2020 中国精品科技期刊 OUTSTANDING S&T JOURNALS OF CHINA

2022中国高校百佳科技期刊

ISSN 1001-5965
CN 11-2625/V

北京航空航天大學学报

JOURNAL OF BEIJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS

http://bhxb.buaa.edu.cn

2022-12
Vol.48 No.12

北京航空航天大学学报

第 48 卷　第 12 期　(总第 358 期)　2022 年 12 月

目　　次

基于动态四叉树搜索的民航行李车码放算法 …… 邢志伟，侯翔升，李彪，张涛，文涛 (2345)
基于 MM-GGIW-PMBM 滤波的扩展目标跟踪算法 … 吴孙勇，周于松，谢芸，蔡如华，樊向婷 (2356)
机场到港旅客换乘时间效率评价指标优选 …… 罗谦，李琦，文涛，陈丰华，朱萍 (2365)
丝束同轴冷阴极电子束熔丝特性及 TC4 成形组织 ……
…… 许海鹰，杨光，张伟，杨波，桑兴华，王壮 (2373)
嵌入注意力机制的多尺度深度可分离表情识别 …… 宋玉琴，高师杰，曾贺东，熊高强 (2381)
复合材料层板低速倾斜冲击损伤分析 …… 张超，刘建春，方鑫 (2388)
航空铝试块疲劳裂纹相控阵超声成像检测 …… 彭朝勇，胥松柏，杜创洲，张杰 (2398)
红外低轨星座突发任务多重策略调度方法 …… 张晟宇，朱振才，胡海鹰 (2405)
一种方形腔体的目标散射特性及测量方法 …… 赵京城，娄长玉，李家碧，杨宗凯 (2415)
基于云模型的民航监察员队伍能力综合评价 …… 李敬强，樊天辰，周妍汝，房秋 (2425)
预浸料贮存时间对 MT700/603 复合材料力学性能的影响 ……
…… 王荣，于雅琳，王乐辰，莫申忠，黄玉清，周翔 (2434)
miniSAR 卫星精密参考轨道设计 …… 廖祥，郑靖，许永生，谢成清，丁强强 (2442)
基于图卷积网络的卷积神经网络耗时预测算法 ……
…… 李哲暘，张如意，谭文明，任烨，雷鸣，吴昊 (2450)
湿热环境中含脱层复合材料层合板的界面裂纹扩展 …… 夏飞，薛江红，何赞航，全福松 (2460)
基于 PCA-HicksHenne 方法的几何不确定性稳健优化设计 …… 张威，王强，路嘉晨，阎超 (2473)
Tanabe 模型和 Smith 热调节模型结合预测皮温效果分析 ……
…… 王涛，张万欣，李猛，卜雪琴，张宸，王海亮 (2482)
开裂式阻力方向舵流固耦合机理分析 …… 李永昌，戴玉婷，杨超 (2494)
可变后掠翼联动驱动机构设计与尺寸综合 … 都显琛，刘学翱，董洋，王辉，何天宇，王春洁 (2502)
面向控制的仿鸽扑翼机纵向动力学建模与分析 …… 彭程，孙立国，王衍洋，谭文倩，肖峰 (2510)
环肋翅片管相变传热特性及分形优化 …… 王玮琦，邢玉明，郑文远，郝兆龙 (2520)
基于 PCC-LSTM 模型的短期负荷预测方法 … 刘倩倩，刘钰山，温烨婷，何杰，李晓，毕大强 (2529)
基于特征融合与抗遮挡的卫星视频目标跟踪方法 ……
…… 刘耀胜，廖育荣，林存宝，李兆铭，杨新岩 (2537)
机载 PLC 信道传递函数建模与概率保证分析 …… 戚佳艺，李峭，熊华钢，严若文 (2548)
基于 ELMo-GCN 的核电领域命名实体识别 …… 荆鑫，王华峰，刘潜峰，罗嗣梧，张凡 (2556)
一种新的基于信号导频的射频指纹识别方法 …… 曾盛，朱丰超，杨剑 (2566)
地月空间的远距离逆行轨道族及其分岔研究 …… 陈冠华，杨驰航，张晨，张皓 (2576)

2022 年第 48 卷总目次

期刊基本参数：CN 11-2625/V * 1956 * m * A4 * 244 * zh * P * ￥50.00 * 400 * 26 * 2022-12

第 48 卷终

(**编　辑**　张　嵘　孙　芳　卞欢欢　王　茜　李亚泰　李艳霞　苏　磊)

http://bhxb.buaa.edu.cn

JOURNAL OF BEIJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS

Vol. 48 No. 12 (Sum 358) December 2022

CONTENTS

Civil aviation luggage cart stacking algorithm based on dynamic quadtree search
…… XING Zhiwei, HOU Xiangkai, LI Biao, ZHANG Tao, WEN Tao (2345)
Extended target tracking algorithm based on MM-GGIW-PMBM filter
…… WU Sunyong, ZHOU Yusong, XIE Yun, CAI Ruhua, FAN Xiangting (2356)
Optimization of transfer time efficiency evaluation index for airport arriving passengers
…… LUO Qian, LI Qi, WEN Tao, CHEN Fenghua, ZHU Ping (2365)
Properties of gas discharge electron beam coaxial wire-fuse additive manufacturing and microstructure of TC4 titanium alloy
…… XU Haiying, YANG Guang, ZHANG Wei, YANG Bo, SANG Xinghua, WANG Zhuang (2373)
Multi-scale depthwise separable convolution facial expression recognition embedded in attention mechanism
…… SONG Yuqin, GAO Shijie, ZENG Hedong, XIONG Gaoqiang (2381)
Damage analysis in composite laminates under low velocity oblique impact
…… ZHANG Chao, LIU Jianchun, FANG Xin (2388)
Ultrasonic phased array imaging on aviation aluminum block fatigue crack
…… PENG Chaoyong, XU Songbai, DU Chuangzhou, ZHANG Jie (2398)
Burst tasks scheduling method for infrared LEO constellation based on multi-strategies
…… ZHANG Shengyu, ZHU Zhencai, HU Haiying (2405)
Scattering characteristics and measurement method of a square cavity
…… ZHAO Jingcheng, LOU Changyu, LI Jiabi, YANG Zongkai (2415)
Comprehensive evaluation on capability of civil aviation supervisor team based on cloud model
…… LI Jingqiang, FAN Tianchen, ZHOU Yanru, FANG Qiu (2425)
Effects of prepreg ambient-temperature storage life on mechanical properties of MT700/603 composites
…… WANG Rong, YU Yalin, WANG Lechen, MO Shenzhong, HUANG Yuqing, ZHOU Xiang (2434)
Precise references orbit design of miniSAR satellite
…… LIAO Xiang, ZHENG Jing, XU Yongsheng, XIE Chengqing, DING Qiangqiang (2442)
A graph convolution network based latency prediction algorithm for convolution neural network
…… LI Zheyang, ZHANG Ruyi, TAN Wenming, REN Ye, LEI Ming, WU Hao (2450)
Interfacial crack growth of delaminated composite laminates under hygrothermal environment
…… XIA Fei, XUE Jianghong, HE Zanhang, JIN Fusong (2460)
Robust optimization design under geometric uncertainty based on PCA-HicksHenne method
…… ZHANG Wei, WANG Qiang, LU Jiachen, YAN Chao (2473)
Performance analysis of skin temperature prediction model combining Smith's thermoregulation model with Tanabe model
…… WANG Tao, ZHANG Wanxin, LI Meng, BU Xueqin, ZHANG Chen, WANG Hailiang (2482)
Fluid and structure coupling analysis of split drag rudder
…… LI Yongchang, DAI Yuting, YANG Chao (2494)
Design and dimensional synthesis of a variable wing sweep mechanism
…… DU Xianchen, LIU Xue'ao, DONG Yang, WANG Hui, HE Tianyu, WANG Chunjie (2502)
Control oriented longitudinal modeling and analysis of pigeon-like flapping-wing aircraft
…… PENG Cheng, SUN Liguo, WANG Yanyang, TAN Wenqian, XIAO Feng (2510)
Phase change heat transfer characteristics and fractal optimization of radial plate fin tube
…… WANG Weiqi, XING Yuming, ZHENG Wenyuan, HAO Zhaolong (2520)
Short-term load forecasting method based on PCC-LSTM model
…… LIU Qianqian, LIU Yushan, WEN Yeting, HE Jie, LI Xiao, BI Daqiang (2529)
Feature-fusion and anti-occlusion based target tracking method for satellite videos
…… LIU Yaosheng, LIAO Yurong, LIN Cunbao, LI Zhaoming, YANG Xinyan (2537)
Airborne PLC channel modeling by transfer function and its probabilistic guarantee analysis
…… QI Jiayi, LI Qiao, XIONG Huagang, YAN Ruowen (2548)
Named entity recognition in nuclear power field based on ELMo-GCN
…… JING Xin, WANG Huafeng, LIU Qianfeng, LUO Siwu, ZHANG Fan (2556)
A new RF fingerprint identification method based on preamble of signal
…… ZENG Sheng, ZHU Fengchao, YANG Jian (2566)
Distant retrograde orbits and its bifurcations in Earth-Moon system
…… CHEN Guanhua, YANG Chihang, ZHANG Chen, ZHANG Hao (2576)

The End of Volume 48

http://bhxb.buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0144

基于动态四叉树搜索的民航行李车码放算法

邢志伟[1,2,*], 侯翔开[1], 李彪[1], 张涛[3], 文涛[3]

(1. 中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300; 2. 中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300;
3. 中国民用航空局第二研究所工程技术研究中心, 成都 610041)

摘 要: 民航行李智能化码放是未来行李处理的重要发展方向。为解决当前运输过程中劳动密集、效率低下等问题,提出了基于动态四叉树搜索的民航行李车码放算法。基于行李构型沿竖直方向动态规划组合成复合层,针对根节点空码放方案构造四叉树,设计动态最低利用率公式,在四叉树的每层生成复合层,4 个分支为 4 种复合层放入后的新码放方案。设计了一种优化剩余空间的动态选择算法,在每层选择并保留 n 个最优码放方案继续搜索,当无法生成新码放方案时算法结束,取搜索过程中填充率最高者为最终码放方案。在现实算例的测试中,码放方案的平均空间利用率为 91.63%,相对于选取的同类算法提升了 16.83%,且算法稳定性更强,可多行李一次装载,并使用现实机械手码放平台验证码放结果。

关 键 词: 航空运输; 行李码放; 民航行李车; 乙维布局; 四叉树算法; 剩余空间优化
中图分类号: V219; TP311
文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2022)12-2345-11

航空行李装卸与运输是机场运行保障的重要环节之一。目前,中国机场行李码放装卸仍以人工作业为主,存在效率低、空间浪费大等问题;少数大型机场高价购买国外行李码放系统,每年维护费用高昂。因此,民航行李码放的智能化与自主化将是中国民航行李处理的发展趋势。而行李系统的核心问题是其内部嵌入的码放算法。

民航行李车码放算法的本质某种程度来说可视为三维装箱算法,是典型的 NP-hard 问题,此类问题在 Dyckhoff[1] 与 Wäscher[2] 等的关于切割和布局问题的综述中有详细的论述。在 Bortfeldt 和 Wäscher[3] 更详细的分类中,行李车码放算法可被具体分入 SKP(single knapsack problem)问题。Fanslau 和 Bortfeldt[4] 将其按解决方法类型分为 3 类:①经典启发式方法。具有代表性的为 George 和 Robinson[5] 首次提出的砌墙算法及 Crainic 等[6] 提出的“关键点”算法。此类算法运算简单、速度快,但空间利用率不够理想,缺乏对稳定性的考虑,属于早期算法,是之后绝大多数算法的基础。②元启发式算法。将模拟退火算法、遗传算法等融入启发式算法得以形成。文献[7-9]中利用模拟退火算法通过不断跳出局部最优改善码放方案;文献[10-13]利用遗传算法找到组合最优解,其中,文献[13]的在线装箱算法更有利于解决现实问题;文献[14]运用了禁忌搜索算法;文献[15]运用了萤火虫算法。此类算法结果利用率高,但往往迭代次数多,运算速度慢。③树搜索算法。文献[4,16-20]是基于树搜索的三维装箱问题求解算法,以树搜索的思想选择不同阶段的码放方案。此类算法计算速度快、空间利用率高,但容易在搜索过程中因选择条件单一产生局部最优。

收稿日期: 2021-03-25; **录用日期**: 2021-09-05; **网络出版时间**: 2021-09-16 09:13
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210915.1651.005.html
基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1601200); 四川省科技计划(2019JDTD0001)
* **通信作者**. E-mail: cauc_xzw@163.com

引用格式: 邢志伟, 侯翔开, 李彪, 等. 基于动态四叉树搜索的民航行李车码放算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2345-2355. XING Z W, HOU X K, LI B, et al. Civil aviation luggage cart stacking algorithm based on dynamic quadtree search [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2345-2355(in Chinese).

http://bhxb.buaa.edu.cn

部分学者从现实应用的角度设计了相应的算法。例如,文献[21]对施加方向约束的大型集装箱装载问题开展了研究,算法更侧重于集重类货物装载;文献[22]专注于解决物流中的打包问题;文献[23]为港口集装箱优化了配载方案。可见,即使是针对现实约束的三维装箱算法,也大都集中于各类集装箱或大型车辆的装载,缺乏面向航空空间约束的民航行李运输研究。

因此,本文提出了一种以民航行李车装载为背景,结合四叉树搜索、动态规划与动态选择算法的民航行李车码放算法,并通过实际行李构型数据和同类算法的对比验证了算法的实用性。

1 问题描述

1.1 数学模型

如图1所示,民航行李车的长、宽、高分别为L、W、H,体积为V。以民航行李车右后下点为原点,底面为xy平面,垂直底面向上方向为z轴建立坐标系。行李的长、宽、高分别为l、w、h,其体积为v,如图2所示。(x_i,y_i,z_i)、(x_i',y_i',z_i')为行李i右后下、左前上坐标。给定行李车和一批待装入行李$B=\{\boldsymbol{b}_1,\boldsymbol{b}_2,\cdots,\boldsymbol{b}_n\}$,$\eta_i$为判断行李是否装入的决策变量,若行李$i$已装入行李车,则$\eta_i=1$。装载要求为:在满足实际约束的情况下,得到使行李车空间利用率最大的码放方案。据此,目标函数如下:

$$U=\max\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}\eta_i v_i}{V}\right)\qquad i=1,2,\cdots,n \tag{1}$$



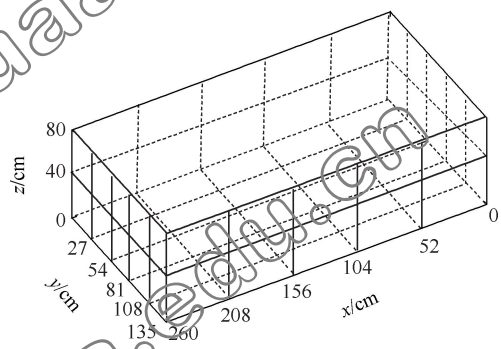


图1 民航行李车示意图

Fig. 1 Schematic diagram of luggage cart for civil aviation

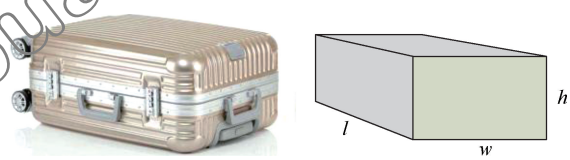


图2 行李摆放姿态

Fig. 2 Luggage placement

1.2 假设条件

基于航空行李的实际装载过程提出如下假设:

1)形状均为长方体。

2)在最大承重范围内可接受多层装载。

3)不考虑装载过程中出现的挤压变形。

4)密度均匀,重心位于其几何中心。

1.3 约束条件处理

航空行李装载有其自身独特的特点,如民航旅客行李平均价值高、对运输损失的容忍度低、装卸速度关系着旅客值机时间等。这些特点决定了行李装载独特的空间约束。因此,针对民航行李车码放问题,可以定义为:在行李集合中选出一个子集码放入行李车中,使行李车空间利用率最大,并满足以下约束条件:

1)边界约束。码放在行李车中的所有行李都必须完全包含在行李车内,即

$$\begin{cases}x_i'\leqslant L\\ y_i'\leqslant W\\ z_i'\leqslant H\end{cases}\qquad i=1,2,\cdots,n \tag{2}$$

2)不重叠约束。所有行李不得与其他行李存在重叠的部分,即

$$x_j'<x_i\ \vee\ x_j>x_i' \tag{3a}$$

或

$$y_j'<y_i\ \vee\ y_j>y_i' \tag{3b}$$

或

$$z_j'<z_i\ \vee\ z_j>z_i' \tag{3c}$$

式中:"∨"代表"或"或者并集。

3)方向性约束。所有行李只可以以最短边为垂直高度码放,即

$$z_i'-z_i=h_i\qquad i=1,2,\cdots,n \tag{4}$$

4)稳定性约束。码放的行李受到其他行李顶面或行李车底部完全支撑,即当行李i放置于行李j之上时满足:

$$\begin{cases}x_i\geqslant x_j\ \wedge\ x_i'\leqslant x_j'\\ y_i\geqslant y_j\ \wedge\ y_i'\leqslant y_j'\end{cases} \tag{5}$$

式中:"∧"代表"且"或者交集。

5)完全切割约束。码放后形成的码放块可

http://bhxb.buaa.edu.cn

以通过多个竖直的平面分割成多个竖层,每个竖层可以通过多个水平的平面分割为最终的行李。所有用于分割的竖直平面与水平平面不能与对应的码放块中的行李相交,即

$$\begin{cases} x_j < x_i < x_j' \\ x_j < x_i' < x_j' \\ y_j < y_i < y_j' \\ y_j < y_i' < y_j' \end{cases} \tag{6}$$

不存在。

2　动态四叉树搜索码放算法

2.1　算法原理

算法以四叉树为基本框架,在每层设计固定数量节点以提高搜索速度。算法码放界限为民航行李车 $\boldsymbol{C}$,其包含行李车的三维属性为长、宽、高,$\boldsymbol{C} = (L, W, H)$。

算法搜索过程中的节点对应码放方案 **con**,每层 n 个。**con** 中包含剩余空间 $\boldsymbol{F}$、剩余复合条集合 S、所用复合层 P 等,**con** $= (\boldsymbol{F}, S, P)$。剩余空间 $\boldsymbol{F}$ 是在码放过程中对 $\boldsymbol{C}$ 完成码放后的剩余空间,尺寸为 x_free、y_free,$\boldsymbol{F} = (x_\text{free}, y_\text{free})$。四叉树的顶点对应的码放方案状态为尚未开始码放。码放方案集合表示动态四叉树中所有继续搜索的节点,$\text{CON} = \{\textbf{con}_1, \textbf{con}_2, \cdots, \textbf{con}_n\}$。

以四叉树顶点即空码放方案为起始开始搜索,在码放方案中添加一个复合层 $\boldsymbol{p}_i$ 生成新码放方案。$\boldsymbol{p}_i$ 是通过将复合条 $\boldsymbol{s}_j$ 以相同的姿态沿 x 轴或 y 轴码放生成的。$\boldsymbol{p}_i$ 的 x、y 方向尺寸为其底面的最小外包矩形对应尺寸,高度为 H。复合条 $\boldsymbol{s}_j$ 是将多个行李 $\boldsymbol{b}$ 以动态规划的算法沿 z 轴码放得到的行李组合,如图 3 所示。定义 $\boldsymbol{s}_j$ 尺寸为其最小外包长方体尺寸,高度为 H。$\boldsymbol{s}_j = (Q, l_s_j, w_s_j)$。其中,$Q$ 为包含 $\boldsymbol{b}$ 的集合,l_s_j 为 $\boldsymbol{s}_j$ 的长,w_s_j 为 $\boldsymbol{s}_j$ 的宽。行李 $\boldsymbol{b}_i$ 包含行李的三维属性长、宽、高,$\boldsymbol{b}_i = (l_i, w_i, h_i)$ 为码放算法中的最小单元。

生成的 $\boldsymbol{s}_j$ 以填充率 fr_s_j 作为筛选的标准。fr_s_j 为 $\boldsymbol{s}_j$ 内行李实际体积与定义体积的比值,计算公式如下:

$$\text{fr}_s_j = \frac{v_s}{l_s_j \cdot w_s_j \cdot H} \tag{7}$$

式中:v_s 为复合条内行李的体积。

以所有行李生成复合条集合 $S = \{\boldsymbol{s}_1, \boldsymbol{s}_2, \cdots, \boldsymbol{s}_n\}$,并通过动态规划算法组合 $\boldsymbol{s}_j$ 生成 $\boldsymbol{p}_i$。定义 d 为复合层的形状变量,代表不同复合层形状,$d = 1, 2, 3, 4$,如图 4 所示。$\boldsymbol{p}_i = (K, \text{xl}_p_i, \text{yl}_p_i, d)$,其中,$K$ 为包含的复合条集合,xl_p_i 为 $\boldsymbol{p}_i$ 在 x 轴方向长度,yl_p_i 为 $\boldsymbol{p}_i$ 在 y 轴方向长度。复合层集合 $P = \{\boldsymbol{p}_1, \boldsymbol{p}_2, \cdots, \boldsymbol{p}_n\}$ 代表码放方案中的已码放结果。

复合层填充率 fr_p_i 是算法搜索过程中选择新码放方案的标准之一,是 $\boldsymbol{p}_i$ 内行李的实际体积与定义体积的比值,计算公式如下:

$$\text{fr}_p_i = \frac{\sum_{\boldsymbol{b} \in K} v_{\boldsymbol{b}}}{\text{xl}_p_i \cdot \text{yl}_p_i \cdot H} \tag{8}$$

式中:$v_{\boldsymbol{b}}$ 为 $\boldsymbol{b}$ 的体积。

将 $\boldsymbol{p}_i$ 放入 **con** 即得到待选码放方案 $\boldsymbol{r}$。$\boldsymbol{r}$ 与 **con** 结构相同,包含剩余空间、剩余复合条集合、所用复合层等,$\boldsymbol{r} = (\boldsymbol{F}, S, P)$。**con** 添加的复合层有 4 种,故 $\boldsymbol{r}$ 有 $4n$ 个。在算法的搜索选择过程中,$\boldsymbol{r}$ 成为新一代码放方案或被舍弃。

同一深度的 **con** 生成的所有 $\boldsymbol{r}$ 放入待选码放方案集合 $R = \{\boldsymbol{r}_1, \boldsymbol{r}_2, \cdots, \boldsymbol{r}_{4n}\}$ 中等待动态选择算法进行遍历选择,选出 n 个作为新一代码放方案。

如此迭代直至某个 **con** 在算法的迭代过程中无法继续添加复合层或所有行李码放完成,将此码放方案称为最终码放方案,将其放入最终码放方案集合 FINCON 中。

在算法开始搜索前会将 S 中底面积最小的一部分复合条先取出搁置,组成小型复合条集合 S_1,占比为整体的 25%。当 **con** 中已码放的复合层占据空间超过 $\boldsymbol{C}$ 的一半时,将放入 S 中参与迭代,使用“填缝”的思想提升空间利用率。

当算法中不存在可继续搜索的码放方案时,算法结束。取 $\text{FINCON} = \{\textbf{con}_1, \textbf{con}_2, \cdots, \textbf{con}_k\}$ 中空间利用率最高者为算法的最终输出结果。

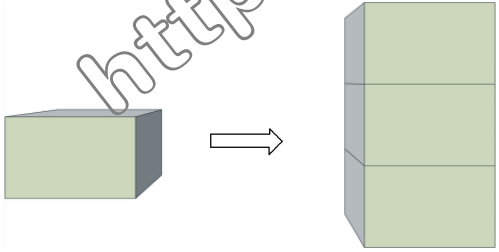


图 3　复合条生成示意图

Fig. 3　Schematic diagram of compound bar generation

2.2　算法流程

本文算法先将所有行李以动态规划的算法沿 z 轴组合成 $\boldsymbol{s}$ 放入 S 中。然后,基于剩余空间生成 4 种复合层,并构造四叉树,如图 5 所示,根节点为尚未开始码放的初始码放方案。根据设计的动态选择算法对四叉树迭代搜索得到最终码放方

http://bhxb.buaa.edu.cn

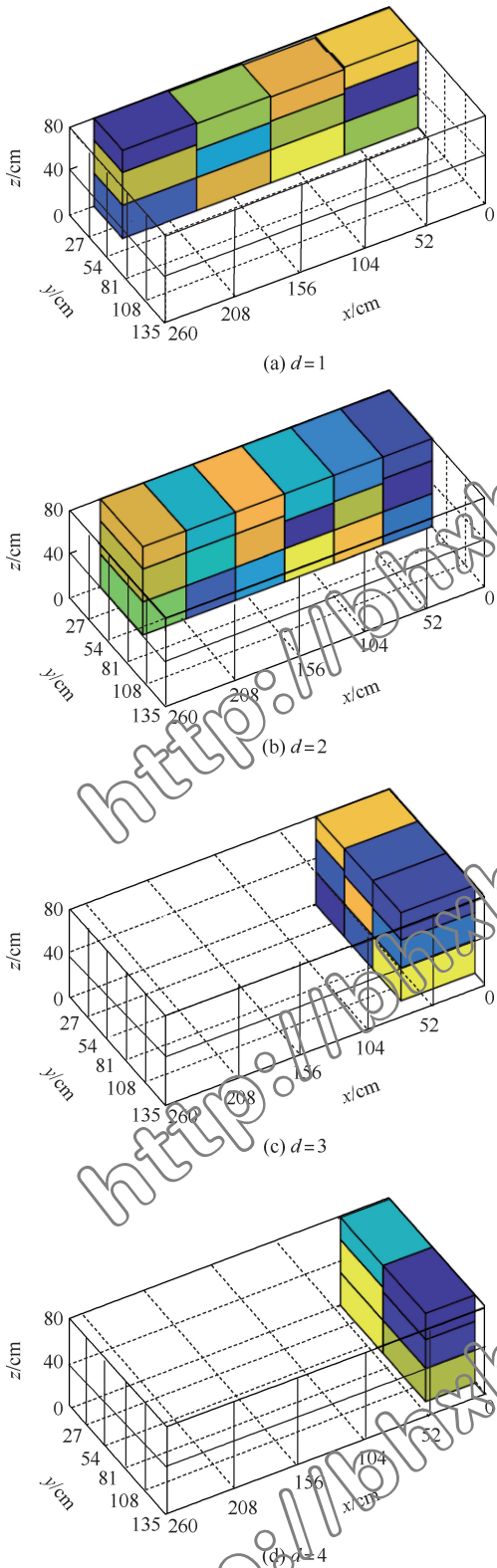


图4 四种复合层示意图

Fig. 4 Schematic diagram of four types of composite layers

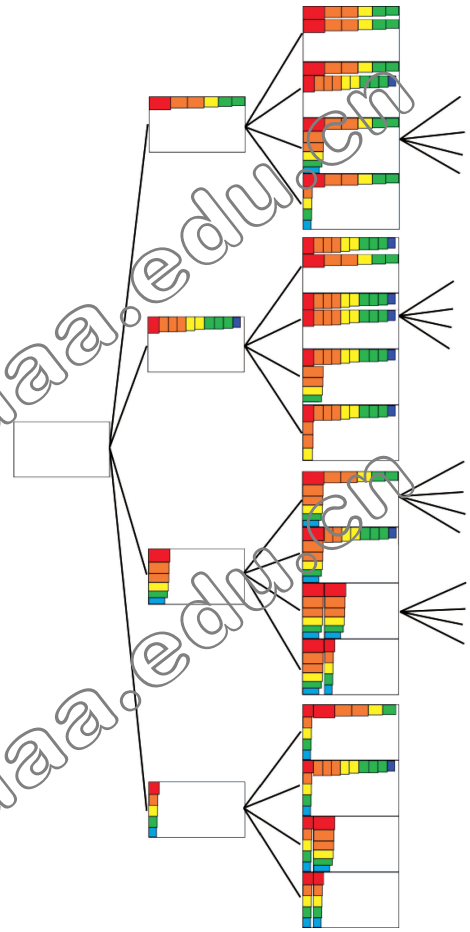


图5 四叉树搜索

Fig. 5 Quadtree search

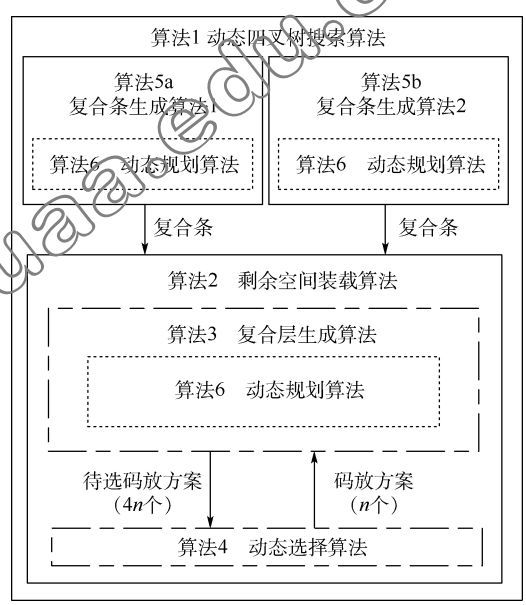


图6 算法嵌套图

Fig. 6 Nesting diagram of algorithm

案。整个算法实现流程如图6所示,以下介绍内嵌算法。

算法1 动态四叉树搜索(dynamic quadtree search,DQS)算法。

算法为复合条生成和剩余空间装载,得到最终码放方案。

步骤1 生成空的 S、S_1、CON、R、FINCON。

步骤2 调用复合条生成算法(算法5a和5b),生成复合条并放入 S 中,取出其中底面积最小的前25%放入 S_1。

步骤3 调用剩余空间装载算法(算法2),

http://bhxb.buaa.edu.cn

得到 FINCON。

步骤 4　在 FINCON 中选取空间利用率最大的码放方案,算法结束。

算法 2　剩余空间装载(loadspace)算法。

算法为迭代算法,最终得到 FINCON。该算法在码放后期利用 S_1“填缝”更好地填充了剩余空间,如图 7 所示。

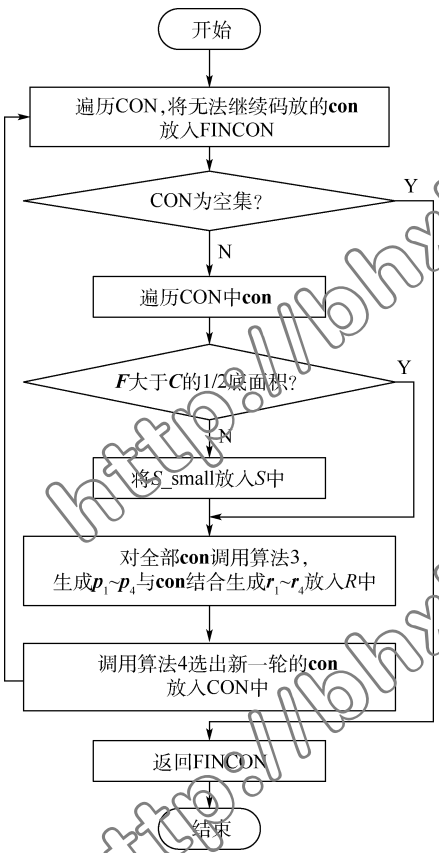


图 7　算法 2 流程

Fig. 7　Flow chart of algorithm 2

算法 3　复合层生成算法。

根据不同码放方案中剩余空间与剩余复合条集合的各项参数重新设定动态的最低空间利用率,提升整体利用率,保证运输过程的稳定性(见图 8)。公式具体如下(以沿 x 轴码放为例):

$$\mathrm{fr} = \mathrm{fr}_0 - 0.1^{\frac{100\delta m}{\bar{l}\cdot x_\mathrm{free}}+1} \tag{9}$$

式中:fr 为复合层的动态最低空间利用率;fr_0 为复合层最低空间利用率上限;δ 为剩余复合条长度标准差;m 为剩余复合条数目;$\bar{l}$ 为剩余复合条长度平均值;x_free 为剩余空间沿 x 轴方向的长度。

算法 4　动态选择算法。

如图 9 所示,设计了一种基于剩余空间和剩余复合条集合双重因子影响的动态选择算法,并在每层选出 n 个继续搜索的码放方案。算法中存在 2 个计算值,即实际浪费体积 v_{act} 和潜在浪费体积 v_{hide}(见图 10)。

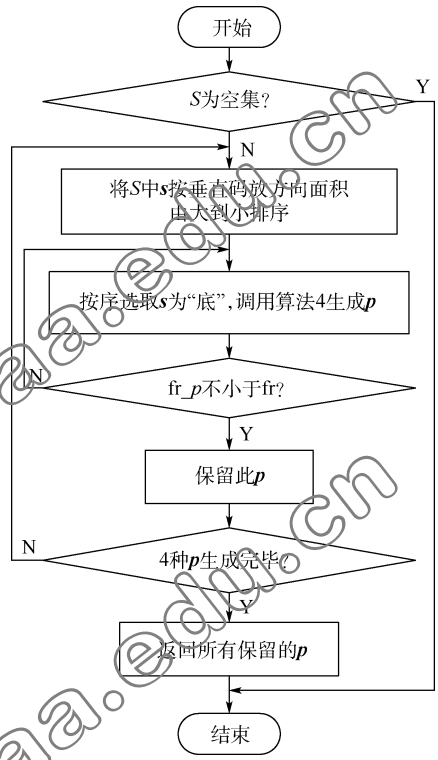


图 8　算法 3 流程

Fig. 8　Flow chart of algorithm 3

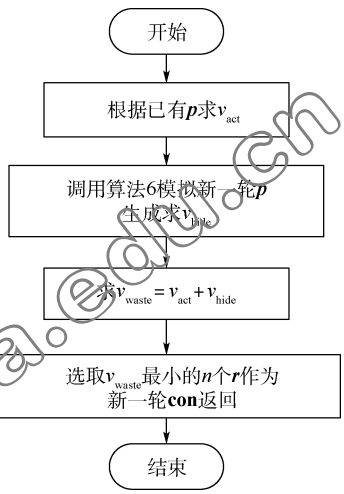


图 9　算法 4 流程

Fig. 9　Flow chart of algorithm 4

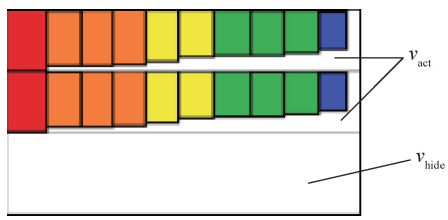


图 10　两种浪费体积示意图

Fig. 10　Schematic diagram of two waste volumes

v_{act} 为 $\boldsymbol{r}$ 中没能完全利用的空间体积之和,即定义体积与实际体积之差。

$$v_{\mathrm{act}} = \sum_{i=1}^{k} (\mathrm{xl}_p_i \cdot \mathrm{yl}_p_i \cdot H)(1 - \mathrm{fr}_p_i) \tag{10}$$

http://bhxb.buaa.edu.cn

v_{hide}为 $\boldsymbol{r}$ 中 $\boldsymbol{F}$ 与 S 匹配度不足而产生的潜在浪费空间,虽在当层的 $\boldsymbol{r}$ 中表现不直观,却深刻影响着整体利用率的高低。

计算方式如下:对 $\boldsymbol{r}$ 模拟新一轮的复合层生成,选取生成的 4 种复合层中实际浪费体积最小者作为潜在浪费体积。

最终选择 v_{act}与 v_{hide}之和 v_{waste}最小的 n 个 $\boldsymbol{r}$ 作为新一轮四叉树搜索的 **con**。

算法 5 复合条生成算法。

算法包括算法 5a 和算法 5b。

算法 5a 设定的复合条最低利用率略高于算法 5b,将不满足算法 5a 行李放入算法 5b 重新生成 $\boldsymbol{s}$。目的为生成更多的 $\boldsymbol{s}$ 以在搜索过程中增添更多组合,如图 11 所示。实验证明,同时使用算法 5a 和算法 5b 比单一使用算法 5a 效果更好。

复合条生成算法 2 与算法 5a 流程相同,使用 free_B 代替 B 为总的行李集合。

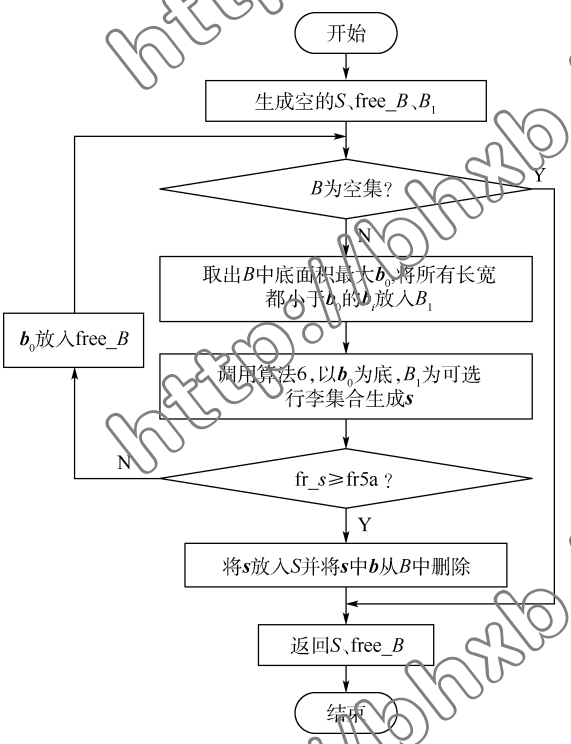


图 11 算法 5a 流程

Fig. 11 Flow chart of algorithm 5a

算法 6 动态规划算法。

利用动态规划算法解决一维背包问题的原理,在生成复合条时将 $\boldsymbol{b}_0$ 以上行李体积视为物品价值,高度视为物品质量,将高度 H 视为背包容量。用于复合层生成时与此同理,不再赘述。

3 计算实验

动态四叉树搜索算法实现了最终码放方案可视化,并使用 ABB 公司 IRB6700 型号机械手实现现实环境验证。算例验证数据选取原则如下:行李车数据选取国内民航机场常规行李车尺寸,为 260 cm × 135 cm × 80 cm;参照国内单航班行李处理情况,确定同一航班下 70 个不同尺寸的行李箱为码放方案输入,各尺寸所占比例的设定依据为国内某枢纽机场自动行李托运设备信息采集系统导出的历史尺寸数据统计分布。其中,行李箱尺寸型号判定依据为其三边之和(如 24 寸行李箱定义为三边之和不超过 136 cm,将三边之和范围在 128 ~ 136 cm 之间的行李箱划分为 24 寸行李箱,1 寸 = 0.033 m),具体划分比例如表 1 所示,行李数量及各尺寸型号所占比例能够在某种程度上代表机场行李车码放输入的常态。由于存在同尺寸行李箱的三边长度也并不完全一致的情况,表 1 给出的是各行李箱尺寸范围。考虑到现实码放环境中存在做工误差、检测误差及行李膨胀等影响行李箱尺寸的因素,因此,为行李箱尺寸添加随机数以反映以上因素对行李箱尺寸的影响。重复 30 次实验以验证本文算法稳定性。随机数区间如下:长度为[-1,1]cm,宽度为[-1,1]cm,高度为[-1,3]cm。

表 1 航空行李实验数据

Table 1 Experimental data of air luggage

行李箱尺寸/寸	长/cm	宽/cm	高/cm	数量	比例/%
22	56 ~ 60	37 ~ 41	23 ~ 24	20	29
24	62 ~ 65	40 ~ 44	26 ~ 27	24	34
26	66 ~ 71	43 ~ 47	28 ~ 29	21	30
28	75 ~ 81	45 ~ 49	28 ~ 29	3	4
32	85 ~ 91	51 ~ 55	30 ~ 32	2	3

3.1 算法对比测试

选取满足同样现实约束的算法对以上测试算例开展比较验证实验,文献[17]的算法可满足同样的严格现实约束,故选取其中的 HOBTS 算法与本文 DQS 算法进行对比。

经多次实验,DQS 算法中各项参数修正后设定如表 2 所示。完成 30 次码放后,DQS 算法和 HOBTS 算法的空间利用率如图 12 所示,其各项

表 2 DQS 算法参数

Table 2 Parameters in DQS algorithm

参数	说明	数值
fr5a/%	算法 5a 中复合条最低空间利用率	97
fr5b/%	算法 5b 中复合条最低空间利用率	93
fr_0/%	复合层最低空间利用率上限	90
n	保留码放方案数目(当 $n \geqslant 4$ 时结果开始不再变化)	4

http://bhxb.buaa.edu.cn

统计参数如表 3 所示,其中 4 次码放方案结果如图 13 所示。

使用 HOBTS 算法完成 30 次标准民航行李车码放后得到的空间利用率如图 12 所示,其各项统计参数如表 4 所示,其中 4 次码放方案结果如图 14所示。

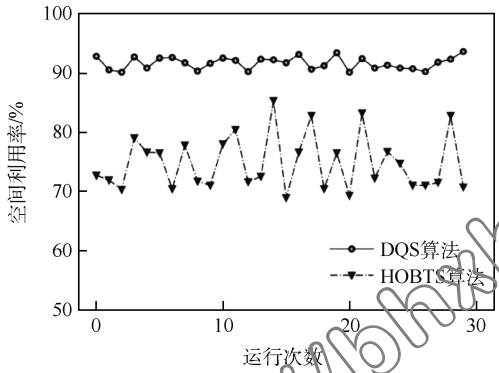


图 12　DQS 算法与 HOBTS 算法结果对比

Fig. 12　Comparison of results between DQS and HOBTS algorithms

表 3　DQS 算法 30 次运算结果

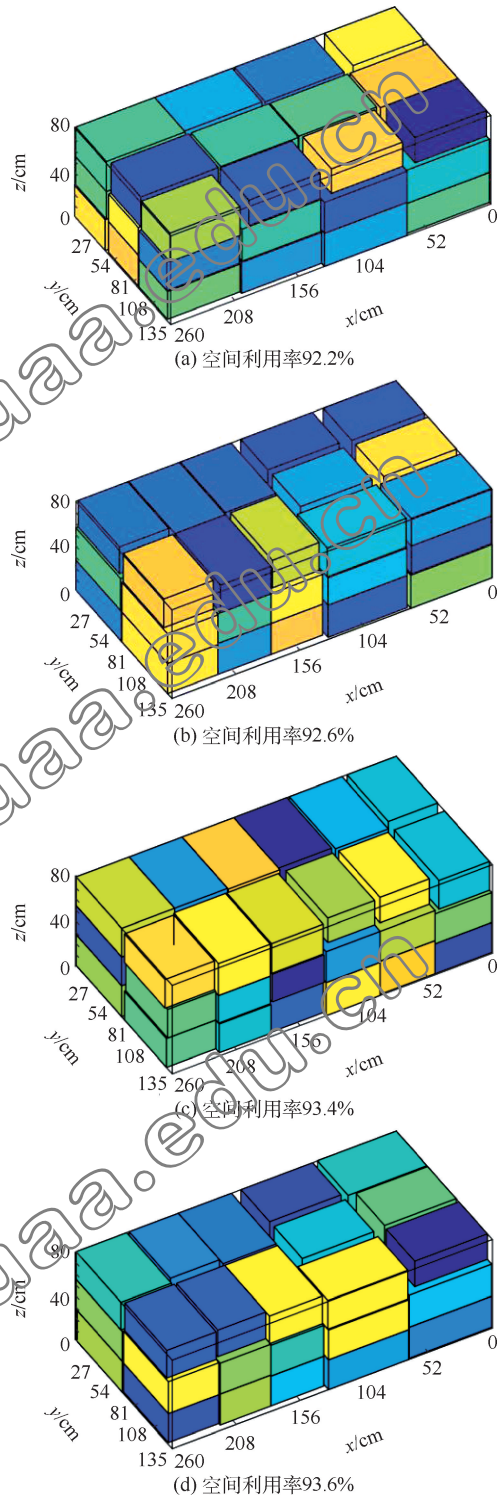
Table 3　30 operation results in DQS algorithm

统计参数	空间利用率/%
最小值	90.1
第一四分位数	90.7
中位数	91.7
第三四分位数	92.5
最大值	93.6
平均值	91.63

注:标准差为 0.010 557。

3.2　算法对比分析

结合图 12 与表 3、表 4 对比分析可知,DQS 算法在本文算例中生成的码放结果平均空间利用率为 91.63%,高出 HOBTS 算法 16.83%,相比于目前仅 50% 空间利用率的人工码放方案也表现出了足够的优秀性。比人工码放高的空间利用率是机场行李码放自动化与智能化的保障,利用率越高,处理相同数目的行李箱时使用的行李车数量越少,为机场节省更多的行李车资源,提升机场资源利用率和效益。在算法稳定性的表现上,从四分位数来看 DQS 算法的实验结果更为集中,因随机数添加所导致的结果波动更小,0.010 557 的利用率标准差低于 HOBTS 算法的 0.046 709,算法稳定性更好。现实码放往往存在多种扰动使得算法无法发挥出应有的性能,优秀的算法稳定性可以使算法更好地适应复杂的现实码放环境,从而降低扰动对算法的负面影响。



(a) 空间利用率92.2%

(b) 空间利用率92.6%

(c) 空间利用率93.4%

(d) 空间利用率93.6%

图 13　DQS 算法码放的 4 个结果

Fig. 13　Four results of DQS algorithm stacking

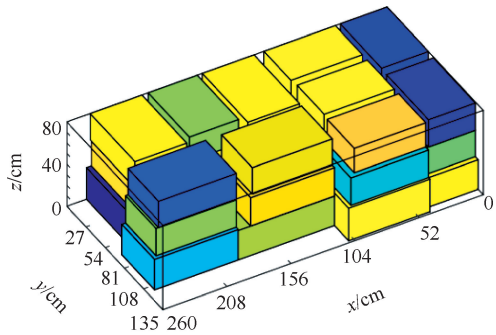
表 4　HOBTS 算法 30 次运算结果

Table 4　30 operations results of HOBTS algorithm

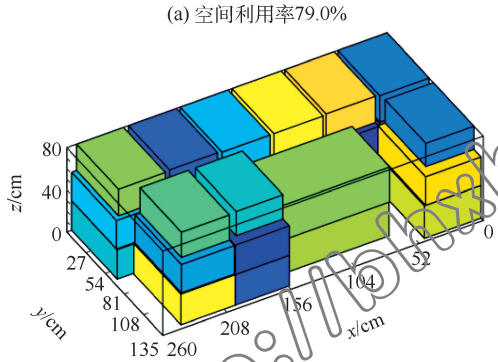
统计参数	空间利用率/%
最小值	68.9
第一四分位数	71.0
中位数	72.6
第三四分位数	77.8
最大值	86.7
平均值	74.8

注:标准差为 0.046 709。

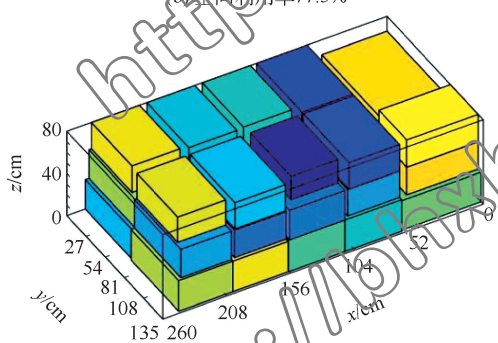
http://bhxb.buaa.edu.cn



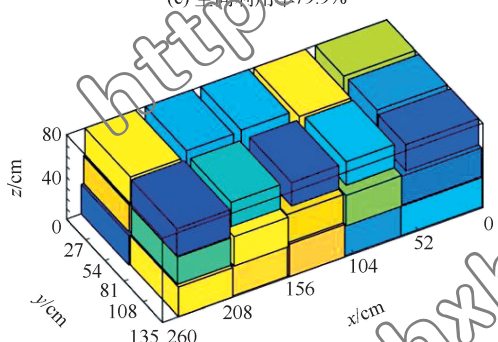
(a) 空间利用率79.0%



(b) 空间利用率77.5%



(c) 空间利用率79.9%



(d) 空间利用率86.7%

图 14 HOBTS 算法码放的 4 个结果

Fig. 14 Four results of HOBTS algorithm stacking

DQS 算法最大的优势在于:有针对性地根据民航行李车的码放环境设计了算法,实现了对剩余空间更大化的利用,优化了树搜索中局部最优的弊端。具体而言,在行李车码放的环境中,单个行李的体积相对于整个行李车占比较大,能够放入行李车的行李较少。因此,剩余空间能否被更有效的利用是决定整体利用率的关键之处。而大多数启发式装箱算法的结果是通过将多个码放序列循环演化后选取最优者而得到的,演化过程往往是以随机改变序列中的值代表的随机性和根据算法中自带的演化公式生成新序列代表的方向性相结合,而演化公式的意义往往与装箱问题无关,并非是根据箱子剩余空间设计的公式,因此演化过程存在一定的盲目性,最终得到的最优解一定程度上是因为产生了足够多不同的序列,得到了较好的结果。而 DQS 码放序列的生成是基于剩余空间的,在码放过程中动态地分析剩余空间,并根据剩余空间与尚未码放的行李箱匹配程度确定了当下的序列内容,每完成一次码放重新分析一次,因此当完成码放后的剩余空间对整体影响较大时,DQS 算法优势明显。以 HOBTS 算法为例,其在三维装箱算法的标准测试集中表现优秀,可以达到 90% 的空间利用率,然而在本文测试中只有 75% 的空间利用率。主要原因在于:标准测试集中箱子体积相对于整个容器较小,一个容器中可装入约 100 个箱子;码放完成后无法继续码放的空间相对较小,剩余空间对整体的空间利用率影响很小。而在行李车的环境中,行李箱体积相对较大,行李车只能装入约 30 个行李箱且只能正放,完成码放后无法继续码放的剩余空间对整体空间利用率的影响极大,即使剩余空间中多码放一组行李也将极大地提高整体利用率。因此,标准测试集中结果与本文测试算例所得结果不具有相比性。

DQS 算法相对于 HOBTS 算法在本文算例中的优势及提升具体值分析如下:

1) 设计了动态选择算法。DQS 算法在码放时,考虑了已码放结果和未码放空间双重因素,既考虑了完成码放部分的空间利用率,还考虑了剩余未码放空间中是否仍能继续保持高利用率码放,从整体的角度选择码放方案。基于此,DQS 算法所得方案剩余空间小于 HOBTS 算法,DQS 方案大多码放复合条为 12 组,而 HOBTS 方案大多为 10、11 组,如图 13、图 14 所示。以算例中最多的 24、26 寸箱子计算可得,动态选择算法可提升7.5% ~18.0% 的空间利用率。

2) 设计了动态的最低空间利用率公式。DQS 算法在复合层的生成中可以根据剩余空间改变最低空间利用率,使得生成的复合层总体空间利用率更高且更均衡,提升空间利用率。DQS 算法中复合层空间利用率平均约为 95%,HOBTS 算法中空间利用率为 91%,可提升约 4%。

将图 13(b)的码放方案在现实环境中码放实验,结果如图 15 所示。可见,在民航行李车中码放行李的表现上,DQS 算法是有效的。

http://bhxb.buaa.edu.cn



图 15　现实码放结果

Fig. 15　Real-world stack result

3.3　多样性数据实验与分析

为进一步验证 DQS 算法的稳定性与实用性,将其应用于更多样化的行李箱数据集合,以异构程度划分,运算结果如表 5 所示。将 DQS 算法应用于三维装箱算法的标准测试集 BR1～BR7,并与其他约束相近算法做对比进一步验证 DQS 算法的适应性,码放结果如表 6 所示。

表 5　多样性数据集运算结果

Table 5　Operation results of diverse dataset

异构等级	行李箱所占比例/%					平均填充率/%
	22 寸	24 寸	26 寸	28 寸	32 寸	
1	100					85.8
		100				93.5
	30				70	84.6
2	50	50				91.2
		50	50			89.7
		20		40	40	84.3
3	33	33	34			92.3
		40	40	20		87.7
	40		10	10	40	89.1
4	25	25	25	25		89.2
	30	10		30	30	85.7
	30	30	30	5	5	91.3
5	20	20	20	20	20	88.8
		10	10	40	40	84.3
	20	40	20	10	10	86.4

注:异构等级越高,行李箱异构性越强,异构性强弱受行李箱种类和占比影响,种类越多,占比越平均,异构性越强。

由表 5 可得,同异构等级下,随着数据集中大尺寸行李箱的加入,平均填充率有所降低,如异构等级 2 数据集中,当 28、32 寸行李占比较大时,填充率显著降低,因此该算法对中小尺寸行李箱(22、24 寸行李箱)的码放更具优势;随着数据集异构性的增强,平均填充率并未降低。而当大型号行李箱的数量较少时,平均填充率反而有所提高,如异构等级 4 的第 3 组平均填充率为91.3%,该数据集大尺寸行李箱较少,平均填充率高于异构等级 1、2、3 中大部分同样大尺寸行李箱较少的数据集。因此,该算法对较强异构的行李集合码放更具优势。经分析原因在于:小尺寸行李箱可被该算法中的“填缝算法”更好的利用,较强异构的行李集合可以生成更多的组合供该算法中“动态选择算法”加以选择,因此,DQS 算法更适合中小尺寸强异构性的行李集合码放。根据多样性数据集实验结果可得,算法的平均填充率保持在 84.3%～93.5%,算法稳定性较好。

DQS 算法在三维装箱标准测试集中与其他算法的结果对比如表 6 所示。箱子种类数分别为 3、5、8、10、12、15、20,异构性由弱到强,其他算法结果均是在满足 C1 与 C2 约束条件下所得,DQS 算法满足 C1、C2、C3 约束。在多出的 C3 与民航行李箱自身只允许正放的严格约束下,DQS 算法表现与其他算法相差不大,甚至在 BR2 测试集的结果中以 95.1% 的填充率高于所有其他算法。然而,由于 DQS 算法的约束更严格,在除 BR2 的其他测试集下结果仍小于大部分其他算法。但随着测试集异构性的增强,差距也在不断缩小,最终在 BR6 中以 92.8% 的填充率超过了 HSA 算法(92.7%),在 BR7 中以 92.2% 的填充率超过了 HAS 算法(92.0%),印证了上文由多样性数据集得出的 DQS 算法对强异构集合更为适应的结论。

由此可见,DQS 算法的优势在于解决强异构性小尺寸的算例,其中对强异构性算例的运算优势使其有较强的实用性,可以满足现实机场行李码放智能化的要求。

表 6　标准测试集 BR1～BR7 运算结果比较

Table 6　Comparison of operation results between standard tests of BR1 – BR7

算法	约束	填充率/%						
		BR1	BR2	BR3	BR4	BR5	BR6	BR7
HSA[9]	C1&C2	93.8	93.9	93.7	93.6	93.2	92.7	92.0
CLTRS[4]	C1&C2	94.5	94.7	94.7	94.4	94.1	93.9	93.2
MLHS[24]	C1&C2	94.5	94.9	95.2	95.0	94.8	94.5	94.0
MLTrS[18]	C1&C2	93.5	93.4	93.8	93.9	93.4	93.7	93.6
DQS	C1&C2&C3	92.5	95.1	93.4	93.0	92.6	92.8	92.2

注:C1 为方向约束,C2 为稳定性约束,C3 为完全切割约束。

http://bhxb.buaa.edu.cn

4 结 论

1）满足了航空行李装载过程中的5个现实约束，提出了一种用于民航行李车码放行李的动态四叉树搜索算法，并通过设计的动态空间利用率和动态选择算法提升了行李车内利用空间，为民航行李高效稳定运输提供了有效的解决办法。

2）采用现实数据算例测试，平均空间利用率可达91.63%，并与其他三维装箱算法比较，证明了所提算法在求解民航行李车码放问题中有一定的优越性。

3）将算法应用于更多样性的数据集与三维装箱标准测试集，结合实验结果证明了其对中小尺寸、强异构行李有更好的适应性。在多组特征不同的数据集下该算法结果仍保持在较小范围，证明了算法有较好的稳定性。

4）实现了最终码放方案的可视化，可直观地观察最终码放方案，为算法的修正提供了素材。

参考文献（References）

[1] DYCKHOFF H, FINKE U. Cutting and packing in production and distribution[M]. Heidelberg: Physica-Verlag, 1992.

[2] WÄSCHER G, HAUNER H, SCHUMANN H. An improved typology of cutting and packing problems[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 183(3): 1109-1130.

[3] BORTFELDT A, WÄSCHER G. Constraints in container loading-A state-of-the-art review[J]. European Journal of Operational Research, 2013, 229(1): 1-20.

[4] FANSLAU T, BORTFELDT A. A tree search algorithm for solving the container loading problem[J]. Informs Journal on Computing, 2010, 22(2): 222-235.

[5] GEORGE J A, ROBINSON D F. A heuristic for packing boxes into a container[J]. Computers & Operations Research, 1980, 7(3): 147-156.

[6] CRAINIC T G, PERBOLI G, TADEI R. TS(2)PACK: A two-level tabu search for the three-dimensional bin packing problem[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 195(3): 744-760.

[7] 张德富，魏丽军，陈青山，等. 三维装箱问题的组合启发式算法[J]. 软件学报，2007，18(9)：2083-2089.
ZHANG D F, WEI L J, CHEN Q S, et al. Combinatorial heuristic algorithm for three-dimensional packing problem[J]. Journal of Software, 2007, 18(9): 2083-2089(in Chinese).

[8] CHEKANIN V A, CHEKANIN A V. Multimethod genetic algorithm for the three-dimensional orthogonal packing problem[J]. Journal of Physics Conference Series, 2019, 1353(11): 012109.

[9] 张德富，彭煜，朱文兴，等. 求解三维装箱问题的混合模拟退火算法[J]. 计算机学报，2009，32(11)：2147-2156.
ZHANG D F, PENG Y, ZHU W X, et al. Hybrid simulated annealing algorithm for solving three dimensional packing problem[J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(11): 2147-2156(in Chinese).

[10] EROZAN I, CALISKAN E. A multi-objective genetic algorithm for a special type of 2D orthogonal packing problems[J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 77(1): 66-81.

[11] FENG X, MOON I, SHIN J. Hybrid genetic algorithms for the three-dimensional multiple container packing problem[J]. Flexible Services and Manufacturing Journal, 2015, 27(2-3): 451-477.

[12] 张钧，贺可太. 求解三维装箱问题的混合遗传模拟退火算法[J]. 计算机工程与应用，2019，55(14)：32-39.
ZHANG J, HE K T. Hybrid genetic simulated annealing algorithm for 3D bin packing problem[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(14): 32-39(in Chinese).

[13] 张长勇，翟一鸣. 基于改进遗传算法的航空集装箱装载问题研究[J]. 北京航空航天大学学报，2021，47(7)：1345-1352.
ZHANG C Y, ZHAI Y M. Research on air container loading problem based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(7): 1345-1352(in Chinese).

[14] KOCH H, SCHILGELL M, BORTFELDT A. A hybrid algorithm for the vehicle routing problem with three-dimensional loading constraints and mixed backhauls[J]. Journal of Scheduling, 2019, 23(4): 71-93.

[15] ZHAO C, JIANG L, TEO K L. A hybrid chaos firefly algorithm for three-dimensional irregular packing problem[J]. Journal of Industrial and Management Optimization, 2017, 13(5): 1-21.

[16] LIU S, WEI T, XUN Z Y, et al. A tree search algorithm for the container loading problem[J]. Computers & Industrial Engineering, 2014, 75: 20-30.

[17] 刘胜，朱风华，吕宜生. 求解三维装箱问题的启发式正交二叉树搜索算法[J]. 计算机学报，2015，38(8)：1530-1543.
LIU S, ZHU F H, LV Y S. Heuristic orthogonal binary tree search algorithm for three-dimensional packing problem[J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(8): 1530-1543(in Chinese).

[18] 刘胜，沈大勇，商秀芹，等. 求解三维装箱问题的多层树搜索算法[J]. 自动化学报，2020，46(6)：1178-1187.
LIU S, SHEN D Y, SHANG X Q, et al. A multi-layer tree search algorithm for 3D packing problem[J]. Acta Automatic Sinica, 2020, 46(6): 1178-1187(in Chinese).

[19] FONTAN F, LIBRALESSO L. An anytime tree search algorithm for two-dimensional two and three-staged guillotine packing problems[J]. Computer Science, 2020, 4(2): 1-20.

[20] PEJIC I, VAN DEN BERG D. Monte Carlo tree search on perfect rectangle packing problem instances[C]// Proceedings of the 2020 Genetic and Evolutionary Computation Conference, 2020: 1697-1703.

[21] TOFFOLOT A M, ESPRIT E, WAUTERS T, et al. A two-dimensional heuristic decomposition approach to a three-dimensional multiple container loading problem[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 257(2): 526-538.

[22] HARRATH Y, BOUOUDINA H E, QASIM A T, et al. Toward smart logistics: A new algorithm for a multi-objective 3D bin packing problem[C]// Smart Cities Symposium, 2018.

[23] 郑斐峰，梅启煌，刘明. 基于遗传算法与贪婪策略的多港口

http://bhxb.buaa.edu.cn

集装箱配载研究[J]. 运筹与管理,2018,27(5):1-7.
ZHENG F F,MEI Q H,LIU M. Research on multiport container stowage based on genetic algorithm and greedy strategy[J]. Operations Research and Management Science,2018,27(5):1-7(in Chinese).
[24] 张德富,彭煜,张丽丽. 求解三维装箱问题的多层启发式搜索算法[J]. 计算机学报,2012,35(12):2553-2561.
ZHANG D F,PENG Y,ZHANG L L. Multilevel heuristic search algorithm for solving three-dimensional packing problem[J]. Chinese Journal of Computers,2012,35(12):2553-2561(in Chinese).

Civil aviation luggage cart stacking algorithm based on dynamic quadtree search

XING Zhiwei[1,2,*], HOU Xiangkai[1], LI Biao[1], ZHANG Tao[3], WEN Tao[3]

(1. College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
3. Engineering Technology Research Center, The Second Research Institute of Civil Aviation Administration of China, Chengdu 610041, China)

Abstract: Intelligent baggage packing is an important trend of future civil aviation baggage processing. To solve the problems of labor intensiveness and inefficiency in the current transportation, a new algorithm based on dynamic quadtree search is proposed. Using the dynamic planning of luggage configuration in the vertical direction, the quadtree is constructed for the empty code placement scheme of the root node. A dynamic minimum utilization formula is proposed to generate a composite layer in each layer of the quadtree. After placing the composite layer, the branches become the new schemes. A dynamic selection algorithm is also designed to optimize the remaining space. *n* optimal code placement schemes are selected and retained at each layer to continue searching. When the new code placement scheme cannot be generated, the algorithm ends, and the final code placement scheme has the highest filling rate among all the schemes. In the test of practical examples, the average space utilization rate of the schemes is 91.63%, 16.83% higher than that of similar algorithms. Moreover, the proposed algorithm is more stable and can load multiple bags one time. The results are verified by using areal manipulator stacking platform.

Keywords: air transportation; luggage stacking; civil aviation luggage cart; 3D layout; quadtree algorithm; optimization of residual space

http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2021-03-25; **Accepted**: 2021-09-05; **Published online**: 2021-09-16 09:13
URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210915.1651.005.html
Foundation items: National Key R & D Program of China (2018YFB1601200); Sichuan Science and Technology Program (2019JDTD0001)
* **Corresponding author**. E-mail: cauc_xzw@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0162

基于 MM-GGIW-PMBM 滤波的扩展目标跟踪算法

吴孙勇[1,2,*], 周于松[1], 谢芸[1], 蔡如华[1], 樊向婷[1]

(1. 桂林电子科技大学 数学与计算科学学院, 桂林 541004; 2. 广西精密导航技术与应用重点实验室, 桂林 541004)

摘 要: 针对多机动扩展目标跟踪问题,将交互式多模型的思想引入泊松多伯努利混合滤波(PMBM)算法中,提出了一种多模型的伽马高斯逆威夏特-泊松多伯努利混合滤波(MM-GGIW-PMBM)算法。该算法融合多种运动模型,通过模型的交互实现对机动扩展目标扩展状态和质心状态的混合估计预测;通过引入强跟踪滤波(STF)中的渐消因子修正预测之后 GGIW 分量中的协方差矩阵,防止发生跟踪模型失配的现象;在 PMBM 更新阶段扩展目标外形和质心估计完成的基础上,利用似然函数完成模型概率的更新。仿真实验结果表明:MM-GGIW-PMBM 算法能够对多机动扩展目标的数量和状态进行有效的估计。

关 键 词: 泊松多伯努利混合滤波; 伽马高斯逆威夏特; 扩展目标跟踪; 强跟踪滤波; 交互式多模型

中图分类号: TN953

文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2022)12-2356-09

多目标跟踪(multiple target tracking, MTT)的目的是从一系列有噪声、带有杂波的测量数据中检测和跟踪目标。在大多数应用(如雷达)中,由于目标和传感器之间的距离较远或者传感器分辨率过低,目标被看作是点目标,每个点目标在每个时间间隔内最多产生一个测量值。然而,随着传感器的分辨率越来越高,目标将占据传感器的多个分辨率单元,使得单个目标在每次扫描时会产生多个量测,从而点目标的模型假设就不再成立,此时则需要将目标模型建模为扩展目标。区别于传统意义上的点目标,扩展目标的演化是递归估计目标外形和运动状态的过程,每个目标在每个时刻可能会产生多个量测,其详细的概述在文献[1]中给出。

在贝叶斯框架下,Mahler[2]将随机有限集(random finite set, RFS)应用于 MTT 问题之中,早期基于 RFS 的 MTT 算法通过逼近后验多目标密度的一阶矩来跟踪目标,如概率假设密度(probability hypothesis density, PHD)滤波器[3-5]和势概率假设密度(cardinality PHD, CPHD)[6-7]滤波器。而近年来基于 RFS 的共轭 MTT 问题引起了广泛的关注,MTT[8]中的共轭性意味着所有的先验和后验概率密度都具有相同的函数形式,即通过共轭先验可以为目标概率密度提供闭式解,理论上保证了最优。

在文献中可以找到 2 种类型的多目标滤波满足共轭先验的性质:广义标签多伯努利滤波(generalized labeled multi-Bernoulli filtering, GLMB)[8-9]

收稿日期: 2021-04-01; **录用日期**: 2021-07-03; **网络出版时间**: 2021-07-30 09:11

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210729.1607.002.html

基金项目: 国家自然科学基金(62263007,62061010,62161007); 中央引导地方科技发展资金项目(2022ZYZX2001); 广西自然科学基金(2019GXNSFBA245072); 广西精密导航技术与应用重点实验室主任基金; 大学生创新训练项目(201910595164); 桂林电子科技大学研究生教育创新计划

* **通信作者**. E-mail: wusunyong121991@163.com

引用格式: *吴孙勇, 周于松, 谢芸, 等. 基于 MM-GGIW-PMBM 滤波的扩展目标跟踪算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2356-2364. WU S Y, ZHOU Y S, XIE Y, et al. Extended target tracking algorithm based on MM-GGIW-PMBM filter[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2356-2364(in Chinese).*

和泊松多伯努利混合滤波(Poisson multi-Bernoulli mixture filtering, PMBM)[10]。相较于 GLMB,PMBM 的滤波精度更高且计算代价更小。PMBM 滤波允许将扩展目标集合划分成 2 个不相交的子集:已检测到的目标集合和还没有被检测到的目标集合。文献[10]提出了一种 GGIW-PMBM 滤波算法,该算法假设目标状态服从伽马高斯逆威夏特(Gamma Gaussian inverse Wishart,GGIW)分布[11],通过单一的运动模型对扩展目标的演化进行建模,然而当该运动模型无法与目标运动相匹配时,就会导致跟踪精度下降。

在 Granström 等[10]提出的 GGIM-PMBM 多机动扩展目标跟踪算法中,本文结合交互式多模型[12-14](interacting multiple model, IMM)算法的思想,提出了一种多模型的 GGIM-PMBM (MM-GGIW-PMBM) 算法。首先,在预测阶段利用 IMM 算法融合多种运动模型,实现对扩展目标的混合估计;然后,引入强跟踪滤波器(strong tracking filter, STF)的渐消因子,使输出残差正交,增强算法对目标的跟踪能力和估计精度,使得当扩展目标在做机动运动时,能够快速地为目标匹配准确的运动模型;最后,在 PMBM 更新阶段利用似然函数完成模型概率的更新。此外,本文采用广义最优子模式[15](generalized optimal sub-pattern assignment, GOSPA)距离衡量算法的跟踪性能,该方法将误差分解成目标位置误差、漏检目标数量和误检目标数量 3 部分,能够直观地展现扩展目标跟踪算法的性能。

1　模型框架

假设在 k 时刻将扩展目标建模为

$$\boldsymbol{X}_k = \{\boldsymbol{\xi}_k^i = (\gamma_k^i, \boldsymbol{x}_k^i, \boldsymbol{X}_k^i)\}_{i=1}^{N_{x,k}} \tag{1}$$

式中:$N_{x,k}$ 为 k 时刻目标的数量;γ_k^i 为第 i 个目标的泊松分布量测比率;$\boldsymbol{x}_k^i$ 为第 i 个目标质心的运动学状态,包含目标的位置、速度及转弯率等参数;$\boldsymbol{X}_k^i$ 为第 i 个目标的外形状态,包含目标的形状和大小。将扩展目标建模为 RFS,根据 RFS 的性质,目标的势($N_{x,k}$)为时变离散随机变量,目标的状态($\boldsymbol{\xi}_k^i$)为随机变量。

利用线性高斯动态模型[16]为多运动模型下目标的质心 $\boldsymbol{x}_k^i$ 建模,即

$$\boldsymbol{x}_{k+1}^i = \left(\sum_{r=1}^{M} p_{k+1/k,r}^i \boldsymbol{F}_{k+1/k,r}^i \otimes \boldsymbol{I}_d\right)\boldsymbol{x}_k^i + \sum_{r=1}^{M} p_{k+1/k,r}^i \boldsymbol{w}_{k+1/k,r}^i \tag{2}$$

式中:M 为转移模型总数量;$p_{k+1/k,r}^i$ 为第 r 个模型的转移概率;$\boldsymbol{w}_{k+1/k,r}^i$ 为第 r 个转移模型对应的过程噪声,其均值为 0,协方差为 $\boldsymbol{Q}_{k+1/k,r}^i$;$\boldsymbol{F}_{k+1/k,r}^i$ 为第 r 个模型对应的转移矩阵;$\boldsymbol{I}_d$ 为单位矩阵,d 为目标外形的维度;"⊗"表示克罗内克积。

假设 $Z_k = \{\boldsymbol{z}_k^i\}_{i=1}^{N_{z,k}}$ 为 k 时刻的量测集,其同样被假设为 RFS,通过线性高斯模型建模,可表示为

$$\boldsymbol{z}_k^j = (\boldsymbol{H}_k \otimes \boldsymbol{I}_d)\boldsymbol{x}_k^i + \boldsymbol{e}_k^j \tag{3}$$

式中:$\boldsymbol{e}_k^j$ 为协方差为 $\boldsymbol{R}_k^j$ 的高斯白噪声;$\boldsymbol{H}_k$ 为量测矩阵。

量测集合 Z_k 由杂波量测和目标产生量测的并集组成,表示为

$$Z_k = \theta(z) \cup k(z) \tag{4}$$

式中:$\theta(z)$ 为由目标产生的量测,$k(z)$ 为杂波量测,假设它们相互独立。杂波量测 $k(z) = \lambda c(z)$,λ 为杂波量测数量对应的泊松率,$c(z)$ 为杂波的空间概率分布函数。

设扩展目标的状态 ξ 的检测概率为 $p_{\mathrm{D}}(\xi)$,如果被检测到,产生的量测数量服从泊松分布,密度为 $\gamma\varphi(z\mid\xi)$,γ 为目标产生的量测数量对应的泊松率,$\varphi(z\mid\xi)$ 为依赖目标状态的量测分布函数。则对于非空量测集($|Z|>0$),其似然函数可表示为

$$L_z(x) = p_{\mathrm{D}}(\xi)p(Z\mid\xi) = p_{\mathrm{D}}(x)\mathrm{e}^{-\gamma(\xi)}\prod_{z\in Z}\gamma(\xi)\varphi(z\mid\xi) \tag{5}$$

式中:$p(Z\mid\xi)$ 为预测似然函数。因为量测服从泊松分布,所以目标至少产生一个量测的概率为 $1-\mathrm{e}^{-\gamma(\xi)}$,则扩展目标 ξ 的有效检测概率为 $p_{\mathrm{D}}(\xi)(1-\mathrm{e}^{-\gamma(\xi)})$,漏检的概率可以表示为

$$q_{\mathrm{D}}(\xi) = 1 - p_{\mathrm{D}}(\xi) + p_{\mathrm{D}}\mathrm{e}^{-\gamma(\xi)} \tag{6}$$

注意,$q_{\mathrm{D}}(\xi)$ 同样也是量测集合为空集时的条件似然,即 $L_{z=\varnothing}(\xi) = q_{\mathrm{D}}(\xi)$,$\varnothing$ 为空集。

2　扩展目标状态的概率密度分布

假设 k 时刻扩展目标状态由式(1)表示,由参数集合 $\xi_k^{(j)} \triangleq (\alpha_k^{(j)}, \beta_k^{(j)}, m_k^{(j)}, P_k^{(j)}, v_k^{(j)}, V_k^{(j)})$ 与其相对应,其关系如下:$\gamma \sim \mathrm{GAM}(\gamma;\alpha,\beta)$ 表示泊松分布的量测比率,α 为形状参数,β 为逆尺度参数。

$$\mathrm{GAM}(\gamma;\alpha,\beta) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)}\gamma^{\alpha-1}\mathrm{e}^{-\beta\gamma} \tag{7}$$

式中:$\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数。

$\boldsymbol{x} \sim N(\boldsymbol{x};\boldsymbol{m},\boldsymbol{P})$ 表示质心的运动学状态分布,$\boldsymbol{m}$ 为均值,$\boldsymbol{P}$ 为协方差。

$$N(\boldsymbol{x};\boldsymbol{m},\boldsymbol{P}) = \frac{\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{m})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}^{-1}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{m})}}{(2\pi)^{\frac{n_x}{2}}|\boldsymbol{P}|^{\frac{1}{2}}} \tag{8}$$

http://bhxb.buaa.edu.cn

式中：$|\cdot|$表示取行列式的值；n_x为目标的数量。

$\boldsymbol{X}\sim \mathrm{IW}(\boldsymbol{X};v,\boldsymbol{V})$表示扩展目标的外形，$v$为自由度参数，$\boldsymbol{V}$为矩阵参数。

$$\mathrm{IW}(\boldsymbol{X};v,\boldsymbol{V}) = \frac{2^{-\frac{v-d-1}{2}}|\boldsymbol{V}|^{\frac{v-d-1}{2}}}{\Gamma_d\left(\frac{v-d-1}{2}\right)|\boldsymbol{X}|^{\frac{v}{2}}}\mathrm{etr}\left(-\frac{1}{2}\boldsymbol{X}^{-1}\boldsymbol{V}\right) \tag{9}$$

式中：$\mathrm{etr}(\cdot)=\exp(\mathrm{tr}(\cdot))$表示矩阵迹的指数；$\Gamma_d$为多元伽马函数。

根据式(7)～式(9)，扩展目标状态数服从GGIW分布，表示为

$$P(\xi|Z) = p(\gamma|Z)p(\boldsymbol{x}|\boldsymbol{X},Z)p(\boldsymbol{X}|Z) = \mathrm{GAM}(\gamma;\alpha,\beta)N(\boldsymbol{x};\boldsymbol{m},\boldsymbol{P})\mathrm{IW}(\boldsymbol{X};v,\boldsymbol{V}) = \mathrm{GGIW}(\xi) \tag{10}$$

式中：$\xi\triangleq(\gamma,\boldsymbol{x},\boldsymbol{X})$为扩展目标待估计状态，$\xi\triangleq(\alpha,\beta,\boldsymbol{m},\boldsymbol{P},v,\boldsymbol{V})$为GGIW的分量参数。

3 泊松多伯努利混合滤波

3.1 泊松点过程

泊松点过程(Poisson point process, PPP)假设RFS中目标数量服从泊松分布，且目标状态之间独立同分布。PPP可通过单目标状态空间中的强度函数$D(x)$参数化，而强度函数$D(x)$可由未知目标数量对应的泊松率μ与扩展目标的分布函数$f(x)$的乘积表示，即$D(x)=\mu f(x)$。此外，强度函数还具有一个重要的性质，即空间S中扩展目标的总数量可以由$\int_{x\in S}D(x)\mathrm{d}x$表示。通过强度函数$D(x)$，PPP的密度可表示为

$$f(X) = \mathrm{e}^{-<D(x);1>}\prod_{x\in X}D(x) = \mathrm{e}^{-\mu}\prod_{x\in X}\mu f(x) \tag{11}$$

3.2 多伯努利混合过程

伯努利集合X_{B}同样为RFS，且集合X_{B}中包含的变量最多只能有一个，其概率密度函数为

$$f(X_{\mathrm{B}}) = \begin{cases}1-r(x) & X_{\mathrm{B}}=\varnothing\\ r(x)f(x) & X_{\mathrm{B}}=\{x\}\\ 0 & |X_{\mathrm{B}}|\geqslant 2\end{cases} \tag{12}$$

式中：$r(x)$为存活概率，$f(x)$为概率密度函数。在MTT，伯努利RFS包含了单个目标存在情况的不确定性(通过$r(x)$)和目标状态x的不确定性(通过$f(x)$)。

多伯努利(multi Bernoulli, MB)RFS X_{MB}是固定数量的伯努利RFS X_{B}^n($n\in\Pi$，Π为索引集)的并集，可表示为

$$X_{\mathrm{MB}} = \bigcup_{n=1}^{M}X_{\mathrm{B}}^n \tag{13}$$

集合X_{MB}概率密度函数为

$$f(X_{\mathrm{MB}}) = \begin{cases}\sum\limits_{\bigcup_{n\in\Pi}X_{\mathrm{B}}^n=X_{\mathrm{MB}}}\prod\limits_{n\in\Pi}f(X_{\mathrm{B}}^n) & |X_{\mathrm{MB}}|\leqslant|\Pi|\\ 0 & |X_{\mathrm{MB}}|>|\Pi|\end{cases} \tag{14}$$

MB的分布可通过其伯努利参数$\{r(x),f(x)\}_{\Pi}$表示。

多伯努利混合(MB mixture, MBM)密度可以由一系列正则化且带有权重的MB的概率密度函数混合表示，即MBM可以由$\{(\omega^s,\{r^{s,n}(x),f^{s,n}(x)\}_{n\in\Pi_s})\}_{s\in J}$定义，其中，$J$为MBM中MB的索引集合，$\Pi_s$为第$s$个MB中伯努利成分的索引集合，$\omega^s$为第$s$个MB的权重。

3.3 PMBM结构

PMBM可以用2个部分表示：一部分为PPP，用来估计多目标演化过程中存在但是并未被检测到的目标，由符号X^u表示；另外一部分为MBM，用来估计多目标演化过程中已经被检测到的目标的分布情况，由符号X^s表示。因此，目标集合X可以划分成2个不相交的子集：

$$\begin{cases}X_P = X^u\cup X^s\\ X^u\cap X^s=\varnothing\end{cases} \tag{15}$$

PMBM密度函数可表示为

$$\begin{cases}f(X_P) = \sum\limits_{X^u\cup X^s=X_P}f^u(X^u)\sum\limits_{s\in J}\omega^s f^s(X^s)\\ f^u(X^u) = \mathrm{e}^{-<D^u;1>}\prod\limits_{x\in X^u}D^u(x)\\ f^s(X^s) = \sum\limits_{\bigcup_{j\in J_s}X_j=X^s}\prod\limits_{n\in\Pi_s}f^{s,n}(X_n)\end{cases} \tag{16}$$

式中：$f^{s,n}(\cdot)$为第s个MB中第n个伯努利的密度函数；设$r^{s,n}(\cdot)$为第s个MB中第n个伯努利的存活概率，每个伯努利成分由GGIW成分混合表示；$|J|$为MBM中MB的数量；$|\Pi_s|$为第s个MB分量中伯努利的数量；D^u为未知目标的强度函数。

则PMBM可以通过参数表示为：D^u，$\{(\omega^s,\{r^{s,n}(x),f^{s,n}(x)\}_{n\in\Pi_s})\}_{s\in J}$。

3.4 PMBM滤波的递归算法

1) 预测。假设PMBM滤波的后验概率密度由D^u，$\{(\omega^s,\{r^{s,n}(x),f^{s,n}(x)\}_{n\in\Pi_s})\}_{s\in J}$表示，则预测之后PMBM的概率密度表示为：$D_+^u$，$\{(\omega_+^u,\{(r_+^{s,n},f_+^{s,n})\}_{n\in\Pi_s})\}_{s\in J}$。

$$D_+^u(x) = \langle D^{\mathrm{b}}(x)+D^u;P_{\mathrm{s}}\cdot\boldsymbol{\Psi}_{k|k-1}\rangle \tag{17}$$

$$r_+^{s,n} = \langle f^{s,n};P_{\mathrm{s}}\rangle r^{s,n} \tag{18}$$

$$f_+^{s,n}(x) = \frac{\langle f^{s,n};P_{\mathrm{s}}\cdot\boldsymbol{\Psi}_{k|k-1}\rangle}{\langle f^{s,n};P_{\mathrm{s}}\rangle} \tag{19}$$

http://bhxb.buaa.edu.cn

式中:$D^{\mathrm{b}}(x)$为新生分量强度函数;P_{s} 为目标存活概率;$\boldsymbol{\Psi}_{k|k-1}$为转移矩阵的混合估计;$\omega_{+}^{s}=\omega^{s}$。

2)更新。假设 k 时刻 PMBM 滤波的预测概率密度由 D_{+}^{u}, $\{(\omega_{+}^{u},\{(r_{+}^{s,n},f_{+}^{s,n})\}_{n\in\Pi_s})\}_{s\in J}$ 表示,则更新之后 PMBM 的概率密度 $f(X_P\mid Z_P)$ 为

$$\begin{cases} f(X_P\mid Z_P)=\displaystyle\sum_{X^u\cup X^s=X_P} f^{u}(X^u)\sum_{s\in J_+}\sum_{A\in A^s}\omega_A^s f_A^s(X^s) \\ f^{u}(X^u)=\mathrm{e}^{-<D^u;1>}\displaystyle\prod_{x\in X^u}D^u(x) \\ f_A^s(X^s)=\displaystyle\sum_{\bigcup\limits_{C\in A}X^C=X^s}\prod_{C\in A}f^{s,C}(X^C) \end{cases} \tag{20}$$

式中:权重 ω_A^s 为

$$\omega_A^s=\frac{\omega_{+}^{s}\displaystyle\prod_{C\in A}L}{\displaystyle\sum_{s\in J}\sum_{A\in A^s}\omega_{+}^{j}\prod_{C\in A}L} \tag{21}$$

其中:L 表示似然函数;A 为伯努利成分的数据关联;A^s 为第 s 个 MB 的数据关联集合。

PPP 的密度 D^u 为

$$D^{u}=q_{\mathrm{D}}(x)D_{+}^{u}(x) \tag{22}$$

4　MM-GGIW-PMBM 的递归

多模型 PMBM 算法与单模型 PMBM 算法的区别主要在预测阶段。因为扩展目标的概率密度函数可由式(10)表示,所以可以通过对参数 α、β、$\boldsymbol{m}$、$\boldsymbol{P}$、v、$\boldsymbol{V}$ 的预测来对 GGIW 变量进行预测。而多模型 PMBM 算法在预测阶段需要对参数 α、β、$\boldsymbol{m}$、$\boldsymbol{P}$、v、$\boldsymbol{V}$ 进行混合估计预测,且还要使用 STF 修正预测之后的 GGIW 的协方差,MM-GGIW-PMBM 预测阶段算法如下:

步骤 1　输入未知目标成分 $\{\omega_{u,k-1}^{j},\xi_{u,k-1}^{j}\}_{j=1}^{U}$ 和 MBM 成分 $\{\omega_{k-1}^{s},\{r_{k-1}^{s,n},f_{k-1}^{s,n}\}_{n\in\Pi_s}\}_{s\in J_{k-1}}$。

步骤 2　通过加权求和对模型概率进行预测:$p_{k|k-1,r}^{j}=\displaystyle\sum_{i=1}^{M}\boldsymbol{\pi}_{ir}p_{k-1,i}^{j}$,$\boldsymbol{\pi}_{ir}$ 为模型转移概率矩阵。

步骤 3　目标新生:$\{\omega_{\mathrm{b},k-1}^{j},\xi_{\mathrm{b},k-1}^{j}\}_{j=1}^{B}$。

步骤 4　将新生目标与未知目标合并为 PPP,即 $\{\omega_{h,k-1}^{j},\xi_{h,k-1}^{j}\}_{j=1}^{H}=\{\omega_{\mathrm{b},k-1}^{j},\xi_{\mathrm{b},k-1}^{j}\}_{j=1}^{B}\cup\{\omega_{u,k-1}^{j},\xi_{u,k-1}^{j}\}_{j=1}^{U}$,其中,$H=B+U$。

步骤 5　对 PPP 及每个 MB 中的每个伯努利进行预测,即 $\{\omega_{h,k/k-1}^{j},\xi_{h,k/k-1}^{j}\}_{j=1}^{H}\leftarrow\{\omega_{h,k-1}^{j},\xi_{h,k-1}^{j}\}_{j=1}^{H}$;$\{\omega_{k/k-1}^{s},\{r_{k/k-1}^{s,n},f_{k/k-1}^{s,n}\}_{n\in\Pi_s}\}_{s\in J_{k/k-1}}\leftarrow\{\omega_{k-1}^{s},\{r_{k-1}^{s,n},f_{k-1}^{s,n}\}_{n\in\Pi_s}\}_{s\in J_{k-1}}$。

步骤 6　通过 STF 对预测阶段之后的扩展目标协方差进行修正:$\boldsymbol{P}_{k|k-1}^{j}=\boldsymbol{\varpi}_k^{j}\boldsymbol{\Psi}_{k|k-1}^{j}\boldsymbol{P}_{k-1}^{j}(\boldsymbol{\Psi}_{k|k-1}^{j})^{\mathrm{T}}+\displaystyle\sum_{r=1}^{M}p_{k/k-1,r}^{j}\boldsymbol{Q}_{k/k-1,r}^{j}$。

步骤 7　输出未知目标成分 $\{\omega_{h,k/k-1}^{j},\xi_{h,k/k-1}^{j}\}_{j=1}^{H}$ 和 MBM 成分 $\{\omega_{k/k-1}^{s},\{r_{k/k-1}^{s,n},f_{k/k-1}^{s,n}\}_{n\in\Pi_s}\}_{s\in J_{k/k-1}}$。

4.1　多模型 GGIW 分量预测阶段的混合估计

在预测阶段,通过混合估计实现多模型向单模型的转化。设已知扩展目标状态空间中第 j 个 GGIW 分量为 $\xi_{k-1}^{j}=(\alpha_{k-1}^{j},\beta_{k-1}^{j},\boldsymbol{m}_{k-1}^{j},\boldsymbol{P}_{k-1}^{j},v_{k-1}^{j},\boldsymbol{V}_{k-1}^{j})$,$\omega_{k-1}^{j}$ 为其权重,则预测分量可通过式(23)计算得到:

$$\omega_{k/k-1}^{j}=P_{\mathrm{s}}\cdot\omega_{k-1}^{j} \tag{23a}$$

$$\alpha_{k|k-1}^{j}=\sum_{r=1}^{M}(p_{k|k-1,r}^{j}/\eta_{k-1,r})\alpha_{k-1}^{j} \tag{23b}$$

$$\beta_{k|k-1}^{j}=\sum_{r=1}^{M}(p_{k|k-1,r}^{j}/\eta_{k-1,r})\beta_{k-1}^{j} \tag{23c}$$

$$p_{k|k-1,r}^{j}=\sum_{i=1}^{M}\boldsymbol{\pi}_{ir}p_{k-1,i}^{j} \tag{23d}$$

$$v_{k|k-1}^{j}=\sum_{r=1}^{M}p_{k|k-1,r}^{j}[2d+2+\mathrm{e}^{-T/\tau_{k-1,r}}(v_{k-1}^{j}-2d-2)] \tag{23e}$$

$$\boldsymbol{V}_{k|k-1}^{j}=\sum_{r=1}^{M}p_{k|k-1,r}^{j}\mathrm{e}^{-T/\tau}\boldsymbol{I}_d\boldsymbol{V}_{k-1}^{j}(\boldsymbol{I}_d)^{\mathrm{T}} \tag{23f}$$

$$\boldsymbol{m}_{k|k-1}^{j}=\boldsymbol{\Psi}_{k|k-1}^{j}\boldsymbol{m}_{k-1}^{j} \tag{23g}$$

$$\boldsymbol{P}_{k|k-1}^{j}=\boldsymbol{\Psi}_{k-1|k-1}^{j}\boldsymbol{P}_{k-1}^{j}(\boldsymbol{\Psi}_{k-1|k-1}^{j})^{\mathrm{T}}+\sum_{r=1}^{M}p_{k/k-1,r}^{j}\boldsymbol{Q}_{k/k-1,r}^{j} \tag{23h}$$

$$\boldsymbol{\Psi}_{k|k-1}^{j}=\sum_{r=1}^{M}p_{k|k-1,r}^{j}\boldsymbol{F}_{k|k-1}^{r} \tag{23i}$$

式中:M 为运动模型的总数量;$\eta_{k-1,r}$为第 r 个模型下指数渐消因子;$p_{k-1,r}^{j}$为 $k-1$ 时刻第 j 个 GGIW 分量对应第 r 个模型的概率;$\boldsymbol{\pi}_{ir}$为模型 i 到模型 r 转移概率;$\tau_{k-1,r}$为扩展目标在第 r 个模型下的扩展灵敏度;T 为采样时间间隔;$\boldsymbol{F}_{k|k-1}^{r}$为第 r 个模型对应的转移矩阵;$\boldsymbol{Q}_{k/k-1,r}^{j}$为第 r 个模型对应的过程噪声协方差。

4.2　强跟踪滤波器修正

由于扩展目标跟踪算法对转移矩阵模型有非常严格的要求,当实际转移模型参数发生变化时,会使滤波器的状态估计出现较大偏差。因此,通过引入一种 STF,利用时变的渐消因子在线实时调整增益矩阵,从而自适应修正协方差,增强算法对机动目标的跟踪能力。第 j 个 GGIW 分量的预测协方差的修正公式如下:

$$\boldsymbol{P}_{k|k-1}^{j}=\boldsymbol{\varpi}_k^{j}\boldsymbol{\Psi}_{k|k-1}^{j}\boldsymbol{P}_{k-1}^{j}(\boldsymbol{\Psi}_{k|k-1}^{j})^{\mathrm{T}}+\sum_{r=1}^{M}p_{k/k-1,r}^{j}\boldsymbol{Q}_{k/k-1,r}^{j} \tag{24a}$$

http://bhxb.buaa.edu.cn

$$\boldsymbol{\varpi}^j = \begin{cases} \eta_k^j & \eta_k^j > 1 \\ 1 & \eta_k^j \leqslant 1 \end{cases} \tag{24b}$$

$$\eta_k^j = \frac{\mathrm{tr}(\boldsymbol{G}_k^j)}{\mathrm{tr}(\boldsymbol{L}_k^j)} \tag{24c}$$

$$\boldsymbol{G}_k^j = N_0^j(k) - \lambda_0 \frac{\boldsymbol{X}_{k|k-1}^j + \boldsymbol{R}_k}{|W|} - \boldsymbol{H}_k \sum_{r=1}^{M} p_{k/k-1,r}^j \boldsymbol{Q}_{k/k-1,r}^j (\boldsymbol{H}_k)^{\mathrm{T}} \tag{24d}$$

$$\boldsymbol{L}_k^j = \boldsymbol{H}_k \boldsymbol{\Psi}_{k|k-1}^j \boldsymbol{P}_{k-1}^j (\boldsymbol{\Psi}_{k|k-1}^j)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}} \tag{24e}$$

$$N_0^j(k) = \tilde{\boldsymbol{z}}_k^j (\tilde{\boldsymbol{z}}_k^j)^{\mathrm{T}} \tag{24f}$$

$$\tilde{\boldsymbol{z}}_k^j = \frac{1}{|W|} \sum_{\boldsymbol{z}_k^j \in W} \boldsymbol{z}_k^j - \boldsymbol{H}_k \boldsymbol{m}_{k|k-1}^j \tag{24g}$$

式中：$\boldsymbol{R}_k$ 为量测噪声协方差；$\boldsymbol{H}_k$ 为量测矩阵；$\boldsymbol{X}_{k|k-1}^j$ 为第 j 个扩展目标的外形参数预测；λ_0 为弱化因子；$|W|$ 为量测子集的数量。

4.3 GGIW 分量的更新

多模型 PMBM 算法与单模型 PMBM 算法在更新阶段的区别在于多模型 PMBM 算法需要对模型概率进行更新，MM-GGIW-PMBM 更新阶段算法如下：

步骤 1 输入未知目标成分 $\{\omega_{h,k/k-1}^j, \xi_{h,k/k-1}^j\}_{j=1}^H$ 和 MBM 成分 $\{\omega_{k/k-1}^s, \{r_{k/k-1}^{s,n}, f_{k/k-1}^{s,n}\}_{n\in\Pi_s}\}_{s\in J_{k/k-1}}$。

步骤 2 利用量测划分方法[16]生成量测子集：$\{W_1, W_2, \cdots, W_N\}$。

步骤 3 求预测似然 $l_{k,r}^j$。

步骤 4 预测目标成分的漏检：$\{\omega_{lh,k/k-1}^j, \xi_{lh,k/k-1}^j\}_{j=1}^H \leftarrow \{\omega_{h,k/k-1}^j, \xi_{h,k/k-1}^j\}_{j=1}^H$；$\{\omega_{l,k}^s, \{r_{l,k}^{s,n}, f_{l,k}^{s,n}\}_{n\in\Pi_s}\}_{s\in J_{k/k-1}} \leftarrow \{\omega_{k/k-1}^s, \{r_{k/k-1}^{s,n}, f_{k/k-1}^{s,n}\}_{n\in\Pi_s}\}_{s\in J_{k/k-1}}$。

步骤 5 未知成分与已知成分更新。其中，$\{\omega_{h,k}^j, \xi_{h,k}^j\}_{j=1}^N \leftarrow \{\omega_{h,k/k-1}^j, \xi_{h,k/k-1}^j\}_{j=1}^H$；$\{\omega_{g,k}^s, \{r_{g,k}^{s,n}, f_{g,k}^{s,n}\}_{n\in\Pi_s}\}_{s\in J_g} \leftarrow \{\omega_{k/k-1}^s, \{r_{k/k-1}^{s,n}, f_{k/k-1}^{s,n}\}_{n\in\Pi_s}\}_{s\in J_{k/k-1}}$。

步骤 6 利用预测似然对模型概率更新：$p_{k,r}^j = p_{k/k-1}^j l_{k,r}^j$。

步骤 7 合并漏检、未知与已知成分：$\{\omega_k^s, \{r_k^{s,n}, f_k^{s,n}\}_{n\in\Pi_s}\}_{s\in J} \leftarrow \{\omega_{g,k}^s, \{r_{g,k}^{s,n}, f_{g,k}^{s,n}\}_{n\in\Pi_s}\}_{s\in J_g} \cup \{\omega_{l,k}^s, \{r_{l,k}^{s,n}, f_{l,k}^{s,n}\}_{n\in\Pi_s}\}_{s\in J_{k/k-1}}$；$\{\omega_k^j, \xi_k^j\}_{j=1}^M \leftarrow \{\omega_{h,k}^j, \xi_{h,k}^j\}_{j=1}^N \cup \{\omega_{lh,k/k-1}^j, \xi_{lh,k/k-1}^j\}_{j=1}^H$。

步骤 8 输出 $\{\omega_k^s, \{r_k^{s,n}, f_k^{s,n}\}_{n\in\Pi_s}\}_{s\in J}$ 和 $\{\omega_k^j, \xi_k^j\}_{j=1}^M$。

假设第 j 个 GGIW 预测分量参数为 $\xi_{k|k-1}^j = (\alpha_{k|k-1}^j, \beta_{k|k-1}^j, \boldsymbol{m}_{k|k-1}^j, \boldsymbol{P}_{k|k-1}^j, v_{k|k-1}^j, \boldsymbol{V}_{k|k-1}^j)$，则其参数的更新如下：

$$\alpha_k^j = \alpha_{k|k-1}^j + |W| \tag{25a}$$

$$\beta_k^j = \beta_{k|k-1}^j + 1 \tag{25b}$$

$$\boldsymbol{m}_k^j = \boldsymbol{m}_{k|k-1}^j + \boldsymbol{K}_k \boldsymbol{\varepsilon}_k \tag{25c}$$

$$\boldsymbol{P}_k^j = \boldsymbol{P}_{k|k-1}^j - \boldsymbol{K}_k \boldsymbol{H}_k \boldsymbol{P}_{k|k-1}^j \tag{25d}$$

$$v_k^j = v_{k|k-1}^j + |W| \tag{25e}$$

$$\boldsymbol{V}_k^j = \boldsymbol{V}_{k|k-1}^j + \boldsymbol{N}_k + \bar{\boldsymbol{Z}}_k \tag{25f}$$

式中：

$$\bar{\boldsymbol{z}}_k = \frac{1}{|W|} \sum_{\boldsymbol{z}_k^j \in W} \boldsymbol{z}_k^j \tag{26a}$$

$$\bar{\boldsymbol{Z}}_k = \sum_{\boldsymbol{z}_k^j \in W} (\boldsymbol{z}_k^j - \bar{\boldsymbol{z}}_k)(\boldsymbol{z}_k^j - \bar{\boldsymbol{z}}_k)^{\mathrm{T}} \tag{26b}$$

$$\boldsymbol{X}_k = \frac{\boldsymbol{V}_{k|k-1}^j}{v_{k|k-1}^j - 2d - 2} \tag{26c}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_k = \bar{\boldsymbol{z}}_k - \boldsymbol{H}_k \boldsymbol{m}_{k|k-1}^j \tag{26d}$$

$$\boldsymbol{S}_k = \boldsymbol{H}_k \boldsymbol{P}_{k|k-1}^j \boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}} + \frac{\boldsymbol{X}_k}{|W|} \tag{26e}$$

$$\boldsymbol{K}_k = \frac{\boldsymbol{P}_{k|k-1}^j \boldsymbol{H}_k}{\boldsymbol{S}_k} \tag{26f}$$

$$\boldsymbol{N}_k = \boldsymbol{X}_k^{1/2} \boldsymbol{S}_k^{-1/2} \boldsymbol{\varepsilon}_k (\boldsymbol{\varepsilon}_k)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{S}_k^{-T/2} \boldsymbol{X}_k^{T/2} \tag{26g}$$

同时在更新阶段完成模型概率的更新。假设模型的总数量为 M，则对于新生目标分量的模型概率为

$$p_{k,r}^j = \frac{1}{M} \tag{27}$$

未检测到的目标分量和已检测到的目标分量的模型概率更新方式相同，其模型概率为

$$p_{k,r}^j = \frac{p_{k|k-1}^j l_{k,r}^W}{\sum_{r=1}^{M} p_{k|k-1}^j l_{k,r}^W} \tag{28}$$

式中：$l_{k,r}^j$ 为第 r 个模型下量测子集为 W 的预测似然，其表达式为

$$l_k^j = (\boldsymbol{\pi}^{|W|}|W|!)^{-1} \frac{|\boldsymbol{V}_{k|k-1}^j|^{\frac{v_{k|k-1}^j - d - 1}{2}} \Gamma_d\left(\frac{v_{k|k-1}^j - d - 1}{2}\right) |\boldsymbol{X}|^{\frac{1}{2}} \Gamma(\alpha_k^j) (\beta_{k|k-1}^j)^{\alpha_{k|k-1}^j}}{|\boldsymbol{V}_{k-1}^j|^{\frac{v_{k|k-1}^j - d - 1}{2}} \Gamma_d\left(\frac{v_{k|k-1}^j - d - 1}{2}\right) |\boldsymbol{S}|^{\frac{1}{2}} \Gamma(\alpha_{k|k-1}^j) (\beta_k^j)^{\alpha_k^j}} \tag{29}$$

5 仿真实验

5.1 性能评估

对于椭圆外形扩展目标估计的性能评价主要有 6 种[17]，其中，基于高斯 Wasserstein 距离（Gaussian Wasserstein distance，GWD）[18]通常是最佳的选择，而本文则是选择文献[15]中 GOSPA 多目标度量对所提算法进行评估，其定义为

http://bhxb.buaa.edu.cn

$$d_p^{(c,2)}(\boldsymbol{X},\hat{\boldsymbol{X}}) = \left[\min_{\theta\in\Theta^{(|\boldsymbol{X}|,|\hat{\boldsymbol{X}}|)}}\sum_{(i,j)\in\theta} d_{\mathrm{GW}}^{(c)}(\boldsymbol{x}^i,\hat{\boldsymbol{x}}^j)^p + \frac{c^p}{2}(|\boldsymbol{X}|-|\theta|+|\hat{\boldsymbol{X}}|-|\theta|)\right]^{\frac{1}{p}} \tag{30}$$

式中:

$$d_{\mathrm{GW}}^{(c)}(\boldsymbol{x}^i,\hat{\boldsymbol{x}}^j) = \min(c;d_{\mathrm{GW}}(\boldsymbol{x}^i,\hat{\boldsymbol{x}}^j)) \tag{31}$$

其中:$d_{\mathrm{GW}}(\boldsymbol{x}^i,\hat{\boldsymbol{x}}^j)$为 GWD 误差;$\Theta^{(|\boldsymbol{X}|,|\hat{\boldsymbol{X}}|)}$为所有可能的二维赋值集的集合。

从式(30)可以看出,GOSPA 方法将误差分成 3 个部分,$\sum_{(i,j)\in\theta} d_{\mathrm{GW}}^{(c)}(\boldsymbol{x}^i,\hat{\boldsymbol{x}}^j)^p$ 表示位置误差,$\frac{c^p}{2}(|\boldsymbol{X}|-|\theta|)$为漏检目标数量,$\frac{c^p}{2}(|\hat{\boldsymbol{X}}|-|\theta|)$为误检目标数量,其中,$c$ 为基线距离的截止值,p 为异常值的惩罚程度,在本文仿真算法中取 $c=10$,$p=1$。

5.2　仿真场景

在算法实验场景中,假设目标的运动方式有 2 种,分别为匀速直线(CV)转弯(CT)运动,对应的模型转移矩阵为

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{CT}} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{CV}} = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\theta T)/\theta & 0 & -(1-\cos(\theta T))/\theta \\ 0 & \cos(\theta T) & 0 & -\sin(\theta T) \\ 0 & (1-\cos(\theta T))/\theta & 1 & \sin(\theta T)/\theta \\ 0 & \sin(\theta T) & 0 & \cos(\theta T) \end{bmatrix}$$

其对应的过程噪声分别为

$$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{CV}} = \begin{bmatrix} T^4/4 & T^3/2 & 0 & 0 \\ T^3/2 & T^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T^4/4 & T^3/2 \\ 0 & 0 & T^3/2 & T^3/2 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{CT}} = \begin{bmatrix} T^4/4 & T^3/2 & 0 & 0 \\ T^3/2 & T^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T^4/4 & T^3/2 \\ 0 & 0 & T^3/2 & T^3/2 \end{bmatrix}$$

式中:$T=1$ s 为时间采样间隔长度。STF 的弱化因子 $\lambda_0=1$,扩展目标的检测概率 Pd = 0.8,存活概率 Ps = 0.99,杂波服从均值为 60 的泊松分布,模型 i 到模型 r 转移概率矩阵为

$$\boldsymbol{\pi}_{ir} = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.05 & 0.15 \\ 0.05 & 0.9 & 0.05 \\ 0.05 & 0.05 & 0.9 \end{bmatrix}$$

新生目标强度由 GGIW 混合表示,为 $\lambda_k^{\mathrm{b}}(x)=\sum_{i=1}^{4}\omega_{\mathrm{b}}\mathrm{GGIW}(\alpha_k^i,\beta_k^i,\boldsymbol{m}_k^i,\boldsymbol{P}_k^i,v_k^i,\boldsymbol{V}_k^i)$,其中,$\omega_{\mathrm{b}}=0.01$,$\alpha=32$,$\beta=4$,$\boldsymbol{m}$ 的值与真实目标轨迹的初始参数相等,$\boldsymbol{P}=\mathrm{diag}([1,1,1,1]^{\mathrm{T}})^2$,$v=12$,$\boldsymbol{V}=\mathrm{diag}([12,12]^{\mathrm{T}})$。未知目标初始参数与新生目标相同。量测矩阵及量测噪声分别为 $\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\end{bmatrix}$,$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}1&0\\0&1\end{bmatrix}$。每个扩展目标在每个时刻产生量测数量服从均值为 8 的泊松分布。

5.3　算法性能对比

在图 1 和图 2 中,存在 3 个扩展目标在设定的杂波环境中运动。第 1 个目标质心的初始运动信息为[-75 m; -2 m/s; -75 m;2 m/s],在 1 ~ 5 s做匀速直线运动,在 6 ~ 20 s 做角速度为 -0.2 rad/s的转弯运动,在 21 ~ 30 s 做角速度为 0.3 rad/s 的转弯运动。第 2 个扩展目标质心的初始运动信息为[-75 m; -2 m/s;75 m;2 m/s],在 10 ~ 14 s做匀速直线运动,在 15 ~ 20 s 做角速度为 -0.2 rad/s 的转弯运动,在 21 ~ 30 s 做角速度为 0.3 rad/s 的转弯运动。第 3 个扩展目标质心的初始运动信息为[75 m; 2 m/s; 75 m; 2 m/s],在 7 ~ 11 s 做匀速直线运动,在 12 ~ 20 s 做角速度为 -0.2 rad/s 的转弯运动,在 21 ~ 30 s 做角速度为 0.3 rad/s 的转弯运动。3 个扩展目标的椭圆外形的长短轴相同,分别为 0.8 m 和 1 m,初始概率分别为[1/3,1/3,1/3],各运动模型对应伽马分布指数的渐消因子分别为 2、2、3,而外形随时间变化的灵敏度分别为 $\tau=9$、10、10,图 1 采用的是 MM-GGIW-PMBM 算法,图 2 采用的是 GGIW-PMBM 算法。可以看出,相较于采用单个运动模型的 GGIW-PMBM 算法,MM-GGIW-PMBM 算法对扩展目标的估计更加精确稳定。

为了进一步验证本文算法的精度及有效性,将 MM-GGIW-PMBM 算法与相同条件下的 MM-GGIW-PHD 算法做对比,一共进行 100 次蒙特卡罗实验取估计误差均值,且每一次实验目标运行 100 个时刻,共对 27 个目标进行跟踪,目标出生及消失的时刻各不相同,在第 58 个时刻之前跟踪的目标数量较少,第 58 个时刻之后目标数量较多。

图 3 和图 4 分别为目标数量的估计及目标数量误差的估计。可以看出,在第 58 个时刻之前,由于目标数量较少,MM-GGIW-PMBM 算法估计精度只是略高于 MM-GGIW-PHD 算法,但在第 58 个时刻之后,目标数量增多,MM-GGIW-PHD 算法估计误差出现大幅度波动,而 MM-GGIW-PMBM

http://bhxb.buaa.edu.cn

算法估计误差则保持稳定,这是因为 PHD 滤波通过泊松分布近似目标的数量分布,但是由于泊松分布的均值与协方差相等这一特性,即目标数量过多时,其估计的误差也会随之增大。

由于 GOSPA 算法的特殊性,可以将 GOSPA 误差分为目标位置误差、漏检目标数量及误检目标数量 3 部分。其中,2 种算法 GOSPA 距离估计的误差如图 5 所示,即扩展目标位置误差、漏检目标数量及误检目标数量总体误差对比;图 6 为 2 种算法对目标位置估计的误差;图 7 为 2 种算法对漏检目标数量的估计;图 8 为 2 种算法对误检目标数量的估计。从图 5、图 7 和图 8 中可以看出,当目标数量较少时,相较于 MM-GGIW-PHD 算法,虽然 MM-GGIW-PMBM 算法对扩展目标的

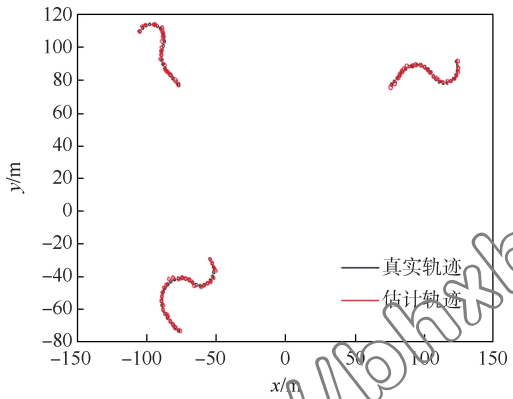


图 1 MM-GGIW-PMBM 算法下扩展目标运动轨迹及其估计轨迹

Fig. 1 Trajectory of extended target and its estimated trajectory by MM-GGIW-PMBM algorithm

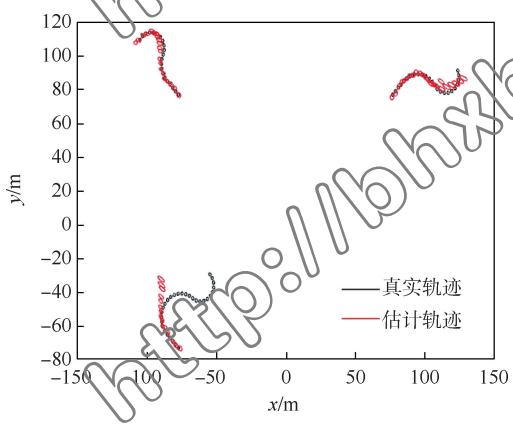


图 2 GGIW-PMBM 算法下扩展目标运动轨迹及其估计轨迹

Fig. 2 Trajectory of extended target and its estimated trajectory by GGIW-PMBM algorithm

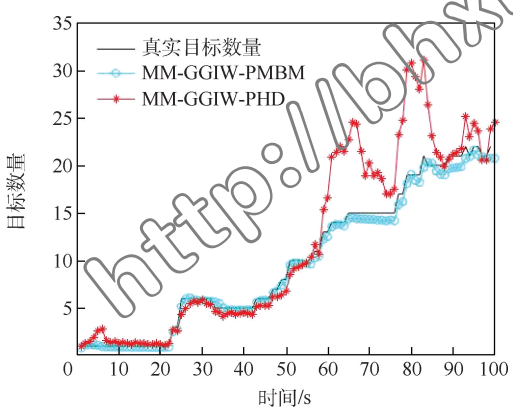


图 3 两种算法对目标数量的估计对比

Fig. 3 Comparison of two algorithms for estimating target numbers

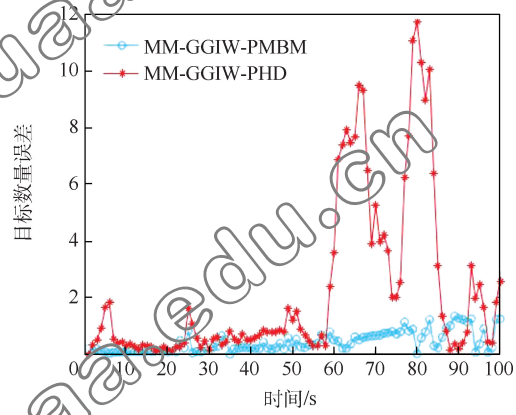


图 4 两种算法对目标数量的估计误差对比

Fig. 4 Comparison of two algorithms for estimating error of target numbers

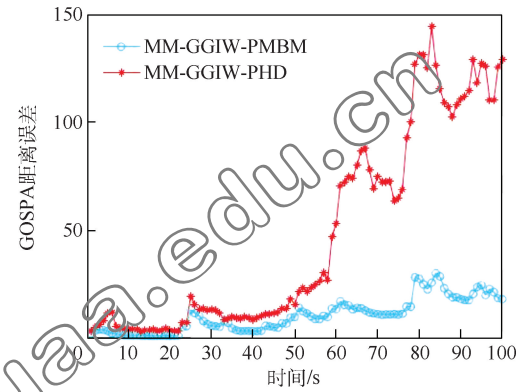


图 5 两种算法 GOSPA 距离估计误差对比

Fig. 5 Comparison of GOSPA distance estimation errors between two algorithms

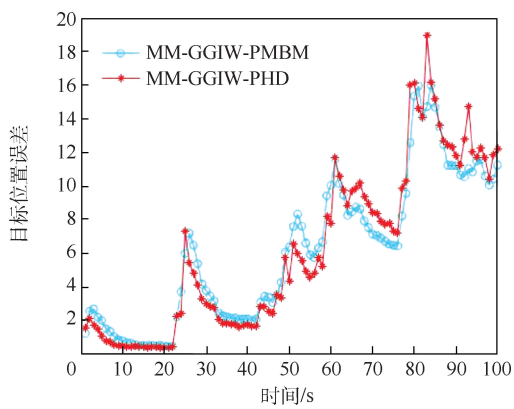


图 6 两种算法目标位置估计误差对比

Fig. 6 Comparison of target location estimation errors between two algorithms

http://bhxb.buaa.edu.cn

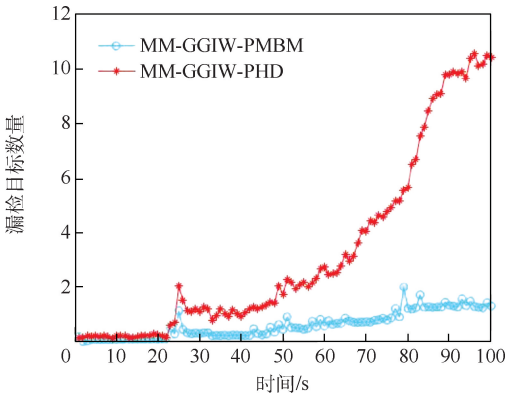


图 7　两种算法漏检目标数量估计对比

Fig. 7　Comparison of estimating missed target numbers between two algorithms

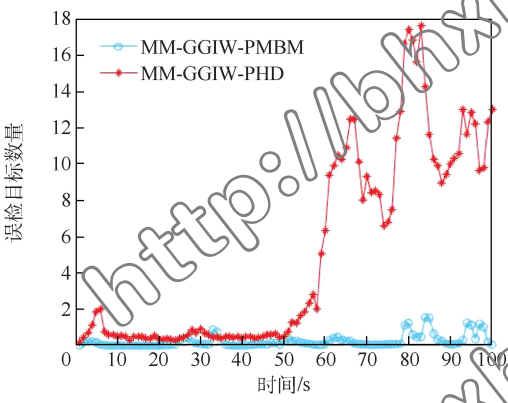


图 8　两种算法误检目标数量估计对比

Fig. 8　Comparison of estimating false detection target numbers between two algorithms

GOSPA 距离误差、漏检目标数量及误检目标数量估计更加精确稳定,但这种优势并不明显,甚至对目标位置的估计(在图 6 给出)精度还要略低于 MM-GGIW-PHD 算法。而当目标的数量较多时,随着量测信息的积累,MM-GGIW-PMBM 算法在 GOSPA 距离误差、漏检目标数量及误检目标数量这 3 方面的估计精度要远强于 MM-GGIW-PHD 算法,其对目标位置的估计精度也强于 MM-GGIW-PHD 算法。

6　结　论

1)针对扩展目标的机动问题,提出了一种 MM-GGIW-PMBM 算法,利用随机矩阵法将扩展外形建模成椭圆,再使用 GGIW 分量描述扩展目标状态。

2)仿真结果表明在扩展目标的交互式算法中引入强滤波跟踪的有效性,在相同条件下,当目标做机动运动时,传统的单模型 GGIW-PMBM 算法会逐渐跟丢目标,不能对多机动扩展目标进行有效的估计,而 MM-GGIW-PMBM 算法在目标做机动运动时能够快速做出调整。

3)相较于 MM-GGIW-PHD 算法,当目标数量较多时,MM-GGIW-PMBM 算法能够更加稳定有效地对目标进行估计。

参考文献(References)

[1] GRANSTRÖM K, BAUM M. Extended object tracking: Introduction, overview and applications[J]. Journal of Advances in Information Fusion, 2017, 12(2): 140-174.

[2] MAHLER R. Multitarget Bayes filtering via first-order multitarget moments[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(4): 1152-1178.

[3] VO B N, MA W K. The Gaussian mixture probability hypothesis density filter[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(11): 4091-4104.

[4] CLARK D, VO B N. Convergence analysis of the Gaussian mixture PHD filter[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(4): 1204-1212.

[5] MAHLER R. PHD filters of higher order in target number[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(4): 1523-1543.

[6] PASHA S A, VO B N, TUAN H D. A Gaussian mixture PHD filter for jump Markov system models[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(3): 919-936.

[7] SHEN X, SONG Z, FAN H, et al. Particle filter implementation of CPHD filter for unknown clutter[C]// 2017 6th International Conference on Electrical Engineering and Informatics. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.

[8] VO B T, VO B N. Labeled random finite sets and multi-object conjugate priors[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(13): 3460-3475.

[9] VO B T, VO B N. The labeled multi-Bernoulli filter[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(12): 3246-3260.

[10] GRANSTRÖM K, FATEMI M, SVENSSON L. Poisson multi-Bernoulli mixture conjugate prior for multiple extended target filtering[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020, 56(1): 208-225.

[11] GRANSTRÖM K, ORGUNER U. On spawning and combination of extended/group targets modeled with random matrices[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(3): 678-692.

[12] MAZOR E, AVERBUCH A, BAR-SHALOM Y, et al. Interacting multiple model methods in target tracking: A survey[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(1): 103-123.

[13] 甘林海,刘进忙,王刚,等. 多模型 GGIW-GLMB 算法跟踪机动群目标[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(10): 2185-2192.
GAN L H, LIU J M, WANG G, et al. Multi model GGIW-GLMB algorithm for tracking maneuvering group targets[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(10): 2185-2192(in Chinese).

[14] 汪云,胡国平,甘林海. 基于多模型 GGIW-CPHD 滤波的群目标跟踪算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),

http://bhxb.buaa.edu.cn

2017,45(2):89-94.
WANG Y,HU G P,GAN L H. Group target tracking algorithm based on multi model GGIW-CPHD filtering[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition),2017,45(2):89-94(in Chinese).
[15] RAHMATHULLAH A S,GARCÍA-FERNÁNDEZ Á F,SVENSSON L. Generalized optimal sub-pattern assignment metric[C]// 2017 20th International Conference on Information Fusion. Piscataway:IEEE Press,2017:1-8.
[16] GRANSTRÖM K,LUNDQUIST C,ORGUNER U. A Gaussian mixture PHD filter for extended target tracking[C]//2010 13th International Conference on Information Fusion. Piscataway:IEEE Press,2010:1-8.
[17] YANG S,BAUM M,GRANSTRÖM K. Metrics for performance evaluation of elliptic extended object tracking methods[C]// 2016 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems. Piscataway:IEEE Press,2016:523-528.
[18] GIVENS C R,SHORTT R M. A class of Wasserstein metrics for probability distributions[J]. Michigan Mathematical Journal,1984,31(2):231-240.

Extended target tracking algorithm based on MM-GGIW-PMBM filter

WU Sunyong[1,2,*], ZHOU Yusong[1], XIE Yun[1], CAI Ruhua[1], FAN Xiangting[1]

(1. School of Mathematics and Computing Science, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;
2. Guangxi Key Laboratory of Precision Navigation Technology and Application, Guilin 541004, China)

Abstract: To address the problem of multiple maneuvering extended target tracking, this paper introduces the concept of interactive multiple models into the Poisson multi-Bernoulli mixture filtering (PMBM) algorithm, and proposes a multi-model algorithm with Gamma Gaussian inverse Wishart and PMBM (MM-GGIW-PMBM). Firstly, the algorithm integrates multiple motion models and realizes the hybrid estimation and prediction of the extended state of the maneuvering target and the centroid state through the interaction of the models. Secondly, the covariance matrix in the predicted GGIW components is modified by introducing the fading factor into the strong tracking filter (STF) to prevent the tracking model mismatch. Finally, the target shape is expanded in the PMBM update stage based on the completion of centroid estimation, and the likelihood function is used to update the model probability. The simulation shows that the proposed algorithm can effectively estimate the number and state of multiple maneuvering extended targets.

Keywords: Poisson multi-Bernoulli mixture filtering; Gamma Gaussian inverse Wishart; extended target tracking; strong tracking filter; interactive multiple models

http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2021-04-01; **Accepted**: 2021-07-03; **Published online**: 2021-07-30 09:11
URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210729.1607.002.html
Foundation items: National Natural Science Foundation of China (62263007,62061010,62161007); Central Government Guided Local Science and Technology Development Fund Project (2022ZYZX2001); Gaungxi Natural Science Foundation (2019GXNSFBA245072); Director Fund of Guangxi Key Laboratory of Precision Navigation Technology and Application; Innovation Training Program for College Students (201910595164); Innovation Project of GUET Graduate Education

* **Corresponding author**. E-mail: wusunyong121991@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0116

机场到港旅客换乘时间效率评价指标优选

罗谦[1,2,*], 李琦[1], 文涛[2], 陈丰华[3], 朱萍[4]

(1. 西华大学 计算机与软件工程学院, 成都 610039; 2. 中国民用航空总局第二研究所, 成都 610041;
3. 广州白云国际机场股份有限公司, 广州 510000; 4. 重庆医科大学 教务处, 重庆 400016)

摘 要: 换乘时间效率评价对提升机场综合交通的换乘效率有着重大意义,传统的指标优选方法应用在民航机场到港旅客换乘评价中难以真实反映指标关系并且缺乏指标筛选规则。针对上述问题,根据指标体系中目标层、因素层、指标层各自与指标的关联特征,抽象出指标的重要性、关联均衡性、独立性3种数据关系,并使用DS证据理论融合得到指标综合关系。基于指标综合关系和综合评价方法,定义评估精度作为筛选指标的理论支撑,并设计算法构建优选模型。使用国内37个机场的到港旅客换乘时间数据进行实证分析,结果表明:指标综合关系能够更精确地反映指标关系,优化了指标排序,比基于主成分分析和最大互信息系数的指标排序更优异,能剔除更多冗余指标。评估精度将可剔除的指标直观展示出来,为筛选指标提供了切实依据,完善了指标优选模型。

关 键 词: 航空运输; 指标优选方法; DS证据理论; 换乘时间效率; 指标体系构建
中图分类号: U8
文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2022)12-2365-08

机场地面交通中心(ground transport center, GTC)是空港综合交通枢纽的重要组成部分,是旅客换乘的服务载体,到港旅客的换乘时间效率是决定GTC换乘服务品质的核心要素之一,直接影响着旅客的换乘体验。2021年,中共中央、国务院印发的《国家综合立体交通网规划纲要》指出,预计2021—2035年旅客出行量年均增速为3.2%左右,民航出行占比不断提升。民航旅客出行量的逐年增加必然会促进GTC飞速发展,对GTC的换乘效率无疑会是重大考验。掌握到港旅客换乘时间效率情况对于提升GTC的换乘效率有着重大意义,因此迫切需要构建一套科学实用的指标体系,以便对其做出客观正确的评价。

指标优选是指标体系构建过程中的核心关节,目的是通过计算指标数据关系,筛选出"低冗余、高影响"的指标,确保指标体系构建的科学性和合理性。国内外学者们对此展开了大量的研究,并取得了一定的成果。李盛阳等[1]通过计算指标扰动对目标值的影响情况来优选指标。丛玮等[2]采用灰色关联聚类的方法计算指标与指标之间的灰色绝对关联度,筛选最具代表性的指标。Tang等[3]使用特征提取的方法,从指标集中提取符合要求的指标。杨柳等[4]通过信息融合的方法计算指标可信度,根据指标可信度对指标进行排序和优选。张耀天等[5]提出了一种基于层次分析法的可变权重决策方法,对评价指标的权重进行动态修正,降低区分度不高的指标权重,提升区分度高的指标权重。Zhu等[6]使用主成分分析法(principal component analysis, PCA)对指标数据集降维,从大量冗余的指标中筛选出部分关键

收稿日期: 2021-03-15; **录用日期**: 2021-06-20; **网络出版时间**: 2021-06-30 14:27
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210630.1105.001.html
基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1601200); 四川省科技计划(2019JDTD0001,20ZDYF3373)
* **通信作者**. E-mail: luoqian@caacetc.com

引用格式: 罗谦, 李琦, 文涛, 等. 机场到港旅客换乘时间效率评价指标优选[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2365-2372. LUO Q, LI Q, WEN T, et al. Optimization of transfer time efficiency evaluation index for airport arriving passengers[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2365-2372(in Chinese).

指标。王丽萍等[7]将PCA中的协方差矩阵替换为最大互信息系数矩阵,筛选强相关因子。徐春荣等[8]在专家评分的基础上使用群组决策最大特征根法对指标进行初步筛选,并对初选指标进行相关性分析得到优选的指标体系。迟国泰等[9]根据指标间相关系数剔除冗余指标,使用PCA的因子负载来判断剩余指标对评价结果的影响程度,进而得到优选指标。Zhang[10]根据文献研究法、问卷调查法、专家咨询法等方法对指标的影响因素进行分析,使用DS证据综合法构建群体决策综合判断矩阵,并结合层次分析法确定指标权重筛选指标。

上述方法虽能达到指标优选的目的,但应用在民航机场到港换乘评价时,仍存在2个问题:①量化指标数据关系时未紧密结合指标体系结构特征,指标关系反映不够精确,据此得到的指标排序还有优化的余地;②传统指标优选方法常依据经验制定指标筛选规则,缺乏理论支撑,优选模型有待完善。针对以上问题,本文首先从指标体系结构特征中抽象出重要性、关联均衡性、独立性三重数据关系,使用DS证据理论融合得到指标综合关系,根据指标综合关系得到更优异的指标排序。然后,基于指标排序和综合评价方法,定义评估精度并设计优选算法完善优选模型。最后,通过国内37个机场的到港旅客换乘时间数据实证分析验证模型的有效性,同时构建科学合理的到港旅客换乘时间效率评价指标体系。

1 指标数据关系量化

当前,应用最广泛的指标体系是立体化塔式结构的3层指标体系(目标层、因素层、指标层),传统平面化的计算方法难以全面、真实地反映3层结构指标体系的数据关系。本文将指标体系数据关系和指标体系结构特征相关联,从3层结构指标体系的目标($\boldsymbol{Y}$)、因素($\boldsymbol{Y}_j, j\in[1,g]$;$g$为因素个数)、指标($x_i, i\in[1,m]$;$m$为指标个数)中对应抽象出指标与目标、指标与因素、指标与指标之间的3种数据关系,分别表示为:$x_i\leftrightarrow\{x_1,x_2,\cdots,x_m\}$;$x_i\leftrightarrow\boldsymbol{Y}_j, i\in[1,m], j\in[1,m]$;$x_i\leftrightarrow x_k, i\in[1,m], k\in[1,m]$。3种数据关系分别反映指标的重要性、关联均衡性和独立性,根据各自特点采取不同方法量化,从而形成全方位、立体化的指标数据关系量化方法。

1.1 重要性

重要性诠释的是指标对目标的影响程度。PCA[5]不仅能够用于降维,其因子载荷矩阵[6-7]也能反映出指标对目标的影响情况。使用PCA来量化指标与目标之间的数据关系,将指标在各个主成分上因子载荷的绝对值作为指标重要性的评分,值越大,表示该指标对目标影响越大。

首先,将指标数据集标准化,并得到其协方差矩阵$\boldsymbol{P}_{m\times m}$,$m$为指标个数。然后,由$|\boldsymbol{P}-\lambda\boldsymbol{a}|=0$得到$\boldsymbol{P}$的特征值$\lambda$及单位特征向量$\boldsymbol{a}$,并将特征值$\lambda_i$按照大小排序,使得$\lambda_1\geqslant\lambda_2\geqslant\cdots\geqslant\lambda_m\geqslant0$。

设指标x_i在第j主成分上因子载荷为b_{ij},则指标x_i重要性的计算公式为

$$P_i=\max(|b_{ij}|)=\max(|a_{ij}\sqrt{\lambda_i}|) \tag{1}$$

1.2 关联均衡性

关联均衡性诠释的是指标和因素之间的关联情况。使用距离相关系数[11]计算指标和因素的关联度,引入Gini系数计算关联度的均衡性[4],关联度越均衡,则指标和因素的关系越稳定。

设有矩阵$\boldsymbol{M}$、$\boldsymbol{N}$,其样本距离协方差和样本距离方差分别为$\sqrt{\mathrm{dCov}_n^2(\boldsymbol{M},\boldsymbol{N})}$和$\sqrt{\mathrm{dVar}_n^2(\boldsymbol{M})}$,则有$\boldsymbol{M}$、$\boldsymbol{N}$的关联度$\mathrm{dCor}(\boldsymbol{M},\boldsymbol{N})$为

$$\mathrm{dCor}(\boldsymbol{M},\boldsymbol{N})=\begin{cases}\sqrt{\dfrac{\mathrm{dCov}_n^2(\boldsymbol{M},\boldsymbol{N})}{\sqrt{\mathrm{dVar}_n^2(\boldsymbol{M})\cdot\mathrm{dVar}_n^2(\boldsymbol{N})}}} & \mathrm{dVar}_n^2(\boldsymbol{M})\cdot\mathrm{dVar}_n^2(\boldsymbol{N})>0\\ 0 & \mathrm{dVar}_n^2(\boldsymbol{M})\cdot\mathrm{dVar}_n^2(\boldsymbol{N})=0\end{cases} \tag{2}$$

升序排列指标x_i对各个因素的关联度表示为$q_{i1},q_{i2},\cdots,q_{ig}$,关联均衡性$G_i$为

$$G_i=\frac{1}{g}+\frac{2}{g\sum_{j=1}^{g}q_{ij}}\sum_{k=1}^{g-1}(g-k)q_{ik} \tag{3}$$

式中:$j=1,2,\cdots,k,\cdots,g$,g为因素个数;q_{ij}、q_{ik}分别为指标x_i对因素j、k的关联度。

1.3 独立性

独立性诠释的是指标和指标之间的依赖关系,独立性越强,表明指标的依赖越低,越应该保留。使用最大互信息系数[3](maximal information coefficient, MIC)计算指标和指标之间的相关性

http://bhxb.buaa.edu.cn

来表示指标之间的依赖情况。

给定 2 个随机连续变量 α 和 β,假设其概率密度分别为 $p(\alpha)$ 和 $p(\beta)$,联合概率密度为 $p(\alpha,\beta)$,则 α 和 β 之间的互信息 I 和最大互信息系数 MIC 分别为

$$I(\alpha;\beta) = \iint p(\alpha,\beta)\log_2\frac{p(\alpha,\beta)}{p(\alpha)p(\beta)}\mathrm{d}\alpha\mathrm{d}\beta \tag{4}$$

$$\mathrm{MIC}(\alpha;\beta) = \max_{uv<H}\frac{I(\alpha;\beta)}{\log_2\min(u,v)} \tag{5}$$

式中:u、v 分别为在 α、β 方向上划分格子的个数;H 取值为数据量的 0.6 次方。

指标 x_i 独立性计算公式为

$$R_i = 1 - \frac{1}{m-1}\sum_{x_j\in S_{m-1}}\mathrm{MIC}(x_i;x_j) \tag{6}$$

式中:$x_i\in Q$;$S_{m-1}=Q-x_i$;Q 为指标集。

2　基于指标综合关系的优选模型

2.1　指标综合关系

结合指标体系结构特征抽象出来的 3 种指标数据关系,一定程度上反映了不同层面的业务关系,3 种数据关系的量化结果可以视为“专家”在不同维度对各个指标的评价值,为了消除“专家”之间的“偏见”,使用 DS 证据理论将其融合得到指标的综合关系。3 种数据关系的定量表示视为 DS 证据理论的基本概率赋值函数[12](basic probability assignment, BPA),融合结果视为指标综合关系的量化值。

为了解决 DS证据理论融合过程中证据冲突的难题,使用相容系数[13]优化证据可信度[14]来避免证据冲突。

设识别框架 $\boldsymbol{\Theta}=(A_1,A_2,\cdots,A_\eta)$,证据集 $\boldsymbol{E}=(E_1,E_2,\cdots,E_\varpi)$ 对应的 BPA 为 $m_1,m_2,\cdots,m_\varpi$,定义证据距离矩阵 $\boldsymbol{D}_{\varpi\times\varpi}=[d_{ij}]_{\varpi\times\varpi}$,其中,$d_{ij}$ 由相容系数计算得到

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\eta}\left(1-\frac{2m_i(A_k)m_j(A_k)}{m_i^2(A_k)+m_j^2(A_k)}\right)} \tag{7}$$

式中:η 为 $\boldsymbol{\Theta}$ 中命题个数;d_{ij} 的最大值为 $\max d_{ij}$。

首先,归一化矩阵 $\boldsymbol{D}$,得到正则化矩阵 $\overline{\overline{\boldsymbol{D}}}$,$\overline{\overline{\boldsymbol{D}}}$ 中元素 $\overline{\overline{d_{ij}}}=d_{ij}/\max d_{ij}$,则 $\overline{\overline{d_{ij}}}\in[0,1]$。定义证据 E_i 到证据集 $\boldsymbol{E}$ 的均方欧氏距离为

$$s_i = \frac{1}{\varpi}\sum_{j=1}^{\varpi}\overline{\overline{d_{ij}}}^2 = \frac{1}{\varpi}\sum_{j=1}^{\varpi}\frac{d_{ij}}{\max d_{ij}} \tag{8}$$

式中:ϖ 为证据个数;$s_i\in[0,1]$。s_i 的大小反映的是证据 E_i 与其他证据之间的差异程度,s_i 较大时,差异较大,可信度因子 ε_i 较小;反之,则差异较小,可信度因子较大。即 $s_i\to1$ 时,$\varepsilon_i\to0$;$s_i\to0$ 时,$\varepsilon_i\to1$。

设 $\varepsilon_i=f(s_i)$,则 $f(s_i)$ 应满足如下条件:①$f(s_i)$ 是单调递减函数;②s_i 较小时 $f(s_i)$ 衰减缓慢,s_i 较大时 $f(s_i)$ 迅速衰减到零。综上,$f(s_i)$ 应是一条指数相关单调递减曲线,则可定义可信度因子为

$$\varepsilon_i = f(s_i) = (1-s_i)k^{-s_i} \tag{9}$$

当 $k=2.965$ 时,关系曲线最符合要求,则有

$$\varepsilon_i = (1-s_i)2.965^{s_i} \tag{10}$$

设原始证据的 BPA 为 $m_i(A_j)$,修正后的 BPA 为 $m_i''(A_j)$,则有

$$m_i''(A_j) = m_i(A_j)\varepsilon_i \tag{11}$$

指标综合关系充分考虑了指标的业务关系和数据关系,能够真实反映指标的重要程度,得到优异的指标排序,为指标优选提供了依据。

2.2　优选模型

2.2.1　筛选指标的判定规则

设评价对象集为 $\boldsymbol{Y}=[y_1,y_2,\cdots,y_n]$,$n$ 为评价对象数量;原始指标集为 $\boldsymbol{X}=[x_1,x_2,\cdots,x_m]$,$m$ 为原始指标集的指标总数;优选指标集为 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{opt}}$;根据指标综合关系将原始指标集降序排序得到排序指标集 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{order}}$;取排序指标集中前 $k(k\leqslant m)$ 个指标得到评价指标集,表示为 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{order}\text{-}k}$。

指标优选希望使用比原始指标集更少的指标得到相同甚至更优的评价结果。但一方面,指标数量越多,涵盖目标的信息就越广,试图使用少量的指标得到更优的评价结果显得不切实际。另一方面,指标之间存在冗余,剔除冗余指标后进行评价,得到与使用原始指标集相同的评价结果却是切实可行的,指标优选的意义即在于此。因此,本文以使用原始指标集的评价结果作为基准,将使用评价指标集的评价结果与之比较,衍生出评估精度的定义,作为指标筛选规则的理论支撑。

为使得筛选指标的标准有效且统一,需要使用综合评价方法进行评价,使用聚类方法给评价结果聚类并据此给评价对象赋标签。综合评价研究中常采用 5 类标签[15]或 3 类标签[16],5 类标签标示优、良好、一般、较差、差,3 类标签标示好、中、差。现有综合评价方法适用条件不同且各有利弊[17],其中熵权 TOPSIS 方法[18-20]具有原理简单、数据利用充分、可防止人为赋权影响评价结果等优点,因此本文采用该方法进行综合评价。为了兼顾各分类中指标的范围和数量尽量相近,采

http://bhxb.buaa.edu.cn

用自然断点法[21]做为聚类方法。

定义 1 标签集。标签集是换乘时间效率评价结果的集合,可表示为 $\boldsymbol{F}_k=[f_{k1},\cdots,f_{ki},\cdots,f_{kn}]$。其中,$n$ 为评价对象个数,k 为评价指标集中指标个数;f_{ki}表示第 i 个评价对象的标签值,若是 5 类标签,$f_{ki}\in\{1,2,3,4,5\}$,若是 3 类标签,$f_{ki}\in\{1,2,3\}$。

定义 2 评估精度。记使用原始指标集进行评价得到的各评价对象的标签值为 f_{mi},设 c 为 $\boldsymbol{F}_k$ 中满足 $f_{ki}=f_{mi}$ 的个数,评估精度 A 可表示为

$$A=(c/n)\times 100\% \tag{12}$$

由于评估精度的定义是以使用原始指标集的评价结果作为基准,当 $k=m$ 时,$A=100\%$,评估精度必然能够达到 100%。若当 $k<m$ 时,$A=100\%$,则可剔除 $m-k$ 个指标,可以预见的是,指标排序越优异,$A=100\%$ 时 k 越小,能够剔除的指标越多。

综上,指标筛选规则为:当评估精度达到 100% 时,评价指标集即为优选指标集,不在评价指标集之内的指标即可予以剔除。

2.2.2 算法设计

精确全面的指标关系和科学严谨的优选算法是影响指标体系科学性的两大关键点。目前,大多数学者聚焦在指标关系研究上,缺乏对优选算法的研究。本文基于指标综合关系和评估精度设计优选算法,从原始指标集中筛选优异指标形成优选指标集,完善优选模型。

优选算法具体步骤如下:

步骤 1 基于原始指标集 $\boldsymbol{X}$,使用熵权 TOPSIS 评价模型综合评价各个目标对象,使用自然断点法将评价结果聚类并据此给评价对象赋予标签,得到基准标签集 $\boldsymbol{F}_m$,令 $k=1$。

步骤 2 从排序指标集 $\boldsymbol{X}_{\text{order}}$ 中取出 $k(k\leqslant m)$ 个指标形成评价指标集 $\boldsymbol{X}_{\text{order-}k}$。

步骤 3 基于 $\boldsymbol{X}_{\text{order-}k}$,使用熵权 TOPSIS 评价模型综合评价各个目标对象,使用自然断点法将评价结果聚类并据此给评价对象赋予标签,得到标签集 $\boldsymbol{F}_k$。

步骤 4 基于 $\boldsymbol{F}_k$ 和 $\boldsymbol{F}_m$,计算 $\boldsymbol{X}_{\text{order-}k}$ 的评估精度。

步骤 5 如果评估精度为 100%,跳转到步骤 6;否则,令 $k=k+1$,跳转到步骤 2。

步骤 6 优选指标集 $\boldsymbol{X}_{\text{opt}}=\boldsymbol{X}_{\text{order-}k}$,结束。

完整优选模型如图 1 所示。

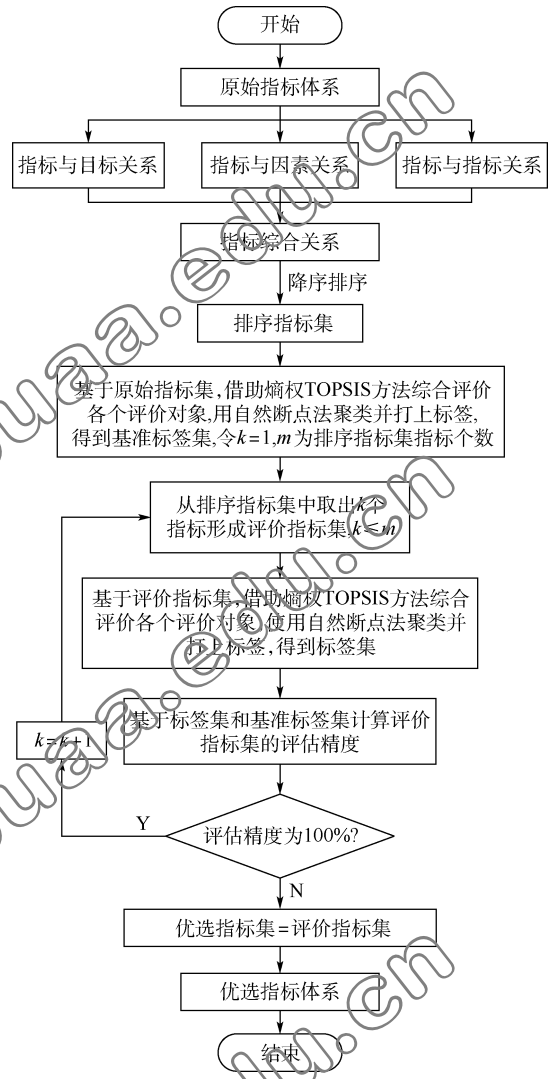


图 1 完整优选模型流程示意图

Fig. 1 Flow diagram of complete optimization model

3 实证分析

3.1 原始指标体系与实验方法

为验证优选模型的有效性,构建科学实用的到港旅客换乘时间效率评价指标体系,根据到港旅客换乘业务特征,将其分为 5 个阶段:落地等待、下机摆渡、至行李转盘步行、行李等待、候车。分别从换乘时间、旅客满意度、预期达标率(可容忍换乘时间内完成换乘的人数占总人数的比率)3 个方面共提取出 15 个指标来反映各个机场对于到达旅客换乘时间效率的综合情况,构建出3层结构的原始指标体系,如表 1 所示。

结合原始指标体系结构特征抽象出 3 种数据关系。指标与目标、指标与因素、指标与指标之间的数据关系可分别表示为:$x_i\leftrightarrow\{x_1,x_2,\cdots,x_{15}\}$,$i\in[1,15]$;$x_i\leftrightarrow\boldsymbol{Y}_j$,$i\in[1,15]$,$j\in[1,3]$,$\boldsymbol{Y}_1=[x_1,x_2,x_3,x_4,x_5]$,$\boldsymbol{Y}_2=[x_6,x_7,x_8,x_9,x_{10}]$,$\boldsymbol{Y}_3=[x_{11},$

http://bhxb.buaa.edu.cn

表 1　原始指标体系

Table 1　Original index system

目标	因素	指标
换乘时间效率 Y	换乘时间 Y_1	落地等待时间 x_1
		下机摆渡时间 x_2
		至行李转盘步行时间 x_3
		行李等待时间 x_4
		平均候车时间 x_5
	旅客满意度 Y_2	落地等待时间满意度 x_6
		下机摆渡时间满意度 x_7
		至行李转盘步行时间满意度 x_8
		行李等待时间满意度 x_9
		平均候车时间满意度 x_{10}
	预期达标率 Y_3	落地等待时间达标率 x_{11}
		下机摆渡时间达标率 x_{12}
		至行李转盘步行时间达标率 x_{13}
		行李等待时间达标率 x_{14}
		平均候车时间达标率 x_{15}

$x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}]$;$x_i \leftrightarrow x_k, i \in [1,15], k \in [1,15]$。

按照 5 类标签和 3 类标签进行 2 组实验,在这 2 种情况下分别采用 PCA 和 MIC 方法计算指标关系与本文的指标综合关系进行优选对比,分析评估精度达到 100% 之后的情况。从 CAPSE 报告[22]中收集 37 个国内机场的到港旅客换乘时间数据进行实验。

3.2　结果与分析

将 3 种数据关系视为 3 个证据,根据指标数据关系量化方法量化,结果视为各自证据的 BPA,使用式(11)对 BPA 进行修正,将修正之后的 BPA 使用 DS 证据理论融合,得到指标综合关系,将指标按照指标综合关系的量化结果排序(见表 2)。

由表 2 可以看出,行李等待阶段提取的指标在各自因素内排序都是最末,而候车阶段提取的指标在各自因素内排序都较为靠前,这与实际情况相符。随着智慧机场建设的逐步推进,行李分拣系统等一系列智能系统的广泛应用缩短了旅客等待行李的时间,行李等待时间已不是影响旅客换乘时间效率的关键因素。而由于 GTC 换乘的复杂性,各种交通工具的协调运行控制仍然是一大难题,候车时间仍是旅客关注的重点,极大地影响着到港旅客的换乘时间效率。在指标综合关系量化结果的指导下,行李等待时间满意度指标 x_9 的指标综合关系值最低,代表在考虑指标的重要性、关联均衡性、独立性之后,指标 x_9 的可保留性最低。但是否剔除指标 x_9,不能依据主观臆测,应根据评估精度,比较指标在评估中的作用来判断。

表 2　指标综合关系量化结果排序

Table 2　Ranking of quantitative results of comprehensive index relationship

因素	指标	因素内排序	综合排序
Y_1	x_1	1	4
	x_2	4	9
	x_3	2	7
	x_4	5	11
	x_5	3	8
Y_2	x_6	4	13
	x_7	3	5
	x_8	2	2
	x_9	5	15
	x_{10}	1	1
Y_3	x_{11}	2	6
	x_{12}	4	12
	x_{13}	3	10
	x_{14}	5	14
	x_{15}	1	3

分别在 5 类标签和 3 类标签的情况下,基于指标综合关系、PCA 指标关系、MIC 指标关系使用本文优选算法计算评估精度,比较评估精度达到 100% 之后的情况。其中,PCA 的阈值取 85%,即当累积方差贡献率达到 85% 时,提取主成分,计算各指标在主成分上的因子载荷作为 PCA 指标关系[9]。过往经验表明[7],MIC 的网格数取 15 × 15 时能取得较好的效果,即式(5)中 $H = 0.6$, $u = v = 15$。对比实验结果如图 2 和图 3 所示。

图 2 和图 3 都能看出,当评估精度达到 100% 之后,再增加指标并不会影响评价结果,也就是说余下的指标均可剔除。图 2 表示,5 类标签情况下,根据指标综合关系得到的指标排序,使用前 14 个指标达到了评估精度的 100%,可剔除最后一个指标,而此时依据 PCA 指标关系和 MIC

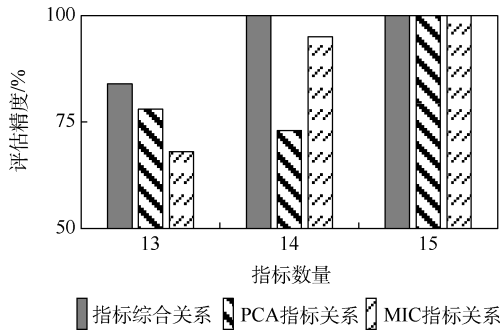


图 2　五类标签下评估精度结果比较

Fig. 2　Comparison of evaluation accuracy results under five kinds of labels

http://bhxb.buaa.edu.cn

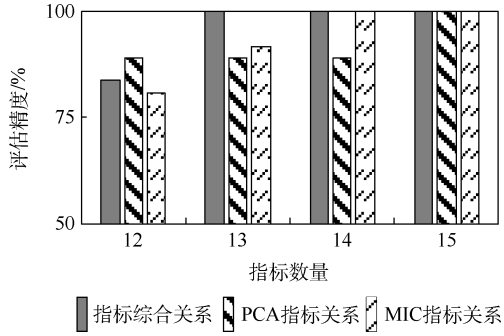


图3 三类标签下评估精度结果比较

Fig. 3 Comparison of evaluation accuracy results under three kinds of labels

指标关系得到的指标排序,使用优选算法则无法剔除冗余指标,没有体现出优选效果。3类标签相较5类标签容错的阈值更广,因此有机会剔除更多的指标。图3表示,3类标签情况下,根据指标综合关系得到的指标排序使用前13个指标达到了评估精度的100%,可剔除后2个指标,此时基于PCA指标关系得到的指标排序仍然无法剔除指标,基于MIC指标关系得到的指标排序只能剔除1个指标。上述实验结果表明,将指标体系数据关系和指标体系结构特征结合起来抽象出的重要性、关联均衡性、独立性反映了指标不同层面的特性,融合三者得到的指标综合关系比单一的PCA、MIC方法得到的指标关系更加真实准确,排序结果更加优异,在100%评估精度的情况下能够剔除更多的冗余指标,具有更好的优选效果。此外,传统的指标优选算法常以经验制定优选规则,缺乏切实的理论支撑。本文以原始指标集的评价结果作为基准,从指标优选的意义出发,定义评估精度作为筛选指标的理论支撑,据此提出优选规则及算法,完善了优选模型。从图2和图3即可看出,评估精度能够将可剔除的指标直观展示出来,筛选指标有据可依,优选结果清楚明晰。

综上,根据指标综合关系,在5类标签情况下剔除指标 x_9,在3类标签情况下剔除指标 x_9、x_{14},得到科学合理的到港旅客换乘时间效率评价指标体系。

4 结 论

本文为构建科学合理的换乘时间效率评价指标体系,基于指标综合关系构建优选模型来筛除冗余指标,研究结果表明:

1)结合指标体系结构特征抽象出重要性、关联均衡性、独立性三重数据关系,融合得到指标综合关系,能够更加全面地反映指标关系,优化了指标排序。

2)定义评估精度并设计优选算法完善了指标优选模型,使得在民航机场到港换乘评价领域中筛选指标能够有据可依,优选结果清楚直观。

3)为空港GTC的换乘时间效率评估提供了指标体系支撑,在北京首都国际机场、北京大兴国际机场的综合交通运行评估中得到实际应用。第三方评估也可基于历史评估对象数据,采用本文模型优选指标构建指标体系,对现有评估对象做出科学合理的评价。

下一步考虑在本文构建的指标体系的基础上,结合数据特征和业务实际研究综合评价方法,并对各机场到港旅客换乘时间效率进行评价分析,提出相应优化建议。

参考文献(References)

[1] 李盛阳,张晓武,邢立宁. 基于灵敏度分析的动态指标选取方法[J]. 计算机仿真,2005,22(3):120-123.
LI S Y, ZHANG X W, XING L N. The method of dynamic selecting measures based on sensitivity analysis[J]. Computer Simulation, 2005, 22(3): 120-123(in Chinese).

[2] 丛玮,胡明华,张晨. 复杂性指标体系的构建及精炼方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2012,12(5):130-134.
CONG W, HU M H, ZHANG C. Construction and refinement method of metrics system[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2012, 12(5): 130-134(in Chinese).

[3] TANG B, TANG J, LIU Y, et al. Comprehensive evaluation and application of GIS insulation condition. Part 1: Selection and optimization of insulation condition comprehensive evaluation index based on multi-source information fusion[J]. IEEE Access, 2019, 7: 88254-88263.

[4] 杨柳,汪妮,解建仓,等. 基于多源信息融合决策的灌区生态环境评价指标优选[J]. 农业工程学报,2015,31(14):225-231.
YANG L, WANG N, XIE J C, et al. Index optimization of eco-environment evaluation in irrigation district based on multi-source information fusion decision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(14): 225-231(in Chinese).

[5] 张耀天,张旭成,贾明顺,等. 基于层次分析法的自适应决策评价方法[J]. 北京航空航天大学学报,2016,42(5):1065-1070.
ZHANG Y T, ZHANG X C, JIA M S, et al. Adaptive evaluation method based on analytic hierarchy process[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(5): 1065-1070(in Chinese).

[6] ZHU Y M, HIPEL K W, KE Y G, et al. Establishment and optimization of an evaluation index system for brownfield redevelopment projects: An empirical study[J]. Environmental Modelling and Software, 2015, 74: 173-182.

[7] 王丽萍,李宁宁,马皓宇,等. MIC-PCA耦合算法在径流预

http://bhxb.buaa.edu.cn

报因子筛选中的应用[J]. 中国农村水利水电,2018(9):36-41.
WANG L P,LI N N,MA H Y,et al. Research on the application of MIC-PCA algorithm in screening runoff forecast factors [J]. China Rural Water and Hydropower,2018(9):36-41(in Chinese).

[8] 徐春荣,任文婧,周泓. 航空发动机研发能力建设项目后评价指标体系[J]. 北京航空航天大学学报,2014,40(8):1160-1164.
XU C R,REN W J,ZHOU H. Post-evaluation index system for aero-engine R & D capacity building projects[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(8):1160-1164(in Chinese).

[9] 迟国泰,曹婷婷,张昆. 基于相关-主成分分析的人的全面发展评价指标体系构建[J]. 系统工程理论与实践,2012,32(1):111-119.
CHI G T,CAO T T,ZHANG K. The establishment of human all-around development evaluation indicators system based on correlation-principle component analysis[J]. Systems Engineering-Theory & Practice,2012,32(1):111-119(in Chinese).

[10] ZHANG Y. Construction of bid evaluation index system in government public project green procurement in China based on D-S evidence theory[J]. Sustainability,2020,12(2):1-15.

[11] SZEKELY G J,RIZZO M L,BAKIROV N K. Measuring and testing dependence by correlation of distances[J]. Annals of Statistics,2007,35(6):2769-2794.

[12] 师俊朋,胡国平,王馨. 基于证据融合的雷达反隐身性能评估方法[J]. 北京航空航天大学学报,2015,41(6):1095-1101.
SHI J P,HU G P,WANG X. Evaluation method for radar anti-stealth performance based on evidence fusion[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(6):1095-1101(in Chinese).

[13] 朱友清,周石琳,邹焕新. 基于相容系数的冲突证据合成方法及评价准则[J]. 系统工程与电子技术,2014,36(6):1118-1123.
ZHU Y Q,ZHOU S L,ZOU H X. Combination method of conflict evidences and evaluation rule based on compatibility ratio [J]. Systems Engineering and Electronics,2014,36(6):1118-1123(in Chinese).

[14] 张盛刚,李巍华,丁康. 基于证据可信度的证据合成新方法[J]. 控制理论与应用,2009,26(7):812-814.
ZHANG S G,LI W H,DING K. A novel approach to evidence combination based on the evidence credibility[J]. Control Theory & Applications,2009,26(7):812-814(in Chinese).

[15] 彭金栓,方媛,徐磊. 基于突变模型的轨道换乘效率评价[J]. 都市快轨交通,2017,30(4):50-54.
PENG J S,FANG Y,XU L. Rail transfer efficiency evaluation based on catastrophe model[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2017,30(4):50-54(in Chinese).

[16] 张建平,胡明华,刘卫东. 终端区空中交通管制运行品质综合评价[J]. 西南交通大学学报,2012,47(2):341-347.
ZHANG J P,HU M H,LIU W D. Integrated evaluation for operation performance of air traffic control in terminal area[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2012,47(2):341-347(in Chinese).

[17] 吕雅慧,郧文聚,张超,等. 基于 TOPSIS 和 BP 神经网络的高标准农田综合识别[J]. 农业机械学报,2018,49(3):196-204.
LV Y H,YUN W J,ZHANG C,et al. Multi-characteristic comprehensive recognition of well-facilitied farmland based on TOPSIS and BP neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3):196-204(in Chinese).

[18] JEGOVSKA T,KOKER R,CAKAR T. Green supplier selection using fuzzy multiple-criteria decision-making methods and artificial neural networks[J]. Computational Intelligence and Neuroscience,2020,2020:8811834.

[19] LIU X,ZHOU X,ZHU B,et al. Measuring the maturity of carbon market in China:An entropy-based TOPSIS approach[J]. Journal of Cleaner Production,2019,229:94-103.

[20] XIAO W,LV X J,ZHAO Y L,et al. Ecological resilience assessment of an arid coal mining area using index of entropy and linear weighted analysis:A case study of Shendong Coalfield,China[J]. Ecological Indicators,2020,109:105843.

[21] 武增海,李涛. 高新技术开发区综合绩效空间分布研究——基于自然断点法的分析[J]. 统计与信息论坛,2013,28(3):82-88.
WU Z H,LI T. The comprehensive performance evaluation of the high-tech development zone:Analysis based on the natural breakpoint method[J]. Statistics & Information Forum,2013, 28(3):82-88(in Chinese).

[22] CAPSE. 千万级机场乘机时间效率分析[R]. 合肥:CAPSE,2019.
CAPSE. Time efficiency analysis of 10 million class airports [R]. Hefei:CAPSE,2019(in Chinese).

http://bhxb.buaa.edu.cn

Optimization of transfer time efficiency evaluation index for airport arriving passengers

LUO Qian[1,2,*], LI Qi[1], WEN Tao[2], CHEN Fenghua[3], ZHU Ping[4]

(1. School of Computer and Software Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China;
2. The Second Research Institute of Civil Aviation Administration of China, Chengdu 610041, China;
3. Guangzhou Baiyun International Airport Company Limited, Guangzhou 510000, China;
4. Dean's Office, Chongqing Medical University, Chongqing 400016, China)

Abstract: The evaluation of transfer time efficiency is of great significance to improve the transfer efficiency of airport comprehensive transportation. The traditional index optimization method is difficult to truly reflect the index relationship and lacks of index screening rules in the transfer evaluation of inbound passengers at civil aviation airports. In light of the aforementioned issues, according to the target layer, factor layer, index layer and the correlation characteristics of indicators in the index system, this paper abstracts the importance, correlation equilibrium and independence of indicators, and uses DS evidence theory to fuse the comprehensive relationship of indicators. Based on the comprehensive relationship of indicators and the comprehensive evaluation method, evaluation accuracy is defined as the theoretical support of screening indicators, and the algorithm is designed to build the optimization model. Finally, the paper uses the data of 37 domestic airports to make an empirical analysis. The results show that the index comprehensive relationship can reflect the index relationship more accurately and optimize the index ranking, which is better than the index ranking based on principal component analysis and maximum mutual information coefficient, and can eliminate more redundant indexes. The evaluation accuracy identifies the indexes that may be intuitively eliminated, offering a useful basis for choosing indexes and enhancing the index optimization model.

Keywords: air transport; index optimization method; DS evidence theory; transfer time efficiency; index system construction

http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2021-03-15; **Accepted**: 2021-06-20; **Published online**: 2021-06-30 14:27

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210630.1105.001.html

Foundation items: National Key R & D Program of China (2018YFB1601200); Sichuan Science and Technology Program (2019JDTD0001, 20ZDYF3373)

* **Corresponding author**. E-mail: luoqian@caacetc.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0147

丝束同轴冷阴极电子束熔丝特性及 TC4 成形组织

许海鹰[1,*], 杨光[1], 张伟[2], 杨波[1], 桑兴华[1], 王壮[1]

(1. 中国航空制造技术研究院 高能束流发生器实验室, 北京 100024;
2. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 针对热阴极电子束轴侧熔丝与丝束同轴冷阴极电子束熔丝方法的特点进行分析,研究了丝束同轴冷阴极电子束熔丝增材制造熔滴过渡特点及获得滴状过渡和熔桥过渡方式需要满足的条件。采用直径 2 mm 的 TC4 钛合金丝材制备出丝束同轴冷阴极电子束熔丝增材制造的钛合金试样,对其微观组织进行分析,结果表明:与常规热阴极电子束轴侧熔丝成形的工艺相比,丝束同轴冷阴极电子束熔丝成形试样的组织表现为等轴晶与柱状晶层层交替叠加的状态,柱状晶与等轴晶尺寸明显减小,表明成形试样的晶粒细化,力学性能得到提高。

关 键 词: 丝束同轴; 冷阴极电子束; 熔丝增材制造; 钛合金; 微观组织
中图分类号: TG439.9; TM924.15; TN146
文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2022)12-2373-08

熔丝增材制造技术包括电弧熔丝增材制造[1-4]、激光熔丝增材制造[5-7]、等离子弧熔丝增材制造[8]、电子束熔丝增材制造[9-11]等技术,每种熔丝增材制造技术均有其特点及应用领域,而电子束熔丝增材制造技术是被国内外专家公认的适用于大型钛合金构件快速制造的技术。美国 Sciaky 公司已将电子束熔丝增材制造钛合金零件应用于航空航天领域[9-10],中国航空制造技术研究院研制的电子束熔丝增材制造钛合金构件已经装机应用。但上述电子束熔丝增材制造技术所用电子束源均为热阴极电子束源,热阴极电子束源固有的结构特点使其在熔丝制造过程中,金属丝材一般只能从轴侧送入到电子束轴线位置进行熔化成形,不仅使丝束对中难度大,而且易造成电子束能量过度输入,存在加热阴影区等不足之处,导致成形质量难以大幅提高。

冷阴极电子束源技术起源于 20 世纪 70 年代的苏联,已经应用于冶炼、EB-PVD、热处理等行业领域[11]。冷阴极电子束中,电子主要来自高压电场激发气体电离出的正离子轰击阴极产生的二次电子,并借助阴极、阳极形貌产生的静电场或电磁线圈产生的电磁场进行汇聚,形成能量高度集中的电子束斑,由于其产生电子方式的特殊性,可通过阴极形貌的改变获得各种形貌束斑[12-13]。2006 年,乌克兰红波公司研制出可实现“X”形束流输出的冷阴极电子束源,并将其应用于丝束同轴冷阴极电子束熔丝增材制造技术[9,13]。初步研究结果表明,此类技术的成形质量和成形效率远高于热阴极轴侧送丝的熔丝增材制造技术。

为将这一优质电子束熔丝增材制造技术实现国产化,使核心技术自主可控,中国航空制造技术研究院高能束流发生器实验室研究人员在深入研究环形冷阴极电子束产生机理、阴极形貌调节电

收稿日期: 2021-03-25; **录用日期**: 2021-06-25; **网络出版时间**: 2021-08-16 13:32
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210816.1132.001.html
基金项目: 国家自然科学基金 (51775527)
* **通信作者**. E-mail: xhyxhy@126.com

引用格式: 许海鹰, 杨光, 张伟, 等. 丝束同轴冷阴极电子束熔丝特性及 TC4 成形组织[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2373-2380. XU H Y, YANG G, ZHANG W, et al. Properties of gas discharge electron beam coaxial wire of fuse additive manufacturing and microstructure of TC4 titanium alloy[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2373-2380(in Chinese).

子束静电汇聚焦点的方法后,采用理论计算和模拟仿真的方法,于 2019 年研制了国内首台丝束同轴冷阴极电子束熔丝增材制造样机,在该样机上,针对 TC4 钛合金丝材进行了熔丝增材制造工艺试验。上海理工大学[14]基于乌克兰进口设备开展了该项技术的工艺试验。由于该项技术相对于其他增材制造技术起步较晚,有关熔滴过渡方式调控、成形组织特点,尚未得到深入研究。

本文在分析了热阴极电子束轴侧送丝、丝束同轴冷阴极电子束熔丝增材制造方法及其特点后,重点分析了丝束同轴冷阴极电子束熔丝增材制造的熔滴过渡方式、TC4 钛合金成形组织、发现采用丝束同轴冷阴极电子束熔丝增材制造 TC4 钛合金试样的微观组织中的粗大树枝晶明显减少。

1 电子束熔丝成形方法及特点

热阴极电子束轴侧熔丝的方法和丝束同轴冷阴极电子束熔丝制造方法示意图分别如图 1(a)和图 1(b)所示。从图 1(a)中可以看出,十字滑台带动导丝嘴移动,实现金属丝材的丝端与电子束轴线对中,十字滑台系统的存在,增加了系统控制的复杂程度;用于电子束熔丝成形的金属丝材直径一般为 1 ~ 3 mm,而热阴极电子束的束斑直径一般较小,通常小于 1 mm,需要通过散焦或电子束扫描方法使电子束能量最大程度输入到金属丝材的丝端位置,由于丝端接收面积有限,无论是散焦或电子束扫描,都不可避免地会使部分电子束能量输入到成形零件,使成形区域热输入过大,导致成形区域晶粒进一步长大。此外,金属丝材的丝端仅有一侧接收电子束能量,另外一侧无法接收电子束能量,形成了电子束能量接收的“阴影区”,熔丝成形运动方向指向“阴影区”时,易形成未熔合缺陷,导致该成形方向熔丝成形质量变差,从而使热阴极电子束轴侧熔丝成形的运动轨迹规划、成形自由度受到限制。

如图 1(b)所示,丝材从环形阴极轴心送入,通过导丝嘴定位到成形件上需要增材的位置,因此不需要机械结构复杂的对中机构;冷阴极电子枪的环形阴极接负高压,导丝嘴和丝材均接地,当阴-阳极之间充满气体放电产生的等离子体后,环形阴极与地之间构建的静电场,将产生可以使电子束汇聚的等离子体阳极“透镜”效应,使环形阴极产生的二次电子在丝端轴向汇聚,在送丝速度与电子束功率等工艺参数匹配时,电子束能量几乎都集中在丝材上,成形区域几乎不会有过度热输入,从而避免成形件中粗大组织的大量出现。由于丝束同轴冷阴极电子束熔丝的方法是在丝材轴向上全面加热,不存在电子束加热的“阴影区”,极大提高了电子束熔丝成形的自由度。此外,丝束同轴冷阴极电子束熔丝方法所用冷阴极电子枪的阴极是有一定厚度的环形铝阴极,在阴极内部设置有水冷通道,阴极寿命长,从而避免了热阴极电子枪由于灯丝寿命有限而需要频繁更换灯丝所产生的成形缺陷。

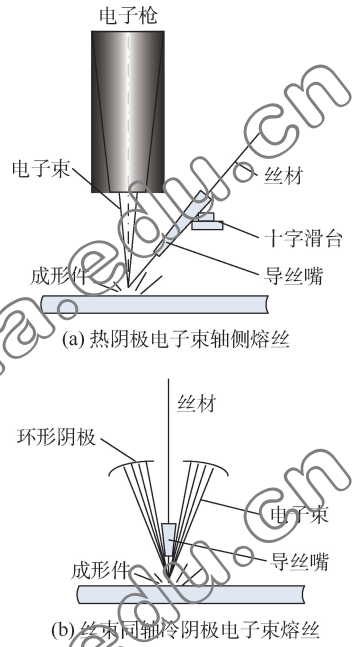


图 1 电子束熔丝方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electron beam fuse additive manufacturing method

2 丝束同轴冷阴极电子束熔丝增材制造熔滴过渡

丝束同轴冷阴极电子束熔丝增材制的质量与熔滴过渡方式密切相关,环形束斑汇聚在一起,形成一段与电子枪轴线吻合的电子能量高度汇聚的区域,沿电子枪轴线送进丝材的丝端(未形成金属液体的丝材端部)受热熔化形成熔滴,在表面张力 F_σ、重力 F_g、电磁力 F_{cz} 等的共同作用下,过渡到成形件或基板上。丝束同轴冷阴极电子束熔丝增材制造束流形貌及丝端的熔滴如图 2 所示。通常,在加速电压不变、束流恒定时,丝束同轴冷阴极电子枪的电子束焦点是具有一定长度的电子能量汇聚区域,长度为 ΔL。图 2 中,丝端至工件距离为 L_s,导丝嘴下端面至熔滴端面距离为 L_{s1}。丝端熔滴受力作用的示意图如图 3 所示。

与传统弧焊技术熔滴受力状态相比,熔滴受到的表面张力 F_σ、重力 F_g、电磁力 F_{cz} 分别可用

http://bhxb.buaa.edu.cn

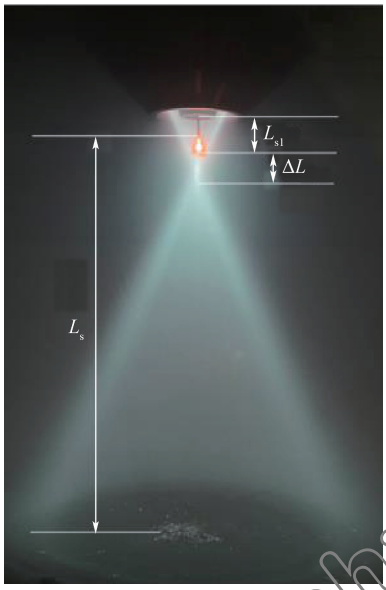


图 2　丝束同轴冷阴极电子束熔丝增材制造束流形貌及丝端熔滴

Fig. 2　Beam appearance of gas discharge electron beam coaxial wire of fuse additive manufacturing and droplet at wire top

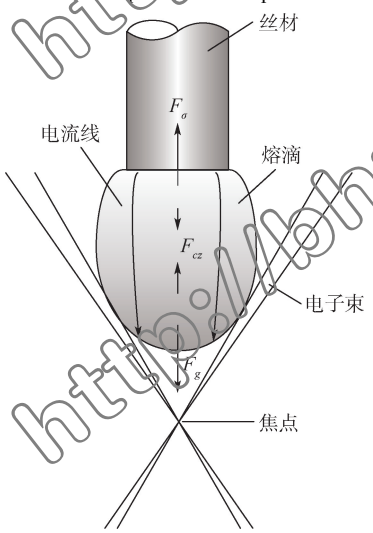


图 3　丝端熔滴受力作用示意图

Fig. 3　Schematic diagram of force acting on droplet at wire top

式(1)~式(3)表示[15]。由于丝束同轴冷阴极电子束无法像传统电弧一样流过数十甚至上百安电流,其等离子流力、斑点压力对熔滴过渡影响可以忽略不计。

$$F_\sigma = 2\pi R\sigma \tag{1}$$

式中:R 为丝材半径;σ 为表面张力系数。TC4 钛合金可以参考 Ti 的表面张力系数,取值为 1 510 × 10^{-3} N/m。

$$F_g = mg = \frac{4}{3}\pi r^3\rho g \tag{2}$$

式中:m 为质量;r 为熔滴半径;ρ 为熔滴的密度;g 为重力加速度。

如图 3 所示,环形电子束在焦点区域汇聚后逐渐发散,照射到工件表面,当丝端靠近焦点区域,电子束中的部分电子,将通过丝材流向地,在丝材与熔滴连接的颈缩处,熔滴所受电磁力 F_{cz} 表示为

$$F_{cz} = I^2\ln\left(\frac{d_D}{d_s}\right) \tag{3}$$

式中:I 为流过熔滴电流,A;d_D 为熔滴直径, mm;d_s 为丝材直径,mm。

在丝材与熔滴连接的颈缩处,熔滴所受电磁力 F_{cz} 由小截面指向大截面,将会促进熔滴过渡。

由于在丝束同轴冷阴极电子束熔丝增材制造过程中,所用束流一般仅需要数百毫安,且仅有很少一部分电子通过丝材流向地,无法像传统电弧焊一样存在弧柱,在熔滴端部和环形束流之间难以形成电弧斑点,即使形成,也很小,因此熔滴端部由小截面指向大截面的电磁力对熔滴过渡的影响可以忽略。

在丝束同轴冷阴极电子束熔丝增材制造过程中,熔滴受到的表面张力 F_σ、重力 F_g、电磁力 F_{cz} 随着熔滴大小、丝端与工件间距离 L_s 变化而变化,这些不断变化的力的组合,将会产生不同的熔滴过渡方式。

2.1　滴状过渡

熔滴大小与丝材直径 d_s、送丝速度 V_s、电子束功率 P 密切相关。

当丝材以送丝速度 V_s 通过如图 2 所示电子束能量汇聚区时,所用时间为 $\Delta L/V_s$,在时间 t 内,要使通过该区域的所有丝材从室温 T_r 上升到熔点温度 T_m,达到熔化状态,则电子枪输出电子束功率 P 需要满足:

$$P\frac{\Delta L}{V_s} \geqslant c\rho\left(\frac{\pi d_s^2}{4}\Delta L\right)(T_m - T_r)\xi \tag{4}$$

式中:P 为电子枪输出电子束功率,W;ΔL 为电子束能量汇聚区长度,cm;V_s 为送丝速度,cm/min;$c\rho$ 为丝材的容积比热容,J/(cm^3 · ℃),c 为比热容,ρ 为密度,TC4 钛合金容积比热容为 2.37 J/(cm^3 · ℃);d_s 为所用丝材直径,cm;T_m 为金属丝材熔点,℃;T_r 为室温,℃;ξ 为熔化系数,与材料的热导率、热扩散率等有关,无量纲,可通过一系列试验确定。

当成形件或基板与丝端距离较大、送丝速度较慢时,经常会出现丝端接触到电子束能量汇聚区域,金属丝材迅速熔化形成小熔滴,随着丝材继续进给,在熔滴受到向上指向丝端的表面张力 F_σ 作用下,熔滴长大,且熔滴不会超过焦点向下移

http://bhxb.buaa.edu.cn

动。随着熔滴继续长大,直到熔滴所受向下指向工件的重力 F_g、电磁力 F_{cz} 合力大于表面张力 F_σ 时,熔滴将从丝端脱落,形成滴状过渡。

根据式(1)~式(3)可知,滴状过渡基本条件为

$$F_g + F_{cz} = F_\sigma$$

即

$$F_g + F_{cz} = mg + I^2\ln\left(\frac{d_D}{d_s}\right) = \frac{4}{3}\pi r^3\rho g + I^2\ln\left(\frac{d_D}{d_s}\right) = F_\sigma \tag{5}$$

通常用于熔丝的电子束流仅有数百毫安,电子束轰击丝材,并通过丝材形成回路的电子束流就更少,即式(5)中 F_{cz} 的影响可以忽略,则

$$\frac{4}{3}\pi r^3\rho g = 2\pi R\sigma \tag{6}$$

当 $\frac{r^3}{R} = \frac{3\sigma}{2\rho g}$,形成熔滴过渡,对于半径为 R 的丝材,即当丝端与工件或成形件之间距离 L_s 大于 $2\sqrt[3]{\frac{3R\sigma}{2\rho g}}$ 时,形成滴状过渡。为了保证丝材充分熔化,则根据式(4),电子枪输出电子束流功率 P 与送丝速度 V_s、丝材半径 R 之间需要满足:

$$P \geqslant c\rho\pi R^2(T_m - T_r)\xi V_s \tag{7}$$

2.2 搭桥过渡

与滴状过渡相比,搭桥过渡熔丝增材几乎不会产生金属飞溅,有利于提高成形质量,是当前电子束熔丝增材制造领域研究的热点技术。与热阴极电子束轴侧熔丝的方法相比,丝束同轴冷阴极电子束熔丝增材制造技术在不借助复杂丝端位置监控系统时,通过工艺参数调整,即可实现搭桥过渡熔丝增材的效果。

当丝端与工件间距离 $L_s \leqslant 2\sqrt[3]{\frac{3R\sigma}{2\rho g}}$,且电子枪输出电子束流功率 P 与送丝速度 V_s 满足式(7),丝端接触熔池,由于熔池的面积远大于熔滴,此时,表面张力 F_σ 指向熔池,在表面张力 F_σ 与重力 F_g 共同作用下,丝端熔滴加速过渡。根据式(7),则送丝速度需要满足式(8)所述条件,否则,送丝速度过快,熔丝成形易产生栽丝缺陷,甚至会影响成形过程正常进行,降低成形效率。

$$V_s \leqslant \frac{P}{c\rho\pi R^2(T_m - T_r)\xi} \tag{8}$$

熔丝成形时,已知丝材材料成分、丝材半径 R、电子束流功率 P,根据式(6)与式(8),即可快速确定实现搭桥过渡的工艺参数。例如,采用直径 2 mm 的 TC4 钛合金丝材,假设熔滴密度近似于丝材密度,在电子束流功率达到 5 kW 时,要实现搭桥过渡,则丝端与工件距离 L_s 应小于等于 15 mm;当设定 TC4 钛合金熔点 1 678 ℃、室温 25 ℃、熔化系数 ξ 为 1 时,则可以确定送丝速度 V_s 需要小于等于 677 cm/min。

3 试验分析

3.1 试验装置

采用图 4 所示的中国航空制造技术研究院自主研制的丝束同轴冷阴极电子束熔丝增材制造样机制备钛合金试样,表 1 为该样机的基本参数。

为进一步说明丝束同轴冷阴极电子束增材制造技术与传统热阴极电子束轴侧熔丝成形技术的区别,采用关键技术参数(见表 2)自研热阴极电子束熔丝增材制造设备熔丝成形 TC4 钛合金试样,对这 2 种方法成形的钛合金组织进行对比分析。

成形过程均在搭桥过渡模式下进行。



图 4 丝束同轴冷阴极电子束熔丝增材制造样机

Fig. 4 Equipment for gas discharge electron beam coaxial wire of fuse additive manufacturing

表 1 丝束同轴冷阴极电子束熔丝增材制造样机基本参数

Table 1 Basic parameters of equipment of gas discharge electron beam coaxial wire of fuse additive manufacturing

参数	数值
工作电压 U/kV	−20
最大束流 I_b/mA	1 000
成形速度/(kg·h^{-1})	>5
成形范围 S/(mm×mm×mm)	400×400×500
成形精度 ε/mm	0.2

3.2 熔丝成形组织

分别采用表 3 和表 4 所示工艺参数,用直径 2 mm的 TC4 钛合金丝材成形了 450 mm×50 mm×450 mm 的 2 个试样。丝束同轴冷阴极电子束熔丝所用放电气体为氦-氧混合气体,其中氧气含量

http://bhxb.buaa.edu.cn

2% ~5%。丝束同轴冷阴极电子束熔丝成形的试样如图 5 所示,传统热阴极电子束轴侧熔丝成形试样外观与图 5 所示类似,由于篇幅原因,不再列出。

从表 3 和表 4 列举的关键工艺参数可以看出,采用丝束同轴冷阴极电子束熔丝成形工艺熔化同等规格的钛合金丝材,丝束同轴冷阴极电子束源所用的功率较小,表明输入到成形件上额外热量减少,削弱了粗大组织过度长大倾向。

表 2　热阴极电子束轴侧熔丝增材制造样机基本参数

Table 2　Basic parameters of equipment of fuse additive manufacturing with axial side feeding wire

参数	数值
工作电压 U/kV	-60
最大束流 I_b/mA	500
成形速度/(kg·h^{-1})	~5
成形范围 S/(mm×mm×mm)	3 000×1 800×1 000
成形精度 ε/mm	0.2

表 3　丝束同轴冷阴极电子束熔丝成形工艺参数

Table 3　Technique parameters of gas discharge electron beam coaxial wire of fuse additive manufacturing

参数	数值
气流量 Q/(mL·min^{-1})	120
工作电压 U_{hv}/kV	-20
束流 I_b/mA	300
送丝速度 V_s/(mm·s^{-1})	50
工作台运动速度 V_x/(mm·s^{-1})	60

表 4　热阴极电子束轴侧熔丝增材制造工艺参数

Table 4　Technique parameters of fuse additive manufacturing with axial side feeding wire

参数	数值
气流量 Q/(mL·min^{-1})	0
工作电压 U_{hv}/kV	-60
束流 I_b/mA	150
送丝速度 V_s/(mm·s^{-1})	30
工作台运动速度 V_x/(mm·s^{-1})	50

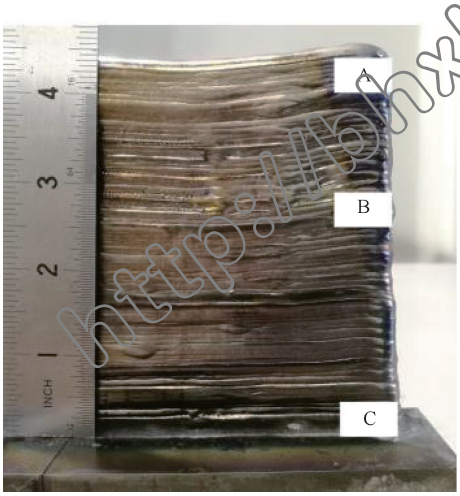


图 5　成形试样

Fig. 5　Specimen of fusion additive

对于 2 种工艺制备试样,分别在垂直于其成形路径的方向上截取金相检测试块,所观察的 2 种工艺成形试样的宏观组织如图 6 所示。

如图 6(a)所示,对于丝束同轴冷阴极电子束熔丝成形试样的宏观组织,在垂直于熔丝成形方向上表现为按照成形高度方向搭接的鱼鳞状结构,而微观条件下仍表现为柱状晶-等轴晶交替出现组织,详细论述及微观组织照片在此不再赘述。

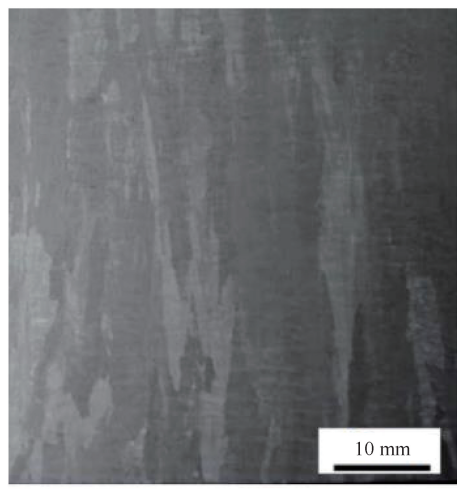
热阴极轴侧熔丝成形试样的宏观组织如图 6(b)所示,在垂直于熔丝成形方向上表现为指向成形高度方向的粗大树枝晶结构。

与热阴极轴侧电子束熔丝成形 TC4 试样的组织相比,丝束同轴冷阴极电子束熔丝成形的钛合金组织得到明显改善。

在图 5 所示平行于成形路径方向的平面内,分别在 A、B、C 三个区域截取用于观察金相组织的试块,A、B、C 三个区域成形组织在宏观上均表现为层层堆叠结构,层与层之间边界清晰。



(a) 丝束同轴冷阴极电子束熔丝成形试样的组织



(b) 热阴极电子束轴侧熔丝成形试样的组织

图 6　不同电子束熔丝成形 TC4 钛合金的宏观组织

Fig. 6　Microstructure of TC4 titanium alloy formed by different electron beam fuses

http://bhxb.buaa.edu.cn

在 A 区域的顶端部分,TC4 成形样品的微观组织如图 7 所示,最顶端为柱状晶,层与层由等轴晶与柱状晶交替组成,柱状晶高度约为 1 ~ 2 mm,宽度约 200 ~ 300 μm,等轴晶尺寸约为 100 ~ 300 μm。

在 B 区域的一个成形层区域的部分组织如图 8(a)所示,成形层中间是柱状晶区,边沿为等轴晶区,柱状晶区宽度约为 1.6 mm,柱状晶宽度最大 300 μm,柱状晶和等轴晶粒内部均为快冷马氏体组织,如图 8(b)所示。

在 C 区域靠近基板附近的组织如图 9 所示,成形组织与基板之间存在明显的熔合线,在基板一侧为等轴晶,在成形区域一侧为等轴晶与柱状晶层层交替叠加区域。

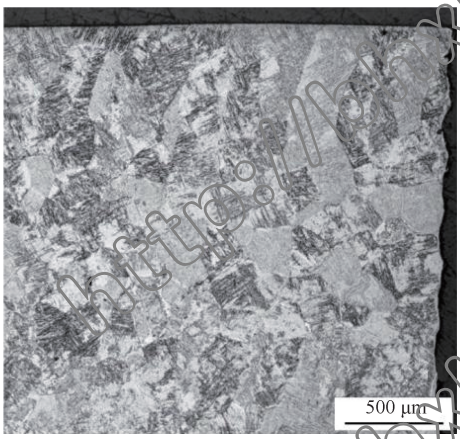
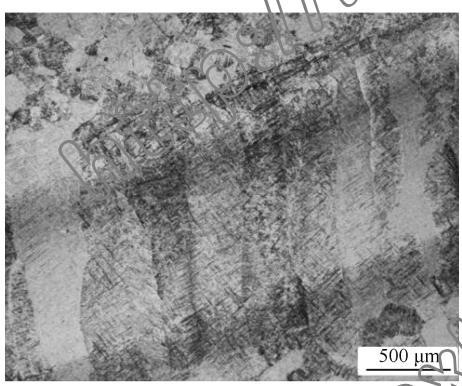
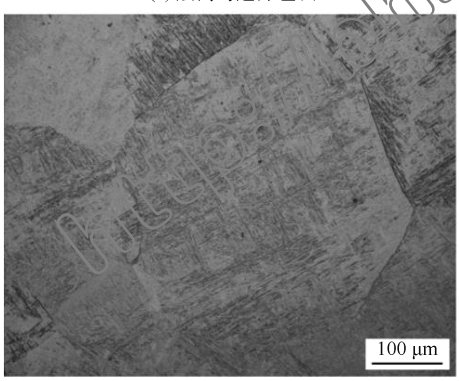


图 7 区域 A 的显微组织

Fig. 7 Microstructure of Section A



(a) 层内与边界组织



(b) 柱状晶与等轴晶内部组织

图 8 区域 B 的显微组织

Fig. 8 Microstructure of Section B



图 9 区域 C 靠近基板附近的微观组织

Fig. 9 Microstructure of Section C near base

4 结 论

1) 丝束同轴冷阴极电子束熔丝成形的熔滴在滴状过渡时,表面张力抑制熔滴过渡,在搭桥过渡时,表面张力促进熔滴过渡。

2) 丝束同轴冷阴极电子束熔丝成形在给定金属丝材材料成分、丝材半径、电子束流功率条件下,可以通过调节丝端与熔池的间距、送丝速度、束流功率获得滴状过渡、搭桥过渡熔丝成形方法。

3) TC4 钛合金的丝束同轴冷阴极电子束熔丝成形组织为柱状晶与等轴晶层层叠加的组织,柱状晶的尺寸远小于采用热阴极电子束轴侧熔丝成形 TC4 钛合金的组织,成形质量得到了提升。

参考文献 (References)

[1] 尹凡,王克鸿,冯曰海,等. 电弧填丝增材制造的宽度尺寸建模及分析[J]. 机械制造与自动化,2018,47(3):119-122.
YIN F,WANG K H,FENG Y H,et al. Width dimension modeling and analysis of wire and arc additive manufacture[J]. Machine Building & Automation,2018,47(3):119-122(in Chinese).

[2] 曹嘉明. 电弧熔丝增材制造高强钢零件工艺基础研究[D]. 武汉:华中科技大学,2017.
CAO J M. Fundamental study on wire and arc additive manufacturing technique for high strength steel components[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2017(in Chinese).

[3] 王帅,顾惠敏,王伟,等. ZL205A 电弧熔丝增材制造堆积体的组织与性能[J]. 稀有金属材料与工程,2019,48(9):2910-2916.
WANG S,GU H M,WANG W,et. al. Microstructure and me-

http://bhxb.buaa.edu.cn

chanical properties of ZL205A aluminum alloy wall produced by wire arc additive manufacturing[J]. Rare Metal Materials and Engineering,2019,48(9):2910-2916(in Chinese).

[4] 方力,侯智文,黄俊润,等.电弧熔丝增材制造复合填充路径规划算法[J].南京航空航天大学学报,2019,51(1):98-104.
FANG L,HOU Z W,HUANG J R,et al. Composite filling path planning algorithm for wire and ARC additive manufacturing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2019,51(1):98-104(in Chinese).

[5] 郭一蒙.铝合金激光熔丝增材制造工艺研究[D].南京:南京理工大学,2018.
GUO Y M. The laser additive manufacturing technology of aluminum alloy with melting wire[D]. Nanjing:Nanjing University of Science and Technology,2018(in Chinese).

[6] 黄安国,刘博,郑增超,等.激光熔丝增材制造丝材过渡状态的电磁振动监测方法[J].机械工程学报,2018,54(2):34-40.
HUANG A G,LIU B,ZHENG Z C,et al. Electromagnetic vibration monitoring method for liquid transfer mode in wire feeding based laser additive manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering,2018,54(2):34-40(in Chinese).

[7] 李慧敏.激光熔丝增材制造工艺特性研究[D].重庆:重庆大学,2017.
LI H M. Study on the process characteristics of wire based laser additive manufacturing[D]. Chongqing:Chongqing University,2017(in Chinese).

[8] 刘思余,冯曰海,占彬,等.堆覆速度对等离子弧双填丝增材制造碳钢堆覆层组织和性能的影响[J].机械工程材料,2018,42(9):69-72.
LIU S Y,FENG Y H,ZHAN B,et al. Effect of deposition speed on microstructure and properties of double-wire and plasma arc additive manufactured carbon steel stacking layer[J]. Materials for Mechanical Engineering,2018,42(9):69-72(in Chinese).

[9] 陈国庆,树西,张秉刚,等.国内外电子束熔丝沉积增材制造技术发展现状[J].焊接学报,2018,39(8):123-128.
CHEN G Q,SHU X,ZHANG B G,et al. Development status of electron beam fuse deposition additive manufacturing technology at home and abroad[J]. Transactions of the China Welding Institution,2018,39(8):123-128(in Chinese).

[10] 巩水利,锁红波,李怀学.金属增材制造技术在航空领域的发展与应用[J].航空制造技术,2013(13):66-71.
GONG S L,SUO H B,LI H X. Development and application of metal additive manufacturing technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2013(13):66-71(in Chinese).

[11] DENBNOVETSKY S V,MELNYK V G,MELNYK I V. High-voltage,glow-discharge electron sources and possibilities of its application in industry for realizing different technological operations[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,2003,31(5):987-993.

[12] DENBNOVETSKY S V,MELNYK I V,MELNYK V G,et al. High voltage glow discharge electron guns and its advanced application examples in electronic industry[C]//2016 International Conference "Radio Electronics & Info Communications". Piscataway:IEEE Press,2016:16450310.

[13] FEINAEUGLE P,MATTAUSCH G,SCHMIDT S,et al. A new generation of plasma-based electron beam sources with high power density as a novel tool for high-rate PVD[C]//Society of Vacuum Coaters 54th Annual Technical Conference Proceedings,2011.

[14] ZHANG J H,YANG Y,CAO S,et al. Fine equiaxed β grains and superior tensile property in Ti-6Al-4V alloy deposited by coaxial electron beam wire feeding additive manufacturing[J]. Acta Metallurgica Sinica(English Letters),2020,33(10):1311-1320.

[15] 叶焕中.电弧焊及电渣焊「M」.2 版.北京:机械工业出版社,1988.
YE H Z. Arc welding and electroslag welding[M]. 2nd ed. Beijing:China Machine Press,1988(in Chinese).

http://bhxb.buaa.edu.cn

Properties of gas discharge electron beam coaxial wire of fuse additive manufacturing and microstructure of TC4 titanium alloy

XU Haiying[1,*], YANG Guang[1], ZHANG Wei[2], YANG Bo[1], SANG Xinghua[1], WANG Zhuang[1]

(1. Science and Technology on Power Beam Generator Laboratory, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;
2. School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the analysis of fuse additive manufacturing using hot cathode electron beams with axial side feeding wires and gas discharge electron beam coaxial wire, the characteristics of droplet transfer of the gas discharge electron beam coaxial wire fuse additive manufacturing have been analyzed, and the conditions for obtaining droplet transfer and bridging transfer are also studied. A TC4 titanium alloy sample is made by gas discharge electron beam coaxial wire of fuse additive manufacturing by the mode of droplet bridging of Φ2 mm TC4 wire. The microstructure of the sample is compared with that manufactured by hot cathode electron beam fuse additive. Results show that the columnar and equiaxed grains of the sample overlap alternately layer by layer with an obvious decrease in their sizes, indicating that the sample grains of the sample are refined and that its mechanical properties can be improved.

Keywords: electron beam coaxial wire; gas discharge electron beam; fuse additive manufacturing; titanium alloy; microstructure

http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2021-03-25; **Accepted**: 2021-06-25; **Published online**: 2021-08-16 13:32
URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210816.1132.001.html
Foundation item: National Natural Science Foundation of China (51775527)
* **Corresponding author**. E-mail: xhyxhy@126.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0114

嵌入注意力机制的多尺度深度可分离表情识别

宋玉琴*, 高师杰, 曾贺东, 熊高强
(西安工程大学 电子信息学院, 西安 710600)

摘 要: 针对面部表情识别中,传统机器学习方法特征提取较为复杂,浅层卷积神经网络识别率不高,以及深度卷积神经网络易带来梯度爆炸或弥散的问题,构建了残差网络嵌入注意力机制的多尺度深度可分离表情识别网络。通过多层多尺度深度可分离残差单元的叠加进行不同尺度的表情特征提取,使用 CBAM 注意力机制进行表情特征的筛选,提升有效表情特征权重的表达,削弱训练数据的噪声影响。所提网络模型在 Fer-2103 和 CK+表情数据集分别取得了 73.89% 和 97.47% 的准确度,表明所提网络具有较强的泛化性。

关 键 词: 表情识别; 注意力机制; 多尺度特征提取; 深度可分离卷积; 残差网络
中图分类号: TP391
文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2022)12-2381-07

面部表情识别作为人机智能交互系统的关键技术,是当前人工智能的重要研究课题。传统的表情识别主要是应用机器学习方法人为设计特征,最后用分类算法判定表情。提取特征的方法主要有局部二值模式(local binary pattern, LBP)[1]、主成分分析法(principal component analysis, PCA)[2]、Gabor 小波变换[3]、尺度不变的特征变换(scale invariant feature transform, SIFT)[4]、灰度共生矩阵(gray-level co-occurrence matrix, GLCM)[5]等。常用的分类算法有支持向量机(support vector machine, SVM)[6]、K 近邻算法(K-nearest neighbor, KNN)[7]等。上述方法特征提取与表情分类是 2 个分开的过程,效率较低,且其特征提取受到人为因素影响,容易丢失部分表情特征,特征提取的不完备使得最终分类效果一般。

基于深度学习的表情识别,其特征提取与表情分类可同时进行。李勇等[8]基于 LeNet-5 优化网络模型,将网络中提取的低层特征与高层特征相结合,在 CK+数据集上取得了 83.74% 的识别率。Mollahosseini 等[9]将 AlexNet 与 GoogleNet 网络融合,增加了网络的深度和宽度,在 CK+数据集上取得了 93.20% 的识别率。Jung 等[10]通过输入人脸外貌特征与人脸关键点联合训练网络,增强了特征提取的多样性,在 CK+数据集上取得了 97.25% 的识别率。

研究表明,更深更宽的卷积神经网络能够有效提高表情识别率,但随着网络深度的增加,会出现梯度爆炸和梯度弥散的现象,导致模型训练难以收敛。对此,何凯明等[11]提出了深度残差网络(ResNet),有效缓解了网络性能退化和梯度爆炸等问题。受此启发,本文构建了残差网络嵌入 CBAM[12](convolutiona block attention module)的多尺度深度可分离表情识别网络。通过叠加多层深度可分离卷积层来代替 5×5、7×7、9×9 等大卷积核,提取不同深度的特征信息,降低网络运算参数,采用 CBAM 注意力机制提高网络模型对关键表情特征的敏感度,提升网络中面部表情特征权重,剔除无关的冗余特征,提升网络的鲁棒性。同时,通过恒等映射有效缓解了网络中的梯度问题,提高网络收敛速度。

收稿日期: 2021-03-10; **录用日期**: 2021-06-13; **网络出版时间**: 2021-07-13 08:46
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210712.1530.008.html
基金项目: 中国纺织工业联合会科技性指导项目 (2019062)
* **通信作者**. E-mail: 81308995@qq.com

引用格式: *宋玉琴, 高师杰, 曾贺东, 等. 嵌入注意力机制的多尺度深度可分离表情识别[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2381-2387. SONG Y Q, GAO S J, ZENG H D, et al. Multi-scale depthwise separable convolution facial expression recognition embedded in attention mechanism[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2381-2387(in Chinese).*

http://bhxb.buaa.edu.cn

1 表情识别网络模型

1.1 CBAM 注意力机制

注意力机制是模仿人类在浏览时专注自己感兴趣的事物而忽视无关事物的特性。CBAM 注意力机制由通道注意力与空间注意力串联组合而成。其中,通道注意力关注的是有意义的输入特征,空间注意力关注的是最具信息量的特征部分。

假设输入特征 $\boldsymbol{F}$ 大小为 $H \times W \times C$,H、W 和 C 分别为特征的长、宽和通道数。通道注意力如图 1 所示。首先,特征 $\boldsymbol{F}$ 分别进行最大池化(Maxpool)和平均池化(Avgpool)后,特征变化为 $1 \times 1 \times C$,再分别输入共享权值的多层感知器(multi-layer perception, MLP),其中隐藏层为降低参数运算设置 C/r 个神经元,r 为缩减倍数,激活函数为 ReLU。然后,将经 MLP 运算后并相加的特征采用 Sigmoid 激活函数完成映射,得到权重系数 M_C。最后,将输入特征与 M_C 相乘,得到完成通道注意力的新特征。

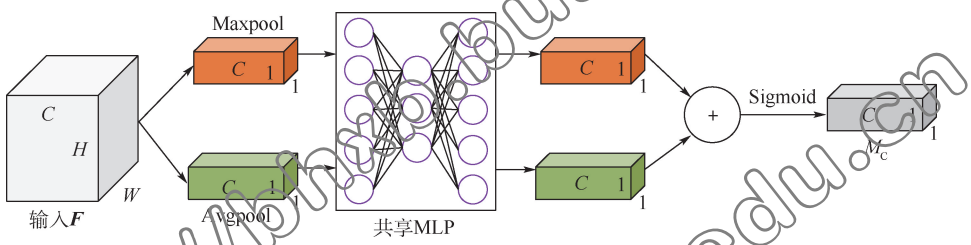


图 1 通道注意力模块

Fig. 1 Channel attention module

空间注意力如图 2 所示。首先,特征 $\boldsymbol{F}$ 分别经最大池化和平均池化后,并在通道上完成拼接,得到 $H \times W \times 2$ 的特征。然后,将其输入到卷积核为 7×7、Sigmoid 激活函数的卷积层,得到最终的权重系数 M_S。最后,$\boldsymbol{F}$ 与 M_S 相乘便可得到完成空间注意力的新特征。

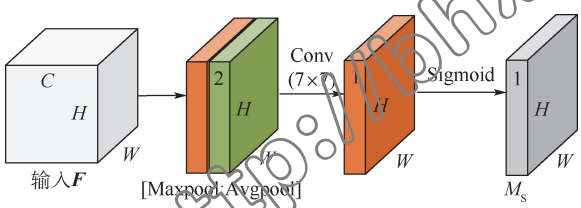


图 2 空间注意力模块

Fig. 2 Spatial attention module

1.2 嵌入 CBAM 的多尺度深度可分离卷积残差块

本文提出的嵌入 CBAM 的多尺度深度可分离卷积残差块如图 3 所示,其中,深度可分离卷积由点卷积(pointwise convolution, PW)和深度卷积(depthwise convolution, DW)组成,如图中 A_Conv2d 和 B_Conv2d 所示。假设输入 $\boldsymbol{F}'$特征类型为 $H \times W \times C$。以本文采用的卷积核为例,$\boldsymbol{F}'$特征经 N 个点卷积,其参数量为 $H \times W \times C \times N$,通过卷积核为$3 \times 3 \times 1$的深度卷积,参数量为 $H \times W \times C \times 3 \times 3$,因此,深度可分离卷积的计算量为 $H \times W \times C \times 3 \times 3 + H \times W \times C \times N$。特征 $\boldsymbol{F}'$经卷积核为

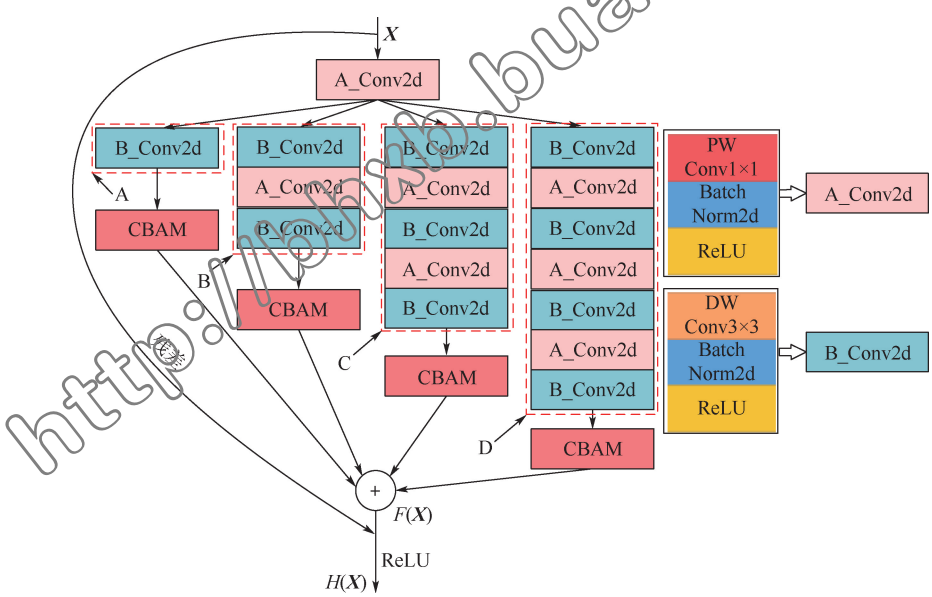


图 3 嵌入 CBAM 的多尺度深度可分离卷积残差块(基础块)

Fig. 3 Multi-scale depthwise separable convolution residuals embedded in CBAM(Basic Block)

http://bhxb.buaa.edu.cn

$3\times3\times N$ 标准卷积运算,其参数量为 $H\times W\times C\times 3\times3\times N$。深度可分离卷积与标准卷积参数运算量对比如式(1)所示。采用深度可分离卷积神经网络替代标准卷积使得网络模型的参数减少 1/8 ~ 1/9,从而轻量化网络模型。

$$\frac{H\times W\times C\times N+H\times W\times C\times 3\times3}{H\times W\times C\times 3\times3\times N}=\frac{1}{N}+\frac{1}{3\times3} \tag{1}$$

A_Conv2d 和 B_Conv2d 均由卷积层、批归一化层(batch normalization)、ReLU 激活层组成。其中,批归一化层通过归一化每批数据,缓解深层神经网络中梯度消失的问题,提升网络模型的非线性表达。ReLU 激活函数能有效改善梯度的弥散问题,增强网络模型的收敛效率。本文利用 2 层 A_Conv2d 和 B_Conv2d 的叠加代替一个 5×5 的卷积核,利用 3 层 A_Conv2d 和 B_Conv2d 的叠加代替一个 7×7 的卷积核,使用 4 层 A_Conv2d 和 B_Conv2d 的叠加代替一个 9×9 的卷积核,从而丰富网络提取特征的多样性,在每个通道后嵌入 CBAM,并对不同通道进行特征融合。CBAM 能提高网络表情相关特征的权重,剔除冗余特征,提升特征的有效性。通过恒等映射缓解深层网络梯度弥散和梯度爆炸的问题,提高网络训练的收敛速度,输入 $\boldsymbol{X}$ 在经过卷积激活等图中运算输出为 $F(\boldsymbol{X})$。若输入 $\boldsymbol{X}$ 与输出 $F(\boldsymbol{X})$ 的特征维度相同,则直接加和。若维度不同,则与输出 $F(\boldsymbol{X})$ 维度一致,最终输出 $H(\boldsymbol{X})=\boldsymbol{X}+F(\boldsymbol{X})$。

1.3　表情识别网络总体模型

本文提出的残差网络嵌入 CBAM 的多尺度深度可分离表情识别网络如图 4 所示,由 1 个卷积核为 3×3×64 的卷积层、8 个 Basic Block、全局平均池化层(Golbal Average Pooling)和全连接层(FC)等构成。其中,Basic Block 的卷积核的个数依次为 64、64、128、128、256、256、512、512。全局平均池化层能生成与分类类别相对应特征图,增强特征图与类别的一致性,对每个特征图求和取均值,最终输入到 Softmax 分类层。此外,全局平均池化可看做对模型的网络结构整体进行正则化,从而提高模型的泛化性能。

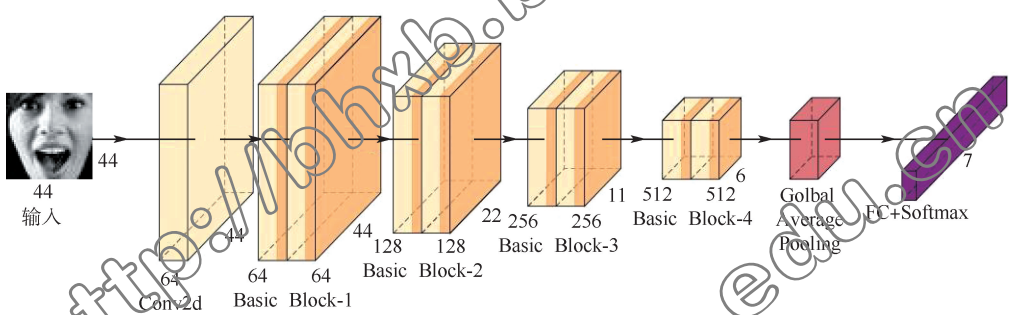


图 4　基于残差网络的嵌入 CBAM 的多尺度深度可分离表情识别网络结构

Fig. 4　Structure of multi-scale depthwise separable facial expression recognition network embedded in CBAM based on residual network

网络损失函数选用交叉熵(cross-entropy)损失函数,其能度量预测的概率与真实的差异情况,交叉熵损失越小,则模型预测的准确率越高。交叉熵损失函数表示为

$$L=-\frac{1}{C}\sum_{i=1}^{C}\left[y_i\ln(g(x_i))+(1-y_i)\cdot\ln(1-g(x_i))\right] \tag{2}$$

式中:$g(x_i)$ 为模型输出预测值;y_i 为输入 x_i 真实值;C 为样本数;L 为计算后的交叉熵损失值。

如图 4 所示,向模型输入预处理过后的 44×44×3 的图像,经过第 1 个卷积处理后特征格式为 44×44×64,经过 8 个 Basic Block 特征图为 6×6×512,最终送入到全连接层和 Softmax 分类层得出表情类别。网络模型的特征变化如表 1 所示。

表 1　表情识别网络特征参数

Table 1　Feature parameters of expression recognition network

网络层	输入类型	输出类型
Conv2d	44×44×3	44×44×64
Basic Block-1	44×44×64	44×44×64
Basic Block-2	22×22×128	22×22×128
Basic Block-3	11×11×256	11×11×256
Basic Block-4	6×6×512	6×6×512
Golbal Average Pooling	6×6×512	1×1×512
FC + Softmax	1×1×512	1×1×7

2　实验环境与结果

本文设计的网络在 Ubuntu18.04 LTS 系统下使用 Pytorch 深度学习框架完成搭建,实验硬件平台如下:CPU 为 AMD Ryzen 5 3600X,主频为

http://bhzb.buaa.edu.cn

3.8 GHz,内存为 32 GB,GPU 为显存 11 GB 的 NVIDIA GTX 1080TI,选用 Fer-2013 和 CK + 公开表情数据集进行表情识别网络模型的训练与测试。

2.1 数据集选择与处理

Fer-2013 数据集[13]是 Kaggle 面部表情识别比赛提供的一个数据集,包括训练集图像 28 709 张,公共验证集与私有验证集均 3 589 张图像,图像的像素都为 48 ×48。该数据集包含愤怒(4 953 张)、厌恶(547 张)、恐惧(5 121 张)、快乐(8 989 张)、悲伤(6 077 张)、惊喜(4 002 张)和中立 (6 198 张) 7 类表情,各类表情如图 5 所示,每列为一类表情,其同类表情的面部姿态、年龄、表情强度、肤色有明显的差异,并且很多人脸有被眼镜、帽子、手等物体遮挡,这样更符合真实场景下的人脸表情,使用该数据集更能说明算法模型的泛化性能。

CK + 数据集[14]是面部表情识别的代表性数据集之一,其在实验室条件下采集,较为严谨可靠。数据集包括 123 人的 593 个图像序列,展示了表情从平静状态到峰值的过程,其中 327 个为带有标签表情序列。本文实验选取除中立表情外的其他 7 种表情,提取表情序列中最后 3 帧,并将其处理为 48 × 48 像素的图像,如图 6 所示。这 7 种表情共有 981 张图像,包含愤怒(135 张)、厌恶(177 张)、恐惧(75 张)、快乐(207 张)、悲伤(84 张)、惊喜(249 张)和藐视(54 张)。



图 5 Fer-2013 数据集的表情示例

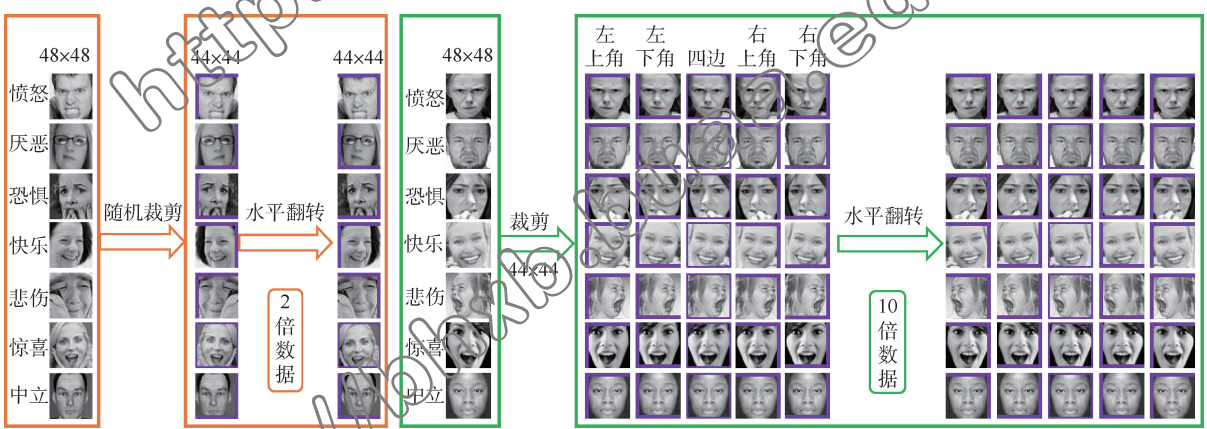
Fig. 5 Sample expression diagram of Fer-2013 dataset



图 6 CK + 数据集的表情示例

Fig. 6 Sample expression diagram of CK + dataset

为提高网络的泛化性能,实验对 Fer-2103 数据集和 CK + 数据集进行了数据增强。如图 7(a)所示,在训练网络模型时,将训练集的图像随机裁剪为 44 ×44 大小,其中随机裁剪掉的为紫色部分,并进行水平翻转,将数据集扩充数据为原来的 2 倍后输入网络进行训练。如图 7(b)所示,为提高网络模型的鲁棒性能,在进行测试集验证时,将输入图像分别在左上角、左下角、四边、右上角和右下角进行裁剪,裁剪部分如图 7(b)中紫色部分所示,得到 5 张 44 ×44 大小的图像,并水平翻转,得到 10 倍数据,将处理后的图像输入模型得到类别概率求和并取均值,其最大概率分类为最终表情类别。



(a) Fer-2013训练集的数据增强示例

(b) Fer-2013测试集的数据增强示例

图 7 Fer-2013 训练集与测试集的数据增强示例

Fig. 7 Sample figure of data enhancement of Fer-2013 training set and test set

2.2 实验过程与结果

在 Fer-2013 数据集上训练时,网络超参数如下:实验共迭代 300 次,初始学习率设为 0.01,批量大小设为 32,50 次迭代后,每 8 轮迭代学习率衰减为之前的 0.8 倍。在公共验证集上测试优化网络权值,在私有验证集上测试模型,评估模型性能。混淆矩阵如图 8 所示。本文算法在 Fer-2013 数据集得到 73.89% 的准确度,快乐(91%)、惊喜(84%)、中立(74%)等表情因相对其他表情具有明显的面部特征从而获得较高的识别率,而厌恶(69%)、愤怒(64%)、悲伤(64%)和恐惧(58%) 4 种表情之间误判率相对较高,其主要原因是:这

http://bkxb.buaa.edu.cn

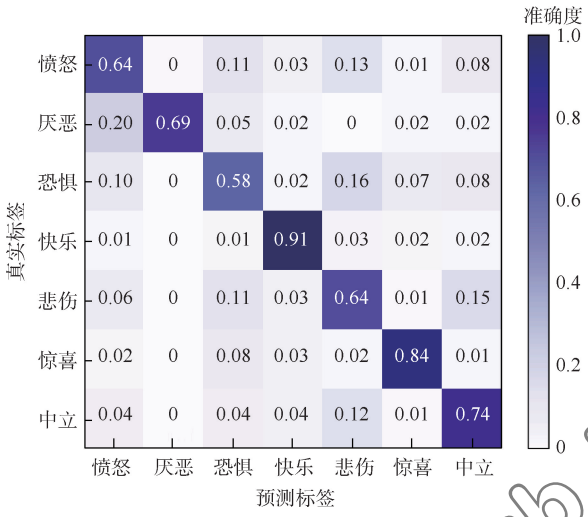


图 8　Fer-2013 私有验证集表情分类的混淆矩阵

Fig. 8　Confusion matrix of expression classification in Fer-2013 private validation set

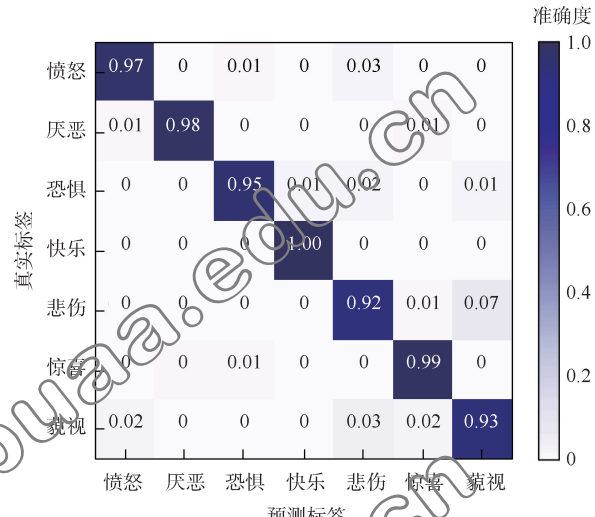


图 9　CK + 测试集表情分类的混淆矩阵

Fig. 9　Confusion matrix of expression classification in CK + test set

些表情本身就有较高的相似性,人类也难以辨认陌生人的这 4 类表情。

此外,这些表情图像数据相对其他表情较少,类别数据的不均衡导致网络训练不充分,也是影响其识别率的重要因素。

在 CK + 数据集上训练时,因其数据较少,故采用十折交叉验证,实验以 9:1 的比例将数据集分为训练集和测试集,训练集 882 张图像,测试集 99 张图像。实验共迭代 200 次。训练批量大小设为 64,前 50 次迭代其学习率为 0.01,之后每 8 轮迭代,学习率衰减为之前的 0.7 倍。其测试集混淆矩阵如图 9 所示。本文算法在 CK + 数据集得到 97.47% 的准确度,快乐(100%)、惊喜(99%)、厌恶(98%)、愤怒(97%)等均有较高的识别率。恐惧(95%)、藐视(93%)、悲伤(92%)等表情因受类别数据不均衡和本身易混淆的影响,识别率相对较低。

为验证本文算法的先进性,在 Fer-2013 和 CK + 公开表情数据集上,与近年其他表情识别算法进行对比,对比结果如表 2 所示,本文构建的网络模型具有更强的泛化性能。此外,因为 Fer-2013 数据集存在较多的受遮挡面部图像,且存在部分表情标签误分的问题,模型在 Fer-2013 数据集准确度整体相对 CK + 数据集较低。

表 2　本文算法与其他表情识别算法的准确度对比

Table 2　Comparison of recognition rates between proposed algorithm and other expression recognition algorithms

数据集	算法	准确度/%								总体准确度/%
		愤怒	厌恶	恐惧	快乐	悲伤	惊喜	中立	藐视	
Fer-2013	文献[15]	65	71	50	90	60	79	75	—	71.52
	文献[16]	65	65	54	91	62	82	73	—	72.67
	文献[17]	—	—	—	—	—	—	—	—	73.00
	本文	64	69	58	91	64	84	74	—	73.89
CK +	文献[18]	79	86	92	99	95	100	99	—	95.67
	文献[19]	88	97	94	99	88	99	—	78	94.90
	文献[20]	90	100	85	100	95	98	—	88	96.28
	本文	97	98	95	100	92	99	—	93	97.47

2.3　消融实验

为进一步验证 CBAM 注意力机制与多尺度卷积结构特征提取的有效性,实验通过增删 Basic Block 中不同通道的卷积结构与注意力机制进行实验验证。实验在 Fer-2013 和 CK + 数据集上训练时,网络中的超参数与 2.2 节中一致。消融实验结果如表 3 所示,表 3 中的 A、B、C、D 分别表示不同尺度的卷积模块,如图 3 所示,此外 A-CBAM、B-CBAM、C-CBAM、D-CBAM 分别对应 A、B、C、D 卷积模块后添加 CBAM 注意力机制。由表 3 分析可知,随着 Basic Block 中通道由 A 增加到 ABCD 通道,2 个数据集上表情识别率均有明显提升,验证了通过提取多尺度的表情特征能有效提升表情的识别率。此外,随着 Basic Block 各

http://bhxb.buaa.edu.cn

表3 消融实验

Table 3 Ablation experiments

A	B	C	D	A-CBAM	B-CBAM	C-CBAM	D-CBAM	Fer-2013数据集准确度/%	CK+数据集准确度/%
✓								71.91	92.12
✓	✓							72.53	94.74
✓	✓	✓						72.72	95.17
✓	✓	✓	✓					72.94	95.49
✓	✓	✓	✓	✓				73.06	95.96
✓	✓	✓	✓	✓	✓			73.42	96.67
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		73.63	97.09
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	73.89	97.47

各个通道依次增加CBAM注意力机制,数据集上的表情识别率稳步提升。验证了嵌入CBAM注意力机制能有效提升网络中表情特征的表达,削弱了网络中无关特征的权重。

3 结 论

本文设计的嵌入CBAM多尺度深度可分离残差表情识别网络,通多层小卷积层的叠加来代替大卷积核,在丰富了特征信息同时,有效缩减了网络训练参数,通过注意力机制进行特征的筛选,提升有效特征的表达权重,有效提高了表情识别率,网络模型具有较高的泛化性。

后续将通过生成式对抗网络进行数据增强,丰富面部表情样本的多样性,从而提高表情识别网络的训练效率。对因表情数据类别数据不均衡,导致网络无法均衡训练部分参数的现象展开研究,进而提升网络模型的泛化性。

参考文献(References)

[1] SHAN C, GONG S, MCOWAN P W. Facial expression recognition based on local binary patterns: A comprehensive study [J]. Image and Vision Computing, 2009, 27(6): 803-816.

[2] LUO Y, ZHANG T, ZHANG Y. A novel fusion method of PCA and LDP for facial expression feature extraction [J]. Optik, 2016, 127(2): 718-721.

[3] 刘帅师,田彦涛,万川. 基于Gabor多方向特征融合与分块直方图的人脸表情识别方法[J]. 自动化学报, 2011, 37(12): 1455-1463.
LIU S S, TIAN Y T, WAN C. Facial expression recognition method based on Gabor multiorien-tation features fusion and block histogram [J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(12): 1455-1463(in Chinese).

[4] KUMAR V D A, KUMAR V D A, MALATHI S, et al. Facial recognition system for suspect identification using a surveillance camera[J]. Pattern Recognition and Image Analysis, 2018, 28(3): 410-420.

[5] ZHOU J, ZHANG S, MEI H, et al. A method of facial expression recognition based on Gabor and NMF[J]. Pattern Recognition and Image Analysis, 2016, 26(1): 119-124.

[6] HSIEH C C, HSIH M H, JIANG M K, et al. Effective semantic features for facial expressions recognition using SVM[J]. Multimedia Tools and Applications, 2016, 75(11): 6663-6682.

[7] SUN K, KANG H, PARK H H. Tagging and classifying facial images in cloud environments based on KNN using MapReduce [J]. Optik, 2015, 126(21): 3227-3233.

[8] 李勇,林小竹,蒋梦莹. 基于跨连接LeNet-5网络的面部表情识别[J]. 自动化学报, 2018, 44(1): 176-182.
LI Y, LIN X Z, JIANG M Y. Facial expression recognition based on cross-connected LeNet-5 network[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(1): 176-182(in Chinese).

[9] MOLLAHOSSEINI A, CHAN D, MAHOOR M H. Going deeper in facial expression recognition using deep neural networks[C]// 2016 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-10.

[10] JUNG H, LEE S, YIM J, et al. Joint fine-tuning in deep neural networks for facial expression recognition[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2015: 2983-2991.

[11] HE K M, ZHANG X, REN S, et al. Deep residual learning for image recognition[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2016: 770-778.

[12] WOO S, PARK J, LEE J Y, et al. CBAM: Convolutional block attention module[C]// Proceedings of the European Conference on Computer Vision(ECCV). Berlin: Springer, 2018: 3-19.

[13] GOODFELLOW I J, ERHAN D, CARRIER P L, et al. Challenges in representation learning: A report on three machine learning contests[C]// International Conference on Neural Information Processing. Berlin: Springer, 2013: 117-124.

[14] LUCEY P, COHN J F, KANADE T, et al. The extended Cohn-Kanade dataset (CK+): A complete dataset for action unit and emotion-specified expression[C]// 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2010: 94-101.

[15] SHI C, TAN C, WANG L. A facial expression recognition method based on a multibranch cross-connection convolutional neural network[J]. IEEE Access, 2021, 9: 39255-39274.

[16] XIE W C, SHEN L L, DUAN J M. Adaptive weighting of handcrafted feature losses for facial expression recognition[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2021, 51(5): 2787-2800.

[17] HAYALE W, NEGI P S, MAHOOR M. Deep Siamese neural networks for facial expression recognition in the wild[J/OL].

http://bhxb.buaa.edu.cn

IEEE Transactions on Affective Computing,2021(2021-03-04)[2021-03-05]. https://ieeexplore.ieee.org/document/9423550.

[18] SUN X,XIA P P,ZHANG L,et al. A ROI-guided deep architecture for robust facial expressions recognition[J]. Information Sciences,2020,522:35-48.

[19] 兰凌强,李欣,刘淇缘,等. 基于联合正则化策略的人脸表情识别方法[J]. 北京航空航天大学学报,2020,46(9):1797-1806.

LAN L Q,LI X,LIU Q Y,et al. Facial expression recognition method based on a joint normalization strategy[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2020,46(9):1797-1806(in Chinese).

[20] GAN Y,CHEN J,YANG Z,et al. Multiple attention network for facial expression recognition[J]. IEEE Access,2020,8:7383-7393.

Multi-scale depthwise separable convolution facial expression recognition embedded in attention mechanism

SONG Yuqin*, GAO Shijie, ZENG Hedong, XIONG Gaoqiang

(School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710600, China)

Abstract: For facial expression recognition, traditional machine learning method features extraction is relatively complex, shallow convolutional neural network recognition rate is not high, and deep convolutional network is easy to cause gradient explosion or dispersion problems. This paper constructs the multi-scale deep separable expression recognition network with residual network which embedded in attention mechanism. Through superposition of multi-layer and multi-scale depth separable residual elements, facial expression feature extraction of different scales is achieved; in the meanwhile, CBAM attention mechanism was used to screen the expression features for the purpose of improving the expression of the weight of the expression features and weakening the noise impact of training data. The algorithm network model in this paper achieves accuracy of 73.89% and 97.47% in Fer-2103 and CK + expression data sets respectively, which indicates that this network has strong generalization.

Keywords: expression recognition; attention mechanism; multi-scale feature extraction; depthwise separable convolution; residual network

http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2021-03-10; **Accepted**: 2021-06-13; **Published online**: 2021-07-13 08:46

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210712.1530.008.html

Foundation item: Science Technology Development Department of CNTAC (2019062)

* **Corresponding author**. E-mail: 81308995@qq.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0154

复合材料层板低速倾斜冲击损伤分析

张超*, 刘建春, 方鑫
(江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

摘 要: 纤维增强复合材料层板对低速冲击事件敏感,冲击产生的损伤会导致材料结构承载性能及使用寿命大幅下降。基于此,提出了一种基于连续介质损伤力学的有限元模型,研究了复合材料层板低速倾斜冲击力学行为。采用 Hashin 准则结合渐进退化模型预测层内损伤起始和演化;采用界面单元结合双线性 Traction-Separation 本构关系模拟层间分层;编写用户材料 VUMAT 子程序,实现基于 ABAQUS/Explicit 软件平台的数值求解。数值计算结果与现有正冲击下实验数据吻合较好,验证了模型的有效性。探讨了冲击角度、冲击能量对复合材料层板倾斜冲击力学性能的影响,分析倾斜冲击下层板损伤模式及失效机理,为复合材料结构倾斜冲击问题数值分析提供参考。

关 键 词: 复合材料层板; 低速冲击; 倾斜冲击; 损伤; 数值模拟
中图分类号: TB332
文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2022)12-2388-10

碳纤维增强复合材料层板具有比强度高、比模量大、力学性能可设计等优点,在现代航空结构中应用非常广泛。复合材料层板"叠层制造"的工艺,使得层板结构存在对低速冲击事件敏感、层间强度低、易分层等缺点。然而,复合材料层板在制造、装配、使用和维护期间,容易受到低速冲击事件的影响,如工具跌落、石子碰擦、冰雹冲击等。这类低速冲击事件,往往在复合材料层板内部产生肉眼难以观察的隐形损伤,如层间分层、基体开裂等。这些损伤会导致复合材料承载能力及使用寿命的大幅下降,对层板结构的安全使用造成严重威胁。

复合材料层板低速冲击过程是一个高度非线性的瞬态过程,其低速冲击力学行为及损伤机理的研究通常采用实验研究[1-5]、理论分析[6-8]和数值模拟[9-13]3 种方式。实验研究成本高、周期长且限定于特定条件;理论分析基于多种假设,过于简化,难以精确求解材料的动态响应;而有限元数值模拟可以较好地解决低速冲击这一瞬态动力学问题,详细获取冲击过程中层板损伤演化过程,具有边界适应性强、求解精度高等优点,已成为研究复合材料层板低速冲击问题的首选方法。

目前,对复合材料层板低速冲击力学行为数值模拟的研究主要集中在正冲击条件下,而实际应用中,带有一定角度的倾斜冲击则是更为普遍的情形。复合材料层板具有各向异性特征,铺层方式各异,不同冲击角度下损伤情况也不相同,相关倾斜冲击问题的数值研究工作开始受到学者们的关注。Pascal 等[14-15]基于半连续方法建立了机织复合材料和聚氨酯泡沫夹芯板的低速正冲击和倾斜冲击有限元模型,模拟了冲击过程中机织复合材料层的局部损伤现象,分析了材料最终断裂形状的形成机理。Kumar等[16]建立了复合材料夹芯板概率冲击有限元分析模型,探讨了冲击角度和冲击时层板

收稿日期: 2021-03-29; **录用日期**: 2021-07-09; **网络出版时间**: 2021-07-30 09:21
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210729.1745.005.html
基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20180855); 机械结构力学及控制国家重点实验室开放课题(MCMS-E-0219Y01)
* **通信作者**. E-mail: zhangchao@ujs.edu.cn

引用格式: 张超, 刘建春, 方鑫. 复合材料层板低速倾斜冲击损伤分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2388-2397.
ZHANG C, LIU J C, FANG X. Damage analysis in composite laminates under low velocity oblique impact[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2388-2397(in Chinese).

几何扭曲对夹芯板低速冲击响应不确定度的影响。徐瑀童等[17]建立了层板低速冲击损伤评估全过程模型,探讨了冲击能量和冲击角度对层板分层损伤的影响。

然而,直到目前,对复合材料层板倾斜冲击问题的数值研究工作还非常有限,对层板能量吸收和破坏机理的分析严重不足,远远没有满足实际工程应用的要求。本文建立了复合材料层板低速倾斜冲击损伤分析有限元模型,模拟倾斜冲击下复合材料层板损伤过程,分析材料损伤特性和失效机理,探讨冲击角度和冲击能量对层板倾斜冲击行为的影响,为复合材料结构倾斜冲击问题数值分析提供一定的参考。

1　复合材料损伤模型

1.1　层内损伤

1.1.1　起始准则

三维 Hashin 失效准则考虑了纤维和基体的拉伸和压缩损伤,被广泛运用于复合材料单层损伤预测。4 种损伤模式由式(1)~式(4)判定。

纤维拉伸失效($\sigma_{11}\geqslant 0$):

$$F_{\mathrm{ft}}=\left(\frac{\sigma_{11}}{X_{\mathrm{T}}}\right)^2+\alpha\left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2+\alpha\left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2\geqslant 1 \tag{1}$$

纤维压缩失效($\sigma_{11}<0$):

$$F_{\mathrm{fc}}=\left(\frac{\sigma_{11}}{X_{\mathrm{C}}}\right)\geqslant 1 \tag{2}$$

基体拉伸失效($\sigma_{22}+\sigma_{33}\geqslant 0$):

$$F_{\mathrm{mt}}=\left(\frac{\sigma_{22}+\sigma_{33}}{Y_{\mathrm{T}}}\right)^2+\left(\frac{1}{S_{23}^2}\right)(\sigma_{23}^2-\sigma_{22}\sigma_{33})+\left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2+\left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2\geqslant 1 \tag{3}$$

基体压缩失效($\sigma_{22}+\sigma_{33}<0$):

$$F_{\mathrm{mc}}=\left(\frac{\sigma_{22}+\sigma_{33}}{2S_{12}}\right)^2+\left(\frac{\sigma_{22}+\sigma_{33}}{Y_{\mathrm{C}}}\right)\left[\left(\frac{Y_{\mathrm{C}}}{2S_{12}}\right)^2-1\right]+\frac{1}{S_{23}^2}(\sigma_{23}^2-\sigma_{22}\sigma_{33})+\left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2+\left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2\geqslant 1 \tag{4}$$

式中:α 为剪切修正因子;X_{T}、X_{C} 分别为单层板轴向拉伸、压缩强度;Y_{T}、Y_{C} 分别为单层板横向拉伸、压缩强度;S_{12}、S_{13} 和 S_{23} 为单层板剪切强度;σ_{11} 为纤维束轴向应力,σ_{22} 和 σ_{33} 为纤维束横向应力;F_{ft}、F_{fc}、F_{mt} 和 F_{mc} 分别为纤维束轴向拉伸失效系数、轴向压缩失效系数、横向拉伸失效系数和横向压缩失效系数。

1.1.2　损伤演化规律

一旦满足材料的损伤起始准则,就需要损伤演化规律来预测损伤的后续发展。采用 Lapczyk 和 Hurtado[18] 提出的渐进退化方案来表征层内损伤的演化过程。

考虑到损伤的不可逆性,不同损伤模式下损伤变量 d_I 的演化规律为

$$d_I=\max\left\{d_I,\frac{\delta_{I,\mathrm{eq}}^{\mathrm{f}}(\delta_{I,\mathrm{eq}}-\delta_{I,\mathrm{eq}}^{0})}{\delta_{I,\mathrm{eq}}(\delta_{I,\mathrm{eq}}^{\mathrm{f}}-\delta_{I,\mathrm{eq}}^{0})}\right\}$$

$$d_I\in[0,1],\ I=\mathrm{ft},\mathrm{fc},\mathrm{mt},\mathrm{mc} \tag{5}$$

式中:$\delta_{I,\mathrm{eq}}^{0}$ 和 $\delta_{I,\mathrm{eq}}^{\mathrm{f}}$ 分别为某一失效模式的初始损伤等效位移和完全失效等效位移,计算式为

$$\delta_{I,\mathrm{eq}}^{0}=\delta_{I,\mathrm{eq}}/\sqrt{\varphi_I} \tag{6}$$

$$\delta_{I,\mathrm{eq}}^{\mathrm{f}}=2G_I/(\sigma_{I,\mathrm{eq}}/\sqrt{\varphi_I}) \tag{7}$$

其中:φ_I 为与失效模式相关的指标,由各损伤模式的起始准则计算得来,G_I 为断裂能密度;$\delta_{I,\mathrm{eq}}$ 和 $\sigma_{I,\mathrm{eq}}$ 分别为某一损伤模式的等效位移和等效应力,表达式为

$$\delta_{I,\mathrm{eq}}=l\sqrt{\langle\varepsilon_{ii}\rangle^2+\alpha_I\sum_{j=1,j\neq i}^{3}\varepsilon_{ij}^2}\qquad i=1,2,3 \tag{8}$$

$$\sigma_{I,\mathrm{eq}}=l\left(\langle\sigma_{ii}\rangle\langle\varepsilon_{ii}\rangle+\sum_{j=1,j\neq i}^{3}\sigma_{ij}\varepsilon_{ij}\right)/\delta_{I,\mathrm{eq}}$$

$$i=1,2,3 \tag{9}$$

式中:l 为单元特征长度;"< >"为 Macaulay 运算符;ε_{ii} 为纤维束轴向或横向正应变;α_I 为剪切应变的贡献因子。

1.2　层间损伤

层间分层是低速冲击下复合材料层板最典型的损伤模式。本文在相邻复合材料单层之间引入零厚度界面单元(cohesive elements),以模拟低速冲击下复合材料层板的分层现象。界面单元力学行为由混合模式下双线性 Traction-Separation 本构模型确定,初始阶段为线弹性响应,损伤后采用线性损伤演化。

定义混合模式下相对位移 δ_{m} 的表达式为

$$\delta_{\mathrm{m}}=\sqrt{\langle\delta_1\rangle^2+\delta_2^2+\delta_3^2} \tag{10}$$

式中:δ_1 为界面法向相对位移;δ_2、δ_3 分别为界面 2 个切向相对位移。

界面起始损伤位移 δ_{m}^{0} 由式(11)确定:

$$\left(\frac{\langle t_1\rangle}{N}\right)^2+\left(\frac{t_2}{S}\right)^2+\left(\frac{t_3}{T}\right)^2=1 \tag{11}$$

式中:N 为界面法向强度;S、T 为界面剪切强度;t_1、t_2、t_3 为界面法向及切向应力。

界面完全失效位移 $\delta_{\mathrm{m}}^{\mathrm{f}}$ 由式(12)确定:

$$\left(\frac{G_{\mathrm{I}}}{G_{\mathrm{IC}}}\right)^2+\left(\frac{G_{\mathrm{II}}}{G_{\mathrm{IIC}}}\right)^2+\left(\frac{G_{\mathrm{III}}}{G_{\mathrm{IIIC}}}\right)^2=1 \tag{12}$$

式中:G_{I}、G_{II}、G_{III} 分别为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ型裂纹应变能

http://bhxb.buaa.edu.cn

释放率;G_{IC}、G_{IIC}、G_{IIIC}分别为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ型裂纹临界应变能释放率。

界面损伤起始后,界面损伤演化由式(13)确定:

$$d = \frac{\delta_{\mathrm{m}}^{\mathrm{f}}(\delta_{\mathrm{m}}^{\max} - \delta_{\mathrm{m}}^{0})}{\delta_{\mathrm{m}}^{\max}(\delta_{\mathrm{m}}^{\mathrm{f}} - \delta_{\mathrm{m}}^{0})} \qquad d \in [0,1] \tag{13}$$

式(13)中考虑了界面损伤的不可逆性,定义混合模式下界面最大相对位移 $\delta_{\mathrm{m}}^{\max}$ 为

$$\delta_{\mathrm{m}}^{\max} = \max\{\delta_{\mathrm{m}}^{\max}, \delta_{\mathrm{m}}\} \tag{14}$$

因此,混合模式下,界面双线性 Traction-Separation 本构关系由式(15)确定:

$$t_s = D_{sr}\delta_r \qquad s = 1,2,3;r = 1,2,3 \tag{15}$$

$$D_{sr} = \begin{cases} \bar{\delta}_{sr}K & \delta_{\mathrm{m}}^{\max} \leqslant \delta_{\mathrm{m}}^{0} \\ \bar{\delta}_{sr}(1-d)K & \delta_{\mathrm{m}}^{0} < \delta_{\mathrm{m}}^{\max} < \delta_{\mathrm{m}}^{\mathrm{f}}, \delta_1 > 0 \\ \bar{\delta}_{sr}[(1-d)K + Kd\bar{\delta}_{s1}] & \delta_{\mathrm{m}}^{0} < \delta_{\mathrm{m}}^{\max} < \delta_{\mathrm{m}}^{\mathrm{f}}, \delta_1 \leqslant 0 \\ 0 & \delta_{\mathrm{m}}^{\max} \geqslant \delta_{\mathrm{m}}^{\mathrm{f}}, \delta_1 > 0 \\ \bar{\delta}_{s1}\bar{\delta}_{1r}K & \delta_{\mathrm{m}}^{\max} \geqslant \delta_{\mathrm{m}}^{\mathrm{f}}, \delta_1 \leqslant 0 \end{cases}$$

式中:$\bar{\delta}_{ij}$为 Kronecker 算子;K 为界面罚刚度。

2 低速冲击有限元模型

2.1 有限元建模

基于文献[19]正冲击实验数据建立有限元模型。复合材料层板直径为 75 mm,每层厚度为 0.25 mm,共 8 层,正交铺层为$[0/90]_{2s}$。冲头为半球形圆柱体,直径为 15 mm;初始速度为 3.83 m/s;质量分别为 1 kg、1.5 kg、2 kg,冲击能量分别为 7.35 J、11.03 J、14.70 J。

采用实体单元 C3D8R 对层板进行网格离散。在相邻层间插入零厚度界面单元 COH3D8 模拟冲击载荷下的分层现象。层板边界设置为固定边界条件,约束所有自由度以代表实验中的夹紧条件。冲头设置为解析刚体。采用 ABAQUS 软件中“Surface to Surface”接触属性定义冲头和层板之间的接触行为。考虑到低速冲击中层板损伤失效主要出现在冲击接触区,层板模型网格采用渐进划分方式,既保证分析精度,又可以提高运算效率。低速正冲击有限元模型如图 1 所示,单向复合材料和界面性能参数列于表 1 和 2。

2.2 数值模型验证

图 2 给出了 3 种正冲击能量(7.35 J、11.03 J 和 14.70 J)下实验和数值模拟获得的冲击力-时间曲线。可以看出,在这 3 种情况下,数值模型预测的冲击过程所经历的时间与实验结果吻合较好。

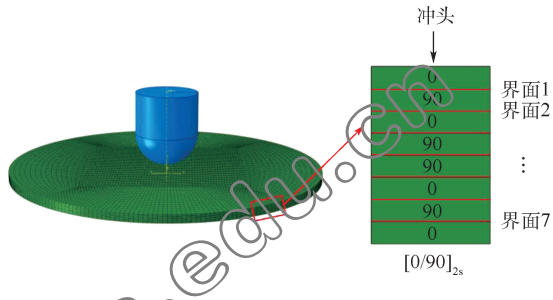


图 1 复合材料层板低速正冲击有限元模型

Fig. 1 Finite element model of composite laminates under low velocity normal impact

表 1 单向复合材料性能参数

Table 1 Material properties of unidirectional composite

参数	数值
密度/(kg·m^{-3})	1 600
弹性性能/GPa	$E_{11}=153$; $E_{22}=E_{33}=10.3$ $G_{12}=G_{13}=6$; $G_{23}=3.7$ $v_{12}=v_{13}=0.3$; $v_{23}=0.4$
强度性能/MPa	$X_{\mathrm{T}}=2\,537$; $X_{\mathrm{C}}=1\,580$ $Y_{\mathrm{T}}=82$; $Y_{\mathrm{C}}=236$; $S=117.45$ $S_{12}=S_{13}=90$; $S_{23}=40$
断裂韧性/(N·mm^{-1})	$G_{\mathrm{ft}}=G_{\mathrm{fc}}=10$; $G_{\mathrm{mt}}=G_{\mathrm{mc}}=1$

表 2 界面材料性能参数

Table 2 Material properties of interface material

参数	数值
密度/(kg·m^{-3})	1 200
K/(N·mm^{-3})	200 000
N/MPa	62.3
$S=T$/MPa	92.3
G_{IC}/(N·mm^{-1})	0.28
$G_{\mathrm{IIC}}=G_{\mathrm{IIIC}}$/(N·mm^{-1})	0.79

整个冲击过程经历的时间随着冲击能量的增大而增加,这是因为:模拟中冲击能量的变化是通过改变冲头质量来实现,而非改变冲击速度。冲击力峰值也随冲击能量增大而变大,整体上呈现随时间变化先上升后下降的趋势,且在峰值力附近曲线有明显的震荡现象。数值模拟过程中,冲击力-时间曲线的震荡历程反映了层板冲击过程中不同损伤模式的起始、演化过程,以及峰值力附近各种损伤快速耦合扩展。数值模拟中的峰值力均略大于实验中的峰值力。

图 3 给出了 3 种冲击能量下实验和数值模拟获得的冲击能量-时间曲线。冲头在触碰到层板后,动能开始转化,一部分动能转化为层板的弹性势能,另一部分动能使层板产生振动和内部损伤。

http://bhxb.buaa.edu.cn

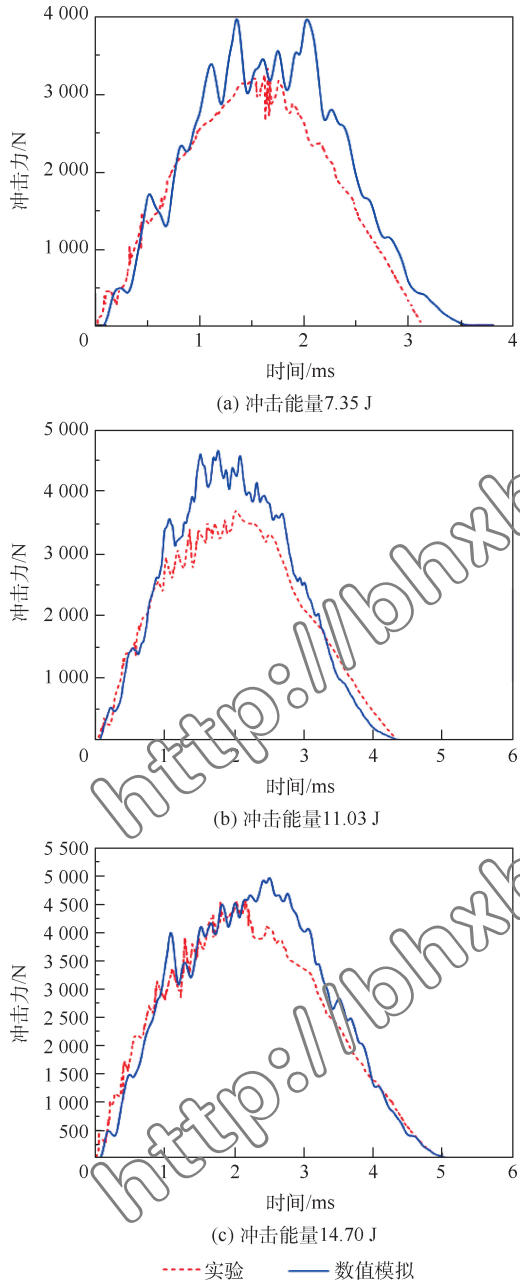


图 2　三种冲击能量下数值与实验冲击力-时间曲线比较

Fig. 2　Comparison of numerical and experimental impact force-time curves under three impact energy levels

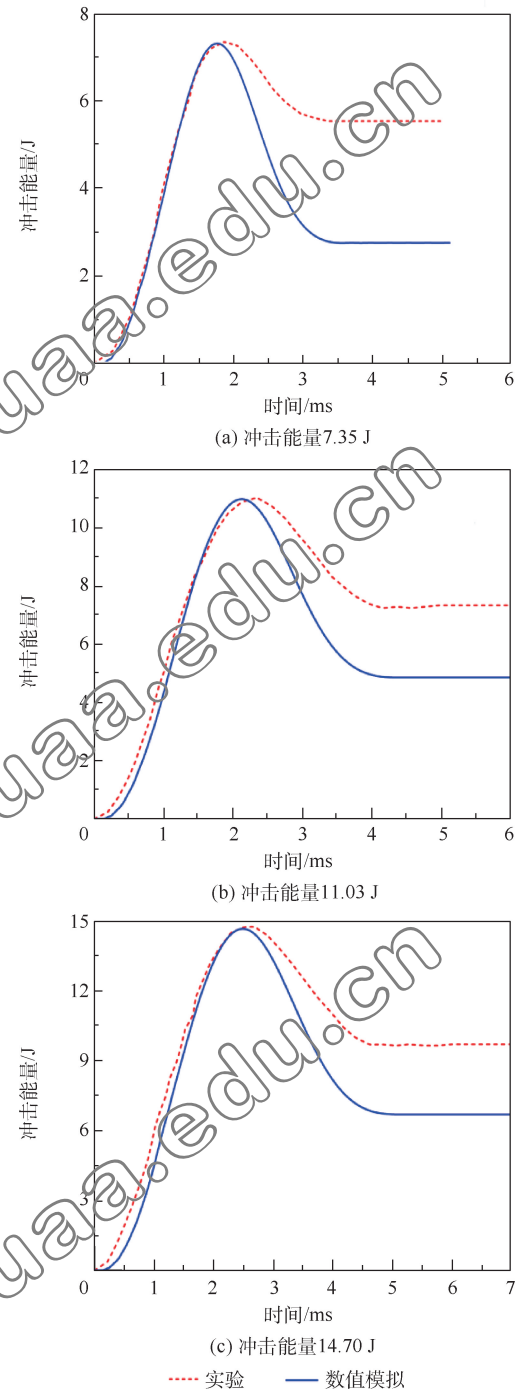


图 3　三种冲击能量下数值与实验冲击能量-时间曲线比较

Fig. 3　Comparison of numerical and experimental impact energy-time curves under three impact energy levels

当冲击能量-时间曲线中冲击能量达到最大值时,冲头速度降为零,此时层板的弹性势能达到最大。随后,层板的弹性势能开始转化为冲头的动能,使其产生回弹。由图 3 可以看出,由于冲击能量的耗散,冲头稳定回弹时的速度要小于初始冲击速度。也就是说,数值模拟得出的能量吸收值要低于实验值,但随着冲击能量的增加,这种差异逐渐减小。同时,冲击能量越大,层板吸收的能量也越多,层板损伤情况也越严重。数值模拟中,冲头达到零速度和稳定回弹速度所需的时间与实验测试结果基本一致。

3　数值分析与讨论

低速冲击下,复合材料层板损伤模式主要为基体开裂、层间分层和纤维断裂。其中,基体开裂和层间分层对冲击较为敏感,即使是在较小的冲击能量下也比较容易产生,而纤维断裂往往发生在较高的冲击能量下。虽然这些损伤从层板的表面看并不明显,但会对材料的剩余性能和安全使用产生重大影响。

http://bhxb.buaa.edu.cn

本节在已验证复合材料层板低速冲击有限元模型的基础上,改变冲头冲击角度(冲击速度与层板之间的夹角),考虑冲击物实际尺寸,并引入转动惯量及冲头与层板间的摩擦系数,建立实物倾斜冲击有限元模型,实现对层板低速倾斜冲击的数值预测。采用的冲头质量为 0.446 kg,摩擦系数为0.3,冲击速度分别为 6 m/s、7 m/s、8 m/s、9 m/s,即在冲击能量为 8.03 J、10.93 J、14.27 J、18.06 J 下开展冲击角度为 30°、45°、60°、90°的倾斜冲击数值分析。

3.1 倾斜冲击过程分析

低速冲击是一个瞬态动力学过程,本节以 14.27 J 冲击能量下 45°倾斜冲击为例,给出该工况下倾斜冲击过程,如图 4 所示,整个冲击过程中冲头与层板接触时间约为 2.2 ms。低速冲击过程可以分为 3 个阶段:损伤起始阶段、损伤扩展阶段和冲击回弹阶段。损伤起始阶段如图 4(a)、(b)所示,在冲头开始接触层板后,冲击力从零开始突然增大,压缩应力沿层板面内和厚度方向快速传播。损伤扩展阶段如图 4(b)、(c)所示,在这一阶段,不同损伤模式在层板中迅速产生并扩展,层板上表面出现局部凹陷,下表面出现局部突起,基体出现开裂。分层首先发生在上层界面,然后很快出现在每层界面中。随着冲击的持续,冲击过程中基体裂纹和分层不断发展,但在这个冲击能量下并未出现明显的层内纤维断裂现象。随着冲击过程的持续,冲头的动能逐渐转化为层板的弹性势能和其他耗散能,冲头的速度逐渐减小,当冲头速度为零时,这一阶段结束。冲击回弹阶段如图 4(d)、(e)所示,这一阶段冲击接触力逐渐减小,层板弹性势能开始逐渐转化为冲头的动能,冲头发生回弹,并且冲击引起的层板变形开始恢复,层内的基体裂纹不再扩大,而界面分层损伤会在一定程度上继续扩展。

在冲击过程中,受转动惯量及冲头与层板间摩擦力的影响,冲头自身会发生一定的偏转。从冲头开始接触层板到达到冲击的最大位移位置,冲头偏转并不明显,当冲头从最大位移位置发生回弹时,偏转现象较为明显,如图 4(d)、(f)所示。初始状态时,冲头的运动是在 x-z 平面内,层板所处平面为 x-y 平面。可以发现,冲击过程中,冲头除了在自身 x-z 平面发生偏转外,回弹过程中也在 x-y 平面内发生偏转。这种情形与实际倾斜冲击时冲头偏转情况较为吻合。

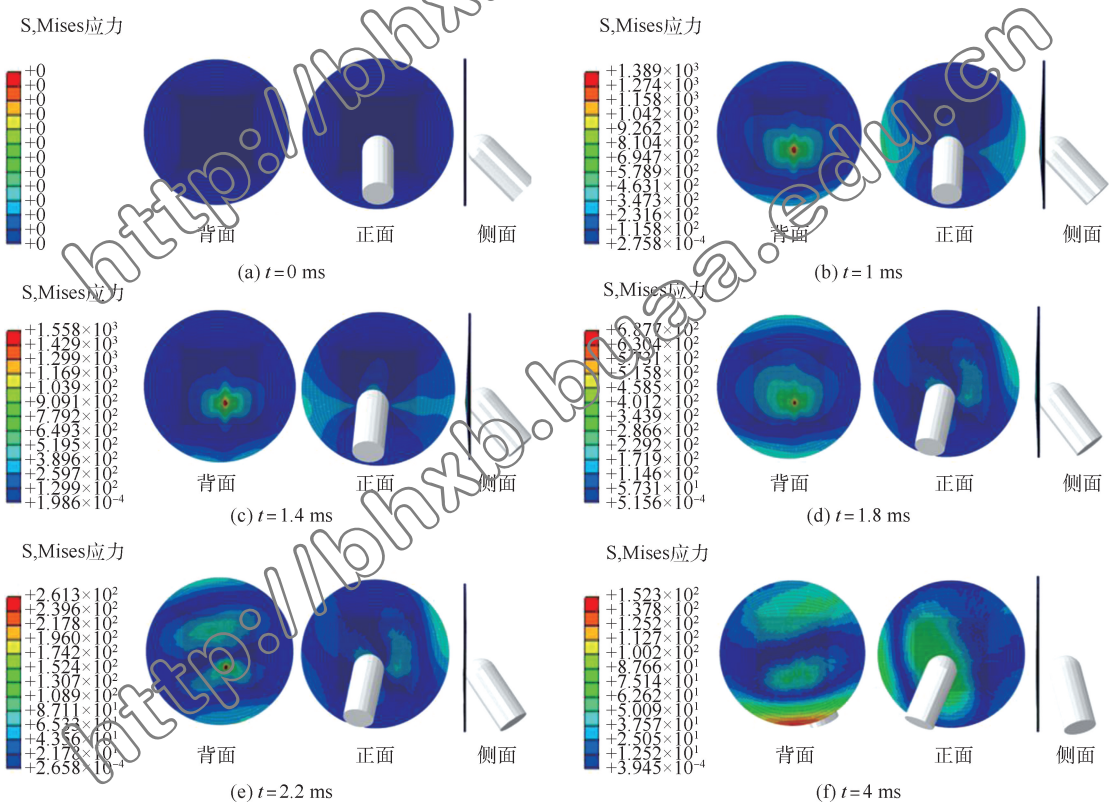


图 4 14.27 J 冲击能量下复合材料层板 45°低速倾斜冲击过程

Fig. 4 Low-velocity oblique impact of composite laminates under impact energy of 14.27 J at 45°

3.2 冲击角度对层板冲击损伤的影响

为了探讨冲击角度对复合材料层板冲击损伤的影响,分别开展冲击角度为 30°、45°、60°、90°的倾斜冲击模拟。图 5 为 14.27 J 冲击能量不同冲

http://bhxb.buaa.edu.cn

击角度下冲头的动能变化情况。在各个冲击角度下,冲头的冲击速度值是相同的。冲击速度可以分解到层板的厚度和面内 2 个方向。在冲击过程中,随着冲头与层板的接触,沿层板厚度方向的动能一部分转化为层板的弹性势能,另一部分转化为使层板产生损伤和振动的耗散能。由图 5 可以看出,随着冲击角度的增大,冲击过程中冲头的动能衰减越快;但在这些冲击角度下,60°工况下冲头的剩余速度最小,层板吸收的能量最多。

图 6 为 14.27 J 冲击能量不同冲击角度下冲击力的变化。在倾斜冲击下,除了与层板垂直的方向产生冲击力外,还会在平行于层板的方向产生,图 6 中所描述的是各方向冲击力的合力。可以看出,30°时冲击力最小,随着冲击角度增大,所产生的冲击力也变大。在 45°和 60°时冲击力峰值比较接近,而在 90°冲击时,冲击力峰值迅速增大。4 种冲击角度下冲击力总体上都随冲击历程先增大,在达到峰值后开始下降,但存在一些显著波动。在冲击开始的一小段时间内,曲线都呈稳定上升。当时间达到 0.2 ms 左右时,出现了明显波动。此时各曲线的冲击载荷比较接近,观察层板损伤情况可以发现,层板最接近冲击面的那一层界面开始出现分层损伤,伴随着分层的出现,曲线出现波动。除了分层损伤,层板还出现了基体损伤。随着冲击过程的进行,分层损伤在其余界面层相继出现并扩展,基体损伤也不断演化,在这些损伤模式的共同作用下,曲线波动明显。当冲头达到最大位移进入回弹阶段时,层板损伤的快速扩展阶段已基本结束,在此阶段除分层外,几乎不产生新的损伤。可以看到,这时的曲线较为平缓,但也有少量波动。此外,在模拟边界条件时设置为层板四周固定,以此来模拟层板冲击过程中的夹紧状态,在冲击过程中层板会产生振动。因此,曲线中存在的波动是由层板不同模式损伤起始、演化和冲击振动的共同作用所导致。

图 7 给出了不同冲击角度下基体的损伤分布,

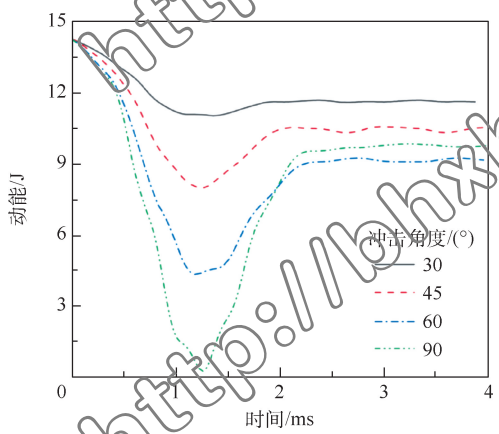


图 5　不同冲击角度冲击过程中冲头的动能变化

Fig. 5　Kinetic energy variation of impactor during impact at different impact angles

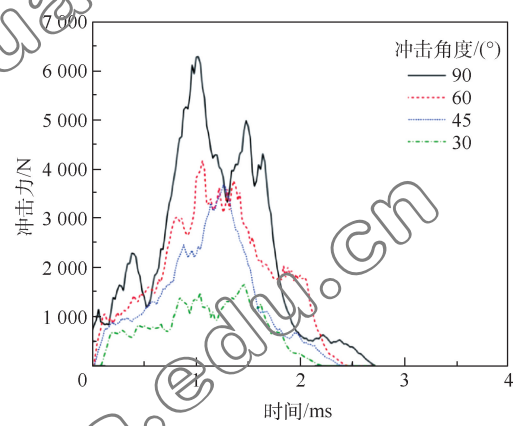


图 6　不同冲击角度冲击过程中冲头的冲击力变化

Fig. 6　Impact force variation of impactor during impact at different impact angles

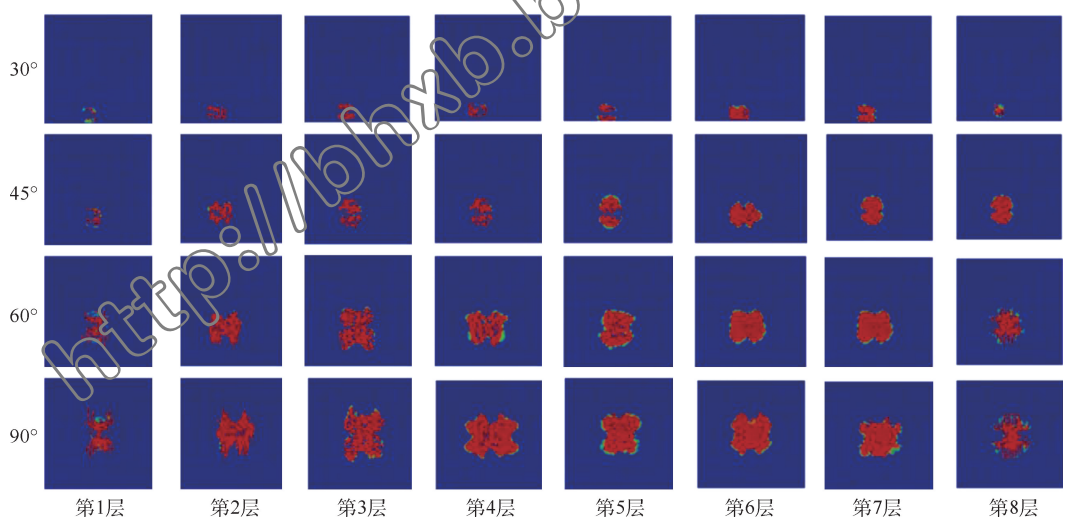


图 7　不同冲击角度下复合材料层板基体损伤分布

Fig. 7　Matrix cracking in damaged composite laminates during impact at different impact angles

http://bhxb.buaa.edu.cn

显示部分为冲头与层板接触的冲击区域。最先与冲头接触的那一层定义为层板的第 1 层,下面为第 2 层、第 3 层,依次类推。损伤类型主要是基体开裂,纤维在此能级下损伤并不明显。可以看到,中间的第 4 层、第 5 层损伤较为严重,下 3 层基体损伤面积与上 3 层相比相对较大。层板受到冲击产生变形时,基体的拉伸损伤从背面开始,有向上层扩展的趋势。

通过比较可以看出,尽管冲击角度不同,但在这些冲击角度下,层板各对应层的基体损伤分布情况大致相同,损伤形状基本一致,都呈现蝴蝶状损伤。此外,可以明显看出,每层损伤的损伤长轴与下层板主轴方向大致相同,并且随着冲击角度的增大,层板基体损伤越严重。在冲头与层板接触时,沿层板厚度方向的动能开始转化,速度开始减小,当厚度方向的速度为零时开始反弹。90°冲击时层板厚度方向速度最大,产生的冲击力峰值也最大,损伤最严重。这表明相同能量低速倾斜冲击时,冲击角度越大,基体损伤状态越严重。

分层损伤在低能级中并不明显,在 18.06 J 的冲击能量下出现了明显损伤。模拟中,当损伤变量达到 0.99 时,界面单元删除。在此能级下大部分的界面损伤区域并没有出现单元删除,产生的界面损伤为部分失效,但这些界面损伤会大幅降低层板的剩余强度,给层板的后续使用带来安全隐患。其中在冲击角度为 60°和 90°时,部分层出现明显的单元删除。图 8 为这 2 种角度 18.06 J 冲击能量下的分层情况。第 1 层和第 2 层层板之间界面定义为第 1 层界面,依此类推。可以看到,在这种能级下分层主要发生第 5、6、7 三个界面层,并且正冲击下的分层损伤要多于倾斜冲击,随着冲击角度的增加,分层面积也越大,这与基体的损伤趋势基本一致。

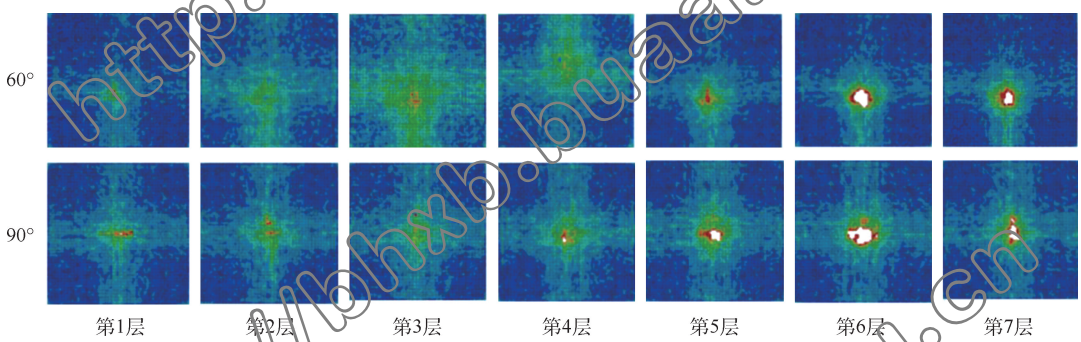


图 8 不同冲击角度下复合材料层板分层损伤分布

Fig. 8 Delamination in damaged composite laminates during impact at different impact angles

3.3 冲击能量对层板冲击损伤的影响

为了探讨冲击能量对复合材料层板冲击损伤的影响,以 60°冲击角度为例进行讨论,通过改变冲头速度来调整冲击能量。冲击能量分别为 8.03 J、10.93 J、14.27 J、18.06 J。图 9 给出了不同冲击能量下冲头的动能变化情况。可以发现,初始冲击能量越大,较高的冲击速度所带来的大能量冲击对层板的破坏更严重;并且初始冲击能量越大,层板在冲击过程中吸收更多能量,产生的损伤也更为严重,冲击过程中能量的衰减也越多。

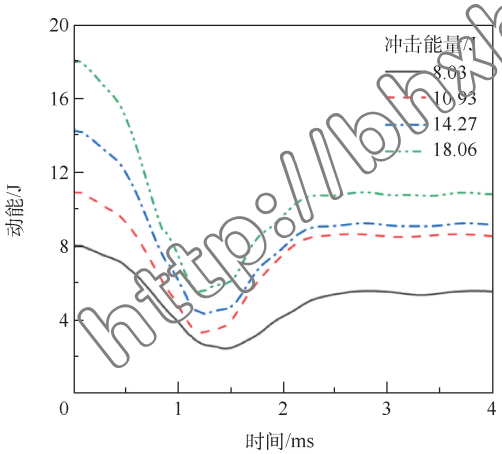


图 9 不同冲击能量冲击过程中冲头的动能变化

Fig. 9 Kinetic energy variation of impactor during impact at different impact energies

图 10 为不同冲击能量下冲击力的变化情况。由于冲击角度相同,此处描述的是 60°工况下垂直于层板的冲击力。可以看到,在不同冲击能量下,冲击力的变化趋势大致相同,随着冲头侵入时增加,在冲头回弹时逐渐减小,直到冲头与层板分离,整个冲击过程结束。在冲击能量为 8.03 J 时,冲击力峰值较小,在其他冲击能量下,尽管能量越大,冲击力峰值增加,但总体上而言,差距并不大。曲线中存在的波动,也是由层板不同模式损伤起始、演化和冲击振动共同作用导致。

图 11 为不同冲击能量 60°倾斜冲击下典型层的损伤分布情况。图 11(a)为第 4 层基体损伤,可以看出,基体损伤区域形状可以近似看作蝴

http://bhxb.buaa.edu.cn

蝶状,各对应层的损伤区域形状基本相同。8.03 J 冲击能量下,损伤区域面积较小,随着冲击能量的增加,损伤区域面积逐渐增大。这表明冲击能量越大,冲击造成的损伤越严重。分层损伤总体上并不明显,图 11(b)为第 6 层界面分层情况,其中 8.03 J 和 10.93 J 冲击能量时并没有出现明显的单元删除,在 14.27 J 冲击能量时出现较少的删除现象,随着能量进一步增加,删除单元增多。

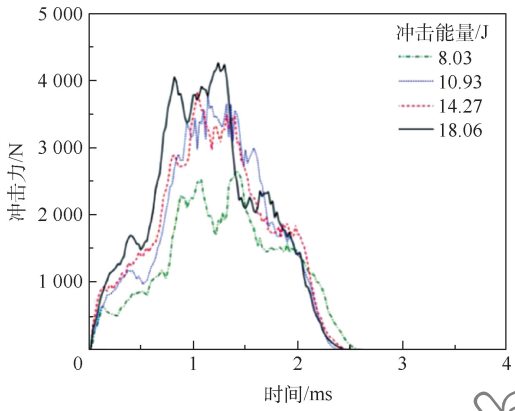
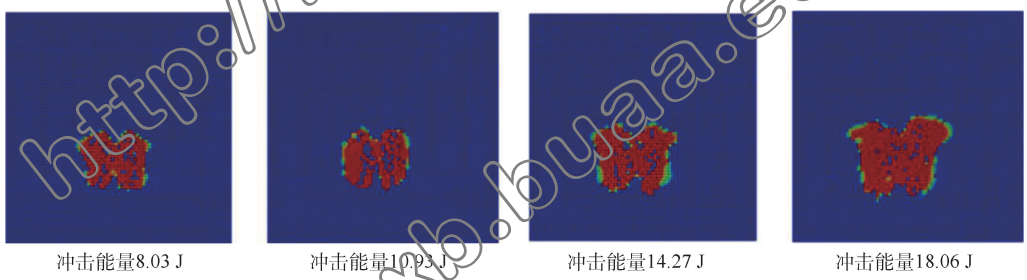


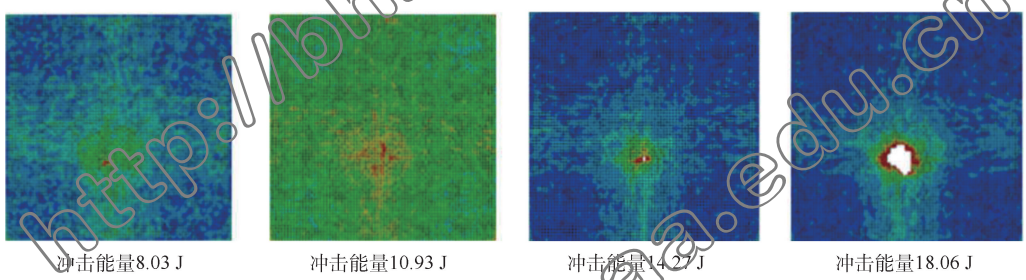
图 10　不同冲击能量冲击过程中冲头的冲击力变化

Fig. 10　Impact force variation of impactor during impact at different impact energies

图 12 为基体损伤随冲击角度和冲击能量的变化情况。可以看出,在各冲击能量下,基体损伤单元数量随冲击角度的变化趋势大致相同,且能量越高,损伤越多;其中当冲击角度在 45°与 60°之间时,基体损伤单元数的变化更加剧烈。这说明基体损伤对于这个范围角度的冲击更为敏感。总体上而言,冲击角度的增加会引起更多的基体损伤。



(a) 第4层基体损伤



(b) 第6层界面分层

图 11　不同冲击能量下典型层损伤分布情况

Fig. 11　Damage distribution of typical layer under different impact energies

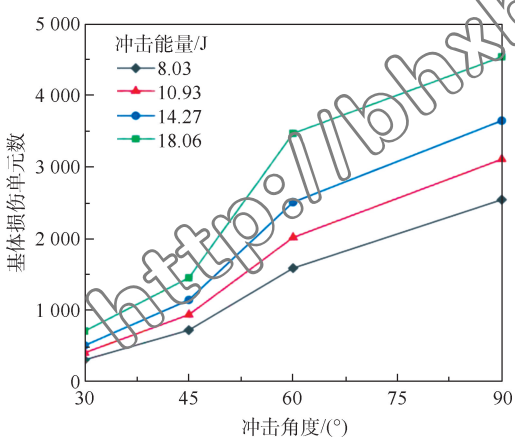


图 12　不同冲击角度和冲击能量下基体损伤变化

Fig. 12　Variation of matrix damage with different impact angles and impact energies

4　结　论

1)所建立的复合材料层板低速冲击有限元模型可以有效分析层板在正冲击下的损伤特性,并适用于预测层板低速倾斜冲击下的力学行为。

2)保持冲击能量不变,对复合材料层板开展 4 种冲击角度下的数值模拟。结果表明,冲击角度越大,冲击过程中冲击力峰值越大;随冲击角度增加,层板吸能越多,损伤越严重,分层区域也越大。

3)保持冲头质量不变,改变冲击速度,对复合材料层板开展 4 种不同冲击能量下倾斜冲击模拟。结果表明,随着冲击能量增大,冲击力峰值增

http://bhxb.buaa.edu.cn

大,层板吸收了更多能量,基体损伤与层间分层面积显著增加。

4)根据不同冲击角度和冲击能量下基体损伤变化曲线,冲击角度与冲击能量的增加会引起更多损伤,其中基体损伤对45°与60°之间的冲击更为敏感。

参考文献(References)

[1] 崔旭,李斌,王朔,等. GLARE层板低速冲击的实验与模拟[J]. 航空材料学报,2019,39(2):68-74.
CUI X,LI B,WANG S,et al. Simulation on low velocity impact to GLARE laminate based on ABAQUS[J]. Journal of Aeronautical Materials,2019,39(2):68-74(in Chinese).

[2] SOLVER I,THORSSON A,SUNIL P,et al. Experimental investigation of composite laminates subject to low-velocity edge on impact and compression after impact[J]. Composite Structures,2018,186:335-346.

[3] HESAM Y,ALI N,HAMED S,et al. Experimental and numerical investigation of low velocity impact on electrospun nanofiber modified composite laminates[J]. Composite Structures,2018,200:507-514.

[4] DAMGHANI M,ERSOY N,PIORKOWSKI M,et al. Experimental evaluation of residual tensile strength of hybrid composite aerospace materials after low velocity impact[J]. Composites Part B,2019,179:107537.

[5] MIAO H R,WU Z Y,YING Z P,et al. The numerical and experimental investigation on low-velocity impact response of composite panels:Effect of fabric architecture[J]. Composite Structures,2019,227:111343.

[6] NATSUKI T,YOSHIZAWA K,BAO L M,et al. Theoretical analysis of low-velocity impact response in two-layer laminated plates with an elastic medium layer[J]. Composite Structures,2017,162:308-312.

[7] 王计真,刘小川. 预加载复合材料层合薄板低速冲击理论分析[J]. 应用力学学报,2018,35(6):1248-1253.
WANG J Z,LIU X C. Theoretical analysis of low speed impact of preloaded composite laminates[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics,2018,35(6):1248-1253(in Chinese).

[8] PEREZ M,MARTINEZ X,OLLER S,et al. Impact damage prediction in carbon fiber-reinforced laminated composite using the matrix-reinforced mixing theory[J]. Composite Structures,2013,104:239-248.

[9] ZHOU Y Z,WEN P Y,WANG S N. Finite element analysis of a modified progressive damage model for composite laminates under low-velocity impact[J]. Composite Structures,2019,225:111113.

[10] WAN Y,DIAO C Y,YANG B,et al. GF/epoxy laminates embedded with wire nets:A way to improve the low-velocity impact resistance and energy absorption ability[J]. Composite Structures,2018,202:818-835.

[11] JIANG Y X,ZHANG B Y,WEI J S,et al. Study on the impact resistance of polyurea-steel composite plates to low velocity impact[J]. International Journal of Impact Engineering,2019,133:103357.

[12] FENG D,AYMERICH F. Finite element modelling of damage induced by low-velocity impact on composite laminates[J]. Composite Structures,2014,108:160-171.

[13] ZHANG C,DUODU E,GU J N,et al. Finite element modeling of damage development in cross-ply composite laminates subjected to low velocity impact[J]. Composite Structures,2017,173:219-227.

[14] PASCAL F,DORICAL O,NAVARRO P,et al. Impact damage prediction in thin woven composite laminates. Part I:Modeling strategy and validation[J]. Composite Structures,2018,190:32-42.

[15] PASCAL F,ROGANI A,MAHMOUD B,et al. Impact damage prediction in thin woven composite laminates. Part II:Application to normal and oblique impacts on sandwich structure[J]. Composite Structures,2018,190:43-51.

[16] KUMAR R,MUKHOPADHYAY T,NASKAR S,et al. Stochastic low-velocity impact analysis of sandwich plates including the effects of obliqueness and twist[J]. Thin-Walled Structures,2019,145:106411.

[17] 徐瑀童,左洪福,陆晓华,等. 复合材料低速冲击损伤评估数值分析与试验研究[J]. 振动与冲击,2019,38(3):149-155.
XU Y T,ZUO H F,LU X H,et al. Numerical analysis and experimental study on low speed impact damage evaluation of composite materials[J]. Journal of Vibration and Shock,2019,38(3):149-155(in Chinese).

[18] LAPCZYK I,HURTADO J. Progressive damage modeling in fiber reinforced materials[J]. Composites Part A,2007,38(11):2333-2341.

[19] SHI Y,SWAIT T,SOUTIS C. Modelling damage evolution in composite laminates subjected to low velocity impact[J]. Composite Structures,2012,94(9):2902-2913.

http://bhxb.buaa.edu.cn

Damage analysis in composite laminates under low velocity oblique impact

ZHANG Chao*, LIU Jianchun, FANG Xin

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Fiber reinforced composite laminates are sensitive to low velocity impact events, and the induced damage extensively reduces the load-bearing capacity and service life of composite structures. A continuum damage mechanics based finite element model is proposed to investigate the mechanical behavior of composite laminates under low velocity oblique impact. The Hashin criteria and a gradual degradation model are employed to predict the intra-laminar damage initiation and evolution; cohesive elements ruled by the bilinear Traction-Separation constitutive relation are applied to simulate delamination. A user material subroutine VUMAT is then developed and implemented to obtain the numerical solution based on ABAQUS/Explicit solver. The numerical results are largely consistent with the available experimental data under normal impact, thus validating the effectiveness of the proposed model. The effects of the impact angle and impact energy on the oblique impact properties of composite laminates are discussed and the damage mode and failure mechanism are analyzed in detail, providing insight into the numerical study on general oblique impact problems in composite structures.

Keywords: composite laminate; low-velocity impact; oblique impact; damage; numerical simulation

http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2021-03-29; **Accepted**: 2021-07-09; **Published online**: 2021-07-30 09:21

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210729.1745.005.html

Foundation items: Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20180855); Research Fund of State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures (MCMS-E-0219Y01)

* **Corresponding author**. E-mail: zhangchao@ujs.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0161

航空铝试块疲劳裂纹相控阵超声成像检测

彭朝勇[1,*], 胥松柏[1], 杜创洲[1], 张杰[2]

(1. 西南交通大学 物理科学与技术学院, 成都 610031; 2. 英国布里斯托尔大学 机械工程学院, 布里斯托尔 BS8 1TR)

摘 要: 表面疲劳裂纹扩展可导致结构失效,利用相控阵超声成像技术监测疲劳裂纹,获取结构完整性评价所需裂纹信息,可及时对结构失效提出安全预警。采用三点弯曲疲劳试验法在航空铝试块上生长疲劳裂纹,对裂纹开口面材料进行逐步切削来获得不同长度的疲劳裂纹,利用相控阵超声全矩阵采集(FMC)和全聚焦方法(TFM)获得的裂纹尖端和开口图像信息来监测裂纹扩展和测量裂纹长度,并测试了相控阵超声探头放置位置、裂纹张开/闭合、裂纹表面粗糙度对超声成像检测效果的影响。研究结果表明:相控阵超声探头从裂纹侧面入射检测能更好地对裂纹进行超声成像,并真实反映材料内部裂纹扩展前缘形貌。当疲劳裂纹长度大于3倍超声波长时,裂纹尖端和开口图像完全分离,相控阵超声全矩阵采集和全聚焦成像技术可有效测量裂纹长度,测量误差小于0.2 mm。相比裂纹张开时,疲劳裂纹闭合效应会使裂纹尖端超声图像信号减弱4.5 dB,长度测量值小0.6 mm。

关 键 词: 疲劳裂纹; 相控阵超声; 全矩阵采集/全聚集方法; 成像特征; 裂纹长度
中图分类号: V221$^+$.3; TB553
文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2022)12-2398-07

疲劳裂纹多在反复载荷和恶劣工作条件下产生,是金属结构失效的主要原因之一[1-3]。据统计,运行中的金属结构有多达90%的故障是由疲劳引起的[4]。初始疲劳裂纹的形成通常并不导致结构立即失效[5],在循环载荷继续作用下,宏观裂纹会以惊人的速度扩展至临界水平,从而对结构完整性造成不利影响,导致灾难性后果[6-7]。利用实测的疲劳裂纹尺寸,结合断裂力学计算分析,通过结构完整性评估,可以估算结构的剩余寿命[8]。如果疲劳裂纹位于结构可触及的被检测面上,可使用渗透、磁粉、涡流、热成像等技术来对疲劳裂纹进行无损评价[9]。对于一些检测手段难以直接接触的工件表面疲劳裂纹,则可使用超声波导波或体波检测[10-12]。

常规超声检测结果呈现通常采用A扫,对缺陷的定量通常是与参考缺陷进行当量对比,而无法获得真实的缺陷形貌特征;普通相控阵超声扇形扫查,在超声检测效率和结果成像上有了进一步的提高,但仍然无法对疲劳裂纹进行直观成像量化。疲劳裂纹可通过相控阵超声全矩阵采集(full matrix capture, FMC)和后处理技术来成像,如全聚焦方法[13](total focusing method, TFM)及其变体[14-16]。使用相控阵超声FMC/TFM来检测和表征疲劳裂纹的一大优势在于相控阵超声探头可以以一个大角度入射到疲劳裂纹面,所形成的高分辨率图像有利于提高疲劳裂纹的检测精度和对其进行特征量化[13,17]。理论上,对于尺寸大于2个超声波长的裂纹,TFM图像中所包含的信息可用于测量裂纹尺寸[18-20]。然而,这种超声检测及成像方法几乎都采用人工切槽来开展试验研

收稿日期: 2021-04-01; **录用日期**: 2021-05-14; **网络出版时间**: 2021-05-26 10:25
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210525.1137.001.html
基金项目: 国家自然科学基金(61501381)
*通信作者. E-mail: pengmd@163.com

引用格式: 彭朝勇, 胥松柏, 杜创洲, 等. 航空铝试块疲劳裂纹相控阵超声成像检测[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2398-2404. PENG C Y, XU S B, DU C Z, et al. Ultrasonic phased array imaging on aviation aluminum block fatigue crack[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2398-2404(in Chinese).

究,较少涉及对实际疲劳裂纹进行验证。

本文采用三点弯曲疲劳试验(将条状试样平放于弯曲试验夹中,形成简支梁形式,试样下方有 2 个支撑点,间距视试样长度可调,试样上方有 1 个加载点对试样施加周期性载荷,用于产生疲劳裂纹)在航空铝试块中生长疲劳裂纹,利用相控阵超声波 FMC/TFM 成像技术,对疲劳裂纹进行检测和生长监测,并采用该技术对疲劳裂纹检测量化能力进行验证。本文测试出了相控阵超声波 FMC/TFM 成像技术的疲劳裂纹量化能力,得出开/闭合状态及不同裂纹表面粗糙度对成像结果的影响,为该技术进一步在工业领域应用提供了参考依据。

1　疲劳裂纹超声成像

1.1　全矩阵采集

使用 TFM 对超声回波信号进行成像处理之前,需先利用 FMC 获取超声数据。对于晶元数为 N 的相控阵超声探头(见图 1),在一个数据采集周期内,每个晶元相继单独发射一次超声信号,每次发射时所有晶元都接收并储存超声回波信号[21]。首先,第 1 个晶元发射超声信号,全部 N 个晶元接收并储存超声回波信号,得到 N 个超声 A 扫信号;然后,第 2 个晶元发射,再次得到 N 个超声 A 扫信号,直至顺序激发完所有 N 个晶元,共得到N^2个超声 A 扫信号。将所有超声 A 扫信号组合在一个矩阵中,其中 i 为发射晶元,j 为接收晶元,用A_{ij}来表示全矩阵数据采集中第 i 个晶元发射、第 j 个晶元接收的超声 A 扫信号。

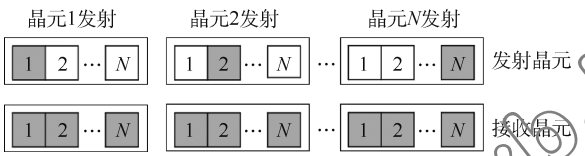


图 1　全矩阵数据采集

Fig. 1　Full matrix data capture

1.2　全聚焦方法

TFM 是对聚焦区域的每个离散坐标点进行虚拟聚焦,其成像原理如图 2 所示。相控阵超声探头对试块进行检测,以探头中心点为原点 O 建立坐标轴,i 表示发射晶元,j 表示接收晶元。以 $P(x,z)$ 点为例,为得到 P 点的超声回波信号幅值,将全矩阵数据矩阵中的所有对应的超声回波信号在该点进行叠加,其幅值 $I(x,z)$ 表示[22]为

$$I(x,z) = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} A_{ij}(T_{iP} + T_{jP}) \tag{1}$$

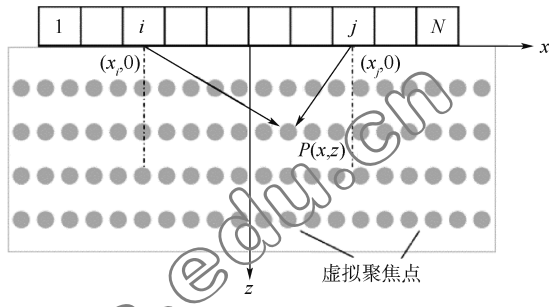


图 2　全聚焦成像原理

Fig. 2　Imaging principle of total focusing

式中:T_{iP}为晶元 i 发射声波到 P 点所需的延时时间;T_{jP}为晶元 j 接收到 P 点反射回波所需的延时时间。

延时可表示为

$$T_{iP} + T_{jP} = \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + z^2}}{c} + \frac{\sqrt{(x - x_j)^2 + z^2}}{c} \tag{2}$$

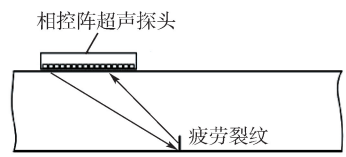
式中:x_i 和 x_j 分别为发射和接收晶元的横坐标;c 为超声波在试块中的纵波传播速度。

聚焦区域的每个离散点的幅值都按照式(1)进行计算,通过计算这些幅值,归一化后便可得到被监测区域的超声二维图像。

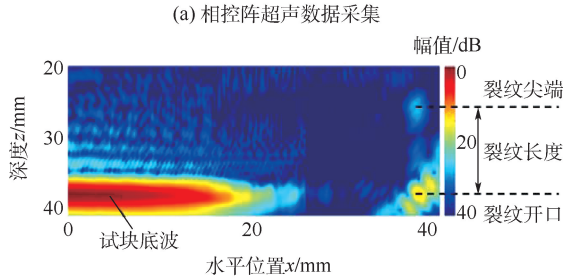
1.3　裂纹超声成像测量

通过 FMC/TFM 方法形成的高分辨率超声成像可用于准确检测并量化裂纹。对于大于 2 个波长的裂纹,可以从 TFM 图像中包含的裂纹尖端和裂纹开口信号测量出裂纹尺寸。为了避免裂纹与底面回波超声图像重叠,探头中心偏离裂纹扩展线一定距离 Δs,如图 3(a)所示。

图 3(b)为疲劳裂纹 TFM 超声成像,缺陷成像与试块底波成像分离,裂纹尖端和开口位置成像清晰且完全分离。通过测量裂纹尖端和裂纹开口超声图像区域中心点之间的深度差,即可得出



(a) 相控阵超声数据采集



(b) TFM成像和裂纹尺寸测量方法

图 3　裂纹成像和测量方法

Fig. 3　Crack imaging and sizing method

http://bhxb.buaa.edu.cn

裂纹长度。理论仿真表明,该方法在裂纹长度小于 2 倍波长时不适用,此时裂纹尖端与裂纹开口超声图像重叠,无法将二者有效分离[19]。

2 试样制备及试验系统构成

本文所采用试验试块由 2014-T6 航空铝制成。试块的 x、y、z 方向尺寸为 342 mm×76 mm×31.5 mm,参考 ASTM E 1820—2020[23] 标准制作单边切槽三点式弯曲疲劳试验试块,并开展疲劳裂纹制作,如图 4 所示。首先,在试验试块中部利用电火花线切割加工(wire electrical discharge machining, WEDM)切割 34.5 mm 的槽,电极丝直径为 0.1 mm;然后,装在疲劳试验机(Instron 8801 型)上,利用三点式弯曲疲劳加载方式完成裂纹生长。

试验系统构成如图 5 所示,主要由三点弯曲疲劳试验平台、相控阵超声探头、FMC 超声采集单元、计算机 TFM 超声成像软件平台构成。试验中,为了获得较高的分辨率和超声成像,选择法国 Imasonic 公司的中心频率为 10 MHz 的 128 晶元相控阵超声探头,其参数如表 1 所示。FMC 超声采集单元为英国 Peak NDT 公司的 Micropulse MP5PA,TFM 超声成像软件平台基于英国布里斯托尔大学超声无损团队开发的 BRAIN 软件,采用 MATLAB 编程实现。

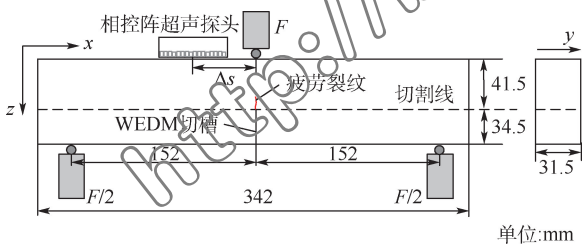


图 4 试块及试验设计

Fig. 4 Testing block and testing plan

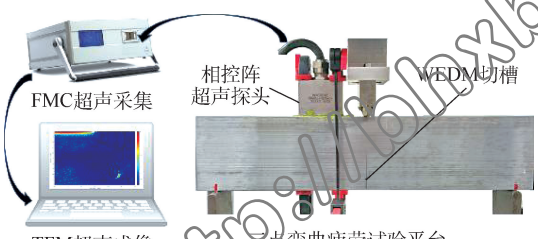


图 5 疲劳裂纹超声试验系统

Fig. 5 Ultrasonic testing system on fatigue crack

表 1 相控阵超声探头参数

Table 1 Parameters of phased array ultrasonic probe

参数	晶片数目	中心频率/MHz	晶片宽度/mm	晶片间距/mm	晶片长度/mm
数值	128	10	0.25	0.3	10

3 测试方法

根据图 4 制作试验试块并开展三点式弯曲疲劳试验,疲劳试验加载采用频率为 5 Hz 的正弦波,加载最小和最大力分别为 0.75 kN 和 7.5 kN,在图示位置放置相控阵超声探头,利用 FMC 超声采集单元和 TFM 超声成像软件平台进行裂纹检测和生长监测。

1)开展相控阵超声探头摆放位置对疲劳裂纹超声成像检测效果影响测试。对疲劳裂纹生长进行定期监测,并与试验试块表面显现出来的疲劳裂纹长度进行对比。当疲劳裂纹生长达到预期长度时,取下试验试块,沿图 4 所示切割线,切除试验试块的 WEDM 切槽区域,仅留下含有实际疲劳裂纹的试块区域——疲劳试块。

2)对疲劳试块进行 FMC 超声数据采集,利用 TFM 超声成像技术测量疲劳裂纹长度,利用游标卡尺测量疲劳试块厚度。对疲劳试块的疲劳裂纹开口面,以约 0.5 mm 深度为步进对材料厚度进行切削,随着疲劳试块厚度的减小,疲劳裂纹长度随之减小。每切削一次疲劳试块,分别进行超声成像法疲劳裂纹剩余长度测量和游标卡尺疲劳试块剩余厚度测量,直至超声成像技术无法测量疲劳裂纹长度为止。

3)开展疲劳裂纹张开/闭合和不同粗糙度表面对 FMC/TFM 超声成像特征影响的测试。参考图 5,将疲劳试块重新放置到三点式弯曲疲劳试验平台上,按增加 1 kN 加载力步进,从 0 kN 加载至 4 kN,再以减少 1 kN 减载力步进,从 4 kN 减载至 0 kN,每加或减一次作用力便采集记录超声成像。对试验试块加载时采用最大 7.5 kN 加载力,而对疲劳试块加载时仅采用最大 4 kN 加载力,目的是确保疲劳裂纹无实质性扩展。

4)利用一块新的试验试块,按疲劳试验加载方式生长裂纹,直至试块瞬断,观察断口形态。利用英国 Taylor Hobson 公司的表面粗糙度测试仪 Talysurf 进行 WEDM 切槽区、疲劳裂纹扩展区和瞬断区的表面粗糙度测量,对断面进行超声成像并分析。

4 试验结果与讨论

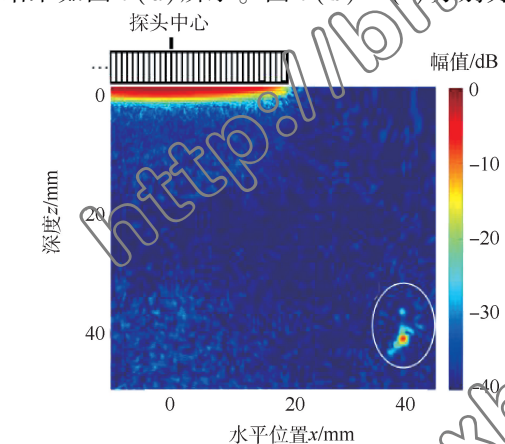
定义试验试块的 x 方向 0 点在 WEDM 切槽左侧,WEDM 切槽位于 $x=40$ mm 处;z 方向 0 点位于超声探头耦合面,WEDM 切槽的底部位于试验试块 $z=41.5$ mm 处。超声数据采集时,相控阵

http://bhxb.buaa.edu.cn

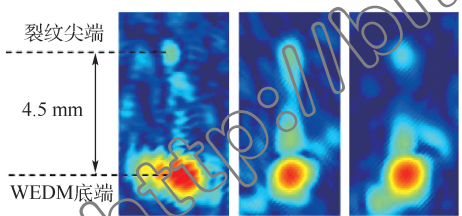
超声探头放置于试块 y 方向的正中间。

首先,开展相控阵超声探头位置与成像效果试验。对试验试块中长度约为 4.5 mm 的疲劳裂纹进行测试,将相控阵探头沿 x 方向移动位置并采集超声数据(见图 6)。如图 6(a)、(d)所示,探头中心置于 $x=0$ mm,即 $\Delta s=40$ mm 位置时,观察超声成像图可见,WEDM 切槽底端及疲劳裂纹尖端能够清晰辨识。如图 6(c)所示,当探头中心置于 $x=20$ mm,即 $\Delta s=20$ mm 位置时,WEDM 切槽底端及疲劳裂纹尖端能够基本辨识,两者之间亦有较强的超声反射信号。如图 6(b)所示,当探头中心置于 $x=40$ mm,即 $\Delta s=0$ mm,探头位于切槽正上方位置时,WEDM 切槽底端及疲劳裂纹尖端区域存在较多的干扰信号,WEDM 切槽底端基本能够辨识,但疲劳裂纹尖端无法准确辨识。试验中,进行疲劳裂纹生长监测时,相控阵超声探头置于 $x=0$ mm,使得探头晶片产生的超声能量信号能够很好地照射 WEDM 切槽和疲劳裂纹,实现 WEDM 切槽底端和疲劳裂纹尖端位置的超声成像,从而实现裂纹生长监测。

对试验试块中疲劳裂纹生长进行定期监测,并与试块表面显现出来的疲劳裂纹长度进行对比,结果如图 7(a)所示。图 7(b)~(f)分别为疲



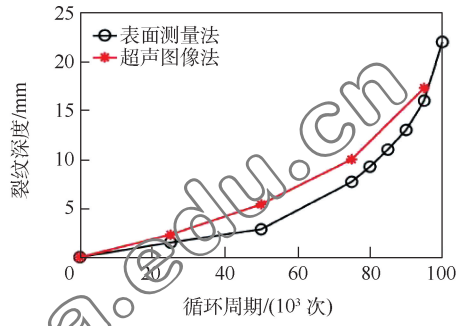
(a)探头中心位于x=0 mm时裂纹成像效果



(b) x=40 mm时的WEDM切槽底部及疲劳裂纹局部区域成像效果　(c) x=20 mm时的WEDM切槽底部及疲劳裂纹局部区域成像效果　(d) x=0 mm时的WEDM切槽底部及疲劳裂纹局部区域成像效果

图 6　相控阵超声探头位置与成像效果

Fig. 6　Phased array ultrasonic probe position and images results



(a)超声图像与表面测量裂纹长度测量值对比

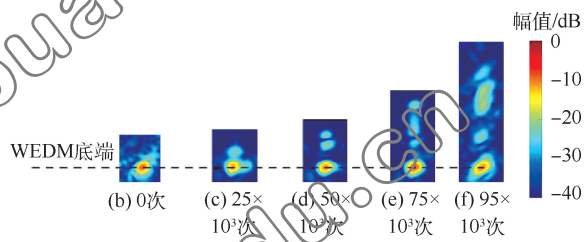


图 7　疲劳裂纹生长监测

Fig. 7　Fatigue crack growth monitoring

劳加载周期为0、25×10^3、50×10^3、75×10^3、95×10^3 次时对应的 WEDM 切槽底端及疲劳裂纹的超声成像。图 7(a)为超声图像与表面测量法得到的裂纹长度结果对比,裂纹刚开始生长较为缓慢,逐步加快,总体生长趋势呈指数曲线。超声图像测量的疲劳裂纹长度要比表面测量法大,图 7(c)~(f)为裂纹在 4 个不同疲劳加载周期时的超声图像,超声测量值比表面测量值平均大 2.3 mm。沿试验试块 y 方向,裂纹扩展前缘呈现曲面状,中间高、两表面低,这是由于疲劳裂纹在材料表面位置的闭合效应更大造成的结果[8]。由此可见,从材料表面测量所得到的疲劳裂纹长度不能真实体现内部疲劳裂纹的真实状态,超声图像则能客观反映。

为验证基于 FMC/TFM 超声成像技术测量疲劳裂纹长度的能力和精度,对不同大小疲劳裂纹进行了测试。试验选取预制疲劳裂纹的试验试块,超声测量裂纹长度为 5.0 mm,完全削出 WEDM 切槽部分的试块材料,采用超声图像测量疲劳裂纹长度为 4.6 mm,用游标卡尺测量疲劳试块厚度为 41.3 mm,逐步切削疲劳裂纹开口面试块材料来获得依次递减的疲劳裂纹长度,直至疲劳试块剩余高度为 38.7 mm。图 8(a)为试验过程中获得的不同长度的疲劳裂纹超声图像,疲劳裂纹尖端部位图像在试块 z 方向位置保持不变,而疲劳裂纹开口部位图像在试块 z 方向位置不断上移,这说明疲劳试块厚度在逐步减小。通过测量超声图像中疲劳裂纹开口和尖端超声能量在 z 方向的中心位置差,便可得出疲劳裂纹的长度。

http://bhxb.buaa.edu.cn

当疲劳裂纹长度大于 2.2 mm 时,超声图像中能够清晰辨识裂纹开口和尖端部位,因此可以实现超声测量;当疲劳裂纹小于 2.2 mm 时,超声图像中仅能辨识开口部位,而尖端图像消失,超声测量失效。根据仿真研究[19]表明,通过 FMC/TFM 超声成像技术进行疲劳裂纹长度测量,当疲劳裂纹长度大于 2 倍超声波长时,疲劳裂纹尖端与开口超声图像开始分离,当疲劳裂纹长度大于 3 倍超声波长时,疲劳裂纹尖端与开口超声图像能够完全分离。2.2 mm 疲劳裂纹长度,相当于 10 MHz 超声波 3.4 倍波长,疲劳裂纹所对应的超声图像测量效果表征与该仿真结论基本一致。

将疲劳试块超声图像测量的第一个疲劳裂纹长度 4.6 mm 作为疲劳试块剩余高度法测量基准,对比 2 种方法的测量精度,如图 8(b)所示。可见,剩余高度法测量值符合线性递减关系,将 4.0 mm、3.4 mm、2.8 mm、2.4 mm、2.1 mm 这 5 个点测量数据进行对比,超声图像法测量结果较试块剩余高度法测量值小,最大差 0.2 mm,最小差 0.1 mm,平均小 0.14 mm。综合试验结果,考虑到游标卡尺的精度为 0.02 mm,超声成像时设置的网格间距为 0.1 mm,疲劳裂纹前缘为曲面,基本可以得出试验中超声图像测量方法本身的误差不大于 0.2 mm。

对疲劳试块实施外力加载,在 34 kN 时发生瞬断,观察断面形态,如图 8(c)所示。疲劳裂纹扩展前缘呈现曲面,中间高、两表面低,裂纹扩展

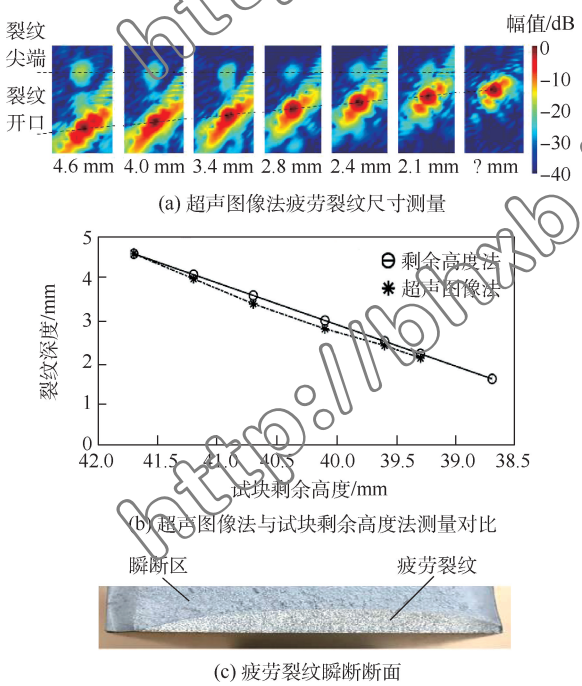


图 8 超声图像法测量疲劳裂纹长度

Fig. 8 Fatigue crack sizing by ultrasonic image method

前缘左右不对称是三点弯曲疲劳加载时 y 方向作用力不均衡所致。用毫米直尺测量裂纹前缘最高处疲劳裂纹长度约为 2.3 mm,而按照图 8(b)中 2 种方法的推算裂纹长度约为 1.7 mm。此处测量结果存在偏差的原因将在疲劳裂纹开合试验后给出解释。

在不同大小疲劳裂纹测量试验中,当超声图像法测量疲劳裂纹长度为 3.4 mm 时,开展疲劳裂纹开合对超声成像测量影响的试验。将疲劳试块放置于三点弯曲疲劳试验平台,按测试方法中所述进行静态力加载并采集超声数据,在加载和减载一个循环周期内测量的超声图像如图 9 所示,图中第 1 排图像表示加载力过程,第 2 排图像表示减载力过程。未加载时,即 0 kN,超声图像中疲劳裂纹尖端图像与开口图像连接在一起,且裂纹尖端图像能量最强点难以清晰辨识,因此会降低超声图像法测量的精度。在加载过程中,疲劳裂纹尖端超声图像与开口超声图像逐步分离,当加载力大于等于 3 kN 时,认为疲劳裂纹张开,而小于 3 kN 时认为疲劳裂纹处于闭合或半闭合状态。加载 4 kN 力发现超声图像法测量值较未加载力时,裂纹尺寸大 0.6 mm,超声能量强 4.5 dB,说明疲劳裂纹闭合效应会使裂纹尖端超声信号反射减弱,超声图像法测量值比实际的要小。该结论与根据图 8(b)中疲劳裂纹瞬断后测量疲劳裂纹长度值相吻合。

利用一块新的试验试块,按疲劳试验加载方式生长疲劳裂纹,直至瞬断,相控阵超声探头中心置于 $x=20$ mm,即 $\Delta s=20$ mm 位置,测量并分析表面粗糙度对超声成像的影响,如图 10 所示。对图 10(b)断口进行观察,疲劳裂纹扩展区平均长度 22.5 mm,裂纹前缘形貌呈现中间高、两端低。WEDM 切槽加工采用 0.1 mm 的电极丝,切槽表面光滑,粗糙度约为 2.4 μm,WEDM 切槽表面不能形成明显超声成像。WEDM 切槽具有一定宽度,切槽底部与疲劳裂纹起裂位置存在明显台阶,对应位置出现较强的超声图像能量区域。

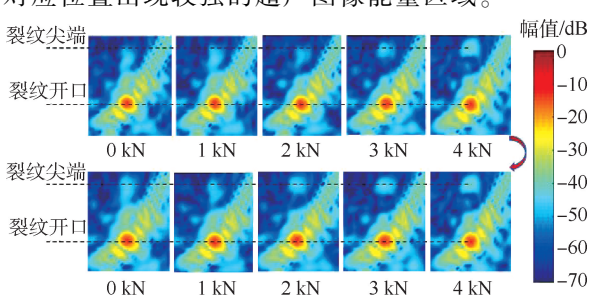


图 9 疲劳裂纹开合超声图像

Fig. 9 Ultrasonic image of fatigue crack opening and closing

http://bhxb.buaa.edu.cn

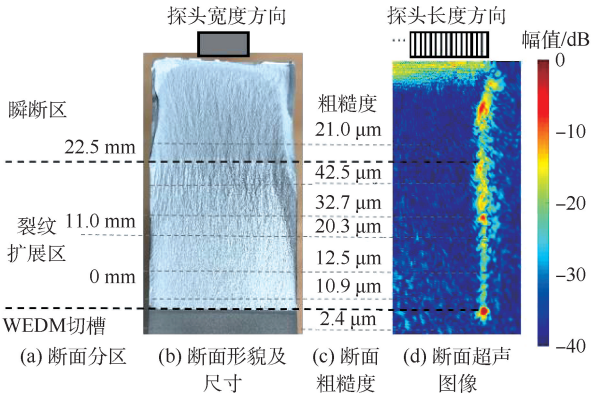


图 10　断面不同粗糙度表面超声成像

Fig. 10　Ultrasonic imaging of fracture and crack surface with different roughness

疲劳裂纹扩展前期,裂纹长度小于约 8 mm 区域,裂纹表面粗糙度约为 10.9 μm,具有明显的超声成像;裂纹扩展中期,裂纹长度介于 8 ~ 15 mm 区域,裂纹表面粗糙度约为 20.3 μm,超声成像信号能力相应增强;裂纹快速扩展区,裂纹长度大于 15 mm 区域,裂纹表面粗糙度约为 42.5 μm,超声成像信号能量亦较强。瞬断区表面粗糙度约为 21.0 μm,存在明显的超声成像。

综上试验,裂纹扩展初期属于典型的疲劳扩展,裂纹表面较为光滑,约为 10.9 μm,随着裂纹生长速度逐步加快,裂纹表面逐步变得粗糙,最大粗糙度约为 42.5 μm。考虑到超声成像区域相对较大,z 方向大于 40 mm,以及相控阵超声声场特性(包括近场、远场特性,晶片发散角特性),图 10(d)中的超声图像能量不能完全反映与断面粗糙度的关系。总体而言,随着裂纹生长,裂纹表面变得更加粗糙,超声成像能量越发变强。

5　结　论

本文采用三点弯曲疲劳试验方法在航空铝试块上生长疲劳裂纹,利用相控阵超声 FMC/TFM 技术开展疲劳裂纹超声数据采集和成像研究,得出以下结论:

1) 利用三点弯曲疲劳试验,疲劳裂纹沿 WEDM 切槽底部起裂,裂纹扩展随疲劳加载周期呈指数曲线扩展,裂纹扩展前缘呈现中间高两端低的凸起形貌。通过对试块瞬断断口分析,疲劳裂纹随着长度扩展表面粗糙度从 10.9 μm 逐步增大到 42.5 μm。

2) 相控阵超声 FMC/TFM 成像技术可以有效监测试块材料内部疲劳裂纹扩展,利用疲劳裂纹尖端和开口超声图像可以测量长度大于 3 倍超声波波长的裂纹,采用本试验测试参数,该技术方法的测量误差小于 0.2 mm。

3) 超声图像法测量张开疲劳裂纹时,比测量闭合疲劳裂纹长度大 0.6 mm,超声图像能量强 4.5 dB,说明疲劳裂纹存在尖端闭合效应,对超声成像特性和测量存在影响。

参考文献(References)

[1] COLLINS J. Failure of materials in mechanical design: Analysis, prediction, prevention[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1993.

[2] SIERADZKI K, NEWMAN R. Stress-corrosion cracking[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 1987, 48(11): 1101-1113.

[3] WOODTLI J, KIESELBACH R. Damage due to hydrogen embrittlement and stress corrosion cracking[J]. Engineering Failure Analysis, 2000, 7(6): 427-450.

[4] CAMPBELL F. Elements of metallurgy and engineering alloys[M]. Cleveland: ASM International, 2008.

[5] KULKARNI S, ACHENBACH J. Structural health monitoring and damage prognosis in fatigue[J]. Structural Health Monitoring: An International Journal, 2008, 7(1): 37-49.

[6] ZHAO Y, YANG B. Scale-induced effects on fatigue properties of the cast steel for Chinese railway rolling wagon bogie frames[J]. Advanced Materials Research, 2010, 118-120(1): 59-64.

[7] KLINGER C, BETTGE D. Axle fracture of an ICE3 high speed train[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 35: 66-81.

[8] SCHIJVE J. Fatigue of structures and materials[M]. Berlin: Springer, 2009.

[9] ALMOND D, WEELES B, LI T, et al. Thermographic techniques for the detection of cracks in metallic components[J]. Insight, 2011, 53(11): 614-620.

[10] LIM H, KIM Y, KOO G, et al. Development and field application of a nonlinear ultrasonic modulation technique for fatigue crack detection without reference data from an intact condition[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(9): 1-14.

[11] CHENG J, POTTER J, CROXFORD A, et al. Monitoring fatigue crack growth using nonlinear ultrasonic phased array imaging[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(5): 1-14.

[12] QUAEGEBEUR N, BOUSLAMA N, BILODEAU M, et al. Guided wave scattering by geometrical change or damage: Application to characterization of fatigue crack and machined notch[J]. Ultrasonics, 2017, 73(1): 187-195.

[13] HOLMES C, DRINKWATER B, WILCOX P. Postprocessing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for nondestructive evaluation[J]. NDT & E International, 2005, 38(8): 701-711.

[14] CAMACHO J, ATEHORTUA D, CRUZA J, et al. Ultrasonic crack evaluation by phase coherence processing and TFM and its application to online monitoring in fatigue tests[J]. NDT & E International, 2018, 93(10): 164-174.

[15] ZHANG J, DRINKWATER B, WILCOX P, et al. Defect detection using ultrasonic arrays: The multi-mode total focusing method[J]. NDT & E International, 2010, 43(2): 123-133.

http://bhxb.buaa.edu.cn

[16] ZHANG J, DRINKWATER B, WILCOX P. Efficient immersion imaging of components with nonplanar surfaces[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2014, 61(8): 1284-1295.

[17] SHAKIBI B, HONARVAR F, MOLES M, et al. Resolution enhancement of ultrasonic defect signals for crack sizing[J]. NDT & E International, 2012, 52(11): 37-50.

[18] FELICE M, VELICHKO A, WILCOX P. Accurate depth measurement of small surface-breaking cracks using an ultrasonic array post-processing technique[J]. NDT & E International, 2014, 68(12): 105-112.

[19] PENG C, BAI L, ZHANG J, et al. The sizing of small surface-breaking fatigue cracks using ultrasonic arrays[J]. NDT & E International, 2018, 99(10): 64-71.

[20] SATYARNARAYAN L, PUKAZHENDHI D, BALASUBRAMANIAM K, et al. Phased array ultrasonic measurement of fatigue crack growth profiles in stainless steel pipes[J]. Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the ASME, 2007, 129(4): 737-743.

[21] 周正干,彭地,李洋,等. 相控阵超声检测技术中的全聚焦成像算法及其校准研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(10): 1-7.
ZHOU Z G, PENG D, LI Y, et al. Full focus imaging algorithm and its calibration in phased array ultrasonic testing technology [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10): 1-7(in Chinese).

[22] CAN C, CALEAP M, PAN M, et al. A comparison between ultrasonic array beamforming and super resolution imaging algorithms for non-destructive evaluation[J]. Ultrasonics, 2014, 54(7): 1842-1850.

[23] ASTM. Stardard test method for measurement of frature toughness: ASTM E 1820—2020[S]. Conshohocken: ASTM, 2020.

Ultrasonic phased array imaging on aviation aluminum block fatigue crack

PENG Chaoyong[1,*], XU Songbai[1], DU Chuangzhou[1], ZHANG Jie[2]

(1. School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. Department of Mechanical Engineering, University of Bristol, Bristol BS8 1TR, UK)

Abstract: Surface breaking fatigue crack propagation can lead to structural failure. The phased array ultrasonic imaging technology is used to monitor fatigue cracks and can obtain the crack information required for structural integrity evaluation. For the purpose of evaluating the structural integrity of a structure, fatigue cracks are monitored using the phased array ultrasonic imaging technique, which may also collect the crack information needed. It can promptly provide safety warnings before structural failures. The three-point bending fatigue test method is used to grow fatigue crack on an aviation aluminum test block. Fatigue cracks of different lengths are obtained by gradually cutting the material awayfrom the crack mouth surface. Phased array ultrasonic full matrix capture (FMC) and total focusing method (TFM) are applied by using fatigue crack tip and mouth image information to monitor crack growth and measure crack length. The test influences on ultrasonic imaging of phased array ultrasonic probe positioning, fatigue crack opening/closing, crack surface roughness are also carried out. The results show that the ultrasonic probe can better image the crack when irradiated from the side of the crack, which can truly reflect the morphology of the crack front inside the material. When the fatigue crack length is more than 3 times the ultrasonic length, the image of the crack tip and crack mouth is totally separated, the phased array ultrasonic FMC/TFM imaging technology can effectively measure the crack length, and the measurement error is less than 0.2 mm. Compared with being opened, the fatigue crack closing effect can weaken the reflection of the ultrasonic image signal at the crack tip by 4.5 dB, and the length measurement value is 0.6 mm smaller.

Keywords: fatigue crack; phased array ultrasonic; full matrix capture/total focusing method; image characterization; crack length

Received: 2021-04-01; **Accepted**: 2021-05-14; **Published online**: 2021-05-26 10:25

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210525.1137.001.html

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61501381)

* **Corresponding author**. E-mail: pengmd@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0119

红外低轨星座突发任务多重策略调度方法

张晟宇[1,2,3,*], 朱振才[1,2], 胡海鹰[1,2]

(1. 中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201203; 2. 上海微小卫星工程中心, 上海 201203;
3. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘 要: 面向红外低轨星座的突发任务规划与资源调度问题,结合红外低轨星座的空间与时间分布特性,提出一种基于多重策略的红外低轨星座任务应急调度方法。所提方法结合红外低轨星座的设计特点,从星座全球分布的均匀性、结构的对称性及星座内卫星运动的周期性分析作为输入,提出一种以地理分区为长期值守分组策略与事件触发下基于相对运动分析的动态快速分组策略相结合的多重策略。在所提策略指导下完成任务分组,开展工作窗口调度。经仿真分析可得:所提策略可有效应对不同区域的目标触发,并实时完成分组及工作窗口规划调度,较好解决了任务突发情况下的系统响应,由于采用优先分组的策略,降低了全局优化的复杂度,具有创新性,且具备较好的应用价值。

关 键 词: 多重策略优化; 红外低轨星座; 任务规划; 突发任务调度; 星座协同
中图分类号: V19
文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2022)12-2405-10

红外低轨星座是通过全球组网,协同工作完成对空间高动态时敏目标实时探测发现、跟踪定位的复杂系统。星座需要对全球范围目标出现的空域进行二重覆盖,并在目标出现之后快速响应形成观测资源对目标的分配。由于目标有其不可预见性与随机性,针对目标任务的观测任务具有突发性,突发性任务具有输入精度低,捕获窗口短的特点,突发任务对于全球覆盖的星座提出高时效响应的要求,需要快速地选出执行任务的卫星来完成观测。

针对事件快速响应的方法研究方面,现有的研究主要针对如何动态地进行已有规划方案的调整与重规划[1-2],陈书剑等[3]提出了结合观测路径的突发任务响应时间最优的多星成像规划方法,在向全局优化的同时进行时效性的增强。

星座的任务响应需要同时考虑单星观测任务的规划及多星之间的协同。贺仁杰等[4]提出了通用的成像卫星规划模型。文献[5-7]针对不同方面的单星规划问题提出了启发式、基因算法等。

同时红外低轨星座调度还需要卫星开展协同规划。姜维等[8]提出了通用的协同规划模型,文献[9-10]根据具体问题提出了超启发等多种算法。

红外低轨星座资源调度问题是一个复杂时空观测资源动态分配问题,文献[11-12]提出了包括基于补偿跟踪的低轨预警资源调度方法。这些方法都针对红外低轨星座中的一些特定的问题提出解决方案,但面向全球的实时响应调度方面,尚没有结合红外低轨星座的特点提出突发任务调度方法。现有方法多采用直接进行全局优化。红外低轨星座卫星数量较多,当目标数量较大时,难以满足系统实时任务响应的要求。因此,本文提出一种多重策略下的星座突发任务快速优化策略,对

收稿日期: 2021-03-16; **录用日期**: 2021-05-05; **网络出版时间**: 2021-06-11 16:09
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210611.1033.001.html
* **通信作者**. E-mail: zhangsy@microsate.com

引用格式: 张晟宇, 朱振才, 胡海鹰. 红外低轨星座突发任务多重策略调度方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2405-2414. ZHANG S Y, ZHU Z C, HU H Y. Burst tasks scheduling method for infrared LEO constellation based on multi-strategies [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2405-2414(in Chinese).

http://bhxb.buaa.edu.cn

目标观测的分析结合红外星座的轨道特性开展，可以提高系统对突发任务的响应能力。

1 红外低轨星座特性分析

红外低轨星座的设计目标是构建一个面向全球分布的时敏动态多目标进行协同观测的系统。星座的设计要满足对于全球空域空间时敏目标立体观测与组网通信的要求。因此，对于目标空域的全球二重覆盖及保持星座整网联通的要求是星座设计的主要目标[13-15]。

1.1 空域覆盖能力分析

空域覆盖能力的主要约束包括临边观测约束及最大探测距离约束。如图 1 所示。

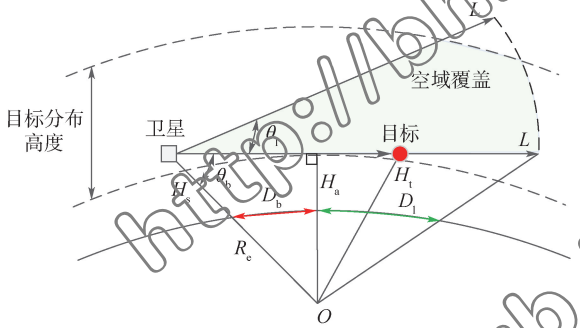


图 1 红外低轨星座空域覆盖示意图

Fig. 1 Schematic of infrared LEO constellation spatial coverage

卫星需要在深空背景下观测目标，即卫星与目标的连线应高于大气临边的高度 H_a。卫星的红外载荷探测能力是有限的，最大的探测距离为 L。

红外低轨星座为了获得目标的位置与运动信息，需要同时为 1 个目标分配至少 2 颗卫星的观测资源。

空间动态多目标的立体定位任务是系统的核心任务，立体观测也是基础的协同模式。立体观测由 2 颗卫星同时对目标进行观测。在这个过程中，一颗卫星通过星间链路向另外一颗卫星发送自身的位置速度信息、传感器的指向信息及标在图像像面上的位置信息。接收卫星通过计算本星和协同卫星的运动信息、目标测量信息完成对于目标的定位。立体定位的工作模式如图 2 所示。

图 2 中，Sat1 和 Sat2 为对目标构成立体观测的 2 颗卫星。由 Sat1 和 Sat2 指向目标的视线 LOS_{sat1} 和 LOS_{sat2} 构成了立体观测角。Sat1 和 Sat2 之间通过星间链路(ISL)进行通信，通过交互自身运动信息及目标测量信息完成对目标的立体定位。

为了进行全球覆盖将临边约束和最大观测距离投影到地球表面。其中由临边约束产生的不可见区域是以星下点为中心，弧段 $D_b(H_t)$ 为半径的圆形区域。其中 H_t 为目标的高度，因此，这个圆形区域的大小是变化的，由目标分布的上下边界决定。不可见弧段长度 $D_b(H_t)$ 为

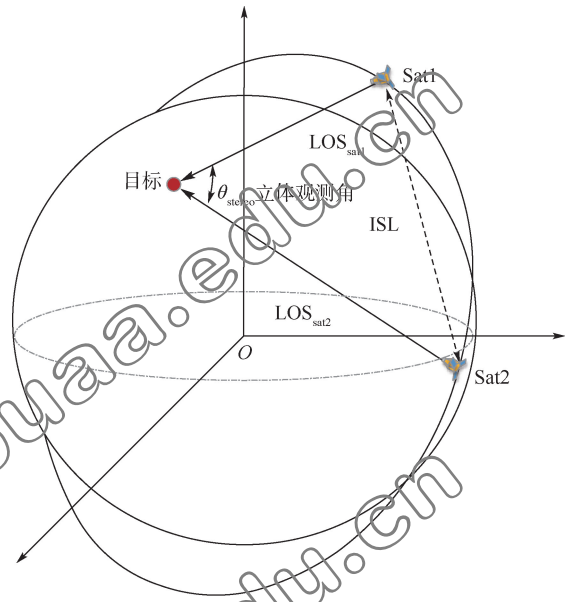


图 2 立体观测工作模式

Fig. 2 Stereo observation mode

$$D_b(H_t) = \left[\arccos\left(\frac{R_e+H_a}{R_e+H_s}\right)-\arccos\left(\frac{R_e+H_a}{R_e+H_t}\right)\right]R_e \tag{1}$$

式中：R_e 为地球半径；H_s 为卫星高度。

同样，最大观测距离到地面也产生一个半径为 $D(H_t)$ 的圆形区域。最大探测弧段为

$$D(t)=\arccos\left[\frac{(R_e+H_t)^2+(R_e+H_s)^2-L^2}{2(R_e+H_t)(R_e+H_s)}\right]R_e \tag{2}$$

以星下点为中心，最大可观测距离去除不可观测范围获得 1 个环带区域，环带的宽度为

$$D_l(H_t) = D(H_t) - D_b(H_t) \tag{3}$$

式中：D_l 为可见投影弧段。

投影到地面的覆盖示意图如图 3 所示。其中蓝色部分为卫星的单重覆盖区域，红色为空域的二重覆盖区域，星下点的中心区域未被覆盖的部分代表盲区。覆盖的投影大小随着目标高度的分布不同而变化，目标高度越低则盲区越大，目标高度越接近卫星的高度则覆盖区域越大。

从红外低轨星座的观测特点出发，结合全球覆盖特性的要求，适合选用 Walker 星座构型。其中 Walker 星座 δ 构型具备较好的覆盖特性。Walker-δ 的特点是由多颗高度相同，倾角相同，轨

http://bhxb.buaa.edu.cn

道面之间升交点均匀分布,轨道面内卫星的相位也均匀分布的一种星座。常用 $T/P/F$ 来表示其构型,其中 T 为卫星总数,P 为轨道面的数量,F 为相邻轨道面间的相位差[16-17]。

结合对于红外低轨星座覆盖能力的分析,可以进行红外星座规模的分析与设计。将观测能力投影到地面分析覆盖特性。覆盖分析如图 4 所示。

卫星在一个轨道面中均匀分布,在轨道面内星间的半间距 S 决定了一个轨道面内所需卫星的数量 N,轨道面半覆盖宽度 C 决定了所需轨道面的数量 P。轨道面和轨道面中卫星数量为

$$\begin{cases} P > \pi R_e / D \\ N > 2\pi R_e / D \end{cases} \tag{4}$$

式中:D 为最大探测距离投影弧段长度。

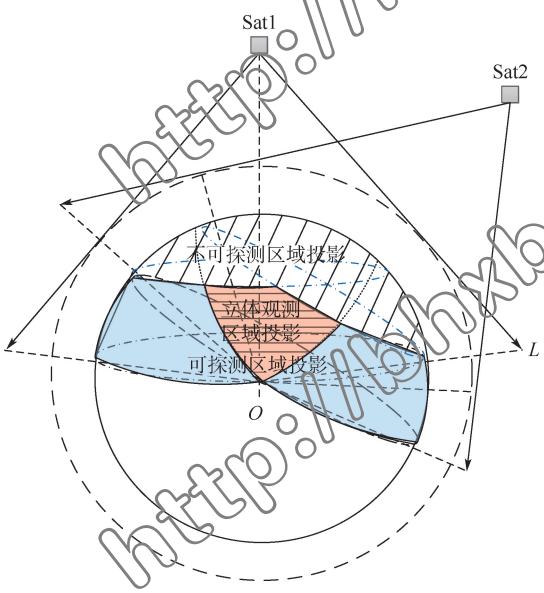


图 3　空域覆盖地面投影示意图

Fig. 3　Terrestrial projection of spatial coverage

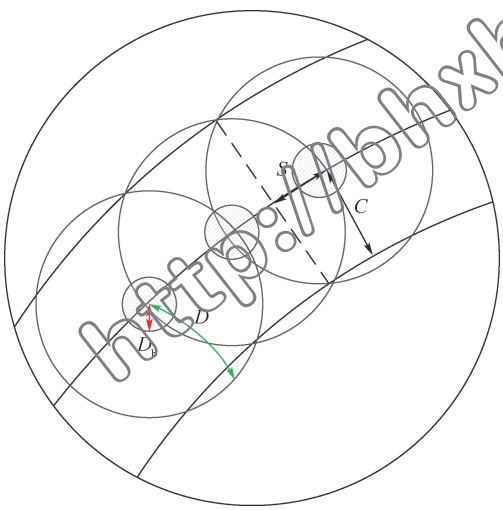


图 4　星座的覆盖投影分析

Fig. 4　Project analysis of spatial coverage

1.2　通信约束分析

星座的设计还要考虑到星座可以实时保持网络联通性能。因此,需要考虑星间链路的约束,如图 5 所示。

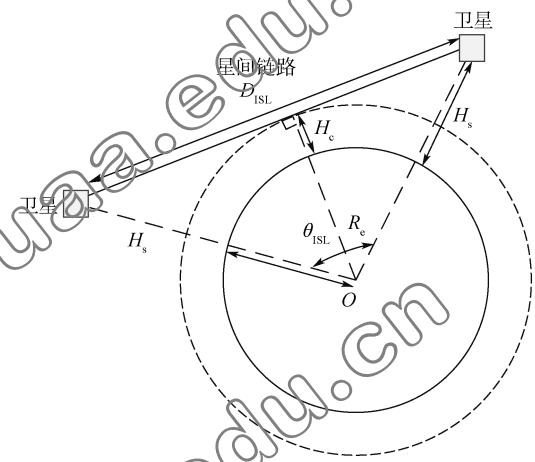


图 5　星间链路示意图

Fig. 5　Inter satellite link

2 颗卫星的星间地心角 θ_{ISL} 和卫星的高度 H_s 决定了 2 颗卫星的通信距离。同时卫星之间为了降低链路的损耗,需要避免穿越大气,需要考虑链路保护高度 H_c。星间通信最大地心角和传输距离的计算如下。

星间通信最大地心角为

$$\theta_{ISL}^{max} = 2\arccos\left(\frac{H_c + R_e}{H_s + R_e}\right) \tag{5}$$

传输距离为

$$D_{ISL} = 2(H_s + R_e)\sin(\theta_{ISL}/2) \tag{6}$$

因此,轨道面内卫星数量 N 也需要满足:

$$N > 2\pi/\theta_{ISL}^{max} \tag{7}$$

同时要求 2 个轨道面之间至少有 1 对卫星可以跨轨道面组链路(inter orbit ILS,IOL),因此,轨道面之间卫星的最小地心角 θ_{IOL}^{min} 应小于轨道面内的最大地心角:

$$\theta_{IOL}^{min} < \theta_{ISL}^{max} \tag{8}$$

1.3　星座设计结果

星座设计输入如表 1 所示。在表 1 的输入条件下,基于双重约束的星座优化分析,200 ~ 2 000 km 的空域实现二重覆盖,至少需要 28 颗卫星,在

表 1　仿真参数设置

Table 1　Simulation configuration parameters

参数	数值/km
临边高度 H_a	80
最大探测距离 L	6 000
星间链路保护高度 H_c	100
目标高度分布区间	200 ~ 2 000

http://bhxb.buaa.edu.cn

200 km处实现绝对的二重覆盖,卫星的数量需要增加,采用32颗卫星的设计二重覆盖则接近99.99%。因此,选择4个轨道面,每个轨道面8颗卫星,总共32颗卫星组成的Walker星座作为设计结果,采用32/4/1/1 600 km/60°的星座构型。星座内种子卫星Satellite1的初始轨道参数如表2所示。

表2 卫星Satellite1轨道参数

Table 2 Orbital parameters of Satellite 1

参数	数值
半长轴/km	7 878.14
离心率	$5.829\,68\times10^{-19}$
轨道倾角/(°)	60
升交点赤经/(°)	$2.398\,26\times10^{-15}$
近地点幅角/(°)	0
真近点角/(°)	0

倾斜轨道Walker星座的空间几何关系具有高度动态性,但经分析,红外低轨星座具备空间结构稳定性的特点,主要体现在:轨道面的数量及轨道面的倾角是固定的;轨道面内的卫星数量及卫星之间的相位间隔,在一般情况下也是固定的;虽然在全球的分布状态是动态的,但总体保持较为均匀的分布;虽然卫星运动高度动态,但卫星之间的相对位置关系变化具有很高的周期性。

因此,对于红外低轨星座的管理与调度需要充分考虑其空间中星座的均匀性、对称性及变化规律周期性的特点,对于星座管理与星座特性的分析,Chen[18]、Rossi[19]等分别进行了相关的星座构型维持及星座安全方面的研究。

2 多重策略任务应急调度方法

2.1 突发观测任务问题建模

2.1.1 问题模型

红外低轨星座对于突发任务调度的问题,是一个具有时间和空间复杂性的观测资源动态分配问题。

为了完成观测资源的分配需要进行主要的计算过程,首先是可见窗口AW的计算,进行n颗卫星$\mathrm{Sat}=\{\mathrm{Sat}_j\}$与$m$个目标$\mathrm{Tar}=\{\mathrm{Tar}_i\}$之间所有可用观测窗口的计算,获得可见窗口集合$\mathrm{AW}=\{\mathrm{aw}_{i,j}^k\}$。在完成可见窗口计算后,根据系统的任务目标$\mathrm{Objectives}=\{\mathrm{obj}_d\}$,如对多目标定位或对高优先级目标定位,进行任务$\mathrm{Task_{sys}}=\{\mathrm{Task}_{\mathrm{sys}}^r\}$的分配。由于卫星的资源$\mathrm{Sat}=\{\mathrm{Sat}_j\}$有非常强的可替代性,在资源的优选过程中,需要卫星特性及任务特性相关的策略$\mathrm{Strategies}=\{\mathrm{stra}^r\}$来支撑调度方案$\mathrm{Scedule}=\{\boldsymbol{\mathrm{sce}}_{i,j}^t\}$的快速生成。$\boldsymbol{\mathrm{sce}}_{i,j}^t$为一个$M\times K$的任务分配矩阵,表示$t$时刻对$m$个待观测目标分配$k$颗卫星作为观测资源。总结以上关系,有简化的系统任务规划与调度模型如下:

$$\begin{cases}\mathrm{Objectives}=\{\mathrm{obj}_d\}\\ \mathrm{Task_{sys}}=\{\mathrm{Task}_{\mathrm{sys}}^r\}\\ \mathrm{Sat}=\{\mathrm{Sat}_j\}\\ \mathrm{Tar}=\{\mathrm{Tar}_i\}\\ \mathrm{Strategies}=\{\mathrm{stra}^r\}\\ \mathrm{Scedule}=\{\boldsymbol{\mathrm{sce}}_{i,j}^t\}\end{cases}\tag{9}$$

2.1.2 目标变量

目标Tar_i包含的信息如下:

$$\mathrm{Tar}_i=\{\mathrm{ID}_i,w_i,\mathrm{st}_i,\mathrm{et}_i,\mathrm{period}_i,\mathrm{position}_i,\mathrm{velocity}_i\}\tag{10}$$

式中:ID_i为目标的系统编号;w_i为目标的系统权重;st_i为开始时间;et_i为结束时间;period_i为周期;$\mathrm{position}_i$为目标位置信息;$\mathrm{velocity}_i$为目标速度信息。

2.1.3 卫星资源变量

对于卫星Sat_j:

$$\mathrm{Sat}_j=\{\mathrm{SCID}_j,\mathrm{Role}_j,\mathrm{Status}_j,\mathrm{Task}_j^i,\mathrm{Angle}_j,\mathrm{Position}_j,\mathrm{Velocity}_j,\mathrm{WrokTime}_j\}\tag{11}$$

式中:SCID_j为卫星的编号;Role_j为卫星在系统任务中承担的角色,可以为主星或从星;Status_j为卫星的工作状态;Task_j^i为Sat_j正在承担的任务;Angle_j为当前的卫星载荷空间指向角度;$\mathrm{Position}_j$为卫星位置;$\mathrm{Velocity}_j$为卫星速度;$\mathrm{WrokTime}_j$为卫星还可工作的时间长度。

2.1.4 可见窗口变量

可见窗口$\mathrm{aw}_{i,j}^k$,表示Sat_j对Tar_i的第k个可见窗口:

$$\mathrm{aw}_{i,j}^k=\{\mathrm{st}_{i,j}^k,\mathrm{et}_{i,j}^k,\mathrm{period}_{i,j}^k,\mathrm{st_angle}_{i,j}^k,\mathrm{et_angle}_{i,j}^k,\mathrm{dismax}_{i,j}^k,\mathrm{dismin}_{i,j}^k\}\tag{12}$$

式中:$\mathrm{st}_{i,j}^k$为窗口起始时间;$\mathrm{et}_{i,j}^k$为窗口结束时间;$\mathrm{period}_{i,j}^k$为窗口的长度;$\mathrm{st_angle}_{i,j}^k$为指向窗口开始点的卫星指向角度;$\mathrm{et_angle}_{i,j}^k$为指向窗口结束时刻的卫星指向角度;$\mathrm{dismax}_{i,j}^k$为观测窗口中卫星与目标之间的最大距离;$\mathrm{dismin}_{i,j}^k$为观测窗口中卫星与目标之间的最小距离。

2.1.5 任务决策变量

在完成任务规划后,生成规划执行窗口集合:

$$\mathrm{TW}=\{\mathrm{tw}_{i,j}^e\mid 1\leqslant i\leqslant m,1\leqslant j\leqslant n,0\leqslant e\leqslant q\}\tag{13}$$

http://bhxb.buaa.edu.cn

式中:$tw_{i,j}^{e}$表示在任务规划后的卫星 Sat_j 对目标 Tar_i 的第 e 个执行窗口:

$$tw_{i,j}^{e} = \{stw_{i,j}^{e}, etw_{i,j}^{e}, period_{i,j}^{e}\} \tag{14}$$

其中:$stw_{i,j}^{e}$为任务开始时间;$etw_{i,j}^{e}$为任务结束时间。

2.2　目标函数

为了简化问题,在调度过程中,主要考虑 2 颗卫星同时可以观测目标才满足要求,每个传感器 1 个时间段只能观测 1 个目标。优化目标时主要考虑 2 个目标:选择较长的观测弧段;尽早开始观测。

目标函数:

$$\max \sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{M}\sum_{e=1}^{E} x_{i,j}^{e}(w_{p}period_{i,j}^{e} + w_{st}stw_{i,j}^{e}) \tag{15}$$

式中:w_p 为观测时间的权重,w_{st}为开始时间的权重。

约束条件:如观测组合为(Sat_n,Sat_m),则

$$stw_{i,j}^{e} = \max(st_{i,j}^{n}, st_{i,j}^{m}) \tag{16}$$

决策变量:

$$x_{i,j}^{e} = \begin{cases} 1 & H_t(t) < D_1(H_t(t)) < D(H_t(t)) \\ 0 & 其他 \end{cases} \tag{17}$$

2.3　红外低轨星座针对突发任务的多重策略研究

2.3.1　突发任务决策需求与流程分析

红外低轨星座的决策与任务调度需要一个从全局到区域,由区域分配到具体的执行卫星,再根据执行卫星的执行结果调整调度方案。

红外低轨星座在突发任务出现后,启动决策与任务规划调度。在全局层面首先需要解决任务的分配问题。在任务的分配中,需要决定将哪些任务分配给哪些卫星执行。全局初始分配阶段,根据目标的数量、优先级和预测轨迹激活卫星的分组策略,决定对每个目标需要哪些卫星,以及这些卫星如何分配到不同的分组中。这个阶段的决策调度属于匹配型的调度,是一个任务在多个资源中选择合适的资源。

激活分组策略后,形成了针对每个任务的分组,主星启动任务规划与调度会出现 1 颗卫星在任务时间段内具备对多个任务的执行能力,尤其是在多个任务分配到 1 个分组后,卫星资源已经无法满足对所有任务的执行,卫星资源需要优先执行高优先级的任务,并通过合理的任务执行排序,获得较大的任务执行收益,因此,组内的任务规划与调度属于次序型调度问题,优化每个任务的资源分配及分配次序。

主星完成了任务规划与调度,并将任务分配到执行卫星后,卫星开始对目标进行观测,并生成观测结果,结果反馈到主星,主星需要通过任务的完成情况,如预期时段卫星未完成对目标的观测,或者提取完成对目标的观测等情况下决策是否进行重新规划,以及在目标的轨迹进入其他分组的观测范围后,主星向全局决策反馈全局重调度需求。全局决策层若认为需要重调度,则将该执行结果作为新事件进行新一轮的调度。

全局决策主要解决任务分解的问题,是将 $Task_{sys}$ 拆解为 $Task_{group}$,主要对 $Task_{sys}$ 中的目标 $Tar_i = \{ID_i, w_i, st_i, et_i, period_i, position_i, velocity_i\}$ 进行分配。全局决策问题是解决将哪些任务分配到哪些资源的过程,不需要进行具体观测窗口的计算。因此,全局决策的实质是将任务分配到区域分组中的过程。

全局策略包含 2 层策略:全球分组策略和任务分配到组策略。

全球分组策略中,需要解决的问题是如何对任务进行快速响应。现有的初始分组策略研究,需要星座中全部卫星与全部目标的可见性计算,在通过约束与优化目标对适合观测的卫星进行优化排序。计算过程复杂,且未充分考虑目标在时间与空间的分布特性,以及红外低轨星座的对称性与运行过程的周期性。

在分组的策略上存在 2 种典型的方法,一种是固定分组,另一种是动态分组。这 2 种分组策略都有各自的特点。固定分组,分组中卫星之间主从关系是固定的,组内卫星的数量是固定的,因此一个分组拥有的观测资源也是固定的。但是红外低轨卫星与目标都处于高速运动状态,固定分组难以适应快速的空间拓扑变化,因此,固定分组策略在红外低轨星座中是不适用的。动态分组指组内的成员和主从关系是动态调整的,这样的分组策略可以较好地适应动态的相对观测关系。由于目标的出现具有不确定性,对任务又要求快速的响应能力,因此,在动态分组策略下又进一步细分,提出一种兼顾固定分组优势的区域动态分组策略,该策略采用地理区域固定的方式来适应目标出现的区域性,通过全球的区域划分后,目标出现在任何区域都有观测对应的分组可以快速响应,同时 1 个区域中的卫星数量与卫星关系在 1 个时间段内较为稳定。

针对出现在多个区域交界处并在飞行过程中跨越多个区域的目标,提出一种围绕目标的快速分组策略,围绕目标的飞行轨迹来选择动态分组

http://bhxb.buaa.edu.cn

的卫星,该策略可以较好地适应目标观测,但计算开销较大,且分组动态性较高,本文提出一种基于多重策略的红外低轨星座任务应急调度方法。主要采用全球分区管控值守分组策略与基于相对运动分析的动态快速分组策略相结合的方法来提升对于突发事件的快速响应能力。

2.3.2 全球分区管控值守分组策略

根据星座内卫星的分布特性,虽然卫星处于高度动态的过程,但是选取合适的空间范围后,处于空间范围内的卫星数量是相对固定的,而且出入区域的时间也具有很高的周期特性。

因此,在红外低轨星座中采用一种长期在轨维持的分组策略。将经度宽度为 90°,纬度宽度为 90°的 1 个区域划分为 1 个值守区域,进入该区域的卫星动态组成分组。这样在全球范围内划分出 8 个值守区域,获得 8 个分组。分组集合为

$$\text{Group} = \{G_1, G_2, \cdots, G_8\} \tag{18}$$

对于每个分组包含的变量为

$$G_{na} = \{\text{Sat}_{na}, \text{Tar}_{na}, L_{na}, F_{na}\} \tag{19}$$

式中:na 为区域编号,取值在 1 ~ 8 之间;Sat_{na} 为组内卫星集合;Tar_{na} 为分配给该组的目标集合;L_{na} 为组内主星;F_{na} 为组内从星。

区域分组如图 6 所示。

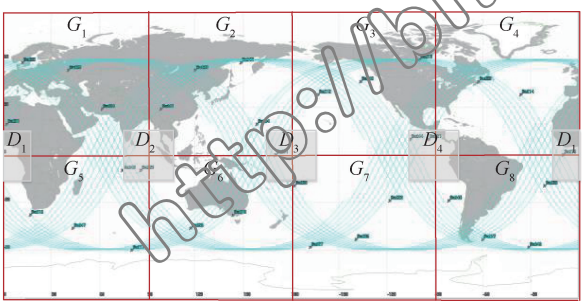


图 6 全球分区示意图

Fig. 6 Global surveillance area

对于 4 个分区交接的区域,组间在这些区域切换频繁,因此,针对正对赤道上经度 0°、90°、180°、-90°的 4 个区域交点为中心,设立 4 个经纬度宽度为 20°的冲突区。如果目标落入冲突区,则触发动态快速分组策略。动态快速分组共 4 个触发区域,分组集合为

$$\text{CG} = \{\text{CG}_1, \text{CG}_2, \cdots, \text{CG}_8\} \tag{20}$$

2.3.3 基于相对运动分析的动态快速分组策略

基于相对运动分析的快速动态分组策略,主要为了解决 2 个问题:①在 4 个区域交界处的分组冲突问题,因此在目标出现前,该策略不激活;②解决在目标落入该区域后如何快速组成观测组的问题。

在动态快速分组策略中,轨道的固有特性依然是分组策略制定的重要依据。由于 Walker-δ 星座中多个轨道面的升交点经度 Ω_A 在赤道上也是均匀分布的,因此,可以将不同轨道面按照升交点经度与冲突区的距离关系,将其分配到动态冲突区中。由于轨道面的对称性,需要同时考虑轨道面的降交点经度 Ω_D。通过计算 $|\text{CG}_{G_0}^{ca} - \Omega_{\text{central}}|$ 来选取距离分区最近的轨道面。其中,$\text{CG}_{G_0}^{ca}$ 为冲突区的中心经度,Ω_{central} 为轨道面的升交点经度或降交点经度的中心经度。这是由于一个轨道面的所有卫星的升交点经度都分布在一个宽度为 R_Ω 的经度区间里:

$$R_\Omega = T_{op}\omega_e \tag{21}$$

式中:T_{op} 为该轨道面的轨道周期;ω_e 为地球速度。

因此,每个分组包含的变量为

$$\text{CG}_{ca} = \{\text{Sat}_{ca}, \text{Tar}_{ca}, L_{ca}, F_{ca}, \Omega_A, \Omega_D\} \tag{22}$$

式中:ca 为区域编号,取值在 1 ~ 4 之间;Sat_{ca} 为组内卫星集合;Tar_{ca} 为分配给改组的目标集合;L_{ca} 为组内主星;F_{ca} 为组内从星;Ω_A 为最近的升交点经度所处轨道面编号;Ω_D 为最近的降交点经度所处轨道面编号。

选定轨道面后,需要进一步选择轨道面上的卫星组成分组。本文采用基于相对运动分析选取原则。在获得目标的位置和初步的运动速度信息后,计算目标与卫星的相对运动角度并设计相对角度影响因子 F_{ra}^n,依据目标与卫星的距离设计相对距离影响因子 F_{dis}^n,以及由目标高度生成半径为 $D_b(H_1)$ 的不可观测区域影响因子 F_{bd}^n,从而形成基于相对运动分析的轨道面内选星因子 SF_{sat}^n 为

$$\text{SF}_{sat}^n = w_{ra}F_{ra}^n + w_{dis}F_{dis}^n + w_{bd}F_{bd}^n \tag{23}$$

式中:w_{ra}、w_{dis}、w_{bd} 分别为对应相对角度影响因子、距离影响因子和不可观测区域影响因子的权重。

2.4 调度方案求解过程

基于多重策略的调度流程如图 7 所示。调度方案的具体执行步骤如下:

步骤 1 在外部目标信息输入条件下触发初始任务调度方案。

步骤 2 依据目标位置所在区域进行策略的选择,如在地理值守区域则根据区域的分组信息直接触发任务规划与调度的计算过程;如目标位置处于冲突区域,则触发基于相对运动分析的动态快速分组策略。根据冲突区选择临近轨道面并通过选星因子选出动态观测分组。

步骤 3 确定分组之后,根据目标轨迹预测

http://bhxb.buaa.edu.cn

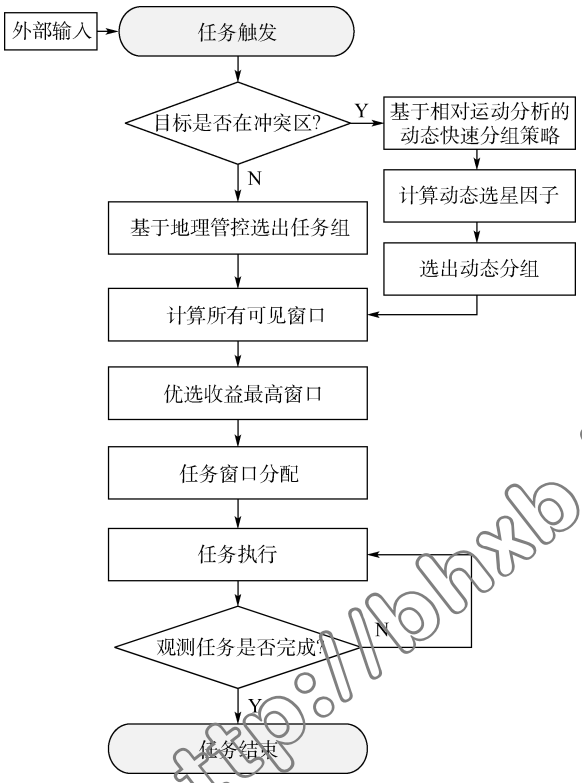


图 7　任务调度流程

Fig. 7　Scheduling procedure

以及卫星信息计算所有可见窗口。

步骤 4　根据目标函数和约束条件进行任务窗口的优选。

步骤 5　通过星间链路进行任务分配。

步骤 6　任务执行。

步骤 7　判别观测任务是否结束,是则调度过程结束,否则执行步骤 6。

3　仿真算例

3.1　仿真输入

选取 3 个目标进行任务规划窗口的计算仿真,3 个目标的输入轨迹点坐标如表 3 所示,表中包含目标初期 2 个位置点的经度、纬度和高度,用于进行可见性与初始轨道的优选。

各项权重的取值如表 4 所示。

表 3　目标初始位置

Table 3　Targets initial position

目标点	经度/(°)	纬度/(°)	高度/km
目标 1 点 1	-19.203	-38.226	121.496
目标 1 点 2	-19.931	-38.120	151.018
目标 2 点 1	-25.591	21.137	128.224
目标 2 点 2	-25.691	20.675	158.993
目标 3 点 1	-123.993	11.633	133.284
目标 3 点 2	-124.377	11.509	164.877

表 4　权重设置

Table 4　Weight configuration

参数	数值
相对角度权重 w_{ra}	0.15
距离权重 w_{dis}	0.65
不可观测区域权重 w_{nd}	0.2
观测时间权重 w_{et}	0.85
开始时间权重 w_{st}	0.15

3.2　仿真结果

3.2.1　卫星分组结果分析

首先对目标 1 进行分组分析,目标 1 出现的位置是(-19.203°,-38.226°),属于全球分区管控值守分组中的 G_8 分组,该组的卫星包括(Sat15,Sat37,Sat38,Sat45,Sat46)。采用相对运动分析的卫星优选方法与区域分组进行对比,采用相对运动分析进行优选的结果如图 8 所示。

采用相对运动分析优选出来的卫星是(Sat15,Sat16,Sat37,Sat38),其中,Sat16 并非区域分组 G_8 中的卫星,而是属于 G_8 相邻的 G_5 区域内的卫星。在相对运动分析中,Sat16 被选入,因为 Sat16 具备对目标 1 的早期观测能力,可以在任务初期获得较好的观测条件,因此被选入。在进行区域分组分析时,目标的可见性分析应该包含最近的一个相邻区域分组共同考虑可见性,从而实现较好的分组效果。

目标 2 的初始位置为(-25.591°,21.137°),属于全球分区管控值守分组中的 G_4 分组,该组的卫星包括(Sat14,Sat22,Sat31)。采用相对运动分析的卫星优选方法与区域分组进行对比,采用相对运动分析进行优选的结果如图 9 所示。

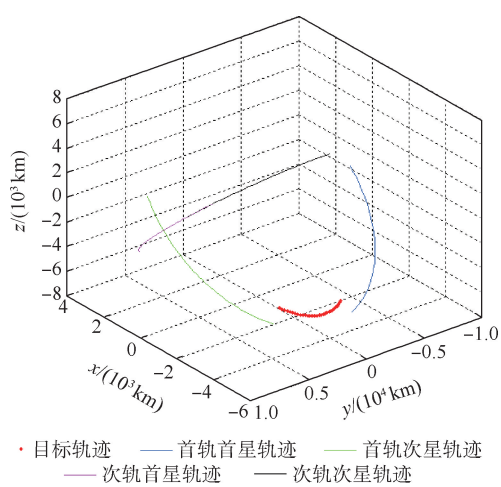


图 8　目标 1 轨道面与卫星筛选结果

Fig. 8　Selection of orbit plans and satellites for Target 1

http://bhxb.buaa.edu.cn

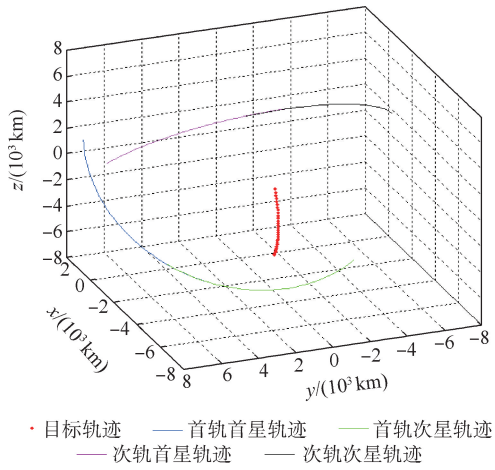


图 9 目标 2 轨道面与卫星筛选结果

Fig. 9 Selection of orbit plans and satellites for Target 2

采用相对运动分析优选出来的卫星是(Sat14,Sat15,Sat31,Sat38),其中,Sat15 与 Sat38,是属于 G_4 相邻的 G_8 区域内的卫星。Sat38 在观测开始约 2 min 后进入 G_4 区域。再次证明了目标的可见性分析应该包含最近的一个相邻区域分组共同考虑可见性的需求。

目标 3 的初始位置为(-123.993°, 11.633°),属于全球分区管控值守分组中的 G_3 分组,该组的卫星包括(Sat11,Sat12,Sat42,Sat43)。采用相对运动分析的卫星优选方法与区域分组进行对比,采用相对运动分析进行优选的结果如图 10 所示。

采用相对运动分析优选出来的卫星是(Sat11,Sat12,Sat27,Sat28),其中,Sat27 和 Sat28 是属于 G_3 相邻的 G_7 区域内的卫星。Sat27 和 Sat28 在目标 3 出现的早期具备较好的观测效能。再次证明了目标的可见性分析应该包含最近的一个相邻区域分组共同考虑可见性的需求。

通过对 3 个分属不同区域的目标在其初始时刻进行区域分组和基于相对运动的动态分组分析。

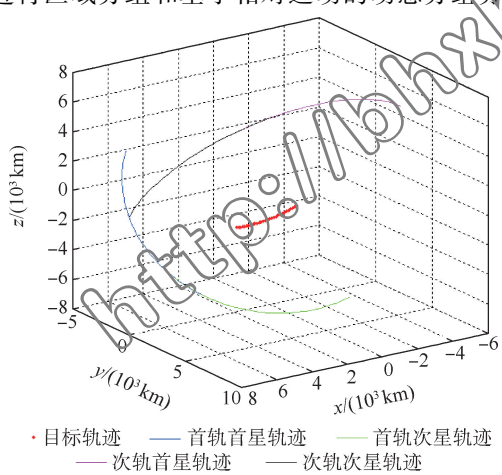


图 10 目标 3 轨道面与卫星筛选结果

Fig. 10 Selection of orbit plans and satellites for Target 3

区域分组的结果和动态分组的结果相互印证了分组策略的有效性。其中相对运动分组可以获得初始时刻观测条件较好的卫星分组。对于区域分组,经过 3 个目标的分析,证明在计算可见性时,不能只计算本组内的卫星与目标,应该将离目标最近的区域分组纳入可见性的计算,从而可以保证将适合观测的卫星纳入可见性分析。

3.2.2 观测窗口分配结果分析

通过对目标 1、目标 2、目标 3 的轨迹进行外推,再与飞行弧段内的卫星进行可见性计算,将可见性窗口统一作图获得目标 1、2、3 的可见性窗口如图 11 所示。

图 11 中可以看出,目标 1 和目标 2 都在场景的开始阶段就出现了,并且存在可见窗口上有多个时段是重合的。而目标 3 在 630 s 左右出现,与目标 1 有较多可见窗口重合,与目标 2 有部分窗口重合。因此,在任务窗口分配的前期主要考虑目标 1 与目标 2 之间的分配关系。目标 3 出现后,目标 3 作为新增任务,主要考虑在任务变化情况下的观测窗口分配,分配结果如图 12 所示。

观测窗口分配计算采用 100 s 作为规划周期。图 12 中,白色方块表示对目标 1 分配的观测窗口,编号方式为“TW 1-e”,表示对目标 1 的第 e 个

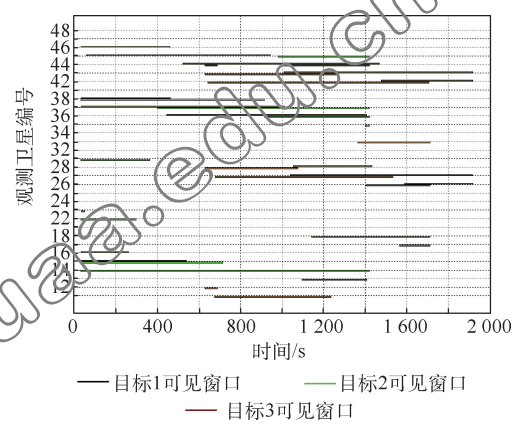


图 11 目标 1、2、3 可见窗口

Fig. 11 Access windows for Target 1, 2, 3

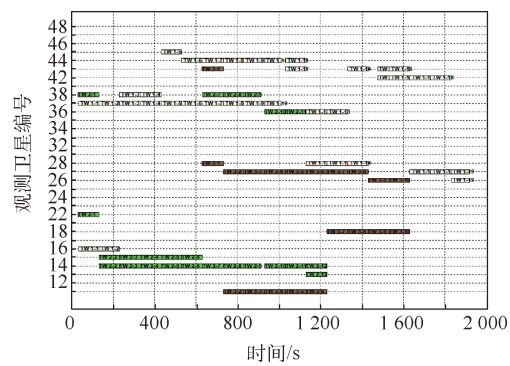


图 12 目标 1、2、3 观测窗口

Fig. 12 Task windows for Target 1, 2, 3

http://bhxb.buaa.edu.cn

观测窗口。绿色方块表示对目标 2 分配的观测窗口,编号方式为“TW 2-*e*”,表示对目标 2 的第*e* 个观测窗口。棕色方块表示对目标 3 分配的观测窗口,编号方式为“TW 3-*e*”,表示对目标 3 的第 *e* 个观测窗口。

每个规划周期内为每个目标优选出 2 颗卫星共同组成立体观测组合,进行目标的立体定位观测。图 12 中目标 1 的观测窗口前期主要选择并维持了观测条件较好的 Sat37 作为主要的观测卫星,先后选择与 Sat37 组成较好观测条件的 Sat16、Sat38、Sat45、Sat44 等形成对目标的立体观测组合。对于目标 2,为目标 2 选出了观测条件较好且观测持续时间较长的 Sat14 和 Sat15 作为立体观测组合进行目标立体定位。在目标 2 的观测窗口后段,选用 Sat38 和 Sat36 先后与 Sat14 配合完成对目标 2 的立体观测。由于 Sat14 与目标具有近 1 000 s 的可见弧段,因此 Sat14 被分配了最长的观测窗口。对于目标 3 观测窗口的分配结果为以观测窗口较长的 Sat27 为主要观测卫星,先后安排 Sat11 和 Sat18 与其配合。

4　结　论

本文就红外星座突发任务的规划问题做出了深入分析和研究,提出一种多重应急调度策略,经过仿真计算,结果显示所提策略下进行的任务调度具有较好的任务响应时效性,可以满足大规模星座在轨实时规划的需求,为红外星座突发任务规划奠定了基础。

1)本文提出基于区域值守的长期分组策略,面向地理区域进行长期分组,可以快速进行面向目标探测的组网和工作窗口的调度规划,为全球性星座的快速任务规划提供支撑。

2)本文提出基于相对运动特性分析的动态快速分组策略,针对观测条件优选观测卫星,可以将具备最好观测条件的卫星快速分配给观测任务,获得较好的组网观测效果。

3)本文提出的多重策略,充分考虑红外低轨星座空间和时间的特性结合星座长期运行和任务突发的运行特点,具有创新性,可以满足大规模星座在轨实时任务规划的需求。

参考文献(References)

[1] GUO C, XIONG W, LIU C X. Research on emergency mission planning of earth observation satellites[C]// Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Computer Communication and the Internet. Piscataway: IEEE Press, 2016: 210-214.

[2] HU J, HUANG H, YANG L, et al. A multi-objective optimization framework of constellation design for emergency observation [J]. Advances in Space Research, 2021, 67: 531-545.

[3] 陈书剑,李智,胡敏,等. 应急任务响应时间最优的多星成像规划方法[J]. 中国空间科学技术,2020,40(2):17-28.
CHEN S J, LI Z, HU M, et al. Multi-satellite imaging planning method with optimal response time for emergency tasks[J]. Chinese Space Science and Technology, 2020, 40(2): 17-28(in Chinese).

[4] 贺仁杰,高鹏,白保存,等. 成像卫星任务规划模型、算法及其应用[J]. 系统工程理论与实践,2011,31(3):411-422.
HE R J, GAO P, BAI B C, et al. Models, algorithms and applications to the mission planning system of imaging satellites[J]. System Engineering Theory and Practice, 2011, 31(3): 411-422 (in Chinese).

[5] HAN P, HE Z W, GENG Y Z, et al. Mission planning for agile earth observing satellite based on genetic algorithm[C]// Proceedings of the 38th Chinese Control Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019: 564-569.

[6] 张晟宇,孙煜坤,宋振才,等. 启发式前后向链条优化组合在轨多目标观测规划算法[J]. 系统工程与电子技术,2021,43(5):1262-1269.
ZHANG S Y, SUN Y K, ZHU Z C, et al. Heuristic optimized forward-backward chains combination method for on-board multi-targets observation planning[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(5): 1262-1269(in Chinese).

[7] HE L, LIU X L, LAPORTE G, et al. An improved adaptive large neighborhood search algorithm for multiple agile satellites scheduling[J]. Computers & Operations Research, 2018, 100: 12-25.

[8] 姜维,庞秀丽,郝会成. 成像卫星协同任务规划模型与算法[J]. 系统工程与电子技术,2013,35(10):2093-2101.
JIANG W, PANG X L, HAO H C. Collaborative scheduling model and algorithm for imaging satellite network[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(10): 2093-2101 (in Chinese).

[9] 陈金勇,张超,李艳斌. 基于超启发式的多星协同任务规划算法研究[J]. 中国电子科学研究院学报,2018,13(3):254-259.
CHEN J Y, ZHANG C, LI Y B. Multi-star cooperative task planning based on hyper-heuristic algorithm[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2018, 13(3): 254-259(in Chinese).

[10] YAO F, LI J T, CHEN Y N, et al. Task allocation strategies for cooperative task planning of multi-autonomous satellite constellation[J]. Advances in Space Research, 2019, 63: 1073-1084.

[11] YU Y, HOU Q, ZHANG J, et al. Mission scheduling optimization of multi-optical satellites for multi-aerial targets staring surveillance[J]. Journal of the Franklin Institute, 2020, 357: 8657-8677.

[12] 孙立远,熊伟. 基于补偿跟踪的低轨预警资源调度方法研究[J]. 装备学院学报,2015,26(3):74-80.
SUN L Y, XIONG W. Scheduling method of LEO early warning resources based on tracking compensation[J]. Journal of Equipment Academy, 2015, 26(3): 74-80(in Chinese).

http://zndxxb.buaa.edu.cn
http://zndxxb.buaa.edu.cn
http://zndxxb.buaa.edu.cn

[13] 刘闻,王晓路,汪宏昇,等. 基于 Agent 的低轨预警卫星星座探测仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(11): 2413-2421.
LIU W, WANG X L, WANG H S, et al. Agent based modeling and simulation analysis of LEO early-warning satellites[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(11): 2413-2421 (in Chinese).

[14] BUDIANTO I A, OLDS J R. A collaborative optimization approach to design and deployment of a space based infrared system constellation[C]//Conference. Piscataway: IEEE Press, 2000: 879415.

[15] SHTARK T, GURFIL P. Low earth orbit satellite constellation for regional positioning with prolonged coverage durations[J]. Advances in Space Research, 2019, 63: 2469-2494.

[16] 任俊亮,邢清华,李龙跃. 局部空域覆盖的回归轨道预警星座设计方法[J]. 现代防御技术, 2016, 44(3): 1-6.
REN J L, XING Q H, LI L Y. Method on designing a part airspace covered early warning constellation in recursive orbit[J]. Morden Defence Technology, 2016, 44(3): 1-6 (in Chinese).

[17] 田野,李海岩,秦国政,等. 中低轨预警卫星覆盖效能与定位精度分析[J]. 兵工自动化, 2019, 38(7): 43-51.
TIAN Y, LI H Y, QIN G Z, et al. Analysis of MEO and LEO early warning satellites Coverage capability and positioning accuracy[J]. Ordnance Industry Automation, 2019, 38(7): 43-51 (in Chinese).

[18] CHEN Y, ZHAO L F, LIU H J, et al. Analysis of configuration and maintenance strategy of LEO walker constellation[J]. Journal of Astronautics, 2019, 40(11): 1296-1303.

[19] ROSSI A, PETIT A, MCKNIGHT D. Short-term space safety analysis of LEO constellations and clusters[J]. Acta Astronautica, 2020, 175: 476-483.

Burst tasks scheduling method for infrared LEO constellation based on multi-strategies

ZHANG Shengyu[1,2,3,*], ZHU Zhencai[1,2], HU Haiying[1,2]

(1. Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China;
2. Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Shanghai 201203, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Aiming at problems of the burst task planning and resource scheduling of the infrared LEO constellation, a method based on multi-strategies is proposed considering the temporal and spatial distribution characteristics of infrared LEO constellation. And drawing on the design characteristics of infrared LEO constellation such as the uniformity of the global distribution, the symmetry of the structure and the periodic motion, this multi-strategies involve a long-term on-duty grouping strategy based on geographic divisions and the event triggering strategy based on relative motion analysis. Under the guidance of these strategies, this paper completes task grouping and carries out work window scheduling. Through simulation analysis, the multi-strategies reveal the effectivity, while dealing with target triggers in different areas and fulfilling of grouping and working window scheduling in real time, which insure the timeline of system response under task emergencies. Due to the priority grouping strategy, global complexity is reduced, and the method is proved to be innovative with practical application values.

Keywords: multi-strategy optimization; infrared LEO constellation; mission planning; burst task scheduling; constellation collaboration

Received: 2021-03-16; **Accepted**: 2021-05-05; **Published online**: 2021-06-11 16:09
URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210611.1033.001.html

* **Corresponding author**. E-mail: zhangsy@microsate.com

http://bhxb.buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0120

一种方形腔体的目标散射特性及测量方法

赵京城*, 娄长玉, 李家碧, 杨宗凯
(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 雷达散射截面(RCS)是评价飞机隐身性能的重要指标,进气道对飞机的RCS有较大贡献,研究飞机进气道的散射有重要意义。相对于普通凸表面类型目标,进气道属于腔体,在远场条件计算、测量系统配置方面都需根据自身特有的散射机理做相应调整。借鉴矩形波导与远场关系理论,分析进气道等腔体类型目标的散射规律,判断进气道散射只与口面场有关。以一种方形腔体为例,采用几何光学法进行定量回波分析,通过电磁仿真软件FEKO进行仿真计算验证理论推导的正确性。在紧缩场和普通远场2种环境下,对腔体目标进行RCS对比测量研究。数值计算和实验测量的结果表明:对进气道等腔体类目标进行散射测量时,测试场仅需保证口面尺寸满足远场条件即可,但是测量系统需要具备2~5倍进气道长度的测量能力。

关 键 词: 进气道; 腔体散射特性; 远场条件; 数值计算; 雷达散射截面; 测量系统
中图分类号: TN951
文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2022)12-2415-10

雷达散射截面(radar cross section,RCS)是武器系统隐身性能的重要指标[1],是定量表征目标散射强弱的物理量[2],通过研究目标的散射特性,运用材料及外型技术,减少目标的RCS值,在隐身技术领域有重大意义。

理论分析和实验结果都已证明,发动机进气道对飞机和导弹的雷达散射截面有重要的影响[3]。因此,在计算现代飞行器的RCS值及进行隐身外形设计时,应充分考虑进气道结构的电磁散射特性[4]。鉴于进气道的几何形状和结构复杂,通常将进气道简化为腔体模型来研究其散射特性[5]。

国内外已经开展了腔体电磁散射方面的研究,发展形成了一套系统的、科学的研究方法。除了传统的解析方法、时域的积分方程解法、频域的矩量法、有限元法等数值计算方法[6]外,还有几何光学法[7-9]、物理光学法[10-12]、射线追踪法[13-14]、广义射线法[15]、复射线法[16]等高频近似方法。矩量法等精确数值计算方法只能求解电尺寸较小的散射体[17],而高频近似解法具有物理概念清楚、场分布可以直接写出表达式和方法简单易用等优点。在测量方面,一般测试场仍将进气道作为普通目标看待,按照三维最大尺寸(通常是长度)计算远场条件和设置距离门参数。但是,按照波导理论分析,腔体散射应该只与口面场相关,远场条件也应该按照口面尺寸计算。另外,由于腔体存在多次反射,反射路径远大于腔体长度,因此,距离门参数按长度设置可能给测量带来较大误差,本文将在腔体目标的远场条件分析和多次散射距离两方面进行深入研究。

本文根据矩形波导理论分析腔体散射只与口面场分布相关的机理,用几何光学法推导腔体模型的散射距离与电磁波入射角度即方位角的关系。用FEKO软件对腔体模型进行散射场计算,验

收稿日期: 2021-03-16; **录用日期**: 2021-04-24; **网络出版时间**: 2021-05-07 09:33
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210506.1738.004.html
*通信作者. E-mail: zjccool@126.com

引用格式: 赵京城, 娄长玉, 李家碧, 等. 一种方形腔体的目标散射特性及测量方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2415-2424. ZHAO J C, LOU C Y, LI J B, et al. Scattering characteristics and measurement method of a square cavity[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2415-2424(in Chinese).

http://bhxb.buaa.edu.cn

证理论推导的正确性。将腔体实物模型分别置于紧缩场和普通远场暗室中测量,验证腔体散射只与口面场有关。同时设置不同的距离门参数,验证腔体类目标测量系统需要具备的距离测量能力。

1 腔体目标散射机理

1.1 矩形波导理论

根据矩形波导传输特性,电磁波在金属腔体内传输可视为波在波导内壁间连续入射与反射[18],构成导行波沿波导传播。

对于闭合金属腔体而言,外加电场不影响腔体内部电场[19],对于进气道来说,与闭合腔体不同的是一端开口,入射电磁波通过口面进入腔体内部,散射电磁波通过口面传播到腔体外部,腔体外表面的电磁场不影响腔体内部散射。

在测量进气道等腔体类目标的RCS时,由于腔体内部电磁场与腔体产生的散射场均由进气道口面场决定,与进气道外壁电磁场分布无关。因此,在计算远场条件时,不需取目标三维最大尺寸(如进气道长度),只需取口面最大尺寸即可。

1.2 传统目标RCS测量方法及要求

RCS测量要求用平面波照射,但是实际天线发射的是球面波,将一个已知特性的发射天线设置在远处向待测天线照射,当发射天线的波前阵面扩展到一定程度,可认为待测天线接收的是近似平面波的照射,满足近似条件的距离称为远场条件,其示意图如图1所示。

目标口面尺寸D的相位差满足:

$$\Delta\varphi \leqslant kh = 2\pi h/\lambda \tag{1}$$

其中,$k=2\pi/\lambda$,为保证一定的测试精度,要求相位差$\Delta\varphi\leqslant\pi/8=22.5°$,此时满足$D\ll 2R$的条件,有

$$h \approx D^2/(8R) \tag{2}$$

此时雷达与被测目标之间的距离R满足:

$$R \geqslant 2D^2/\lambda \tag{3}$$

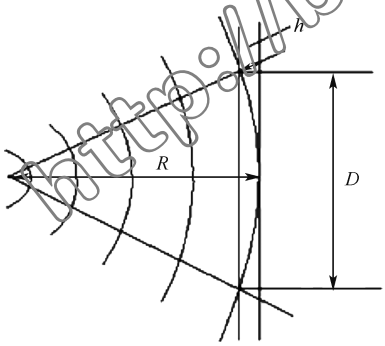


图1 远场条件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of far field conditions

式中:D为目标口径;λ为波长;$2D^2/\lambda$为实际测量中最小的测试距离。

引入远场条件的基本出发点是要求在被测目标口径平面上的相位变化小于$\pi/8$。在计算远场条件时,一般取目标三维尺寸中最大的一维。对进气道来说,其长度往往比口面尺寸大,因此,需要使用长度计算远场条件。由此计算得到的测量距离一般较大,需要在大型测试场中进行测量,成本较高。但是,进气道等腔体类目标散射机理与一般凸表面目标不同,有2个问题值得深入研究:①远场条件是否应该按照长度计算;②按照长度计算出的远场条件下是否能获得准确的测量结果。

1.3 腔体类目标散射特点

腔体散射最主要的特点是在腔体内部产生的多次反射,此外,在腔体边缘产生的绕射也会对腔体散射产生一定影响。

1.3.1 多次反射

电磁波照射到腔体口面后,会在口面处形成口面场并进入到腔体内部如图2所示,在腔体内壁之间经过多次反射后,能量会从腔体口面处再次辐射到远区,多次反射对腔体散射起到十分重要的作用。

L为腔体模型长度尺寸,D为腔体模型口面尺寸,θ为电磁波(以下用射线代替)入射方向与腔体模型轴向夹角,红色标记处为射线1的反射位置。记射线1在目标模型轴向的投影为d(见图2)。下面采用几何光学法详细地分析腔体内部的单站回波特性,其中,$m_1=2L/d$且$2L$可被d整除,如图3所示。

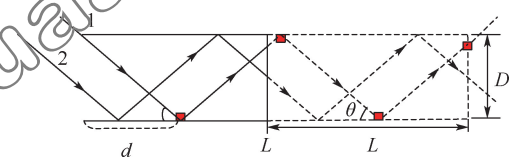


图2 腔体内壁多次反射示意图

Fig. 2 Multiple reflection of cavity inner wall

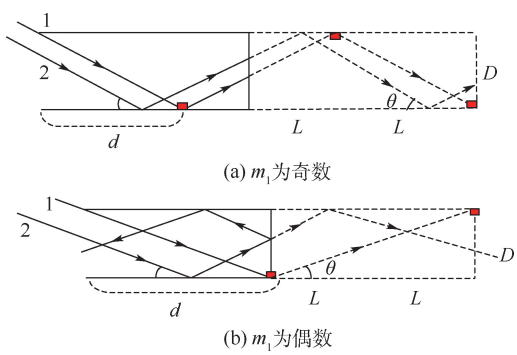


图3 腔体部分回波示意图

Fig. 3 Echo diagram of cavity part

http://bnxb.buaa.edu.cn

本节分 2 种情况予以说明。

1) 临界角度情况($2L$ 可以被 d 整除)。依据几何光学原理,射线在腔体底面反射,相当于以底面为对称轴做镜像。因此,可以做腔体镜像来分析。若回波方向朝上,表示回波沿入射方向返回,即接收机可以接收到回波功率的单站情况;若回波方向朝下,表示入射方向没有回波,即接收机不能接收到回波功率。可用回波比例来表示腔体多次反射后单站接收的回波情况。

① 若 $m_1 = 2L/d$ 为奇数,如图 3(a)所示。朝向目标的箭头代表电磁波入射方向,另一个代表水平极化。不难发现除了射线 1 以外,其余射线的出射方向均朝上,即全部的射线沿入射方向返回;其回波方向可用如图 4(a)所示的情况来呈现。该图是在 FEKO 软件中对口面尺寸 D = 0.11 m、径向长度 L = 0.3 m 的方形腔体,在方位角为 10.39°时计算获得的水平极化双站散射方向图,频率为 15 GHz。此时回波比例为 1。

② 若 $m_1 = 2L/d$ 为偶数,如图 3(b)所示。亦不难发现除了射线 1 以外,其余射线出射方向均朝下,即入射方向没有回波,其回波大致方向如图 4(b)所示,方位角为 20.2°。此时回波比例为 0。

2) 一般角度情况($2L$ 不可被 d 整除)。实际入射方向与模型轴向夹角即方位角 θ 从 0°~90°变化。除了某些角度下 $2L$ 可以被 d 整除,其余角度 $2L$ 均不能被 d 整除。

① 若 $m_2 = 2L/d$ 为奇数,记 $d_1 = 2L - m_2 d$ 为 d 整除 $2L$ 后的剩余长度。如图 3(a)所示,此时射线 1 在镜像底面上是朝上射出的,存在一条射线,其下的所有射线均朝下射出。这个临界射线在入射口面处距离射向内壁的垂直距离为 $d_1 \tan\theta$,因此回波比例 p 为

$$p = 1 - d_1 \tan\theta / D \tag{4}$$

② 若 $m_2 = 2L/d$ 为偶数,记 $d_1 = 2L - m_2 d$ 为 d 整除 $2L$ 后的剩余长度。如图 3(b)所示,此时射线 1 在镜像底面上是朝下射出的,存在一条射线,其下的所有射线均朝上射出。这个临界射线在入射口面处距离射向内壁的垂直距离也为 $d_1 \tan\theta$,因此回波比例 p 为

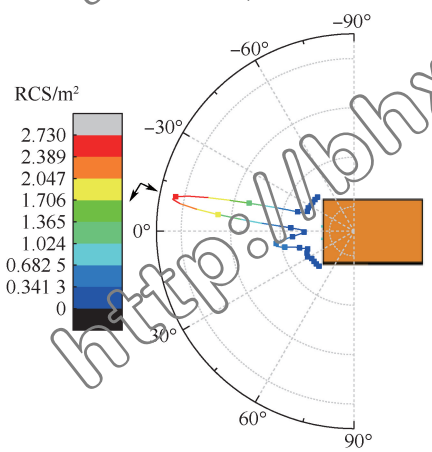
$$p = d_1 \tan\theta / D \tag{5}$$

式中:$d = D/\tan\theta$,$m_2 = 2L/d = 2L\tan\theta/D$,得到 $d_1 = 2L - m_2 d$。其回波方向如图 5 所示,方位角为 34°。

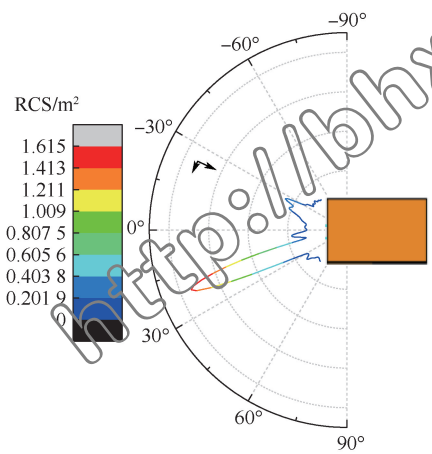
显然,方形腔体多次反射情况与平面波方位角关系密切,随着角度变化,入射到腔体口面处的能量按余弦规律减小,方形腔体的归一化回波比例为

$$p\cos\theta = \begin{cases} i\cos\theta - 2L\sin\theta_i/D & i \text{ 为偶数} \\ 2L\sin\theta_i/D - (i-1)\cos\theta_i & i \text{ 为奇数} \end{cases} \tag{6}$$

式中:i 为偶数时,对应图 4(a)中入射波全返回的情况;i 为奇数时,对应图 4(b)中入射波不返回的情况。



(a) 入射波全返回



(b) 入射波不返回

图 4　入射临界角返回情况

Fig. 4　Return of critical angle of incidence

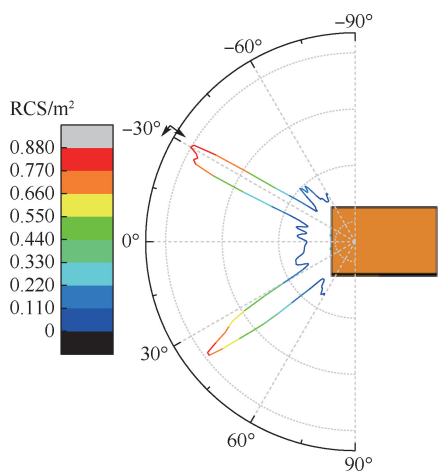


图 5　入射波返回的一般情况

Fig. 5　Return of incident wave

http://bhxb.buaa.edu.cn

当方位角为小角度时,投影部分远大于 $2L$,0°正入射时入射波全返回,角度偏离 0°能量会立即减小至 0,小角度时能够单站返回的部分投影为 $2L$,即 $p = 2L/d = 2L\tan\theta/D$,小角度范围内的归一化回波比例为

$$p\cos\theta = \frac{2L\sin\theta}{D} \tag{7}$$

同时,随着方位角的变化,散射距离 s 也会随之变化,$s = L/\cos\theta$,相对于腔体径向长度,其散射距离倍数为

$$n = s/L = 1/\cos\theta \tag{8}$$

本节所述,可得到方腔单站归一化回波比例曲线与腔体径向长度倍数曲线。通过 FEKO 软件仿真计算来验证推导结果,并对推导结果和仿真计算结果做归一化处理。图 6 为口面尺寸 D = 0.11 m、径向长度 L = 0.3 m 的方形腔体在不同极化状态下的推导结果与不同频率下 FEKO 单站仿真计算曲线。

由图 6 可知,归一化回波比例曲线与不同频率下 FEKO 单站仿真计算曲线趋势相同,方位角从 0°~90°,其归一化 RCS 都有降低趋势,并且两者的尖峰与低谷位置一致。由于理论推导采用的是几何光学法,频率更高的 50 GHz 比30 GHz 的曲线更接近于理论推导结果。此外,散射距离会随方位角增加而增加,并且增加的斜率逐渐变大。

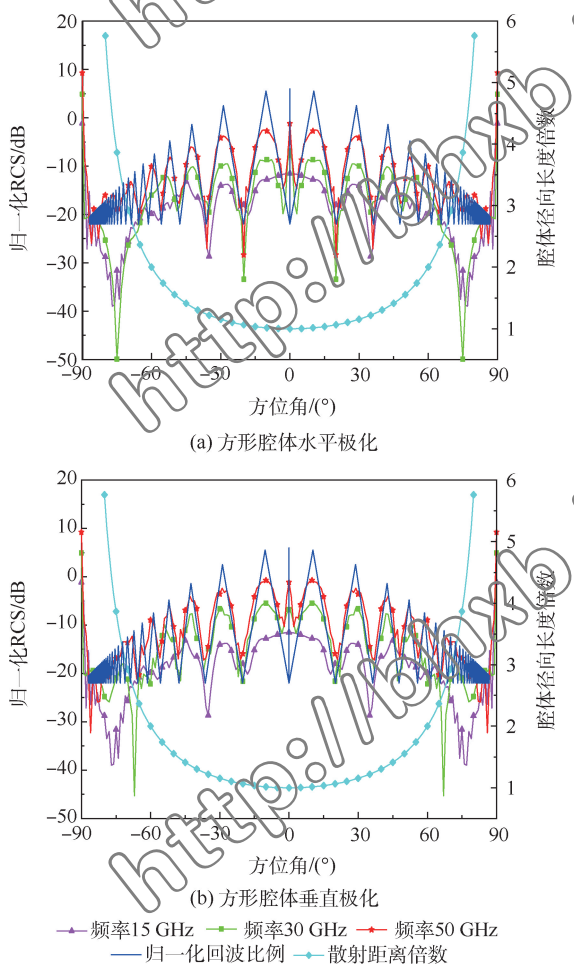


图 6 不同极化状态下推导结果与 FEKO 仿真计算的归一化曲线

Fig. 6 Normalized curves between derived results and FEKO simulation results under different polarization states

1.3.2 边缘绕射

电磁波在经过飞机进气道的棱边、缝隙等障碍物时,不能被直接照射到阴影区域内,而是会偏离直线传播进入该区域,即产生绕射。阴影区的绕射场也会对腔体的散射起到一定作用。

2 仿真计算及成像分析

2.1 仿真建模计算

计算模型与 1.3.1 节中验证理论推导的模型相同,口面尺寸 D 为 0.11 m,径向长度 L 为 0.3 m。平面波入射方向与腔体轴线在同一个平面上,方位角范围为 -90°~90°,如图 7 所示。角度间隔为 1°,计算频率为 15 GHz。由图 8 仿真计算结果看出:方位角在 60°~90°范围内,金属腔体的外壁散射较大,影响对腔体散射的分析。为了更好地研究腔体内部多次反射特性,应减小外壁的散射值。在腔体内外表面分别涂覆 2 种吸波材料,其中吸波材料 1 的电磁参数为介电常数实部 ε_r = 4,介电常数虚部 ε_i = 1.2,磁导率实部 μ_r = 1.2,磁导率虚部 μ_i = 0.6,涂在内壁。吸波材料 2 的电磁参数为:介电常数实部 ε_r = 1,介电常数虚部 ε_i = 0.6,磁导率实部 μ_r = 1.2,磁导率虚部 μ_i = 0.6,涂在外壁。通过 FEKO 仿真计算 2 种吸波材料的反射率,如图 9 所示,吸波材料 1 的反射率在 -10 dB 左右,吸波材料 2 的反射率在 -30 dB 左

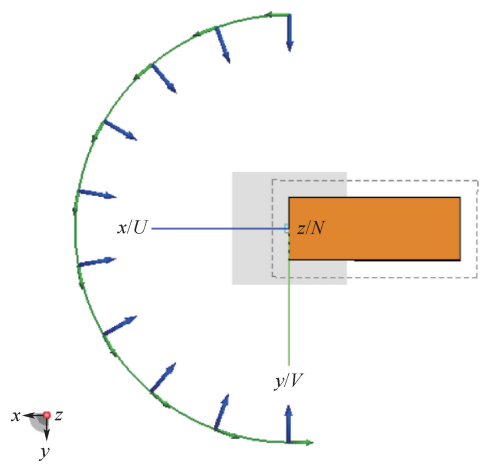


图 7 方位角示意图

Fig. 7 Schematic diagram of azimuth angle

http://bhxb.buaa.edu.cn

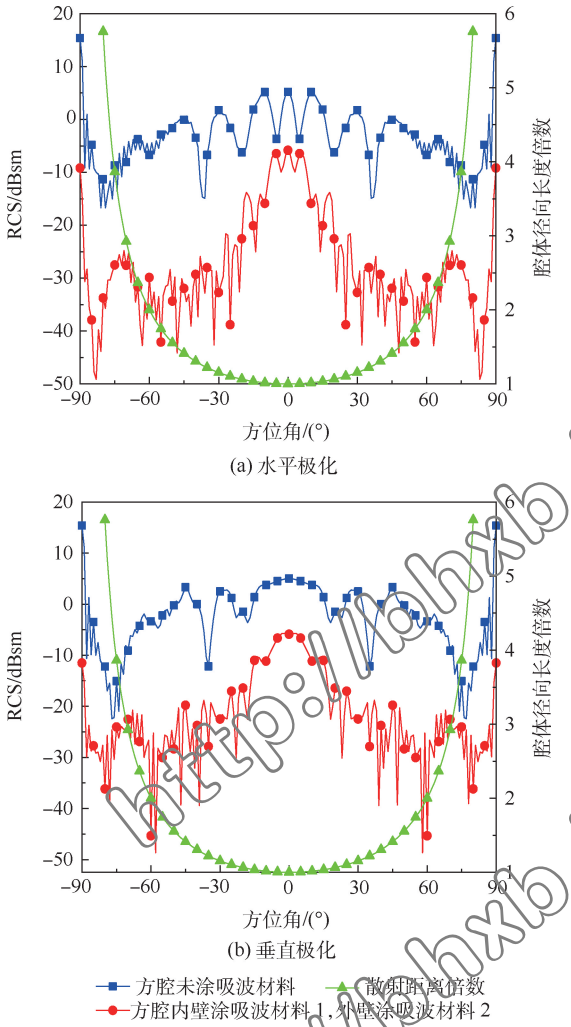


图 8　15 GHz 不同极化状态下金属腔体与涂吸波材料腔体的 RCS 曲线对比

Fig. 8　RCS curve comparison of metal cavity and cavity coated with absorbing material under different polarization conditions at 15 GHz

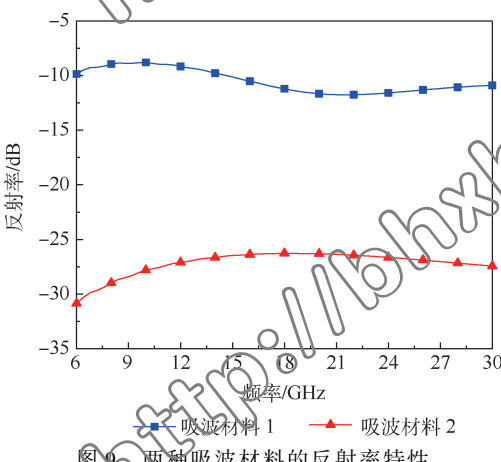


图 9　两种吸波材料的反射率特性

Fig. 9　Reflectivity characteristics of two absorbing materials

右。方形金属腔体和内外壁涂有吸波材料腔体的 RCS 对比曲线如图 8 所示。

由图 8 可知,方位角在 30°～60°(－60°～－30°)范围内,涂有吸波材料腔体的 RCS 相比于金属腔体的 RCS 显著减小,这与该方位角范围内腔体多次反射特性一致;从 2 种 RCS 曲线可以看出,方位角在±60°附近出现拐点,这是因为方位角在 0°～60°(－60°～0°)范围内,腔体内部反射为腔体散射的主要部分;方位角在 60°～90°(－90°～－60°)范围内,腔体外壁散射影响逐渐变大。结合测试距离倍数曲线可以看出,当腔体内壁使用吸波材料时,随着方位角变大,散射次数增加,散射幅度随角度衰减较快。在吸波材料性能较好的情况下,散射测量系统具备 2～5 倍腔体径向长度的测量能力即可准确测量腔体散射。

2.2　一维距离像验证

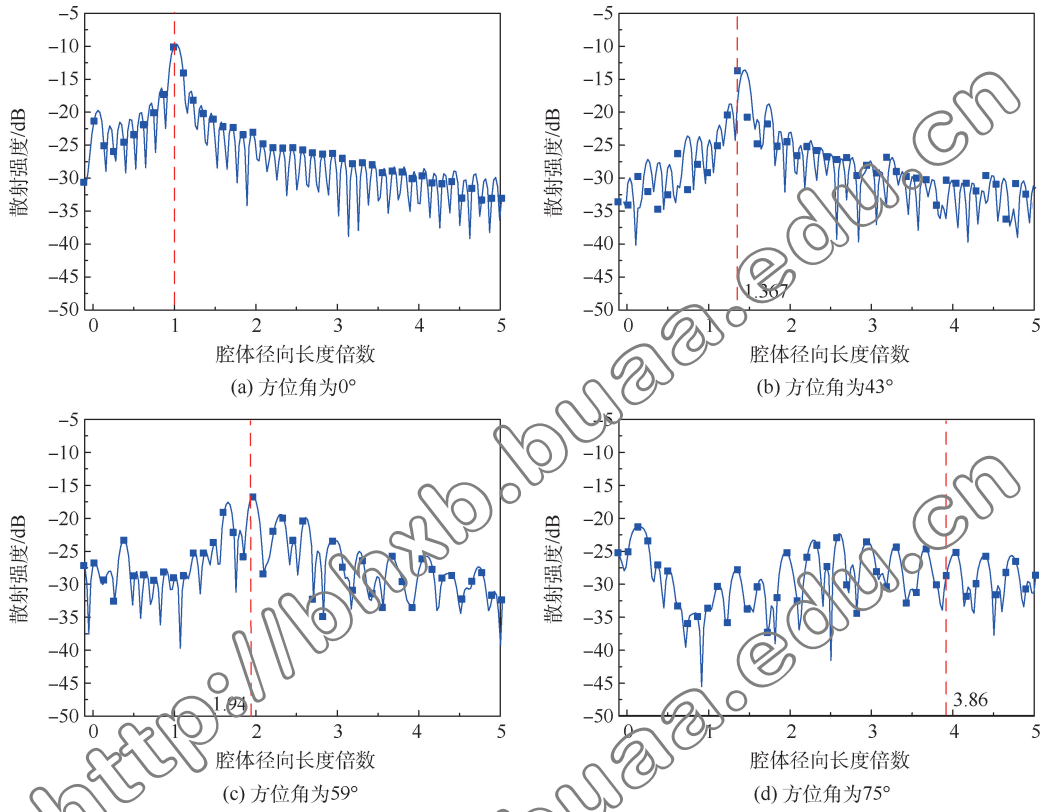
图 8 中的散射距离曲线是通过理论计算得出,可采用一维距离像来验证。选择一维像计算角度为 0°、43°、59°、75°,这些角度分别对应于腔体散射角度曲线中的峰值角度。选择水平极化方式,计算频率范围为 13～17 GHz,得到不同方位角的一维距离像如图 10 所示。

由图 10 可知,随着方位角增大,一维像的尖峰逐渐右移,即腔体内部散射的成像距离逐渐变大;方位角为 0°、43°、59°、75°时理论计算的成像距离分别为 0.3 m(1 倍)、0.41 m(1.367 倍)、0.58 m(1.94 倍)、1.16 m(3.86 倍),图 10 中腔体内部多次反射的成像位置与理论距离大致相同,验证了理论计算测试距离的正确性。同时,成像幅度逐渐减小,说明腔体内部反射值逐渐减小。方位角在 0°～59°范围内,金属腔体内部多次反射的 RCS 比其他散射值大,在方位角为 75°时,腔体内部反射小于近距离处腔体外表面镜像反射。验证了方位角在 0°～60°(－60°～0°)范围内,腔体内部反射为腔体散射的主要部分,而方位角在 60°～90°(－90°～－60°)范围内,腔体外壁散射影响逐渐变大。

对于涂有吸波材料的腔体,同样在入射角为 0°、43°、59°、75°做一维距离像,如图 11 所示。

由图 11(a)可知,随着方位角增大,散射距离增加,同时腔体散射量值逐渐减小。由图 11(b)可以看出,当腔体内壁涂有吸波材料时,方位角为 59°时推算的最大散射距离应为 0.6 m 左右,但是其散射量值很低,可以忽略,方位角为 75°时,腔体内部散射也可以忽略。由此说明,对于内壁吸波材料性能良好的腔体,散射测量设备具备 2 倍腔体径向长度的测量能力即可准确测量腔体散射。但是,检验吸波材料性能是否良好也是测量的目的之一,所以,对于测量设备来说,应该具备 2～5 倍腔体径向长度的测量能力,以应对吸波材料性能不好的情况。

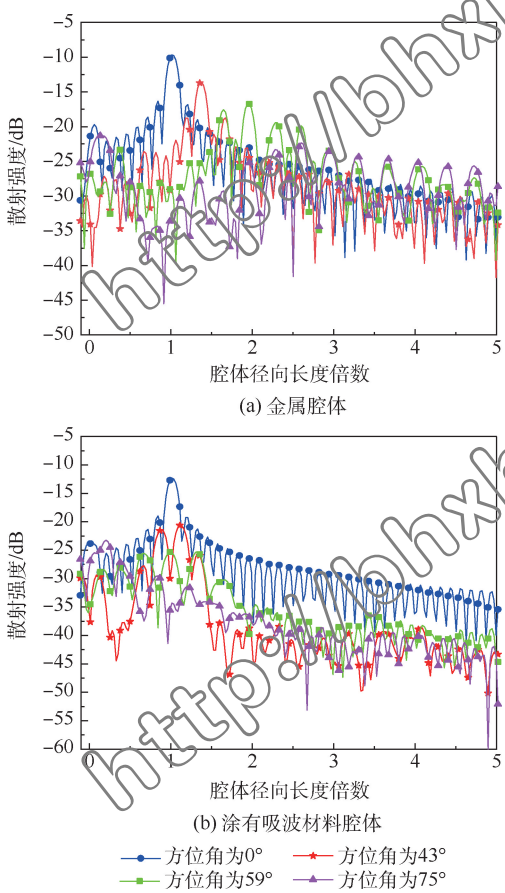
http://bhxb.buaa.edu.cn



(a) 方位角为0° (b) 方位角为43° (c) 方位角为59° (d) 方位角为75°

图 10 不同方位角的一维距离像

Fig. 10 One-dimensional range profile at different azimuth angles



(a) 金属腔体 (b) 涂有吸波材料腔体

图 11 水平极化状态下不同方位角的一维距离像

Fig. 11 One-dimensional range profiles at different azimuth angles under horizontal polarization

3 实验结果及分析

为了验证理论计算与仿真计算是否正确，本节通过 2 种类型的实验测量，分别验证是否应以口面尺寸计算进气道远场条件，以及长度方向满足远场条件的情况下，进气道的散射特性 RCS 和散射测量系统配置的关系。

实验所用测试场，一种是北京航空航天大学 2.5 m 静区的紧缩场，尺寸小于 2.5 m 的目标在此紧缩场内都满足远场条件。另一种是普通远场，需计算远场条件，实际测量中是在同一个实验室直接架设喇叭天线实现，天线至目标距离 5 m < R < 7 m。

模型设计方面，因为验证的目标是腔体散射只与腔体口面场分布有关，与腔体外壁电磁散射无关。因此，设计的模型使其口面尺寸满足远场条件，外壁即长度方向不满足远场条件。在实验室天线至目标距离 5 m < R < 7 m，信号频率 f 范围为 5 ~ 15 GHz，波长 0.02 m < λ < 0.06 m 时，目标尺寸应满足：

$$\frac{2L^2}{\lambda} > R > \frac{2D^2}{\lambda} \tag{9}$$

求得 D < 0.224 m，0.224 m < L < 2.5 m。据此结果，结合实际条件，选择口面尺寸 D = 0.11 m，长

http://bhxb.buaa.edu.cn

度 $L=0.9$ m。按此尺寸,加工了方形腔体实验模型。

3.1　以口面尺寸计算远场条件

为验证以腔体口面尺寸计算远场条件是否合理,在紧缩场和普通远场条件下,对设计的腔体目标进行了频率为 5 GHz 的 RCS 测量。

测量场景如图 12 所示。其中图 12(a)为紧缩场条件下进行测量,腔体口面和长度尺寸均满足远场条件。图 12(b)为普通远场条件下进行测量,腔体口面满足远场条件,而腔体长度不满足远场条件。

2 种条件下的测量结果如图 13 所示。测试点频率为 5 GHz,测试目标区长度为 3 m,将待测目标放置在转台中央,通过计算机控制转台以 0.5°为角度间隔转动 360°(-180°~180°),共 720 个角度位置。

从图 13 可知,在方位角 90°附近,即电磁波照射腔体模型长度最大尺寸时,普通远场 RCS 曲线出现了典型的近场散射特征,与紧缩场测量结果有明显差别。而在 ±60°小角度范围内,普通远场 RCS 曲线与紧缩场测量结果基本一致。而该角度范围内,散射机理以腔体散射为主,验证了腔体目标散射测量应以腔体口面尺寸计算远场条件的判断。



(a) 紧缩场



(b) 普通远场

图 12　不同条件下的实验测量系统

Fig. 12　Experimental measurement system under different conditions

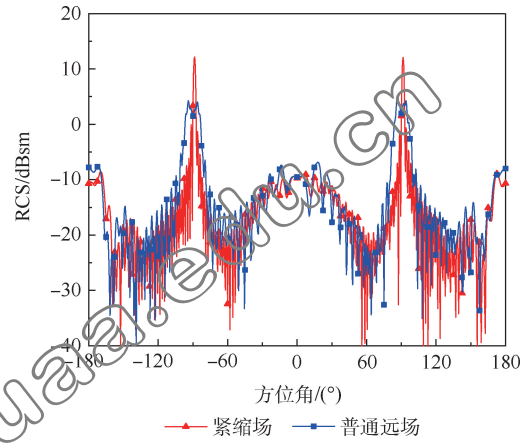


图 13　方形腔体水平极化状态下紧缩场测量与普通远场结果比较

Fig. 13　Comparison of compact field measurement and ordinary far field measurement of square cavity under horizontal polarization state

3.2　满足远场条件情况下测量系统的配置

目前的主流散射测试场以紧缩场为主,在此情况下,只要进气道尺寸不超过紧缩场静区尺寸,则进气道口面和长度都满足远场条件,但这种情况下测量结果不一定能真实反映进气道散射,因为除了远场条件,RCS 测量结果还与测试系统相关。在紧缩场建设时,测试系统一般都与紧缩场静区尺寸匹配,即 2 m 静区的紧缩场,测量系统具备 2 m 或 3 m 目标的测量能力就基本达到要求。但是根据第 1 节对腔体目标散射机理的分析,进气道等腔体类目标的散射机理主要是多次反射。理论推导与仿真验证结果表明,电磁波在腔体内的传播路径可达腔体长度数倍。因此,如果在 2 m静区的测试场中测量长度 2 m 的进气道,而测量系统仅具备 3 m 目标的测量能力,获得的进气道散射结果就可能有较大偏差。

在北京航空航天大学 2.5 m 静区紧缩场中,对方形腔体长度 0.9 m 的腔体进行了频率15 GHz 的散射测量。紧缩场静区远大于目标物理尺寸,满足远场条件。但是在测量系统配置上,分别取 1.5,2,2.5,3 m 目标区进行 RCS 计算,获得的 RCS 曲线如图 14 所示。

从图 14 可知,取 1.5,2,2.5,3 m 目标区进行 RCS 计算获得的结果方位角在 ±60°范围外曲线一致性非常好,这是由于方位角在 ±60°范围外,腔体散射主要由腔体外表面散射为主,不存在多次反射。而在方位角 ±60°范围内,取 1.5,2,2.5,3 m 目标区进行 RCS 计算获得的结果差别非常大,可达 10 dB 以上,但是 1.5 m 目标区也达到了腔体物理尺寸的 1.5 倍,按照一般目标考虑,基本满足测量要求。出现如此大的曲线差别,只能判断是

http://bhxb.buaa.edu.cn

由腔体多次反射引起电磁波传播路径变长造成。

为验证该问题,对腔体目标进行了二维成像诊断,如图 15 所示。其中测量频率范围为 13 ~ 17 GHz,孔径角 16°。

如图 15 所示,方形腔体在方位角为 45°处,其最大散射源位置并不在腔体物理尺寸(图 15 中的红色虚线框处)所在位置,而是出现在腔体几何中心 1.5 m 之后区域,而该位置处并没有实际目标存在,只能是腔体内部多次散射引起。如果测量系统目标区配置不合理,很可能遗漏这一对腔体有重要贡献的散射分量。方形腔体在方位角为 60°处,其最大散射源位置在腔体口面处,这与腔体形状有关。但是在腔体几何中心 1.5 m 之后区域,仍然有很大的散射源存在。这说明,测量方位角在 ±60°范围内,当取 1.5,2,2.5,3 m 目标区对腔体目标进行 RCS 计算,结果会差别非常大。

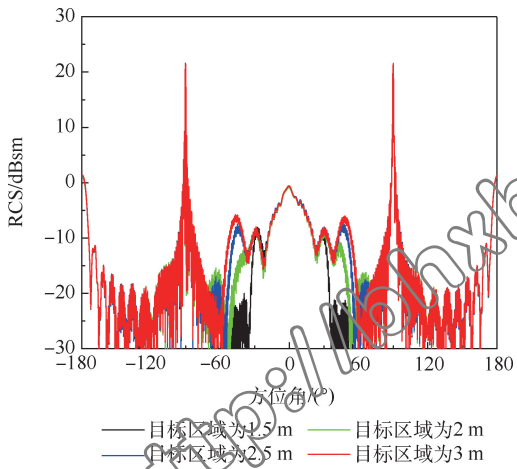


图 14 频率15 GHz 方形腔体水平极化状态下的 RCS 曲线

Fig. 14 RCS curves of 15 GHz square cavity in horizontal polarization state

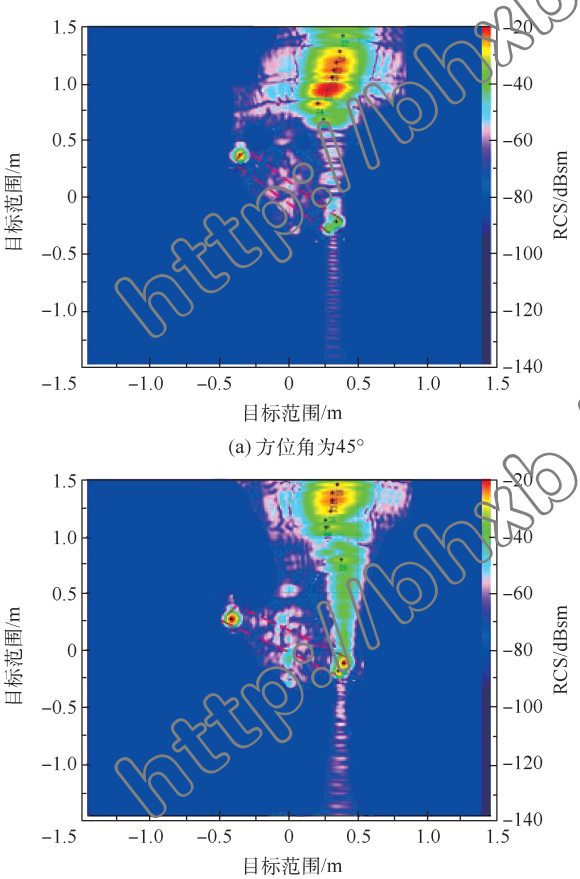


图 15 方形腔体水平极化状态下不同方位角的二维成像

Fig. 15 Two-dimensional imaging of square cavity with horizontal polarization at different azimuth angles

图 15 的实验结果说明,即使在进气道口面和长度都满足远场条件的情况下,RCS 测量结果也未必能真实反映进气道的散射。除了满足远场条件,测量腔体类目标散射时,测试系统还需根据腔体尺寸进行合理配置,根据仿真计算,测试系统应具备 2 ~ 5 倍腔体径向长度的测量能力。

4 结 论

本文以方形腔体为例进行分析,研究方法基于电磁场基本规律,圆形腔体、S 弯进气道等其他腔体同样遵循这些规律,只是其他腔体的求解更为复杂,由方形腔体分析得到的测量要求也适用于其他腔体。对于进气道等腔体类目标 RCS 测量,其基本结论如下:

1) 腔体类目标散射测量用腔体口面尺寸计算远场条件,而不用尺寸更大的径向长度。即长度 5 m,口面尺寸 1 m 的进气道,可以在静区尺寸 1 ~ 2 m 的紧缩场中测量,前提是保证旋转过程中进气道口面在静区范围内。

2) 在进气道口面和长度都满足远场条件的情况下,RCS 测量结果也未必能真实反映进气道的散射,即在腔体实际物理尺寸之后仍然存在较强散射源。

3) 除了满足口面远场条件,测量腔体类目标散射时,测试系统应具备 2 ~ 5 倍腔体长度的测量能力。即长度 5 m,口面尺寸 1 m 的进气道,在 5 m静区紧缩场中未必能获得准确测量结果,测量系统至少要具备测量大于 10 m 尺寸目标的能力。

参考文献(References)

[1] SCHALKWYK R, SMIT J. Dynamic radar cross section measurements of a full-scale aircraft for RCS modelling validation [C]// International Conference on Radar Systems, 2017: 1-6.

[2] 郭华昌. 复杂终端腔体电磁散射的 SBR 与 FDTD 混合方法研究[D]. 西安:西北工业大学, 2007: 2-3.

http://bhxb.buaa.edu.cn

GUO H C. Research on hybrid method of SBR and FDTD for electromagnetic scattering from complex terminal cavities[D]. Xi'an:Northwestern Polytechnic University,2007:2-3(in Chinese).

[3] 袁云. 喷气式飞机发动机进气道的电磁散射研究及 RCS 计算[D]. 西安:西北工业大学,2001:21-22.
YUAN Y. Electromagnetic scattering study and RCS calculation of jet engine inlet tract[D]. Xi'an:Northwestern Polytechnic University,2001:21-22(in Chinese).

[4] 张乐,周洲,许晓平,等. 飞翼无人机 3 种保形进气口进气道气动与隐身综合特性对比[J]. 航空动力学报,2015,30(7):123-132.
ZHANG L,ZHOU Z,XU X P,et al. Comparison of integrated aerodynamic and stealth characteristics of three types of conformal inlet intakes for flying wing UAVs[J]. Journal of Aerospace Power,2015,30(7):123-132(in Chinese).

[5] 蒋应富,李建周,许家栋,等. 新型通用进气道类复杂腔体结构电磁散射计算方法[J]. 航空学报,2009,30(9):1740-1744.
JIANG Y F,LI J Z,XU J D,et al. A new method for calculating electromagnetic scattering from complex cavity structures in general purpose air intakes[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2009,30(9):1740-1744(in Chinese).

[6] 胡列豪. 电大尺寸复杂终端涂层腔体的电磁散射研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2007:1-2.
HU L H. Electromagnetic scattering study of electric large size complex terminal coated cavities[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2007:1-2(in Chinese).

[7] 汪连栋. 几何光学法用于飞机进气道 RCS 的计算[J]. 火力与指挥控制,1992,17(2):60-68.
WANG L D. Geometric optical method for the calculation of aircraft inlet RCS[J]. Fire Control & Command Control,1992,17(2):60-68(in Chinese).

[8] 刘万明,阮颖铮,周海京. 腔体结构电磁散射分析新方法[J]. 电子学报,1998,26(9):100-102.
LIU W M,RUAN Y Z,ZHOU H J. A new method for electromagnetic scattering analysis of cavity structures[J]. Acta Electronica Sinica,1998,26(9):100-102(in Chinese).

[9] 赵云青,秦会斌,毛祥根. 复杂目标雷达散射截面的计算研究[J]. 杭州电子科技大学学报,2007,27(5):59-62.
ZHAO Y Q,QIN H B,MAO X G. Computational study of radar scattering cross section for complex targets[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University,2007,27(5):59-62(in Chinese).

[10] UMUL Y Z. Physical optics scattering of waves by a half-plane with different face impedances[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2011,10(1):21-24.

[11] SAEEDFAR A,BARKESHLI K. Shape reconstruction of three-dimensional conducting curved plates using physical optics,NURBS modeling,and genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2006,54(9):2497-2507.

[12] 丁卫平,徐金平. 带有腔体或槽缝的电大尺寸目标电磁散射特性分析[J]. 电子学报,2002,30(6):40-43.
DING W P,XU J P. Analysis of electromagnetic scattering characteristics of electrical large size targets with cavities or slot slits[J]. Acta Electronica Sinica,2002,30(6):40-43(in Chinese).

[13] 张鹏飞. 电大尺寸开口腔体 RCS 的 SBR 并行计算[J]. 空间电子技术,2008(2):66-69.
ZHANG P F. SBR parallel computation for RCS of electric large-size open cavities[J]. Space Electronic Technology,2008(2):66-69(in Chinese).

[14] 袁晶,华根瑞,张生春. 基于 SBR 方法的矩形腔体散射特性分析[J]. 电子元器件应用,2012(11):77-79.
YUAN J,HUA G R,ZHANG S C. Analysis of scattering characteristics of rectangular cavities based on SBR method[J]. Electronic Component & Device Applications,2012(11):77-79(in Chinese).

[15] 周至伟. 开口腔体电磁散射的 GRE 法计算[J]. 北京理工大学学报,1997,17(6):671-675.
ZHOU J W. Calculation of GRE method for electromagnetic scattering from open cavities[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,1997,17(6):671-675(in Chinese).

[16] 高飞,马凤国,张红霞,等. 利用复射线法分析腔体的散射场[J]. 电波科学学报,2000,15(2):244-247.
GAO F,MA F G,ZHANG H X,et al. Analysis of the scattering field of cavities using the complex ray method[J]. Chinese Journal of Radio Science,2000,15(2):244-247(in Chinese).

[17] 汪中德,汪茂光. 开口腔体的雷达散射截面计算方法[J]. 电波科学学报,1994,9(4):45-51.
WANG Z D,WANG M G. A method for calculating radar scattering cross section of open cavities[J]. Chinese Journal of Radio Science,1994,9(4):45-51(in Chinese).

[18] 周希朗. 电磁场理论与微波技术基础[M]. 2 版. 南京:东南大学出版社,2010:172-180,458-463.
ZHOU X L. Fundamentals of electromagnetic field theory and microwave technology[M]. 2nd ed. Nanjing:Southeast University Press,2010:172-180,458-463(in Chinese).

[19] 陈元植. 静电平衡原理与空腔导体内外两侧场强的独立性[J]. 大学物理,1987,1(4):11-13.
CHEN Y Z. The principle of electrostatic equilibrium and the independence of the field strengths on the inner and outer sides of a cavity conductor[J]. College Physics,1987,1(4):11-13(in Chinese).

http://bhxb.buaa.edu.cn

Scattering characteristics and measurement method of a square cavity

ZHAO Jingcheng*, LOU Changyu, LI Jiabi, YANG Zongkai

(College of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Radar cross section (RCS) is an important index to evaluate the stealth performance of aircraft. As the inlet has a great contribution to the RCS of aircraft, it is significant to the study of the scattering of aircraft inlet. Compared with the common convex surface target, the inlet belongs to the cavity, so the far-field condition calculation and measurement system configuration should be adjusted according to its own unique scattering mechanism. Based on the theory of the relationship between rectangular waveguide and far field, the scattering law of cavity type targets such as inlet is analyzed. Taking a square cavity as an example, the quantitative echo analysis is carried out by using geometrical optics method, and the correctness of the theoretical derivation is verified by FEKO simulation. The RCS of the cavity target is measured in the compact field and the far field. The results of numerical calculation and experimental measurement show that when measuring the scattering of cavity like targets such as inlet, the test field only needs to ensure that the size of the inlet surface meets the far-field conditions, but the measurement system needs to have the measurement ability of 2 ~ 5 times the length of the inlet.

Keywords: inlet; cavity scattering characteristics; far field condition; numerical calculation; radar cross section; measurement system

http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2021-03-16; **Accepted**: 2021-04-24; **Published online**: 2021-05-07 09:33

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210506.1738.004.html

* **Corresponding author**. E-mail: zjccool@126.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0363

基于云模型的民航监察员队伍能力综合评价

李敬强*, 樊天辰, 周妍汝, 房秋

(中国民航大学 安全科学与工程学院, 天津 300300)

摘 要: 针对民航监察员队伍能力量化评价缺乏全面性的问题,构建了一种综合评价指标体系。基于民航监管相关研究及标准分析,提取监察员队伍能力的1级和2级指标。采用G1-CRITIC法计算监察员队伍能力指标的主客观权重。为消除单一赋权法的片面性,基于博弈论思想将主客观指标进行线性组合并确定其权重占比。引入云模型对构建的指标体系进行实例综合评价。结果表明:所构建的能力综合评价指标体系能较好体现民航监察员队伍的综合能力,指标权重分配较为合理。此外,预测出的监察员队伍能力缺陷和不足,能够有利于提升针对其培训的科学性并激发监察员队伍的监管效能。

关 键 词: 民航监察员队伍; G1-CRITIC法; 博弈论组合赋权; 云模型; 能力评价

中图分类号: X949

文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2022)12-2425-09

民用航空运输是安全风险领域中高度敏感的行业,民航监察员队伍作为保障民航安全的一道防线,肩负着对民航系统各个运行环节规范性、合规性和安全性的监督和审查,其工作具有专业性、系统性、合作性,对民航的高质量发展起到了重要保障作用。新型冠状病毒感染疫情对民航运输业带来了严重冲击,使民航运输规模、发展平衡性、运行安全与防疫安全形势变得更加复杂,这些因素也对民航监察员队伍的工作效能提出了更高要求[1]。此外,监管资源与监管要求之间的矛盾是目前民航安全监管的最大矛盾,精准识别安全隐患是监察队伍能力建设的薄弱环节。当前民航运行的一些环节中还存在着漏洞和隐患,只有先确保民航运输各系统的安全,才能保障整个民航运输的系统安全。民航运行所面临的新挑战不仅对监察员风险感知、预测、防范能力提出了更高要求,而且也要求监察员在开展工作过程中更加注重团队协作,发挥监察队伍的整体效能。因此,开展民航监察员队伍能力评价,建立科学的指标体系、指标权重、评估等级,最终建立专业化、正规化的监察员团队对保障民航安全运行具有重要现实意义。

目前,大多研究都聚焦于监察员个体的能力评价。罗凤娥等[2]提出航空安全监察员的能力主要由职业素养、经验技术、专业知识能力3个部分组成;曾波平等[3]界定了监察员胜任力的类别,并构建了行政执法模型,但还缺乏定量分析;杨三军等[4]认为制度基础、综合体质和专业救援是影响矿山应急救援队伍能力的主要因素,并将权重云和标准云引入能力评估模型中,通过对比,确定优势及劣势指标;Edwards[5]和Offermann[6]等认为团队个人的心智、情绪及认知均会对队伍的最终绩效产生一定的影响;周雪等[7]在铁路运输领域中建立了组合赋权-云评价模型,提出了影响铁路旅客安全的主要因素,并提出风险缓解措施;王薇和黄文斌[8]运用层次分析法对应急志愿服务的综合能力进行评价,并指出了应急管理工

收稿日期: 2022-05-16; **录用日期**: 2022-06-06; **网络出版时间**: 2022-08-12 17:22

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20220812.1412.004.html

基金项目: 国家自然科学基金(U1933122); 民航安全能力建设基金(ASSA2021-51); 中央高校基本科研业务费专项资金(3122019186)

* **通信作者**. E-mail: jqli@cauc.edu.cn

引用格式: 李敬强, 樊天辰, 周妍汝, 等. 基于云模型的民航监察员队伍能力综合评价[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2425-2433. LI J Q, FAN T C, ZHOU Y R, et al. Comprehensive evaluation on capability of civil aviation supervisor team based on cloud model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2425-2433(in Chinese).

作还需完善的方面;曾宏建[9]、马跃如等[10]、梁燕和赵琛徽[11]对不同岗位的队伍能力需求也进行了探讨和研究。综上,现有研究都集中在监察员个人能力的层面,并没有专门针对监察员队伍进行深入和系统化的研究和评价。鉴于监察员的工作内容边界和责任边界尚不清晰,检查内容具有专业性、交叉性等特征。所以,有针对性的构建监察员团队的能力模型及量化方法,将为监管队伍建设提供科学的评估手段。

因此,本文将民航监察员队伍作为研究对象,全面构建团队的综合能力评价体系,确定各因素在体系中的权重占比,并在民航安全监管领域中,引入云模型的理论结构进行应用,结合实例评价监察员队伍的能力,分析确定各个团队的薄弱环节,以期推动队伍的标准化建设和规范化管理。

1 民航监察员队伍能力评价指标体系构建

民航监察员队伍中存在一些能力和管理层面上的问题,如队伍总体缺乏长期规划[12]、一线运行经验较少、队伍内部管理较为混乱、监察负担较大等问题。因此,构建合理性的民航监察员队伍能力评价体系十分重要,而监察员队伍能力评价的最终目的是要提高整个团队的监察效能,发挥各专业集成优势,保障民航运行的安全。同时,队伍能力具有一定的适用性和动态性。因此,所选指标要充分反映整个团队的运作现状,最大程度覆盖团队成员各专业特长。

首先,从人、管、环[13-14]3个方面去提出监察员队伍能力的评价维度。其次,结合可行性、全面性等指标构建原则,基于分析文献[2-14]并梳理监察员相关规章制度[15-16]进行指标的筛选和提取。最后,参照民航监管领域中多位专家的意见,依据目前民航监管的现状和监察工作的特点,最终确定民航监察员队伍能力评价指标体系如图1所示。同时,为方便进行评价和本文的专家打分,对各指标进行了评价标准的含义及说明,如表1所示。

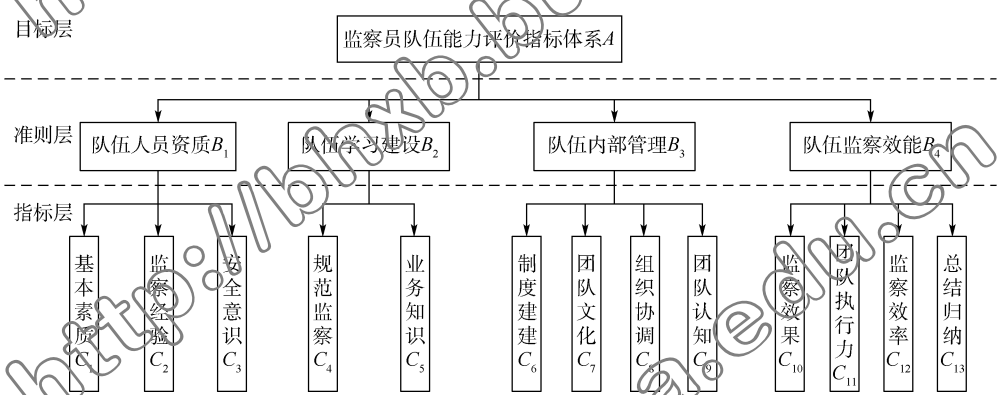


图1 民航监察员队伍能力评价指标体系

Fig. 1 Capability evaluation index system of civil aviation supervisor team

表1 监察员队伍能力评价指标及释义

Table 1 Evaluation index and interpretation of capability of supervisor team

1级指标	2级指标	具体评价标准或含义说明
队伍人员资质	基本素质	团队成员政治思想正确,工作态度端正良好,监察意愿强烈
	监察经验	各成员对监察工作的特点和流程熟悉、掌握相关监察知识、拥有丰富的一线工作经验
	安全意识	在生产活动中,从观念上时刻对安全抱有敬畏之心,时刻警觉生产中存在的安全隐患
队伍学习建设	规范监察	严格按照相关规定进行监察工作,规范监察步骤,避免出现检查遗漏等问题
	业务知识	队伍成员需熟悉掌握所有和监察专业相关的通识、国际标准及民航业务知识等
队伍内部管理	制度建设	依据相关文件手册、规章制度制定团队规章制度,维护团队秩序,保障监察工作的开展
	团队文化	团队的相互合作中,队伍组织者应尽可能统一员工的思想和意志,为保障安全生产努力
	组织协调	团队成员需在生活中相互信任,工作中相互配合,协调好队员之间的关系
	团队认知	存在团队异质性的情况下,能否在有认知冲突时,相互理解,达成一致,做好监察工作
队伍监察效能	监察效果	主要衡量标准为在工作中能否发现企业运行或安全生产中的核心隐患,认真对待工作
	团队执行力	在进行监察工作时,每个成员都有做好监察工作的意愿和完成监察任务的能力
	监察效率	在熟悉检查流程的基础上,高效地完成每次检查任务,并保证检查质量
	总结归纳	每次结束后认真撰写监察报告,并能够周期性的对监察工作进行各方面的总结和归纳

http://bhxb.buaa.edu.cn

2　民航监察员队伍能力评价指标体系组合权重确定

2.1　G1 法主观赋权

G1 法,也称为序关系分析法,是在层次分析法的基础上优化而衍生出的主观赋权法。其原理继承了层次分析法对于指标相对重要性判断的思想[17]。同时,不需要进行一致性检验,具有计算流程简便、速度快等特点。主要步骤如下:

1)邀请专家对评价指标进行重要程度的排序。假设评价指标集 M 为

$$M = (C_1, C_2, C_3, \cdots, C_{j-1}, C_j, \cdots, C_q) \tag{1}$$

邀请民航领域内经验丰富的专家(如各专业高级监察员或局方监察工作长达 8 年以上的监察员)对指标集内的所有指标按照重要性由大到小的顺序进行排列。排列的结果为

$$C_1^* > C_2^* > \cdots > C_{j-1}^* > C_j^* > \cdots > C_q^* \tag{2}$$

2)专家对评价指标集内的所有相邻指标进行重要程度 r_j 的赋值。赋值说明如表 2 所示。

$$r_j = \frac{m_{j-1}}{m_j} \qquad j = 2, 3, \cdots, q \tag{3}$$

式中:r_j 为第 $j-1$ 和第 j 项指标之间的重要程度;m_j 为第 j 项指标的权重。

3)根据专家的赋值情况,计算第 j 项指标 C_j^* 的主观权重,并根据专家对指标的排序情况,计算出所有指标的权重。计算方法为

$$w_j^* = \left(1 + \sum_{j=2}^{j} \prod_{k=j}^{j} r_k\right)^{-1} \tag{4}$$

式中:$w_{j-1}^* = r_j w_j^*$;$i = j, j-1, j-2, \cdots, 3, 2$。

表 2　r_j 赋值说明

Table 2　r_j assignment description

r_j	赋值说明
1	前一个指标和后一个指标一样重要
1.1	介于一样重要和稍重要之间
1.2	前一个指标比后一个指标稍重要
1.3	介于稍重要和较重要之间
1.4	前一个指标比后一个指标较重要
1.5	介于较重要和非常重要之间
1.6	前一个指标比后一个指标非常重要
1.7	介于非常重要和极端重要之间
1.8	前一个指标比后一个指标极端重要

2.2　CRITIC 法客观赋权

CRITIC 法是一种基于指标相关性确定其权重的客观赋权法[18]。其原理是利用指标间的标准差和指标内的相关系数来计算其指标间的差异程度,以此来计算其客观权重,相比与客观赋权法中的熵权法,CRITIC 法更加注重指标间的相关性。主要步骤如下:

1)计算每个评价指标的标准差。评价指标 C_j 的标准差为

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m} (C_j^i - \overline{C}_j)^2}{m-1}} \tag{5}$$

式中:m 为评价方案个数;$\overline{C}_j$ 为其评价指标的均值;C_j^i 为第 i 个方案的指标值。

2)计算 2 个指标之间的相关系数为

$$r_{jp} = \frac{\sum_{i=1}^{m} (C_j^i - \overline{C}_j)(C_p^i - \overline{C}_p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} (C_j^i - \overline{C}_j)^2 (C_p^i - \overline{C}_p)^2}} \tag{6}$$

式中:$\overline{C}_p$ 为评价指标的均值;C_p^i 为第 i 个方案的指标值。

3)计算评价指标 C_j 包含的信息量为

$$G_j = \sigma_j \sum_{p=1}^{n} (1 - r_{jp}) \tag{7}$$

4)对计算结果进行归一化处理,得出评价指标的最终权重为

$$w_{\sigma_j} = \frac{G_j}{\sum_{j=1}^{n} G_j} \tag{8}$$

2.3　博弈论组合权重的确定

为减少主客观赋权中存在的片面性,将 G1 法求得的主观权重 $\boldsymbol{\omega}'$ 和 CRITIC 法确定的客观权重 $\boldsymbol{\omega}''$ 视为博弈的双方,基于博弈论的思想,计算双方之间的最优综合权重 $\boldsymbol{\omega}^*$。主要步骤如下:

1)将主客观权重基于博弈论的思想线性组合,使得组合后的权重和主客观权重离差和最小:

$$\boldsymbol{\omega} = \alpha_1 \boldsymbol{\omega}' + \alpha_2 \boldsymbol{\omega}'' \tag{9}$$

式中:α_1 和 α_2 为线性组合系数。

$$\begin{aligned} \min(\|\boldsymbol{\omega}^* - \boldsymbol{\omega}'\|_2 + \|\boldsymbol{\omega}^* - \boldsymbol{\omega}''\|_2) = \\ \min(\|\alpha_1^* \boldsymbol{\omega}_1 + \alpha_2^* \boldsymbol{\omega}_2 - \boldsymbol{\omega}'\|_2 + \\ \|\alpha_1^* \boldsymbol{\omega}_1 + \alpha_2^* \boldsymbol{\omega}_2 - \boldsymbol{\omega}''\|_2) \end{aligned} \tag{10}$$

式中:α^* 为最优组合系数,$\alpha_1^* + \alpha_2^* = 1$,$\alpha_1^*$、$\alpha_2^* \geqslant 0$。

2)对式(9)和式(10)求一阶导数,可得

$$\begin{cases} \alpha_1 \boldsymbol{\omega}'(\boldsymbol{\omega}')^{\mathrm{T}} + \alpha_2 \boldsymbol{\omega}'(\boldsymbol{\omega}'')^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{\omega}'(\boldsymbol{\omega}')^{\mathrm{T}} \\ \alpha_1 \boldsymbol{\omega}''(\boldsymbol{\omega}')^{\mathrm{T}} + \alpha_2 \boldsymbol{\omega}''(\boldsymbol{\omega}'')^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{\omega}''(\boldsymbol{\omega}'')^{\mathrm{T}} \end{cases} \tag{11}$$

3)根据式(11)求得线性组合系数 α_1 和 α_2。进而计算出最终权重:

$$\boldsymbol{\omega}^* = \alpha_1^* \boldsymbol{\omega}' + \alpha_2^* \boldsymbol{\omega}'' = (\boldsymbol{\omega}_1^*, \boldsymbol{\omega}_2^*, \boldsymbol{\omega}_3^*, \cdots, \boldsymbol{\omega}_m^*) \tag{12}$$

基于 2.1 节和 2.2 节描述的 G1 主观赋权法

http://bhxb.buaa.edu.cn

和 CRITIC 客观赋权法，邀请多位具有专业性、安全监管经验丰富的专家分成 2 组对评价指标进行重要程度的判断，专家自身的专业知识、从业经验及相关任职年限是打分的主要依据，最终结合多位专家的意见，结合式(1)～式(12)，得出所有指标的权重如表 3 所示，权重分布如图 2 所示。

表 3 监察员队伍能力影响因素权重

Table 3 Weight of influencing factors of supervisor team capability

1 级指标	权重			2 级指标	权重		
	G1 法	CRITIC 法	博弈论综合		G1 法	CRITIC 法	博弈论综合
队伍人员资质	0.238 3	0.229 3	0.233 0	基本素质	0.019 7	0.081 4	0.037 4
				监察经验	0.041 4	0.045 4	0.042 5
				安全意识	0.053 8	0.093 3	0.065 2
队伍学习建设	0.158 9	0.387 6	0.292 3	规范监察	0.075 3	0.143 7	0.095 0
				业务知识	0.012 3	0.153 3	0.052 8
队伍内部管理	0.262 1	0.139 4	0.190 5	制度建设	0.006 8	0.037 0	0.015 5
				团队文化	0.004 4	0.051 9	0.018 1
				组织协调	0.120 5	0.073 8	0.107 1
				团队认知	0.144 6	0.022 1	0.109 4
队伍监察效能	0.340 7	0.243 7	0.284 1	监察效果	0.300 7	0.108 0	0.245 3
				团队执行力	0.188 0	0.044 3	0.146 7
				监察效率	0.027 6	0.037 3	0.030 4
				总结归纳	0.004 9	0.108 5	0.034 7

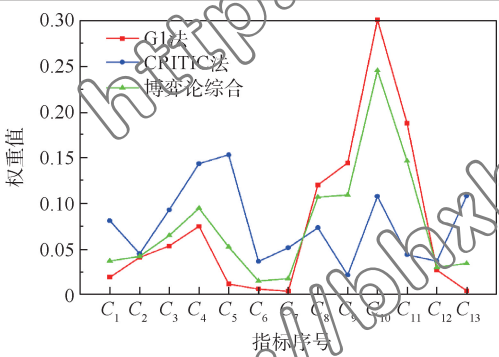


图 2 指标权重分布

Fig. 2 Index weight distribution

3 监察员队伍能力云模型实证评价

3.1 云模型的基本理论及算法

3.1.1 云模型概念

“云模型”的概念是由李德毅等[19]提出，把传统概率论中随机函数的思想与现代模糊数学的思想进行融合，并由此来进行定性概念与定量评价之间的转换。其广泛应用于决策评估、图像处理、语言处理等领域，有评价结果直观、精确等特点。

假设 U 为能用准确数值表示的论域，U 的定性描述为 C。若 x 元素为一个定量数值，且为 C 的一次随机实现，则其隶属度为 $\mu(x)\in[0,1]$，并且其分布式满足：

$$\mu: U\to[0,1], \forall x\in U, x\to\mu(x) \tag{13}$$

式中：x 元素在论域上的分布称为云，每个元素对应 1 个云滴，每个云滴均为定性描述在论域中的体现。云有 3 个数字特征，分别为期望 E_x、熵 E_n 及超熵 H_e。其中，期望 E_x 代表云滴群的信息中心值，是定性概念定量化表示的中心点；熵 E_n 表示对定性概念的取值范围，确定定性概念的不确定度，反映其云滴的离散程度和浮动范围；超熵 H_e 代表云滴的凝聚性和稳定程度，反映云的厚度。上述 3 个数值共同构成云模型的基本数字特征，具体如图 3 所示。

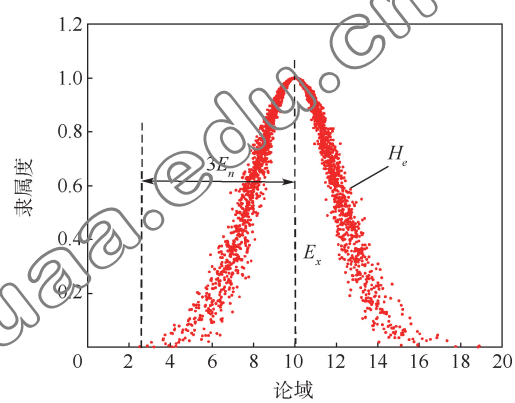


图 3 云评价模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cloud evaluation model

3.1.2 云发生器算法

云模型按照算法分为 2 种，包括正向云发生器和逆向云发生器[20]。正向云发生器能将定性描述转化为定量值算法，主要思想为已知云的3 个数字特征，再计算出其云滴数和相应的隶属度，具体算法如步骤 1～步骤 4，转换流程如图 4 所示。

步骤 1 根据已知条件，生成正态随机数 $E_n'\sim N(E_n, H_e^2)$。

步骤 2 根据已知条件，生成正态随机数 $x\sim N(E_x, E_n'^2)$。

步骤 3 计算隶属度即确定度：

http://bhxb.buaa.edu.cn

$$\mu_i(x) = \exp\left[-\frac{(x-E_x)^2}{2E_n'^2}\right] \tag{14}$$

步骤 4　不断重复步骤 1 ~ 步骤 3，直至生成 n 个云滴数。

逆向云发生器和正向发生器的原理相反，主要思路是将定量数值转化为定性理论，最终生成云团数字特征。具体算法如式(15) ~ 式(17)，转换流程如图 4 所示。

1）计算样本均值：

$$E_x = \bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{15}$$

2）计算方差：

$$S^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x}) \tag{16}$$

3）计算云的 3 个数字特征：

$$\begin{cases} E_x = \bar{x} \\ E_n = \sqrt{\dfrac{\pi}{2}} \cdot \dfrac{1}{n}\displaystyle\sum_{i=1}^{n}|x_i - E_x| \\ H_e = \sqrt{S^2 - E_n^2} \end{cases} \tag{17}$$

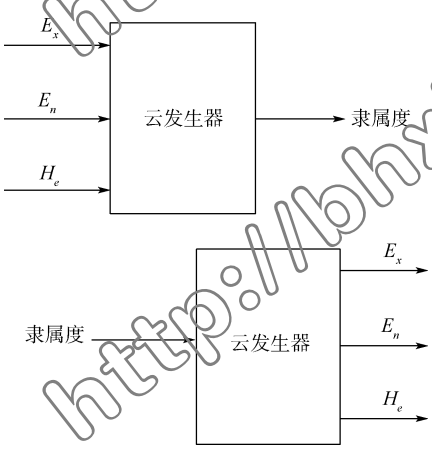


图 4　正、逆向云发生器

Fig. 4　Forward and reverse cloud generator

3.2　云模型实证评价

3.2.1　标 准 云

为使评价结果更加直观，综合考虑专家评语等级划分的习惯，将民航监察员队伍能力等级评语分为差、较差、合格、良好及优秀 5 个不同的等级，分值越高代表综合能力越强，以此来构建标准云。本文采用改进黄金分割法[21]确定 5 个标准云，云的期望、熵、超熵的计算式为

$$\begin{cases} E_{x_0} = \dfrac{x_{\min} - x_{\max}}{2} \\ E_{x+2} = x_{\max} \\ E_{x-2} = x_{\min} \\ E_{x-1} = E_{x_0} - 0.382(E_{x_0} - x_{\min}) \\ E_{x+1} = E_{x_0} + 0.382(x_{\max} - E_{x_0}) \end{cases} \tag{18}$$

$$\begin{cases} E_{n-1} = E_{n+1} = \dfrac{0.382(x_{\max} - x_{\min})}{6} \\ E_{n_0} = 0.618E_{n+1} \\ E_{n-2} = E_{n+2} = \dfrac{E_{n+1}}{0.618} \end{cases} \tag{19}$$

$$\begin{cases} H_{e-1} = H_{e+1} = \dfrac{H_{e_0}}{0.618} \\ H_{e-2} = H_{e+2} = \dfrac{H_{e+1}}{0.618} \end{cases} \tag{20}$$

式中：E_{x_0}、E_{n_0}、H_{e_0} 分别为标准云中间的期望、熵、超熵；E_{x-1}、E_{x-2} 为标准云左侧的期望；E_{x+1}、E_{x+2} 为标准云右侧的期望。

假设论域 $[x_{\min}, x_{\max}]$ 取值为 $[0, 10]$，H_{e_0} 取 0.1。据式(18) ~ 式(20)计算其标准云的具体数值，结果如表 4 所示。结合云发生器生成其标准云，如图 5 所示。

表 4　标准云的数字特征

Table 4　Digital features of standard cloud

评价等级	$(E_{x_0}, E_{n_0}, H_{e_0})$
优秀	(10, 1.030 3, 0.261 8)
良好	(6.91, 0.636 7, 0.161 8)
合格	(5, 0.393 5, 0.1)
较差	(3.09, 0.636 7, 0.161 8)
差	(0, 1.030 3, 0.261 8)

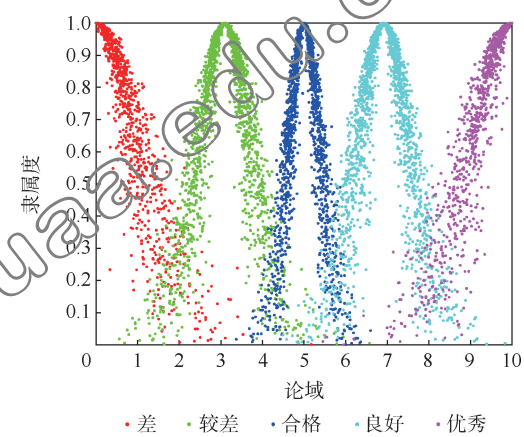


图 5　标准云图

Fig. 5　Standard cloud map

3.2.2　各层级评价云

民航监察员队伍的整体评价流程如图 6 所示。本文评价选取 T 监管局的某个监察队伍，邀请 10 位评价专家结合监察队伍的实际表现情况进行专业评分，为使评价结果更加客观，在进行打分时充分结合该监察队伍上级、同事及部分行政相对人的评价，通过个体调查、查询监察记录及现场讨论等方式进行指标赋分，经计算得出各指标的评价云数字特征如表 5 所示。其中准则层生成

http://bhxb.buaa.edu.cn

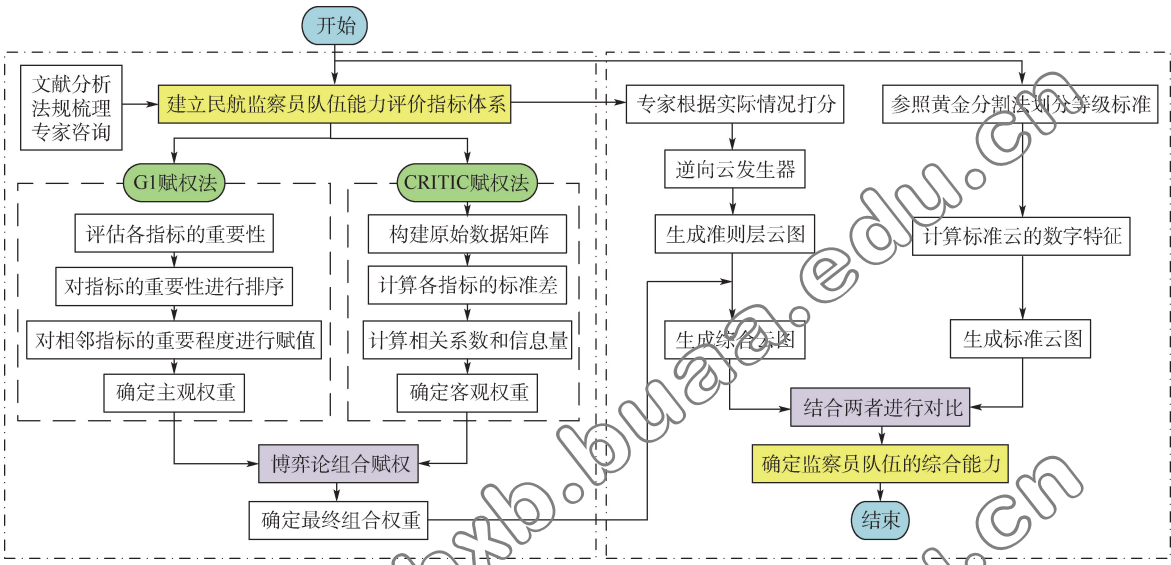


图6 监察员队伍能力评价流程

Fig. 6 Capacity evaluation process of supervisor team

表5 指标层评价云数字特征

Table 5 Digital features of evaluation cloud for index layers

指标层	E_x	E_n	H_e	排序
C_1	8.639 2	0.501 2	0.130 6	4
C_2	9.159 1	0.302 2	0.106 5	1
C_3	8.863 0	0.395 4	0.117 8	2
C_4	6.156 4	0.567 2	0.106 3	13
C_5	6.357 9	0.621 3	0.089 7	12
C_6	7.824 1	0.591 6	0.106 9	6
C_7	6.954 6	0.678 8	0.097 3	11
C_8	7.241 6	0.542 1	0.129 4	9
C_9	7.494 0	0.637 2	0.122 3	8
C_{10}	7.523 6	0.431 7	0.143 6	7
C_{11}	8.293 1	0.371 1	0.172 6	5
C_{12}	7.235 9	0.521 3	0.137 1	10
C_{13}	8.643 7	0.357 6	0.180 1	3

的综合云是根据指标层的数字特征与相应的权重进行加权合成得到，其加权算法如式(21)所示。准则层的具体云数字特征，如表6所示。

$$\begin{cases} E_x = \dfrac{\sum_{j=1}^{n} E_{x_j}\omega_j}{\sum_{j=1}^{n}\omega_j} \\ E_n = \dfrac{\sum_{j=1}^{n} E_{n_j}\omega_j^2}{\sum_{j=1}^{n}\omega_j^2} \\ H_e = \dfrac{\sum_{j=1}^{n} H_{e_j}\omega_j^2}{\sum_{j=1}^{n}\omega_j^2} \end{cases} \tag{21}$$

式中：E_{x_j}、E_{n_j}、H_{e_j}、ω_j 分别为指标层或准则层各指标的期望、熵、超熵、权重。

表6 准则层综合评价云

Table 6 Cloud layer comprehensive evaluation criteria

准则层	E_x	E_n	H_e
B_1	8.892 0	0.392 7	0.117 5
B_2	6.228 4	0.580 0	0.102 4
B_3	7.367 3	0.591 9	0.125 2
B_4	7.836 5	0.416 1	0.151 5

通过表6中的准则层云数字特征，在MATLAB上分别生成评价云与标准云的对比图，判断其监察队伍的综合能力区间，如图7所示。

由准则层的具体云数字特征与各层级的权重再次进行运算，得到目标层 A 即该监察队伍的综合评价为(7.523 0，0.490 5，0.124 2)，并依据该云数字特征的数据生成最终云图，如图8所示。

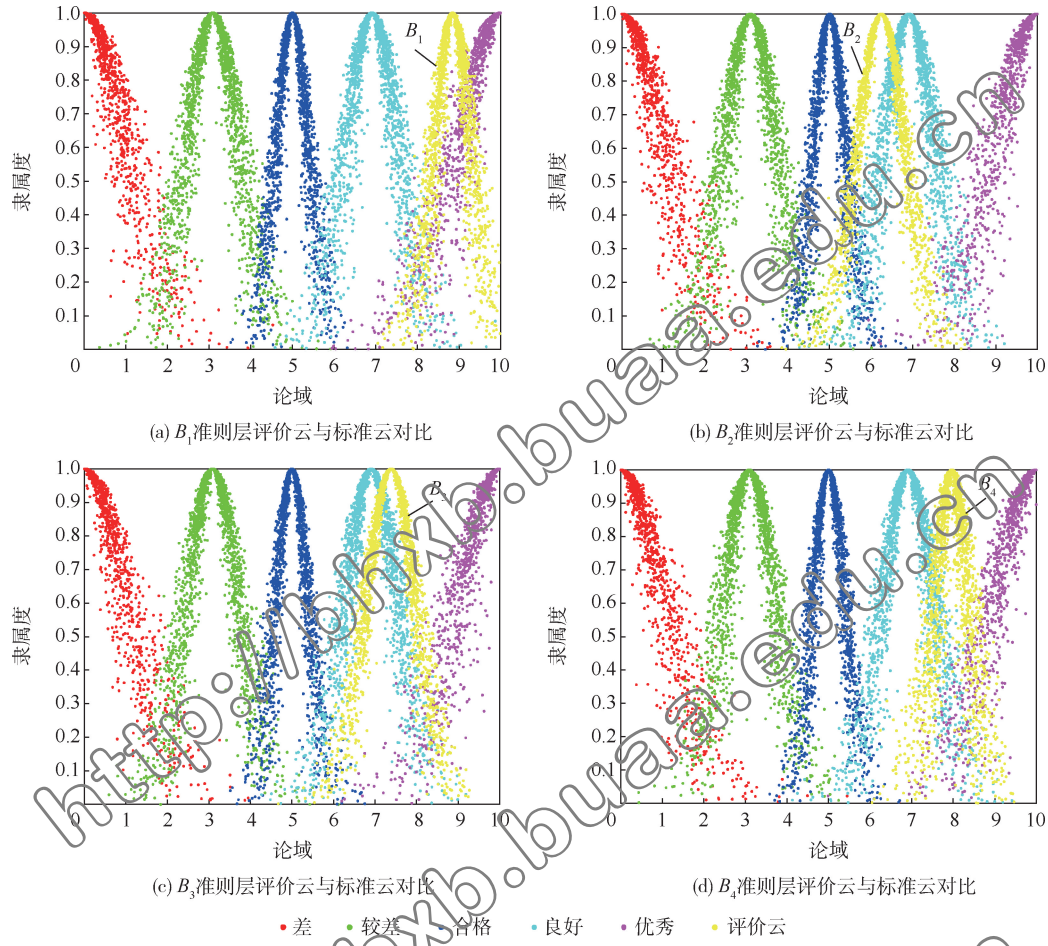
3.3 实例评价结果

首先，从指标层的评价结果来看，指标 C_1 ~ C_3 的期望值水平较高，导致准则层 B_1 期望值也较高，在其余指标中 C_4 的期望值最低，C_{13} 的期望值最高，这也导致准则层 B_2 为水平最低的区间。

其次，从准则层出发，期望值大小依次为 $B_1 > B_4 > B_3 > B_2$。由图7可知，准则层 B_1、B_4 和 B_3 均靠近优秀区域，因此，该监察队伍在人员配备、队伍管理以及监察执行层面的表现较好，但在学习层面上表现相对不佳，存在一定的进步空间，应在日后的监察中加强监察知识的培训和监察流程的规范化，以提高监察效能。

最后，从目标层分析，由图8可知，虽然准则层 B_2 的期望值位于较低水平，但该层级其他的期望值均位于综合能力的良好和优秀之间，导致最终此监察员队伍的综合评价总体升高，期望值为7.523 0，说明该监察员队伍的综合能力较好。而

http://bhxb.buaa.edu.cn



(a) B_1准则层评价云与标准云对比　(b) B_2准则层评价云与标准云对比

(c) B_3准则层评价云与标准云对比　(d) B_4准则层评价云与标准云对比

图 7　各准则层评价云与标准云对比

Fig. 7　Comparison of evaluation cloud and standard cloud of each criterion layer

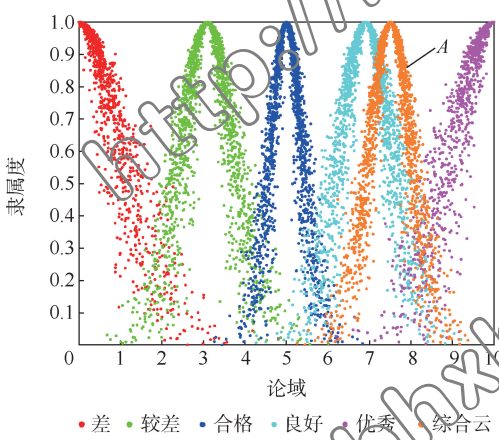


图 8　目标层综合云与标准云对比

Fig. 8　Comparison between target layer comprehensive cloud and standard cloud

在实地调研中，该监管局的此监察队伍在执行日常监察、专项监察及临时性监察任务中的综合表现均较为优秀。同时，为进一步证明模型的有效性，还选取了 5 个其他监管专业的监察员队伍进行能力评价体系的应用，将本文所构建评价体系的评价结果与实际监察员队伍的综合绩效进行对比，选择 4 个准则层的指标进行实地评估。为使其评价结果更加具体直观，先根据百分制的规则对云模型中的期望值进行评价结果的转化，同时，为方便比较其中的差异，再量化出其等级划分的具体评价值，最终进行评价结果的对比。如图 9 所示，其对比结果的差异性很小，说明其构建的评价模型能够较为准确的量化监察员队伍的实际能力，证明了该模型的适用性和有效性。

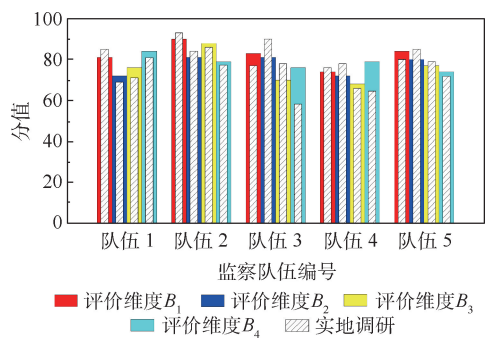


图 9　评价模型对比

Fig. 9　Comparison of evaluation model

4　结　论

1）基于文献研究和监察政策等文件的梳理，结合民航安全监管所面临的新形势及重难点工

http://bhxb.buaa.edu.cn

作,从队伍人员资质、队伍学习建设、队伍内部管理和队伍监察效能4个方面建立民航监察员队伍能力评价体系。

2)运用G1法和CRITIC法确定民航监察员队伍能力指标的主客观权重,并用博弈论的思想理论平衡出其综合权重,识别影响其权重占比较大的因素。

3)引入云模型的理论对构建的评价体系进行实例分析,通过对比标准云与各层级综合云,判断T监管局某监察员队伍整体综合能力的级别和层次,找出队伍能力建设的薄弱环节和提升监管效能的措施,从而有针对性的进行改善和优化。

参考文献(References)

[1] 夏禹. 对新阶段民航监察员队伍建设的认识和思考[J]. 民航管理,2021(9):34-38.
XIA Y. Thoughts on the construction of civil aviation inspectors team in the new stage[J]. Civil Aviation Management, 2021(9):34-38(in Chinese).

[2] 罗凤娥,祖振洲,周广杯,等. OJT视角下基于FAHP的航空安全监察员培训能力评估[J]. 科技和产业,2021,21(5):121-125.
LUO F E,ZU Z Z,ZHOU G B,et al. Composites evaluation of aviation safety inspector training capabilities of based on FAHP from OJT perspective[J]. Science Technology and Industry, 2021,21(5):121-125(in Chinese).

[3] 曾波平,高翔,李建美. 民航监察员行政执法胜任力模型探讨[J]. 现代商贸工业,2016,37(1):95-97.
ZENG B P,GAO X,LI J M. Discussion on administrative law enforcement competency model of civil aviation supervisor[J]. Modern Business Industry,2016,37(1):95-97(in Chinese).

[4] 杨三军,朱新菲,谭波. 基于云模型的矿山应急救援队伍能力评估标准研究[J]. 煤矿安全,2021,52(11):250-255.
YANG S J,ZHU X F,TAN B. Evaluation standard of mine emergency rescue force capability based on cloud model[J]. Safety in Coal Mines,2021,52(11):250-255(in Chinese).

[5] EDWARDS B D,DAY E A,ARTHUR W,et al. Relationships among team ability composition,team mental models,and team performance[J]. Journal of Applied Psychology,2006,91(3):727-736.

[6] OFFERMANN L R,BAILEY J R,VASILOPOULOS N L,et al. The relative contribution of emotional capability and cognitive ability to individual and team performance[J]. Human Performance,2004,17(2):219-243.

[7] 周雪,左忠义,程伟. 基于组合赋权云模型的铁路旅客运输安全评价[J]. 中国安全科学学报,2020,30(S1):158-164.
ZHOU X,ZUO Z Y,CHENG W. Safety evaluation of railway passenger transportation based on combined weighting cloud model[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(S1):158-164(in Chinese).

[8] 王薇,黄文斌. 基于层次分析法的应急志愿服务综合能力评价研究[J]. 科学技术与工程,2020,20(17):6956-6962.
WANG W,HUANG W B. Evaluation index system and empirical study on comprehensive ability of emergency volunteer service[J]. Science Technology and Engineering,2020,20(17):6956-6962(in Chinese).

[9] 曾宏建. "团队异质性"对中学教研团队绩效影响的实证研究[J]. 教育学术月刊,2019(6):86-93.
ZENG H J. An empirical study on the effect of "team heterogeneity" on the performance of teaching and research teams in secondary school[J]. Education Research Monthly,2019(6):86-93(in Chinese).

[10] 马跃如,蒋珊珊,张静. 包容性领导对医疗团队绩效影响的实证研究——基于团队认知的视角[J]. 湖南大学学报(社会科学版),2019,33(1):78-84.
MA Y R,JIANG S S,ZHANG J. An empirical study on the impact of inclusive leadership on medical team performance-A team cognition perspective[J]. Journal of Hunan University(Social Sciences), 2019,33(1):78-84(in Chinese).

[11] 梁燕,赵琛徽. 集体心理所有权影响创业团队绩效的机制研究[J]. 科研管理,2021,42(9):150-156.
LIANG Y,ZHAO C H. A research on the mechanism of collective psychological ownership affecting entrepreneurial team performance[J]. Science Research Management,2021,42(9):150-156(in Chinese).

[12] 袁博. 关于推进民航监察员职业化的思考[J]. 民航管理,2019(9):21-23.
YUAN B. Reflection on promoting civil aviation inspector professionalization[J]. Civil Aviation Management, 2019(9):21-23(in Chinese).

[13] 赵沛宇,郭修琪,许德春,等. 基于网络层次分析法的矿山救护队救援能力评估[J]. 中国煤炭,2019,45(12):66-70.
ZHAO P Y,GUO X Q,XU D C,et al. Evaluation of rescue capability of mine rescue team based on network analytic hierarchy method[J]. China Coal,2019,45(12):66-70(in Chinese).

[14] 郭再富,魏锌,吴轩. 灾害事故专业应急救援队伍能力评价指标体系研究[J]. 中国安全生产科学技术,2021,17(7):136-141.
GUO Z F,JI Z,WU X. Study on the index system of capability evaluation on professional emergency rescue teams of natural disaster and accident[J]. Journal of Safety Science and Technology,2021,17(7):136-141(in Chinese).

[15] 中国民用航空局. 中国民用航空规章 第18部 中国民用航空监察员管理规定:CCAR-18-R4[S]. 北京:中国民用航空局,2020.
Civil Aviation Administration of China. Civil aviation regulations of China. Part 18:Regulations on the administration of civil aviation inspectors in China:CCAR-18-R4[S]. Beijing:Civil Aviation Administration of China,2020(in Chinese).

[16] 中国民用航空局. 中国民用航空规章 第13部 民用航空行政检查工作规则:CCAR-13-R1[S]. 北京:中国民用航空局,2016.
Civil Aviation Administration of China. Civil aviation regulations of China. Part 13:Working rules for civil aviation administrative inspection:CCAR-13-R1[S]. Beijing:Civil Aviation Administration of China,2016(in Chinese).

http://bhxb.buaa.edu.cn

[17] 吴建斌,谷志红,王正,等. 基于博弈变权-云模型的配电网设备精益运维多属性评价[J]. 科学技术与工程,2021,21(27):11615-11623.
WU J B,GU Z H,WANG Z,et al. Multi-attribute evaluation on lean operation and maintenance of distribution network equipment based on game variable weight cloud model[J]. Science Technology and Engineering,2021,21(27):11615-11623(in Chinese).

[18] 万林,章国宝,陶杰. 基于 AHP-CRITIC 的电梯安全性评估[J]. 安全与环境学报,2017,17(5):1696-1700.
WAN L,ZHANG G B,TAO J. On the safety evaluation of the elevator based on AHP-CRITIC criteria[J]. Journal of Safety and Environment,2017,17(5):1696-1700(in Chinese).

[19] 李德毅,孟海军,史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展,1995(6):15-20.
LI D Y,MENG H J,SHI X M. Membership clouds and membership cloud generators[J]. Journal of Computer Research and Development,1995(6):15-20(in Chinese).

[20] 黄克勇,邱鹏. 基于云模型的城轨信号系统安全保障能力评价方法[J]. 中国安全生产科学技术,2021,17(12):129-134.
HUANG K Y,QIU P. Evaluation method on safety assurance capability of urban rail transit signal system based on cloud model[J]. Journal of Safety Science and Technology,2021,17(12):129-134(in Chinese).

[21] 徐选华,吴慧迪. 基于改进云模型的语言偏好信息多属性大群体决策方法[J]. 管理工程学报,2018,32(1):117-125.
XU X H,WU H D. Approach for multi-attribute large group decision-making with linguistic preference information based on improved cloud model[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management,2018,32(1):117-125(in Chinese).

Comprehensive evaluation on capability of civil aviation supervisor team based on cloud model

LI Jingqiang*, FAN Tianchen, ZHOU Yanru, FANG Qiu

(College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Aiming at the lack of comprehensiveness in the quantitative evaluation of the capability of civil aviation supervisors, a comprehensive evaluation index system is proposed. Firstly, the constituent elements of the capability for the supervisor team and the corresponding primary and secondary indicators were extracted based on relevant study research and standard analysis in the civil aviation supervision industry. Then, the G1-CRITIC method was used to calculate the subjective and objective weights for the capability indicators of the supervisor team. To eliminate the one-sidedness of the single-weighting method, the subjective and objective indicators were linearly combined, and their weights were determined with game theory. Finally, the cloud model was employed to comprehensively evaluate the constructed indicator system. The result shows that the evaluation system clearly reflects the comprehensive capability of civil aviation supervisors with reasonable weighting indicators. In addition, the predicted deficiencies of the supervisor team could further support the scientificity of training, and stimulate the regulation efficiency of the supervisor team.

Keywords: civil aviation supervisor team; G1-CRITIC method; combination weighting of game theory; cloud model; capability evaluation

Received: 2022-05-16; **Accepted**: 2022-06-06; **Published online**: 2022-08-12 17:22

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20220812.1412.004.html

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (U1933122); Civil Aviation Security Capacity Building Fund (ASSA2021-51); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (3122019186)

* **Corresponding author**. E-mail: jqli@cauc.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0121

预浸料贮存时间对 MT700/603 复合材料力学性能的影响

王荣*, 于雅琳, 王乐辰, 莫申忠, 黄玉清, 周翔
(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

摘 要: 以碳纤维增强环氧树脂热熔预浸料 MT700/603 为研究对象,开展室温贮存时间与预固化度的关联性分析,研究预浸料预固化度对复合材料成型质量和关键力学性能的影响机制,建立预浸料贮存时间-预固化度-制品性能三者之间的内在联系。结果表明:随着室温贮存时间的延长,60 d 后 603 环氧树脂的最低黏度增加了 4.6 倍,玻璃化转变温度增加了 17.9 ℃,预固化度为 11.2%;MT700/603 预浸料贮存时间小于 30 d 时,制备的复合材料内部质量良好,纤维分布较为均匀,孔隙率较低,树脂的预固化度在 5.3% 以内,孔隙率低于 0.03%;复合材料更倾向依赖于树脂基体破坏的纵向压缩强度和压缩模量对孔隙率的敏感度,要高于倾向依赖于纤维增强体破坏的纵向拉伸强度和拉伸模量;预浸料在室温贮存时树脂预固化度增加,黏度增大,加压时机与树脂黏度变化不匹配是导致复合材料构件关键力学性能下降的根本原因;根据产品的力学性能指标要求,结合不同贮存时间的关键力学性能数据,可反推出预浸料的最长室温贮存时间,实现了预浸料可用性的定量化评估。

关 键 词: 碳纤维增强环氧树脂; 贮存时间; 预固化度; 力学性能; 孔隙
中图分类号: TB332
文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2022)12-2434-08

碳纤维增强树脂基复合材料因为轻质、高强、高模、抗疲劳、耐腐蚀等优异的性质被广泛应用在航空航天领域[1-3]。复合材料通常由纤维和树脂复合的预浸料制备而成。在实际生产中,受转移、运输、储存环境等客观条件的限制或大型复合材料结构件较长的生产周期,预浸料在固化之前往往存在一定的室温贮存期[3-5]。预浸料在室温下长期放置会发生缓慢预固化,在制备碳纤维增强复合材料制件的过程中影响微观组分结构,形成内部缺陷。材料缺陷(如孔隙、裂缝、分层、夹杂物等)会直接影响复合材料的使用性能,尤其是孔隙缺陷,对航天复合材料的力学性能有着重要影响[6-9]。因此,评估预浸料在室温下不同贮存时间后的可使用性具有重要意义。

国内外大量研究围绕着贮存时间、贮存环境对预浸料的理化特性及复合材料成型质量影响展开。沈超[10]发现随着室温贮存时间的延长,3232 树脂黏度增加,凝胶时间缩短。臧千等[11]发现 603 树脂在室温储存 35 d 后,黏度增加了 4.2 倍,预固化度达到 11%。秦永乐等[12]发现预浸料在氧气或空气环境中储存相比于真空或氮气环境更容易导致黏性失效,在复合材料内部引入缺陷。Grunenfelder 等[13]发现预浸料在超过室温储存期后制备的复合材料构件会出现孔隙缺陷。此外,复合材料制造缺陷与力学性能的关联也基本建立。孔隙缺陷的存在会造成复合材料的拉伸、压

收稿日期: 2021-03-16; **录用日期**: 2021-05-07; **网络出版时间**: 2021-05-18 13:27
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210518.0940.001.html
* **通信作者**. E-mail: 2532436356@qq.com

引用格式: *王荣, 于雅琳, 王乐辰, 等. 预浸料贮存时间对 MT700/603 复合材料力学性能的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2434-2441. WANG R, YU Y L, WANG L C, et al. Effects of prepreg ambient-temperature storage life on mechanical properties of MT700/603 composites[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2434-2441 (in Chinese).*

http://bhxb.buaa.edu.cn

缩、弯曲和层间剪切等力学性能出现不同程度地下降[14-17]。Olivier 等[18]报道横向拉伸强度和模量比纵向拉伸强度和模量对孔隙率更加敏感,在纵向拉伸强度下降 12% 时,横向拉伸强度已经下降 30%。Cinquin 等[19]发现孔隙率为 11% 时,压缩强度下降了 14%。Tudd 和 Wright[20]认为在孔隙率小于 4% 时,每增加 1%,层间剪切强度会下降 7% 左右。预浸料长期放置导致的预固化度会影响最终制件的关键力学性能,但关于预浸料贮存时间对复合材料力学性能影响机理的相关研究鲜有开展。大多数预浸料仅仅通过简单给出固定保质期的方式判定可使用与否,无法量化评价不同贮存时间下预浸料的可使用性,从而造成了原材料的大量浪费甚至产品质量的波动性较难控制。

本文以碳纤维增强环氧树脂体系热熔预浸料 MT700/603 为研究对象,基于 603 环氧树脂的固化特性开展室温贮存时间与预固化度的关联性分析,进一步探究预浸料预固化度对复合材料成型质量和关键力学性能的影响机制,建立起 MT700/603 预浸料室温贮存时间-预固化度-制品性能三者之间的内在联系,从制品性能角度系统量化评价 MT700/603 预浸料室温贮存的稳定性,为预浸料可使用性的定量化和标准化评价提供重要的理论依据和技术基础。

1　实验材料与方法

1.1　原材料

MT700 碳纤维,河南永煤碳纤维有限公司研制的 MT700C-6K-N1B-2;耐高温环氧树脂 603,航天材料及工艺研究所自制;MT700/603 预浸料,航天材料及工艺研究所自制。

1.2　复合材料制备

裁剪成 440 mm × 240 mm 尺寸的 MT700/603 预浸料及 603 环氧树脂放置于室温为(20 ± 5) ℃、相对湿度为 20% ~ 34% 的环境中 60 d。分别于第 0,10,20,30,40,50,55,60 d 进行理化性能测试及试样制备。预浸料按照压力为 0.6 MPa,温度先130 ℃/h后 180 ℃/4 h 的固化制度,采用热压罐工艺进行固化,制成复合材料单向板。

1.3　测试仪器及方法

采用美国博勒飞黏度仪公司的 DV2 旋转黏度仪测试树脂黏度,升温速率为 1 ℃/min;通过美国梅特勒-托利多公司的 Mettler Toledo DSC 1 型差示扫描热(differential scanning calorimetry, DSC)分析仪测试树脂的低温玻璃化转变和固化反应热,升温速率为 10 ℃/min;通过美国通用电气 USIP40 超声波探伤仪 C 型扫描成像测试复合材料的内部质量;采用德国赛多利斯公司的 BSA124S-CW 电子天平和德国马尔公司的 16EWR 数显卡尺通过几何法测试复合材料的密度,测试参照 GB/T 1463—2005[21]进行;采用德国 LEICA DM4000M 金相显微镜测试复合材料的孔隙率,测试参照 GB/T 3365—2008[22]进行;通过中国珠海三思泰捷电气设备有限公司的 CMT5205 电子万能试验机测试复合材料的拉伸、压缩、弯曲和层剪性能,测试分别参照 GB/T 3354—2014[23]、GB/T 5258—2008[24]、GB/T 3356—2014[25]、JC/T 773—2010[26]进行。

2　结果与分析

2.1　603 环氧树脂黏度和固化特性分析

603 环氧树脂在不同室温贮存时间下的黏度曲线如图 1 所示。随温度的增加,603 环氧树脂黏度先降低,然后呈现一定平台阶段,随后又迅速增高。随着室温贮存时间的增加,黏度平台的温度范围由 130 ~ 166 ℃逐渐变窄为 140 ~ 150 ℃。初始状态(第 0 d)时,树脂的最低黏度出现在 152 ℃左右,约为 446 mPa · s;到 60 d 后,在更低的温度 147 ℃左右即出现最低黏度,约为 2 490 mPa · s,增加了约 4.6 倍。说明随着室温贮存时间的延长,树脂发生了预固化反应,分子量变大导致黏度增加及黏度平台变窄。此外,黏度平台是 603 环氧树脂体系的工艺窗口,树脂黏度过高、窗口过窄会造成加压时机与树脂黏度变化的不匹配。加压时机过晚,树脂流动性变差,无法对预浸料层间或层内的纤维充分浸润,同时成型过程中气泡和挥发份的排除受阻,容易造成复合材料构件出现气孔、疏松等内部缺陷。对于 603 环氧树脂,室温放置

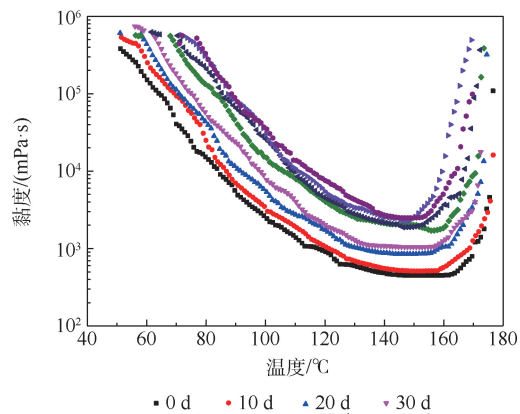


图 1　不同贮存时间下 603 环氧树脂的黏度曲线

Fig. 1　Viscosity vs temperature curves of 603 epoxy resin in different storage periods

http://bhxb.buaa.edu.cn

30 d 内黏度平台和最低黏度变化较小,预浸料制备的复合材料质量风险较小;30 d 后预固化反应变快,黏度变化较大,成型质量风险大幅增加。

采用 DSC 分析仪测试 603 环氧树脂在不同室温贮存时间的玻璃化转变温度和固化反应特性,如图 2 所示。DSC 曲线热流斜率最大点即为未固化 603 环氧树脂的玻璃化转变温度(T_g)。603 环氧树脂的 T_g 随室温贮存时间的变化曲线如图 3 所示。随着贮存时间的延长,603 环氧树脂的 T_g 也由第 0 d 的 -5.3 ℃逐渐增加到第 60 d 的 12.6 ℃,累计增加了 17.9 ℃。文献[27]研究表明,T_g =0 ℃时环氧树脂预浸料的操作工艺性最佳[27],在本节出现在贮存时间 21 d 左右。从图 3 也可看出,30 d 后 T_g 变化速率增大,表明预固化反应加剧,此结果也与黏度变化呈现对应关系。

在检测的 60 d 储存期内,603 环氧树脂的反应峰值温度(T_p)均在 275.5 ~ 277.5 ℃之间。结果表明,室温贮存 0 ~ 60 d 内,树脂固化反应放热温度并无较大波动。

取 DSC 曲线热流 q 的积分面积即为环氧树脂的放热量:

$$\Delta H = \iint \mathrm{d}q\mathrm{d}T \tag{1}$$

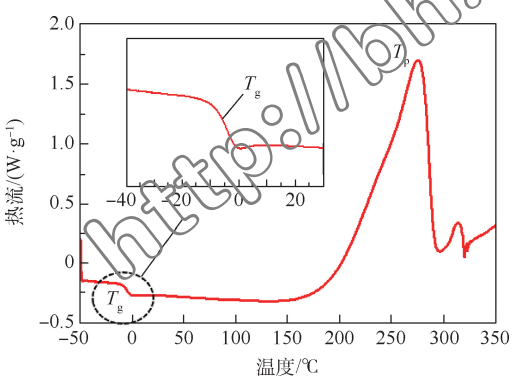


图 2 603 环氧树脂的 DSC 曲线

Fig. 2 DSC curve of 603 expoxy resin

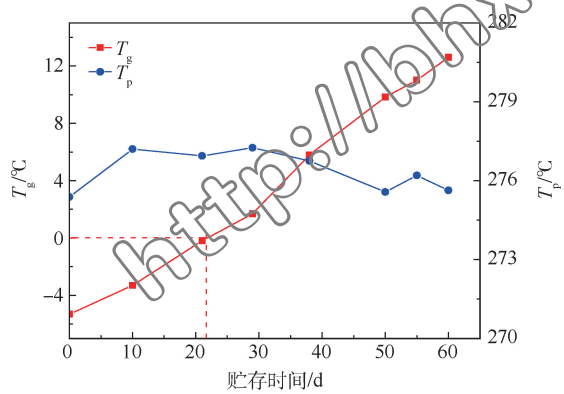


图 3 不同贮存时间下 603 环氧树脂的 T_g 和 T_p 变化曲线

Fig. 3 T_g and T_p curves of 603 epoxy resin in different storage periods

不同贮存时间下环氧树脂固化反应的放热量(ΔH)相比于初始态固化反应放热量(ΔH_0)的减小值即为树脂的预固化度:

$$\alpha = 1 - \frac{\Delta H}{\Delta H_0} \tag{2}$$

如图 3 所示,随着贮存时间的延长,603 环氧树脂的预固化度逐渐增加,当室温贮存 30 d 时预固化度约为 5.3%;室温贮存 60 d 时,预固化度达到 11.2% 左右。参考文献[28]中利用 Kamal 模型和 Kissinger 方法得到的 603 环氧树脂的固化动力学模型如下:

$$\frac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}t} = 0.7\frac{\mathrm{d}\alpha_1}{\mathrm{d}t} + 0.3\frac{\mathrm{d}\alpha_2}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

$$\frac{\mathrm{d}\alpha_1}{\mathrm{d}t} = 9.563 \times 10^4 \mathrm{e}^{\frac{8\,483.097}{T}} \alpha^{0.325}(1-\alpha)^{1.669} \tag{4}$$

$$\frac{\mathrm{d}\alpha_2}{\mathrm{d}t} = 3.438 \times 10^7 \mathrm{e}^{\frac{11\,690.237}{T}} \alpha^{0.589}(1-\alpha)^{1.091} \tag{5}$$

式中:α_1 和 α_2 分别为图 2 中峰 1 和峰 2 的预固化度;α 为总固化度;t 为贮存时间;T 为温度。

利用式(3)~式(5)固化动力学方程,建立 603 环氧树脂体系在室温 25 ℃条件下贮存时间与预固化度之间的关系。如图 4 所示,随着贮存时间的延长,预固化度逐渐变大。贮存 30 d 时预固化度约为 4.3%;贮存 60 d 时,预固化度约为 7.0%。虽然实验值与模型数值有一定偏差,但是树脂的预固化度随着贮存时间变长均表现出增大的趋势。

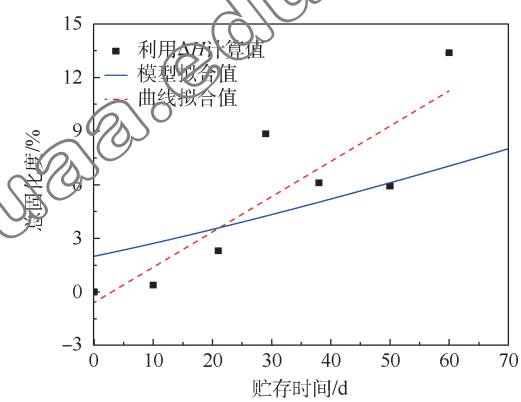


图 4 不同贮存时间下 603 环氧树脂预固化度的实验值、模型值和实验拟合值变化曲线

Fig. 4 Three kinds of pre-curing degree value (experimental, model and fitting data) of 603 epoxy resin in different storage periods

2.2 室温贮存时间对复合材料单向板成型质量的影响

通过 C 型超声波探测不同室温贮存时间下 MT700/603 预浸料成型的复合材料单向板的扫描图像如图 5 所示。考虑到该材料具有复杂的界面,故采用透射法直观探测其分层、气孔等缺陷。

http://bhxb.buaa.edu.cn

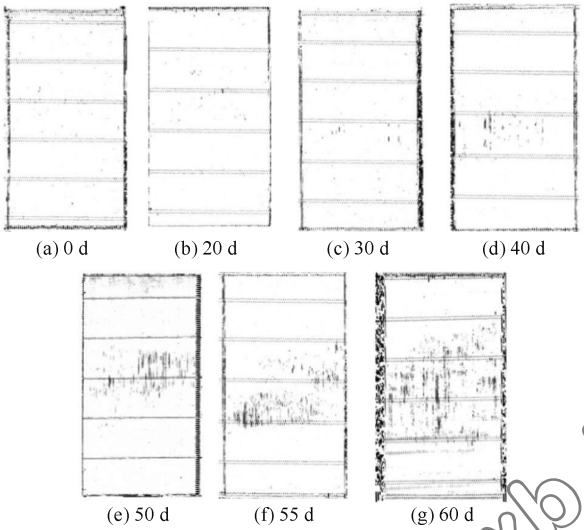


图 5　不同贮存时间下 MT700/603 预浸料复合材料的超声波 C 型扫描图像

Fig. 5　Ultrasonic C-scan images of composites prepared by MT700/603 prepreg in different storage periods

可以发现,随着贮存时间的延长,单向板的内部成型质量逐渐变差,30 d 之前透射的超声波没有明显的衰减现象,扫描图像颜色分布均匀,单向板完整度较高,没有显著缺陷。但是 30 d 之后单向板无损检测超声波的衰减程度越来越大,扫描图像中杂色越来越明显,说明产品缺陷越来越严重。

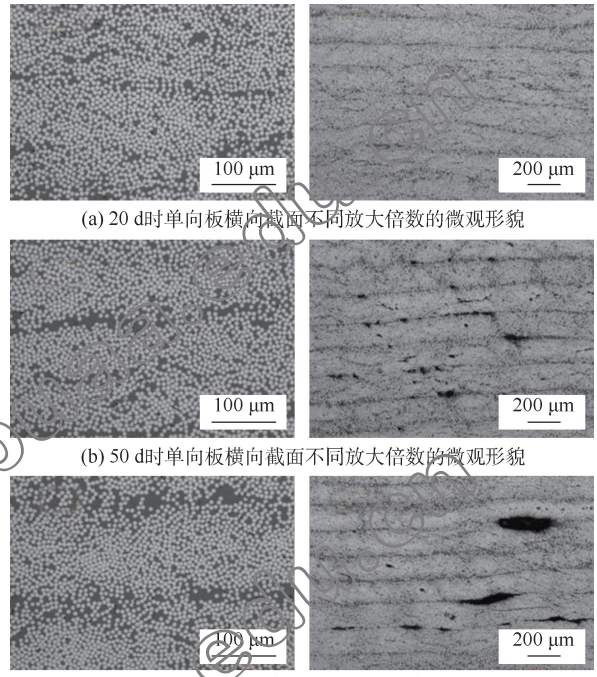
为了深入探究单向板的缺陷形式和特征,分别选取完整度较高的贮存时间为 20 d 和有明显缺陷的贮存时间为 50 d 和 55 d 的 3 类单向板,采用光学显微镜分别观察单向板横向截面不同放大倍数的微观形貌,如图 6 所示,预浸料室温贮存 20 d 时,单向板横向截面显示纤维分布整体较为均匀,预浸料层间紧密贴合,层内和层间没有明显缺陷。预浸料室温贮存 50 d 时,在单向板的局部层内和层间均检测到密集型孔隙,纤维在层内分布密实,层间分布稀疏;贮存 55 d 后,在单向板的局部层间检测到尺寸更大的孔隙,纤维在层内的分布密度明显大于层间分布密度。

图 7 为 MT700/603 预浸料在不同室温贮存时间下成型的单向板的孔隙率变化曲线。可以看出,贮存时间变长,单向板的孔隙率逐渐增大,前 20 d 未检出孔隙;第 30 d 孔隙率变为 0.03%,之后迅速增加到第 60 d 的 0.2%。经过数值拟合,单向板孔隙率随着预浸料贮存时间的变化关系近似符合以下函数:

$$V = 0.001\,61\mathrm{e}^{\frac{t}{12.426\,7}} - 0.001\,61 \qquad (6)$$

式中:V 为孔隙率,%;t 为贮存时间,d。

预浸料的贮存时间不会影响复合材料成型时的固化温度和时间,但是会影响加压时机。在相



(a) 20 d时单向板横向截面不同放大倍数的微观形貌

(b) 50 d时单向板横向截面不同放大倍数的微观形貌

(c) 55 d时单向板横向截面不同放大倍数的微观形貌

图 6　贮存时间为 20,50,55 d 的 MT700/603 预浸料复合材料横向截面的光学显微镜照片

Fig. 6　Light microscopy section images of composites prepared by MT700/603 prepreg on the 20th, 50th and 55th day

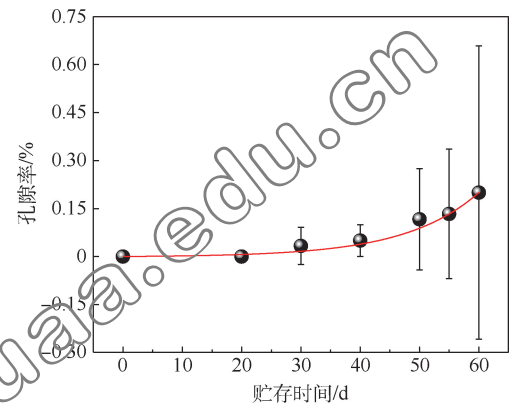


图 7　不同贮存时间下 MT700/603 预浸料复合材料的孔隙率变化曲线

Fig. 7　Void volume fraction of composites prepared by MT700/603 prepreg in different storage periods

同加压条件下,树脂预固化度的增加,导致其黏度增加,流动性变差,预浸料层内或层间的气泡排出受到阻碍,因此,得到的复合材料单向板的孔隙缺陷逐渐增多,孔隙率逐渐变大。

此外,随着预浸料贮存时间的延长,单向板的纤维体积含量逐渐下降,从初始状态的 62.8% 降为第 60 d 的 61.5%;厚度从第 0 d 的 2.15 mm 逐渐增加到第 50 d 的 2.28 mm,50 d 后趋于不变;密度从第 0 d 的 1.56 g/cm^3 逐渐下降到 30 d 的 1.51 g/cm^3,之后趋于不变,如图 8 所示。这是由于随着预浸料贮存时间的延长,树脂的预固化度

http://bhxb.buaa.edu.cn

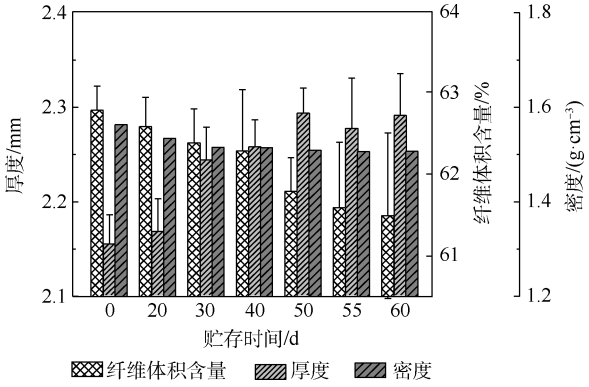


图 8 不同贮存时间下 MT700/603 预浸料复合材料的纤维体积含量、厚度和密度变化

Fig. 8 Fiber volume fraction, thickness and density of composites prepared by MT700/603 prepreg in different storage periods

逐渐变大,黏性逐渐增加,流动性逐渐变差。相同的成型工艺下复合材料出胶量变少,树脂含量增多,纤维体积分数逐渐下降,同时也导致单向板的厚度逐渐增加,密度出现下降的趋势。

2.3 室温贮存时间对复合材料单向板力学性能的影响

不同贮存时间下 MT700/603 预浸料复合材料单向板的拉伸、压缩、弯曲和层间剪切等力学性能如图 9 ~ 图 12 所示。实验表明,随着预浸料室温贮存时间的延长,纤维增强复合材料的纵向拉伸强度和模量,纵向压缩强度和模量,纵向弯曲强度和模量及层间剪切强度等性能都出现了不同程度地下降。在预浸料室温贮存 60 d 的检测期内,复合材料单向板的纵向拉伸强度逐渐降低,从初始状态的 2 270 MPa 逐渐降低到第 60 d 的 2 030 MPa,下降了 10.6%;纵向拉伸模量变化不大,在 139 ~ 137 GPa 范围内波动。单向板的纵向压缩强度变化趋势与孔隙率类似,先从初始态的

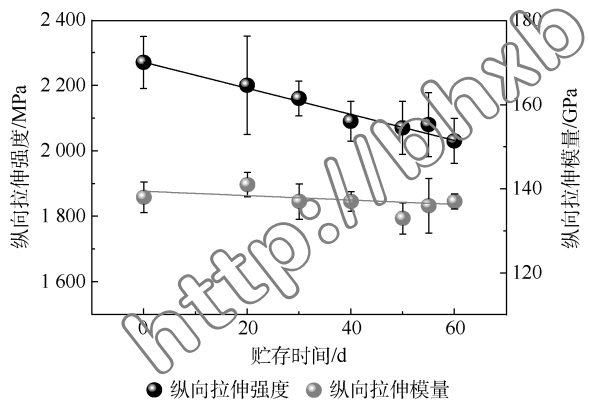


图 9 不同贮存时间下 MT700/603 预浸料复合材料的纵向拉伸强度和模量变化曲线

Fig. 9 Longitudinal tensile strength and modulus of composites prepared by MT700/603 prepreg in different storage periods

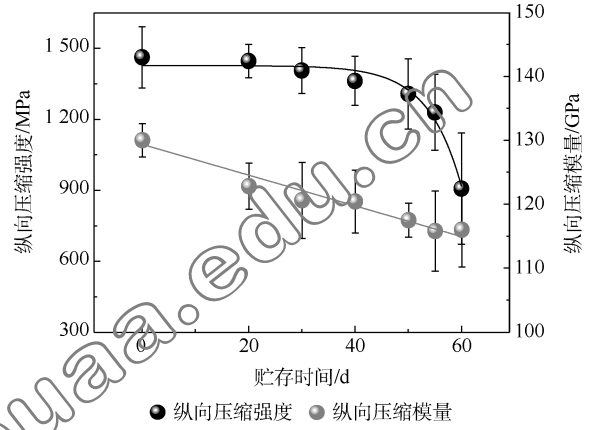


图 10 不同贮存时间下 MT700/603 预浸料复合材料的纵向压缩强度和模量变化曲线

Fig. 10 Longitudinal compression strength and modulus of composites prepared by MT700/603 prepreg in different storage periods

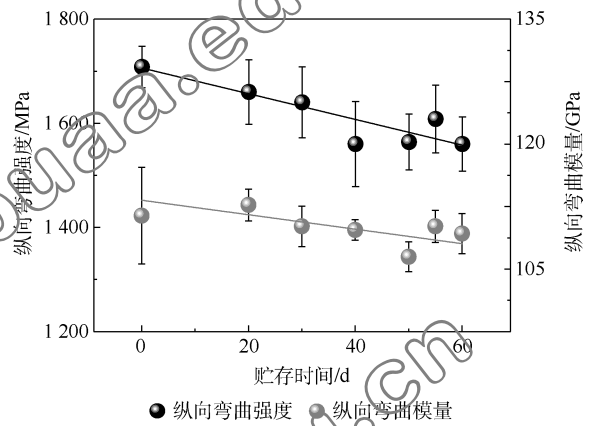


图 11 不同贮存时间下 MT700/603 预浸料复合材料的纵向弯曲强度和模量变化曲线

Fig. 11 Longitudinal flexural strength and modulus of composites prepared by MT700/603 prepreg in different storage periods

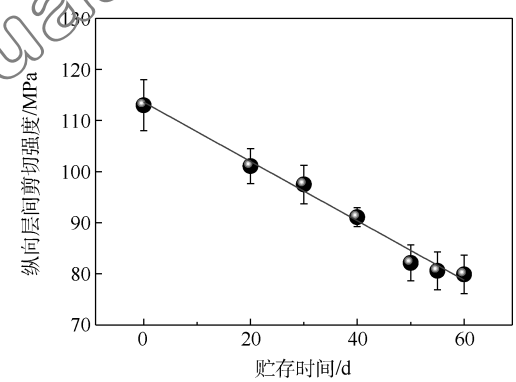


图 12 不同贮存时间下 MT700/603 预浸料复合材料的纵向层间剪切强度变化曲线

Fig. 12 Longitudinal interlaminar shear strength of composites prepared by MT700/603 prepreg in different storage periods

1 462 MPa 缓慢降低到 30 d 的 1 423 MPa,然后迅速下降到第 60 d 的 907 MPa,共降低了 38.0%;纵向压缩模量从初始态的 130 GPa 逐渐降低到第

http://bhxb.buaa.edu.cn

60 d 的 116 GPa,下降了 10.8%。单向板的纵向弯曲强度随着贮存时间的变长也逐渐降低,从初始态的 1 708 MPa 降低到第 60 d 的 1 560 MPa,下降了 8.7%;纵向弯曲模量从最初状态的 114.7 GPa 逐渐降低到第 60 d 的 111 GPa,下降了 3.2%。单向板的纵向层剪强度从初始态的 113 MPa 逐渐降低到第 60 d 的 79.9 MPa,下降了 29.3%。可以发现,相比于拉伸性能和弯曲性能,预浸料室温贮存时间对复合材料单向板的压缩性能和层间剪切性能的影响更为显著。

预浸料贮存时间对复合材料力学性能影响的根本原因是预浸料预固化度的变化。预浸料贮存时间延长,树脂的预固化度逐渐增加,黏度变大、工艺窗口过窄,导致加压时机与树脂黏度变化的不匹配。相同的成型工艺下,树脂流动性变差,不能将纤维充分浸润,同时预浸料层内或层间的气泡排出受阻,导致复合材料单向板厚度增加,树脂含量增大,且内部出现孔隙缺陷。此外,预固化度的增加,导致预浸料变硬发干,铺覆工艺性变差,预浸料之间无法紧密贴合,进一步导致复合材料内部孔隙率的增加。在室温贮存的前 20 d 内,虽然没有检测到孔隙的出现,但是单向板厚度增加,纤维体积含量下降,从而导致其拉伸、压缩、弯曲和剪切性能的下降。贮存时间超过 20 d 后,孔隙率先缓慢增加到 30 d 的 0.03%,之后迅速增大到第 60 d 的 0.2%,孔隙缺陷是导致单向板力学性能下降的直接原因。拉伸破坏是损伤渐进过程,孔隙的存在使得局部纤维发生弯曲变形,影响了破坏过程的载荷传递,因此,拉伸强度随着孔隙率的增加逐渐下降;但是固化后纤维体积含量依旧很高(>61%),纵向拉伸模量变化不大。相比于纵向拉伸强度,纵向压缩强度对孔隙率更加敏感,因为压缩破坏是更倾向依赖于树脂基体的破坏,而拉伸破坏是更倾向依赖于纤维增强体的破坏,孔隙缺陷使得局部纤维发生弯曲变形,挤占了树脂的体积含量,造成单向板内部基体含量下降,更容易发生失效破坏,因此,压缩强度在预浸料室温贮存时间大于 30 d 孔隙率迅速增加时也表现出迅速下降的趋势;另一方面,孔隙的存在使得复合材料的有效承载面积降低,压缩模量也呈现逐渐下降的趋势。此外,孔隙在层间剪切试验的失效载荷-位移行为方面起关键作用,孔隙使层间区域的有效承载面积减小,破坏过程的载荷传递效率受到影响,从而降低了复合材料层压板的层间剪切强度。弯曲破坏是依赖于树脂基体、纤维增强体和两者界面等更加复杂的破坏形式,载荷传递效率也受到孔隙缺陷引起的局部纤维弯曲变形的影响,因此弯曲强度和弯曲模量的下降程度介于拉伸性能、压缩性能和层间剪切性能之间。综合考虑复合材料的力学性能,预浸料的室温贮存时间不宜超过 30 d,此时树脂的预固化度为 5.3%,复合材料的孔隙率为 0.03%。

对于同样采用 MT700/603 预浸料的复合材料构件,根据设计的力学性能指标要求,结合图 9 ~ 图 12 不同贮存时间下复合材料的关键力学性能数据,可以反推出 MT700/603 预浸料室温可承受的最长贮存时间,从而节约原材料,降低生产成本。提供一种从复合材料产品性能角度系统量化评价 MT700/603 预浸料室温贮存稳定性的方法,而且这种方法有望进一步推广到其他类型预浸料可使用性的定量化和标准化评价中。

3　结　论

1) 603 环氧树脂在室温贮存 30 d 后,树脂的最低黏度增加了 1.4 倍,T_g 增加了 7.0 ℃,预固化度变为 5.3%;室温贮存 60 d 后,最低黏度相比于初始态增加了 4.6 倍,T_g 增加了 17.9 ℃,预固化度变为 11.2%。

2) MT700/603 预浸料室温贮存时间在 30 d 以内时,复合材料内部质量良好、纤维分布较为均匀,孔隙率较低,为 0.03%。

3) 孔隙缺陷导致复合材料的拉伸、压缩、弯曲、剪切等力学性能均出现不同程度的下降,更倾向依赖于树脂基体破坏的纵向压缩强度和压缩模量对孔隙率的敏感性要高于更倾向依赖于纤维增强体破坏的纵向拉伸强度和拉伸模量。

4) 随着室温贮存时间的延长,603 环氧树脂预固化度逐渐增大,黏度逐渐增加,成型过程中加压时机与树脂黏度变化不匹配是导致复合材料构件关键力学性能下降的根本原因。

参考文献 (References)

[1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007,24(1):1-12.
DU S Y. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1):1-12 (in Chinese).

[2] WIGGRES H, FERRO O, SALES R C M, et al. Comparison between the mechanical properties of carbon/epoxy laminates manufactured by autoclave and pressurized prepreg[J]. Polymer Composites, 2018, 39(S4):2562-2572.

[3] JONES R W, NG Y, MCCLELLAND J F. Monitoring ambient-temperature aging of a carbon-fiber/epoxy composite prepreg

http://bhxb.buaa.edu.cn

with photoacoustic spectroscopy[J]. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing,2008,39(6):965-971.

[4] 王斌,杨建奎,方东红,等.湿法缠绕用环氧配方适用期研究[J].固体火箭技术,1999,22(4):61-64.
WANG B,YANG J K,FANG D H,et al. Pot life of epoxy formula for wet winding[J]. Journal of Solid Rocket Technology,1999,22(4):61-64(in Chinese).

[5] 郭战胜,杜善义,张博明,等.先进复合材料用环氧树脂的固化反应和化学流变[J].复合材料学报,2004,21(4):146-151.
GUO Z S,DU S Y,ZAHNG B M,et al. Cure kinetics and chemorheological behavior of epoxy resin used in advanced composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2004,21(4):146-151(in Chinese).

[6] KIM D,CENTEA T,NUTT S R. In-situ cure monitoring of an out-of-autoclave prepreg:Effects of out-time on viscosity,gelation and vitrification[J]. Composites Science and Technology,2014,102:132-138.

[7] CHAMBERS A R,EARL J S,SQUIRES C A,et al. The effects of voids on the flexural fatigue performance of unidirectional carbon fibre composites developed for wind turbine applications[J]. International Journal of Fatigue,2006,28(10):1389-1398.

[8] PARK S Y,CHOI W J,CHOI H S. The effects of voids contents on the long-term hygrothermal behaviors of glass/epoxy and GLARE laminates[J]. Composites Structures,2010,92:18-24.

[9] ALMEIDA S F M,NETO Z S N. Effects of voids contents on the strength of composite laminates[J]. Composites Structures,1994,8:139-148.

[10] 沈超.3232树脂预浸料的贮存试验研究[J].航空材料学报,2003,23(SI):168-170.
SHEN C. Investigations on the storage of 3232 resin prepreg[J]. Journal of Aeronautical Materials,2003,23(SI):168-170(in Chinese).

[11] 臧千,樊孟金,白雪莲,等.603树脂体系及其热熔预浸料室温储存期性能研究[J].固体火箭技术,2018,41(3):383-387.
ZANG Q,FAN M J,BAI X L,et al. Study of properties of 603 epoxy resin and its prepreg during storage at room temperature[J]. Journal of Solid Rocket Technology,2018,41(3):383-387(in Chinese).

[12] 秦永乐,孟江燕,李伟东,等.碳纤维增强双马来酰亚胺树脂预浸料铺覆黏性及其储存老化行为[J].复合材料学报,2019,36(8):1830-1837.
QIN Y L,MENG J Y,LI W D,et al. Placement tack and storage aging behavior and carbon fiber reinforced bismaleimide prepreg[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2019,36(8):1830-1837(in Chinese).

[13] GRUNENFELDER L K,CENTEA T,HUBERT P,et al. Effect of room-temperature out-time on tow impregnation in an out-of-autoclave prepreg[J]. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing,2013,45:119-126.

[14] 刘玲,路明坤,张博明,等.孔隙率对碳纤维复合材料超声衰减系数和力学性能的影响[J].复合材料学报,2004,21(5):116-121.
LIU L,LU M K,ZAHNG B M,et al. Effects of porosity on the ultrasonic absorption coefficient and mechanical strength of carbon/epoxy composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2004,21(5):116-121(in Chinese).

[15] 刘玲,张博明,王殿富,等.聚合物基复合材料中孔隙率及层间剪切性能的试验表征[J].航空材料学报,2006,26(4):115-118.
LIU L,ZAHNG B M,WANG D F,et al. Experimental characterization of porosity and interlaminar shear strength in polymeric matric composites[J]. Journal of Aeronautical Materials,2006,26(4):115-118(in Chinese).

[16] 刘志真,李宏运,益小苏.孔隙率对聚酰亚胺复合材料力学性能的影响[J].材料工程,2005(9):56-58.
LIU Z Z,LI H Y,YI X S. Influence of void content on mechanical properties of polyimide composite[J]. Journal of Materials Engineering,2005(9):56-58(in Chinese).

[17] 张冬梅,叶金蕊,刘奎,等.孔隙微观特征影响CFRP力学性能的细观综述[J].复合材料学报,2013,30(增刊):118-123.
ZHANG D M,YE J R,LIU K,et al. Effects of void micro-characteristics on the mechanical behavior of CFRP by micromechanical method[J]. Acta Materias Compositae Sinica,2013,30(Suppl):118-123(in Chinese).

[18] OLIVIER P,COTTU J P,FERRET B. Effects of cure cycle pressure and voids on some mechanical properties of carbon/epoxy laminates[J]. Composites,1995,26(7):509-515.

[19] CINQUIN J,TRIQUENAUX V,ROUSNE Y. Porosity influence on organic composite material mechanical properties[C]//16th International Conference on Composite Materials,2007:1-8.

[20] TUDD N C W,WRIGHT W W. Voids and their effects on the mechanical properties of composites-An appraisal[J]. Sampe Journal,1978,14:10-14.

[21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.纤维增强塑料密度和相对密度试验方法:GB/T 1463—2005[S].北京:中国标准出版社,2005.
General Administration of Quality Supervision,Inspection and Quarantine of the People's Republic of China,Standardization Administration. Test methods for density and relative density of fiber reinforced plastics:GB/T 1463—2005[S]. Beijing:Standards Press of China,2005(in Chinese).

[22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.碳纤维增强塑料孔隙含量和纤维体积含量试验方法:GB/T 3365—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.
General Administration of Quality Supervision,Inspection and Quarantine of the People's Republic of China,Standardization Administration. Carbon fiber reinforced plastics-Determination of void content and fiber volume content:GB/T 3365—2008[S]. Beijing:Standards Press of China,2008(in Chinese).

[23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法:GB/T 3354—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.
General Administration of Quality Supervision,Inspection and Quarantine of the People's Republic of China,Standardization Administration. Test method for tensile properties of orientation

http://bhxb.buaa.edu.cn

fiber reinforced polymer matrix composite materials: GB/T 3354—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014 (in Chinese).

[24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 纤维增强塑料面内压缩性能试验方法: GB/T 5258—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Fibre-reinforced plastic composites-Determination of compressive properties in the in-plane direction: GB/T 5258—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009 (in Chinese).

[25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 定向纤维增强聚合物基复合材料弯曲性能试验方法: GB/T 3356—2014[S]. 北京:中国标准出版社,2014.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Test method for flexural properties of orientational fiber reinforced polymer matrix composite materials: GB/T 3356—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014 (in Chinese).

[26] 中华人民共和国工业和信息化部. 纤维增强塑料 短梁法测定层间剪切强度: JC/T 773—2010[S]. 北京:建材工业出版社,2011.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Fibre-reinforced plastics composites-Determination of apparent interlaminar shear strength by short-beam method: JC/T 773—2010[S]. Beijing: China Building Materials Press, 2011 (in Chinese).

[27] 石佩洛,梁涛涛,白雪莲,等. 树脂 η^* 和 T_g 对 C/E 预浸料黏性的表征[J]. 宇航材料工艺,2016(6):79-81.
SHI P L, LIANG H T, BAI X L, et al. Characterization of C/E prepreg' tack properties by η^* and T_g of resins[J]. Aerospace Materials and Technology, 2016(6): 79-81 (in Chinese).

[28] 李婷婷,李艳霞,陈超,等. 603 环氧树脂体系固化动力学模型的建立与验证[J]. 复合材料学报,2018,35(1):95-102.
LI T T, LI Y X, CHEN C, et al. Establishment and verification of curing kinetics model of 603 epoxy resin system[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(1): 95-102 (in Chinese).

Effects of prepreg ambient-temperature storage life on mechanical properties of MT700/603 composites

WANG Rong*, YU Yalin, WANG Lechen, MO Shenzhong, HUANG Yuqing, ZHOU Xiang

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: A hot-melt prepreg MT700/603 was prepared. The correlation between ambient-temperature storage life and the degree of pre-curing, and effects of pre-curing degree on composite quality and mechanical properties were investigated and discussed. The relationship among prepreg storage life, pre-curing degree and composite properties was established. The results show that the minimum viscosity is increased by 4.6 times after 60 days' storage at room temperature. Meanwhile, the glass transition temperature is increased by 17.9 ℃ and the pre-curing degree is increased to 11.2%. When storage life is less than 30 days, the composites show good internal quality, uniform fiber distribution and low porosity (≤0.03%), and the pre-curing degree is less than 5.3%. The longitudinal compression strength and modulus of composites tendentiously dependent on the failure of resin matrix are more sensitive to porosity than the longitudinal tensile strength and modulus dependent on the failure of fiber reinforcement. With the extension of storage life, the pre-curing degree and the viscosity of resin increases, and there is a mismatch between the pressurized moment and the resin gel point, which is the fundamental reason for the decrease of mechanical properties in composites. The maximum ambient-temperature storage life can be deduced according to the design requirement and mechanical properties data in different storage periods, realizing the quantitative evaluation of the prepreg availability.

Keywords: carbon fiber reinforced epoxy resin; storage life; pre-curing degree; mechanical properties; porosity

Received: 2021-03-16; **Accepted**: 2021-05-07; **Published online**: 2021-05-18 13:27

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210518.0940.001.html

* **Corresponding author**. E-mail: 2532436356@qq.com

http://bhxb.buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0141

miniSAR 卫星精密参考轨道设计

廖祥[1], 郑靖[2,*], 许永生[2], 谢成清[2], 王强强[1]

(1. 深圳市魔方卫星科技有限公司, 深圳 518129; 2. 深圳航天东方红卫星有限公司, 深圳 518057)

摘 要: 为满足轻小型合成孔径雷达(miniSAR)卫星干涉测量任务对空间基线的要求,通过分析卫星参考轨道特性,建立了一套精密参考轨道设计算法。所建算法以 miniSAR 卫星成功入轨后的一组定轨数据及根据参考轨道特性解析得到的参考轨道预估值为输入,基于仅考虑中心天体非球形高阶引力摄动的轨道外推模型、Eckstein-Hechler 平根模型及嵌套式迭代修正方法,设计输出其任务周期内使用的参考轨道。数值实验表明:所建算法设计的参考轨道生成的参考轨迹在三维空间的回归精度优于 0.01 m,满足实际工程应用需求。

关 键 词: 轻小型合成孔径雷达; 重轨干涉; 参考轨道; 回归轨道; 冻结轨道

中图分类号: V173.1

文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2022)12-2442-08

2015 年以来,多个国外商业航天初创公司相继提出并部署各自的轻小型合成孔径雷达(mini synthetic aperture radar, miniSAR)卫星[1]。在此背景下,深圳航天东方红卫星有限公司瞄准市场前景广阔的高分辨率微波成像和形变测量应用领域的 miniSAR 卫星项目,并立项研发,计划 2021 年底具备发射条件。为实现高精度长时间序列的形变监测,miniSAR 卫星的重轨干涉基线设计优于500 m,要求卫星在轨任务期间的三维空间回归轨迹被控制在直径为 500 m 的管道内。

管道指以卫星运行轨道的参考轨迹为中心、干涉基线极大值为直径的三维空间[2]。以国外早期干涉 SAR 卫星项目为例,ERS-1/ERS-2 管道设计直径为 600 m[3],TerraSAR-X 为 500 m[4],ALOS/ALOS-2 为 1000 m[5],Sentinel-1 则达到了 150 m[6-7]。由于 SAR 卫星一般运行在 500~800 km 高度范围内的低地球轨道空间,大气阻力与太阳光压等非保守摄动力会对卫星轨道根数造成长期影响,如此高精度的管道控制要求,需设计高精度参考轨迹为基准,进一步实施精密轨道控制[8]。而参考轨迹由参考轨道预报一个回归周期生成,因此,干涉 SAR 卫星高精度轨道控制中一个十分重要的术语"参考轨道"被提出。

参考轨道指在仅考虑中心天体保守力情况下,满足预报一个回归周期后卫星地固系下的三维空间位置完成重合的一类轨道。参考轨道仅为一组包含历元的轨道根数,其最终类型为瞬时轨道根数(又称密切轨道根数),坐标系通常为惯性系瞬时真赤道地心坐标系(true of date, TOD)[9]。对于需要生成长期一致的时间序列干涉数据的 SAR 卫星,参考轨道一旦完成设计,在整个任务周期内就不能更改,这同时对重轨单星和双星近距编队干涉 SAR 系统构成约束。

由于干涉 SAR 卫星技术起步较晚,且工程任务较少,国内外关于参考轨道设计的文献较欠缺。推导严密、可复现性好的精密参考轨道设计文献更是稀缺。文献[10]针对 TerraSAR-X 任务,实现了一种基于虚拟速度增量与序列二次规划的参考

收稿日期: 2021-03-25; **录用日期**: 2021-08-27; **网络出版时间**: 2021-09-15 17:34
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210915.1638.004.html
基金项目: 国家自然科学基金(11802073); 深圳市科技计划(JSGG20190823094603691)
*通信作者. E-mail: 29321633@qq.com

引用格式: 廖祥, 郑靖, 许永生, 等. miniSAR 卫星精密参考轨道设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2442-2449.
LIAO X, ZHENG J, XU Y S, et al. Precise references orbit design of miniSAR satellite[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2442-2449(in Chinese).

轨道优化设计方法,但由于引入了 2 次虚拟轨控,生成的参考轨迹不连续;文献[11]提出基于迭代修正方法的严格回归轨道设计,但文中的推导存在部分错误,实现算法存在缺陷,且回归精度较差;文献[12]提出一种基于高阶地球重力场模型的严格回归轨道单目标优化设计方法,但回归精度较差,仍在米级;文献[13]在修正文献[10]方法的同时,解决了利用倾角偏置修正沿迹向长期漂移的问题,但文中采用专有工具优化设计参考轨道,无法获取具体实现算法。

本文基于嵌套式迭代修正思想,通过合理选择参考系、初始预估参数、平根与轨道外推模型,并合理设置迭代修正反馈值及迭代收敛判据,建立了一套推导严密、可复现性好的 miniSAR 卫星精密参考轨道设计算法,由其设计的参考轨道生成的参考轨迹在地固系下的闭环精度达毫米级。

1　参考轨道特性分析

miniSAR 卫星的参考轨道必须同时具备 2 个基本特性:①轨道必须是回归轨道,即运行在该轨道上的卫星对星下点具有高精度重访特性;②轨道必须是冻结轨道,即卫星星下点重访时轨道高度的一致性。根据轨道动力学原理,回归轨道特性与轨道半长轴 a 和倾角 i 相对应,冻结轨道特性与偏心率 e 和近地点幅角 ω 相对应[10]。

此外,考虑到卫星能源的稳定性及升交点赤经的进动速率,miniSAR 卫星的参考轨道还设计具备太阳同步轨道特性。这一特性进一步约束了参考轨道半长轴 a 和倾角 i 之间的关系[14]。

1.1　太阳同步特性

太阳同步轨道平面法线与太阳矢量在赤道平面上的投影保持着固定的夹角关系,这使得运行其上的卫星可获得稳定的光照条件,且在卫星飞越相同地理纬度的目标区域处于同一地方时。太阳同步轨道的设计主要考虑降交点平地方时(mean local time, MLT)与平均轨道高度(mean orbit altitude, MOA)2 个参数。

文献[15]指出,太阳同步轨道倾角平根受太阳引力影响的长期摄动 $\Delta\bar{i}_S$ 年变化率 $\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$(°/年)与降交点 MLT 成正弦关系,降交点 MLT 为 3:00、9:00、15:00、21:00 时 $\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ 最大,降交点 MLT 为 0:00、6:00、12:00、18:00 时 $\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ 最小并接近于 0,如图 1 所示。因此,在设计太阳同步轨道参数时,干涉 SAR 卫星适合选择 0:00、6:00、12:00、18:00 附近的降交点 MLT,以减小倾角平根的长期漂移,进而避免不必要的倾角调整。

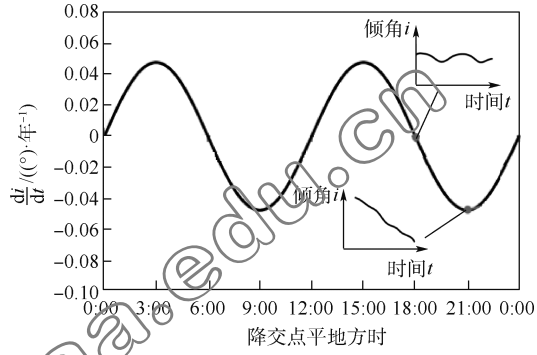


图 1　受太阳引力影响的倾角长期项摄动[15]

Fig. 1　Secular perturbation of inclination due to gravity of the Sun[15]

MOA 的设计则需考虑 SAR 卫星载荷在一个回归周期 T 内可实现对全球的无缝覆盖。这里的覆盖能力并非实际可照射区域,而是卫星在姿态最大侧摆角下载荷所能覆盖的区域来计算。由于 SAR 载荷一般具有照射盲区,因而 MOA 的设计需要对此因素加以建模分析。

确定好降交点 MLT 与 MOA 后,可根据基于 J_2 低阶引力摄动下的太阳同步轨道设计方程进一步确定轨道倾角:

$$i = \arccos\left(\frac{2\dot{\Omega}_{\oplus}\, a^{\frac{7}{2}}(1-e^2)^2}{3J_2R_{\oplus}\sqrt{\mu}}\right) \tag{1}$$

式中:μ 为地球引力常数;$R_{\oplus}$ 为地球平均半径;$\dot{\Omega}_{\oplus}$ 为地球公转升交点赤经进动速率;J_2 为地球非球形引力模型二阶带谐项系数。

1.2　回归特性

理想的参考轨迹在地固系三维空间下为首尾完全闭合的曲线,因而参考轨道必须具有回归特性。给定回归周期 T 与对应的回归圈数 N,则回归轨道约束方程为

$$\frac{\frac{N}{T}}{\omega_{\oplus}-\dot{\Omega}} - \frac{1}{\dot{\omega}-\dot{M}} = 0 \tag{2}$$

式中:$\omega_{\oplus}$ 为地球自转速率;$\dot{\Omega}$、$\dot{\omega}$、$\dot{M}$ 分别为升交点赤经、近地点幅角、平近点角的进动速率,三者在 J_2 低阶引力摄动下的解析式[16]为

$$\begin{cases} \dot{\Omega} = \dfrac{\mathrm{d}\Omega}{\mathrm{d}t} = -\dfrac{3\sqrt{\mu}R_{\oplus}^2 J_2\cos i}{2a^{7/2}} \\ \dot{\omega} = \dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \dfrac{3J_2\dot{M}R_{\oplus}^2(4-5\sin^2 i)}{4a^2(1-e^2)^2} \\ \dot{M} = \dfrac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}t} = \sqrt{\dfrac{\mu}{a^3}}\left[1+\dfrac{3J_2R_{\oplus}^2(2-3\sin^2 i)}{4a^2(1-e^2)^{3/2}}\right] \end{cases} \tag{3}$$

式中:倾角 i 以式(1)为约束参与式(3)对半长轴 a 的求解;Ω 为升交点赤经;ω 为近地点幅角;M

http://bhxb.buaa.edu.cn

为平近点角。

1.3 冻结特性

理想参考轨迹的星下点重访时轨道高度保持不变,因而参考轨道必须具有冻结特性。冻结轨道有 2 种类型:①临界倾角的冻结轨道;②小偏心率近圆冻结轨道。干涉 SAR 卫星的参考轨道属于第 2 种情况。冻结轨道设计方程为

$$\dot{e} = \frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t} = \dot{\omega} = \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = 0 \tag{4}$$

根据小偏心率近圆冻结轨道的要求,考虑 J_2 及 J_3 低阶引力摄动可解算得到

$$\begin{cases} e = \dfrac{\sin i}{\dfrac{\cos^2 i}{\sin i} - \dfrac{2J_2 a}{J_3 R_\oplus}} \\ \omega = 90° \\ M = -\omega \end{cases} \tag{5}$$

式中:J_3 为地球非球形引力模型三阶带谐项系数。

1.4 参考轨道预估值

综上对参考轨道特性的分析,可预估得到 5 个基于低阶引力势场的参考轨道根数:

$$\bar{\boldsymbol{a}}_0 = (\bar{a}_0, \bar{i}_0, \bar{e}_0, \bar{\omega}_0, \overline{M}_0)^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

式中:$\bar{a}_0$、$\bar{i}_0$、$\bar{e}_0$、$\bar{\omega}_0$、$\overline{M}_0$ 分别为半长轴、倾角、偏心率、近地点幅角、平近点角的平根。

需要指明的是,此处获得的参考轨道初值为 TOD 坐标系下的平根,在使用之前须将其转换为瞬根方可作为初始输入参与后续迭代修正过程:

$$\boldsymbol{a}_0 = (a_0, i_0, e_0, \omega_0, M_0)^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

式中:a_0、i_0、e_0、ω_0、M_0 分别为半长轴、倾角、偏心率、近地点幅角、平近点角的瞬根。

2 参考轨道设计算法

参考轨道的设计包含两部分工作:①针对 (a,i) 组合的太阳同步回归轨道的优化设计;②针对 (e,ω) 组合的冻结轨道的优化设计。但由于 (a,i) 迭代修正的输入为预估的参考轨道根数,2 种组合优化设计方法需嵌套使用。当 (e,ω) 迭代收敛之后,只需再重复一轮 (a,i) 迭代修正即可实现高精度回归。具体算法流程如图 2 所示。

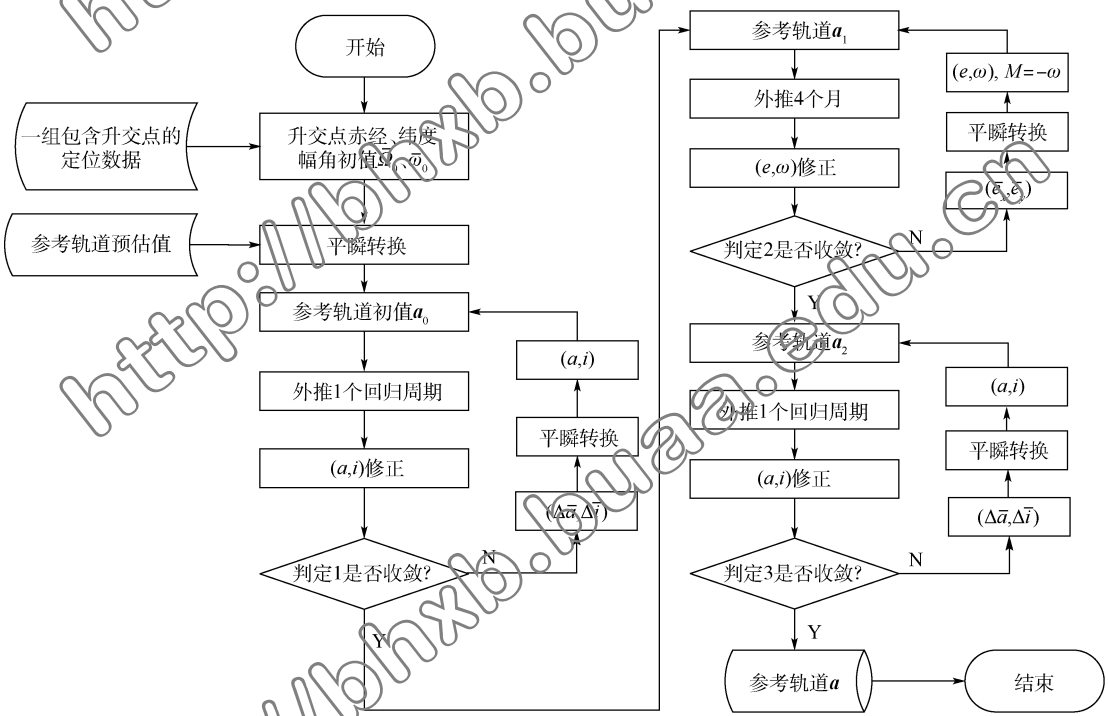


图 2 精密参考轨道设计算法流程

Fig. 2 Algorithm flow chart of precise reference orbit design

2.1 迭代修正具体实现

从算法流程可见,参考轨道设计过程主要分为 3 个步骤:①(a,i) 组合迭代粗修正;②(e,ω) 组合迭代修正;③(a,i) 组合迭代精修正。

2.1.1 (a,i) 组合迭代粗修正

(a,i) 组合迭代粗修正以参考轨道初值 $\boldsymbol{a}_0$ 为输入,外推 1 个回归周期 T,利用首尾轨道数据生成平根修正量 $(\Delta\bar{a},\Delta\bar{i})$,并进一步通过平瞬转换获得新的 (a,i) 值,其余轨道根数保持不变。其中,$(\Delta\bar{a},\Delta\bar{i})$ 为实际获得的平根修正量,(a,i) 则为最终修正得到的瞬根值。$(\Delta\bar{a},\Delta\bar{i})$ 根据梯度矩阵获得

$$\begin{bmatrix} \Delta\bar{a} \\ \Delta\bar{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial f}{\partial a} & \dfrac{\partial f}{\partial i} \\ \dfrac{\partial g}{\partial a} & \dfrac{\partial g}{\partial i} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda \\ \Delta\varphi \end{bmatrix} \tag{8}$$

http://bhxb.buaa.edu.cn

式中:$\Delta\lambda$ 和 $\Delta\varphi$ 分别为首尾轨道数据星下点经纬度之差;4 个偏导数求解式为

$$\begin{cases}\dfrac{\partial f}{\partial a} = \left(\dfrac{21J_2R_\oplus^2\sqrt{\mu}}{4a^{9/2}(1-e^2)^2}T + \dfrac{\partial u}{\partial a}\right)\cos i \\ \dfrac{\partial f}{\partial i} = \dfrac{3J_2R_\oplus^2\sqrt{\mu}}{2(1-e^2)^2}\cdot\dfrac{\sin i}{a^{7/2}}T \\ \dfrac{\partial g}{\partial a} = \dfrac{\partial u}{\partial a}\sin i \\ \dfrac{\partial g}{\partial i} = 0\end{cases} \tag{9}$$

其中:中间量 $\partial u/\partial a$ 计算如下:

$$\frac{\partial u}{\partial a} = -\frac{3T}{2}\sqrt{\frac{\mu}{a^5}}\left[1+(2e-e^3/4)\cos M+\frac{5}{2}e^2\cos(2M)+\frac{13}{4}e^3\cos(3M)\right] \tag{10}$$

式(8)~式(10)为最终算法,其详细推导过程可参考文献[10-12],但注意式(9)对文献[11]中错误部分的更正。

2.1.2　(e,ω) 组合迭代修正

由于太阳同步轨道的偏心率平根矢量 $(\bar{e}_x,\bar{e}_y)$ 具有"同宿极限环"特性,因而可采用"平均法"对其进行迭代修正,实现轨道冻结特性[10-13]。实际修正量 $(\bar{e}_x,\bar{e}_y)$ 通过计算 4 个月内以 1 个回归周期 T 为步长的偏心率平根矢量均值获得,如图 3 所示。

每次迭代过程计算得到偏心率平根矢量后,需将其转化为 $(\bar{e},\bar{\omega})$,进一步通过平瞬转换获得新的 (e,ω) 值,并令 $M=-\omega$,以维持起点处于升交点,其余轨道根数保持不变。其中,偏心率平根矢量与 $(\bar{e},\bar{\omega})$ 的关系为

$$\begin{cases}\bar{e}_x = \bar{e}\cos\bar{\omega} \\ \bar{e}_y = \bar{e}\sin\bar{\omega}\end{cases} \tag{11}$$

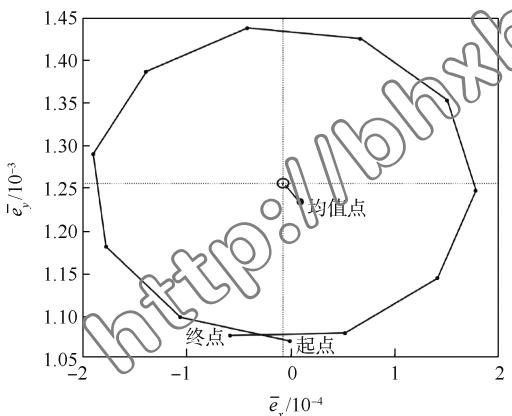


图 3　偏心率平根矢量修正示意图

Fig. 3　Diagram of mean eccentricity vector correction

2.1.3　(a,i) 组合迭代精修正

(a,i) 组合迭代精修正的实施方法与 2.2 节步骤 1 相同,但本节迭代修正的收敛判据与 2.2 节步骤 1 不同。

2.2　收敛判据

(a,i) 与 (e,ω) 组合每轮修正需要多次迭代实现收敛,参考轨道设计算法的 3 轮组合修正都需要给定明确的收敛判据,用以判断每次迭代后的结果是否满足收敛条件,各轮修正的收敛判据如下。

步骤 1　判定 3。以前后 2 次迭代修正后的参考轨道根数,预报 1 个回归周期 T 之后的三维空间轨迹回归精度优于精密定轨精度为收敛准则。参考 GNSS 精密定轨精度为厘米级,故收敛准则设置为

$$\|\Delta r\|_n < 0.01\ \text{m} \tag{12}$$

式中:n 为迭代次数,$n\geqslant 1$;$\|\Delta r\|_n$ 为参考轨迹闭环回归精度,计算式为

$$\|\Delta r\|_n = \{((x_{f_t_0+T})_n-(x_{f_t_0})_n)^2+((y_{f_t_0+T})_n-(y_{f_t_0})_n)^2+((z_{f_t_0+T})_n-(z_{f_t_0})_n)^2\}^{\frac{1}{2}} \tag{13}$$

式中:x_f、y_f、z_f 分别为地固系三维坐标值,时间下标 t_0、t_0+T 表征预报 1 个回归周期 T 所得轨道数据的首、尾坐标值。

步骤 2　判定 2。以前后 2 次迭代修正后的偏心率平根矢量偏差引起的参考轨迹偏差 $\bar{a}\Delta\bar{e}$ 优于厘米级为收敛准则。由于 $\bar{a}$ 为 10^{-6} m 量级,故偏心率平根矢量前后差异需优于 1.0×10^{-8},即

$$(\Delta\bar{e})_n = \sqrt{(\Delta\bar{e}_x)_n^2+(\Delta\bar{e}_y)_n^2} < 1.0\times10^{-8} \tag{14}$$

式中:$(\Delta\bar{e}_x)_n$ 与 $(\Delta\bar{e}_y)_n$ 计算式为

$$\begin{cases}(\Delta\bar{e}_x)_n = (\bar{e}_x)_n-(\bar{e}_x)_{n-1} \\ (\Delta\bar{e}_y)_n = (\bar{e}_y)_n-(\bar{e}_y)_{n-1}\end{cases} \tag{15}$$

步骤 3　判定 1。以前后 2 次迭代修正后的参考轨道根数预报 1 个回归周期 T 之后的三维空间轨迹回归精度无明显提高为收敛准则。考虑二阶展开,回归精度差异需优于 $o(\|\Delta r\|_n^2)$,即

$$\|\Delta r'\|_n = \text{abs}(\|\Delta r\|_n-\|\Delta r\|_{n-1}) < 1.0\times10^{-4}\ \text{m} \tag{16}$$

式中:abs( )表示取绝对值;n 为迭代次数,$n\geqslant 2$。

2.3　平瞬转换

参考轨道设计算法的迭代实际修正量为平根,但参考轨道的形式为瞬根,因此在修正平根后需执行平瞬转换获得瞬根修正值。

常用的平瞬转换模型有多种[16],本文选用考虑 $J_2\sim J_6$ 及 J_2^2 摄动的 Eckstein-Hechler 模型[17],该模型专门针对小偏心率冻结轨道进行优化,尤其适合参考轨道设计过程。

http://bhxb.buaa.edu.cn

Eckstein-Hechler 模型在基于 SCILAB 科学计算语言的 Celestlab[18] 与基于 Java 语言的 Orekit[19] 这 2 套成熟开源航天动力学库中皆有实现，可作为实现参考。

2.4 外推模型

(a,i) 与 (e,ω) 组合迭代修正的过程皆需要进行轨道外推，以获得向后一段时间的轨道数据。由于参考轨道只考虑中心天体保守力，因而外推模型的动力学只考虑高阶地球非球形引力，本文为 100×100 阶的 EGM2008 引力模型[20]。

动力学模型的单一决定了外推模型的精度取决于积分器的选择及对积分步长的控制。考虑到积分效率与精度，选择 9 阶误差控制的 8 阶 Runge-Kutta-Verner 积分器 RKV8(9)[21]。修正过程中，误差容限设为优于 1.0×10^{-13}，(a,i)、(e,ω) 组合迭代修正最大步长分别控制在 10 s、5 s 以内。

3 数值实验

3.1 输入数据与实验条件

3.1.1 轨道特性输入

miniSAR 卫星轨道设计为具有 10 天/151 轨（回归周期为 10 天，10 天内卫星运行 151 轨）回归、冻结特性的太阳同步轨道，标称降交点 MLT 为 6:00（晨昏轨道），卫星质量为 180 kg。

3.1.2 定位数据输入

卫星成功入轨后经运控系统提供一组包含升交点的定位数据，如表 1 所示（表中为仿真的地固系三维位置与速度值）。对其插值得到升交点处地固系状态矢量，对应历元 t_0 为 2021-01-01，00:26:13.511 668 UTCG。再利用升交点处的地固状态矢量计算得到升交点赤经平根初值为 $\overline{\Omega}_0=10.881\ 803\ 934°$。

表 1 定位数据

Table 1 Precision positioning data

历元（UTCG）	x_f/m	y_f/m	z_f/m	v_{x_f}/(m·s^{-1})	v_{y_f}/(m·s^{-1})	v_{z_f}/(m·s^{-1})
2021-01-01T 00:26:10.0	−783 574.748 753	−6 863 761.705 245	−26 410.675 743	−1 491.687 930	141.316 578	7 530.503 149
2021-01-01T 00:26:11.0	−785 063.311 452	−6 863 616.424 823	−18 889.864 376	−1 490.723 932	149.784 298	7 530.530 497
2021-01-01T 00:26:12.0	−786 550.909 902	−6 863 462.687 911	−11 369.030 230	−1 489.756 916	158.251 697	7 530.548 764
2021-01-01T 00:26:13.0	−788 037.541 089	−6 863 300.494 834	−3 848.182 376	−1 488.786 875	166.718 766	7 530.557 951
2021-01-01T 00:26:14.0	−789 523.201 997	−6 863 129.845 928	3 672.670 120	−1 487.813 817	175.185 493	7 530.558 057
2021-01-01T 00:26:15.0	−791 007.889 614	−6 862 950.741 538	11 193.518 187	−1 486.837 742	183.651 868	7 530.549 083
2021-01-01T 00:26:16.0	−792 491.600 927	−6 862 763.182 023	18 714.352 756	−1 485.858 651	192.117 880	7 530.531 028
2021-01-01T 00:26:17.0	−793 974.332 924	−6 862 567.167 748	26 235.164 760	−1 484.876 544	200.583 519	7 530.503 892

3.1.3 参考轨道初值

根据轨道特性预估值与定位数据，计算得到的参考轨道在 t_0 时刻的初值为

$$\bar{\boldsymbol{a}}_0=\begin{pmatrix}\bar{a}_0\\ \bar{e}_0\\ \bar{i}_0\\ \overline{\omega}_0\\ \overline{\Omega}_0\\ \overline{M}_0\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}6\ 908\ 391.598\ 467\ \text{m}\\ 0.001\ 065\ 844\\ 97.516\ 872\ 037°\\ 90.0°\\ 10.881\ 803\ 934°\\ 270.0°\end{pmatrix}\tag{17}$$

平瞬转换后参与迭代修正的参考轨道初值为

$$\boldsymbol{a}_0=\begin{pmatrix}a_0\\ e_0\\ i_0\\ \omega_0\\ \Omega_0\\ M_0\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}6\ 917\ 784.183\ 313\ \text{m}\\ 0.001\ 165\ 858\\ 97.511\ 721\ 612°\\ 65.805\ 305\ 734°\\ 10.881\ 860\ 946°\\ 294.194\ 463\ 246°\end{pmatrix}\tag{18}$$

3.1.4 实验条件

数值实验基于 MATLAB 语言环境，轨道外推与数据报表使用 STK Engine 的 MATLAB 编程接口实现，平瞬转换算法移植自 Celestlab。仿真程序运行于搭载 Windows 10 专业版操作系统的联想 P52 移动工作站，机带内存 32 GB，处理器型号为 Intel Xeon E-2176M。

3.2 实验结果

表 2 给出了参考轨道初值及数值实验过程中 3 轮迭代修正所得参考轨道根数，其中 $\boldsymbol{a}$ 为最终获得的参考轨道根数。从表 2 中数据可见，由 $\boldsymbol{a}_0$ 到 $\boldsymbol{a}_1$ 及 $\boldsymbol{a}_2$ 到 $\boldsymbol{a}$ 的过程中，只有半长轴与倾角是变化量；由 $\boldsymbol{a}_1$ 到 $\boldsymbol{a}_2$ 的过程中，只有偏心率、近地点幅角与平近点角是变化量。

表 3 给出了 3 轮修正迭代过程中收敛判据的统计数据，图 4～图 7 则对统计数据进行了可视化。其中，图 4 与图 5 对应第 1、2 轮 (a,i) 组合迭代修正过程中的收敛情况，横坐标 n 为迭代次数，图 6 与图 7 则对应 (e,ω) 组合迭代修正过程中偏心率平根矢量收敛情况。统计数据表明：

http://bhxb.buaa.edu.cn

表 2　迭代修正过程中所得参考轨道根数(TOD 瞬根)

Table 2　Reference orbit elements obtained during process of iterative correction (TOD osculating elements)

轨道参数	$\boldsymbol{a}_0$	$\boldsymbol{a}_1$	$\boldsymbol{a}_2$	$\boldsymbol{a}$
历元 (UTCG)	t_0	t_0	t_0	t_0
半长轴 a/m	6 917 784.183 313	6 917 807.832 603	6 917 807.832 603	6 917 808.175 966
偏心率 e	0.001 165 858	0.001 165 858	0.001 340 574	0.001 340 574
轨道倾角 i/(°)	97.511 721 612	97.534 015 350	97.534 015 350	97.534 027 100
近地点幅角 ω/(°)	65.805 305 734	65.805 305 734	69.021 264 985	69.021 264 985
升交点赤经 Ω/(°)	10.881 860 946	10.881 860 946	10.881 860 946	10.881 860 946
平近点角 M/(°)	294.194 463 246	294.194 463 246	290.978 735 015	290.978 735 015

表 3　迭代修正收敛数据

Table 3　Convergence data of iterative correction

n	$\|\Delta r'\|$/m	$\|\Delta r\|$/m	$\Delta\bar{e}$	n	$\|\Delta r'\|$/m	$\|\Delta r\|$/m	$\Delta\bar{e}$
1	28 263.230 02	52.167 615 93	0.000 187 929 7	4	0.000 335 849	0.005 178 737	0.000 000 000 2
2	3 073.541 513	0.486 591 513	0.000 002 372 6	5	0.000 005 517		
3	0.263 825 008	0.005 720 578	0.000 000 026 5	6	0.000 000 438		

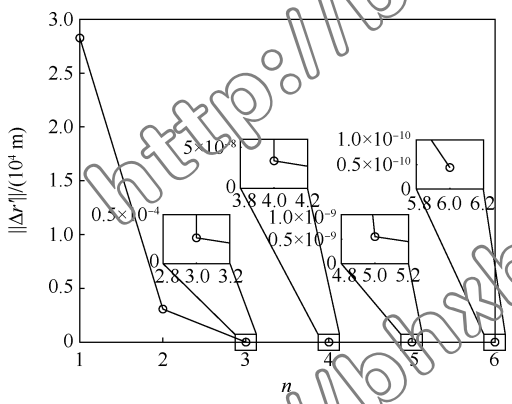


图 4　第 1 轮 (a,i) 迭代修正收敛情况

Fig. 4　Convergence of first (a,i) iterative correction

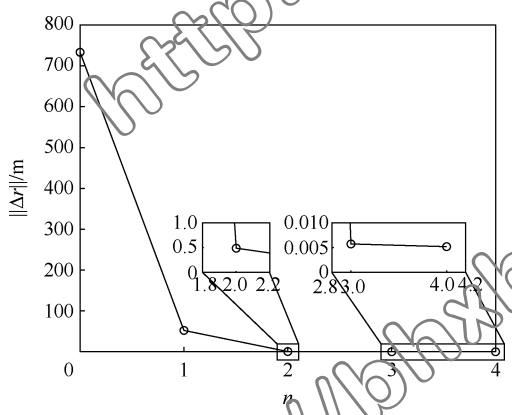


图 5　第 2 轮 (a,i) 迭代修正收敛情况

Fig. 5　Convergence of second (a,i) iterative correction

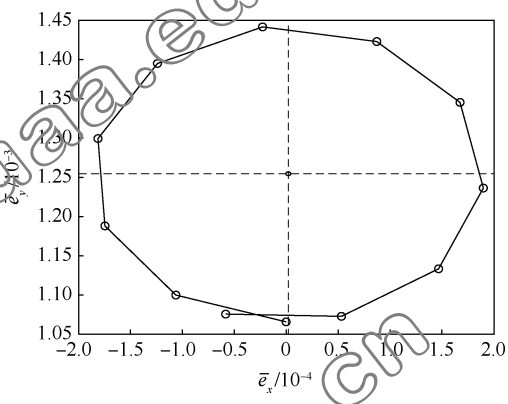


图 6　偏心率平根矢量收敛情况

Fig. 6　Convergence of mean eccentricity vector

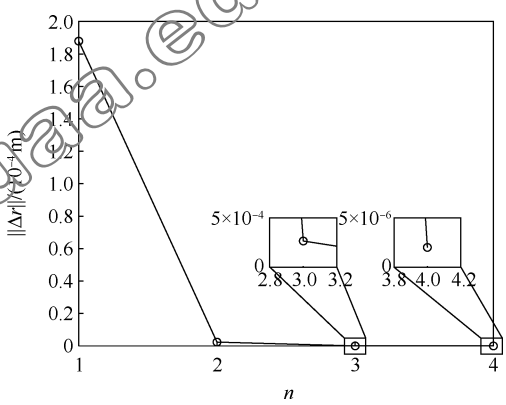


图 7　(e,ω)迭代修正收敛情况

Fig. 7　Convergence of (e,ω) iterative correction

1) 第 1 轮(a,i)组合迭代修正过程中,仅 6 次迭代$\|\Delta r'\|$即实现收敛,收敛精度达 4.38×10^{-7} m。

2) (e,ω)组合迭代修正过程中,120 天内以 1 个回归周期为步长的偏心率平根矢量在迭代修正过程中逐步收缩半径,仅 4 次迭代偏心率平根变化率 $\Delta\bar{e}$ 即收敛至 2×10^{-10}。

3) 第 2 轮(a,i)组合迭代修正过程中,仅4 次迭代$\|\Delta r\|$即实现收敛,收敛精度优于 0.006 m。

综合本节所述,实验结果的收敛精度满足收敛判据指标,验证了所提 miniSAR 卫星参考轨道迭代修正设计算法的有效性和精密性。

实验中,单次(a,i)修正平均耗时 56.64 s,单次(e,ω)修正平均耗时 624.45 s,合计耗时 47.29 min。卫星轨控任务周期一般大于轨道周期,合计耗时小于 miniSAR 卫星约 95.36 min 的轨道周期,不影响轨控任务正常开展。此外,考虑到软硬件条

http://bhxb.buaa.edu.cn

件,参考轨道设计工作不适合在内存低于GB级的嵌入式星载计算机上进行。

4 结 论

本文建立了一套完整的miniSAR卫星精密参考轨道设计算法,经过嵌套式(a,i)、(e,ω)组合的3轮迭代修正获得了毫米级三维空间轨迹回归精度。

1)引入了参考轨道的具体定义,提出的参考轨道设计算法流程清晰、推导严密、收敛判据明确、可复现性好。

2)提升了参考轨道设计速度与精度,数值实验在48 min内获得了地固系三维空间闭环回归精度约为0.005 m优于0.01 m的精密参考轨道,满足实际工程应用需求。

参考文献(References)

[1] 徐辉,刘爱芳,王帆.轻小型星载SAR系统发展探讨[J].现代雷达,2017,39(7):1-6.
XU H,LIU A F,WANG F. Discussion on development of space-borne light-SAR[J]. Modern Radar,2017,39(7):1-6(in Chinese).

[2] PAU P L,MARC R C,ZAN F D,et al. Role of the orbital tube in interferometric spaceborne SAR missions[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2015,12(7):1486-1490.

[3] MATS R. The orbit control of ERS-1 and ERS-2 for a very accurate tandem configuration[J]. RBCM Special Issue,1999(21):72-78.

[4] ARBINGER C,D'AMICO S,EINEDER M. Precise ground-in-the-loop orbit control for low earth observation satellites[C]// 18th International Symposium on Space Flight Dynamics,2014:333.

[5] KANKAKU Y,SUZUKI S,OSAWA Y. ALOS-2 mission and development status[C]// 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Piscataway: IEEE Press,2014:2396-2399.

[6] SERRANO M A M,SHURMER I,MARC X. Sentinel-1:Operational approach to the orbit control strategy[J]. Advances in Space Research,2017,60(5):879-892.

[7] BARAT I,PAU P,BERTHYL D,et al. Sentinel-1:Link between orbit control and interferometric SAR baselines performance[C]// 25th International Symposium on Space Flight Dynamics,2015:19-23.

[8] DE FLORIO S. Precise autonomous orbit control in low earth orbit:From design to flight[D]. Glasgow:University of Glasgow,2013:4-11.

[9] 仲惟超.卫星集群导航与轨道控制方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014:20-21.
ZHONG W C. Research on the orbit navigation and control of the satellite cluster[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2014:20-21(in Chinese).

[10] D'AMICO S,ARBINGER C,KIRSCHNER M,et al. Generation of an optimum target trajectory for the TerraSAR-X repeat observation satellite[C]// 18th International Symposium on Space Flight Dynamics 2004:137.

[11] 蒲明珺.高精度回归轨道设计与精确维持控制方法研究[D].上海:上海交通大学,2018:32-47.
PU M J. Research on high-precision repeat-groundtranck orbit design and precise orbit maintenance control method[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2018:32-47(in Chinese).

[12] 杨盛庆,杜耀珂,陈筠力.基于迭代修正方法的严格回归轨道设计[J].宇航学报,2016,37(4):420-426.
YANG S Q,DU Y K,CHEN J L. Design of strictly-regressive orbit based on iterative adjustment method[J]. Journal of Astronautics,2016,37(4):420-426(in Chinese).

[13] KAHLE R,SPIRIDONOVA S,KIRSCHNER M. Improved reference orbits for the repeat-ground-track missions enMAP and tandem-L[J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences,Aerospace Technology Japan,2019,17(3):308-314.

[14] 陈洁,汤国建.太阳同步卫星的轨道设计[J].上海航天,2004,21(3):34-38.
CHEN J,TANG G J. Orbit design of sun-synchronous satellite[J]. Aerospace Shanghai,2004,21(3):34-38(in Chinese).

[15] YAMAMOTO T,ARIKAWA Y,UEDA Y,et al. Autonomous precision orbit control considering observation planning:ALOS-2 flight results[J]. Journal of Guidance,Control,and Dynamics,2016,39(6):1244-1264.

[16] VALLADO D A. Fundamentals of astrodynamics and applications[M]. 4nd ed. El Segundo:Microcosm Press,2013:609-730.

[17] ECKSTEIN M,HECHLER H. A reliable derivation of the perturbations due to any zonal and tesseral harmonics of the geopotential for nearly-circular satellite orbits[C]// Eropean Space Research Organisation Scientific Report 13,1970:1-31.

[18] ALAIN L,THIERRY M. Celestlab:Spaceflight dynamics toolbox for mission analysis[C]// International Conference on Astrodynamics Tools and Techniques 2016,2016:1-6.

[19] MAISONOBE L,POMMIER V,PARRAUD P. Orekit:An open source library for operational flight dynamics applications[C]// International Conference on Astrodynamics Tools and Techniques 2010,2010:1-6.

[20] PAVLIS N K,HOLMES S A,KENYON S C,et al. The development and evaluation of the Earth gravitational model 2008(EGM2008)[J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth,2012,117:B04406.

[21] VERNER J H. Numerically optimal Runge-Kutta pairs with interpolants[J]. Numerical Algorithms,2010,53(2):383-396.

http://bhxb.buaa.edu.cn

Precise references orbit design of miniSAR satellite

LIAO Xiang[1], ZHENG Jing[2,*], XU Yongsheng[2], XIE Chengqing[2], DING Qiangqiang[1]

(1. Shenzhen MagicCube Satellite Ltd, Shenzhen 518129, China;
2. Shenzhen Aerospace Dongfanghong Satellite Ltd, Shenzhen 518057, China)

Abstract: In order to meet the requirements of the mini synthetic aperture radar (miniSAR) satellite interferometry mission for the space baseline, a set of precision reference orbit design algorithms was established by analyzing the features of the satellite reference orbit. The algorithm takes a group of orbit determination data after the successful orbit insertion of the miniSAR satellite and the estimation elements of reference orbit obtained by analyzing the reference orbit features as inputs. The Eckstein-Hechler mean elements model and nested iterative correction method are used to design and output the reference orbit within the mission duration. Numerical simulation shows that the spatial regression accuracy of the reference trajectory formed by the algorithm is better than 0.01 m, which can be applied to real engineering application.

Keywords: mini synthetic aperture radar; repeat interferometry; reference orbit; repeating ground track orbit; frozen orbit

http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2021-03-25; **Accepted**: 2021-08-27; **Published online**: 2021-09-15 17:34

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210915.1638.004.html

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (11802073); Shenzhen Science and Technology Plan (JSGG20190823094603691)

* **Corresponding author**. E-mail: 29321633@qq.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0149

基于图卷积网络的卷积神经网络耗时预测算法

李哲暘[1], 张如意[1], 谭文明[1,2,*], 任烨[1], 雷鸣[1], 吴昊[1]

(1. 杭州海康威视数字技术股份有限公司, 杭州 310051; 2. 杭州海康威讯系统技术有限公司, 杭州 310051)

摘 要: 通过可学习的预测算法获取卷积神经网络(CNN)在硬件上的推理耗时越来越受到研究者的关注。现有耗时预测算法主要面临2个问题:卷积神经网络设计空间采样复杂度高,数据采集成本高;无法准确预测硬件编译器的算子融合技术对推理耗时的影响。为了解决上述问题,提出了一种基于图卷积网络(GCN)的耗时预测算法,将整体网络耗时看作多节点耗时补偿的累加,并利用图卷积对结构算子融合产生的耗时影响进行建模。同时,提出一种新型差分训练方案,减少采样空间规模,提高算法的泛化能力。在HISI3559硬件平台上对MB-C连续空间采样模型的耗时预测实验表明:所提算法可将耗时估计的平均相对误差从传统算法的302%降低到5.3%。另外,通过将传统耗时预测算法替换成所提算法进行耗时评估,可以使网络结构搜索算法搜索到耗时更加接近目标的高精度网络。

关 键 词: 耗时预测; 图卷积网络; 深度学习; 网络结构搜索; 模型部署

中图分类号: TP391.4; V247.1

文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2022)12-2450-10

高清智能摄像机已成为智慧化城市管理中重要的感知来源,其含有的深度学习推理引擎能够在端侧对输入图像进行分析,向中心端系统提供高价值结构化信息。具有深度学习推理能力的智能摄像机通常采用带有神经网络计算硬核(neural network processing unit, NPU)的片上系统(system on chip, SOC)芯片(如HISI3559)。相对于中心端深度学习器件,边缘端的硬核加速器通常更加关注低功耗和低成本。近年来,边缘端芯片算力有了长足的进步,智能分析输入的图像已从2 K分辨率向4 K~8 K高分辨率转变,智能功能需求种类也快速增长,算力和带宽瓶颈依然较为严重。为此,芯片厂商在电路与编译器设计时采用了多种优化措施,包括权重与激活量化[1-2]、算子融合[3]、权重裁剪[4-5]、轻量化结构设计[6-8]等。由于每种硬件的特点不同,同一种模型结构在不同硬件上运行的效率也不同。在边缘端推理加速算法研发时,需要针对不同芯片采用不同方案。多种方案叠加后,加速效果呈现非线性特点。在对模型进行加速优化时,精确获得模型实际运行耗时是优化成功的前提条件。

现有的模型硬件耗时预测算法按发展的历程,主要可分为代理评估、硬件实测和算法预测3类。

1) 代理评估。采用容易获得的测评指标代替耗时指标。早期深度学习模型主要应用在物体分类、识别等非实时任务上,在端侧部署的主要难点为参数存储。Denton[9]、Han[10]等提出的算法以参数量为关注重点,将网络的存储压缩率作为评价指标。随着深度学习在识别[11-12]与检测算

收稿日期: 2021-03-29; **录用日期**: 2021-06-06; **网络出版时间**: 2021-06-29 16:57
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210629.1503.001.html
基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFC0807706)
* **通信作者**. E-mail: tanwenming@hikvision.com

引用格式: *李哲暘, 张如意, 谭文明, 等. 基于图卷积网络的卷积神经网络耗时预测算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2450-2459. LI Z Y, ZHANG R Y, TAN W M, et al. A graph convolution network based latency prediction algorithm for convolution neural network[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2450-2459(in Chinese).*

法[13-16]的大规模应用,端侧模型的运行耗时成为主要优化目标。介于当时的模型结构中操作类型少,卷积计算占比高[17-18],文献[19]开始将乘加运算次数(operations per second, OPS)作为主要评价指标,辅以理论内存进出消耗(memory access cost, MAC)辅助评价。相对于以存储压缩率为指标,以乘加运算次数和内存进出消耗作为评价指标,能直接反映模型的理论算力和带宽需求。由于不同芯片采用不同优化方式,理论计算结果与实际资源消耗存在差异。部署时模型需反复试凑设计,对训练资源消耗大。

2)硬件实测。文献[20]在所提出的模型结构搜索算法 MnasNet 中用了硬件实测方法,在优化算法执行中,将所得模型自动编译部署到实体硬件中进行耗时实测,并将测试结果向优化算法反馈。硬件实测方法的优点是可以直接测量模型在特定硬件上的耗时,方法简单有效,但对部署系统设计能力及成本要求都较高。此外实物系统受到系统调度等波动的影响,需要多次测试才能得到稳定的反馈,进一步增加了运行成本。

3)算法预测。通过构建数学模型,预测模型在实际硬件中的运行耗时。Facebook AI 研究院在文献[21]中采用了查表法。查表法通过板上实测手段对搜索空间中每种结构单元的耗时进行测量,构建[结构单元类型,耗时]的数据结构存表。对于输入的待测模型,在进行结构拆解后,查询对应的结构单元耗时并累加后即得到预测耗时。文献[22]中进一步对 4 000 多种模型结构中的结构单元耗时进行采样,使用支持向量机(support vector machine, SVM)进行结构单元耗时预测建模,替代文献[21]中的数据结构表,一定程度上简化了所需资源。文献[23]提出 one-hot 编码方法,使得复杂网络结构可以简化为编码表,作为输入特征训练线性回归模型,直接对整体模型耗时进行回归。文献[21-23]模型耗时预测算法,对于模块替换类结构搜索算法较为友好,但是受限于码表和传统回归算法的能力,在硬件编译器采用更加灵活的通道裁剪、混合量化、算子融合等精简手段时,优化空间复杂度指数级增长,预测误差较大。

本文提出了一种基于图卷积神经网络(graph convolution network, GCN)的卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)模型推理硬件耗时预测新算法。通过将卷积神经网络的拓扑结构转化为图网络,网络模型中各层的超参做为节点输入特征。将网络模型在硬件上的前向推理过程当做黑箱系统,以耗时作为训练目标,通过学习网络结构间的关系,预测实际硬件耗时。构建了基于 MobileNetV2[7]的算法验证空间,在 GPU、HISINNIE 硬核 2 种硬件上验证了本文算法性能。在模型自动裁剪、自动网络结构搜索等算法中,如需同时在精度和耗时等多方面达到最优,则可采用本文算法在多目标搜索优化过程中取代复杂的耗时实测过程。

1　图卷积网络

Kipf 和 Welling[24]在 2017 年提出了一种可扩展的图卷积神经网络。图卷积神经网络融合了图神经网络和卷积神经网络的特点,将卷积神经网络从欧式空间扩展到了适合于表达关系网络的非欧空间,同时具有边与节点的可扩展性。

带有隐层的简单图卷积网络如图 1 所示。该网络由 3 个层组成,分别为输入层、隐层和输出层,每层均含有 C_x 个通道,其中 C_1 为输入通道,C_2 为隐层通道,C_3 为输出通道。G 为图拓扑结构,该图为一个有 4 个节点的无向图。图 1 中的虚线部分表示空域图卷积操作和非线性激活操作,其单层的前向传播如下:

$$\boldsymbol{h}_i = \delta\left(\boldsymbol{w}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}_i + \sum_{j\in N(i)} \boldsymbol{w}_j^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}_j\right) \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{h}_i$ 为隐层第 i 个节点特征值向量;$\boldsymbol{w}_i$ 为权重

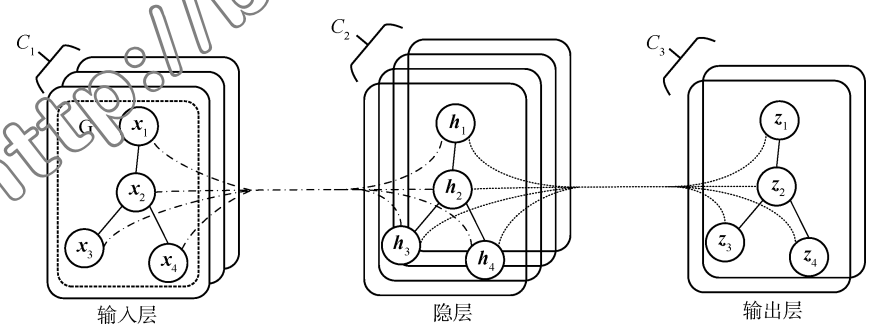


图 1　带有隐层的图卷积网络示意图

Fig. 1　Schematic diagram of graph convolution network with hidden layers

http://bhxb.buaa.edu.cn

向量；$\boldsymbol{x}_i$ 为输入特征向量；$N(i)$ 为节点 i 的邻接节点集合；$\delta(\cdot)$ 为非线性激活函数。

为了能够与欧氏空间卷积相对应，可采用矩阵计算：

$$\boldsymbol{H} = \delta(\mathrm{norm}(\boldsymbol{A} + \boldsymbol{I})\boldsymbol{X}\boldsymbol{W}) \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{A}$ 为邻接矩阵；$\boldsymbol{I}$ 为单位对角矩阵；$\boldsymbol{X}$ 为输入特征矩阵；$\boldsymbol{W}$ 为权重矩阵；norm(·)为对矩阵的归一化。

用式(2)替代卷积神经元网络中的欧氏空间卷积操作，即可对图网络进行卷积计算。

如果将卷积神经网络结构作为输入特征数据，则预测器需要接受非欧空间数据，并对卷积神经网络结构中节点间拓扑关系具有较强的敏感度。因此，本文选用图卷积网络对神经网络耗时进行建模预测。

2 基于图卷积网络的耗时预测算法

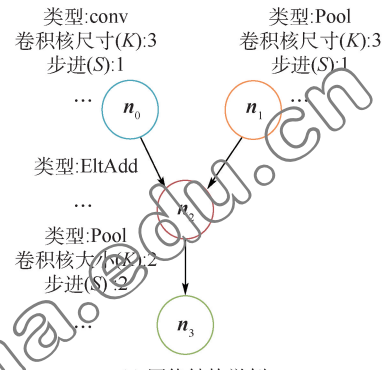
本节主要阐述基于图卷积网络的耗时预测算法核心设计，可分为卷积神经网络图编码、耗时预测算法整体设计与采样空间优化、图卷积网络设计与训练 3 部分。

2.1 卷积神经网络的图编码

在利用图卷积对网络模型耗时预测之前，需要对卷积神经网络结构进行图编码。编码分为 2 步：

步骤 1 图网络中的节点用于表示卷积神经网络结构中的操作，边用于表示操作间的拓扑关系。如图 2(a)所示，现有主流卷积神经网络为有向无环图，拓扑结构可转换为图网络。如图 2 所示，根据边与节点的关系，可生成有向邻接矩阵 $\boldsymbol{A}$。具体的，由于图 2(a)中共有 4 个节点，为了表示节点间的连接关系，可以用一个维度为 4×4 的邻接矩阵来表示。如果第 i 行第 j 列的值为 0，则表示第 i 个节点和第 j 个节点没有连接；如果为 1，则表示存在连接。

步骤 2 节点特征矩阵用于表示网络中操作的属性超参集合，如图 2(b)所示，特征矩阵 $\boldsymbol{F}$ 中第 i 行表示每 i 个节点操作具体的特征属性，m 表示特征属性共有 m 维。其中，节点的属性包括操作类型、卷积核尺寸、步进数、输入输出通道等。特别针对属性中的操作类型，使用 one-hot 编码。如图 2(b)中的操作种类，“001”表示卷积(conv)，“010”表示池化(Pool)，“100”表示元素累加操作(EltAdd)等，其他特征则直接将值输入特征矩阵中。当 1 个节点操作不包含某个属性时，如元素累加操作(EltAdd)没有核大小和步进属性，则对应特征值设置为 0。经过上述的编码就可得到节点特征矩阵 $\boldsymbol{F}$。在算法实际执行中，



(a) 网络结构举例

	n_0	n_1	n_2	n_3
n_0	0	0	1	0
n_1	0	0	1	0
n_2	0	0	0	1
n_3	0	0	0	0

邻接矩阵:$\boldsymbol{A} \in \mathbf{R}^{4\times4}$

	类型				K	S	…
n_0	0	0	1	…	3	1	…
n_1	0	1	0	…	2	1	…
n_2	1	0	0	…	0	0	…
n_3	0	1	0	…	2	2	…

特征矩阵:$\boldsymbol{F} \in \mathbf{R}^{4\times m}$

(b) 网络结构的矩阵表示举例

图 2 网络结构和网络结构的矩阵

Fig. 2 Representation of a network and its matrix

特征矩阵需要做归一化处理，避免不同尺度特征数据影响模型的训练收敛。

2.2 耗时预测算法整体设计与采样空间优化

基于算法预测的耗时评测算法需要采集数据训练算法模型。卷积神经网络的模型空间复杂度随着节点数与节点超参的增加成指数级增加，有限的训练样本无法表征空间的整体分布。为了降低模型空间的复杂度，结合先验假设模型在实际硬件运行时，单个算子执行对耗时的影响仅与其邻近的节点距离为 p 以内的前置操作相关(p 为常数)，则整体网络的耗时可恒等变换成带有重叠拓扑结构的子网络差分累加：

$$L(N_n) = \sum_{i=p+1}^{n}(L(N_i^{i-p}) - L(N_{i-1}^{i-p})) + L(N_p^1) \tag{3}$$

式中：$L(\cdot)$ 为网络在板上实测耗时；N_j^i 为整体网络 N 中第 i 个节点到第 j 个节点之间拓扑结构的子网络，$i=j$，N_j^i 表示单节点，$i>j$，N_j^i 表示空结构，空结构的耗时为 0；n 为整体网络包含的节点数，即将整体网络耗时拆分为 1 个子网络耗时 $L(N_p^1)$ 与 $(n-p)$ 个子网络对耗时差。第 i 对子网络耗时差得到的是节点 i 的耗时补偿 $(L(N_i^{i-p}) - L(N_{i-1}^{i-p}))$。

用图卷积去预测拆分得到的子网络集合，代入式(3)可以得到耗时预测模型：

$$\tilde{L}(N_n) = \sum_{i=p+1}^{n}(G(N_i^{i-p}) - G(N_{i-1}^{i-p})) + G(N_p^1) \tag{4}$$

式中：$\tilde{L}(\cdot)$ 为预测耗时；$G(\cdot)$ 为图卷积预测耗时模型。

http://bhxb.buaa.edu.cn

由于式(4)对应的所有子网络拓扑结构的最大节点距离均为 p,故对预测模型 $G(\,)$ 进行训练的数据只需采集模型空间中最大节点距离为 p 的子结构集合即可。

通常无论是模型结构搜索还是模型裁剪,都面临结构空间复杂的问题。假设模型空间为 n 节点单链结构,每个节点有 m 种可选特征属性(如操作类型、卷积核尺寸、通道数等),则整体模型空间的采样规模为 m^n。而采用式(4)进行拆解后,子网络模型空间的采样规模则变为 m^p。现有经典网络模型空间中 n 一般规模大于 100,而硬件优化算法中对应的 p 一般小于 10。因此进行拆解可以大幅降低训练所需样本采样规模,模型空间复杂度的降低也使得图卷积网络的训练变得相对简单。此外,利用拆解获得的子网络计算耗时补偿累加得到最终耗时预测的方式,能在训练过程中学习到编译器的算子融合技术对推理耗时的影响。

2.3　图卷积网络设计与训练

2.3.1　图卷积网络设计

本文采用 GraphConv[25] 中阐述的改进型图卷积神经网络,其单层前向的传播如下:

$$\boldsymbol{x}_i' = \delta\left(\boldsymbol{\theta}_1\boldsymbol{x}_i + \sum_{j\in N(i)}\boldsymbol{\theta}_2\boldsymbol{x}_j\right) \tag{5}$$

式中:$\boldsymbol{x}_i$ 为当前节点特征值;$N(i)$ 为邻接节点集合;$\boldsymbol{\theta}$ 为权重;$\delta(\,)$ 为非线性激活函数。

前向传播式(5)和图卷积神经网络的前向式(1)相比,所有邻边共享同一个权重 $\boldsymbol{\theta}_2$,模型参数量大幅减少,降低了过拟合的风险。除此之外,为了缓解图卷积由于深度加深导致最后一层输出节点特征相似的固有问题,本文通过级联的方式融合浅层和深层的节点特征。

具体图卷积网路的结构如图 3 所示,网络可分为 3 个部分:输入、特征提取、累加输出。输入部分将输入的卷积模型网络编码成邻接矩阵和特征矩阵。特征提取部分由 3 层 GraphConv 结构级联而成,将浅层特征与深层特征进行拼接。3 层图卷积层的节点输出维度分别是(100,100,1)。当输入节点的特征维度为 m,则 3 层图卷积输入的节点特征维度分别是(m,100 + m,200 + m)。最后一部分累加图卷积最后一层所有节点的 1 维特征作为输出。

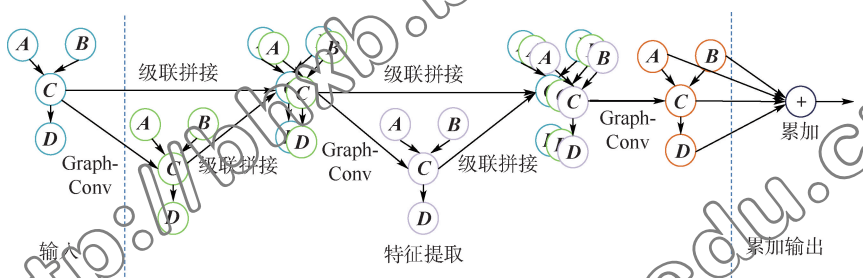


图 3　图卷积网络结构示意图

Fig. 3　Structure of graph convolution network

2.3.2　图卷积的训练

图卷积的训练包括训练集采样与训练方案设计。

根据 2.2 节所述,$G(\,)$ 仅对拆解后的子模型空间中的结构进行耗时预测,故训练集为模型空间中最大节点距离 p 的子结构集合。为了能在训练中获得式(3)中准确的单节点耗时补偿($L(N_i^{i-p}) - L(N_{i-1}^{i-p})$),本文设计了一种差分训练方案。当采样获得了 1 个子结构 N_i^{i-p},则对应配置 1 个附属子结构 N_{i-1}^{i-p}。在训练中,不仅要训练 $G(\,)$ 对整体子结构的耗时预测能力,还要训练 $G(\,)$ 对单节点耗时补偿的预测能力。故本文算法在训练时采用 2 项损失函数:

$$\text{loss}_{\text{reg}} = \left\|L(N_i^{i-p}) - G(N_i^{i-p})\right\|_2 + \left\|L(N_{i-1}^{i-p}) - G(N_{i-1}^{i-p})\right\|_2 \tag{6}$$

$$\text{loss}_{\text{diff}} = \left\|(L(N_i^{i-p}) - L(N_{i-1}^{i-p})) - G'(N_i^{i-p}, N_{i-1}^{i-p})\right\|_2 \tag{7}$$

$$\text{loss} = \alpha\cdot\text{loss}_{\text{reg}} + (1-\alpha)\cdot\text{loss}_{\text{diff}} \tag{8}$$

式中:$G(N_i^{i-p})$ 和 $G(N_{i-1}^{i-p})$ 为图网络预测的子结构总体耗时;$G'(N_i^{i-p}, N_{i-1}^{i-p})$ 为图网络预测的单节点补偿时间;α 为[0,1]之间的实数,用来调整 2 种损失函数之间的平衡;$\|\cdot\|_2$ 为二范数。

完整的训练方案如图 4 所示。

对于每一组样本对,分别做如图 4 所示的训练,训练 $G(\,)$ 对输入的图结构预测其整体耗时和最后一个节点的耗时补偿。损失函数如式(6)~式(8)所示。

为了快速获得符合要求的训练集,本文使用的采样策略如下:在模型空间中随机采集大量完整网络;遍历完整网络中符合要求的子结构和附属子结构,测试 2 个网络的实际硬件耗时,构成样本对;当遍历到某一节点时,以该节点为初始节点,向上包含所有路径长度小于 p 值的节点构成 1 个子结构。

http://bhxb.buaa.edu.cn

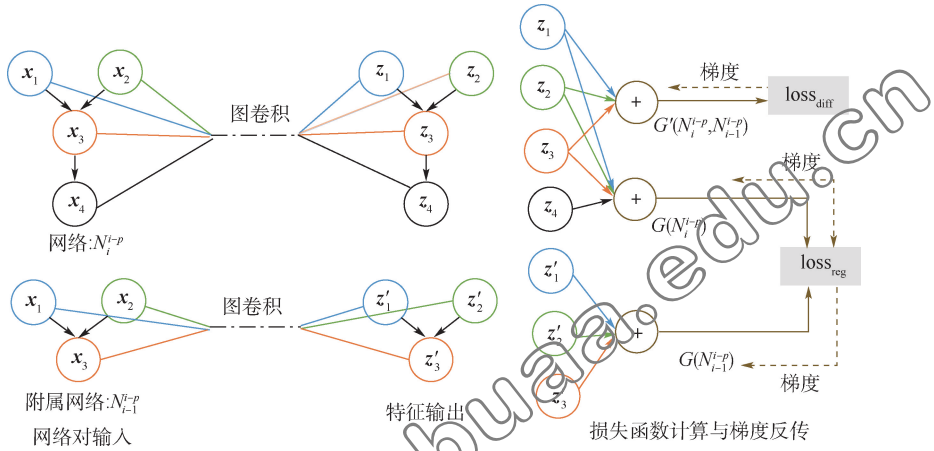


图 4 图卷积训练示意图

Fig. 4 Schematic diagram of graph convolution network training

2.3.3 耗时预测推理过程

如图 5 所示,本文算法对单个输入卷积模型进行耗时预测的完整推理过程。主要可分为 3 个步骤:

步骤 1 遍历每个节点进行网络划分,如图 5 中划分网络后得到网络 1,网络 2,…,网络 N;网络划分的规则如下,对于当前节点 i,向上包含所有路径长度小于等于式(3)中 $p+1$ 值的节点。图 5 是 $p=1$ 的情况,可以看到,节点 $i-1$ 和节点 i 得到的子网络就是在整体网络中以当前节点为初始节点向上截取了路径长度小于等于 2 的所有节点构成的网络。

步骤 2 对划分得到的子网络进行编码,得到邻接矩阵 $\boldsymbol{A}$ 和特征矩阵 $\boldsymbol{F}$,进行相应图卷积计算,得到子结构总体耗时和单节点补偿时间的预测;除第一次的子网络会将子结构总体耗时预测输出到累加器之外,其他的子网络均只将当前节点的补偿时间预测输出到累加器。如图 5 所示,假设当前节点为 $i-1$ 节点,输出到累加器的是当前节点补偿时间 t_{i-1} 即为 z_4 特征。当前节点变为 i 节点时,输出到累加器的是第 i 节点补偿时间 t_i 即为 z_5 特征。

步骤 3 累加以上预测值得到网络的整体耗时。需要说明的是,不同于之前的单节点耗时相加的算法,本文所提算法输入的是 1 个网络,输出的是节点耗时再进行累加,并包含了补偿信息,故可认为是一种整体法,能得到更加精确的整体耗时预测。

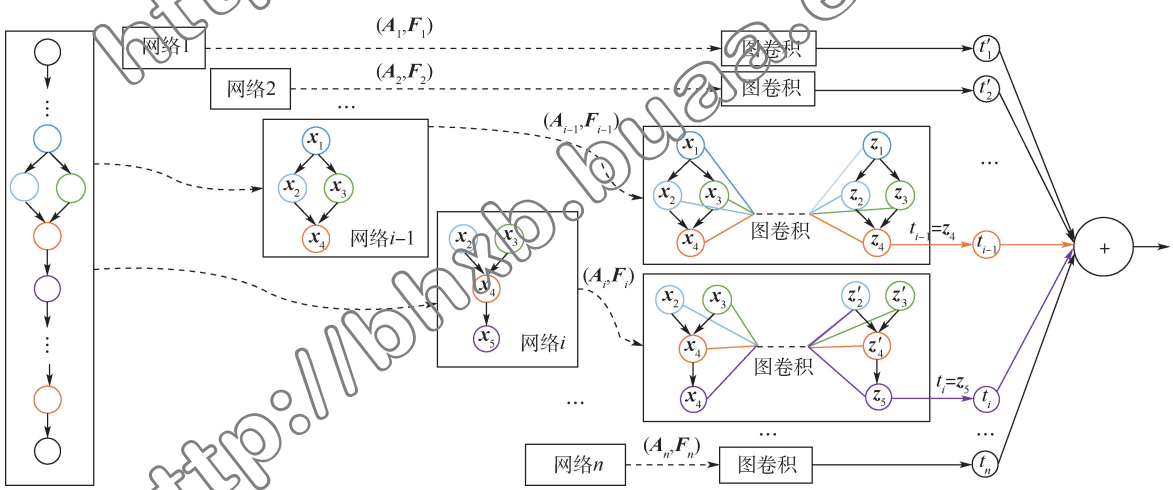


图 5 耗时预测前向示意图

Fig. 5 Procedures of latency prediction

3 实验结果与分析

3.1 实验平台

本文实验选取海思端侧硬件平台和英伟达 GPU 平台进行验证。HISI3559 平台是海思一款边缘端数字信号处理芯片,带有深度学习硬核。该硬核在编译使用时对网络推理有一定的自动优化。本文实验中 HISI3559 的编译器版本为 2.3.5。

http://bhxb.buaa.edu.cn

GPU 平台具体型号为 TeslaV100-SXM2-32GB。针对神经网络推理,英伟达公司开发了一套加速工具 TensorRT,本文实验中的 GPU 部署使用词工具对网络推理进行优化加速。

由于测量耗时存在一定理论波动,本文实验每个真值采用 10 次测试取平均值得到。

3.2　输入空间与训练集

为了验证耗时预测算法在不同输入空间的有效性,实验分别在离散空间(mobilenet block,MB)和连续空间(mobilenet block-continuous,MB-C)进行实验。离散空间和连续空间的区别在于空间中是否含有如通道数比例这种连续的变化属性。MB 提出于文献[19],借鉴了 MobileNetV2 的结构,空间由 16 个可进行类型选择的层组成,且其被分成 4 个阶段,单个阶段内,每层的输入输出分辨率相同,阶段间由下采样层连接,将分辨率降为原来的一半。具体结构如图 6 所示。图 6 中输入的图像高为 H,宽为 W,输入通道数为 C_{in}。经过1 ×1的卷积,将通道数变为原来的 e 倍,e 的取值范围为{3,6}。可分离卷积的卷积核尺寸大小可选范围为{3,5,7}。最后经过 1 ×1 卷积将输出通道数变为 C_{out}。非下采样层还会带有短接操作。每层之间可以独立选择短接操作来控制网络深度。MB-C 则是在 MB 基础上加入连续通道数的变化。通道的可变化比例为[0.35,1],每组通道数的选择范围是{1,8,16,32}。

对于耗时模型训练所需要的数据集,先在 2 个空间上各自随机采样 100 个独立模型,之后根据 2.3.2 节中所述算法采样双网络训练集。测试集为 2 个空间中各随机采样 1 000 个模型构成。

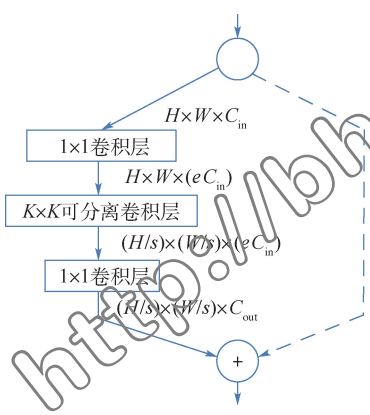


图 6　MB 空间层选项示意图

Fig. 6　Candidate operations of layers in MB space

3.3　模型训练与评估

图卷积网络训练参数如下,设置式(4)中 p 参数为 2,训练时使用 Adam 优化器。权重初始学习率为 0.01,单批次数据量为 128。总共训练迭代 1 000 轮。每 100 轮学习率下降为之前的 30%。为了多维度证明算法的有效性,实验设置了多个评价指标,包括平均相对误差(MRE)、最大相对误差(MAX)、5% 误差样本占比、10% 误差样本占比。各个指标具体介绍如下:

MRE 指标为测试集样本预测相对误差的平均值,其计算式为

$$\text{MRE} = \frac{\sum_{i=1}^{q}\left(\left|\frac{y_i - y_i'}{y_i}\right|\right)}{q} \tag{9}$$

式中:y_i 为模型的真实耗时;y_i'为算法预测耗时;q 为测试集样本数。

MAX 指标为测试集中预测的最大相对误差,其计算式为

$$\text{MAX} = \max\left(\left\{\left|\frac{y_i - y_i'}{y_i}\right|, i \in [1,q]\right\}\right) \tag{10}$$

5% 误差样本占比为测试集中预测相对误差在 5% 以内的样本数占总样本数的比例;10% 误差样本占比为模型预测相对误差在 10% 以内的样本占总测量样本的比例。

3.4　针对离散空间的耗时预测算法对比

本节实验针对 MB 空间,将本文算法和传统算法进行对比。对比算法包括单层预测累加、查表累加和基于 one-hot 编码的系列算法。其中,基于 one-hot 编码的系列算法具体包括 SVM 回归(线性核、高斯核)、贝叶斯回归、拉索回归和随机森林回归。各算法的性能测试结果如表 1所示。

本文算法(图卷积网络)在 HISI3559 上的平均相对平均误差为 0.5%,最大相对误差为 2.4%。2 种指标均超越了其他算法。在 GPU 平台上,本文算法的最大相对误差为 10.0%,优于其他算法,而平均相对误差除比拉索回归(2.8%)

表 1　离散空间耗时算法对比

Table 1　Performance comparison of algorithms in discrete search space

算法	HISI3559		GPU	
	MRE/%	MAX/%	MRE/%	MAX/%
单层预测累加	283.3	344.1	7.6	18.0
查表累加	33.3	42.4	5.8	14.2
one-hot(线性核)	3.4	18.0	3.2	13.2
one-hot(高斯核)	8.4	51.4	6.2	39.2
one-hot(贝叶斯回归)	3.3	16.3	3.2	12.8
one-hot(拉索回归)	2.4	9.7	**2.8**	12.2
one-hot(随机森林回归)	7.9	42.2	6.0	41.0
本文算法	**0.5**	**2.4**	3.1	**10.0**

注:表中黑体数据表示该指标的最佳性能。

http://bhxb.buaa.edu.cn

略低0.3%外同样优于其他算法。表1证明了基于图卷积网络的耗时预测算法在不同硬件平台上可以有效建模。从本文算法和单层预测累加算法对比中可以看出,本文算法性能的提升来自于图卷积的建模能力和耗时补偿机制的提出。

从表1中进一步发现,相比GPU平台,本文算法在HISI3559平台的精度提升更加明显,其原因可能是HISI3559的层间融合策略多于GPU。由于本文算法中耗时补偿的建模机制可以有效估计层间融合对耗时的影响,最终导致HISI3559平台上的预测精度提升比GPU平台更为显著。

3.5 针对连续空间的耗时预测算法对比

本节实验针对MB-C连续空间,将本文算法和传统算法进行对比。对比算法是单层预测累加算法。需要说明的是,由于连续变量无法使用one-hot编码,基于one-hot编码的相关算法无法应用于连续空间。另外,由于连续空间提取查表的空间过大,查表累加算法也不适用。因此,本节实验与单层预测累加算法进行对比。2种算法在不同平台上的性能如表2所示。

从表2可得,本文算法在HISI3559平台上5%误差样本占比和10%误差样本占比分别为63.8%和99.7%,性能远超单层预测累加算法的0%(所有测试样本误差均大于10%);对于MRE和MAX指标,本文算法相比单层预测累加算法的误差也降低了至少1个数量级。在GPU平台上,本文算法的性能相对单层预测耗时累加算法也有显著提高。本节实验现象表明,在HISI3559和GPU平台上,本文算法由于图编码的有效性和图卷积高效的建模能力,使其仍可以针对连续空间进行有效建模,并且性能远超单层预测累加的算法。

表2 连续空间耗时算法对比

Table 2 Performance comparison of algorithms in continuous search space

算法	平台	5%误差样本占比/%	10%误差样本占比/%	MRE/%	MRE/%
本文算法	HISI3559	63.8	99.7	5.3	13.2
	GPU	84.1	100	3.2	9.0
单层预测累加算法	HISI3559	0	0	302	392
	GPU	44.9	75.6	6.8	28.1

3.6 p 参数假设的有效性讨论

本文算法基于式(3)中的假设:单个算子执行对耗时的影响仅与其邻近的节点距离p以内的前置操作相关(p为常数)。本节以实验来讨论此假设的有效性。

选择目前主流网络MobileNetV2、IncptionV2、ResNet50。将不同的p值代入式(3)获得的预测耗时与真实耗时进行比较。实验结果如图7所示。

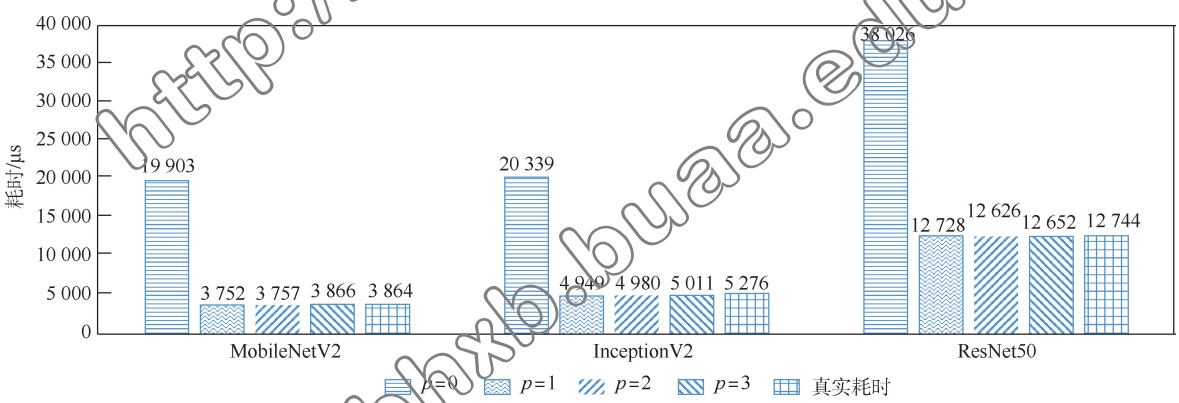


图7 不同p值得到的耗时与真值对比

Fig. 7 Comparison of latency with different p values and real latency

图7共包含3组直方图,分别表示3个不同的网络。每组直方图都存在5个纹理不同的柱形数据,柱状图高度表示相应设置获得的耗时。$p=0$指单层测量直接累加所得值。从图7中可得,$p=0$的耗时累加值和真实耗时差异巨大,说明HISI3559芯片运行时存在层间融合优化,使得整体耗时与单层耗时单纯累加差异甚远。但当$p=1$时,其耗时累加值和真实耗时的差异就大幅降低。当$p\geq1$时,这种差异仍然有所降低,但边际效益已不高。这说明HISI3559平台绝大多数的单个算子执行对耗时的影响仅与其邻近的节点距离为1以内的前置操作相关。基于本节实验现象,说明当$p\geq1$时,式(3)中的假设在HISI3559平台上是成立的,考虑到输入空间规模和耗时预测精度的权衡,在本文实验中,p设置为2。

http://bxb.buaa.edu.cn

3.7　结合图卷积网络耗时预测的网络结构搜索

将本文算法应用到多目标(精度与耗时)网络结构搜索中。实验使用 MB-C 连续空间,搜索任务针对 ImageNet100K 数据集的分类任务,将搜索目标耗时设置为4 ms。具体网络结构搜索算法为:第 1 步,借鉴文献 [26]训练超级网络来快速评估每条支路的精度;第 2 步,根据文献[27]提出的遗传算法搜索耗时接近 4 ms,且性能尽量高的模型。对比实验设置为:在其他实验条件保持相同的情况下,一个使用单层预测累加的耗时预测算法,另一个使用基于图卷积网络的耗时预测算法,对比搜索出来的网络性能。具体的实验结果如表 3 所示(硬件平台为 HISI3559)。

从表 3 可得,在保证其他搜索设置相同的情况下,使用单层预测累加算法搜索到的网络耗时为 4 256 μs。使用本文提出的耗时预测算法搜索到的网路耗时为 4 055 μs。本文算法更接近预设的目标耗时(4 000 μs),精度也没有损失。

表 3　耗时预测算法对结构搜索的作用

Table 3　Effect of latency predictor on neural architecture search

耗时预测算法	精度/%	耗时/μs
单层预测累加算法	85.0	4 256
本文算法	85.1	4 055

4　结　论

传统的耗时估计算法无法很好地同时解决硬核加速器层间融合优化的建模问题和输入空间过大导致的采样成本高的问题,为此本文提出了一种基于图卷积的耗时预测算法。主要改进如下:

1) 将网络模型编码成有向无环图,提出了基于图论的网络结构编码算法。

2) 将整体耗时模型恒等拆分成子网络对,并提出了有效的近似假设,减少了输入空间规模,降低欠拟合风险。

3) 设计了完整的图卷积网络结构,使用了浅层和深层特征融合的技术提高网络的建模能力。

4) 设计新的损失函数,有效训练图卷积回归模型。

5) 在不同网络空间和硬件平台上证明了本文算法的有效性,针对 HISI3559 平台,本文算法在 MRE、MAX、5% 误差样本占比、10% 误差样本占比 4 项指标均超过现有耗时估计算法,特别在 MB-C 连续空间上,针对 HISI3559 平台,本文算法将 MRE 从 302% 降低到 5.3% 。

6) 将本文算法与模型结构搜索算法结合,在特定硬件上搜索到既高效又高精度的模型。

本文算法能够与结构搜索、通道裁剪、量化等多种优化手段结合,对边缘侧部署模型优化有重要意义。

参考文献(References)

[1] CHOI J, WANG Z, VEN KATARAMANI S, et al. PACT: Parameterized clipping activation for quantized neural networks [EB/OL]. (2018-07-17) [2021-03-15]. https://arxiv.org/abs/1805.06085.

[2] ZHANG D, YANG J, YE D, et al. LQ-Nets: Learned quantization for highly accurate and compact deep neural networks[C]// Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2018: 365-382.

[3] CHEN T, MOREAU T, JIANG Z, et al. TVM: End-to-end optimization stack for deep learning [EB/OL]. (2018-10-05) [2021-03-15]. https://arxiv.org/abs/1802.04799.

[4] YU J, HUANG T. AutoSlim: Towards one-shot architecture search for channel numbers [EB/OL]. (2019-06-01) [2021-03-15]. https://arxiv.org/abs/1903.11728.

[5] YOU Z, YAN K, YE J, et al. Gate decorator: Global filter pruning method for accelerating deep convolutional neural networks [EB/OL]. (2019-09-18) [2021-03-15]. https://arxiv.org/abs/1909.08174.

[6] ZHANG X, ZHOU X, LIN M, et al. ShuffleNet: An extremely efficient convolutional neural network for mobile devices[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2018: 6848-6856.

[7] SANDLER M, HOWARD A, ZHU M, et al. MobileNetV2: Inverted residuals and linear bottlenecks[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2018: 4510-4520.

[8] 邱博,刘翔,石端玉,等. 一种轻量化的多目标实时检测模型[J]. 北京航空航天大学学报,2020,46(9):157-164.
QIU B, LIU X, SHI Y Y, et al. A lightweight multi-objective real-time model for detection[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(9): 157-164 (in Chinese).

[9] DENTON E, ZAREMBA W, BRUNA J, et al. Exploiting linear structure within convolutional networks for efficient evaluation [EB/OL]. (2014-06-09) [2021-03-15]. https://arxiv.org/abs/1404.0736.

[10] HAN S, MAO H, DALLY W J. Deep compression: Compressing deep neural networks with pruning, trained quantization and huffman coding [EB/OL]. (2016-02-15) [2021-03-15]. https://arxiv.org/abs/1510.00149.

[11] 陈猛夫. 基于迁移学习的暴恐图像自动识别[J]. 北京航空航天大学学报,2020,46(9):1677-1681.
CHEN M F. Automatic recognition of riot images based on transfer learning[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(9): 1677-1681 (in Chinese).

[12] 张子昊,王蓉. 基于 MobileFaceNet 网络改进的人脸识别方法[J]. 北京航空航天大学学报,2020,46(9):1756-1762.
ZHANG Z H, WANG R. An improved face recognition method based on MobileFaceNet network[J]. Journal of Beijing Univer-

http://bhxb.buaa.edu.cn

sity of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(9): 1756-1762 (in Chinese).

[13] REN S, HE K, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks[EB/OL]. (2016-01-06)[2021-03-05]. https://arxiv.org/abs/1506.01497.

[14] 岳邦铮,韩松. 基于改进 Faster R-CNN 的 SAR 船舶目标检测方法[J]. 计算机与现代化,2019(9):90-95.
YUE B Z, HAN S. SAR ship target detector with improved Faster R-CNN[J]. Computer and Modernization, 2019(9): 90-95 (in Chinese).

[15] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: Single shot multibox detector[C]// Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2016: 21-37.

[16] 曹帅,张晓伟,马健伟. 基于跨尺度特征聚合网络的多尺度行人检测[J]. 北京航空航天大学学报,2020(46(9)):1786-1796.
CAO S, ZHANG X W, MA J W. Multi-scale pedestrian detection based on cross-scale feature aggregation networks[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(9): 1786-1796 (in Chinese).

[17] SIMONYAN K, ZISSERMAN A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[EB/OL]. (2015-04-10)[2021-03-15]. https://arxiv.org/abs/1409.1556.

[18] ZEILER M D, FERGUS R. Visualizing and understanding convolutional networks[C]// Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2014: 818-833.

[19] ZHONG Z, YAN J, WU W, et al. Practical block-wise neural network architecture generation[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2018: 2423-2432.

[20] TAN M, CHEN B, PANG R, et al. MnasNet: Platform-aware neural architecture search for mobile[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2019: 2820-2828.

[21] WU B, DAI X, ZHANG P, et al. FBNet: Hardware-aware efficient convnet design via differentiable neural architecture search[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2019: 10734-10742.

[22] CAI H, ZHU L, HAN S. ProxylessNAS: Direct neural architecture search on target task and hardware[EB/OL]. (2019-02-23)[2021-03-15]. https://arxiv.org/abs/1812.00332.

[23] ZHANG L L, YANG Y, JIANG Y, et al. Fast hardware-aware neural architecture search[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2020: 692-693.

[24] KIPF T N, WELLING M. Semi-supervised classification with graph convolutional networks[EB/OL]. (2017-02-22)[2021-03-15]. https://arxiv.org/abs/1609.02907.

[25] MORRIS C, RITZERT M, FEY M, et al. Weisfeiler and Leman go neural: Higher-order graph neural networks[C]// Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. Menlo Park: AAAI Press, 2019: 4602-4609.

[26] GUO Z, ZHANG X, MU H, et al. Single path one-shot neural architecture search with uniform sampling[C]// Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2020: 544-560.

[27] MICHEL G, ALAOUI M A, LEBOIS A, et al. DVOLVER: Efficient pareto-optimal neural network architecture search[EB/OL]. (2019-02-05)[2021-03-15]. https://arxiv.org/abs/1902.01654.

http://bhxb.buaa.edu.cn

A graph convolution network based latency prediction algorithm for convolution neural network

LI Zheyang[1], ZHANG Ruyi[1], TAN Wenming[1,2,*], REN Ye[1], LEI Ming[1], WU Hao[1]

(1. Hangzhou Hikvision Digital Technology Co., Ltd., Hangzhou 310051, China;
2. Hangzhou Hikvision System Technology Co., Ltd., Hangzhou 310051, China)

Abstract: Obtaining the inference latency of a convolution neural network (CNN) via learnable prediction algorithm have attracted more attention. Existing latency predictors suffer from two major problems. First, the high complexity of CNN design space requires tremendous cost of data collection. Second, traditional algorithms fail to accurately model the effect of the hardware complier's operator fusion on latency. To solve these problems, this paper proposes a latency predictor based on graph convolution network (GCN). This algorithm regards the latency of a complete network as accumulation of multi-node latency compensation, and utilizes graph convolution to model the effect caused by operator fusion. Furthermore, we propose a differential training algorithm to reduce the size of input space and improve the generalization of the algorithm. Experiments on HISI3559 in MB-C continuous search space show that our algorithm can reduce the average relative error from 302% to 5.3%. In addition, replacing the traditional latency predictor with the proposed predictor enables neural architecture search algorithms to find high precision networks with latency closer to the target.

Keywords: latency prediction; graph convolution network; deep learning; neural architecture search; model deployment

http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2021-03-29; **Accepted**: 2021-06-06; **Published online**: 2021-06-29 16:57
URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210629.1503.001.html
Foundation item: National Key R & D Program of China (2018YFC0807706)
* **Corresponding author**. E-mail: tanwenming@hikvision.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0137

湿热环境中含脱层复合材料层合板的界面裂纹扩展

夏飞，薛江红*，何赞航，金福松
（暨南大学 力学与建筑工程学院，广州 510632）

摘 要：处于恶劣湿热环境中的复合材料层合结构，受湿热残余应变和残余应力的作用，易产生局部屈曲和分层扩展。考虑湿热效应和脱层间接触效应的影响，对含脱层复合材料中厚板的非线性屈曲和界面裂纹扩展行为进行了理论分析。基于可动边界变分原理，建立层合板在湿-热-力载荷作用下的总势能，并推导出非线性后屈曲控制方程和脱层扩展能量释放率。应用摄动法和 Galerkin 法求解控制方程，获得以面内压缩载荷-挠度曲线为特征的含脱层复合材料层合板的后屈曲路径。根据求得的后屈曲解及 Griffith 断裂准则，确定脱层扩展临界压力的理论解。通过开发 MATLAB 程序，综合讨论了脱层尺寸、湿热环境对脱层复合材料层合板屈曲和扩展载荷的影响。研究结果与 ABAQUS 有限元解和经典理论解进行比较，验证了理论分析的有效性。结果表明：湿热环境会显著降低脱层复合材料层合板的屈曲载荷和扩展载荷。此外，忽略复合材料层合板的横向剪切应变将导致对层合板承载能力的高估。

关 键 词：一阶剪切变形理论；湿热环境；能量释放率；非线性后屈曲；脱层
中图分类号：TB332
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2022)12-2460-13

纤维增强复合材料是由高强度、高刚度的纤维作为增强材料，与基体材料进行模压、缠绕等方式形成宏观上具有新性能的材料。相对于传统材料，纤维增强复合材料具有比强度高、耐腐蚀性好、可设计性好等优点，在机械化工、航空航天等众多领域得到广泛应用。对于复合材料层合结构，在加工使用过程中极易出现损伤，层间脱层是复合材料层合板壳结构的一种常见缺陷或损伤形式，主要发生在层板的界面上。层合板壳结构发生脱层扩展的根本原因是脱层前沿处的应力累积，由于前沿处应力场分布的奇异性，作为层间断裂韧性表征量的临界应变能量释放率得到广泛应用[1]。同时，环境中温度和湿度的改变也会在复合材料层合板内部产生湿热应力，削弱层合板的承载能力。因此，分析湿热环境中复合材料层合板结构在压缩荷载下的非线性后屈曲、脱层扩展等力学行为，是一项极具工程意义的工作。

关于含脱层复合材料层合板壳的非线性力学研究，Chai 等[2]最先提出一维穿透脱层分析模型，研究脱层层合板的整体失稳。刘述伦等[3]讨论了含有贯穿脱层复合材料层合板的力学性能与湿度和温度之间的关系，并给出了屈曲问题的解答。周宇等[4]考虑含纤维搭桥的影响，建立了用挠度和应力函数表示的正交各向异性材料矩形脱层屈曲非线性方程组。李萍等[5]考虑接触效应，研究了单向铺设的层合梁的非线性后屈曲路径。Köllner 和 Völlmecke[6-7]提出了一种分析模型，该模型仅用广义坐标就可模拟层合板的后屈曲行为

收稿日期：2021-03-24；**录用日期**：2021-05-03；**网络出版时间**：2021-07-06 08:48
网络出版地址：kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210705.1516.004.html
基金项目：广东省自然科学基金（2021A1515012037）
*通信作者. E-mail：txuej@jnu.edu.cn

引用格式：夏飞，薛江红，何赞航，等. 湿热环境中含脱层复合材料层合板的界面裂纹扩展[J]. 北京航空航天大学学报，2022，48(12)：2460-2472. XIA F，XUE J H，HE Z H，et al. Interfacial crack growth of delaminated composite laminates under hygro-thermal environment[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2022，48(12)：2460-2472(in Chinese).

和分层损伤。文献[2-7]都是基于经典板壳理论,忽略板在横向界面处由于剪力引起的横向剪切变形,由于层合板/壳对横向剪切变形很敏感[8],由此发展出适用于中厚板的剪切变形理论。基于一阶剪切变形理论(first order shear deformation theory, FSDT)及分层理论,Nikrad 等[9]研究了含集合缺陷的复合材料层合板的后屈曲行为,并与有限元结果进行了对比验证。同样考虑 FSDT,Wang 等[10]研究了含椭圆分层的复合材料层合板的压缩破坏,所建立的模型与实验结果一致。Shabanijafroudi 和 Ganesan[11]则给出了一种新的脱层模型数学建模方法,与有限元的算例验证中证明该方法可以降低求解的计算量。

复合材料层合板的脱层扩展一般分为:Ⅰ型张开、Ⅱ型滑移和Ⅲ型撕裂。Pereira 和 Morais[12]建立梁模型计算能量释放率,并结合实验和虚拟裂纹闭合技术,分析了复合材料层合结构的Ⅰ+Ⅱ混合型层间断裂。郑伟玲和郑龙席[13]发展了一种通过位移来计算 3 点弯曲梁模型中裂纹能量释放率的方法。任雷和盛冬发[14]建立了二维有限元模型,分析了单向纤维增强复合材料板 I 型裂纹的尖端应力场。Tay 等[15]综合使用扩展有限元(extended finite element method, XFEM)和内聚力单元(cohesive element, CE),模拟了复合材料渐进损伤过程 3D 分层和基体开裂及两者之间的相互作用。邓健等[16]基于经典层合板理论及双线性黏聚区本构关系,提出一种 I-II 混合型断裂的裂纹扩展理论模型。

文献[12-16]关于界面裂纹的研究大多基于实验和有限元仿真,从模型受载和边界的形式来看,研究主要集中于双悬臂梁(double cantilever beam, DCB)、端部切口弯曲(end notched flexture, ENF)、混合模式弯曲(mixed mode bending, MMB)层合试件,对于承受面内荷载作用的含初始脱层层合板裂纹扩展的理论研究还不多。为了深入探讨含脱层复合材料层合结构的承载能力,Xue 等[17-19]开展了系列研究,详细讨论了接触效应与模态解的关系,并提出由于接触的存在,含脱层层合板呈现的是整体一致的屈曲模态和后屈曲变形,在面内压缩荷载作用下,含脱层层合板发生Ⅱ型面内滑移扩展,研究表明,脱层界面发生扩展的主要原因是层间剪应力的累积,也与后屈曲阶段横向剪力和剪切变形的增加有关。本文基于 FSDT,分析了承受轴压作用的复合材料层合板在脱层界面的裂纹扩展行为。建立含脱层复合材料层合板的四分区模型,考虑环境湿热和脱层界面的接触效应的影响,推导脱层复合材料层合板在湿-热-力载荷作用下的总势能,并求解非线性后屈曲的控制方程。结合断裂力学中的断裂准则,给出脱层扩展的能量释放率表达式,并进一步求得脱层界面发生扩展时的临界压缩载荷。通过开发 MATLAB 程序代码进行数值计算,讨论了脱层几何尺寸和湿热环境对复合材料层合板承载能力的影响。

1　基本理论

1.1　数学模型

考虑一含初始贯穿脱层的复合材料矩形中厚板,其长为 a、宽为 b、高为 h,由厚度为 h_0 的单层板以一定角度铺设黏合而成。边界条件为四边简支,左右两侧受轴向压缩荷载 N_x 的作用。为便于分析,将脱层复合材料层合板模型简化为可计算的四分区数学模型,如图 1 所示。脱层长度为 L_2,与上表面的距离为 h_2,脱层左前沿与左边界的距离为 L_1,由此将模型分为 4 个层板,分别记为子层合板 $\Omega^{(i)}$,$i=1,2,3,4$。随着纵向压缩载荷的增加,脱层前沿裂纹将扩展 δn_i,各子层合板的边界及尺寸也随之发生变化。

假设层合板在发生变形时 y-z 横截面和 x-z 横截面的转动角度分别为 $\phi_x^{(i)}$ 和 $\phi_y^{(i)}$,则考虑 FSDT

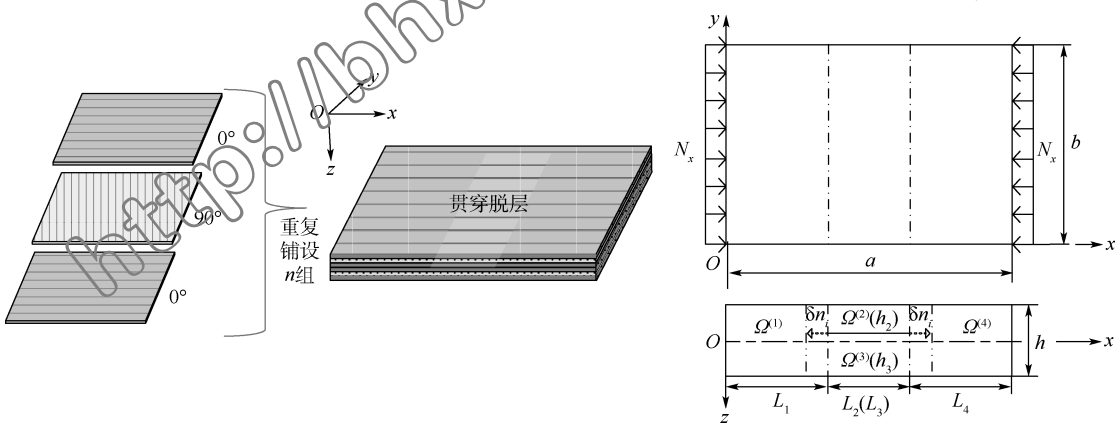


图 1　含脱层复合材料层合板的四分区模型

Fig. 1　Four region modeling of delaminated composite laminates

http://bhxb.buaa.edu.cn

的层合板的位移场 $u^{(i)}$、$v^{(i)}$、$w^{(i)}$ 为

$$\begin{cases} u^{(i)} = u_0^{(i)} + z\phi_x^{(i)} \\ v^{(i)} = v_0^{(i)} + z\phi_y^{(i)} \\ w^{(i)} = w_0^{(i)} \end{cases} \tag{1}$$

式中：$u_0^{(i)}$、$v_0^{(i)}$、$w_0^{(i)}$ 为板的中面位移；ϕ_x、ϕ_y 分别为 x 方向、y 方向上的转角函数。用 $[\boldsymbol{e}_0^{(i)}]$ 表示板的中面应变，$[\boldsymbol{\kappa}^{(i)}]$ 表示板内任一点相对中面的曲率改变，用简化形式表达偏导运算（如 $\partial w^{(i)}/\partial x = w_{,x}^{(i)}$，所有的下标“，”为求偏导，下文同）。板的大挠度非线性几何关系可以表示为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^{(i)} \\ \varepsilon_y^{(i)} \\ \gamma_{xy}^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_x^{(i)} + z\kappa_x^{(i)} \\ e_y^{(i)} + z\kappa_y^{(i)} \\ e_{xy}^{(i)} + z\kappa_{xy}^{(i)} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \gamma_{xz}^{(i)} \\ \gamma_{yz}^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{,x}^{(i)} + \phi_x^{(i)} \\ w_{,y}^{(i)} + \phi_y^{(i)} \end{bmatrix} \end{cases} \tag{2}$$

式中：

$$\begin{cases} [\boldsymbol{e}_0^{(i)}] = \begin{bmatrix} u_{0,x}^{(i)} + (w_{,x}^{(i)})^2/2 \\ v_{0,y}^{(i)} + (w_{,y}^{(i)})^2/2 \\ u_{0,y}^{(i)} + v_{0,x}^{(i)} + w_{,x}^{(i)} \cdot w_{,y}^{(i)} \end{bmatrix} \\ [\boldsymbol{\kappa}^{(i)}] = \begin{bmatrix} \phi_{x,x}^{(i)} \\ \phi_{y,y}^{(i)} \\ \phi_{x,y}^{(i)} + \phi_{y,x}^{(i)} \end{bmatrix} \end{cases} \tag{3}$$

在湿热环境中，层合板的应力场分布受到湿热力和机械力的共同影响，用 $[\boldsymbol{N}^{(i)}]_{\mathrm{E}}$（$N_x^{(i)}$、$N_y^{(i)}$、$N_{xy}^{(i)}$）$_{\mathrm{E}}$ 和 $[\boldsymbol{M}^{(i)}]_{\mathrm{E}}$（$M_x^{(i)}$、$M_y^{(i)}$、$M_{xy}^{(i)}$）$_{\mathrm{E}}$ 分别表示层合板的总薄膜内力和总弯矩，即

$$\begin{bmatrix} [\boldsymbol{N}^{(i)}]_{\mathrm{E}} \\ [\boldsymbol{M}^{(i)}]_{\mathrm{E}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\boldsymbol{N}^{(i)}] \\ [\boldsymbol{M}^{(i)}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\boldsymbol{N}^{(i)}]_{\mathrm{T}} \\ [\boldsymbol{M}^{(i)}]_{\mathrm{T}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\boldsymbol{N}^{(i)}]_{\mathrm{H}} \\ [\boldsymbol{M}^{(i)}]_{\mathrm{H}} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中：$[\boldsymbol{N}^{(i)}]$ 和 $[\boldsymbol{M}^{(i)}]$ 分别为机械内力和内力矩；$[\boldsymbol{N}^{(i)}]_{\mathrm{T}}$ 和 $[\boldsymbol{M}^{(i)}]_{\mathrm{T}}$ 分别为热内力和热力矩；$[\boldsymbol{N}^{(i)}]_{\mathrm{H}}$ 和 $[\boldsymbol{M}^{(i)}]_{\mathrm{H}}$ 分别为湿内力和湿力矩。

湿热内力和内力矩为[20]

$$[\boldsymbol{N}^{(i)}]_{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} N_x^{(i)} \\ N_y^{(i)} \\ N_{xy}^{(i)} \end{bmatrix}_{\mathrm{T}} = \sum_{k=1}^{K_i} [\overline{\boldsymbol{Q}}^{(k)}] \begin{bmatrix} \alpha_x^{(k)} \\ \alpha_y^{(k)} \\ \alpha_{xy}^{(k)} \end{bmatrix} \Delta T(z_k - z_{k-1}) \tag{5}$$

$$[\boldsymbol{N}^{(i)}]_{\mathrm{H}} = \begin{bmatrix} N_x^{(i)} \\ N_y^{(i)} \\ N_{xy}^{(i)} \end{bmatrix}_{\mathrm{H}} = \sum_{k=1}^{K_i} [\overline{\boldsymbol{Q}}^{(k)}] \begin{bmatrix} \beta_x^{(k)} \\ \beta_y^{(k)} \\ \beta_{xy}^{(k)} \end{bmatrix} \Delta C(z_k - z_{k-1}) \tag{6}$$

$$[\boldsymbol{M}^{(i)}]_{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} M_x^{(i)} \\ M_y^{(i)} \\ M_{xy}^{(i)} \end{bmatrix}_{\mathrm{T}} = \sum_{k=1}^{K_i} [\overline{\boldsymbol{Q}}^{(k)}] \begin{bmatrix} \alpha_x^{(k)} \\ \alpha_y^{(k)} \\ \alpha_{xy}^{(k)} \end{bmatrix} \Delta T(z_k^2 - z_{k-1}^2) \tag{7}$$

$$[\boldsymbol{M}^{(i)}]_{\mathrm{H}} = \begin{bmatrix} M_x^{(i)} \\ M_y^{(i)} \\ M_{xy}^{(i)} \end{bmatrix}_{\mathrm{H}} = \sum_{k=1}^{K_i} [\overline{\boldsymbol{Q}}^{(k)}] \begin{bmatrix} \beta_x^{(k)} \\ \beta_y^{(k)} \\ \beta_{xy}^{(k)} \end{bmatrix} \Delta C(z_k^2 - z_{k-1}^2) \tag{8}$$

设 $[\boldsymbol{\sigma}]$ 为应力分量，$[\boldsymbol{\varepsilon}]$ 为应变分量，则有

$$\begin{bmatrix} [\boldsymbol{N}^{(i)}]_{\mathrm{E}} \\ [\boldsymbol{M}^{(i)}]_{\mathrm{E}} \end{bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} [\boldsymbol{\sigma}] \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ z \end{bmatrix} \mathrm{d}z = \int_{-t/2}^{t/2} [\overline{\boldsymbol{Q}}^{(k)}][\boldsymbol{\varepsilon}] \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ z \end{bmatrix} \mathrm{d}z \tag{9}$$

式中：$[\overline{\boldsymbol{Q}}^{(k)}]$ 为层合板第 k 层偏轴的折减刚度系数矩阵；z_k 为第 k 层的 z 坐标；ΔT 和 ΔC 分别为温度的改变量和湿度的改变量；K_i 为层合板的总铺设层数；$\alpha^{(k)}$（$\partial_x^{(k)}$、$\partial_y^{(k)}$、$\partial_{xy}^{(k)}$）和 $\beta^{(k)}$（$\beta_x^{(k)}$、$\beta_y^{(k)}$、$\beta_{xy}^{(k)}$）分别为层合板第 k 层在平面坐标系下偏轴的热膨胀系数和湿膨胀系数，有[20]

$$\begin{bmatrix} \overline{Q}_{11}^{(k)} \\ \overline{Q}_{12}^{(k)} \\ \overline{Q}_{22}^{(k)} \\ \overline{Q}_{16}^{(k)} \\ \overline{Q}_{26}^{(k)} \\ \overline{Q}_{66}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^4\theta & 2\cos^2\theta\sin^2\theta & \sin^4\theta & 4\cos^2\theta\sin^2\theta \\ \cos^2\theta\sin^2\theta & \cos^4\theta + \sin^4\theta & \cos^2\theta\sin^2\theta & -4\cos^2\theta\sin^2\theta \\ \sin^4\theta & 2\cos^2\theta\cos^2\theta & \cos^4\theta & 4\cos^2\theta\sin^2\theta \\ \cos^3\theta\sin\theta & \cos\theta\sin^3\theta - \cos^3\theta\sin\theta & -\cos\theta\sin^3\theta & -2\cos\theta\sin\theta(\cos^2\theta - \sin^2\theta) \\ \cos\theta\sin^3\theta & \cos^3\theta\sin\theta - \cos\theta\sin^3\theta & -\cos^3\theta\sin\theta & 2\cos\theta\sin\theta(\cos^2\theta - \sin^2\theta) \\ \cos^2\theta\sin^2\theta & -2\cos^2\theta\sin^2\theta & \cos^2\theta\sin^2\theta & (\cos^2\theta - \sin^2\theta)^2 \end{bmatrix}.$$

$$\begin{bmatrix} Q_{11} \\ Q_{12} \\ Q_{22} \\ Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{Q}_{44}^{(k)} \\ \overline{Q}_{45}^{(k)} \\ \overline{Q}_{55}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta \\ -\cos\theta\sin\theta & \cos\theta\sin\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{44} \\ Q_{55} \end{bmatrix} \tag{10}$$

http://bhxb.buaa.edu.cn

$$\begin{bmatrix}\alpha_x^{(k)}\\ \alpha_y^{(k)}\\ \alpha_{xy}^{(k)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos^2\theta & \sin^2\theta\\ \sin^2\theta & \cos^2\theta\\ 2\cos\theta\sin\theta & -2\cos\theta\sin\theta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\alpha_1\\ \alpha_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\beta_x^{(k)}\\ \beta_y^{(k)}\\ \beta_{xy}^{(k)}\end{bmatrix}=$$

$$\begin{bmatrix}\cos^2\theta & \sin^2\theta\\ \sin^2\theta & \cos^2\theta\\ 2\cos\theta\sin\theta & -2\cos\theta\sin\theta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\beta_1\\ \beta_2\end{bmatrix} \tag{11}$$

其中:θ 为铺设角;α_1、α_2为热膨胀系数,β_1、β_2为湿膨胀系数,均由实验测得;单层板的折减刚度系数的各分量为

$$\begin{cases}Q_{11}=\dfrac{E_{11}}{1-\mu_{12}\mu_{21}}\\ Q_{22}=\dfrac{E_{22}}{1-\mu_{12}\mu_{21}}\\ Q_{12}=\mu_{12}Q_{22}\\ Q_{44}=G_{23}\\ Q_{55}=G_{13}\\ Q_{66}=G_{12}\end{cases} \tag{12}$$

式中:E_{11}、E_{22}分别为材料在 1、2 弹性主方向上的弹性模量;G_{12}为材料在 1-2 平面内的剪切弹性模量;μ_{12}和μ_{21}为泊松比。

由式(2)和式(9),得到湿热环境中正交对称铺设的层合板的本构关系为

$$\begin{bmatrix}N_x^{(i)}\\ N_y^{(i)}\\ N_{xy}^{(i)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A_{11}^{(i)} & A_{12}^{(i)} & 0\\ A_{12}^{(i)} & A_{22}^{(i)} & 0\\ 0 & 0 & A_{66}^{(i)}\end{bmatrix}\left(\begin{bmatrix}e_x^{(i)}\\ e_y^{(i)}\\ e_{xy}^{(i)}\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}N_x^{(i)}\\ N_y^{(i)}\\ N_{xy}^{(i)}\end{bmatrix}_{\mathrm{T}}-\begin{bmatrix}N_x^{(i)}\\ N_y^{(i)}\\ N_{xy}^{(i)}\end{bmatrix}_{\mathrm{H}}\right) \tag{13}$$

$$\begin{bmatrix}M_x^{(i)}\\ M_y^{(i)}\\ M_{xy}^{(i)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}D_{11}^{(i)} & D_{12}^{(i)} & 0\\ D_{12}^{(i)} & D_{22}^{(i)} & 0\\ 0 & 0 & D_{66}^{(i)}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\kappa_x^{(i)}\\ \kappa_y^{(i)}\\ \kappa_{xy}^{(i)}\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}M_x^{(i)}\\ M_y^{(i)}\\ M_{xy}^{(i)}\end{bmatrix}_{\mathrm{T}}-\begin{bmatrix}M_x^{(i)}\\ M_y^{(i)}\\ M_{xy}^{(i)}\end{bmatrix}_{\mathrm{H}} \tag{14}$$

$$\begin{bmatrix}Q_x^{(i)}\\ Q_y^{(i)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A_{44}^{(i)} & A_{45}^{(i)}\\ A_{45}^{(i)} & A_{55}^{(i)}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\gamma_{xz}^{(i)}\\ \gamma_{yz}^{(i)}\end{bmatrix} \tag{15}$$

式中:$Q_x^{(i)}$ 和 $Q_y^{(i)}$ 分别为 x 方向和 y 方向的剪力;拉伸刚度系数矩阵$[\boldsymbol{A}^{(i)}]$($A_{11}^{(i)}\sim A_{66}^{(i)}$)和弯曲刚度系数矩阵$[\boldsymbol{D}^{(i)}]$($D_{11}^{(i)}\sim D_{66}^{(i)}$)分别为

$$\begin{cases}[\boldsymbol{A}^{(i)}]=\sum_{k=1}^{K_i}[\overline{\boldsymbol{Q}}^{(k)}](z_k-z_{k-1})\\ [\boldsymbol{D}^{(i)}]=\dfrac{1}{3}\sum_{k=1}^{K_i}[\overline{\boldsymbol{Q}}^{(k)}](z_k^3-z_{k-1}^3)\end{cases} \tag{16}$$

层合板在发生面外弯曲变形时,脱层界面处的上子板 $\Omega^{(2)}$ 和下子板 $\Omega^{(3)}$ 之间受到一对相互作用的接触力 q^* 作用,导致上下子板 $\Omega^{(2)}$ 和 $\Omega^{(3)}$ 之间载荷的重新分配。用线弹簧模型模拟层间接触力与上下子板弯形 $w^{(2)}$ 和 $w^{(3)}$ 的关系[17]:

$$q^*=k_{\mathrm{e}}(w^{(2)}-w^{(3)}) \tag{17}$$

式中:接触系数 k_{e} 为

$$k_{\mathrm{e}}=\frac{2E_{22}}{h} \tag{18}$$

1.2　能量分析

静力平衡状态下,含脱层复合材料层合板所受的外力功为

$$W=\sum_{i=1}^{4}\int_{C^{(i)}}\sum_{j=1}^{5}\boldsymbol{P}_j^{(i)}\boldsymbol{u}_j^{(i)}\,\mathrm{d}C^{(i)} \tag{19}$$

式中:$C^{(i)}$ 为子板 $\Omega^{(i)}$ 的边界;$\boldsymbol{P}_j^{(i)}$ 和 $\boldsymbol{u}_j^{(i)}$ 分别为子板 $\Omega^{(i)}$ 边界上的广义外力和广义位移,可以表示为

$$[P_1^{(i)},P_2^{(i)},P_3^{(i)},P_4^{(i)},P_5^{(i)}]=[N_x^{(i)},N_y^{(i)},M_x^{(i)},M_y^{(i)},Q^{(i)}] \tag{20}$$

$$[u_1^{(i)},u_2^{(i)},u_3^{(i)},u_4^{(i)},u_5^{(i)}]=[u^{(i)},v^{(i)},\phi_x^{(i)},\phi_y^{(i)},w^{(i)}] \tag{21}$$

在湿-热-力载荷的共同作用下,含脱层复合材料层合板内的弹性势能为

$$U=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{4}\iint_{\Omega^{(i)}}\{[\boldsymbol{e}^{(i)}]^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{N}^{(i)}]_{\mathrm{E}}+[\boldsymbol{\kappa}^{(i)}]^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{M}^{(i)}]_{\mathrm{E}}\}\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{22}$$

设脱层发生的虚扩展为 δn_i,系统内总势能改变量的变分形式 $\delta\Pi$ 为

$$\delta\Pi=\sum_{i=1}^{4}\iint_{\Omega^{(i)}}\{[[\boldsymbol{N}^{(i)}]_{\mathrm{E}}]^{\mathrm{T}}\delta[\boldsymbol{e}^{(i)}]+[[\boldsymbol{M}^{(i)}]_{\mathrm{E}}]^{\mathrm{T}}\delta[\boldsymbol{\kappa}^{(i)}]+q^{(i)}\delta w^{(i)}\}\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y+\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{4}\iint_{\Omega^{(i)}}[[\boldsymbol{N}^{(i)}]_{\mathrm{E}}]^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{e}^{(i)}]+[[\boldsymbol{M}^{(i)}]_{\mathrm{E}}]^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{\kappa}^{(i)}]\}\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y-\sum_{i=1}^{4}\int_{C^{(i)}}\sum_{j=1}^{5}\boldsymbol{P}_j^{(i)}\delta\boldsymbol{u}_j^{(i)}\big|_{C^{(i)}}\,\mathrm{d}C^{(i)} \tag{23}$$

本文分析的是受轴向压缩载荷作用的复合材料层合板,考虑到复合材料层合板较弱的层间属性及初始脱层的存在,故假定裂纹的扩展路径是在脱层前沿处沿着层间方向发展。根据可动边界变分原理,在动边界上的广义位移 $\boldsymbol{u}_j^{(i)}$($j=1,2,\cdots,5$)的变分形式为

$$\begin{cases}\delta\boldsymbol{u}_j^{(i)}\big|_{C^{(i)}}=\delta\boldsymbol{u}_j^{(i)}\big|_{C^{(i)}}-\left.\dfrac{\partial\boldsymbol{u}_j^{(i)}}{\partial n_i}\right|_{C^{(i)}}\delta n_i\\ \delta\boldsymbol{u}_{j,x}^{(i)}\big|_{C^{(i)}}=\delta\boldsymbol{u}_{j,x}^{(i)}\big|_{C^{(i)}}-\left.\dfrac{\partial\boldsymbol{u}_{j,x}^{(i)}}{\partial n_i}\right|_{C^{(i)}}\delta n_i\\ \delta\boldsymbol{u}_{j,y}^{(i)}\big|_{C^{(i)}}=\delta\boldsymbol{u}_{j,y}^{(i)}\big|_{C^{(i)}}-\left.\dfrac{\partial\boldsymbol{u}_{j,y}^{(i)}}{\partial n_i}\right|_{C^{(i)}}\delta n_i\end{cases} \tag{24}$$

式中:δn_i为脱层扩展的方向,用 δn 表示脱层前沿边界发生正方向扩展,则有

http://bhxb.buaa.edu.cn

$$\begin{cases}\delta n_1 = \delta n_4 = -\delta n \\ \delta n_2 = \delta n_3 = \delta n\end{cases} \tag{25}$$

将式(24)和式(25)代入式(23)后,系统总势能改变量的变分 $\delta\Pi$ 可拆分为 2 部分:

$$\delta\Pi = \delta\Pi_1 + \delta\Pi_2 \tag{26}$$

式中:

$$\begin{aligned}\delta\Pi_1 = &-\sum_{i=1}^{4}\iint_{\Omega^{(i)}}\{([N_{x,x}^{(i)}]_{\mathrm{E}}+[N_{xy,y}^{(i)}]_{\mathrm{E}})\delta u^{(i)}+\\&([N_{y,y}^{(i)}]_{\mathrm{E}}+[N_{xy,x}^{(i)}]_{\mathrm{E}})\delta v^{(i)}+([M_{x,x}^{(i)}]_{\mathrm{E}}+\\&[M_{xy,y}^{(i)}]_{\mathrm{E}}-Q_x^{(i)})\delta\phi_x^{(i)}+([M_{xy,x}^{(i)}]_{\mathrm{E}}+[M_{y,y}^{(i)}]_{\mathrm{E}}-\\&Q_y^{(i)})\delta\phi_y^{(i)}+([N_{x,x}^{(i)}]_{\mathrm{E}}w_{,x}^{(i)}+[N_x^{(i)}]_{\mathrm{E}}w_{,xx}^{(i)}+\\&[N_{y,y}^{(i)}]_{\mathrm{E}}w_{,y}^{(i)}+[N_y^{(i)}]_{\mathrm{E}}w_{,yy}^{(i)}+[N_{xy,x}^{(i)}]_{\mathrm{E}}w^{(i)}+\\&q^{(i)}+2[N_{xy}^{(i)}]_{\mathrm{E}}w_{,xy}^{(i)}+[N_{xy,y}^{(i)}]_{\mathrm{E}}w_{,x}^{(i)}+Q_{x,x}^{(i)}+\\&Q_{y,y}^{(i)})\delta w^{(i)}\}\mathrm{d}x\mathrm{d}y+\sum_{i=1}^{4}\int_{C^{(i)}}\{([N_x^{(i)}]_{\mathrm{E}}\delta(u^{(i)}|_{C^{(i)}})+\\&[N_{xy}^{(i)}]_{\mathrm{E}}\delta(v^{(i)}|_{C^{(i)}})+[M_x^{(i)}]_{\mathrm{E}}\delta(\phi_x^{(i)}|_{C^{(i)}})+\\&[M_{xy}^{(i)}]_{\mathrm{E}}\delta(\phi_y^{(i)}|_{C^{(i)}})+([N_x^{(i)}]_{\mathrm{E}}w_{,x}^{(i)}+\\&[N_{xy}^{(i)}]_{\mathrm{E}}w_{,y}^{(i)}+Q_x^{(i)})\delta(w^{(i)}|_{C^{(i)}}))l_i+\\&([N_y^{(i)}]_{\mathrm{E}}\delta(v^{(i)}|_{C^{(i)}})+[N_{xy}^{(i)}]_{\mathrm{E}}\delta(u^{(i)}|_{C^{(i)}})+\\&[M_y^{(i)}]_{\mathrm{E}}\delta(\phi_y^{(i)}|_{C^{(i)}})+[M_{xy}^{(i)}]_{\mathrm{E}}\delta(\phi_x^{(i)}|_{C^{(i)}})+\\&([N_y^{(i)}]_{\mathrm{E}}w_{,y}^{(i)}+[N_{xy}^{(i)}]_{\mathrm{E}}w_{,x}^{(i)}+\\&Q_y^{(i)})\delta(w^{(i)}|_{C^{(i)}}))m_i\}\mathrm{d}C^{(i)}-\\&\sum_{i=1}^{4}\int_{C^{(i)}}\sum_{j=1}^{5}\boldsymbol{P}_j^{(i)}\delta\boldsymbol{u}_j^{(i)}|_{C^{(i)}}\mathrm{d}C^{(i)}\end{aligned} \tag{27}$$

$$\begin{aligned}\delta\Pi_2 = -\sum_{i=1}^{4}\int_{C^{(i)}}&\left\{\left([N_x^{(i)}]_{\mathrm{E}}\frac{\partial u^{(i)}}{\partial n_i}\Big|_{C^{(i)}}+[N_{xy}^{(i)}]_{\mathrm{E}}\frac{\partial v^{(i)}}{\partial n_i}\Big|_{C^{(i)}}+\right.\right.\\&[M_x^{(i)}]_{\mathrm{E}}\frac{\partial\phi_x^{(i)}}{\partial n_i}\Big|_{C^{(i)}}+[M_{xy}^{(i)}]_{\mathrm{E}}\frac{\partial\phi_y^{(i)}}{\partial n_i}\Big|_{C^{(i)}}+\\&([N_x^{(i)}]_{\mathrm{E}}w_{,x}^{(i)}+[N_{xy}^{(i)}]_{\mathrm{E}}w_{,y}^{(i)}+Q_x^{(i)})\frac{\partial w^{(i)}}{\partial n_i}\Big|_{C^{(i)}}\Big)l_i+\\&\left([N_y^{(i)}]_{\mathrm{E}}\frac{\partial v^{(i)}}{\partial n_i}\Big|_{C^{(i)}}+[N_{xy}^{(i)}]_{\mathrm{E}}\frac{\partial u_i}{\partial n_i}\Big|_{C^{(i)}}+\right.\\&[M_y^{(i)}]_{\mathrm{E}}\frac{\partial\phi_y^{(i)}}{\partial n_i}\Big|_{C^{(i)}}+[M_{xy}^{(i)}]_{\mathrm{E}}\frac{\partial\phi_x^{(i)}}{\partial n_i}\Big|_{C^{(i)}}+\\&([N_y^{(i)}]_{\mathrm{E}}w_{,y}^{(i)}+[N_{xy}^{(i)}]_{\mathrm{E}}w_{,x}^{(i)}+\\&\left.\left.Q_y^{(i)})\frac{\partial w^{(i)}}{\partial n_i}\Big|_{C^{(i)}}\right)m_i\right\}\delta n_i\mathrm{d}C^{(i)}+\\&\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{4}\int_{C^{(i)}}\left\{[N_x^{(i)}]_{\mathrm{E}}\left[w_{,x}^{(i)}+\frac{1}{2}(w_{,x}^{(i)})^2\right]+\right.\\&Q_x^{(i)}[w_{,x}^{(i)}+\phi_x^{(i)}]+[N_{xy}^{(i)}]_{\mathrm{E}}[u_{,y}^{(i)}+v_{,x}^{(i)}+\\&w_{,x}^{(i)}w_{,y}^{(i)}]+Q_y^{(i)}[w_{,y}^{(i)}+\phi_y^{(i)}]+\\&[N_y^{(i)}]_{\mathrm{E}}\left[v_{,y}^{(i)}+\frac{1}{2}(w_{,y}^{(i)})^2\right]+[M_x^{(i)}]_{\mathrm{E}}\phi_{x,x}^{(i)}+\\&\left.[M_y^{(i)}]_{\mathrm{E}}\phi_{y,y}^{(i)}+[M_{xy}^{(i)}]_{\mathrm{E}}[\phi_{x,y}^{(i)}+\phi_{y,x}^{(i)}]\right\}\delta n_i\mathrm{d}C^{(i)}\end{aligned} \tag{28}$$

式中:l_i 和 m_i 分别为子板 $\Omega^{(i)}$ 的边界法线在 x 轴和 y 轴上的方向余弦。对于本文的模型,层间裂纹的扩展方向只会沿着 x 轴,故 m_i 应取为 0。$\delta\Pi_1$ 是脱层边界不变时,脱层板系统的势能改变量,根据虚功原理,系统保持静态平衡的必要条件为

$$\delta\Pi_1 = 0 \tag{29}$$

$\delta\Pi_2$ 为脱层板在动边界上发生扩展时的总能量变化量。从图 1 中可以看出,由于模型的对称性,层合板位移函数 u、v 和转角函数 ϕ_x 是 x 坐标的奇函数,转角函数 ϕ_y 是 y 坐标的奇函数,位移函数 w 是 x、y 坐标的偶函数;同时左右两边脱层前沿处的扩展能量变化相同,故脱层板在发生扩展时的总能量变化量 $\delta\Pi$ 可以简化为

$$\delta\Pi = \delta\Pi_2 = -2\sum_{i=1}^{3}\int_{C^{(i)}}((Q_x^{(i)}w_{,x}^{(i)}l_i\delta n_i)|_{x=L_1})\mathrm{d}C^{(i)} \tag{30}$$

相对应的,脱层板在发生扩展时的总面积变化量为

$$\begin{aligned}\delta A = &\sum_{i=1}^{4}\int_{C^{(i)}}(\delta n_i)\mathrm{d}C^{(i)} = \\&2\sum_{i=1}^{3}\int_{C^{(i)}}(\delta n_i|_{x=L_1})\mathrm{d}C^{(i)} = 2\times 2b\delta n\end{aligned} \tag{31}$$

根据能量释放率的定义,本文分析的受压脱层板在脱层前沿处的能量释放率为

$$G = \frac{\sum_{i=1}^{3}\int_{C^{(i)}}((Q_x^{(i)}w_{,x}^{(i)}l_i\delta n_i)|_{x=L_1})\mathrm{d}C^{(i)}}{2b\delta n} \tag{32}$$

1.3 静态平衡方程及定解条件

对于承受压缩荷载作用的含脱层层合板,式(27)和式(29)中给出了脱层板在静态平衡下的基本控制方程和边界连续性条件。根据弹性力学知识,首先引入应力函数 $\boldsymbol{\Phi}$,有

$$[N_x^{(i)}\quad N_y^{(i)}\quad N_{xy}^{(i)}]^{\mathrm{T}} = [\boldsymbol{\Phi}_{,yy}^{(i)}\quad \boldsymbol{\Phi}_{,xx}^{(i)}\quad -\boldsymbol{\Phi}_{,xy}^{(i)}]^{\mathrm{T}} \tag{33}$$

将式(33)代入式(29),得到用位移函数 $w^{(i)}$ 和转角函数 $\phi_x^{(i)}$ 和 $\phi_y^{(i)}$ 表示的脱层板的非线性控制方程组:

$$\begin{cases}(D_{12}^{(i)}+D_{66}^{(i)})\phi_{x,xy}^{(i)}+D_{66}^{(i)}\phi_{y,xx}^{(i)}+D_{22}^{(i)}\phi_{y,yy}^{(i)}-\\\quad A_{44}^{(i)}(w_{,y}^{(i)}+\phi_y^{(i)})=0\\(D_{12}^{(i)}+D_{66}^{(i)})\phi_{y,xy}^{(i)}+D_{66}^{(i)}\phi_{x,yy}^{(i)}+D_{11}^{(i)}\phi_{x,xx}^{(i)}-\\\quad A_{55}^{(i)}(w_{,x}^{(i)}+\phi_x^{(i)})=0\\A_{55}^{(i)}(w_{,xx}^{(i)}+\phi_{x,x}^{(i)})+A_{44}^{(i)}(w_{,yy}^{(i)}+\phi_{y,y}^{(i)})-\boldsymbol{\Phi}_{,yy}^{(i)}w_{,xx}^{(i)}-\\\quad\boldsymbol{\Phi}_{,xx}^{(i)}w_{,yy}^{(i)}+2\boldsymbol{\Phi}_{,xy}^{(i)}w_{,xy}^{(i)}-([N_x^{(i)}]_{\mathrm{T}}+[N_x^{(i)}]_{\mathrm{H}})w_{,xx}^{(i)}-\\\quad([N_y^{(i)}]_{\mathrm{T}}+[N_y^{(i)}]_{\mathrm{H}})w_{,yy}^{(i)}-2([N_{xy}^{(i)}]_{\mathrm{T}}+\\\quad[N_{xy}^{(i)}]_{\mathrm{H}})w_{,xy}^{(i)}-\eta^{(i)}k_{\mathrm{e}}(w^{(2)}-w^{(3)})=0\\A_{11}^{(i)*}\boldsymbol{\Phi}_{,yyyy}^{(i)}+2(A_{12}^{(i)*}+1/(2A_{66}^{(i)*}))\boldsymbol{\Phi}_{,xxyy}^{(i)}+\\\quad A_{22}^{(i)*}\boldsymbol{\Phi}_{,xxxx}^{(i)}=(w_{,xy}^{(i)})^2-w_{,xx}^{(i)}w_{,yy}^{(i)}\end{cases} \tag{34}$$

同时,脱层板的边界条件为四边简支。结合

http://bhxb.buaa.edu.cn

板在脱层前沿处的连续性条件,求解上述静态控制方程组的定解条件如下。

在 $y=0$ 处,

$$w^{(i)}=0,\phi_x^{(1)}=0,M_y^{(i)}=0,N_y^{(i)}=0,N_{xy}^{(i)}=0 \tag{35a}$$

在 $y=b$ 处,

$$w^{(i)}=0,\phi_x^{(4)}=0,M_y^{(i)}=0,N_y^{(i)}=0,N_{xy}^{(i)}=0 \tag{35b}$$

在 $x=0$ 处,

$$w^{(1)}=0,\phi_y^{(1)}=0,M_x^{(1)}=0,N_x^{(1)}=N_x,N_{xy}^{(1)}=0 \tag{35c}$$

在 $x=a$ 处,

$$w^{(4)}=0,\phi_y^{(4)}=0,M_x^{(4)}=0,N_x^{(4)}=N_x,N_{xy}^{(4)}=0 \tag{35d}$$

在 $x=L_1$ 处($i=1$)和 $x=L_1+L_2$ 处($i=4$),

$$\begin{cases}u^{(i)}=u^{(2)}=u^{(3)}\\ v^{(i)}=v^{(2)}=v^{(3)}\\ w^{(i)}=w^{(2)}=w^{(3)}\\ w_{,x}^{(i)}=w_{,x}^{(2)}=w_{,x}^{(3)}\\ \phi_x^{(i)}=\phi_x^{(2)}=\phi_x^{(3)}\\ \phi_y^{(i)}=\phi_y^{(2)}=\phi_y^{(3)}\\ M_x^{(i)}=M_x^{(2)}+M_x^{(3)}\\ N_x^{(i)}=N_x^{(2)}+N_x^{(3)}\\ N_{xy}^{(i)}=N_{xy}^{(2)}+N_{xy}^{(3)}\end{cases} \tag{36}$$

2　摄动求解

求解非线性控制方程式(34)的精确解比较困难,本文提供一种数值解法——小参数摄动法进行求解。为方便摄动运算,引入如下形式的无量纲参数:

$$\begin{cases}\bar{x}^{(i)}=\dfrac{x^{(i)}}{L_i},\bar{y}^{(i)}=\dfrac{y^{(i)}}{b},\bar{w}^{(i)}=\dfrac{w^{(i)}}{h_0},\alpha_i=\dfrac{h_0}{L_i}\\ \beta=\dfrac{h_0}{b},\bar{D}_{ij}^{(i)}=\dfrac{D_{ij}^{(i)}}{A_{22}^{(i)}h_0^2},\bar{\Phi}^{(i)}=\dfrac{\Phi^{(i)}}{A_{22}^{(i)}h_0^2},\phi_x^{(i)}=\dfrac{h_0}{L_i}\bar{\phi}_x^{(i)}\\ \phi_y^{(i)}=\dfrac{h_0}{b}\bar{\phi}_y^{(i)},\bar{A}_{ij}^{(i)}=\dfrac{A_{ij}^{(i)}}{A_{22}^{(i)}},\bar{A}_{ij}^{(i)*}=A_{ij}^{(i)}A_{22}^{(i)}\\ \bar{k}_e=k_e\dfrac{h_0^2}{A_{22}^{(i)}},\bar{\tau}_i=\dfrac{h_i}{h_0},\bar{N}_x^{(i)}=\dfrac{N_x^{(i)}b^2}{A_{22}^{(i)}h_0^2}\\ [\bar{N}_x^{(i)}]_T=\dfrac{[N_x^{(i)}]_Tb^2}{A_{22}^{(i)}h_0^2},[\bar{N}_x^{(i)}]_H=\dfrac{[N_x^{(i)}]_Hb^2}{A_{22}^{(i)}h_0^2}\\ [\bar{N}_y^{(i)}]_T=\dfrac{[N_y^{(i)}]_TL_i^2}{A_{22}^{(i)}h_0^2},[\bar{N}_y^{(i)}]_H=\dfrac{[N_y^{(i)}]_HL_i^2}{A_{22}^{(i)}h_0^2}\\ [\bar{N}_{xy}^{(i)}]_T=\dfrac{[N_{xy}^{(i)}]_TL_ib}{A_{22}^{(i)}h_0^2},[\bar{N}_{xy}^{(i)}]_H=\dfrac{[N_{xy}^{(i)}]_HL_ib}{A_{22}^{(i)}h_0^2}\end{cases} \tag{37}$$

将式(37)代入式(34)~式(36)中,得到无量纲形式的控制方程和定解条件。选取 $\bar{w}_0$($\bar{w}_0=w_{max}/h$)为摄动小参数,对式(34)中所有变量进行如下形式的摄动展开:

$$\begin{cases}\bar{w}^{(i)}=\bar{w}_1^{(i)}(\bar{x},\bar{y})\bar{w}_0+\bar{w}_3^{(i)}(\bar{x},\bar{y})\bar{w}_0^3+\cdots\\ \bar{\Phi}^{(i)}=\bar{\Phi}_0^{(i)}(\bar{x},\bar{y})+\bar{\Phi}_2^{(i)}(\bar{x},\bar{y})\bar{w}_0^2+\cdots\\ \bar{\phi}_x^{(i)}=\bar{\phi}_{x1}^{(i)}(\bar{x},\bar{y})\bar{w}_0+\bar{\phi}_{x3}^{(i)}(\bar{x},\bar{y})\bar{w}_0^3+\cdots\\ \bar{\phi}_y^{(i)}=\bar{\phi}_{y1}^{(i)}(\bar{x},\bar{y})\bar{w}_0+\bar{\phi}_{y3}^{(i)}(\bar{x},\bar{y})\bar{w}_0^3+\cdots\\ \bar{N}_x=\bar{N}_{cr}+\bar{N}_{2h}(\bar{x},\bar{y})\bar{w}_0^2+\cdots\end{cases} \tag{38}$$

式中:$\bar{N}_{cr}$ 和 $\bar{N}_{2h}$ 分别为脱层板的无量纲屈曲载荷和无量纲后屈曲增量。

把摄动展开式(38)代入无量纲后的控制方程式(34)及定解条件式(35)和式(36)中,得到关于 $\bar{w}_0$ 的多项式,根据 $\bar{w}_0$ 的阶次依次提取一阶、二阶和更高阶的控制方程,并逐次进行求解。本文主要求解前两阶方程,对应求得脱层板的屈曲解和后屈曲响应。将式(37)和式(38)代入式(34)中,按照 $\bar{w}_0$ 的阶次合并同类项,其中一阶摄动方程为

$$\begin{cases}\alpha_i^2(\bar{D}_{12}^{(i)}+\bar{D}_{66}^{(i)})\bar{\phi}_{x1,\bar{x}\bar{y}}^{(i)}+\alpha_i^2\bar{D}_{66}^{(i)}\bar{\phi}_{y1,\bar{x}\bar{x}}^{(i)}+\beta^2\bar{D}_{22}^{(i)}\bar{\phi}_{y1,\bar{y}\bar{y}}^{(i)}-\\ \quad\bar{A}_{44}^{(i)}(\bar{w}_{1,\bar{y}}^{(i)}+\bar{\phi}_{y1}^{(i)})=0\\ \beta^2(\bar{D}_{12}^{(i)}+\bar{D}_{66}^{(i)})\bar{\phi}_{y1,\bar{x}\bar{y}}^{(i)}+\beta^2\bar{D}_{66}^{(i)}\bar{\phi}_{x1,\bar{y}\bar{y}}^{(i)}+\alpha_i^2\bar{D}_{11}^{(i)}\bar{\phi}_{x1,\bar{x}\bar{x}}^{(i)}-\\ \quad\bar{A}_{55}^{(i)}(\bar{w}_{1,\bar{x}}^{(i)}+\bar{\phi}_{x1})=0\\ \alpha_i^2\bar{A}_{55}^{(i)}(\bar{w}_{1,\bar{x}\bar{x}}^{(i)}+\bar{\phi}_{x1,\bar{x}}^{(i)})+\beta^2\bar{A}_{44}^{(i)}(\bar{w}_{1,\bar{y}\bar{y}}^{(i)}+\bar{\phi}_{y1,\bar{y}}^{(i)})+\\ \quad\eta^{(i)}\bar{q}^*-\alpha_i^2\beta^2(\bar{\tau}_i\bar{N}_{cr}+[\bar{N}_x^{(i)}]_T+[\bar{N}_x^{(i)}]_H)\cdot\\ \quad\bar{w}_{1,\bar{x}\bar{x}}^{(i)}-\alpha_i^2\beta^2([\bar{N}_y^{(i)}]_T+[\bar{N}_y^{(i)}]_H)\bar{w}_{1,\bar{y}\bar{y}}^{(i)}=0\end{cases} \tag{39}$$

设四边简支板的一阶摄动方程的位移函数 $\bar{w}_1^{(i)}$ 和转角函数 $\bar{\phi}_{x1}^{(i)}$、$\bar{\phi}_{y1}^{(i)}$ 为

$$\begin{cases}\bar{w}_1^{(i)}=\bar{F}^{(i)}e^{r^{(i)}\bar{x}}\sin(n\pi\bar{y})\\ \bar{\phi}_{x1}^{(i)}=\bar{F}_x^{(i)}e^{r^{(i)}\bar{x}}\sin(n\pi\bar{y})\\ \bar{\phi}_{y1}^{(i)}=\bar{F}_y^{(i)}e^{r^{(i)}\bar{x}}\cos(n\pi\bar{y})\end{cases} \tag{40}$$

式中:$\bar{F}^{(i)}$、$\bar{F}_x^{(i)}$、$\bar{F}_y^{(i)}$ 为振幅系数;$r^{(i)}$ 为模态参数。

由于接触力的存在,子板 $\Omega^{(2)}$ 和子板 $\Omega^{(3)}$ 的控制方程是耦合方程,需要一起求解。将式(40)代入式(39),得到

$$\begin{bmatrix}\bar{\delta}_{11}^{(i)}&\bar{\delta}_{12}^{(i)}&\bar{\delta}_{13}^{(i)}\\ \bar{\delta}_{21}^{(i)}&\bar{\delta}_{22}^{(i)}&\bar{\delta}_{23}^{(i)}\\ \bar{\delta}_{31}^{(i)}&\bar{\delta}_{32}^{(i)}&\bar{\delta}_{33}^{(i)}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\bar{F}_x^{(i)}\\ \bar{F}_y^{(i)}\\ \bar{F}^{(i)}\end{bmatrix}=0 \tag{41}$$

$$\begin{bmatrix}\bar{\delta}_{11}^{(2)}&\bar{\delta}_{12}^{(2)}&\bar{\delta}_{13}^{(2)}&0&0&0\\ \bar{\delta}_{21}^{(2)}&\bar{\delta}_{22}^{(2)}&\bar{\delta}_{23}^{(2)}&0&0&0\\ \bar{\delta}_{31}^{(2)}&\bar{\delta}_{32}^{(2)}&\bar{\delta}_{33}^{(2)}-\bar{k}_e&&&\bar{k}_e\\ 0&0&0&\bar{\delta}_{11}^{(3)}&\bar{\delta}_{12}^{(3)}&\bar{\delta}_{13}^{(3)}\\ 0&0&0&\bar{\delta}_{21}^{(3)}&\bar{\delta}_{22}^{(3)}&\bar{\delta}_{23}^{(3)}\\ &&\bar{k}_e&\bar{\delta}_{31}^{(3)}&\bar{\delta}_{32}^{(3)}&\bar{\delta}_{33}^{(3)}-\bar{k}_e\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\bar{F}_x^{(2)}\\ \bar{F}_y^{(2)}\\ \bar{F}^{(2)}\\ \bar{F}_x^{(3)}\\ \bar{F}_y^{(3)}\\ \bar{F}^{(3)}\end{bmatrix} \tag{42}$$

http://bhxb.buaa.edu.cn

式中：系数 $\bar{\delta}^{(i)}$ 为

$$\begin{cases}\bar{\delta}_{11}^{(i)} = \alpha_i^2(\bar{D}_{12}^{(i)} + \bar{D}_{66}^{(i)})n\pi r^{(i)}\\ \bar{\delta}_{12}^{(i)} = \bar{D}_{66}^{(i)}(\alpha_i r^{(i)})^2 - \bar{D}_{22}^{(i)}(n\pi\beta)^2 - \bar{A}_{44}^{(i)}\\ \bar{\delta}_{13}^{(i)} = -\bar{A}_{44}^{(i)}n\pi\\ \bar{\delta}_{31}^{(i)} = \alpha_i^2\bar{A}_{55}^{(i)}r^{(i)}\\ \bar{\delta}_{23}^{(i)} = -\bar{A}_{55}^{(i)}r^{(i)}\\ \bar{\delta}_{32}^{(i)} = -\beta^2\bar{A}_{44}^{(i)}n\pi\\ \bar{\delta}_{21}^{(i)} = \bar{D}_{11}^{(i)}(\alpha_i r^{(i)})^2 - \bar{D}_{66}^{(i)}(n\pi\beta)^2 - \bar{A}_{55}^{(i)}\\ \bar{\delta}_{22}^{(i)} = -\beta^2(\bar{D}_{12}^{(i)} + \bar{D}_{66}^{(i)})n\pi r^{(i)}\\ \bar{\delta}_{33}^{(i)} = \bar{A}_{55}^{(i)}(\alpha_i r^{(i)})^2 - \bar{A}_{44}^{(i)}(n\pi\beta)^2 + \\ \quad (n\pi\alpha_i\beta)^2([\bar{N}_y^{(i)}]_{\mathrm{T}} + [\bar{N}_y^{(i)}]_{\mathrm{H}}) - \\ \quad \alpha_i^2\beta^2\bar{\tau}_i(\bar{N}_{\mathrm{cr}} + [\bar{N}_x^{(i)}]_{\mathrm{T}} + [\bar{N}_x^{(i)}]_{\mathrm{H}})(r^{(i)})^2\end{cases} \tag{43}$$

式(41)和式(42)成立的必要条件是其系数矩阵等于0，由此得到关于模态参数 $r^{(i)}$ 的特征方程：

$$\begin{cases}(r^{(i)})^6 + \dfrac{\bar{\varsigma}_4^{(i)}}{\bar{\varsigma}_6^{(i)}}(r^{(i)})^4 + \dfrac{\bar{\varsigma}_2^{(i)}}{\bar{\varsigma}_6^{(i)}}(r^{(i)})^2 + \\ \quad \dfrac{\bar{\varsigma}_0^{(i)}}{\bar{\varsigma}_6^{(i)}} = 0(\Omega^{(1)}\&\Omega^{(4)})\\ (r^{(i)})^{12} + \dfrac{\bar{\varsigma}_{10}^{(i)}}{\bar{\varsigma}_{12}^{(i)}}(r^{(i)})^{10} + \dfrac{\bar{\varsigma}_8^{(i)}}{\bar{\varsigma}_{12}^{(i)}}(r^{(i)})^8 + \dfrac{\bar{\varsigma}_6^{(i)}}{\bar{\varsigma}_{12}^{(i)}}(r^{(i)})^6 + \\ \quad \dfrac{\bar{\varsigma}_4^{(i)}}{\bar{\varsigma}_{12}^{(i)}}(r^{(i)})^4 + \dfrac{\bar{\varsigma}_2^{(i)}}{\bar{\varsigma}_{12}^{(i)}}(r^{(i)})^2 + \dfrac{\bar{\varsigma}_0^{(i)}}{\bar{\varsigma}_{12}^{(i)}} = \\ \quad 0(\Omega^{(2)}\&\Omega^{(3)})\end{cases} \tag{44}$$

式中：$\bar{\varsigma}^{(i)}$ 由系数 $\bar{\delta}^{(i)}$ 组成。

用复数根的形式表示模态参数 $r^{(i)}$ 为

$$\begin{cases}r_k^{(i)} = \alpha_k^{(i)} + \mathrm{i}\beta_k^{(i)} \quad k = 1,\cdots,2,N_r^{(i)}\\ N_r^{(i)} = \begin{cases}6 & i = 1,4\\ 12 & i = 2,3\end{cases}\end{cases} \tag{45}$$

将式(45)代入式(40)，得到只包含了24个未知待定系数 $\bar{F}_1^{(1)}\cdots\bar{F}_6^{(1)}$，$\bar{F}_1^{(2)}\cdots\bar{F}_{12}^{(2)}$，$\bar{F}_1^{(4)}\cdots\bar{F}_6^{(4)}$ 的一阶摄动解：

$$\begin{cases}\bar{w}_1^{(i)} = \sum_{k=1}^{N_r^{(i)}}\bar{F}_k^{(i)}e^{\alpha_k^{(i)}\bar{x}}[\sin(\beta_k^{(i)}\bar{x}) + \\ \quad \cos(\beta_k^{(i)}\bar{x})]\sin(n\pi\bar{y})\\ \bar{\phi}_{x1}^{(i)} = \sum_{k=1}^{N_r^{(i)}}\bar{F}_k^{(i)}e^{\alpha_k^{(i)}\bar{x}}[\widehat{C1}_k^{(i)}\sin(\beta_k^{(i)}\bar{x}) + \\ \quad \widehat{C2}_k^{(i)}\cos(\beta_k^{(i)}\bar{x})]\sin(n\pi\bar{y})\\ \bar{\phi}_{y1}^{(i)} = \sum_{k=1}^{N_r^{(i)}}\bar{F}_k^{(i)}e^{\alpha_k^{(i)}\bar{x}}[\widehat{C3}_k^{(i)}\sin(\beta_k^{(i)}\bar{x}) + \\ \quad \widehat{C4}_k^{(i)}\cos(\beta_k^{(i)}\bar{x})]\cos(n\pi\bar{y})\end{cases} \tag{46}$$

式中：系数 $\widehat{C1}_k^{(i)}$、$\widehat{C2}_k^{(i)}$、$\widehat{C3}_k^{(i)}$、$\widehat{C4}_k^{(i)}$ 代表振幅系数 $\bar{F}_x^{(i)}$、$\bar{F}_y^{(i)}$ 与 $\bar{F}^{(i)}$ 之间的关系。

将式(46)代入式(39)的前两式，即可确定其值：

$$\begin{pmatrix}\widehat{C1}_k^{(i)}\\ \widehat{C2}_k^{(i)}\\ \widehat{C3}_k^{(i)}\\ \widehat{C4}_k^{(i)}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\bar{a}_{k1}^{(i)} & \bar{b}_{k1}^{(i)} & \bar{c}_{k1}^{(i)} & \bar{d}_{k1}^{(i)}\\ -\bar{b}_{k1}^{(i)} & \bar{a}_{k1}^{(i)} & -\bar{d}_{k1}^{(i)} & \bar{c}_{k1}^{(i)}\\ \bar{a}_{k2}^{(i)} & \bar{b}_{k2}^{(i)} & \bar{c}_{k2}^{(i)} & \bar{d}_{k2}^{(i)}\\ -\bar{b}_{k2}^{(i)} & \bar{a}_{k2}^{(i)} & -\bar{d}_{k2}^{(i)} & \bar{c}_{k2}^{(i)}\end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix}\bar{A}_{44}^{(i)}n\pi\\ \bar{A}_{44}^{(i)}n\pi\\ \bar{A}_{55}^{(i)}(\alpha_k^{(i)} - \beta_k^{(i)})\\ \bar{A}_{55}^{(i)}(\alpha_k^{(i)} + \beta_k^{(i)})\end{pmatrix} \tag{47}$$

式中：

$$\begin{cases}\bar{a}_{k1}^{(i)} = \alpha_i^2 n\pi\alpha_k^{(i)}(\bar{D}_{12}^{(i)} + \bar{D}_{66}^{(i)})\\ \bar{b}_{k1}^{(i)} = -\alpha_i^2 n\pi\beta_k^{(i)}(\bar{D}_{12}^{(i)} + \bar{D}_{66}^{(i)})\\ \bar{c}_{k1}^{(i)} = \alpha_i^2\bar{D}_{66}^{(i)}((\alpha_k^{(i)})^2 - (\beta_k^{(i)})^2) - \\ \quad \beta^2\bar{D}_{22}^{(i)}(n\pi)^2 - \bar{A}_{44}^{(i)}\\ \bar{d}_{k1}^{(i)} = -2\alpha_i^2\bar{D}_{66}^{(i)}\alpha_k^{(i)}\beta_k^{(i)}\\ \bar{b}_{k2}^{(i)} = -2\alpha_i^2\bar{D}_{11}^{(i)}\alpha_k^{(i)}\beta_k^{(i)}\\ \bar{a}_{k2}^{(i)} = \alpha_i^2\bar{D}_{11}^{(i)}((\alpha_k^{(i)})^2 - (\beta_k^{(i)})^2) - \\ \quad \beta^2\bar{D}_{66}^{(i)}(n\pi)^2 - \bar{A}_{55}^{(i)}\\ \bar{c}_{k2}^{(i)} = -\beta^2 n\pi\alpha_k^{(i)}(\bar{D}_{12}^{(i)} + \bar{D}_{66}^{(i)})\\ \bar{d}_{k2}^{(i)} = \beta^2 n\pi\beta_k^{(i)}(\bar{D}_{12}^{(i)} + \bar{D}_{66}^{(i)})\end{cases} \tag{48}$$

将式(46)代入无量纲后的定解条件式(35)和式(36)中，建立下面的齐次方程组：

$$[\boldsymbol{R}(\bar{N}_{\mathrm{cr}})]\cdot [\bar{F}_1^{(1)}\cdots\bar{F}_6^{(1)},\bar{F}_1^{(2)}\cdots\bar{F}_{12}^{(2)},\bar{F}_1^{(4)}\cdots\bar{F}_6^{(4)}]^{\mathrm{T}} = 0 \tag{49}$$

式中：$[\boldsymbol{R}(\bar{N}_{\mathrm{cr}})]$ 为一个 24×24 的系数矩阵。

式(49)成立的必要条件是系数矩阵等于0，即

$$|\boldsymbol{R}(\bar{N}_{\mathrm{cr}})| = 0 \tag{50}$$

式(50)为最终确定脱层板的无量纲屈曲荷载 $\bar{N}_{\mathrm{cr}}$ 的求解公式，通过代入不同的材料参数和几何参数即可得出相应情况下脱层板的临界屈曲荷载 $\bar{N}_{\mathrm{cr}}$。此外，通过联立式(49)和条件 $\bar{w}_1^{(2)}(1/2,1/2)=1$，即可求得24个待定系数 $[\bar{F}_1^{(1)}\cdots\bar{F}_6^{(1)},\bar{F}_1^{(2)}\cdots\bar{F}_{12}^{(2)},\bar{F}_1^{(4)}\cdots\bar{F}_6^{(4)}]^{\mathrm{T}}$，从而确定式(46)。二阶摄动方程为

$$\beta^4\bar{A}_{11}^{(i)*}\bar{\boldsymbol{\Phi}}_{2,\bar{y}\bar{y}\bar{y}\bar{y}}^{(i)} + \alpha_i^2\beta^2(2\bar{A}_{12}^{(i)*} + \bar{A}_{66}^{(i)*})\bar{\boldsymbol{\Phi}}_{2,\bar{x}\bar{x}\bar{y}\bar{y}}^{(i)} + \alpha^4\bar{A}_{22}^{*}\bar{\boldsymbol{\Phi}}_{2,\bar{x}\bar{x}\bar{x}\bar{x}}^{(i)} = \alpha_i^2\beta^2((\bar{w}_{1,\bar{x}\bar{y}}^{(i)})^2 - \bar{w}_{1,\bar{x}\bar{x}}^{(i)}\bar{w}_{1,\bar{y}\bar{y}}^{(i)}) \tag{51}$$

假设二阶摄动方程的形式解为

$$\bar{\boldsymbol{\Phi}}_2^{(i)} = \bar{\boldsymbol{\Phi}}_{2p}^{(i)} + \bar{\boldsymbol{\Phi}}_{2h}^{(i)} \tag{52}$$

式中：$\bar{\boldsymbol{\Phi}}_{2h}^{(i)}$ 为应力函数的通解；$\bar{\boldsymbol{\Phi}}_{2p}^{(i)}$ 为应力函数的

http://bhxb.buaa.edu.cn

特解。

$$\overline{\boldsymbol{\Phi}}_{2p}^{(i)}=\left\{\left[\sum_{k=1}^{N_r^{(i)}}e^{\alpha_k^{(i)}\bar{x}}(P_{k-1}^{(i)}\sin(\beta_k^{(i)}\bar{x})+P_{k-2}^{(i)}\cos(\beta_k^{(i)}\bar{x}))\right]\cdot\left[\sum_{k=1}^{N_r^{(i)}}e^{\alpha_k^{(i)}\bar{x}}(P_{k-3}^{(i)}\sin(\beta_k^{(i)}\bar{x})+P_{k-4}^{(i)}\cos(\beta_k^{(i)}\bar{x}))\right]\right\}\cos^2(n\pi\bar{y})+\left\{\left[\sum_{k=1}^{N_r^{(i)}}e^{\alpha_k^{(i)}\bar{x}}(P_{k-5}^{(i)}\sin(\beta_k^{(i)}\bar{x})+P_{k-6}^{(i)}\cos(\beta_k^{(i)}\bar{x}))\right]\cdot\left[\sum_{k=1}^{N_r^{(i)}}e^{\alpha_k^{(i)}\bar{x}}(P_{k-7}^{(i)}\sin(\beta_k^{(i)}\bar{x})+P_{k-8}^{(i)}\cos(\beta_k^{(i)}\bar{x}))\right]\right\}\sin^2(n\pi\bar{y})\tag{53}$$

$$\overline{\boldsymbol{\Phi}}_{2h}^{(i)}=\bar{\tau}_i\overline{N}_{2h}\bar{y}^2\tag{54}$$

将式(46)代入式(51),并根据方程左右一一对应关系可确定式(53),其中,$P_{k-}^{(i)}$ 为相关系数。通解需要用 Galerkin 方程进行求解:

$$\sum_{i=1}^{4}\iint_{\Omega^{(i)}}\overline{Q}_i(\bar{w})\bar{f}_i(\bar{x},\bar{y})\,\mathrm{d}\bar{x}\mathrm{d}\bar{y}=0\tag{55}$$

式中:

$$\begin{aligned}\overline{Q}_i(\bar{w})=&\alpha_i^2\overline{A}_{55}^{(i)}(\bar{w}_{1,\bar{x}\bar{x}}^{(i)}+\overline{\phi}_{x1,\bar{x}}^{(i)})+\\&\beta^2\overline{A}_{44}^{(i)}(\bar{w}_{1,\bar{y}\bar{y}}^{(i)}+\overline{\phi}_{y1,\bar{y}}^{(i)})-\\&\alpha_i^2\beta^2(\overline{\boldsymbol{\Phi}}_{,\bar{y}\bar{y}}^{(i)}+([\overline{N}_x^{(i)}]_{\mathrm{T}}+[\overline{N}_x^{(i)}]_{\mathrm{H}})\bar{w}_{1,\bar{x}\bar{x}}^{(i)}-\\&\alpha_i^2\beta^2(\overline{\boldsymbol{\Phi}}_{,\bar{x}\bar{x}}^{(i)}+([\overline{N}_y^{(i)}]_{\mathrm{T}}+[\overline{N}_y^{(i)}]_{\mathrm{H}})\bar{w}_{1,\bar{y}\bar{y}}^{(i)}+\\&2\alpha_i^2\beta^2(\overline{\boldsymbol{\Phi}}_{,\bar{x}\bar{y}}^{(i)}-([\overline{N}_{xy}^{(i)}]_{\mathrm{T}}+[\overline{N}_{xy}^{(i)}]_{\mathrm{H}})\bar{w}_{1,\bar{x}\bar{y}}^{(i)}+\bar{q}^{(i)}\end{aligned}\tag{56}$$

$$\bar{f}_i(\bar{x},\bar{y})=\frac{\bar{w}_1^{(i)}}{\overline{F}_6^{(4)}}\quad i=1,2,3,4\tag{57}$$

将式(56)和式(57)代入式(55)并进行简化得到后屈曲增量 $\overline{N}_{2h}$:

$$\overline{N}_{2h}=\frac{\sum_{i=1}^{4}\alpha_i\int_0^1\int_0^1[\overline{\boldsymbol{\Phi}}_{2p,\bar{y}\bar{y}}^{(i)}\bar{w}_{1,\bar{x}\bar{x}}^{(i)}+\overline{\boldsymbol{\Phi}}_{2p,\bar{x}\bar{x}}^{(i)}\bar{w}_{1,\bar{y}\bar{y}}^{(i)}]\frac{\bar{w}_1^{(i)}}{\overline{F}_6^{(4)}}\mathrm{d}\bar{x}\mathrm{d}\bar{y}}{\sum_{i=1}^{4}\bar{\tau}_i\alpha_i\int_0^1\int_0^1\bar{w}_{1,\bar{x}\bar{x}}^{(i)}\frac{\bar{w}_1^{(i)}}{\overline{F}_6^{(4)}}\mathrm{d}\bar{x}\mathrm{d}\bar{y}}\tag{58}$$

根据式(38)和式(58),可以确定脱层板在静态压缩时的后屈曲路径为

$$\bar{w}_0^2=\frac{\overline{N}-\overline{N}_{\mathrm{cr}}}{\overline{N}_{2h}}\tag{59}$$

将式(38)中位移函数和转角函数的一阶摄动展开式代入式(32),得到用一阶摄动方程的解 $\bar{w}_1^{(i)}$ 和 $\overline{\phi}_{x1}^{(i)}$ 表示的脱层板的能量释放率:

$$G=\frac{\alpha_i^2\bar{w}_0^2}{2b}\sum_{i=1}^{3}\int_{C^{(i)}}\{((A_{44}^{(i)}(\bar{w}_{1,\bar{x}}^{(i)}+\overline{\phi}_{x1}^{(i)}))\bar{w}_{1,\bar{x}}^{(i)}l_i)\mid_{x=L_1}\}\mathrm{d}C^{(i)}\tag{60}$$

根据断裂力学的准则,如果裂纹前沿处的能力释放满足 $G\geqslant G_{\mathrm{cr}}$,则判定裂纹发生扩展,其中 G_{cr} 为材料的断裂韧性。结合式(60),可以推导出脱层板发生脱层扩展时的无量纲临界扩展载荷为

$$\overline{N}_{\mathrm{pl}}=\overline{N}_{\mathrm{cr}}+\overline{N}_{2h}2bG_{\mathrm{cr}}/\left\{\alpha_i^2\sum_{i=1}^{3}\int_{C^{(i)}}\{((A_{44}^{(i)}(\bar{w}_{1,\bar{x}}^{(i)}+\overline{\phi}_{x1}^{(i)}))\bar{w}_{1,\bar{x}}^{(i)}l_i)\mid_{x=L_1}\}\right\}\mathrm{d}C^{(i)}\tag{61}$$

从式(32)和式(61)中可以看出,在几何尺寸和材料参数确定的情况下,脱层界面发生裂纹扩展时的能量改变 $\delta\Pi$ 主要由脱层前沿处的剪力项 $Q_x^{(i)}$ 与横向挠度有关项 $w_x^{(i)}$ 决定,承受轴向压缩荷载的脱层板的Ⅱ型扩展主要发生于板的后屈曲阶段。求解过程如图 2 所示。

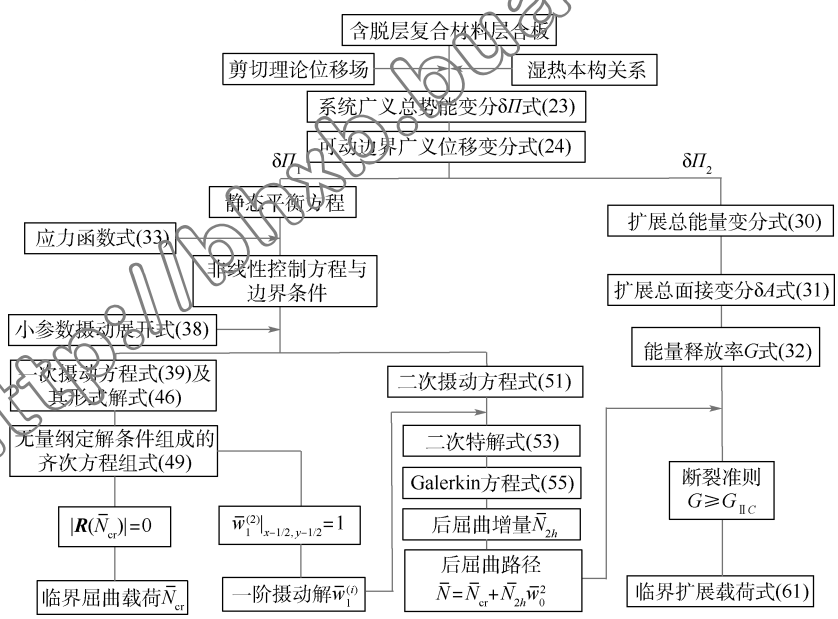


图 2　求解流程

Fig. 2　Flow chart of solving process

http://bhxb.buaa.edu.cn

3 算例分析

本文的研究对象主要为四边简支的含脱层复合材料层合板,本节对第2节的理论推导进行了验证和讨论。其中,算例分析中选用的材料参数[15]:$E_{11}=147$ GPa,$E_{22}=10.3$ GPa,$G_{12}=G_{13}=7.0$ GPa,$G_{23}=3.7$ GPa,$\mu_{12}=0.3$,$G_{IIC}=547$ N/m,$\alpha_1=-0.3\times10^{-6}/℃$,$\alpha_2=28.1\times10^{-6}/℃$,$\beta_1=0$,$\beta_2=0.44$。层合板的几何参数:$a=2$ m,$b=2$ m,层合板的铺设情况,按0°、90°、0°铺设,总共60层$[0°/90°/0°]_{20}$,$h_0=0.002$ m。

3.1 有限元分析

为了验证理论解的正确性,开发ABAQUS有限元软件对含脱层复合材料层合板的屈曲行为进行了数值模拟。同样采用四分区模型,在软件中使用三维空间内的可变形壳单元创建4个层合板部件,保证板模型可以发生面外变形;然后通过装配组合及在脱层前沿连接位置设置绑定约束,使得有限元模型与理论模型一致。在脱层上下2个部件的接触面之间设置法向的硬接触,以防止其发生互相贯穿。在模拟温度变化ΔT对层合板屈曲载荷的影响时,首先在静态通用分析步中计算温度改变引起的热应力分布,然后把得到的结果设置为线性摄动屈曲分析步中的初始状态,进而得出对应温度下的屈曲载荷。整个有限元模型被划分为13 000个S4R单元以满足计算的精度,网格划分情况如图3所示。

图4为考虑热膨胀($\Delta T=25$ ℃,$h_2/h=0.1$,$L_2/a=0.3$)时的脱层板屈曲模态。其中图4(a)中考虑了接触,从图4(a)中可以看出脱层板的屈曲模态是整体一致的变形模态,接触效应不可忽略,否则就会出现图4(b)中上下层板相互贯穿这样不合理的现象。表1列出了相对脱层深度一定($h_2/h=0.2$),不同相对脱层长度L_2/a和温度变化ΔT情况下,有限元屈曲结果(FEM)与当前理论(FSDT)的比较,有限元模拟的屈曲结果同样进行式(37)中的无量纲处理。从表1中可以看出,有限元结果和理论结果较为吻合,2种方法的差值比(Diff.)在5%之内,验证了理论推导的正确性。

3.2 文献对比

为了进一步验证理论推导结果的有效性,将本文的结果与经典层合板理论(CLPT)的解[18]进行了比较。表2为在不同相对脱层深度h_2/h和相对脱层长度L_2/a情况下,在CLPT和FSDT下的无量纲屈曲荷载$\overline{N}_{cr}$和无量纲临界扩展荷载$\overline{N}_{pl}$的对比。可以看出,尽管脱层深度和脱层长度不同,2种方法得到的结果的差值比均不超过7%。同时,CLPT解总大于考虑FSDT的解,这是由于CLPT忽略横向剪切变形,高估了层合板的刚度和

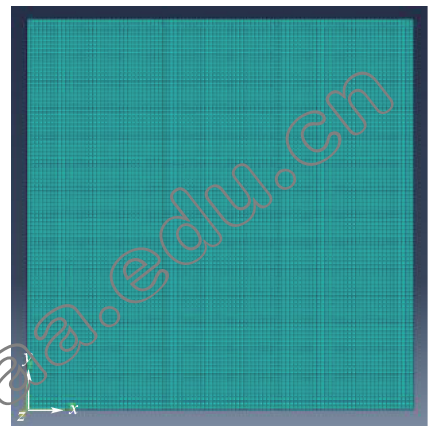
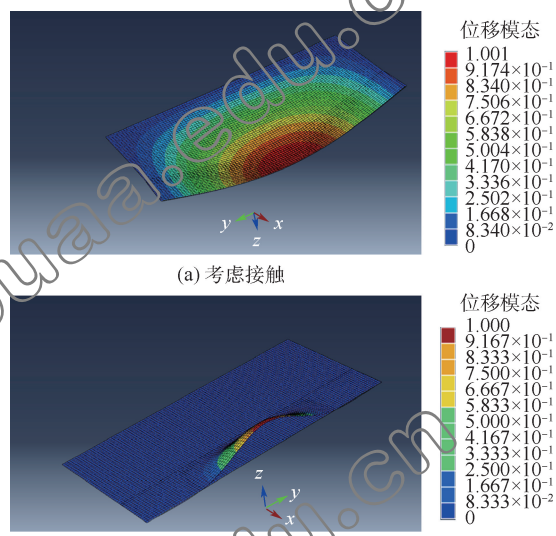


图3 有限元网格划分

Fig. 3 Diagram of finite element mesh partition



(a) 考虑接触

(b) 未考虑接触

图4 含脱层复合材料层合板屈曲模态

Fig. 4 Buckling mode of delaminated composite laminates

表1 含脱层复合材料层合板的有限元方法与理论方法的无量纲屈曲载荷比较

Table 1 Compassion of non-dimensional buckling load between FEM and present method of delaminated composite laminates

ΔT/℃	L_2/a	无量纲屈曲载荷		Diff./%
		FEM	FSDT	
0	0.1	8 477	8 368	1.29
	0.3	7 031	6 720	4.42
	0.5	6 091	5 844	4.06
25	0.1	8 329	8 220	1.31
	0.3	6 881	6 574	4.46
	0.5	5 941	5 697	4.11
75	0.1	8 031	7 925	1.32
	0.3	6 581	6 280	4.57
	0.5	5 640	5 402	4.22

http://bhxb.buaa.edu.cn

表 2　含脱层复合材料层合板的经典层合板理论和剪切理论无量纲屈曲载荷和无量纲临界扩展载荷比较

Table 2　Compassion of non-dimensional buckling load and non-dimensional threshold between CLPT and present method of delaminated composite laminates

h_2/h	L_2/a	$\overline{N}_{cr}$		$\overline{N}_{pl}$		Diff. $\overline{N}_{cr}$/%	Diff. $\overline{N}_{pl}$/%
		CLPT[18]	FSDT	CLPT[18]	FSDT		
0.1	0.1	9 527	9 050	9 706	9 055	5.01	6.71
	0.2	8 991	8 553	9 039	8 620	4.87	4.64
	0.3	8 549	8 145	5 578	8 181	4.73	4.63
0.3	0.1	8 001	7 623	8 031	7 721	4.72	3.86
	0.2	6 633	6 349	6 658	6 395	4.28	3.95
	0.3	5 738	5 516	5 758	5 548	3.87	3.65
0.5	0.1	7 029	6 753	7 065	6 831	3.93	3.31
	0.2	5 477	5 294	5 501	5 338	3.34	2.96
	0.3	4 562	4 428	4 583	4 462	2.94	2.64

注：Diff. $\overline{N}_{cr}$ 为 $\overline{N}_{cr}$ 的 Diff.，Diff. $\overline{N}_{pl}$ 为 $\overline{N}_{pl}$ 的 Diff.。

承载能力。

3.3　脱层情况对临界载荷的影响

图 5 为脱层深度（$L_2/a=0.3$）和湿热环境（$\Delta T=25$ ℃，$\Delta C=0.1\%$）一定时，脱层板的无量纲临界荷载 $\overline{N}_x$（屈曲载荷 $\overline{N}_{cr}$ 和临界扩展载荷 $\overline{N}_{pl}$）随相对脱层深度（h_2/h）的变化情况。如图 5 所示，随着脱层深度的增加，屈曲载荷呈现先减小后增大的趋势，在脱层位于层合板中部 $h_2/h=0.5$ 时，屈曲载荷达到最小值。临界扩展载荷也有同样的变化趋势，且总大于屈曲载荷。在压缩载荷作用下，脱层位置越靠近中间越容易发生脱层扩展。

图 6 为脱层深度（$h_2/h=0.3$）和湿热环境（$\Delta T=25$ ℃，$\Delta C=0.1\%$）一定时，脱层板的无量纲临界荷载 $\overline{N}_x$（临界屈曲荷载 $\overline{N}_{cr}$ 和临界扩展荷载 $\overline{N}_{pl}$）随相对脱层长度（L_2/a）的变化情况。由于数量级的关系，将相对脱层长度化分为 3 个部分：

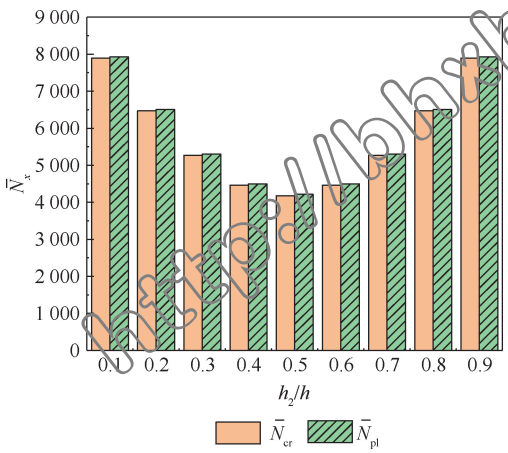


图 5　相对脱层深度对无量纲临界载荷 $\overline{N}_{cr}$ 和 $\overline{N}_{pl}$ 的影响

Fig. 5　Effect of relative delamination depth on non-dimensional critical load $\overline{N}_{cr}$ and $\overline{N}_{pl}$

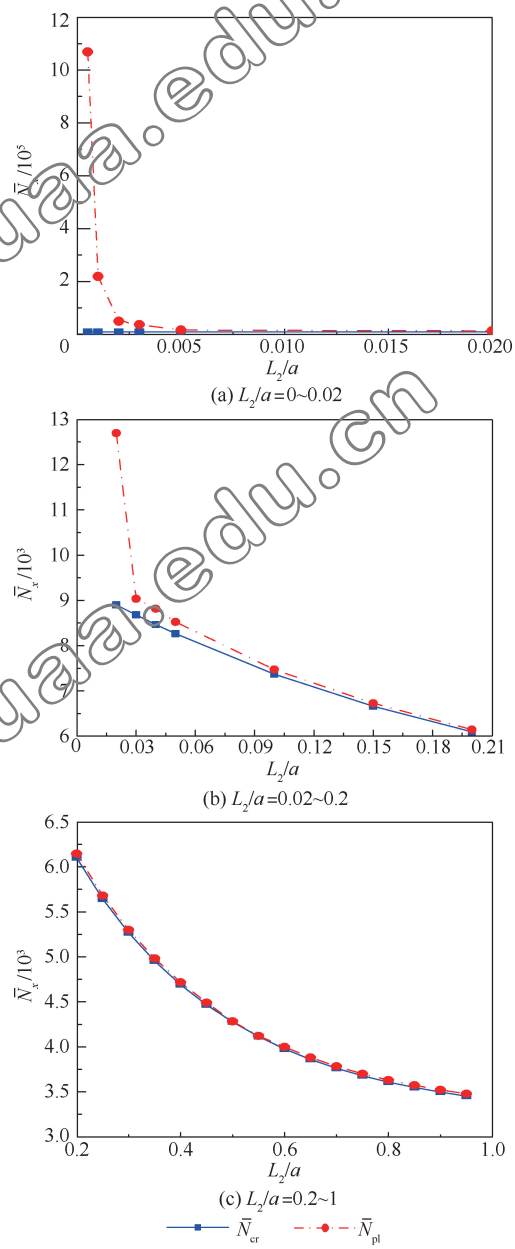


图 6　相对脱层长度对无量纲临界载荷 $\overline{N}_{cr}$ 和 $\overline{N}_{pl}$ 的影响

Fig. 6　Effect of relative delamination length on non-dimensional critical load $\overline{N}_{cr}$ and $\overline{N}_{pl}$

http://bhxb.buaa.edu.cn

图 6(a)为 $L_2/a=0\sim0.02$,图 6(b)为 $L_2/a=0.02\sim0.2$,图 6(c)为 $L_2/a=0.2\sim1$。从图 6 中可以看出,屈曲载荷和临界扩展载荷均随着相对脱层长度的增加而减小。图 6(a)和图 6(b)显示当脱层长度趋近于 0(无脱层)时,扩展载荷急剧增加且远远大于屈曲载荷;图 6(c)则相反,屈曲载荷和扩展载荷同时变化且很接近,说明脱层长度越大,脱层越容易发生扩展。图 6 的曲线趋势同时也表明脱层扩展是一个持续的过程,当静态压缩载荷达到或超过脱层板的扩展载荷时,就会导致脱层长度的增加,进而导致脱层板的承载力下降,诱发脱层发生进一步扩展,直到层合板的完全破坏。

3.4 湿热环境对临界载荷的影响

图 7 和图 8 给出了脱层情况一定($h_2/h=0.5$,$L_2/a=0.05$)时,不同温度改变量 ΔT($\Delta C=0\%$)和湿度改变量 ΔC($\Delta T=0$ ℃)下,脱层板的承载后屈曲路径,其中 $\bar{w}$ 为无量纲挠度。根据上面的分析,受压脱层板一旦发生扩展,会在原载荷下迅速扩展至破坏,因此图 7 和图 8 中各算例的后屈曲路径曲线终止于对应参数下的扩展载荷值。图 7 和图 8 标注出了各种湿热情况下的无量纲屈曲载荷值 $\bar{N}_{cr}$ 和无量纲扩展载荷值 $\bar{N}_{pl}$,可以发现,温度和湿度的增加会极大影响脱层板的承载能力,较大的湿热变形会明显的降低脱层板的屈曲载荷、后屈曲强化载荷和临界扩展载荷。同时,不管处于何种湿热场,脱层板都表现出后屈曲强化的特性;且随着载荷增加,脱层板在屈曲后产生的面外变形不断增加,导致层间剪力的不断累积而发生Ⅱ型脱层扩展。

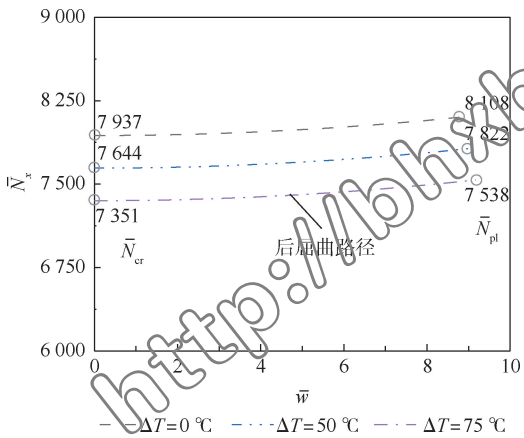


图 7 温度改变对无量纲临界载荷 $\bar{N}_{cr}$ 和 $\bar{N}_{pl}$ 及后屈曲路径的影响

Fig. 7 Effect of change of temperature on non-dimensional critical load $\bar{N}_{cr}$ and $\bar{N}_{pl}$ and post-buckling equilibrium path

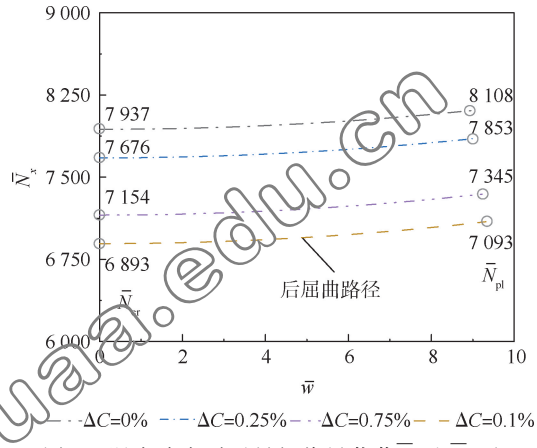


图 8 湿度改变对无量纲临界载荷 $\bar{N}_{cr}$ 和 $\bar{N}_{pl}$ 及后屈曲路径的影响

Fig. 8 Effect of change of hygroscopic concentration on non-dimensional critical load $\bar{N}_{cr}$ and $\bar{N}_{pl}$ and post-buckling equilibrium path

4 结 论

1)经典层合板理论由于忽略横向剪切变形,高估了层合板的承载能力,计算的屈曲载荷和扩展载荷均高于剪切理论的解。

2)在同一湿热场中,当脱层深度越靠近层合板的中间位置或脱层长度越大时,脱层越容易发生扩展。脱层扩展是一个持续的过程,脱层扩展导致脱层长度增加,脱层板的承载力随之下降,脱层在原压缩载荷下会继续扩展,直到层合板的完全破坏。

3)湿热变形会显著降低脱层板的屈曲载荷、后屈曲载荷及扩展载荷。在不同湿热场中,层合板都表现后屈曲强化的特性。

参考文献(References)

[1] 赵丽滨,龚愉,张建宇. 纤维增强复合材料层合板分层扩展行为研究进展[J]. 航空学报,2019,40(1):522509.
ZHAO L B, GONG Y, ZHANG J Y. A survey on delamination growth behavior in fiber reinforced composite laminates[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(1): 522509(in Chinese).

[2] CHAI H, BABCOCK C D, KNAUSS W G. One dimensional modeling of failure in laminated plates by delamination buckling[J]. International Journal of Solids and Structures, 1981, 17(11): 1069-1083.

[3] 刘述伦,薛江红,王璠,等. 含脱层纤维增强复合材料层合板在湿热环境下的屈曲分析[J]. 工程力学,2015,32(3):1-8.
LIU S L, XUE J H, WANG F, et al. Buckling analysis of fiber-reinforced laminated composite plate with delamination under hygrothermal environments[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(3): 1-8(in Chinese).

http://bhxb.buaa.edu.cn

[4] 周宇,沈峰,史耀辉,等. 含纤维搭桥的正交各向异性材料非线性矩形脱层屈曲分析[J]. 力学季刊,2017,38(4):675-680.
ZHOU Y,SHEN F,SHI Y H,et al. Analysis of non-linear buckling of rectangular delamination in orthotropic materials with fiber bridging[J]. Chinese Quarterly of Mechanics,2017,38(4):675-680(in Chinese).

[5] 李萍,金福松,简方,等. 含脱层单向铺设层合梁非线性后屈曲分析[J]. 工程力学,2019,36(11):239-249.
LI P,JIN F S,JIAN F,et al. Nonlinear post-buckling analysis of unidirectional laminated beams with delamination[J]. Engineering Mechanics,2019,36(11):239-249(in Chinese).

[6] KÖLLNER A,VÖLLMECKE C. An analytical framework to extend the general structural stability analysis by considering certain inelastic effects-theory and application to delaminated composites[J]. Composite Structures,2017,170:261-270.

[7] KÖLLNER A,VÖLLMECKE C. Post-buckling behaviour and delamination growth characteristics of delaminated composite plates[J]. Composite Structures,2018,203:777-788.

[8] 刘人怀,薛江红. 复合材料层合板壳非线性力学的研究进展[J]. 力学学报,2017,49(3):487-506.
LIU R H,XUE J H. Development of nonlinear mechanics for laminated composite plates and shells[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2017,49(3):487-506(in Chinese).

[9] NIKRAD S F,KEYPOURSANGSARI S,ASADI H,et al. Computational study on compressive instability of composite plates with off-center delaminations[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,2016,310:429-459.

[10] WANG K K,ZHAO L B,HONG H M,et al. An extended analytical model for predicting the compressive failure behaviors of composite laminate with an arbitrary elliptical delamination[J]. International Journal of Solids and Structures,2020,185-186:439-447.

[11] SHABANJAFROUDI N,GANESAN R. A penalty function based delamination model for postbuckling analysis of composite plates with delamination[J]. Composite Structures,2020,261:113273.

[12] PEREIRA A B,MORAIS A B. Mixed mode I + II interlaminar fracture of carbon/epoxy laminates[J]. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing,2008,39(2):322-333.

[13] 郑伟玲,郑龙席. 复合材料层合板界面裂纹能量释放率解析方法研究[J]. 西北工业大学学报,2019,37(1):137-142.
ZHENG W L,ZHENG L X. Analytical energy release rate of interfacial crack in composite laminates[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University,2019,37(1):137-142(in Chinese).

[14] 任雷,盛冬发. 单向纤维增强复合材料板Ⅰ型裂纹尖端应力场的有限元分析[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2018,38(3):181-186.
REN L,SHENG D F. The finite element analysis for stress field of unidirectional fibre-reinforced composite plate mode Ⅰ crack tip[J]. Journal of Southwest Forestry University(Natural Science),2018,38(3):181-186(in Chinese).

[15] TAY T E,SUN X S,TAN V B C. Recent efforts toward modeling interactions of matrix cracks and delaminations:An integrated XFEM-CE approach[J]. Advanced Composite Materials,2014,23(5-6):391-408.

[16] 邓健,卢天健,尹久仁. 复合材料 MMB 试件 I-II 混合型层间裂纹扩展分析[J]. 航空学报,2021,42(2):224241.
DENG J,LU T J,YIN Q Z. On the I-II mixed interlaminar crack propagation of composite MMB specimens[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2021,42(2):224241(in Chinese).

[17] TANG M Q,XUE J H,YUAN H,et al. Macro-micro analysis for anti-penetrating postbuckling of fiber reinforced,deboned laminates with contact effects[J]. International Journal of Applied Mechanics,2014,6(4):1450044.

[18] XUE J H,JIN F S,ZHANG J W,et al. Post-buckling induced delamination propagation of composite laminates with bi-nonlinear properties and anti-penetrating interaction effects[J]. Composites Part B,2019,166:148-161.

[19] XUE J H,XIA F,ZHANG J W,et al. Multiscale studies on the nonlinear vibration of delaminated composite laminates-global vibration mode with micro buckles on the interface[J]. Scientific Reports,2017,7(1):4468.

[20] 沈观林,胡更开. 复合材料力学[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社,2006:143-153.
SHEN G L,HU G K. Mechanics of composite materials[M]. 2nd ed. Beijing:Tsinghua University Press,2006:143-153(in Chinese).

http://bhxb.buaa.edu.cn

Interfacial crack growth of delaminated composite laminates under hygrothermal environment

XIA Fei, XUE Jianghong*, HE Zanhang, JIN Fusong

(School of Mechanics and Construction Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: The laminated composite structures in harsh hygrothermal environment are easy to undergo premature buckling and delamination propagation. This paper proposes a theoretical study on the nonlinear buckling and interfacial crack propagation of thick plate containing delamination by considering the hygrothermal effect and the contact effect. Based on the variational principles of variable boundary, the total potential energy of the laminates subjected to hygro-thermal-mechanical loading is established from which the governing equations for nonlinear post-buckling and the expression of energy release rate for delamination propagation are derived. The post-buckling equilibrium paths of the laminates characterized by the in-plane load vs deflection amplitude curves are determined via perturbation technique and Galerkin approach. With the available solutions from post-buckling analysis, the theoretical solution of threshold load corresponding to the delamination propagation is determined according to Griffith fracture criterion. By developing MATLAB program, numerical calculations are performed to discuss the effect of the temperature, the hygroscopic concentration and the delamination conditions on the buckling and delamination propagation threshold load. The solutions are compared with the results from ABAQUS finite element analysis and the predictions obtained from classical laminated plate theory, both showing good agreements with the presented theoretical solutions. Results show that hygrothermal environment reduce the buckling load and the delamination propagation threshold load. Besides, neglecting the transverse shear strain may overestimate the load-carrying capacity of the laminates.

Keywords: first order shear deformation theory; hygrothermal environment; energy release rate; nonlinear post-buckling; delamination

http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2021-03-24; **Accepted**: 2021-05-03; **Published online**: 2021-07-06 08:48

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210705.1516.004.html

Foundation item: Guangdong Natural Science Foundation (2021A1515012037)

* **Corresponding author**. E-mail: txuej@jnu.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0142

基于 PCA-HicksHenne 方法的几何不确定性稳健优化设计

张威[1], 王强[2], 路嘉晨[1], 常超[1,*]

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191; 2. 中国航天空气动力技术研究院, 北京 100074)

摘 要: 考虑不确定因素的稳健优化设计在飞行器气动外形设计选型中至关重要。针对环境扰动下稳健优化的研究较多,而对几何不确定性的关注则相对较少。为量化几何不确定性,采用主成分分析(PCA)方法,对 RAE2822 翼型的参数化过程进行了研究,并揭示了翼型的主要几何变形模态。采用敏感度分析方法,指出厚度变形模态、弯度变形模态及上翼面最大厚度位置的轴向位移模态是主要影响模态,并将其作为扰动模态进行稳健优化研究。结果表明:不考虑扰动的确定优化翼型的升力变化更加剧烈,标准差增大近 200%;考虑几何扰动的优化翼型稳健性更高,在平均性能提升的同时,无论是升力还是阻力的变化都比原始 RAE2822 翼型更小。

关 键 词: 稳健优化; 几何扰动; 主成分分析; 参数化; 不确定性
中图分类号: V221+.3; TB553
文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2022)12-2473-09

在飞行器的整个寿命周期中存在着各种各样的不确定性,而考虑不确定因素的气动优化研究在飞行器气动外形设计中扮演着至关重要的角色。考虑不确定性因素的优化设计主要包括稳健优化设计[1]及可靠性优化设计[2]。稳健设计的优化目标是为了在性能提升的同时降低目标函数对不确定因素的敏感度,而可靠性设计则是为了降低故障概率。本文的关注点主要在于稳健优化设计研究。现有的稳健优化设计主要着重于针对环境扰动下的优化设计研究,而对于几何扰动的关注则相对较少。

对于几何不确定性的考量,主要有 2 方面:①局部位置的凸起凹陷,主要是由于工作状态下的磨损、侵蚀等导致的。由于其大小、位置、形状、分布形式等较为依赖对大量实验数据的分析,而实验数据难以获取使得该类几何不确定性量化也较难实现。②加工过程中存在不确定性。现有对该类几何不确定性的研究中,由于认知不足,或是根据经验直接在翼型前缘等关键位置添加满足正态分布的几何扰动[3],然后进行不确定性量化;或是采用区间法[4]直接进行几何不确定性量化。这些方法的使用,无论是对正态扰动添加位置的选择与确定,还是区间法的直接应用,经验性都较强,忽视了对于全局的考量,及潜在几何模态的影响。

本文以 RAE2822 翼型为例,采用主成分分析(principal component analysis, PCA)方法[5-6],对整个参数化过程进行分析,增强对全局范围内主要几何变形模态的认知,了解对应参数的分布规律。应用敏感度分析方法,针对不同目标函数

收稿日期: 2021-03-25; **录用日期**: 2021-06-13; **网络出版时间**: 2021-06-21 16:33
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210621.1344.004.html
基金项目: 国家自然科学基金 (11721202,11972064)
* **通信作者**. E-mail: yanchao@buaa.edu.cn

引用格式: 张威, 王强, 路嘉晨, 等. 基于 PCA-HicksHenne 方法的几何不确定性稳健优化设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2473-2481. ZHANG W, WANG Q, LU J C, et al. Robust optimization design under geometric uncertainty based on PCA-HicksHenne method[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2473-2481(in Chinese).

(以升力系数、阻力系数、翼型厚度等为例),找出主要变形控制模态,作为几何扰动来源。同时,进行了考虑几何不确定性的稳健优化设计研究。

1 PCA-HicksHenne 方法

1.1 Hicks-Henne 参数化方法

Hicks-Henne 方法[7]是常用的参数化方法,本文以此对 RAE2822 翼型进行参数化,具体的几何外形表达式如下:

$$y = y_{\text{origin}} + \sum_{k=1}^{n} c_k f_k(x) \tag{1}$$

式中:y 为变形后翼型的上(下)表面函数;y_{origin} 为初始翼型的上(下)表面函数;$f_k(x)$ 为扰动型函数,c_k 为对应参数。

原始的 Hicks-Henne 方法中的扰动型函数定义如下:

$$\begin{cases} f_k(x) = \begin{cases} x^{0.5}(1-x)\mathrm{e}^{-20x} & k=1 \\ \sin^3(\pi x^{g(k)}) & k=2,3,\cdots,n-1 \\ x^{0.5}(1-x)\mathrm{e}^{-10x} & k=n \end{cases} \\ g(k) = \dfrac{\ln 0.5}{\ln x_k} \\ 0 = x_1 < x_2 < \cdots < x_k < \cdots < x_n = 1 \end{cases} \tag{2}$$

研究表明[8-9],该方法存在后缘扰动不足的问题。对此,本文将翼型后缘扰动函数做了式(3)的修改。其导函数(式(4))在后缘处取值不为 0,可以提供有效的后缘扰动。

$$f_n(x) = x(1-x)^{0.5}\mathrm{e}^{-20(1-x)} \tag{3}$$

$$f'_n(x) = (-20x^2 + 18x + 1)(1-x)^{-0.5}\mathrm{e}^{-20(1-x)} \tag{4}$$

1.2 PCA 方法

PCA 是一种常用的数据降维方法。通过对高维特征数据进行降维,仅保留重要特征,从而实现数据处理效率的提升。

基于最近重构性或最大可分性[10],可将 PCA 的优化目标写为

$$\begin{aligned} &\min_{\boldsymbol{W}} \ -\mathrm{tr}(\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}) \\ &\text{s.t.} \quad \boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W} = \boldsymbol{I} \end{aligned} \tag{5}$$

式中:$\boldsymbol{X}$ 为翼型样本几何向量组成的矩阵;$\boldsymbol{W}$ 为协方差矩阵 $\boldsymbol{X}\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}$ 的特征向量矩阵;$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵。

采用拉格朗日乘子法可得

$$\boldsymbol{X}\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{w}_i = \lambda_i \boldsymbol{w}_i \tag{6}$$

式中:$\boldsymbol{w}_i$ 为矩阵 $\boldsymbol{W}$ 第 i 列的向量,也是 $\boldsymbol{X}\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}$ 的特征向量;λ_i 为对应的特征值。

因此,仅需对协方差矩阵 $\boldsymbol{X}\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}$ 进行特征值分解,得到特征值如式(7)所示。一般对所得到的特征值按照由大到小顺序进行排序,特征值越大,表明对应的"成分"的贡献越大。随后再选取前 d' 个特征值对应的特征向量 $\boldsymbol{W}^* = (\boldsymbol{w}_1, \boldsymbol{w}_2, \cdots, \boldsymbol{w}_{d'})$,即为主成分分析的解。特征值由大到小如下:

$$\lambda_1 \geqslant \lambda_2 \geqslant \cdots \geqslant \lambda_d \tag{7}$$

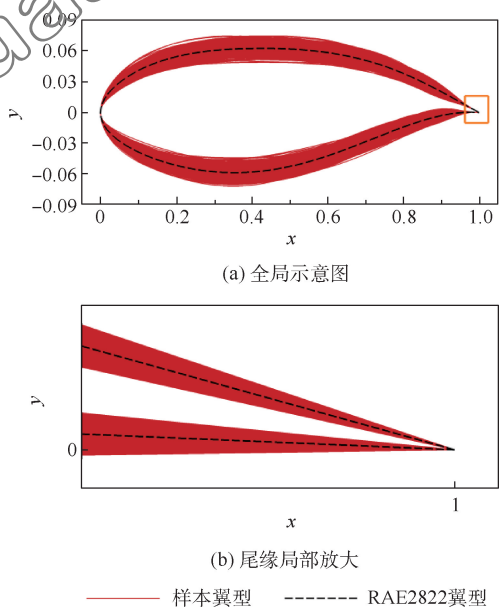
1.3 PCA-HicksHenne 参数化方法

采用 PCA 方法,对经由 Hicks-Henne 方法得到的大量翼型进行分析,提取目标翼型变形的主要模态,并以此为基础对翼型进行变形。该方法可以提高对翼型变形内在几何模态的认知,进一步降低参数化所需参数维度,提高效率,这就是本文所采用的 PCA-HicksHenne 方法。

以 RAE2822 翼型为例,设定 Hicks-Henne 方法中的型函数个数为 21(上下翼面合计变量维度为 42)。较多的型函数个数可以赋予参数化方法更好的设计空间表达能力。在给定设计空间内随机选取 100 000 个样本翼型数据,如图 1 所示,并对其进行 PCA 分析。给出前 20 个主要变形模态所对应的能量分布,如图 2 和图 3 所示。可以看出,前 8 个变形模态表达了 98% 以上的变形信息,这表明仅采用前 8 个模态就能够很好地表征原设计空间中的翼型变形。

图 4 给出经 PCA 分析得到的前 8 个变形模态。模态 1 和模态 2 分别为翼型的厚度变形模态及弯度变形模态,模态 3 和模态 4 分别为上下翼面的最大厚度位置的轴向位移模态,模态 5 ~ 模态 8 则分别为翼面的挤压模态。

本文以这些模态为设计变形模态,通过线性



(a) 全局示意图

(b) 尾缘局部放大

图 1 样本翼型及 RAE2822 翼型示意图

Fig. 1 Schematic of sample airfoils and RAE2822 airfoil

http://bhxb.buaa.edu.cn

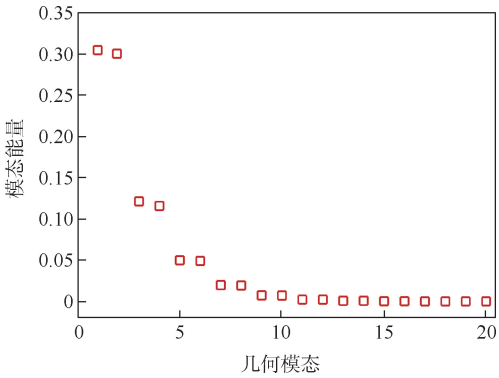


图 2　主要几何变形模态对应模态能量分布

Fig. 2　Energy amplitude of main geometric transformation modes

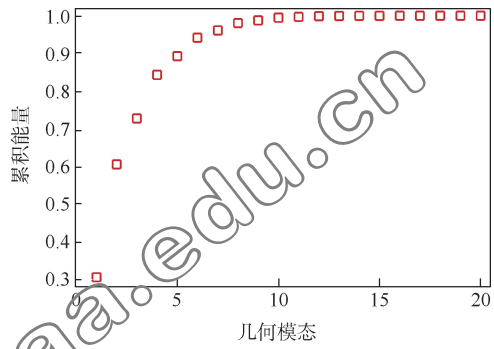


图 3　主要几何变形模态对应累积能量分布

Fig. 3　Accumulated energy of main geometric transformation modes

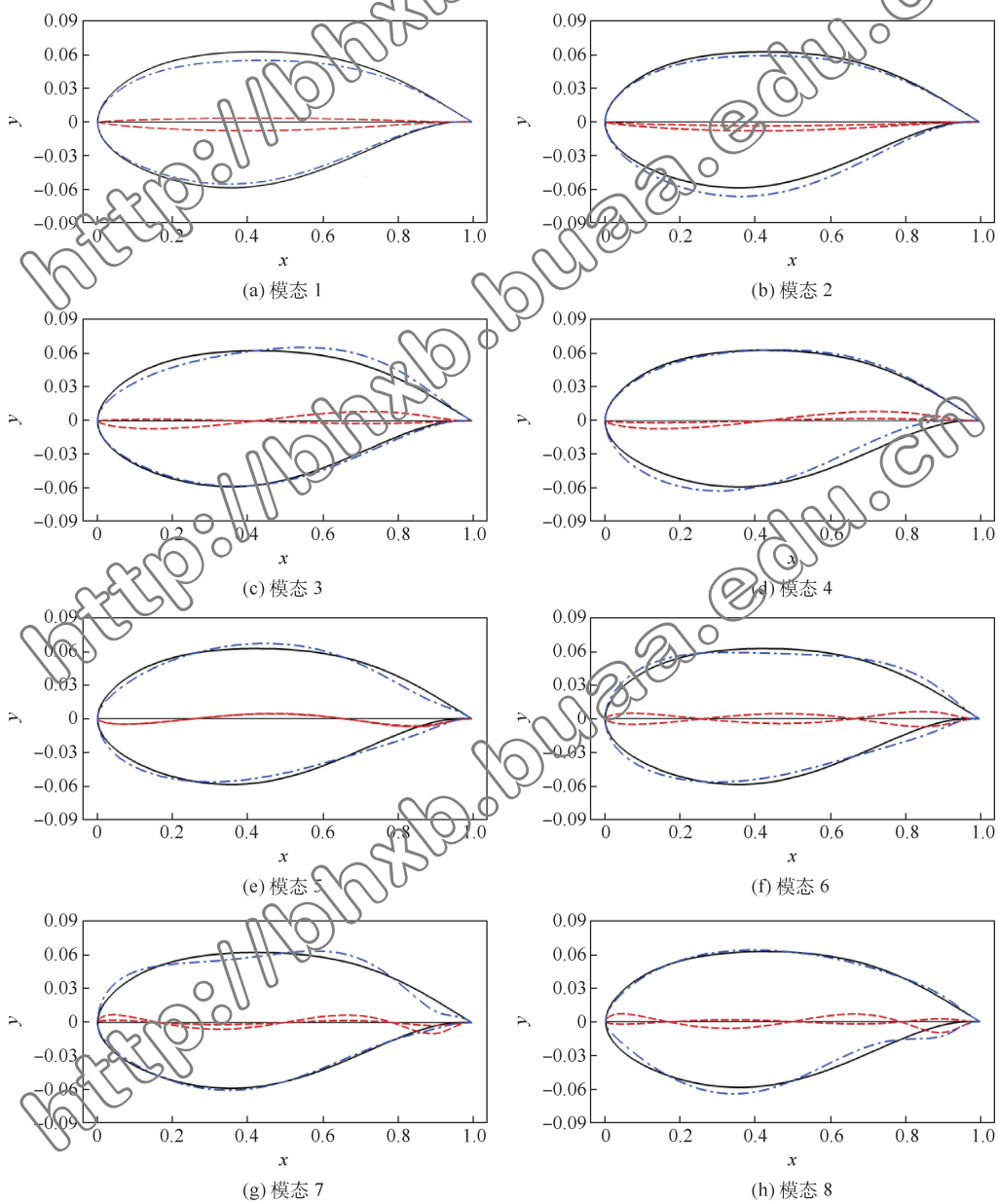


图 4　主要几何变形模态示意图

Fig. 4　Schematic of main geometric transformation modes

http://bhxb.buaa.edu.cn

叠加到基准翼型 RAE2822 上,从而实现翼型的变形。同时,观察本节随机选取的 100 000 个翼型对应在这 8 个模态构建的参数空间中的参数分布情况,如图 5 所示。观察可知,所有模态的参数分布与 $N(0,0.01^2)$ 的正态分布几乎完全一致,因此,可以认为第 3 节中所用到的不确定模态也满足正态分布。同时将各模态参数的设计范围定义为[-0.03,0.03],以满足 99.7% 以上的参数变化范围。

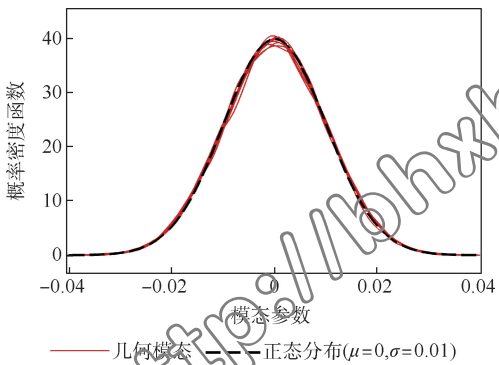


图 5 主要几何变形模态对应参数分布情况

Fig. 5 Parameters distribution of main geometric transformation modes

2 重要参数识别

本文的主要目的是为了发展基于 PCA-Hicks-Henne 参数化方法的几何不确定性稳健优化设计方法。因此,为了选定特定参数模态作为几何扰动模态,需要对各模态针对目标函数(如升力系数、阻力系数、翼型厚度等)的参数敏感度进行分析。

Sobol 指数方法是一种常用的全局参数敏感度分析方法[11-12]。通过 Sobol 指数方法,可以得到各参数对于目标函数的影响,主要包括参数的主指标、参数之间的交互指标及参数的总指标。参数的主指标是指完全由该参数产生的影响;交互指标是指参数之间相互作用,共同产生的影响,通常用来判断参数之间是否存在关联;总指标则是由参数主指标与交互指标共同组成,通常表示该参数产生的所有影响的总和。

本文以 RAE2822 翼型的升力系数、阻力系数、翼型厚度为目标,研究第 1 节中所得的各变形模态在设计空间内的参数敏感度,结果分别如图 6 ~ 图 8 所示,计算状态如表 1 所示。可以看出,对于升力而言,模态 2 是主要影响模态,这是由于跨声速条件下翼型弯度是升力产生的主要来源;对于阻力而言,模态 3 是主要影响模态,这是由于在模态 3 下,上翼面的最大厚度位置在轴向上发生变化,导致上翼面激波产生位移,激波强度、激波阻力发生变化,从而阻力发生变化;对于翼型厚度而言,模态 1 即厚度变形模态是主要影响模态。

因此,模态 1 ~ 模态 3 是翼型性能的主要影响模态。这些模态的微小变化,会对翼型性能产生较大的影响。因此,本文选取这3 个模态作为主要几何扰动模态,进行稳健优化设计。

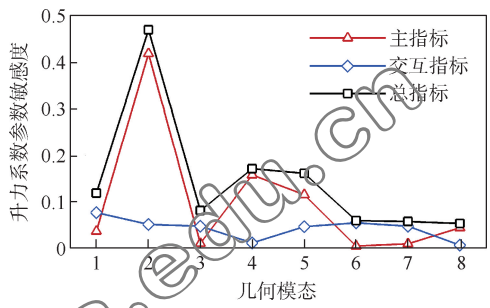


图 6 升力系数的参数敏感度分析

Fig. 6 Parametric sensitivity analysis of lift coefficient

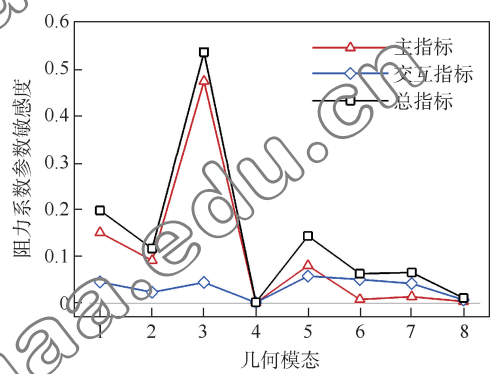


图 7 阻力系数的参数敏感度分析

Fig. 7 Parametric sensitivity analysis of drag coefficient

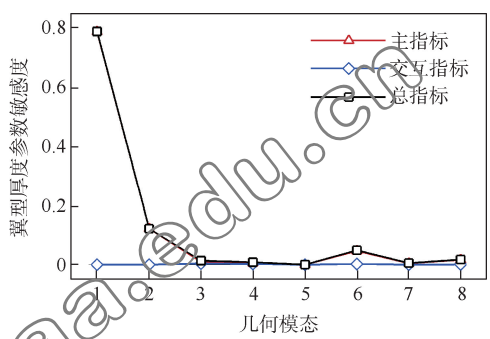


图 8 翼型厚度的参数敏感度分析

Fig. 8 Parametric sensitivity analysis of airfoil thickness

表 1 计算状态

Table 1 Computational condition

参数	马赫数 Ma_∞	迎角 α/(°)	雷诺数 Re_∞/m^{-1}
数值	0.734	2.54	6.5×10^6

http://bhxb.buaa.edu.cn

3　几何扰动定义

在进行稳健优化设计之前,还需对几何扰动模态的参数进行定义。根据第 1 节研究结果,可以假定 3 个扰动模态仍满足正态分布,其均值为 0。为更好展现本文方法的性能,分别设定扰动模态参数的标准差为设计参数的 0.2 ~ 0.4 倍,在基准 RAE2822 翼型上,探索这些不同标准差假设下几何扰动的影响。

混沌多项式方法是一种广泛使用的不确定度量化分析方法[13-14]。本文选用二阶混沌多项式方法来量化不同扰动量下的翼型升力系数、阻力系数、翼型厚度的不确定度,结果如表 2 ~ 表 4 所示。可以看出,随着几何扰动量的增大,各个目标函数的不确定性都在增强。同时也注意到,0.4 倍扰动量下,99.7% 置信区间的翼型厚度变化范围达到 10 倍风洞模型允许公差[15],远远偏离实际允许情况,不予考虑。

表 2　不同扰动量下升力系数的不确定度对比

Table 2　Comparisons of lift coefficient uncertainty under different perturbations

扰动量/倍	升力系数		
	均值	标准差	变异系数
0.2	0.768 0	0.006 57	0.008 6
0.3	0.767 7	0.009 81	0.012 8
0.4	0.766 7	0.012 96	0.016 9

表 3　不同扰动量下阻力系数的不确定度对比

Table 3　Comparisons of drag coefficient uncertainty under different perturbations

扰动量/倍	阻力系数		
	均值	标准差	变异系数
0.2	0.016 21	0.000 82	0.050 7
0.3	0.016 27	0.001 21	0.074 7
0.4	0.016 32	0.001 59	0.097 7

表 4　不同扰动量下翼型厚度的不确定度对比

Table 4　Comparisons of airfoil thickness uncertainty under different perturbations

扰动量/倍	翼型厚度		
	均值	标准差	变化范围(99.7%)
0.2	0.121 0	0.001 2	±0.003 6
0.3	0.121 0	0.001 8	±0.005 4
0.4	0.121 0	0.002 4	±0.007 2

因此,在第 4 节的稳健优化设计中,定义模态 1 ~ 模态 3 为几何扰动模态,符合正态分布,均值为 0,标准差为 0.3 倍的设计参数标准差(即 0.003)。扰动下的翼型变化情况如图 9 所示。

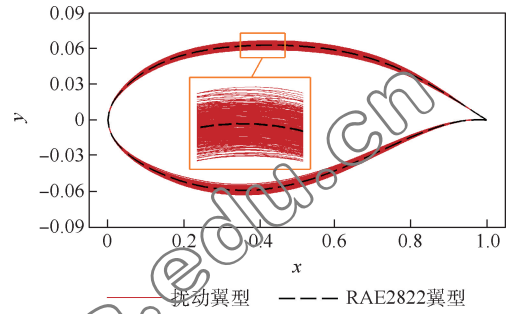


图 9　几何扰动下的翼型变化情况

Fig. 9　Airfoil transformation under geometric perturbation

4　稳健优化设计

4.1　优化流程及计算说明

图 10 给出了几何扰动下的稳健优化设计流程。在无扰动的常规优化流程中,先对初始外形进行 PCA-HicksHenne 参数化设计;其次对参数进行试验设计,得到采样点;再次进行配套网格变形及计算流体力学(computational fluid dynamic, CFD)解算,得到采样点的响应;随后在采样点上构建代理模型,并进行优化算法寻优;最终得到优化外形。而在考虑几何扰动的优化流程中,还需要在参数化完成之后进行敏感度分析,寻找几何扰动参数,并根据 CFD 结果进行扰动下的不确定度量化,随后再构建代理模型、进行算法寻优。

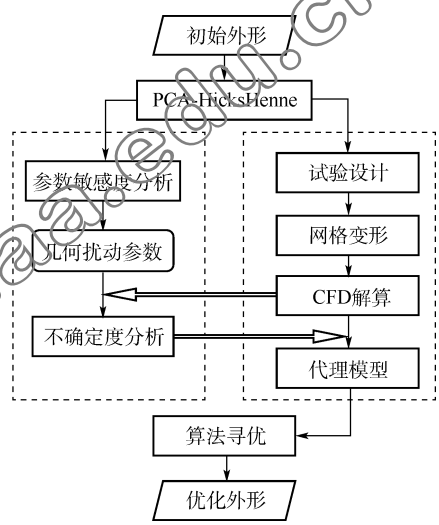


图 10　几何扰动下稳健优化设计流程

Fig. 10　Flow chart of robust optimization design under geometric perturbation

本文选取 RAE2822 翼型作为基础翼型,在自研 CFD 计算平台 MI-CFD[16] 上,构建克里金模型[17],并利用多岛遗传算法[18]进行寻优。计算状态如表 1 所示。为展示稳健优化的性能,将其与确定优化的结果进行对比,具体见 4.2 节和 4.3 节。

4.2　案 例 1

本节案例是单目标优化案例。确定优化目标

http://bhxb.buaa.edu.cn

及对应的稳健优化目标定义分别为

$$\max \quad C_l$$
$$\text{s.t.} \quad \theta \geqslant 0.12 \tag{8}$$
$$\max \quad \mu_{C_l}$$
$$\text{s.t.} \begin{cases} \sigma_{C_l} \leqslant \sigma_{C_{l,\mathrm{RAE2822}}} \\ \mu_\theta \geqslant 0.12 \end{cases} \tag{9}$$

式中：C_l 和 θ 分别为翼型的升力系数和翼型厚度；μ 和 σ 分别为对应下标变量在扰动下的均值和标准差。

优化结果如表 5 所示。本文中无扰动翼型的升阻力性能与扰动下平均性能接近。可以看出，确定优化外形在升力均值方面提升很多，但同时也不可避免地伴随着升力标准差的增长。性能提升的同时，不确定度也在增大，这是不利的。而对于稳健优化外形，因为在优化过程中已经考虑了对不确定性因素的约束，所以在其性能提升的同时，不确定度基本无变化。

表 5 案例 1 优化结果对比

Table 5 Comparisons of optimal results in Case 1

翼型	μ_{C_l}	$\sigma_{C_l}/10^{-2}$	μ_θ
RAE2822	0.767 7	0.981 2	0.121 0
确定优化外形	0.886 5	1.179 7	0.119 8
稳健优化外形	0.895 9	1.018 3	0.120 8

4.3 案例 2

本节案例是多目标优化案例。确定优化目标及稳健优化目标定义分别为

$$\min \quad \{C_d, -C_l\}$$
$$\text{s.t.} \quad \theta \geqslant 0.12 \tag{10}$$
$$\min \quad \{\mu_{C_d}, \sigma_{C_d}, -\mu_{C_l}, \sigma_{C_l}\}$$
$$\text{s.t.} \quad \mu_\theta \geqslant 0.12 \tag{11}$$

式中：C_d 为翼型的阻力系数。

图 11 和图 12 给出 2 个优化过程的 Pareto 前沿面，其中稳健优化结果仅给出平均升力与平均阻力的对应关系。在图 11 和图 12 中分别选出 3 个设计点，并将结果在表 6 和表 7 中列出。

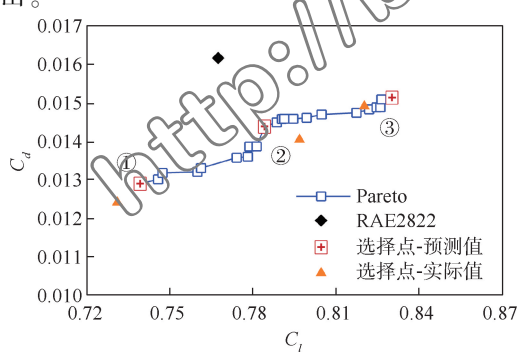


图 11 案例 2 确定优化 Pareto 前沿面

Fig. 11 Pareto frontier of deterministic optimization in Case 2

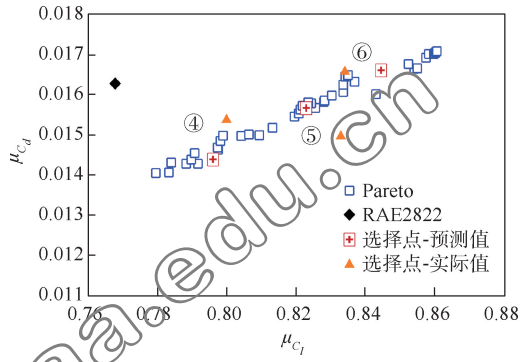


图 12 案例 2 稳健优化 Pareto 前沿面

Fig. 12 Pareto frontier of robust optimization in Case 2

表 6 案例 2 确定优化结果

Table 6 Solutions of deterministic optimization in Case 2

翼型	$\mu_{C_d}/10^{-1}$	$\sigma_{C_d}/10^{-3}$	μ_{C_l}	$\sigma_{C_l}/10^{-2}$	μ_θ
RAE2822	0.162 7	1.214 5	0.767 7	0.981 2	0.121 0
翼型①	0.124 6	0.449 3	0.731 6	1.459 5	0.120 1
翼型②	0.141 9	0.888 8	0.794 3	1.252 3	0.123 1
翼型③	0.149 0	0.556 3	0.820 4	2.956 6	0.121 2

表 7 案例 2 稳健优化结果

Table 7 Solutions of robust optimization in Case 2

翼型	$\mu_{C_d}/10^{-1}$	$\sigma_{C_d}/10^{-3}$	μ_{C_l}	$\sigma_{C_l}/10^{-2}$	μ_θ
RAE2822	0.162 7	1.214 5	0.767 7	0.981 2	0.121 0
翼型④	0.153 7	0.945 3	0.799 9	0.966 0	0.121 0
翼型⑤	0.149 6	1.035 6	0.832 9	1.026 9	0.122 2
翼型⑥	0.165 6	1.072 4	0.834 1	0.967 6	0.122 1

如表 6 和表 7 所示，所有得到的优化翼型均满足翼型厚度约束。其中，确定优化得到的 3 个优化翼型在平均升阻力性能得到提升的同时，对阻力系数的不确定度恰好也有减弱的效果，而对升力系数的不确定度则恰恰相反。3 个翼型的升力系数标准差均有不同幅度的增长，最高达到了近 200%。对于飞行器稳健性的设计要求，这是不利的。而稳健优化得到的 3 个优化翼型，则在目标性能相斥的情况下，兼顾了升阻力的均值及标准差等各方面的性能要求。在提升某些方面性能的同时，也能保证其他性能的不恶化。

由表 6 和表 7 确定优化得到的翼型③（以下为确定优化翼型）和稳健优化得到的翼型⑤（以下称稳健优化翼型）的平均性能相近，对其作对比分析。

图 13 给出了 RAE2822 翼型、确定优化翼型及稳健优化翼型的形状对比，并在图 14 ~ 图 16 中给出了 3 个翼型及其对应扰动翼型的压力系数 C_p 的分布情况。

如图 13 ~ 图 16 所示，在设计状态下，2 个优化外形在下翼面后缘附近都存在由于弯度增加的后缘加载，升力因此增加。此外，稳健外形在上翼

http://bhxb.buaa.edu.cn

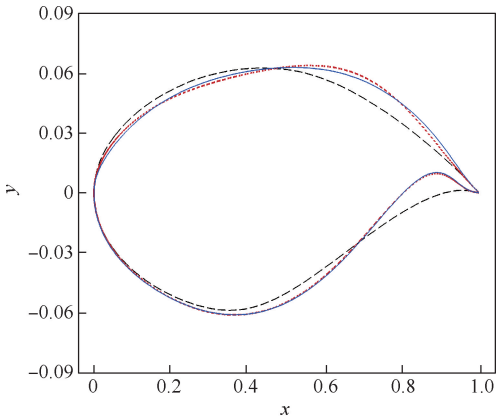


图 13　优化翼型对比

Fig. 13　Comparisons of optimal airfoils

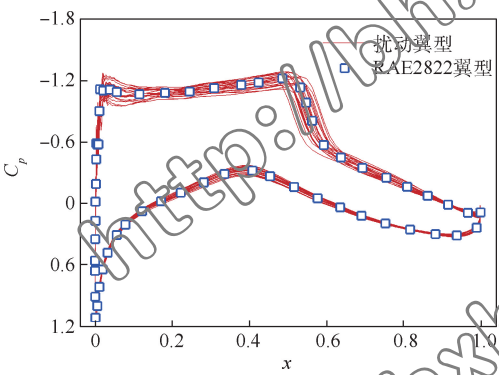


图 14　RAE2822 翼型及扰动翼型的压力分布

Fig. 14　Surface pressure distribution of RAE2822 airfoil and its corresponding airfoils under perturbation

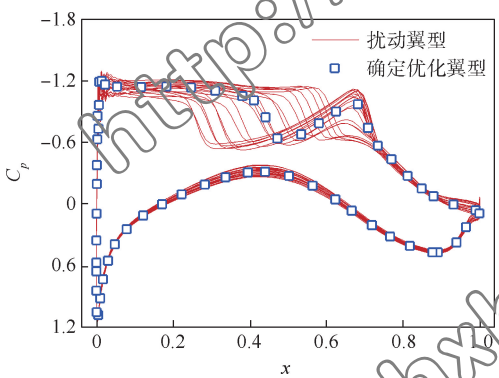


图 15　确定优化翼型及扰动翼型的压力分布

Fig. 15　Surface pressure distribution of deterministic optimal airfoil and its corresponding airfoils under perturbation

面前缘附近曲率更大,产生了一个较小的吸力峰,因此其升力相对更大。而在阻力方面,2 个优化外形的上翼面相对 RAE2822 翼型都更加平缓,确定优化外形分解为 2 个小激波,稳健优化外形激波强度减弱,二者阻力均降低。

而在几何扰动下,稳健优化外形的激波强度和位置的变化与 RAE2822 翼型相似,因此两者的升力系数变化几乎一致,标准差相当。另外稳健外形的激波强度相对较小,因此其阻力系数的标准差也相对较小。对于确定优化外形,其激波位置在扰动下变化剧烈,由此导致升力变化较大。而其激波强度较弱,变化也不大,因此阻力变化不大。

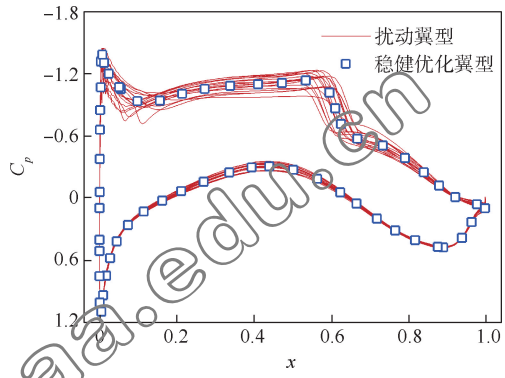


图 16　稳健优化翼型及扰动翼型的压力分布

Fig. 16　Surface pressure distribution of robust optimal airfoil and its corresponding airfoils under perturbation

5　结　论

本文构建了基于主成分分析的 PCA-HicksHenne 参数化方法,并在此基础上进行了考虑几何不确定性的稳健优化研究,结论如下:

1)对原始 Hicks-Henne 方法进行了修改,使其在翼型后缘处也能提供有效扰动,提高了参数化方法的空间表达能力。

2)构建了基于主成分分析的 PCA-HicksHenne 参数化方法,揭示了翼型的主要几何变形模态,验证了对应参数的分布规律,同时实现了参数化方法的降维,提高了优化效率。

3)利用参数敏感度分析方法,发现翼型厚度变形模态、弯度变形模态及上翼面最大厚度位置的轴向位移模态是翼型性能的主要影响模态,必须予以重视。

4)发展了基于 PCA-HicksHenne 方法几何不确定性稳健优化设计方法,拓展了对几何不确定性稳健优化的研究,优化得到的目标翼型在性能提升的同时,稳健性也得以保证。

参考文献(References)

[1] 蒙文巩,马东立. 飞机系列机翼气动特性稳健匹配优化设计[J]. 北京航空航天大学学报,2013,39(1):126-131.
MENG W G, MA D L. Robust matching design optimization for wing aerodynamic characteristic of aircraft family[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(1):126-131(in Chinese).

[2] 山美娟,赵丽滨. 基于可靠性的 CFRP 螺栓连接优化设计方法[J]. 北京航空航天大学学报,2021,47(11):2249-2255.
SHAN M J, ZHAO L B. Reliability-based design optimization

http://bhxb.buaa.edu.cn

method of CFRP bolted joints[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2021,47(11):2249-2255(in Chinese).

[3] 李焦赞,高正红. 基于几何不确定性的翼型多目标稳健优化设计[J]. 力学学报,2011,43(3):611-615.
LI J Z,GAO Z H. Multi objective optimization methodology for airfoil robust design under geometry uncertainty[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2011,43(3):611-615(in Chinese).

[4] 宋鑫,郑冠男,杨国伟,等. 几何不确定性区间分析及鲁棒气动优化设计[J]. 北京航空航天大学学报,2019,45(11):2217-2227.
SONG X,ZHENG G N,YANG G W,et al. Interval analysis for geometric uncertainty and robust aerodynamic optimization design[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2019,45(11):2217-2227(in Chinese).

[5] 赵青,王惠文,王珊珊. 基于中心-对数半长的区间数据主成分分析[J]. 北京航空航天大学学报,2021,47(7):1414-1421.
ZHAO Q,WANG H W,WANG S S. A principal component analysis of interval data based on center and log-radius[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2021,47(7):1414-1421(in Chinese).

[6] 蒋晨琛,霍宏涛,冯琦. 一种基于PCA的面向对象多尺度分割优化算法[J]. 北京航空航天大学学报,2020,46(6):1192-1203.
JIANG C C,HUO H T,FENG Q. An object-oriented multi-scale segmentation optimization algorithm based on PCA[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2020,46(6):1192-1203(in Chinese).

[7] 鞠胜军. 结合转捩的精细化气动优化设计方法研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2018:16-28.
JU S J. Numerical research o detail aerodynamic optimization design with transition prediction[D]. Beijing:Beihang University,2018:16-28(in Chinese).

[8] 张扬,白俊强,朱军,等. 改进Hicks-Henne型函数法在翼型参数化中的应用[J]. 飞行力学,2011,29(5):35-38.
ZHANG Y,BAI J Q,ZHU J,et al. Application of improved Hicks-Henne shape function to airfoil parameterization[J]. Flight Dynamics,2011,29(5):35-38(in Chinese).

[9] 李静. 高性能飞行器气动外形设计方法研究与应用[D]. 西安:西北工业大学,2014:41-43.
LI J. Research on aerodynamic configuration design methods for high performance aircraft[D]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University,2014:41-43(in Chinese).

[10] 周志华. 机器学习[M]. 北京:清华大学出版社,2016:229-232.
ZHOU Z H. Machine learning[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2016:229-232(in Chinese).

[11] JU S J,YAN C,WANG X Y,et al. Sensitivity analysis of geometric parameters upon the aerothermodynamic performances of Mars entry vehicle[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2018,120:597-607.

[12] ZHAO Y T,YAN C,WANG X Y,et al. Uncertainty and sensitivity analysis of SST turbulence model on hypersonic flow heat transfer[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2019,136:808-820.

[13] ZHANG W,WANG S,WANG Q,et al. Reverse jet parameters study on aerodynamic thermal uncertainty of a blunt body[J]. Aerospace Science and Technology,2020,107:106260.

[14] ZHANG W,WANG Q,YAN C. An intelligent polynomial chaos expansion method based upon features selection[J]. Journal of Physics:Conference Series,2021,1786(1):012046.

[15] 张德虎,席胜,田鼎. 典型翼型参数化方法的翼型外形控制能力评估[J]. 航空工程进展,2014,5(3):281-288.
ZHANG D H,XI S,TIAN D. Geometry control ability evaluation of classical airfoil parametric methods[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering,2014,5(3):281-288(in Chinese).

[16] 王胜,王强,林博希,等. 类X-51A飞行器纵向机动数值虚拟飞行仿真[J]. 北京航空航天大学学报,2021,47(1):97-105.
WANG S,WANG Q,LIN B X,et al. Longitudinal maneuver simulation of an X-51A like aircraft based on numerical virtual flight[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2021,47(1):97-105(in Chinese).

[17] LIU Y,HAN Z H,ZHANG Y,et al. Surrogate-based aerodynamic shape optimization of hypersonic flows considering transonic performance[J]. Aerospace Science and Technology,2019,93:105345.

[18] SHEN Y,HUANG W,ZHANG T T,et al. Parametric modeling and aerodynamic optimization of EXPERT configuration at hypersonic speeds[J]. Aerospace Science and Technology,2019,84:641-649.

http://bhxb.buaa.edu.cn

Robust optimization design under geometric uncertainty based on PCA-HicksHenne method

ZHANG Wei[1], WANG Qiang[2], LU Jiachen[1], YAN Chao[1,*]

(1. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074, China)

Abstract: The aerodynamic shape design of an aircraft requires a robust optimization approach that takes uncertainty into account. To the knowledge of the authors, research efforts were more paid to the robust optimization considering environmental perturbations, rather than geometric perturbations. For purpose of quantifying the geometric uncertainty, the principal component analysis (PCA) method was utilized to perform research on the parameterization process of the RAE2822 airfoil. The main geometric transformation modes of the airfoil were revealed subsequently. After that, the sensitivity analysis method was applied, and the thickness deformation mode, the camber deformation mode, and the axial displacement mode of the maximum thickness position on the upper surface were indicated as the main influential modes. Those modes were taken as the perturbation modes in the following robust optimization research. The results show that the lift variation of the deterministic optimal airfoil without consideration of perturbation is much huger, with the standard deviation increased by about 200%. However, the optimal airfoil considering geometric perturbation is more robust. The robust airfoil's variability, whether in lift or drag, are lower than those of the original RAE2822 airfoil along with the improvement in mean performance.

Keywords: robust optimization; geometric perturbation; principal component analysis; parameterization; uncertainty

http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2021-03-25; **Accepted**: 2021-06-13; **Published online**: 2021-06-21 16:33
URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210621.1344.004.html
Foundation items: National Natural Science Foundation of China (11721202,11972064)
* **Corresponding author**. E-mail: yanchao@buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0143

Tanabe 模型和 Smith 热调节模型结合预测皮温效果分析

王涛[1], 张万欣[1,*], 李猛[1], 卜雪琴[2], 张宸[2], 王海亮[1]

(1. 中国航天员科研训练中心人因工程重点实验室, 北京 100094; 2. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 人体热调节模型用于描述人体内外热传递现象,预测热生理参数值。为利用人-服热模型评估室温环境控制,抓住人-服-环境传热的主要因素提出了人体热调节与服装热阻的耦合模型。所提模型由受控系统和热调节控制系统构成。受控系统采用 Tanabe 模型,把人体分为 16 个节段,每个节段由内到外分成核心、肌肉、脂肪和皮肤 4 层,外加与各组织层传热的中心血池,共 65 个节点,每个节点上利用 Pennes 生物热方程计算传热量。热调节控制系统采用 Smith 热调节模型中利用生理数据获取的经验控制方程描述血管舒缩、出汗率和寒颤 3 种人体基本热调节控制方式。结果表明:所提模型对皮肤温度的预测值与试验结果绝对误差最大值小于 0.8 ℃,绝对误差平均值约为 0.5 ℃,对试验工况下的人体皮肤温度有较好的预测结果。

关 键 词: 生物热学; 热调节模型; 受控系统; 生物热方程; 皮肤温度

中图分类号: Q65

文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2022)12-2482-12

热调节模型是人体内外传热的数学描述[1],其可对核心温度和皮肤温度等生理参数进行预测,为热感觉和热舒适评价模型提供输入条件,因此,热调节模型是热感觉和热舒适评价方法的组成部分[2]。日常生活中人们经常处于各类室内环境中,了解人体对环境的热感觉,评价环境的热舒适程度是建筑暖通设计和节能的需要,由此促进了人体热模型的发展。

人体热调节模型始创于 20 世纪初期,文献[3]指出,1911 年提出了一个经验模型把人体描述成一个节点与外环境传热。1934 年 Burton[4] 创建了人体传热数学模型,模型中包括人体解剖结构和热调节控制方程。这些发展初期的人体热模型无论是精度还是通用性都较差。20 世纪 60~90 年代,一些具有里程碑意义的模型相继出现,如 Gagge 两节点模型[5]、文献[6]所提模型和 Smith 多元模型[7]等,2000 年后模型的发展多是在以上经典模型的思路框架下对模型中受控系统和热调节系统进行的改进、完善和创新,并加快了模型应用研究。2001 年 Fiala 等[8] 创建多节点模型,其受控系统模型把人体划分为 15 个节段,共 187 个节点,描述了人体与外界对流、辐射、汗液蒸发等多种传热形式,考虑了衣物热阻的影响,其在生理热调节模型的建立上是通过试验数据的回归分析获得的生理热调控模型,该模型可以预测稳态和瞬态下人体整体和局部的生理热响应。2001 年 UC Berkeley 多节点模型[9-10] 是以 Stolwijk 模型为基础建立起来的,其受控系统模型可以把

收稿日期: 2021-03-25; **录用日期**: 2021-04-23; **网络出版时间**: 2021-06-21 11:51
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210621.0944.001.html
基金项目: 人因工程国防科技重点实验室预研基金 (6142222180502)
* **通信作者**. E-mail: zhangwanxin-2009@163.com

引用格式: 王涛, 张万欣, 李猛, 等. Tanabe 模型和 Smith 热调节模型结合预测皮温效果分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2482-2493. WANG T, ZHANG W X, LI M, et al. Performance analysis of skin temperature prediction model combining Smith's thermoregulation model with Tanabe model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2482-2493(in Chinese).

人体划分为任意个节段,并考虑了身高、体重、肥胖和性别等个体生理和衣物穿着差异,模型将以上人因参数变量融合到人体生成器中,可以研究不同生理特征对人体热响应的影响,其在生理热调节模型的建立上主要用与设定点温度进行比较,完成反馈和控制,该模型可以预测瞬态和非均匀下人体整体和局部的生理热响应。2002 年 Tanabe 等[11]建立的多节点模型也是以文献[6]所提模型为基础,其受控系统模型把人体划分为 16 个节段,每个节段分为 4 层共 64 个节点,第 65 个节点定义为中心血液,其与64 个节点进行对流传热,人体与外界通过对流、辐射、汗液蒸发等形式进行热交换,在生理热调节模型的建立上主要用与设定点温度进行比较,完成反馈和控制,该模型可以预测瞬态和非均匀下人体整体和局部的生理热响应。2016 年 Lai 和 Chen[12]建立的多节点模型允许在不同节段上设置衣物热阻,并在相邻节段间增设了血液传热模拟;2018 年 Davoodi 等[13]在 Gagge 两节点模型上考虑体重、身高、性别、年龄和基础代谢等个体因素发展出了个体化热调节模型;2019 年 Kang 等[14]创建的多节点模型在相邻节段间模拟了导热传热;2020 年范路[15]通过对大量文献研究指出每种人体热模型都有其适用范围,需要根据实际应用加以修正,今后模型的改进将集中在血液模型、服装模型、个体差异和特定环境模型的改进上。人体热模型的应用主要体现在热舒适[16-19]、暖通[20]、医疗[21]、特种服装[22]和暖体假人[23-24]等领域。

从经验模型到两节点模型,再到多元模型是一个由简单到复杂的发展过程。模型越复杂对人体划分得越细致,越适合描述非均匀环境下的人体热响应,但同时模型使用难度也越大,对计算机的运算和存储能力要求也越高。随着计算机技术的普及应用,近 30 年来人体热模型得到快速发展。Tanabe[11]模型、Fiala[8]模型和 Berkeley 模型[9-10]等都是较为成功的模型。尽管如此,目前用于生理参数预测的人体热模型还不能应用在热舒适评价的国际标准中。这是因为模型没有统一公认的验证规范,研究文献中提供的试验验证方法和数据针对性强,无普适性。这种状况使得模型预测精度和可靠性受到质疑[25]。因此,现阶段人体热模型距离成熟应用仍有较大距离,还需要进一步的理论创新研究来夯实基础和试验研究积累数据。

本文创建的人体热调节模型在受控系统上采纳了 Tanabe[11]模型,按生理自然节段把人体分为 65 个传热节点,每个节点的传热采用 Pennes 生物热方程,从传热学角度看 Tanabe 模型对人体受控系统的划分更直观、简便、合理,抓住了人体内部传热的主要特征。但其在热调节控制系统模型上采用与设定点温度进行比较反馈控制,该方法简单,个体差异对设定点温度值影响大,反映到模型预测上就是可靠性不高,相比之下,Smith 多元模型中的生理热调节模型是建立在大量人体解剖和生理数据基础上,热调节模型中的各类参数有其实际物理意义,更具客观性,更能描述人体生理热调节的客观规律。因此,采用这 2 种模型的组合可以有助于提高人体热调节模型的预测水平和可靠性,在学术和应用 2 个方面体现出一定价值。2 种模型的组合在本文设定工况下对人体皮肤温度的预测和试验结果吻合度较高。

1　人体热调节模型

人体热调节模型可以分为受控系统模型和热调节控制系统模型 2 部分。受控系统模型是描述各层肌体组织、血液循环系统、呼吸系统和皮肤层与外界的传热;热调节控制系统模型用于描述人体应对外环境变化时肌体产生的热调节生理功能,包含血液系统输血量控制,皮肤血管舒缩引起的血流量变化控制,汗液分泌变化引起的蒸发散热控制,寒颤引起的肌肉层代谢产热控制。

1.1　受控系统模型

模型中的受控系统是从传热学角度对复杂人体组织的简化划分[11]。依据人体结构特点将人体划分为头、胸、背、腹、上臂、下臂、手、大腿、小腿、足共 16 个节段(下文用字母 $i\in[1,16]$ 来指代身体各节段),每个节段沿径向分成 4 层:核心层、肌肉层、脂肪层和皮肤层(下文用字母 $j\in[1,4]$ 来指代各组织层),外加一个中心血池,这样人体就由 65 节点构成。如图 1 所示,各层组织间通过导热形式传递热量,组织层与血液循环系统发生的传热被简化成与中心血池的传热,皮肤层与外环境间通过对流、辐射、蒸发和呼吸进行热交换,其中呼吸传热仅限头部和胸部。

利用 Pennes 生物热方程对 4 个组织层和中心血池建立能量平衡方程:

$$C(i,1)\frac{\mathrm{d}T(i,1)}{\mathrm{d}\tau}=Q(i,1)-B(i,1)-D(i,1)-\mathrm{RES}(i,1)\tag{1}$$

$$C(i,2)\frac{\mathrm{d}T(i,2)}{\mathrm{d}\tau}=Q(i,2)-B(i,2)+D(i,1)-D(i,2)\tag{2}$$

http://bhxb.buaa.edu.cn

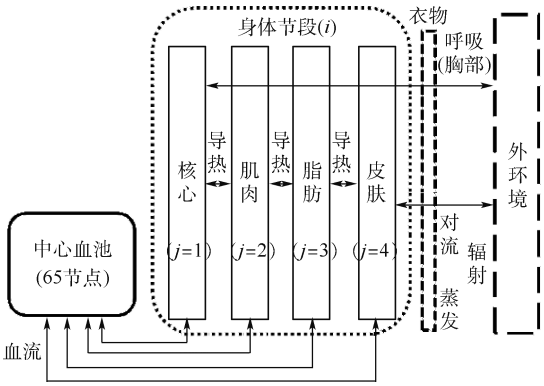


图 1 人体受控系统传热原理

Fig. 1 Heat transfer schematic diagram of human passive system

$$C(i,3)\frac{\mathrm{d}T(i,3)}{\mathrm{d}\tau} = Q(i,3) - B(i,3) + D(i,2) - D(i,3) \tag{3}$$

$$C(i,4)\frac{\mathrm{d}T(i,4)}{\mathrm{d}\tau} = Q(i,4) - B(i,4) + D(i,3) - Q_T(i,4) - E(i,4) \tag{4}$$

$$C(65)\frac{\mathrm{d}T(65)}{\mathrm{d}\tau} = \sum_{i=1}^{16}\sum_{j=1}^{4} B(i,j) \tag{5}$$

式中:C 为人体组织比热容[11],(Wh)/℃;T 为人体各层温度,℃;τ 为时间,s;Q 为代谢产热,W;B 为血流传热,W;D 为组织层间的导热,W;RES 为呼吸传热,W;Q_T 为皮肤层与外界的显热传热,W;E 为皮肤层与外界的潜热传热,W。

1.1.1 代谢产热计算

代谢产热 $Q(i,j)$ 计算如下:

$$Q(i,j) = Q_b(i,j) + W(i,j) + M_{shiv}(i,j) \tag{6}$$

式中:$Q_b(i,j)$ 为各组织层节点的基础代谢率[11];$W(i,j)$ 为对外做功产热;$M_{shiv}(i,j)$ 为寒颤产热。做功产热和寒颤产热只发生在肌肉层(即 $j=2$),其他层为 0。

人体对外做功计算如下:

$$W(i,2) = 58.2(\mathrm{met} - Q_b)A_{DU}\cdot \mathrm{Metf}(i) \tag{7}$$

式中:met 为代谢当量(metabolic equivalent, MET),是一种表示运动强度的重要指标,1 met 定义为一个健康成年人静坐保持舒适状态时的新陈代谢率,约为 58.15 W/m²;Q_b 为基础代谢率,是人体节段各组织层节点基础代谢的总和,约为 0.778 met;Metf(i)[11] 为对外做功引起的人体肌肉层产热在每个节段上的分配系数;A_{DU} 为人体表面积,由 Du Bois 公式计算,表示为

$$A_{DU} = 0.202W^{0.452}H^{0.725} \tag{8}$$

式中:W 为人体体重,kg;H 为人体身高,m。

1.1.2 血流传热计算

血流传热 $B(i,j)$ 是中心血池与各组织层间的热交换,其计算式如下:

$$B(i,j) = \rho C_b\cdot \mathrm{BF}(i,j)(T(i,j) - T(65)) \tag{9}$$

式中:ρC_b 为血液的体积比热[11],ρ 为密度,C_b 为比热;$T(65)$ 为中心血池温度;BF(i,j)为血流量,核心层、肌肉层和脂肪层血流量,其计算式为

$$\mathrm{BF}(i,j) = \mathrm{BFB}(i,j) + \left(\frac{W(i,j) - M_{shiv}(i,j)}{1.16}\right) \tag{10}$$

其中:BFB(i,j)为基础血流;式(10)等号右边第 2 项为代谢产热引起的血流增加量[11]。

1.1.3 组织导热计算

相邻组织层间的导热传热计算如下:

$$D(i,j) = C_d(i,j)(T(i,j) - T(i,j+1)) \tag{11}$$

式中:$C_d(i,j)$ 为不同节段组织层的导热系数[11]。

1.1.4 呼吸散热计算

人体的呼吸散热发生在头、胸部的核心层,即节点(1,1)和(2,1)处,RES(i,j)可表示为

$$\mathrm{RES}(2,1) = [0.001\,4(34 - T_a) + 0.017(5.867 - P_a(1))]\sum_{i=1}^{16}\sum_{j=1}^{4} Q(i,j) \tag{12}$$

式中:T_a 为环境温度,℃;$P_a(1)$为水蒸气压力,kPa。

1.1.5 皮肤层与外界传热计算

皮肤层与外界散热有两部分组成:显热散热 $Q_T(i,4)$ 和蒸发散热 $E(i,4)$,计算如下:

$$Q_T(i,4) = A_{DU}(i)\frac{T(i,4) - T_a}{R_{t,fab} + R_{Ta}} \tag{13}$$

$$E(i,4) = \lambda A_{DU}(i)\frac{P(i,4) - P_a}{R_{e,fab} + R_{ea}} \tag{14}$$

式中:λ 为水的蒸发潜热,取 33 ℃对应值 2 422 kJ/kg;$A_{DU}(i)$ 为节段 i 的体表面积[11];T_a 为环境温度;$P(i,4)$和 P_a 分别为皮肤表面和环境水蒸气分压力,Pa;$R_{t,fab}$和 $R_{e,fab}$分别为衣物的热阻和湿阻,单位分别为(m²K)/W 和(m²Pa)/W;R_{Ta}和 R_{ea}分别为皮肤外表面空气层的热阻和水汽阻力,单位分别为(m²K)/W 和(m²Pa)/W,计算式为[26]

$$R_{Ta} = \frac{1}{h_r + 8.3\sqrt{0.11 + 0.45v_{walk} + v_{wind}}} \tag{15}$$

$$R_{ea} = \frac{2\,340\times 1\,000}{0.1353\sqrt{0.11 + 0.45v_{walk} + v_{wind}}} \tag{16}$$

其中:h_r 为辐射传热系数,取 5.0 W/(m²K);v_{walk} 和 v_{wind}分别为步行速度和环境风速,m/s。

1.1.6 初始与边界条件

边界条件有环境温度、环境水蒸气分压力、风速、衣物热阻和湿阻等,均可通过试验测量。核心层、肌肉层、脂肪层的初始温度参考文献[21]中热中性状态下的设定值,皮肤层的初始温度由试验值给出。

皮肤层水蒸气分压力 $P(i,4)$ 和人体出汗率

http://bhxb.buaa.edu.cn

相关。根据 Umeno[27]的建议,人体皮肤表面汗液的聚集量不会超过 35 g/m^2 的极限值,如有超出部分将会从皮肤上滴落或被内层衣物吸湿带走。在皮肤上的汗液聚集小于 35 g/m^2 时,汗液聚集量等于出汗率加无感出汗减去汗液蒸发量,如下[28]:

$$\frac{\mathrm{d}m_{\mathrm{sa}}(i)}{\mathrm{d}\tau} = m_{\mathrm{rsw}}(i) + \frac{P_{\mathrm{s}}(T(i,4)) - P(i,4)}{R_{\mathrm{esk}}} - \frac{P(i,4) - P_{\mathrm{a}}}{R_{\mathrm{ea}}} \tag{17}$$

式中:$m_{\mathrm{sa}}(i)$为第 i 节段皮肤层汗液聚集量,kg/m^2;$m_{\mathrm{rsw}}(i)$为第 i 节段的出汗率,kg/(m^{2}s);R_{esk}为皮肤水蒸气阻力,(m^{2}Pas)/kg;$P_{\mathrm{s}}(T)$为环境温度 T_{a} 下的皮肤层饱和水蒸气分气压,Pa,计算式为

$$\ln P_{\mathrm{s}} = \ln 611.2 + \frac{17.62T}{243.12 + T} \tag{18}$$

人体皮肤上出现汗液聚集时,皮肤表层的水气压力 $P(i,4)$等于温度 $T(i,4)$下的饱和水蒸气压力,在没有汗液聚集时,可由式(17)推导计算。由此 $P(i,4)$计算如下:

$$P(i,4) = \begin{cases} P_{\mathrm{s}}(T(i,4)) & m_{\mathrm{sa}}(i) > 0 \\ \dfrac{m_{\mathrm{rsw}}(i)R_{\mathrm{esk}}R_{\mathrm{ea}} + P_{\mathrm{s}}(T(i,4))R_{\mathrm{ea}} + P_{\mathrm{a}}R_{\mathrm{esk}}}{R_{\mathrm{esk}} + R_{\mathrm{ea}}} & \\ & m_{\mathrm{sa}}(i) = 0 \end{cases} \tag{19}$$

1.2　热调节控制系统模型

热调节控制系统[7]原理如图 2 所示。人体皮肤层的温度感受器反馈信号与体温基准输入信号

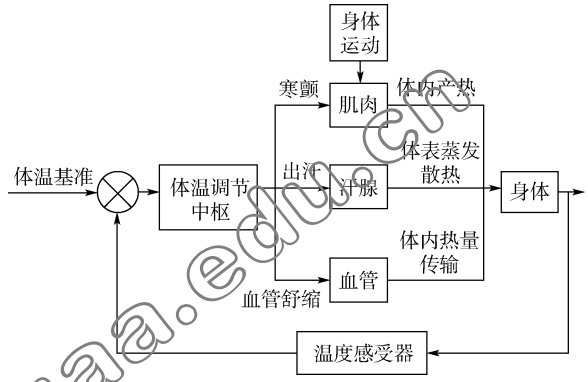


图 2　人体热调节控制系统原理

Fig. 2　Schematic diagram of human thermoregulatory control system

的偏差作为体温调节中枢的控制信号,控制调节肌肉寒颤、汗液分泌、血管舒缩或运动代谢来消除身体的冷热应激,维持人体核心体温和平均皮肤温度处于正常工作范围。

人体热调节控制方程涵盖血管舒缩引起热量输送控制、汗液散热控制和肌肉代谢产热控制,反映了人体随环境改变的自适应调节功能特点,是人体热模型的重要组成部分。本文采用 Smith[7]基于试验数据提出的热调节控制系统模型。模型中的控制变量为核心温度 T_{core} 和平均皮肤温度 T_{skin},核心温度取中心血池温度 $T(65)$,平均皮肤温度计算如下:

$$T_{\mathrm{skin}} = \sum_{i=1}^{16} \frac{A_{\mathrm{DU}}(i)}{A_{\mathrm{DU}}} T_{\mathrm{skin}}(i) \tag{20}$$

1.2.1　皮肤层血流量控制

皮肤层血管收缩时的血流量控制 $\mathrm{BF}_{\mathrm{sk,con}}(i)$计算如下:

$$\mathrm{BF}_{\mathrm{sk,con}}(i) = \begin{cases} \mathrm{BF}_{\mathrm{sk,basal}}(i) & T_{\mathrm{skin}} \geqslant 33.7\ ℃ \\ \dfrac{T_{\mathrm{skin}}(i) - 10.7}{33.7 - 10.7}(\mathrm{BF}_{\mathrm{sk,dilmax}}(i) - \mathrm{BF}_{\mathrm{sk,conmax}}(i)) + \mathrm{BF}_{\mathrm{sk,conmax}}(i) & 10.7\ ℃ < T_{\mathrm{skin}} < 33.7\ ℃ \\ \mathrm{BF}_{\mathrm{sk,conmax}}(i) & T_{\mathrm{skin}} \leqslant 10.7\ ℃ \end{cases} \tag{21}$$

式中:$\mathrm{BF}_{\mathrm{sk,basal}}(i)$为 i 节段皮肤层基础血流量[7];$\mathrm{BF}_{\mathrm{sk,conmax}}(i)$为 i 节段皮肤血管最大收缩状态下的血流量[7]。

皮肤层血管舒张时的血流量控制 $\mathrm{BF}_{\mathrm{sk,dil}}(i)$为

$$\mathrm{BF}_{\mathrm{sk,dil}}(i) = \begin{cases} \mathrm{BF}_{\mathrm{sk,dilmax}}(i) & T_{\mathrm{core}} \geqslant 37.2\ ℃ \\ \dfrac{T_{\mathrm{core}}(i) - 36.8}{37.2 - 36.8}(\mathrm{BF}_{\mathrm{sk,dilmax}}(i) - \mathrm{BF}_{\mathrm{sk,basal}}(i)) + \mathrm{BF}_{\mathrm{sk,basal}}(i) & 36.8\ ℃ < T_{\mathrm{core}} < 37.2\ ℃ \\ \mathrm{BF}_{\mathrm{sk,basal}}(i) & T_{\mathrm{core}} \leqslant 36.8\ ℃ \end{cases} \tag{22}$$

式中:$\mathrm{BF}_{\mathrm{sk,dilmax}}(i)$为 i 节段皮肤血管最大舒张状态下的血流量[7]。

http://bhxb.buaa.edu.cn

人体各节段皮肤层血流量计算如下：

$$BF_{sk}(i) = \frac{V_{O_2}}{V_{O_2,basal}} \cdot \frac{BF_{sk,con}(i)BF_{sk,dil}(i)}{22.910} \tag{23}$$

式中：等号右边第1部分为人体耗氧量与热中性状态下耗氧量的比值，这说明血流量与人体运动耗氧成比例；V_{O_2}和$V_{O_2,basal}$分别为实时耗氧量体积和热中性状态下耗氧量体积，计算式为

$$V_{O_2} = \frac{Q_{total}}{21\ 120(0.23RQ + 0.77)} \tag{24}$$

其中：Q_{total}为总代谢率；RQ为呼吸熵，定义为人体呼出二氧化碳体积流率与吸入氧气体积流率的比值，热中性状态下其值约为0.77。

1.2.2 出汗率控制

核心温度T_{core}超过了出汗阈值或37.1 ℃，人体会发生出汗现象。出汗阈值T_{sweat}为平均皮肤温度T_{skin}的函数，计算如下：

$$T_{sweat} = \begin{cases} 42.084 - 0.158\ 33T_{skin} & T_{skin} < 33.0\ ℃ \\ 36.85 & T_{skin} \geqslant 33.0\ ℃ \end{cases} \tag{25}$$

人体出汗率最大值不超过0.193 3 g/s。整个人体出汗率m_{sw}，计算如下：

$$m_{sw} = \frac{45.8 + 739.4(T_{core} - T_{sweat})}{3\ 600} T_{core} > T_{sweat} \tag{26}$$

人体各节段的出汗率$m_{rsw}(i)$（单位为kg/(s·m²)），计算如下：

$$m_{rsw}(i) = \frac{1\ 000Sweat(i) \cdot m_{sw}}{A_{DU}(i)} \tag{27}$$

式中：Sweat(i)为每个节段出汗率的权重系数，是身体节段的汗腺数量与整个身体汗腺数量的比值[11]。

1.2.3 寒颤代谢产热控制

平均皮肤温度低于寒颤阈值T_{shiv}，则身体会发生寒颤现象，但当核心温度T_{core}等于或高于37.1 ℃时，无论平均皮肤温度是多少，身体都不会发生寒颤。人体发生寒颤的平均皮肤温度阈值T_{shiv}计算如下：

$$T_{shiv} = \begin{cases} 35.5 & T_{core} \leqslant 35.8\ ℃ \\ -1.022\ 2 \times 10^4 + 570.97T_{core} - 7.945\ 5T_{core}^2 & \\ & 35.8\ ℃ < T_{skin} < 37.1\ ℃ \end{cases} \tag{28}$$

寒颤代谢率M_{shiv}计算如下：

$$M_{shiv} = M_{shiv,max}\left[1.0 - \left(\frac{T_{skin} - 20.0}{T_{shiv} - 20.0}\right)^2\right]/3\ 600$$
$$40\ ℃ - T_{shiv} \leqslant T_{skin} \leqslant T_{shiv} \tag{29}$$

式中：$M_{shiv,max}$为寒颤引起的肌肉层最大代谢产热率，是核心温度的函数，计算式为

$$M_{shiv,max} = (-1.186\ 1 \times 10^9 + 6.552 \times 10^7 T_{core} - 9.041\ 8 \times 10^5 T_{core}^2)/3\ 600$$
$$T_{core} < 37.1\ ℃ \tag{30}$$

人体各节段肌肉层寒颤代谢产热率$M_{shiv}(i,2)$的计算需要引入寒颤加权系数Shiv(i)[11]，该系数是将寒颤代谢M_{shiv}分配到身体每一节段的肌肉层中。各节段肌肉层寒颤代谢产热计算如下：

$$M_{shiv}(i,2) = Shiv(i)M_{shiv} \tag{31}$$

2 试验设计

考虑到在空调环境中的室内运动日益成为人们快节奏生活的选择，试验设计对此种情况设置了环境参数、运动工况，并对试验误差进行分析。

2.1 环境参数设置

根据常规室内空调环境，试验设定的环境温度、湿度、风速如表1所示。室内运动时穿着连体内衣，衣物整体热阻和湿阻的测定值如表1所示。

为保障环境参数的一致性，受试者进入恒温舱完成上肢运动代谢流程，在此过程中采集人体皮肤温度等参数，试验现场照片如图3所示。

表1 环境参数汇总

Table 1 Environmental parameters

参数	数值
环境温度/℃	25±2
环境湿度/%	30~70
风速/(m·s⁻¹)	<0.5
衣物整体热阻/(m²·℃·W⁻¹)	0.13
衣物整体湿阻/(m²·kPa·W⁻¹)	0.008 3



图3 试验现场受试者做功照片

Fig. 3 Photo of a subject working at test site

2.2 运动工况设置

运动工况依据代谢量大小涵盖低强度活动量、中等强度活动量和高强度活动量。低强度活动量下受试者做简单的上肢运动，中等和高强度

http://bhxb.buaa.edu.cn

活动量下受试者操作上肢功率计对外做功。做功代谢量级、做功时间和间歇期的设定值依据 GB/T 18048—2008[29]。运动设置对应人体代谢产热量水平和运动工况信息如表 2 所示。

表 2　运动工况设置

Table 2　Motion settings

运动描述	代谢产热/ W	运动频次	运动时间/min	休息时间/min
静息直立,双臂下垂	<125		7	
肩运动。双臂向前抬至水平,后向体侧展开,再自然下垂	125 ~235	20 次/min	3 ~5	7
肘运动。肩关节前伸 60°,同时屈肘,前臂交叉于前胸,双手分别贴于左右胸前,后恢复初始状态	125 ~235	20 次/min	3 ~5	7
功率计 20 W 运动。双手摇动功率计把手,做圆周运动	235 ~360	40 周/min	3 ~5	7
功率计 30 W 运动。双手摇动功率计把手,做圆周运动	235 ~360	40 周/min	3 ~5	7
功率计 40 W 运动。双手摇动功率计把手,做圆周运动	360 ~465	40 周/min	3 ~5	7
功率计 60 W 运动。双手摇动功率计把手,做圆周运动	>465	40 周/min	3 ~5	7

2.3　误差分析

试验测量的物理量有温度、湿度、流量、风速、质量和代谢量,相应的测量设备及精度信息如表 3所示。

表 3　试验设备信息汇总

Table 3　Experimental equipment

设备	用途	物理量	精度
温度传感器	测量环境温度	温度	±0.2 ℃
湿度传感器	测量环境湿度	湿度	4% FS
黑球温度计	测量环境黑球温度	温度	±0.3 ℃
风速计	测量人体周围风速	风速	2% FS
肺功能仪	测量吸入氧气和呼出二氧化碳体积流量	体积流量	2% FS
Ibutton 温湿度传感器	测量皮肤温、湿度	温度/湿度	±0.1 ℃ 2% FS
人体秤	测量体重	质量	±1 g

注:FS 为满量程。

肺功能仪用于实时采集人体吸入氧气和呼出二氧化碳的体积流量,以此计算人体代谢产热。计算方法如下:

$$\sum_{i=1}^{16} W(i,2) = 5.88\left(0.32\frac{\dot{V}_{CO_2}}{\dot{V}_{O_2}} + 0.77\right)\frac{\dot{V}_{O_2}}{A_{DU}} \quad (32)$$

根据式(32)中的独立测量参数:氧气体积流量、二氧化碳体积流量、人体质量和人体身高,可以得到人体代谢产热测量误差计算如下:

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\Delta\dot{V}_{CO_2}}{\dot{V}_{CO_2}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\dot{V}_{O_2}}{\dot{V}_{O_2}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta W}{W}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{H}\right)^2} \quad (33)$$

式中:$\dot{V}_{CO_2}$和 $\dot{V}_{O_2}$分别为肺功能仪测量的二氧化碳和氧气体积流量,其测量精度为 ±2%;W 为人体质量,测量精度为 ±0.5%;H 为人体身高,测量精度为 ±0.6%。可得到人体代谢产热量的测量精度为 ±2.93%。

3　结果与分析

3.1　工况设置

受试者 4 名,个人详细信息如表 4 所示。

试验中,受试者皮肤上贴附温湿度传感器,按规定着装后进入恒温室静坐 1 h,恒温室温度设置为 25 ℃,湿度为 50%,风速为 0(按 0.2 m/s 取值),在此过程中采集热中性状态下皮肤温度等生理参数,而后受试者如图 4 所示,依次进行静立、肩运动、肘运动和操作上肢功率计对外 20,30,40,60 W 做功。受试者完成每一项运动用时 4 min 左右,而后站立静息 7 min,运动全程记录人体皮肤温度和外环境参数,试验中环境温度为 25.6 ℃,大气相对湿度为 54%。人体周围风速为 0.7 m/s,大气压强为 98.6 kPa。

表 4　受试者信息

Table 4　Profile of subjects

序号	姓名	性别	年龄/岁	身高/cm	体重/kg	职业
1	宴 X	男	21	166	60.7	学生
2	张 XX	男	22	174	64.7	学生
3	岳 XX	男	30	172	58.4	职工
4	杨 XX	男	32	181	61.7	职工

3.2　试验结果

图 5 ~图 8 为 4 名受试者运动过程中各节段皮肤温度模拟计算值与试验值的对比分析。

图 5(a)和图 5(b)分别为受试者 1 和 2 与受试者 3 和 4 平均皮肤温度曲线和代谢产热曲线。随着对外做功负荷的增加,代谢产热随之升高,平均皮肤温度逐渐上升。受试者 1 ~4 的平均皮肤温度分别约为 33.3 ℃、33 ℃、33.5 ℃和 32.7 ℃。代谢产热曲线显示运动时人体产热增加,休息时下降。在做功 60 W 时,受试者 1 和 2 达到代谢产热约为 6 met,受试者 3 和 4 达到代谢产热约为 3 met,代谢产热的差别可能与年龄因素有关。

http://bhxb.buaa.edu.cn

4 名受试者平均皮温的仿真值与试验值最大误差小于 0.7 ℃。图 6 为头部皮肤温度变化曲线。曲线显示整个运动过程中,头部皮肤温度无明显变化,只在对外做功 60 W 时略有增加。这是因为头部不参与做功,其上汗腺分布密集,汗液的潜热散热可及时将热量散发到环境中。4 名受试者头部皮肤温度仿真值与试验值最大误差均小于 0.5 ℃。

图 7 为背部皮肤温度曲线。背部皮肤温度随上肢做功增加呈现上升趋势,这是因为背部肌肉群对外做功,引起背部皮肤温度升高。在对外做功 40 W 和 60 W 的休息期间,受试者 1 ~ 3 温度迅速上升形成波峰说明背部肌肉群中的代谢产热

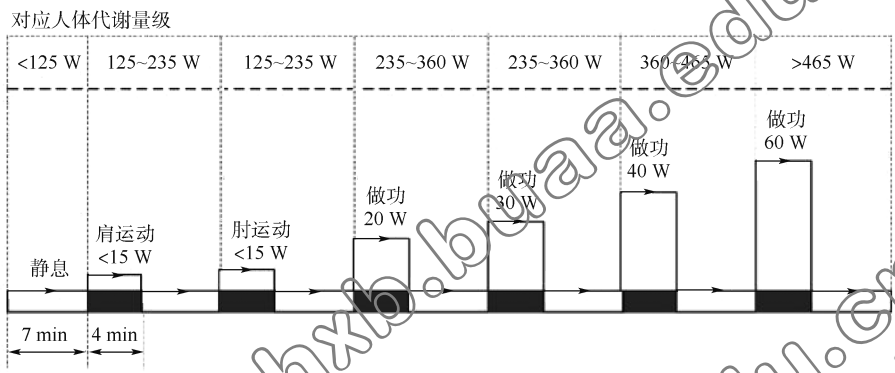
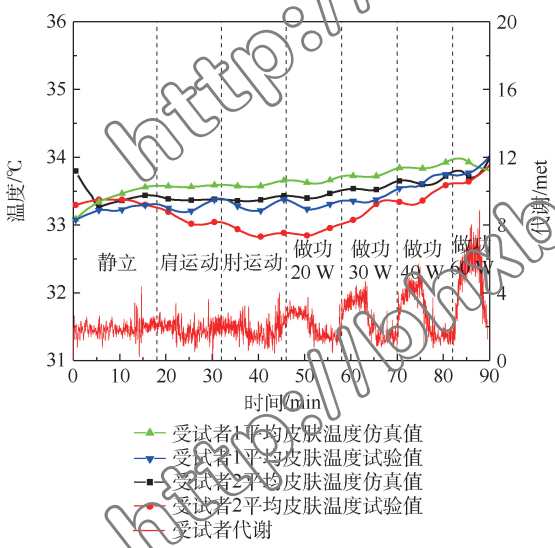
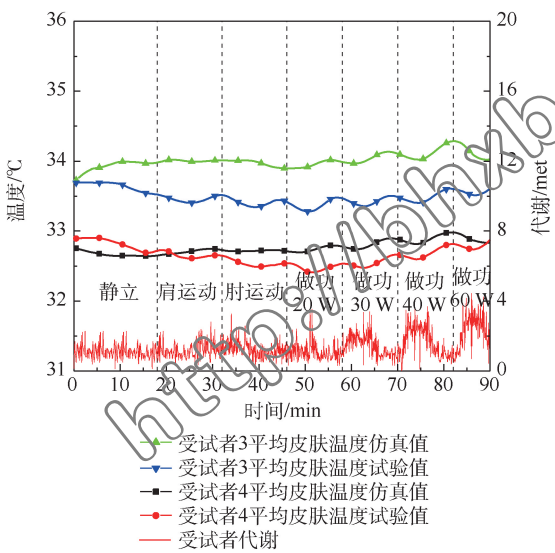


图 4 人体运动做功流程

Fig. 4 Flow diagram of work by body movement



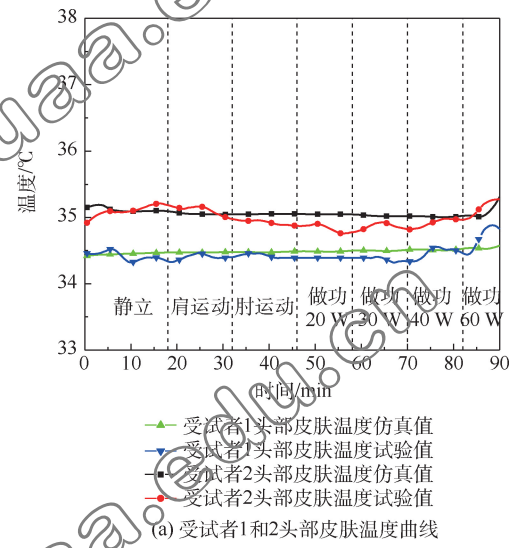
(a) 受试者1和2平均皮肤温度和代谢曲线



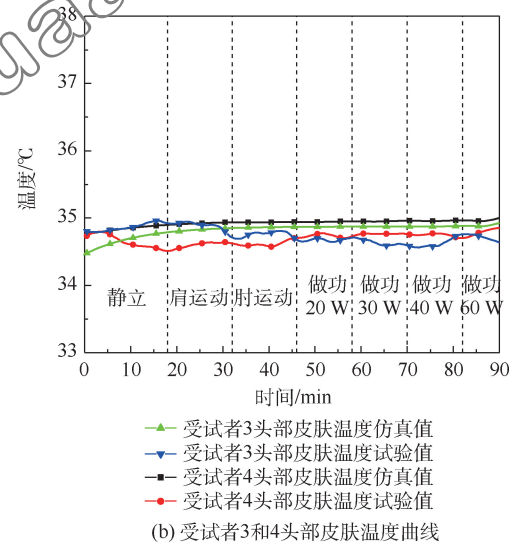
(b) 受试者3和4平均皮肤温度和代谢曲线

图 5 平均皮肤温度曲线

Fig. 5 Mean skin temperature curves of bodies



(a) 受试者1和2头部皮肤温度曲线

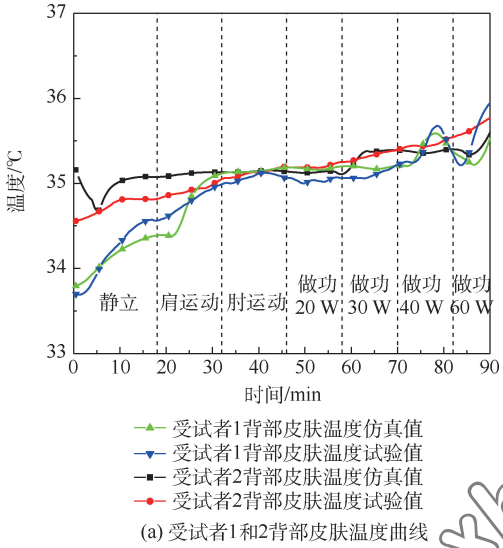


(b) 受试者3和4头部皮肤温度曲线

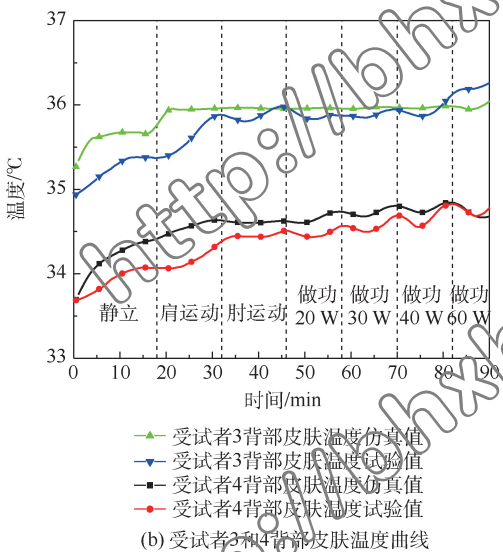
图 6 头部皮肤温度曲线

Fig. 6 Skin temperature curves of heads

http://bhxb.buaa.edu.cn



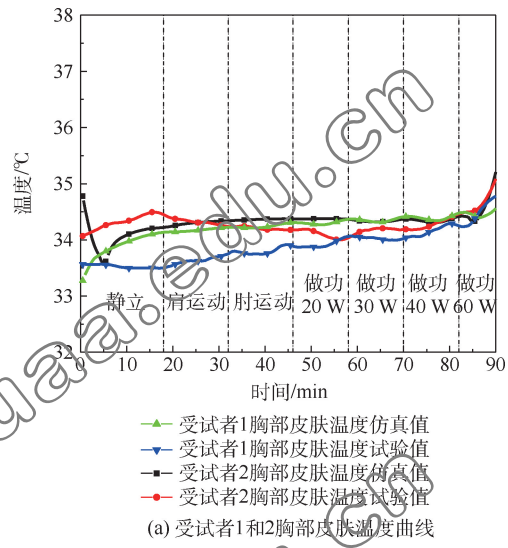
(a) 受试者1和2背部皮肤温度曲线



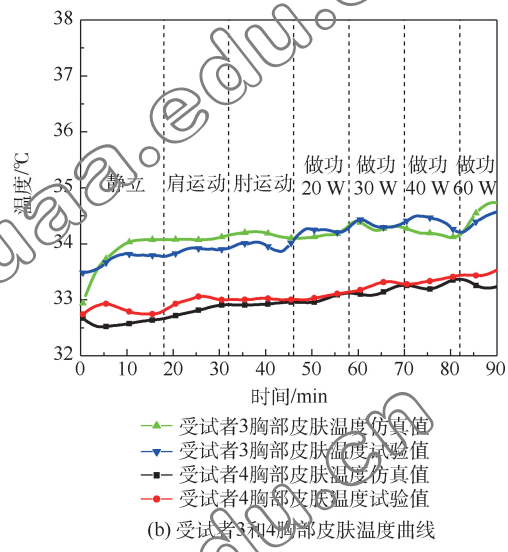
(b) 受试者3和4背部皮肤温度曲线

图 7　背部皮肤温度曲线

Fig. 7　Skin temperature curves of backs



(a) 受试者1和2胸部皮肤温度曲线



(b) 受试者3和4胸部皮肤温度曲线

图 8　胸部皮肤温度曲线

Fig. 8　Skin temperature curves of chests

在做功完成后休息期间才传递到皮肤层,这揭示了人体组织传热具有滞后性。受试者 4 温度较为平缓,是因为出汗降低了皮肤温度。4 名受试者背部皮肤温度仿真值与试验值最大误差小于 0.6 ℃。

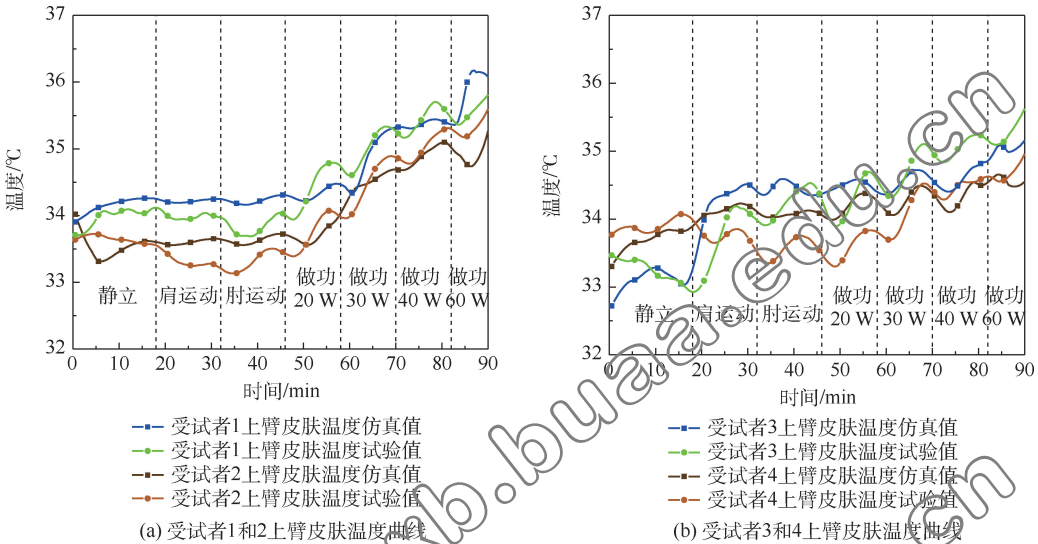
图 8 为胸部皮肤温度曲线。胸部皮肤温度曲线随着做功量增加呈现缓慢上升趋势,说明胸部肌肉层代谢产热与皮肤层对外散热基本保持了平衡。但在 60 W 做功休息期间温度有较明显上升,是由于 60 W 做功时胸部肌肉层代谢产热速率显著大于皮肤层散热速率,又因为人体组织传热的滞后性使得皮温的迅速增加出现在 60 W 做功后。4 名受试者胸部皮肤温度仿真值与试验值最大误差小于 0.7 ℃。

图 9 为上臂温度曲线。上臂肌肉做功大,皮肤温度上升显著。上臂皮肤温度曲线有明显的周期性波动—即在每个做功周期内,皮肤温度先下降后升高(运动时下降,休息时升高),这是做功和停歇的周期性活动引起代谢和对流散热变化而导致皮温的周期性改变:运动时上臂与空气间有较大的相对运动,空气的对流传热大,皮温下降;休息时对流散热小,同时因人体传热的滞后性使得做功的代谢产热休息期间释放到皮肤表面引起皮温增加。4 名受试者 1 号和 2 号上臂皮肤温度仿真值与试验值最大误差均小于 0.8 ℃。

图 10 为手部皮肤温度曲线。手部肌肉做功小,运动速度快,对流传热强,皮肤温度上升趋势弱。手部皮肤温度曲线有明显的周期性波动—即在每个做功周期内,皮肤温度先下降后升高(运动时下降,休息时升高),这是做功和停歇的周期性活动引起代谢和对流散热变化而导致皮温的周期性改变:运动时手部与空气间有较大的相对运动,空气的对流传热大,皮温下降;休息时对流散热小,同时因人体传热的滞后性使得做功的代谢产热休息期间释放到皮肤表面引起皮温增加。4 名受试者手部皮肤温度仿真值与试验值最大误差均小于 0.8 ℃。

图 11 为腿部皮肤温度曲线。腿部皮肤温度

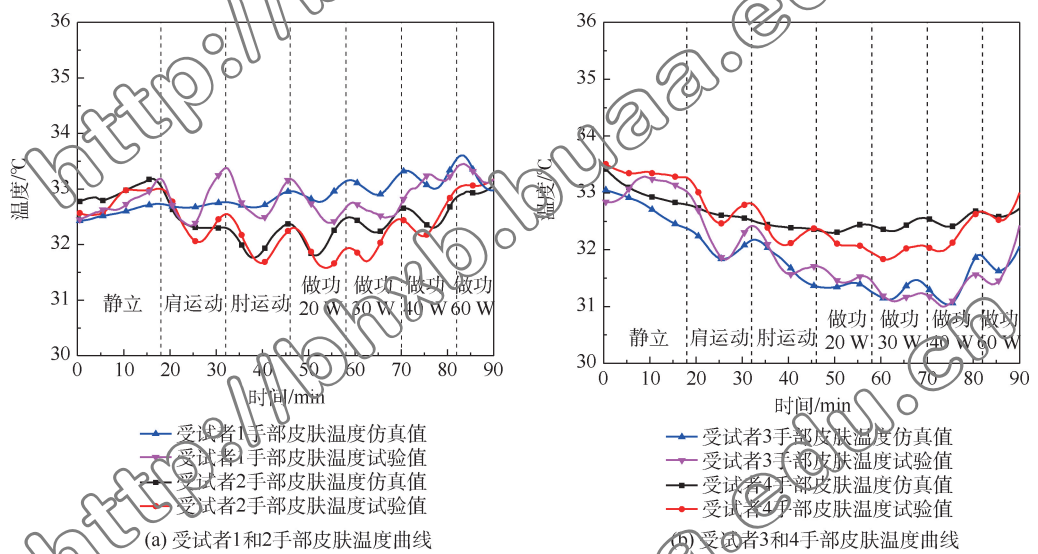
http://bhxb.buaa.edu.cn



(a) 受试者1和2上臂皮肤温度曲线　(b) 受试者3和4上臂皮肤温度曲线

图9　上臂皮肤温度曲线

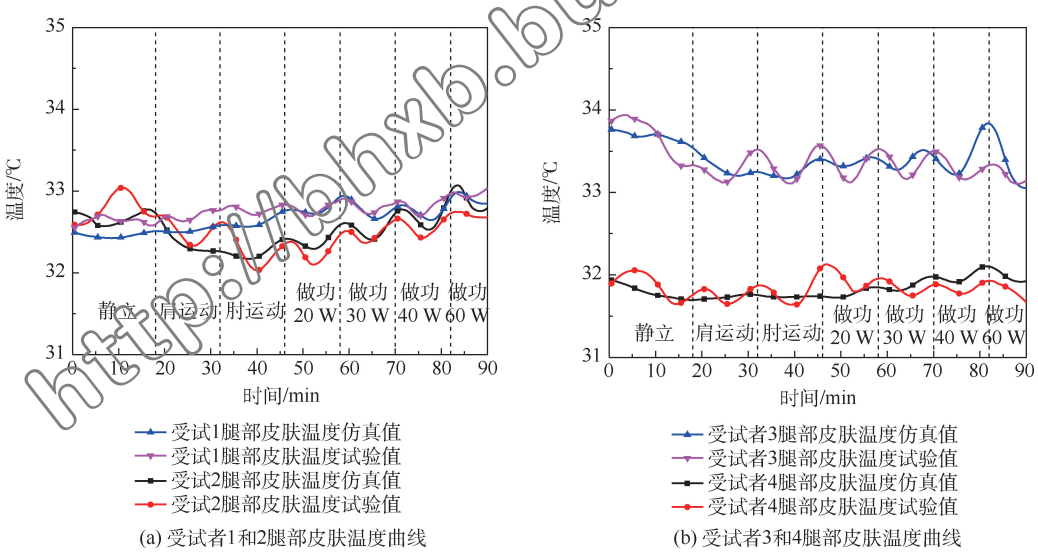
Fig. 9　Skin temperature curves of uper arms



(a) 受试者1和2手部皮肤温度曲线　(b) 受试者3和4手部皮肤温度曲线

图10　手部皮肤温度曲线

Fig. 10　Skin temperature curves of hands



(a) 受试者1和2腿部皮肤温度曲线　(b) 受试者3和4腿部皮肤温度曲线

图11　腿部皮肤温度曲线

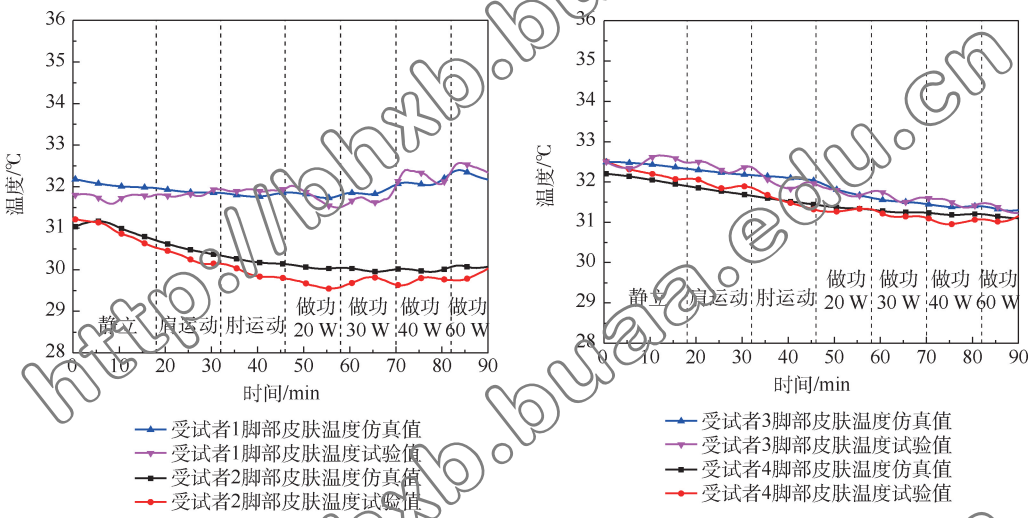
Fig. 11　Skin temperature curves of thighs

http://bhxb.buaa.edu.cn

曲线随做功增加,呈现略微上升趋势。这是因为腿部离人体躯干近,做功产热通过血液循环系统容易将热量传输给腿部。图 11 中温度曲线在每个做功周期内表现出先下降后上升的波动性,也反应了人体代谢产热在人体中传递滞后的特点。4 名受试者腿部温度仿真值与试验值最大误差均小于 0.5 ℃。

图 12 为脚部皮肤温度曲线。脚部代谢产热小,离身体核心部位远,其皮温受外环境影响大,因此4 名受试者脚部皮肤温度变化趋势有不同。图 12 中 30 W 以上对外做功周期内脚部皮肤温度有较为明显波动,说明上肢中高强度周期性做功(30 W 以上)产热通过血液系统对脚部皮温会产生一定影响。4 名受试者脚部温度仿真值与试验值最大误差小于 0.5 ℃。

图 7 背部和图 8 胸部皮肤温度曲线在起始段仿真与试验相比有较大偏差,随着时间变化偏差量逐渐减小,是由于各层组织初始仿真温度的设定与试验值存在偏差,随着计算迭代次数的增加,各层温度的仿真值与试验值逐步趋近。



(a) 受试者1和2脚部皮肤温度曲线　　(b) 受试者3和4脚部皮肤温度曲线

图 12　脚部皮肤温度曲线

Fig. 12　Skin temperature curves of feet

4　结　论

1) 人体上肢运动代谢产热主要在上肢、背部和胸部相关肌肉群产生。肌肉层中的代谢产热在人体中的传递表现出滞后性。

2) 上肢运动代谢产热对人体上部躯体产生的影响作用大于下部躯体。头部、背部和胸部皮肤温度在中低负荷运动下变化不明显,与这些部位汗腺分布密集散热能力强有关。

3) 上肢运动代谢产热通过血液系统传递到远端肢体手和足的份额小,对手和足皮肤温度影响弱。

4) 模型对各部位皮肤温度的仿真值与试验值吻合度较高,最大偏差量小于 0.8 ℃。误差主要来源有以下 5 个方面:①人体核心层、肌肉层和脂肪层温度的初始值无法测量,其值引用了相关文献数据,与真实值存在偏差;②人体模型中皮肤层节点温度代表一个部位整个皮肤层温度,而试验中的皮肤测点温度只是局部皮肤点温度,二者实质物理含义不同,只是作为近似处理;③温度传感器与皮肤间有接触热阻,而且运动时会产生相对滑动,并伴有气流影响,所以测试值与真实值存在偏差;④人体热模型发展不完备,模型中内置的各类物性参数和控制参数对真实物理过程的反映有一定误差;⑤模型对衣物在人体向外环境散热中的作用进行了简化处理,即用恒定的衣物热阻和湿阻的测量值来描述衣物在散热环节的阻力作用。这样的简化虽然对吸湿性小的纤维制做的服装是合理的,但简化处理将不可避免的引入误差。

综上所述,本文中将 Tanabe 模型与 Smith 模型中基于试验获取的人体热调节控制经验方程相结合,再通过合理简化衣物热模型,设置各类物性参数、控制参数和边界初始条件,进而抓住了人-服-环境系统热质传递的主要特征和机理。模型对试验设置的常温环境下中高强度运动中人体皮肤温度的热响应具有一定的预测能力。

参考文献 (References)

[1] SCHELLEN L, LOOMANS M G L C, KINGMA B R M, et al. The use of a thermophysiological model in the built environment to predict thermal sensation: Coupling with the indoor environment and thermal sensation [J]. Building and Environment,

http://bhxb.buaa.edu.cn

2013,59:10-22.

[2] KATIĆ K,LI R L,ZEILER W. Thermophysiological models and their applications: A review[J]. Building and Environment, 2016,106:286-300.

[3] LI Y,LI F Z,LIU Y X,et al. An integrated model for simulating interactive thermal processes in human-clothing system[J]. Journal of Thermal Biology,2004,29(7-8):567-575.

[4] BURTON A C. The application of the theory of heat flow to the study of energy metabolism: Five figures[J]. The Journal of Nutrition,1934,7(5):497-533.

[5] GAGGE A P,STOLWIJK A J,NISHI Y. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response[J]. ASHRAE Transaction, 1971, 77(1): 247-262.

[6] WHITTOW G C. Comparative physiology of thermoregulation[M]. New York: Academic Press,1971:327-380.

[7] SMITH C E. A transient, three-dimensional model of the human thermal system[D]. Kansas: Kansas State University, 1991: 718-724.

[8] FIALA D,LOMAS K J,STOHRER M. Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions[J]. International Journal of Biometeorology,2001,45(3):143-159.

[9] HUIZENGA C,HUI Z,ARENS E. A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments[J]. Building and Environment,2001,36(6):691-699.

[10] ZHANG H,HUIZENGA C,ARENS E,et al. Considering individual physiological differences in a human thermal model[J]. Journal of Thermal Biology,2001,26(4-5):401-408.

[11] TANABE S I,KOBAYASHI K,NAKANO J,et al. Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD)[J]. Energy and Buildings,2002,34(6):637-646.

[12] LAI D Y,CHEN Q Y. A two-dimensional model for calculating heat transfer in the human body in a transient and non-uniform thermal environment[J]. Energy and Buildings, 2016, 118: 114-122.

[13] DAVOODI F,HASSANZADEH H,ZOLFAGHARI S A,et al. A new individualized thermoregulatory bio-heat model for evaluating the effects of personal characteristics on human body thermal response[J]. Building and Environment, 2018, 136: 62-76.

[14] KANG Z X,WANG F M,UDAYRAJ J. An advanced three-dimensional thermoregulation model of the human body: Development and validation[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer,2019,107:34-43.

[15] 范路. 人体热调节模型综述及其发展讨论[J]. 节能,2020,39(4):172-176.
FAN L. Human thermoregulatory models and their development: A review[J]. Energy Conservation,2020,39(4):172-176(in Chinese).

[16] 倪冬香. 基于人体热调节模型的轿车乘员舱热舒适性分析[D]. 上海:上海交通大学,2010:723-730.
NI D X. Thermal comfort study in automobile passenger compartment based on human thermoregulation model[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010: 723-730(in Chinese).

[17] TANG Y L,HE Y,SHAO H W,et al. Assessment of comfortable clothing thermal resistance using a multi-scale human thermoregulatory model[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2016,98:568-583.

[18] 陈吉清,郑习娇,兰凤崇,等. 基于人体热调节模型的乘员舱热舒适性分析[J]. 汽车工程,2019,41(6):723-730.
CHEN J Q,ZHENG X J,LAN F C,et al. An analysis on thermal comfort in passenger compartment based on human thermal regulation model[J]. Automotive Engineering,2019,41(6): 723-730(in Chinese).

[19] 马景辉,魏厚福,杨艺真,等. 基于人体热调节模型的局部辐射温度对热舒适的影响[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版),2020,43(1):130-135.
MA J H,WEI H F,YANG Y Z,et al. Effect of local radiant temperature on thermal comfort based on human thermoregulation model[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Sciences Edition),2020,43(1):130-135(in Chinese).

[20] RIDA M,KELLY N. Toward better estimation of HVAC loads: Integrating a detailed human thermal model into building simulation[J]. Energy Procedia,2017,122:1147-1152.

[21] ZHAO J P,WANG H Q,LI Y G,et al. Heatstroke recovery at home as predicted by human thermoregulation modeling[J]. Building and Environment,2020,173:106752.

[22] WANG F M,GORDON C. Assessing and modeling the thermal impact of the human-clothing environment[J]. Journal of Thermal Biology,2017,70:1.

[23] YANG J,WENG W G,FU M. Coupling of a thermal sweating manikin and a thermal model for simulating human thermal response[J]. Procedia Engineering,2014,84:893-897.

[24] YANG J,NI S J,WENG W G. Modelling heat transfer and physiological responses of unclothed human body in hot environment by coupling CFD simulation with thermal model[J]. International Journal of Thermal Sciences,2017,120:437-445.

[25] IVANOV K P. The development of the concepts of homeothermy and thermoregulation[J]. Journal of Thermal Biology, 2006, 31(1-2):24-29.

[26] QIAN X M,FAN J T. Interactions of the surface heat and moisture transfer from the human body under varying climatic conditions and walking speeds[J]. Applied Ergonomics, 2006, 37(6):685-693.

[27] UMENO T. Prediction of skin and clothing temperatures under thermal transient considering moisture accumulation in clothing[J]. ASHRAE Transaction,2001,107:71-81.

[28] FU G Z. A transient, 3-D mathematical thermal model for the clothed human[D]. Kansas: Kansas State University,1995:61-63.

[29] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 热环境人类工效学 代谢率的测定:GB/T 18048—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Ergonomics of the thermal environment-Determination of metabolic rate: GB/T 18048—2008[S]. Beijing: Standards Press of China,2009(in Chinese).

http://bhxb.buaa.edu.cn

Performance analysis of skin temperature prediction model combining Smith's thermoregulation model with Tanabe model

WANG Tao[1], ZHANG Wanxin[1,*], LI Meng[1], BU Xueqin[2], ZHANG Chen[1], WANG Hailiang[1]

(1. National Key Laboratory of Human Factors Engineering, China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China;
2. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A human body thermoregulation model is designed to describe heat transfer from a human body to the environment, and predict thermal physiological parameters. This model is composed of a passive system and a thermoregulation system. The passive system employs the Tanabe model, consisting of 65 multi-nodes by dividing the human body into 16 segments, each of which has four layers: core, muscle, fat and skin. The 65th node is a blood pool transferring heat with each tissue layer. Pennes' bio-thermal equations are employed in each node to calculate heat exchange. In the thermoregulation system, the empirical control equations developed from the physiological experimental data in Smith's model are used to represent the three basal thermoregulation control modes of vasomotion, sweating and shivering in human bodies. The maximum absolute error between the simulation and experimental data is less than 0.8 ℃, and the mean value of the absolute error is about 0.5 ℃. The tests show that the proposed model based on Smith's and Tanabe's models can effectively predict skin temperature under the operating condition of this study.

Keywords: bio-thermal; thermoregulation model; passive system; bio-thermal equation; skin temperature

http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2021-03-25; **Accepted**: 2021-04-23; **Published online**: 2021-06-21 11:51

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210621.0944.001.html

Foundation item: Foundation of National Key Laboratory of Human Factors Engineering (6142222180502)

* **Corresponding author**. E-mail: zhangwanxin-2009@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0151

开裂式阻力方向舵流固耦合机理分析

李永昌, 戴玉婷*, 杨超
(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为了探究阻力方向舵开裂状态下的流场形态和流固耦合运动机理,采用计算流体力学(CFD)方法开展了不同开裂角下的二维阻力方向舵的流场计算。基于动力学模态分解(DMD)方法对各流场进行模态分解,分析了各模态的流动特征及频率变化。结果表明,在20°开裂角的范围内,机翼绕流的流场结构以开裂区内的驻涡及后缘脱落涡为主,流场各阶模态频率随来流速度的增大而增大,随开裂角的增大而减小。同时,对不同开裂角的二维翼型开展了流固耦合计算。结果表明,随着折减速度的增加,系统的流固耦合运动形式由涡致振动发展为流动失稳,系统的失稳边界随着开裂角的增大而提高。

关 键 词: 开裂式阻力方向舵; 动力学模态分解; 流场重构; 涡致振动; 流动失稳
中图分类号: V221+.3; TB553
文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2022)12-2494-08

开裂式阻力方向舵(简称阻力舵)是目前飞翼式飞机的主要航向操纵装置之一[1-3]。飞翼式飞机在飞行时,阻力舵会对局部流动造成较大的扰动,与升力、俯仰力矩及滚转力矩耦合较大且变化规律复杂。大开裂角状态下的流场类似于大迎角的流场绕流,可能会引起气流分离和涡流等复杂的流场状态[4-5],对飞机的气动特性造成很大的影响,可能会导致气动弹性问题。

针对这种特殊的操纵装置,国内外开展了不同方向的研究。Mohamad 等[6]讨论了阻力舵对飞翼式飞机偏航运动的影响,并给出了低速状态下阻力舵的操纵效率随开裂角的变化规律。张子军等[7]通过风洞试验的方法探究了阻力舵对飞翼式飞机气动特性的影响,试验表明,在给定的迎角和来流马赫数范围内,阻力舵的舵效基本不变,并且阻力舵可以在对升力、侧力、俯仰力矩影响较小的情况下产生较大的偏航力矩。刘其琛等[8]对阻力舵动态打开过程的非定常气动特性进行了研究,得到了升阻力系数等数据在阻力舵打开过程中的变化趋势。韩鹏等[9]针对二维阻力方向舵模型的气动弹性问题开展了工作,为这种特殊的气动外形建立了新的颤振计算方法。

目前的流场分解手段主要有2种:本征正交分解(proper orthogonal decomposition, POD)方法和动力学模态分解(dynamic mode decomposition, DMD)方法。20世纪60年代,Lumley[10]将POD方法应用于流体力学。POD方法的核心思想是通过样本数据得到一组恰当的正交基函数,使得样本数据在该正交基上的投影分量依次迅速衰减,从而可以用较少的基展开获得高维数据的近似描述,构造低维动力学模型。DMD方法是由Schmid等[11-12]在Koopman分析的基础上提出的一种低维系统分解方法,基于流场的动力学特性,对流场快照进行分解,所提取的子结构在时间、空间演化特性上相互正交,可以得到流动在时间和空间上的主要特征。DMD方法经过不断改进发展,近年来被广泛地应用于流动现象的机理分析,如台阶流动[13]、方腔流动[14]等。潘翀等[15]利用

收稿日期: 2021-03-29; **录用日期**: 2021-04-20; **网络出版时间**: 2021-06-01 14:15
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210601.0947.001.html
基金项目: 国家自然科学基金(11672018)
* **通信作者**. E-mail: yutingdai@buaa.edu.cn

引用格式: 李永昌, 戴玉婷, 杨超. 开裂式阻力方向舵流固耦合机理分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2494-2501.
LI Y C, DAI Y T, YANG C. Fluid and structure coupling analysis of split drag rudder[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2494-2501(in Chinese).

http://bhxb.buaa.edu.cn

DMD 方法对复杂流动的实验数据进行分析,发现 DMD 方法不仅能够捕捉流场的主要特征,还可以捕捉其高频谐波。寇家庆和张伟伟[16]对现有的 DMD 方法与 POD 方法进行了比较,说明了 DMD 方法在流场分析中的优势,并讨论了 DMD 方法的研究现状及未来发展方向。Rowley 等[17]对射流流场采用 DMD 分析,得到了流场中的剪切层涡和壁涡等结构。韩亚东和谭磊[18]应用 DMD 方法获得空化流场的动力学模态,揭示了空化发展和脱落的结构特征。Menon 和 Mittal[19]对俯仰运动的翼型绕流进行 DMD 分析,获得了其主要的流场模态,为流固耦合运动的 DMD 分析提供了方法。

本文通过计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法得到了不同雷诺数及不同开裂角下的二维阻力舵的流场数据,并基于 DMD 方法对各流场进行模态分解,分析了各个模态的流动特征及频率变化。同时,通过流固耦合方法进行了二维阻力舵模型俯仰运动的机理分析,得到了不同开裂角下流固耦合系统运动形式的变化规律。

1　计算对象及方法

本文所用计算模型如图 1 所示,是一个带有阻力舵的 NACA0015 翼型,弦长 c 约为 0.3 m,阻力舵安装在翼型的 3/4 弦长位置,模型在 1/2 弦长位置连接有扭转弹簧,流场来流速度为 V,迎角为 α,规定阻力舵的开裂角 β 为单片舵的偏转角度。流场网格如图 2 所示,其为 AMI 网格,分为外部区域和内部区域,在进行流固耦合计算时,外部网格不动,内部网格沿着边界进行移动,从而实现模型的俯仰运动。由于主要关注翼型附近和尾流区的流动特征,主要提取内部区域的计算数据进行 DMD 分析。翼型附近靠近壁面的第 1 层网格厚度 y^+ 约为 1。流场的入口条件为速度入口,出口条件设置为压力出口,翼型表面为无滑移壁面,计算时间步长为 0.000 1 s,计算时选择 k-ω SST 湍流模型。

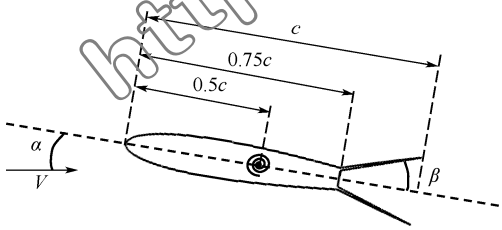
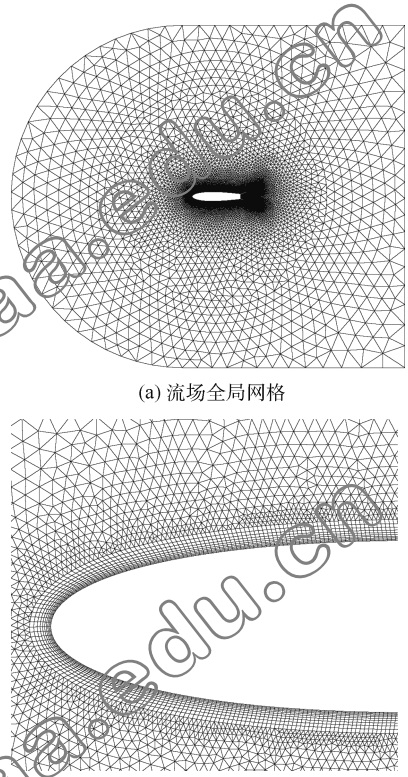


图 1　阻力舵模型

Fig. 1　Drag rudder model

为验证数值计算方法的有效性,图 3 给出了 NACA0012 翼型在动态失速状态下随迎角 α 变化的升力系数的仿真数据与试验数据的对比。翼型迎角 α 随时间 t 的变化规律为:$\alpha(t) = 10° + 15°\sin(\Omega t)$,其中,角频率 Ω 约为 18.67 rad/s。可以看出,本文选用的转捩 SST 模型与文献中的仿真数据[20]及试验数据[21]在 20°迎角的范围内相差不大。而在 20°迎角以上的范围,2 组数值计算的结果与试验值均有不同程度的误差。可以认为本文选用的 SST 模型在迎角不大时的计算数据是可靠的。



(a) 流场全局网格

(b) 翼面附近网格

图 2　流场网格

Fig. 2　Flow field grid

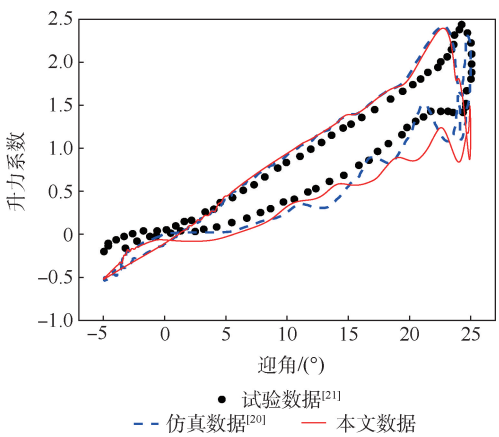


图 3　不同迎角时升力系数的计算结果与试验值

Fig. 3　Numerical and experimental aerodynamic coefficients with different angles of attack

http://bhxb.buaa.edu.cn

为了确保计算效率的同时保证计算的精度，对阻力舵的流场网格进行了网格无关性验证。选用了 3 套流场网格，其外部网格基本一致，而内部网格边界层向外的网格增长率分别为 1.05、1.1、1.15。各自的网格数量分别为 15 万（细网格）、8 万（中等网格）、3 万（粗网格）。计算选用转捩 SST 模型，来流速度为 10 m/s，2°迎角，时间步长为 1×10^{-4} s。3 套网格在相同流场条件下计算得到的翼型表面俯仰力矩随时间变化曲线如图 4 所示，力矩中心为翼型 0.5 倍弦长位置。可以看出，中等密度的网格满足计算精度。为了保证计算精度的同时兼顾计算效率，因此，选择中等密度、网格数为 8 万的网格进行后续计算。

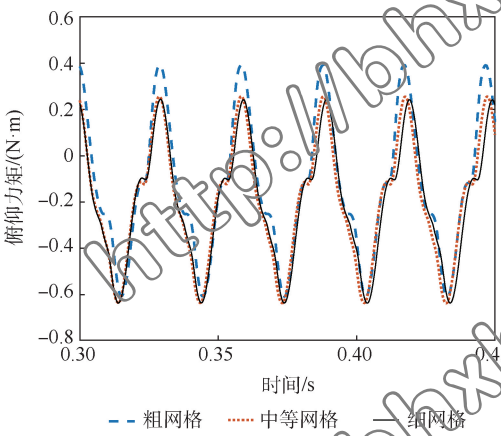


图 4 三套网格的俯仰力矩随时间变化曲线

Fig. 4 Pitching moment of three grids versus time

2 DMD 方法

对于某个流场来说，一系列时间间隔为 Δt 的流场快照矩阵 $\boldsymbol{X}_1^{N+1}$ 可以用前 $N+1$ 个时刻的流场信息向量 $\boldsymbol{x}_i$ 表示为

$$\boldsymbol{X}_1^{N+1}=[\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{x}_2,\cdots,\boldsymbol{x}_{N+1}] \tag{1}$$

DMD 方法的基本思想是用一个线性算子来近似复杂流动的演化。也就是寻找一个矩阵 $\boldsymbol{A}$，使得 $\boldsymbol{X}_2^{N+1}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}_1^N$，这样矩阵 $\boldsymbol{A}$ 就代表了相邻 2 个时刻流场之间的线性关系。但是在实际计算中，矩阵 $\boldsymbol{A}$ 是一个高维矩阵，因此，DMD 方法需要用一个低维矩阵 $\tilde{\boldsymbol{A}}$ 来近似代替 $\boldsymbol{A}$。

为了求解 $\tilde{\boldsymbol{A}}$，先对矩阵 $\boldsymbol{X}_1^N$ 进行奇异值分解：

$$\boldsymbol{X}_1^N\approx\boldsymbol{U}\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{V}^* \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{U}$、$\boldsymbol{V}$ 为酉矩阵；$\boldsymbol{\Sigma}$ 为奇异值对角矩阵；$\boldsymbol{V}^*$ 为 $\boldsymbol{V}$ 的共轭转置矩阵。

从而矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的近似矩阵 $\tilde{\boldsymbol{A}}$ 可以表示为

$$\tilde{\boldsymbol{A}}=\boldsymbol{U}^*\boldsymbol{X}_2^{N+1}\boldsymbol{V}\boldsymbol{\Sigma}^{-1} \tag{3}$$

对矩阵 $\tilde{\boldsymbol{A}}$ 进行特征值分解，记 λ_i 为 $\tilde{\boldsymbol{A}}$ 的第 i 个特征值，$\boldsymbol{w}_i$ 为 $\tilde{\boldsymbol{A}}$ 的第 i 个特征向量，那么第 i 个 DMD 模态 $\boldsymbol{\Phi}_i$ 为

$$\boldsymbol{\Phi}_i=\boldsymbol{U}\boldsymbol{w}_i \tag{4}$$

该模态对应的增长率 g_i 和频率 ω_i 分别为

$$\begin{cases}g_i=\mathrm{Re}\{\lg(\lambda_i)\}/\Delta t\\ \omega_i=\mathrm{Im}\{\lg(\lambda_i)\}/\Delta t\end{cases} \tag{5}$$

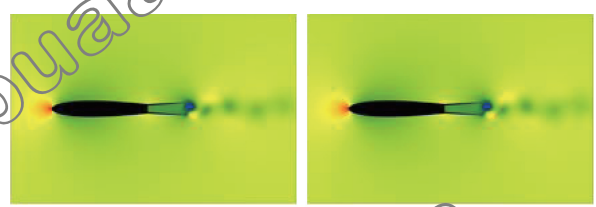
式中：Re 为复数的实部；Im 为复数的虚部。

3 DMD 结果分析

对 5°、10°、20°开裂角状态下的二维阻力舵模型进行非定常气动力计算，在流场稳定后提取网格节点处的压强数据。对采集的流场数据进行 DMD 分析。

图 5 为来流 10 m/s、开裂角 5°状态下的原流场及前 15 阶 DMD 模态重构的流场压强云图，重构流场与原流场基本一致，图 6 为 DMD 分解得到的前 4 阶流场模态，均为稳定的周期模态。

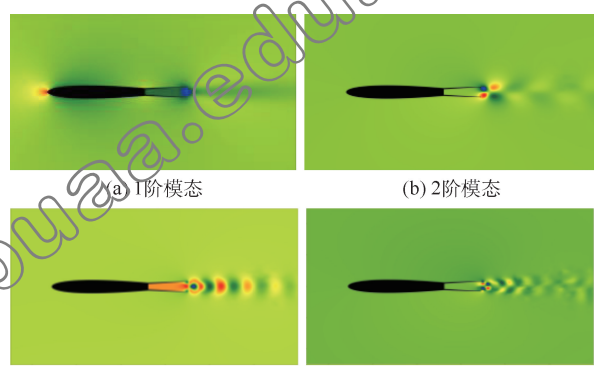
各阶模态的增长率与频率数据如表 1 所示。



(a) 原流场 (b) 重构流场

图 5 流场压强云图

Fig. 5 Pressure contours of flow field



(a) 1阶模态 (b) 2阶模态

(c) 3阶模态 (d) 4阶模态

图 6 开裂角 5°前 4 阶 DMD 模态压强云图

Fig. 6 Pressure contours of the first four DMD modes at crack angle of 5°

表 1 前 5 阶 DMD 模态增长率与频率

Table 1 Frequency and magnification of the first five DMD modes

序号	模态增长率	模态频率/Hz
1	0	0
2	0.004	69.1
3	−0.031	135.5
4	−0.593	212.6
5	−0.742	278.2

http://bhxb.buaa.edu.cn

DMD 的 1 阶模态表示频率为 0 Hz 的平均流场,2 阶模态体现了阻力舵的上下后缘位置交替出现了脱落涡。这 2 个模态代表了流场的主要特征。可以看出,3 ~ 5 阶模态频率大致为 2 阶模态的整数倍,这说明 DMD 分解捕捉到了流场的主要结构,同时提取到了高阶谐波模态。

图 7 展示了一个周期 T 内开裂区的流场演化过程。可以看到,在开裂区内部共存在 a、b、c 这 3 个涡,其中,a 是一直存在于开裂区内的驻涡,b、c 分别为上下舵面后缘位置生成的脱落涡,它们分别与流场 1、2 阶模态对应。在 0 ~ $\frac{1}{4}T$ 时段,涡 b 从上舵面后缘脱落进入流场,涡 c 由开裂区内逐渐向下舵面后缘移动;$\frac{1}{4}T$ ~ $\frac{1}{2}T$ 时段,涡 b 离开后缘位置进入流场,涡 c 继续向后缘移动,涡量逐渐增强;$\frac{1}{2}T$ ~ $\frac{3}{4}T$ 时段,随着涡 c 向后移动,上舵面逐渐生成了一个新的涡 b;$\frac{3}{4}T$ ~ $1T$ 时段,涡 b 向后缘移动,同时新的涡 c 也在下舵面开始形成。

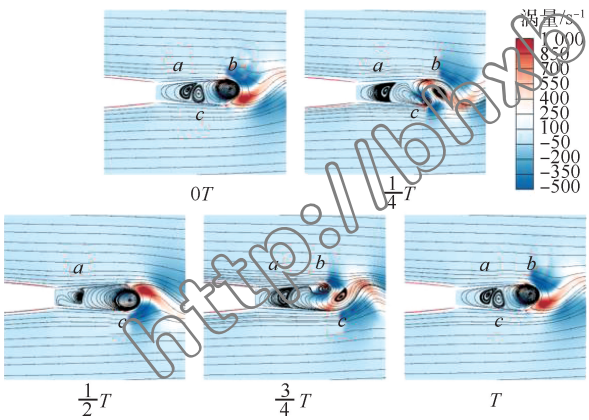


图 7　流场演化过程

Fig. 7　Flow field evolution

对不同来流速度下的流场数据进行分析,结果发现,当来流速度在 10 ~ 60 m/s 时,前 5 阶流场模态云图基本一致。不同来流速度下的 DMD 模态频率如图 8 所示。可以看出,随着来流速度增加,各阶流场模态频率基本线性增加,且高阶模态频率增加的更快。

在来流速度 10 m/s 的状态下,分别对 5°、10°、20°开裂角时的 DMD 流场模态分解结果进行分析,频率分解结果如图 9 所示。开裂角的增大引起尾流区、回流区的范围变大,但流场结构没有太大差别。

DMD 分析的结果表明,在给定的速度范围内,流场结构主要表现为开裂区内驻涡与后缘脱落形成的卡门涡的叠加。由于卡门涡的频率与速度成正比,与物体垂直于来流方向截面的特征尺度成反比,从图 8 中的数据可以看出,在固定的开裂角下,DMD 模态频率与来流速度基本呈线性关系;而图 9 则说明了在相同来流速度下,随着开裂角的增大,翼型垂直来流方向的截面长度增加,因此流场模态频率随之下降;2 组结果反应出流场频率与流速和开裂角相关,不同 DMD 模态之间频率的增长率不同。

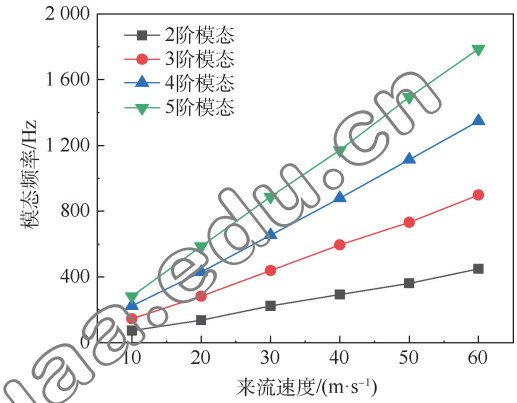


图 8　不同来流速度下的 DMD 模态频率

Fig. 8　Frequencies of DMD modes versus velocity

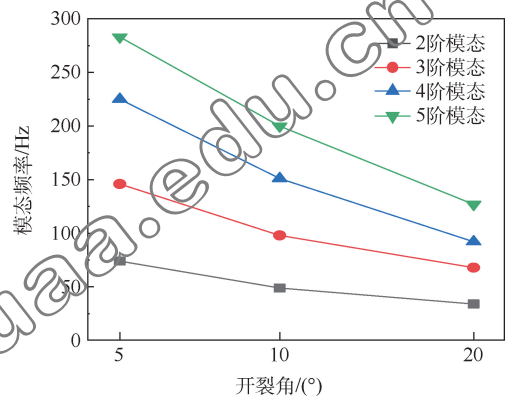


图 9　不同开裂角下的 DMD 模态频率

Fig. 9　Frequencies of DMD modes versus crack angles

4　流固耦合稳定性分析

当涡脱落的频率降低至与结构的固有频率靠近时,有可能会激发结构的振动,引发流固耦合系统的失稳。

使用 Fluent 六自由度求解器进行结构求解计算,在模型的 0.5 倍弦长位置安装扭转弹簧。设置模型的惯性矩 I 为 0.001 35 kg · m^2,给定来流速度 V 为 10 m/s,初始迎角为 0.5°。结构固有频率 f_n 可由结构惯性矩 I 与弹簧刚度 K 得出:

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K}{I}} \tag{6}$$

无阻尼系统俯仰运动方程可以表示为

$$I\ddot{\alpha} + K\alpha = M \tag{7}$$

http://bhxb.buaa.edu.cn

式中:M 为流场计算得到的气动力矩;$\ddot{\alpha}$ 为俯仰位移。

4.1 5°开裂角阻力舵流固耦合响应分析

图 10 为 5°开裂角的模型在不同的结构固有频率下俯仰角及俯仰力矩随时间变化的结果,其中 f 为频域分析中的频率。从图 10 中的结果来看,结构固有频率为 6.6 Hz 时,结构响应的主要频率约为 67 Hz,α 的运动幅值很小,约为0.02°。这与表 1 中流场 2 阶 DMD 模态的频率结果基本一致,因此,可以判断这是由于卡门涡的周期性脱落造成的涡致振动。而当结构的固有频率为 6.2 Hz时,结构的运动频率约为 2.5 Hz,α 的运动幅值约为 3°,涡致振动的影响基本可以忽略,系统处于失稳状态。此时结构运动频率与固有频率不一致是由于翼型带来的气动附加刚度导致的。

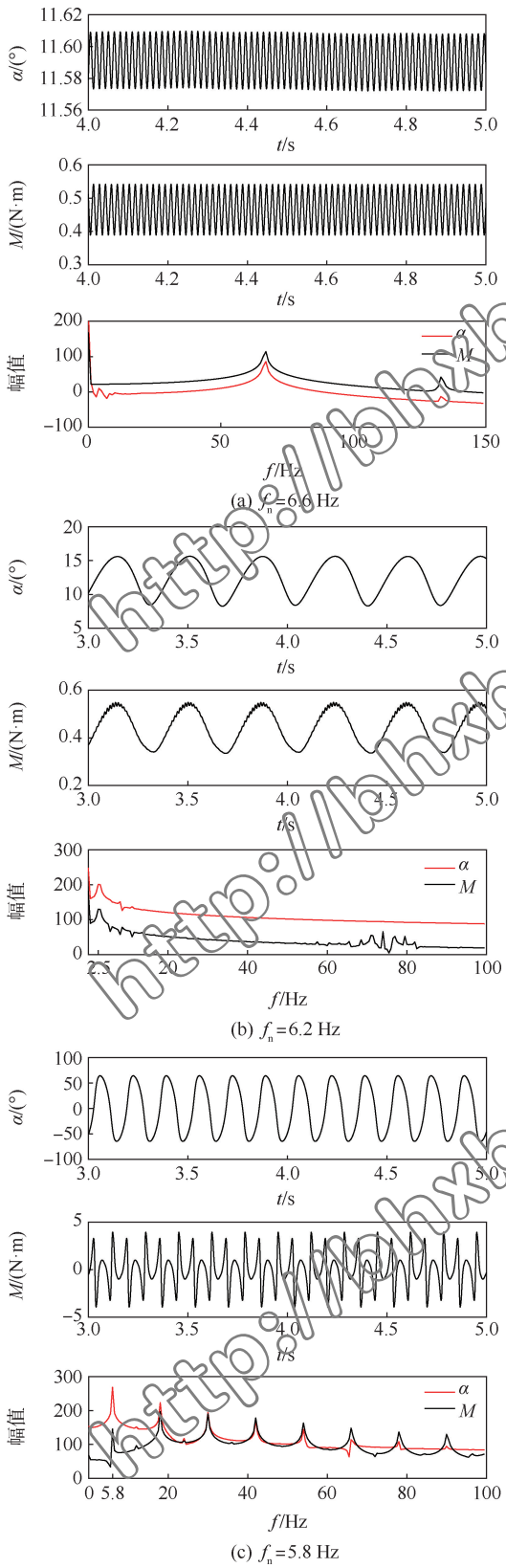


图 10 不同固有频率下的响应曲线(5°开裂角)

Fig. 10 Response curves with different f_n values natural frequency(crack angle is 5°)

定义无量纲的折减速度 U^*[22]为

$$U^* = V/(f_n c) \tag{8}$$

式中:V 为来流速度;f_n 为结构固有频率;c 为翼型弦长。

由此可以得到一系列计算状态下系统的失稳频率 f_a 随 U^* 的变化规律。

对多个状态下的系统响应曲线进行分析,得到图 11 所示结果。

从图 11 中可以看出,模型的运动大致分为 3 个状态,当 U^* 较小时,系统不会发生失稳,而是做小振幅的涡致振动,运动频率与涡脱落频率一致。随着 U^* 增大至 5.2 ~ 5.7 之间,结构的运动形式表现为“浅失速”下的失速颤振,此时流固耦合系统在一定幅值下作俯仰振荡。由于气动刚度的影响,系统的运动频率略低于结构的固有频率[23]。当 U^* 继续增大,系统进入“深失速”颤振状态,此时的运动频率约在 6 Hz 左右。这是由于系统无阻尼,同时结构刚度比较小,运动幅值较大,此时的流场特性占主导。由于来流速度不变,在运动过程中前缘涡以 6 Hz 左右的频率脱落、再附,结构响应频率也在 6 Hz 左右。

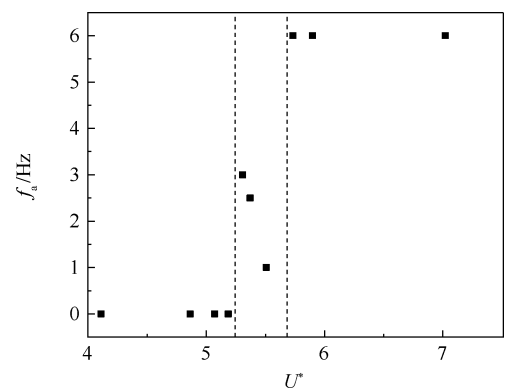


图 11 系统失稳频率随折减速度变化(5°开裂角)

Fig. 11 Instability frequency variations with U^* (crack angle is 5°)

4.2 20°开裂角阻力舵流固耦合响应分析

当开裂角为 20°时,运动规律如图 12 所示。

http://bhxb.buaa.edu.cn

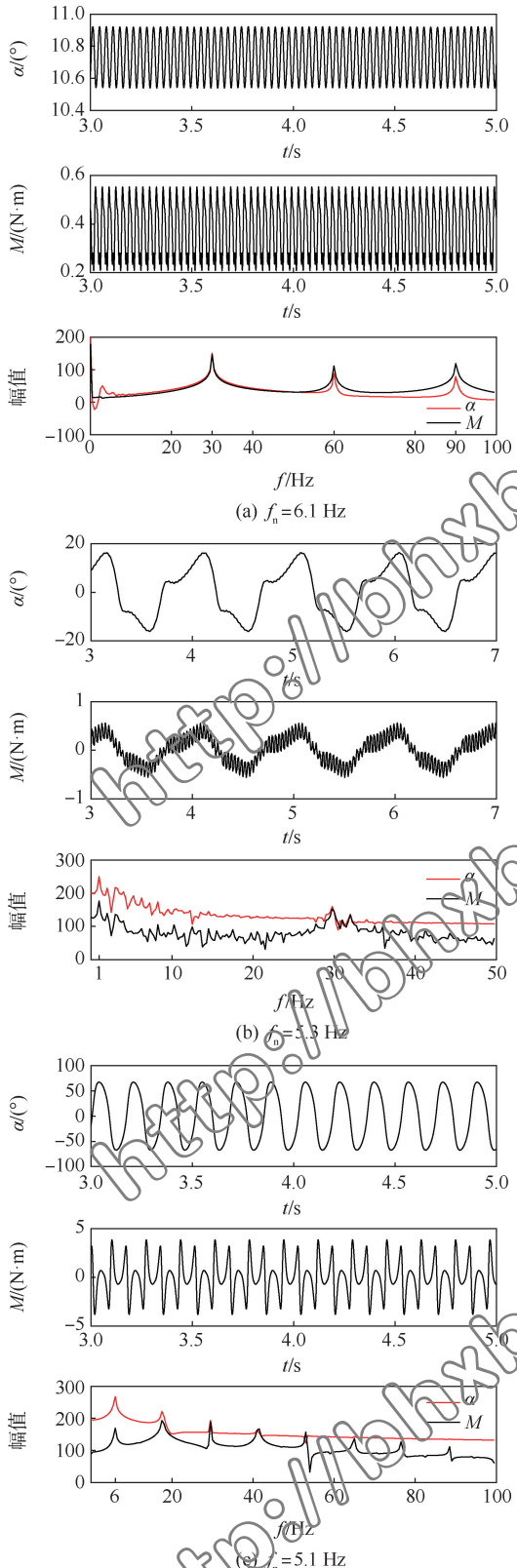


图 12　不同固有频率下的响应曲线(20°开裂角)

Fig. 12　Response curves with different natural frequency (crack angle is 20°)

该状态下的运动与 5°开裂角相似,结构固有频率为 6.1 Hz 时,运动形式为涡致振动,其频率与流场 DMD 的 2 阶模态一致,为 30 Hz 左右,振动幅值很小。当结构固有频率为 5.3 Hz 时,系统运动形式为流固耦合失稳,频率大约为 1 Hz,α 的运动幅值在 15°左右。

图 13 展示了开裂角 20°时 f_a 随 U^* 的变化情况,其规律与 5°开裂角基本一致。但是系统发生失速颤振时,折减速度的范围在 5.6 ~ 6.4 之间,高于 5°开裂角的状态。这个现象说明,在阻力舵打开的过程中,系统的颤振边界提高,也就意味着在大开裂角状态下,阻力舵系统具有更好的稳定性。

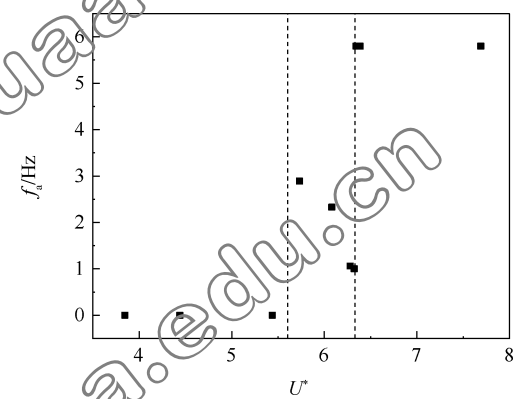


图 13　系统失稳频率随折减速度变化(20°开裂角)

Fig. 13　Instability frequency variations with U^* (crack angle is 20°)

5　结　论

1) 采用 DMD 方法对二维阻力舵的流场特性进行探究,结果表明二维阻力舵流场的主要特征为开裂区的驻涡与后缘脱落涡的叠加。流场的 DMD 模态频率与来流速度成正相关,与开裂角的大小成负相关。

2) 进行阻力舵单自由度流固耦合运动仿真计算,结果表明,随着折减速度的增加,系统运动的主要形式由涡致振动发展为失速颤振,涡致振动的幅值远远小于失速颤振。颤振边界随着开裂角的增大而减小,这表明增大开裂角对提高系统的失稳边界有着积极作用。

参考文献 (References)

[1] STENFELT G, RINGERTZ U. Lateral stability and control of a tailless aircraft configuration [J]. Journal of Aircraft, 2009, 46(6): 2161-2164.

[2] BRITT R T, JACOBSON S B, ARTHURS T D. Aeroservoelastic analysis of the B-2 bomber [J]. Journal of Aircraft, 2000, 37(5): 745-752.

[3] NATARAJAN A, KAPANIA R K, INMAN D J. Aeroelastic optimization of adaptive bumps for yaw control [J]. Journal of Aircraft, 2004, 41(1): 175-185.

[4] 马超,李林,王立新. 大展弦比飞翼布局飞机新型操纵面设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(2): 149-153.
MA C, LI L, WANG L X. Design of innovative control surfaces

http://bhxb.buaa.edu.cn

of flying wing aircrafts with large ratio aspect[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(2):149-153(in Chinese).

[5] SIMON J, BLAKE W, MULTHOPP D. Control concepts for a vertical tailless fighter[C]// Aircraft Design, Systems, and Operations Meeting. Reston:AIAA,1993:4000.

[6] MOHAMAD F, WISNOE W, NASIR R E M, et al. A study about the split drag flaps deflections to directional motion of UiTM's blended wing body aircraft based on computational fluid dynamics simulation[J]. AIP Conference Proceedings, 2012,1440(1):324-329.

[7] 张子军,黎军,李天,等. 开裂式方向舵对某无尾飞翼布局飞机气动特性影响的实验研究[J]. 实验流体力学,2010,24(3):63-66.
ZHANG Z J, LI J, LI T, et al. Experimental investigation of split-rudder deflection on aerodynamic performance of tailless flying-wing aircraft[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics,2010,24(3):63-66(in Chinese).

[8] 刘其琛,李道春,刘凯,等. 开裂式阻力方向舵非定常气动特性研究[C]// 第九届全国流体力学学术会议,2014:337.
LIU Q C, LI D C, LIU K, et al. Research on unsteady aerodynamic characteristics of the cracked drag rudder[C]// Ninth National Academic Conference on Fluid Dynamics, 2014:337(in Chinese).

[9] 韩鹏,吴志刚,杨超. 开裂角对阻力方向舵颤振特性的影响[J]. 航空科学技术,2014,25(10):26-32.
HAN P, WU Z G, YANG C. Effect of different split angles on flutter velocity of split drag rudder[J]. Aeronautical Science & Technology,2014,25(10):26-32(in Chinese).

[10] LUMLEY J L. The structure of inhomogeneous turbulence[C]// Atmospheric Turbulence and Wave Propagation,1967:166-178.

[11] SCHMID P J. Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data[J]. Journal of Fluid Mechanics,2008,656:5-28.

[12] SCHMID P J, LI L, JUNIPER M P, et al. Applications of the dynamic mode decomposition[J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics,2011,25(1-4):249-259.

[13] DEBESSE P, PASTUR L, LUSSEYRAN F, et al. A comparison of data reduction techniques for the aeroacoustic analysis of flow over a blunt flat plate[J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics,2016,30(3):253-274.

[14] GHOMMEM M, PRESHO M, CALO V M, et al. Mode decomposition methods for flows in high-contrast porous media. Global-local approach[J]. Journal of Computational Physics, 2013, 253:226-238.

[15] 潘翀,陈皇,王晋军. 复杂流场的动力学模态分解[C]// 第八届全国实验流体力学学术会议,2010:77-82.
PAN C, CHEN H, WANG J J. Dynamic mode decomposition of cpmplex flow fields[C]// Eighth Annual Meeting of Experiment Fluid Dynamics,2010:77-82(in Chinese).

[16] 寇家庆,张伟伟. 动力学模态分解及其在流体力学中的应用[J]. 空气动力学学报,2018,36(2):163-179.
KOU J Q, ZHANG W W. Dynamic mode decomposition and its applications in fluid dynamics[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2018,36(2):163-179(in Chinese).

[17] ROWLEY C W, MEZI I, BAGHERI S, et al. Spectral analysis of nonlinear flows[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 641: 115-127.

[18] 韩亚东,谭磊. 文丘里管空化流动的试验研究及动力学模态分解[J]. 机械工程学报,2019,55(18):173-179.
HAN Y D, TAN L. Experiment and dynamic mode decomposition of cavitating flow in venturi[J]. Journal of Mechanical Engineering,2019,55(18):173-179(in Chinese).

[19] MENON K, MITTAL R. Dynamic mode decomposition based analysis of flow over a sinusoidally pitching airfoil[J]. Journal of Fluids and Structures,2020,94:102886.

[20] GENG F, KALKMAN I, SUIKER A S J, et al. Sensitivity analysis of airfoil aerodynamics during pitching motion at a Reynolds number of 1.35×10^5[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2018,183:315-332.

[21] LEE T, GERONTAKOS P. Investigation of flow over an oscillating airfoil[J]. Journal of Fluid Mechanics,2004,512:313-341.

[22] 李新涛,张伟伟,蔡跃文,等. 弹性支撑圆柱绕流稳定性分析[J]. 力学学报,2015,47(5):874-880.
LI X T, ZHANG W W, JIANG Y W, et al. Stability analysis of flow past an elastically-suspended circular cylinder[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2015,47(5):874-880(in Chinese).

[23] POIREL D, HARRIS Y, BENAISSA A. Self-sustained aeroelastic oscillations of a NACA0012 airfoil at low-to-moderate Reynolds numbers[J]. Journal of Fluids and Structures, 2008, 24(5):700-719.

http://bhxb.buaa.edu.cn

Fluid and structure coupling analysis of split drag rudder

LI Yongchang, DAI Yuting*, YANG Chao

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: To explore the flow field morphology and fluid-structure coupling mechanism of split drag rudder, computational fluid dynamics (CFD) method is used to calculate the SDR flow field with different crack angles. Based on the dynamic mode decomposition (DMD) method, the flow characteristics and frequency variations of each mode are analyzed. Results show that at the crack angle of 20°, the flow field structure around the wing is mainly composed of the standing vortex in the crack area and the trailing edge shedding vortex, and that the modal frequencies increase with the increase of incoming flow velocity and decrease with the increase of the crack angle. Then the fluid-structure interaction of SDR with different crack angles is calculated. The results show that with the increase of the reduction velocity, the fluid-structure interaction mode of the system develops from the vortex induced vibration to flow instability, and that the instability boundary of the system increases with the increase of the crack angle.

Keywords: split drag rudder; dynamic mode decomposition; flow field reconstruction; vortex induced vibration; flow instability

http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2021-03-29; **Accepted**: 2021-04-20; **Published online**: 2021-06-01 14:15

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210601.0947.001.html

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11672018)

* **Corresponding author**. E-mail: yutingdai@buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0125

可变后掠翼联动驱动机构设计与尺寸综合

都显琛, 刘学翱, 董洋, 王辉, 何天宇, 王春洁*

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 可变后掠翼飞行器通过改变其机翼后掠角,可实现在不同飞行速度条件下,达到最佳飞行状态。为了实现在单驱动下机翼后掠角变化时,同时实现机翼部分蒙皮的展收,基于平面复合连杆机构,提出一种可变后掠翼联动驱动机构。为了解决该机构函数生成与运动生成综合相结合的尺寸综合问题,将复合连杆机构拆分为3个子机构,通过矢量方程法对机构进行分析,建立复合连杆机构的矢量环路方程,并对机构的可动性进行分析。结合机构矢量环路方程,提出一种利用优化算法与运动学分析软件判断机构可动性、优化机构性能的尺寸综合方法。结合相应实例,使用所提方法对机构进行设计,获得了满足可动性要求、尺寸约束,且包络面积最小的机构尺寸构型,证明了所提方法的有效性。

关 键 词: 可变后掠翼; 复合连杆机构; 可动性; 尺寸综合; 优化算法
中图分类号: TH112
文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2022)12-2502-08

可变后掠翼飞行器可通过改变其机翼后掠角,实现对飞行器临界马赫数、升力特性、阻力特性等性能的调节,从而在不同的飞行速度条件下,保持较好的飞行性能。

变后掠翼的关键技术之一是变后掠翼驱动的机构设计,传统的变后掠翼驱动机构通常采用平面四杆机构及其衍生机构[1],以平面四杆机构为基础进行设计与优化[2-3]。平面四杆机构运动特性较为简单,但只可实现机翼后掠角的变化,无法在机翼后掠角变化的同时,令机翼做出其他动作。例如,蒙皮的一部分需要随机翼运动收拢或展开,使用传统后掠翼四杆驱动机构则需要额外添加驱动,会提高机构整体的复杂度。基于平面复合连杆机构,提出一种联动驱动机构,能同时满足机翼和蒙皮的运动要求。平面复合连杆机构相对于平面四杆机构,可以获得更加多样的运动特性,但其机构综合分析及可动性分析方法也更加复杂。对于平面连杆机构的机构综合分析,常用方法为几何关系法、相对位移矩阵法、矢量方程法等,目标为解决机构综合中的函数生成综合[4]、位置生成综合[5-7]、轨迹生成综合3大任务[8-11],Schreiber等[6]利用同伦法对典型Stephenson机构进行了位置生成综合求解,周洪和邹慧君[10]对六杆机构双目标轨迹综合进行了分析求解。对于平面连杆机构的可动性分析问题[12-15],张春等[12]针对一种平面复合连杆机构,利用几何方法与数学方法分别对该平面复合连杆机构进行了可动性分析;于红英和唐德威[15]推导了平面五杆机构的雅可比矩阵,并利用雅可比矩阵分析了机构的奇异轨迹。针对平面连杆机构的尺寸综合方法及可动性分析方法,学者们已经进行了许多研究。而对于如何在机构尺寸综合求解的过程中,保证机构不产生可动性问题,相关研究还较少。

本文基于平面复合连杆机构,提出了一种可

收稿日期: 2021-03-17; **录用日期**: 2021-06-25; **网络出版时间**: 2021-07-29 09:10
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210728.1331.001.html
基金项目: 机器人技术与系统国家重点实验室开放研究项目(SKLRS-2021-KF-01)
* **通信作者**. E-mail: wangcj@buaa.edu.cn

引用格式: 都显琛, 刘学翱, 董洋, 等. 可变后掠翼联动驱动机构设计与尺寸综合[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2502-2509. DU X C, LIU X A, DONG Y, et al. Design and dimensional synthesis of a variable wing sweep mechanism[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2502-2509(in Chinese).

变后掠翼联动驱动机构,该机构可拆分为 3 个平面连杆子机构,可通过单驱动同时实现机翼后掠角的改变及机翼部分蒙皮的展收。利用矢量方程法,对机构进行机构综合分析,建立机构的矢量环路方程,并对机构可动性进行分析。通过建立的机构矢量环路方程,对机构进行函数生成综合与运动生成综合相结合的尺寸综合设计求解,结合动力学分析软件与优化算法对机构可动性进行判断,获得了符合设计要求且满足可动性与尺寸约束要求的最优机构构型。

1　机构描述与分析

1.1　机构描述

变后掠翼机构运动简图与全局坐标系定义如图 1 所示。摇杆 *CBDE* 为飞行器机翼,构件 *FPG* 为需要展收的飞行器蒙皮,由 *P* 点指示其位置与转角。摇杆 *CBDE* 绕 *C* 点转动实现变后掠翼动作,构件 *FPG* 执行蒙皮收拢与展开动作。

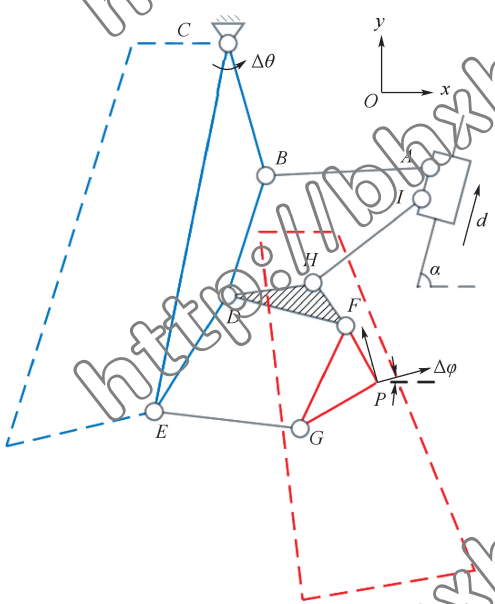


图 1　机构简图

Fig. 1　Schematic diagram of mechanism

A-*H* 均为转动副,该机构自由度计算式如下:

$$D = 3n - 2p_{\mathrm{L}} = 3 \times 7 - 2 \times 10 = 1 \tag{1}$$

式中:n 为机构中活动部件数;p_{L} 为机构中运动副数。通过计算可知,该机构自由度为 1,可通过滑块运动同时驱动摇杆 *CBDE* 及连杆 *FPG*。图 1 中 $\Delta\theta$ 为摇杆 *CBDE* 相对初始机构初始位置转动角度,$\Delta\varphi$ 为蒙皮上点 *P* 相对初始位置的姿态变化角,d 为滑块相对初始位置的位移,α 为滑块的运动方向与水平方向夹角。

定义在该机构第 j 个状态($j=[0,1,\cdots,n]$),滑块相对初始位置位移为 d_j 时,后掠翼 *CBDE* 转动角度为 $\Delta\theta_j$,P_j 点位置为(x_{P_j},y_{P_j}),姿态变化角为 $\Delta\varphi_j$。当 $j=0$ 时,变后掠翼驱动机构处于初始位置。针对该机构,进行函数生成综合与运动生成综合相结合的机构综合分析。

1.2　机构综合约束的建立

矢量方程法是以矢量运算为基础的机构分析方法,普遍适用于机构的运动学分析,可用于解决机构综合问题。利用矢量方程法,建立该机构的矢量环路方程。

将该平面复合连杆机构拆分为 3 个子机构分别进行分析。子机构简图如图 2 所示,红色线条表示拆分得到的各子机构。分别对子机构建立几何关系的矢量方程,得到机构整体的综合等式。

子机构 1 为曲柄滑块机构,第 j 个状态矢量图如图 3 所示。

根据矢量图,建立子机构 1 的几何关系:

$$\overrightarrow{OC}+\overrightarrow{CB_j}-\overrightarrow{OA_j}=\overrightarrow{OC}+(\overrightarrow{OB_j}-\overrightarrow{OC})-\overrightarrow{OA_j}=\overrightarrow{A_jB_j} \tag{2}$$

式中:$\overrightarrow{CB_j}$由$\overrightarrow{CB_0}$旋转得到

$$\overrightarrow{OB_j}-\overrightarrow{OC}=\boldsymbol{T}_j(\overrightarrow{OB_0}-\overrightarrow{OC}) \tag{3}$$

其中:$\boldsymbol{T}_j$ 为旋转矩阵,表示为

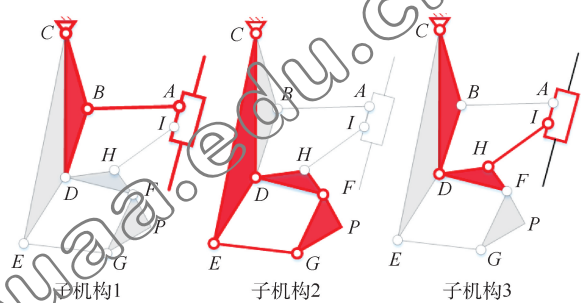


图 2　子机构简图

Fig. 2　Schematic diagrams of sub-mechanisms

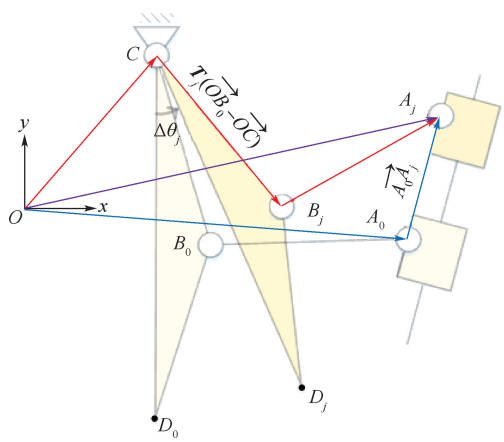


图 3　子机构 1 矢量图

Fig. 3　Vector diagram of sub-mechanism 1

http://bhxb.buaa.edu.cn

$$\boldsymbol{T}_j = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta_j) & -\sin(\Delta\theta_j) \\ \sin(\Delta\theta_j) & \cos(\Delta\theta_j) \end{bmatrix} \tag{4}$$

由机构运动状态,在机构的第 j 个状态,有式(5)成立:

$$\overrightarrow{OA_j} = \overrightarrow{OA_0} + \overrightarrow{A_0A_j} \tag{5}$$

式中:$\overrightarrow{A_0A_j}$为滑块位移矢量,表示为

$$\overrightarrow{A_0A_j} = [d\cos\alpha \quad d\sin\alpha]^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

将式(3)、式(5)代入式(2)中,可得

$$\overrightarrow{OC} + \boldsymbol{T}_j(\overrightarrow{OB_0} - \overrightarrow{OC}) - (\overrightarrow{OA_0} + \overrightarrow{A_0A_j}) = \overrightarrow{A_jB_j} \tag{7}$$

AB 杆长度不变,式(7)、式(8)联立即可建立滑块连杆机构的综合等式。

$$\overrightarrow{A_0B_0} = \overrightarrow{A_jB_j} \tag{8}$$

子机构 2 矢量图如图 4 所示。根据图 4 中,闭环 $ODFP$ 及闭环 $OFGP$ 的几何关系,可得

$$\overrightarrow{OP_j} + (\overrightarrow{OF_j} - \overrightarrow{OP_j}) - \overrightarrow{OD_j} = \overrightarrow{D_jF_j} \tag{9}$$

$$\overrightarrow{OP_j} + (\overrightarrow{OG_j} - \overrightarrow{OP_j}) - \overrightarrow{OE_j} = \overrightarrow{E_jG_j} \tag{10}$$

在机构运动过程中,DE 杆随子机构 1 中 BC 杆转动,可得

$$\overrightarrow{OD_j} = \overrightarrow{OC} + (\overrightarrow{OD_j} - \overrightarrow{OC}) = \overrightarrow{OC} + \boldsymbol{T}_j(\overrightarrow{OD_0} - \overrightarrow{OC}) \tag{11}$$

$$\overrightarrow{OE_j} = \overrightarrow{OC} + (\overrightarrow{OE_j} - \overrightarrow{OC}) = \overrightarrow{OC} + \boldsymbol{T}_j(\overrightarrow{OE_0} - \overrightarrow{OC}) \tag{12}$$

在第 j 个状态,$\overrightarrow{P_jF_j}$、$\overrightarrow{P_jG_j}$随 P 点旋转:

$$\overrightarrow{P_jF_j} = \overrightarrow{OF_j} - \overrightarrow{OP_j} = \boldsymbol{S}_j(\overrightarrow{OF_0} - \overrightarrow{OP_0}) \tag{13}$$

$$\overrightarrow{P_jG_j} = \overrightarrow{OG_j} - \overrightarrow{OP_j} = \boldsymbol{S}_j(\overrightarrow{OG_0} - \overrightarrow{OP_0}) \tag{14}$$

式中:$\boldsymbol{S}_j$ 为 P 点姿态变化的旋转矩阵,表示为

$$\boldsymbol{S}_j = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\varphi_j) & -\sin(\Delta\varphi_j) \\ \sin(\Delta\varphi_j) & \cos(\Delta\varphi_j) \end{bmatrix} \tag{15}$$

将式(11)~式(14)代入式(9)、式(10)中,可得

$$\overrightarrow{OP_j} + \boldsymbol{S}_j(\overrightarrow{OF_0} - \overrightarrow{OP_0}) - \overrightarrow{OC} - \boldsymbol{T}_j(\overrightarrow{OD_0} - \overrightarrow{OC}) = \overrightarrow{D_jF_j} \tag{16}$$

$$\overrightarrow{OP_j} + \boldsymbol{S}_j(\overrightarrow{OG_0} - \overrightarrow{OP_0}) - \overrightarrow{OC} - \boldsymbol{T}_j(\overrightarrow{OE_0} - \overrightarrow{OC}) = \overrightarrow{E_jG_j} \tag{17}$$

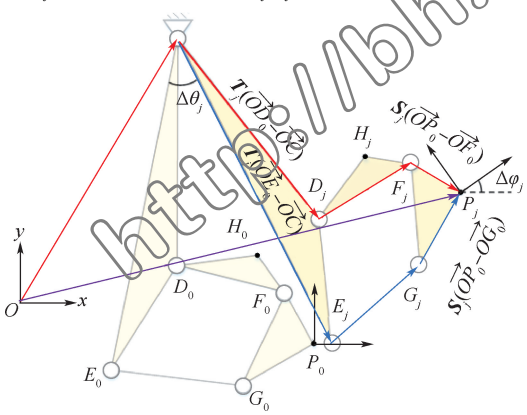


图 4 子机构 2 矢量图

Fig. 4 Vector diagram of sub-mechanism 2

由 FP、GP 杆长度不变得

$$\overrightarrow{D_0F_0} = \overrightarrow{D_jF_j} \tag{18}$$

$$\overrightarrow{E_0G_0} = \overrightarrow{E_jG_j} \tag{19}$$

联立式(16)~式(19),即可建立子机构 2 的矢量环路方程。

子机构 3 为五杆机构,其矢量图如图 5 所示。

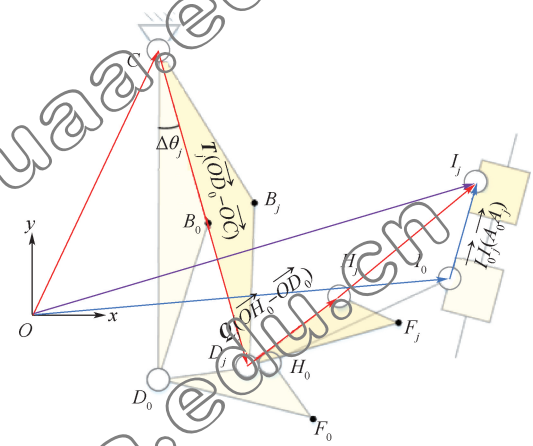


图 5 子机构 3 矢量图

Fig. 5 Vector diagram of sub-mechanism 3

根据图 5 建立子机构 3 的几何关系,如下:

$$\overrightarrow{OC_j} + (\overrightarrow{OD_j} - \overrightarrow{OC_j}) + (\overrightarrow{OH_j} - \overrightarrow{OD_j}) - \overrightarrow{OI_j} = \overrightarrow{I_jH_j} \tag{20}$$

D_0H_0 旋转至 D_jH_j 的旋转矩阵如下:

$$\boldsymbol{Q}_j = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\gamma_j) & -\sin(\Delta\gamma_j) \\ \sin(\Delta\gamma_j) & \cos(\Delta\gamma_j) \end{bmatrix} \tag{21}$$

式中:$\Delta\gamma_j$ 为 D_0H_0 旋转角度。

$$\overrightarrow{OH_j} - \overrightarrow{OD_j} = \boldsymbol{Q}_j(\overrightarrow{OH_0} - \overrightarrow{OD_0}) \tag{22}$$

其中,构件 DHF 的运动与子机构 2 的运动相关联,根据转角关系可建立子机构 2、3 的运动耦合关系。由构件 DHF 在子机构 2 中的旋转可得

$$\Delta\gamma_j = \arccos\left(\frac{\overrightarrow{D_jF_j}\cdot\overrightarrow{D_0F_0}}{|\overrightarrow{D_jF_j}|\cdot|\overrightarrow{D_0F_0}|}\right) \tag{23}$$

将式(21)~式(23)代入式(20)中得

$$\overrightarrow{OC_j} + \boldsymbol{T}_j(\overrightarrow{OD_0} - \overrightarrow{OC}) + \boldsymbol{Q}_j(\overrightarrow{OH_j} - \overrightarrow{OD_j}) - (\overrightarrow{OI_0} + \overrightarrow{A_0A_j}) = \overrightarrow{I_jH_j} \tag{24}$$

由 IH 杆长度不变,建立子机构 3 的矢量环路方程为

$$\overrightarrow{I_0H_0} = \overrightarrow{I_jH_j} \tag{25}$$

由各子机构的几何关系,综合式(8)、式(18)、式(19)、式(25),建立了可变后掠翼联动驱动机构的矢量环路方程。

2 机构可动性分析

2.1 机构奇异点分析

当机构雅可比矩阵奇异时,机构处于奇异

http://bhxb.buaa.edu.cn

点。机构的奇异位形出现在雅可比矩阵行列式为 0 或趋于∞处。子机构 1、2、3 中都可能出现奇异点,而任一子机构出现奇异都会导致整个机构出现奇异,故分别计算 3 个子机构的雅可比行列式。

子机构 1 闭环约束方程为

$$x_C + l_{CB}\cos\theta_{CB} + l_{BA}\cos\theta_{BA} = x_I + d\cos\alpha \tag{26}$$

$$y_C + l_{CB}\sin\theta_{CB} + l_{BA}\sin\theta_{BA} = y_I + d\sin\alpha \tag{27}$$

式中:l_{CB}为 C、B_2 点间杆件长度;θ_{CB}为 C、B_2 点间杆件与水平方向夹角。

式(26)、式(27)两侧对时间求导可得

$$-l_{CB}\dot{\theta}_{CB}\sin\theta_{CB} - l_{BA}\dot{\theta}_{BA}\sin\theta_{BA} = \dot{d}\cos\alpha \tag{28}$$

$$l_{CB}\dot{\theta}_{CB}\cos\theta_{CB} + l_{BA}\dot{\theta}_{BA}\cos\theta_{BA} = \dot{d}\sin\alpha \tag{29}$$

联立式(28)、式(29),得子机构 1 的雅可比矩阵 $\boldsymbol{J}_1$ 及其行列式:

$$\dot{\theta}_{CB} = \boldsymbol{J}_1\dot{d} \tag{30}$$

$$\det(\boldsymbol{J}_1) = \frac{l_{BA}\cos(\alpha-\theta_{BA})}{l_{CB}\sin(\theta_{BA}-\theta_{CB})} \tag{31}$$

由雅可比矩阵为零条件可得,子机构 1 出现奇异点的条件为:$\theta_{BA} = \theta_{CB} + m\pi(m = 0,1,\cdots,n)$时,正运动学出现奇异;$\theta_{BA} = \alpha$ 时,逆运动学出现奇异。

子机构 2 闭环约束方程为

$$l_{DF}\cos\theta_{DF} + l_{FG}\cos\theta_{FG} + l_{GE}\cos\theta_{GE} = l_{DE}\cos\theta_{DE} \tag{32}$$

$$l_{DF}\sin\theta_{DF} + l_{FG}\sin\theta_{FG} + l_{GE}\sin\theta_{GE} = l_{DE}\sin\theta_{DE} \tag{33}$$

式(32)、式(33)两侧求导可得

$$-l_{DF}\dot{\theta}_{DF}\sin\theta_{DF} - l_{FG}\dot{\theta}_{FG}\cos\theta_{FG} + l_{GE}\dot{\theta}_{GE}\cos\theta_{GE} = 0 \tag{34}$$

$$l_{DF}\dot{\theta}_{DF}\sin\theta_{DF} + l_{FG}\dot{\theta}_{FG}\sin\theta_{FG} + l_{GE}\dot{\theta}_{GE}\sin\theta_{GE} = 0 \tag{35}$$

联立式(34)、式(35),得子机构 2 的雅可比矩阵 $\boldsymbol{J}_2$ 及其行列式:

$$\dot{\theta}_{GE} = \boldsymbol{J}_2\dot{\theta}_{DF} \tag{36}$$

$$\det(\boldsymbol{J}_2) = \frac{l_{DF}\cos(\theta_{FG}-\theta_{DF})}{l_{GE}\sin(\theta_{GE}-\theta_{FG})} \tag{37}$$

由雅可比矩阵为零条件可得,子机构 2 出现奇异点的条件为:$\theta_{GE} = \theta_{FG} + m\pi(m = 0,1,\cdots,n)$时,正运动学出现奇异;$\theta_{FG} = \theta_{DF} + m\pi(m = 0,1,\cdots,n)$时,逆运动学出现奇异。

子机构 3 闭环约束方程为

$$x_C + l_{CB}\cos\theta_{CD} + l_{DH}\cos\theta_{DH} + l_{HI}\cos\theta_{HI} = x_I + d\cos\alpha \tag{38}$$

$$y_C + l_{CB}\sin\theta_{CD} + l_{DH}\sin\theta_{DH} + l_{HI}\sin\theta_{HI} = y_I + d\sin\alpha \tag{39}$$

式中:θ_{CD}与滑块位移 d 在子机构 1 中相关,$f(d)$为 θ_{CD}与滑块位移 d 的映射关系:

$$\theta_{CD} = f(d) \tag{40}$$

将式(40)代入式(38)、式(39)中,并对时间求导可得

$$-l_{CD}\sin(f(d))f(\dot{d})\dot{\theta}_{CD} - l_{DH}\dot{\theta}_{DH}\sin\theta_{DH} - l_{HI}\dot{\theta}_{HI}\sin\theta_{HI} = \dot{d}\cos\alpha \tag{41}$$

$$l_{CD}\cos(f(d))f(\dot{d})\dot{\theta}_{CD} + l_{DH}\dot{\theta}_{DH}\cos\theta_{DH} + l_{HI}\dot{\theta}_{HI}\cos\theta_{HI} = \dot{d}\sin\alpha \tag{42}$$

联立式(41)、式(42),得子机构 3 的雅可比矩阵 $\boldsymbol{J}_3$:

$$\dot{\theta}_{DH} = \boldsymbol{J}_3\dot{d} \tag{43}$$

$$\boldsymbol{J}_3 = \frac{l_{CD}f(\dot{d})\sin(\theta_{HI}-f(d)) + \cos(\alpha-\theta_{HI})}{l_{DH}\sin(\theta_{HI}-\theta_{DH})} \tag{44}$$

由雅可比矩阵为零条件可得,子机构 3 出现奇异点的条件为:$\theta_{HI} = \theta_{DH} + m\pi(m = 0,1\cdots,n)$时,正运动学出现奇异;逆运动学出现奇异位置,取决于子机构 1 中 θ_{CD}与滑块位移 d 的映射关系。

拆分得到的 3 个子机构中,任一子机构出现奇异时,整个机构出现奇异。在该机构的运动分析中,始终由滑块作为机构驱动,故只关注机构的正运动学奇异性。根据分析可知,当 A、B、C 这 3 点,D、H、I 这 3 点或 E、G、F 这 3 点共线时,机构正运动学出现奇异。

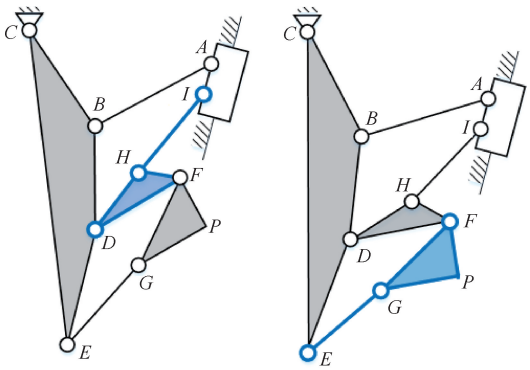
2.2　机构可动性问题

平面连杆机构的可动性,是机构按照预期的运动方式依次通过若干位置的运动能力。在该平面复合连杆机构中,影响机构可动性的因素主要为机构出现死点及机构运动分支的存在。

通过可变后掠翼机构奇异性分析可得,当机构正运动学出现奇异时,运动中出现死点的情况如图 6 所示情况,当 D、H、I 点或 E、G、F 点在运动中处于同一直线时,机构出现死点。

由于回路分支的存在,导致可变后掠翼机构无法到达设计位置的情况。如图 7 所示,在同样机构尺寸的情况下,设计位置与实际位置不处于同一运动回路,导致机构无法到达设计位置,同样不满足机构的可动性需求。

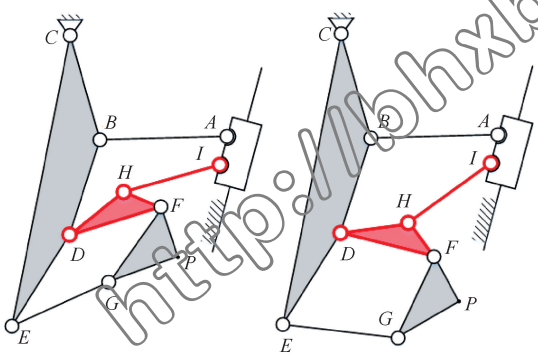
http://bhxb.buaa.edu.cn



(a) 死点状况 1　　(b) 死点状况 2

图 6　机构死点

Fig. 6　Dead center of mechanism



(a) 设计位置　　(b) 可到达位置

图 7　机构运动分支

Fig. 7　Branch defect of mechanism

3　基于优化算法的机构综合求解

3.1　机构综合求解方法

由于可变后掠翼联动驱动机构较为复杂,在求解中难以通过解析方法给出机构出现死点和分支位置的判断依据。针对该问题采用了一种基于机构综合方程,结合动力学仿真软件 ADAMS 进行机构可动性判断,在铰链位置范围内,通过优化算法寻找机构最优解的方法。

单次迭代过程如图 8 所示。单次迭代中通过优化算法确定优化变量取值,结合机构综合等式进行求解,并且通过运动学分析进行可动性判断。

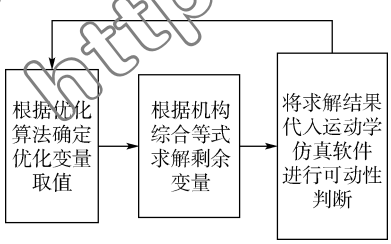


图 8　单次迭代过程

Fig. 8　Single iteration process

3.2　目标函数与约束的建立

在可变后掠翼机构中,除保证机翼转角到位,还需要保证蒙皮运动中间位置合理。以表 1 中设计位置为例,位置 2 为机构到位位置,位置 1 为中间位置。

表 1　设计位置

Table 1　Target positions

位置编号	l_j/mm	$\Delta\theta_j$/(°)	$\Delta\varphi_j$/(°)	(x_{P_j},y_{P_j})/mm
0	0	0	0	(−50, −550)
1	127.5	7	−15	(30, −455)
2	255	30	−1	(150, −390)

机构中共 19 个变量,分别为 A、H 点坐标 $(x_A,y_A)\sim(x_H,y_H)$ 及滑块运动方向与水平方向夹角 α,根据 3 个设计位置共可求解 8 个变量,选择 8 个变量 $\{x_A,y_A,x_E,y_E,x_G,y_G,y_H,y_I\}$ 作为求解变量。

剩余 11 个变量中,以 B、E 这 2 点坐标及 H、I 这2 点横坐标为优化变量,固定 C、D 点坐标及滑块运动角度。在机构设计中,由于可变后掠翼机构安装位置与空间的限制,优化变量范围与固定变量取值如下:

$$\begin{cases} -200\ \text{mm} \leqslant x_B \leqslant -50\ \text{mm} \\ -250\ \text{mm} \leqslant y_B \leqslant -100\ \text{mm} \\ -500\ \text{mm} \leqslant x_E \leqslant -100\ \text{mm} \\ -800\ \text{mm} \leqslant y_E \leqslant -550\ \text{mm} \\ -250\ \text{mm} \leqslant x_H \leqslant -100\ \text{mm} \\ 100\ \text{mm} \leqslant x_I \leqslant 300\ \text{mm} \end{cases} \tag{45}$$

$$\begin{cases} x_C = -10\ \text{mm} \\ y_C = 0\ \text{mm} \\ x_D = -135\ \text{mm} \\ y_D = -425\ \text{mm} \end{cases} \tag{46}$$

优化问题主要由目标函数和约束条件两部分组成。本实例中目标函数为机构在初始状态的矩形包络面积,优化目标为使包络面积最小。机构包络面积定义如下:

$$\begin{cases} L = \max(x_A,x_B,\cdots,x_H) - \min(x_A,x_B,\cdots,x_H) \\ W = \max(y_A,y_B,\cdots,y_H) - \min(y_A,y_B,\cdots,y_H) \\ A = LW \end{cases} \tag{47}$$

式中:L 为机构初始状态的横向最大距离;W 为纵向最大距离;A 为包络面积。

约束为机构在运动中不出现死点,且设计位置处于实际运动回路,即机构可以完成运动行程,并到达设计位置 1、2,约束等式为

http://bhxb.buaa.edu.cn

$$\begin{cases}\Delta\theta_2 = 30^\circ\\ x_{P_1} = 30\ \text{mm}\\ y_{P_1} = -455\ \text{mm}\\ \Delta\varphi_1 = -15^\circ\\ x_{P_2} = 150\ \text{mm}\\ y_{P_2} = -390\ \text{mm}\\ \Delta\varphi_2 = -1^\circ\end{cases} \tag{48}$$

3.3　优化结果及验证

使用 Isight 软件中的 pointer 算法进行优化,获得了机构在本次迭代中的最优解。优化前后优化变量取值、机构运动情况及包络情况如表 2 ~ 表 4 所示。

对求解得到的机构尺寸构型进行验证,机构尺寸构型及运动到位情况如图 9 所示。

表 2　优化前后优化变量取值

Table 2　Values of variables before and after optimization　　mm

优化	x_B	y_B	x_E	y_E	x_H	x_I
优化前	-125	-175	-300	-675	-175	200
优化后	-50	-250	-100	-550	-130.9	191.1

表 3　优化前后求解变量取值

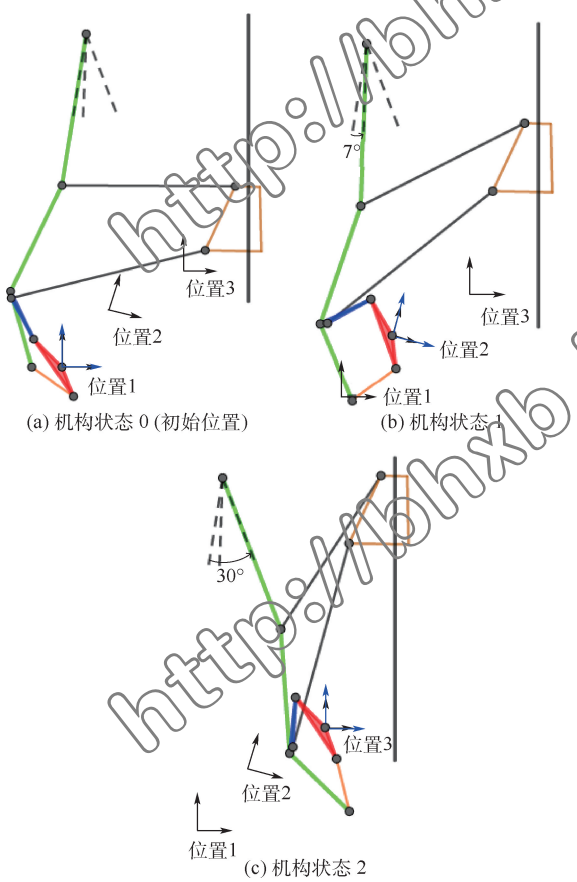
Table 3　Values of the unknowns before and after optimization　　mm

优化	x_A	y_A	x_F	y_F	x_G	y_G	y_H	y_I
优化前	335.0	-174.1	-96.8	-504.1	-111.7	-780.9	-475.6	-201.7
优化后	236.3	-251.4	-96.8	-504.1	-30.9	-598.6	-436.1	-357.3

表 4　优化前后机构运动情况

Table 4　Motion states before and after optimization

优化	机构运动情况		机构包络/m^2
	是否出现死点	是否运动到位	
优化前	否	否	0.445
优化前	否	是	0.222



(a) 机构状态 0 (初始位置)　(b) 机构状态 1　(c) 机构状态 2

图 9　运动到位情况

Fig. 9　States of movement

根据验证,求解得到的机构通过了设计转角与设计位置,满足机构功能需要。通过所提方法,得到了符合可动性要求,且初始位置矩形包络相对初始设计更小的可变后掠翼联动驱动机构。

4　结　论

基于平面滑块连杆机构,设计了一种可同时实现机翼后掠角变化和蒙皮展收的可变后掠翼联动驱动机构,并对该机构进行了分析与优化。

1) 本文提出一种用于可变后掠翼机翼的联动驱动机构,基于平面复合连杆机构,实现了在单驱动条件下,同时完成变后掠翼与部分蒙皮展开与收拢。

2) 针对所提可变后掠翼联动驱动机构,对机构进行拆分,利用矢量方程法,建立了机构拆分后的各个子机构的矢量环路方程,并对机构的可动性进行分析。

3) 对于该机构运动生成综合与函数生成综合相结合的尺寸综合的求解,提出一种基于运动学分析软件与优化算法的求解方法,结合矢量环路方程,解决了尺寸综合任务中机构的可动性问题,获得了符合运动要求且包络较小的可变后掠翼机构尺寸构型。

参考文献 (References)

[1] 董彦非,陈元恺,彭金京. 可变后掠翼技术发展与展望[J]. 飞行力学,2014,32(2):97-100.
DONG Y F, CHEN Y K, PENG J J. Development and prospect of variable swept wing[J]. Flight Dynamics, 2014, 32(2): 97-100(in Chinese).

http://bhxb.buaa.edu.cn

[2] 赵锁珠,李占科,张晓刚.一种无人机变后掠翼机构的设计与仿真研究[J].航空计算技术,2009,39(6):21-24.
ZHAO S Z, LI Z K, ZHANG X G. Study of a variable wing sweep mechanism design for unmanned air vehicle[J]. Aeronautical Computing Technique, 2009, 39(6): 21-24 (in Chinese).

[3] 程勇,董二宝,许旻,等.可变后掠翼机构设计与仿真[J].机械与电子,2010,28(2):20-22.
CHENG Y, DONG E B, XU M, et al. Structural design and kinematics simulation for the variable swept wing[J]. Machinery and Electronic, 2010, 28(2): 20-22 (in Chinese).

[4] 陈青欣.平面多杆机构综合与分析研究[D].武汉:湖北工业大学,2017:6-10.
CHEN Q X. Synthesis and analysis of multi-bar planar linkages [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2017: 6-10 (in Chinese).

[5] RUSSELL K, SODHI R S. Kinematic synthesis of planar five-bar mechanisms for multi-phase motion generation[J]. JSME International Journal, 2004, 47(1): 345-349.

[6] SCHREIBER H, MEER K, SCHMITT B J. Dimensional synthesis of planar Stephenson mechanisms for motion generation using circlepoint-search and homotopy methods[J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37(7): 717-737.

[7] WANG S J, SODHI R S. Kinematic synthesis of adjustable moving pivot four-bar mechanisms for multi-phase motion generation[J]. Mechanism and Machine Theory, 1996, 31(4): 459-474.

[8] 崔光珍,肖艳秋,王才东,等.六杆机构的双目标轨迹综合与运动分析[J].机械传动,2020,44(12):73-79.
CUI G Z, XIAO Y Q, WANG C D, et al. Synthesis and kinematic analysis for bi-objective path of six-bar linkage[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020, 44(12): 73-79 (in Chinese).

[9] WU R, LI R Q, BAI S P. A fully analytical method for coupler-curve synthesis of planar four-bar linkages[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 155: 104070.

[10] 周洪,邹慧君.基于机架杆方向结构误差优化综合曲柄摇杆连续轨迹生成机构[J].机械工程学报,2000,36(5):42-45.
ZHOU H, ZOU H J. Optimal synthesis of crank-rocker linkages for continuous path generation using orientational structural error of the fixed link[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(5): 42-45 (in Chinese).

[11] 陈青欣,王君,汪泉,等.一种平面曲柄滑块五杆机构的路径生成方法[J].湖北工业大学学报,2017,32(1):101-104.
CHEN Q X, WANG J, WANG Q, et al. A method for the path generation of planar five-bar slider-crank mechanisms[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2017, 32(1): 101-104 (in Chinese).

[12] 张春,胡小春,林佳裔.平面复合连杆机构设计及可动性分析[J].机械设计与制造,2020(1):48-51.
ZHANG C, HU X C, LIN J Y. The design and movability analysis of planar combined bar mechanism[J]. Machinery Design and Manufacture, 2020(1): 48-51 (in Chinese).

[13] 聂良益.多环平面连杆机构与球面六杆机构的可动性研究[D].武汉:湖北工业大学,2016:7-13.
NIE L Y. Mobility research of the multi-loop planar linkage and spherical six-bar linkage[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2016: 7-13 (in Chinese).

[14] 宋杰,梅瑛,李瑞琴.平面3-DOF PRR-RRP型六杆机构的曲柄存在条件[J].机械传动,2013,37(11):32-34.
SONG J, MEI Y, LI R Q. Crank existence condition of planar 3-DOF PRR-RRP type six-bar mechanism[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2013, 37(11): 32-34 (in Chinese).

[15] 于红英,唐德威.平面铰链五杆机构的奇异性研究[J].哈尔滨工业大学学报,2007,39(3):381-385.
YU H Y, TANG D W. Study on the singularity of a planar five-bar mechanism[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(3): 381-385 (in Chinese).

http://bhxb.buaa.edu.cn

Design and dimensional synthesis of a variable wing sweep mechanism

DU Xianchen, LIU Xue'ao, DONG Yang, WANG Hui, HE Tianyu, WANG Chunjie*

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: By changing the wing sweep angle, the variable wing sweep aircraft can achieve the best flight state under different flight speeds. To complete the folding and unfolding movements of the wing skin when the wing sweep angle changes under the single drive condition, we present a new driving mechanism for the variable sweep aircraft based on the planar compound linkage mechanism. To solve the problem of the combination of function generation and motion generation, the compound mechanism is divided into three sub-mechanisms. Furthermore, the vector loop equation of the compound mechanism is established and the movability of the mechanism is analyzed. Based on the vector loop equation, we propose a synthesis method to judge the movability and optimize the performance of the mechanism by using the optimization algorithm and kinematic analysis software. Finally, an example is presented to validate the effectiveness of the proposed method. The driving mechanism for the variable sweep aircraft is designed by using the proposed method. The designed mechanism meets the movability requirement and size constraint, and has the minimum envelope area, which prove the effectiveness of the method.

Keywords: variable wing sweep; compound linkage mechanism; movability; dimensional synthesis; optimization algorithm

http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2021-03-17; **Accepted**: 2021-06-25; **Published online**: 2021-07-29 09:10

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210728.1331.001.html

Foundation item: Open Research Program of State Key Laboratory of Robotics and Systems (SKLRS-2021-KF-01)

* **Corresponding author**. E-mail: wangcj@buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0130

面向控制的仿鸽扑翼机纵向动力学建模与分析

彭程，孙立国，王衍洋*，谭文倩，肖峰
（北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191）

摘 要：鸽子飞行时常采用变频率和变振幅模式来操控翅膀扑动与扭转以达到高效飞行的目的。为了给研究扑翼机控制和分配算法提供通用的设计验证平台，建立包含3个控制输入自由度的仿鸽扑翼机动力学模型，并开展开闭环模型有效性验证。考虑机翼运动惯性力和力矩，基于Kane方程建立仿鸽扑翼机的纵向多刚体非线性模型。选择升降舵偏转角、机翼扑动角振幅和机翼扭转角振幅作为控制输入，定义机翼定周期扑动的操纵机制，估算面向控制模型所需的气动导数和操纵导数，建立面向控制的仿鸽扑翼机线性时变周期系统模型。基于Floquet理论对线性时变周期系统模型进行动稳定性分析，结果与开环时域仿真一致。从闭环角度对模型有效性和适应性进行验证，仿真表明，所建模型能有效反映仿鸽扑翼机时变周期动力学特性，并能支撑控制分配方法的设计研究。

关 键 词：扑翼飞行器；多刚体动力学；线性时变周期系统；动稳定性；控制分析
中图分类号：V276
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2022)12-2510-10

与一般的固定翼飞机相比，基于扑翼飞行生物仿生学设计的扑翼飞行器具有结构简单、质量轻、飞行机动性和灵活性强及气动效率高等优势，因此，仿生扑翼飞行器的研究已成为世界各国研究的热点[1]。根据尺寸大小、翅膀扑动的频率及升力产生机理的不同，扑翼飞行器包括仿昆虫型和仿鸟型2种类型扑翼机。本文研究的仿鸽扑翼机属于仿鸟型扑翼机[2]。仿鸟型扑翼飞行器尺寸较大，范围从厘米级到米级不等，其机翼扑动频率不高，小型鸟类一般不超过20 Hz，大型鸟类可能只有1～2 Hz，且其机翼相对于整个飞行器的质量占比较大。仿鸟型扑翼机主要以平飞运动为主，其升力来源于机翼的扑动与空气的相对运动，此外，其机翼扑动在产生升力的同时还为其提供飞行的推动力[3-4]。

扑翼飞行器具有复杂的气动特性[3]，想要建立精确的动力学模型非常困难。面向控制问题建模时虽对精度要求有所降低，但仍具有较高难度，目前仍缺少一个通用模型，在能反映机翼运动产生的惯性力和力矩影响的同时，还能用于控制器设计的验证。目前，扑翼飞行器的建模主要有2类方法。一类是较为常用的采用了单刚体假设的牛顿-欧拉法[5-10]。这种方法将扑翼飞行器视为质量分布均匀的单刚体模型，不考虑机翼扑扭运动产生的惯性力和惯性力矩。另一类建模方法是将扑翼飞行器视为一个相对运动约束下的多刚体模型[11-13]，考虑机翼运动时产生的惯性力和惯性力矩。Orlowski和Girard[12]的研究结果显示，当机翼相对于整个飞行器的质量占比达到5.7%时，扑翼机的单刚体近似模型与非线性多刚体模型的惯性位置、俯仰角和俯仰角速率的仿真结果差别较大，此时多刚体模型更精确。此外，要建立能用于控制器设计的动力学模型，还需要获取相关的气动系数、气动导数和操纵导数。Dietl和

收稿日期：2021-03-22；**录用日期**：2021-05-14；**网络出版时间**：2021-06-15 16:25
网络出版地址：kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210615.1536.007.html
基金项目：航空科学基金（20185702003）
* **通信作者**. E-mail：wangyanyang@buaa.edu.cn

引用格式：彭程，孙立国，王衍洋，等. 面向控制的仿鸽扑翼机纵向动力学建模与分析[J]. 北京航空航天大学学报，2022，48(12)：2510-2519. PENG C，SUN L G，WANG Y Y，et al. Control oriented longitudinal modeling and analysis of pigeon-like flapping-wing aircraft[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2022，48(12)：2510-2519(in Chinese).

Garcia[8]利用 Andersen 等[14]使用气动数据计算得到的气动导数和操纵导数,建立了扑翼飞行器面向控制的纵向动力学模型。Kajak 等[9]利用最小二乘法估计得到了相关的气动系数和操纵导数,建立了无尾扑翼飞行器面向控制的纵向动力学模型。Jiang 等[10]进一步考虑了尾翼的影响,利用 Sun 等[15]给出的气动系数和气动导数及 Armanini等[16]给出的操纵导数建立了扑翼飞行器面向控制的纵向动力学模型。在扑翼飞行器建模的研究中[5-13],Kajak[9]和 Jiang[10]等建立的模型属于仿昆虫型扑翼机,Dietl 和 Garcia[8]建立的扑翼机尺寸虽然较仿昆虫型扑翼机大,但是其使用气动模型的雷诺数较低,适用于仿昆虫型扑翼机。对于仿鸟型扑翼机,目前还缺少相关的气动导数和操纵导数数据。因此,在考虑机翼运动惯性力和惯性力矩影响的基础上,如何建立仿鸟型扑翼机面向控制的纵向动力学模型仍然是一个需要解决的问题。

为给仿鸟型扑翼机控制算法的研究提供设计验证平台,仍有待于从自然界鸟类的操纵机理来对仿鸟型扑翼机的动力学模型进行拓展。结合扑翼飞行生物和微型飞行器的飞行特点,扑翼飞行器往往需要能够改变俯仰力矩的操纵机构来维持或改变俯仰姿态。例如,李智[6]、Dietl 和 Garcia[8]、Jiang 等[10]、年鹏等[17]采用升降舵的偏转角作为输入来改变俯仰力矩,Kajak 等[9]采用压力中心的水平位置来改变俯仰力矩。此外,扑翼飞行器还需要以机翼的扑动速度作为输入来改变飞行时的推力,其中机翼在一个扑动周期内的平均扑动速度可以通过控制机翼的扑动角振幅[6,8]、扑动角位移[17]、扑动频率[6,9,18]等来改变。然而,自然界中的鸟类在飞行中除了通过偏转尾翼来维持纵向姿态平衡及改变翅膀的扑动振幅或频率来改变飞行推力外,还会扭转翅膀来配合翅膀的扑动,以调节翅膀产生的升力方向。但是,目前针对包含机翼扭转角振幅的面向控制的三输入仿鸟型扑翼飞行器纵向动力学模型仍有待于研究。

综上所述,为给仿鸟型扑翼机控制律设计提供通用验证平台,本文建立了三输入定扑动周期的仿鸽扑翼机线性时变周期系统模型,并进行了动稳定性分析和开闭环时域仿真分析等多角度的验证。首先,考虑机翼运动产生的惯性力和惯性力矩的影响,利用 Kane 方程建立了仿鸽扑翼机的多刚体非线性模型;其次,选择升降舵偏转角、机翼扑动角振幅和机翼扭转角振幅作为控制输入,结合已有气动数据及计算模型[19-22]工程估算了扑翼机的气动导数系数和操纵导数系数,建立了面向控制的仿鸽扑翼机纵向多余度线性时变周期系统模型;然后,基于 Floquet 理论对该线性时变周期系统模型进行了动稳定性分析;最后,在设计基础控制器和控制分配方法的前提下,进行了开环和闭环仿真分析验证,阐释了模型的可信性及机翼扭转角振幅的引入对飞行操控能力的改善效果。

1　仿鸽扑翼机线性时变周期系统模型的建立

1.1　仿鸽扑翼机的多刚体模型

仿鸽扑翼机模型包含机身、一对对称的机翼和尾翼。机翼通过铰链与机身相连接,绕 x_b 轴上下扑动,同时绕机翼中心线扭转运动,扑动角为 ϕ,扭转角为 η,如图 1 所示。

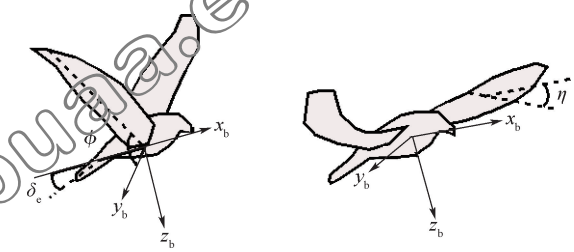


图 1　仿鸽扑翼机概念示意图

Fig. 1　Diagram of a pigeon-like flapping-wing aircraft

仿鸽扑翼机稳定飞行时,机翼的扑动和扭转运动是周期性的,为了方便表示机翼的运动规律,参照 Dietl 和 Garcia[7]的方法将机翼扑动和扭转分别简化为频率为 f_1 和 f_2 的正弦运动:

$$\phi = A\sin(2\pi f_1 t + \varphi_1) \tag{1}$$

$$\eta = R\sin(2\pi f_2 t + \varphi_2) \tag{2}$$

式中:A 为机翼扑动角振幅;R 为机翼扭转角振幅;t 为时间;φ_1 和 φ_2 分别为扑动和扭转的相位角。

由于自然界中鸽子身体、翅膀的形状极不规则且在飞行中不断变化,要获取其精确的外形几何数据非常困难,为了方便分析,参照 Orlowski 和 Girard[12]的简化方法,考虑机翼扑动产生的附加惯性力和惯性力矩的影响,将扑翼机简化为图 2 所示的多刚体模型。机身简化为一个质量均匀的圆柱体,长度为 l,半径为 r;左右机翼的形状简化为矩形,机翼展长为 l_1,单机翼质心到机身尾翼组合体质心距离为 l_2,单机翼弦长为 l_3;尾翼简化为矩形薄板,单个尾翼长、宽分别为 l_4、l_5,左右两边尾翼作为仿鸽扑翼机的升降舵,由联动机构连接,同时偏转相同角度;机身尾翼组合体、左侧机翼、右侧机翼的质量分别为 m_1、m_2、m_3,其中 $m_2 = m_3$,机翼质心位于机翼几何中心,机身质心到机翼前

http://bhxb.buaa.edu.cn

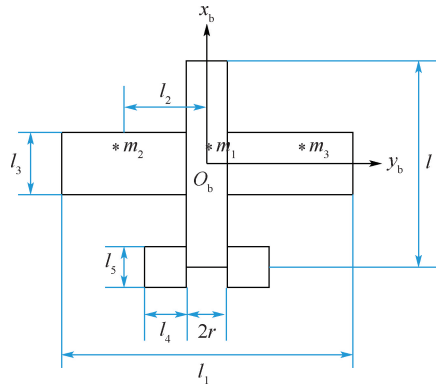


图 2 仿鸽扑翼机简化模型

Fig. 2 Simplified model of pigeon-like flapping-wing aircraft

缘的距离为 x_g,全机总质量为 m,其中 m_1、m_2 和 m_3 前"*"表示重心位置。需要说明的是,由于在较低的飞行速度下鸟类飞行的升力和推动力主要由翅膀扑动产生,为了方便分析,主要考虑仿鸽扑翼机机翼扑动产生的气动力而忽略机身的气动力,因此,由机身形状的不同而产生的对全机气动力的影响可以忽略。

由于采用 Kane 方程可以避免方程中出现对静矩的求导项,容易将动力学方程化为标准形式,便于编程计算[23],采用 Kane 方程建立如式(3)所示的仿鸽扑翼机纵向多刚体动力学模型:

$$\begin{cases} m(\dot{u}+qw)-2m_2(\dot{q}l_2\sin\phi+2ql_2\dot{\phi}\cos\phi)= \\ \quad -D\cos\alpha+L\sin\alpha-mg\sin\theta \\ m(\dot{w}-qu)+2m_2[-\ddot{\phi}l_2\cos\phi+ \\ \quad (q^2+\dot{\phi}^2)l_2\sin\phi]= \\ \quad -D\sin\alpha-L\cos\alpha+mg\cos\theta \\ (I_{1y}+2I_{2y})\dot{q}-2\ddot{\eta}I_{2y}+2m_2l_2\sin\phi(\dot{u}+qw- \\ \quad \dot{q}l_2\sin\phi-2ql_2\dot{\phi}\cos\phi+g\sin\theta)=M_y \end{cases} \tag{3}$$

式中:u、w 分别为扑翼机相对于地面参考系的速度在机体轴 x_b、z_b 方向的分量;q 为扑翼机相对于地面参考系的俯仰角速度在机体轴上的分量,$\dot{q}$、$\ddot{q}$ 分别为导数和二阶导数;θ 为扑翼机相对于地面坐标系的俯仰角;α 为扑翼机飞行迎角;L、D、M_y 分别为扑翼机所受的升力、阻力、俯仰力矩,其与扑翼机飞行速度、雷诺数、扑翼机飞行迎角 α 及机翼扑动时的平均迎角 α_w 有关;I_{1y} 为机身在 y_b 轴上的惯性矩,I_{2y} 为机翼在 y_b 轴上的惯性矩。

该扑翼机模型的几何参数和机翼运动参数如表 1 所示。

当扑翼固定时,$\phi=\eta=\dot{\phi}=\dot{\eta}=\ddot{\phi}=\ddot{\eta}=0$,式(3)为传统的固定翼飞机的纵向动力学方程,与其相比较,式(3)中包含 $\dot{\phi}$ 和 $\ddot{\phi}$ 的项为机翼扑动引起的惯性力或力矩,包含 $\ddot{\eta}$ 的项为机翼扭转引起的惯性力矩,多出来的其他项为机身运动引起的机翼产生的惯性力或力矩。

表 1 仿鸽扑翼机几何参数

Table 1 Geometry parameters of pigeon-like flapping-wings aircraft

参数	数值
总质量 m/g	300
机翼质量占总质量比重/%	6.67
机身长 l/m	0.50
机身直径 $2r$/m	0.10
机身质心距机翼前缘距离 x_g/m	0.075
机翼展长 l_1/m	0.70
机翼机身质心距离 l_2/m	0.2
机翼弦长 l_3/m	0.15
机翼平均厚度/m	0.01
机翼质心距机翼前缘距离/m	0.075 0
机翼气动中心距机翼前缘距离 x_{ac}/m	0.037 5
单个尾翼长 l_4/m	0.01
单个尾翼宽 l_5/m	0.01
机翼安装角/rad	0.087 2

1.2 仿鸽扑翼机操纵机制

为阐明仿鸽扑翼机的操纵机制及设计依据,一方面,选取常规的升降舵偏转角作为操纵输入;另一方面,为了方便工程实践和系统建模分析,在定周期条件下选取机翼扑动角振幅和扭转角振幅作为操纵输入。其中,升降舵偏转的变化可以通过伺服舵机电压的变化来工程实现;定周期下的机翼扑动角和扭转角振幅的实时变化可以通过无刷电动机、伺服舵机和无级调幅扑翼驱动机构[24]来工程实现。

本节以机翼扑动角为例,阐释仿真中定周期、变振幅的机翼扑动角在各离散采样时刻的实时变化情况。在各个离散的采样时刻,机翼扑动角的变化如下:

$$\phi=\begin{cases} A_0\sin(2\pi f_1t+\varphi_1) & t=t_0 \\ (A_0+\Delta A_1)\sin(2\pi f_1t+\varphi_1) & t=t_1 \\ \quad\vdots & \\ (A_0+\Delta A_k)\sin(2\pi f_1t+\varphi_1) & t=t_k \\ (A_0+\Delta A_{k+1})\sin(2\pi f_1t+\varphi_1) & t=t_{k+1} \\ \quad\vdots & \end{cases} \tag{4}$$

即在 $t=t_k$ 时刻,机翼扑动角位于振幅为 $(A_0+\Delta A_k)$ 的正弦轨迹线上。以扑动频率 10 Hz,扑动基准角振幅 A_0,仿真步长 0.005 s,初始相位 $\varphi_1=0$ 为例,机翼扑动角在一个周期为 20 个离散采样点的变化曲线如图 3 所示。

图 3 中,机翼扑动角在一个周期 T 内的各采样时刻点的值如下:

http://bhxb.buaa.edu.cn

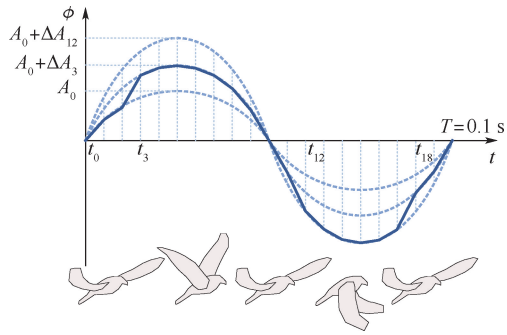


图 3　分时段变振幅扑动序列示意图

Fig. 3　Diagram of flapping sequence of time-varying amplitude

$$\phi=\begin{cases}A_0\sin(2\pi f_1 t+\varphi_1) & t=t_0,t_1,t_2\\ (A_0+\Delta A_3)\sin(2\pi f_1 t+\varphi_1) & t=t_3,t_4,\cdots,t_{11}\\ (A_0+\Delta A_{12})\sin(2\pi f_1 t+\varphi_1) & t=t_{12},t_{13},\cdots,t_{17}\\ (A_0+\Delta A_3)\sin(2\pi f_1 t+\varphi_1) & t=t_{18},t_{19}\end{cases} \tag{5}$$

1.3　面向控制的线性时变周期系统模型的建立

为了方便后续线性时变周期系统的分析及控制系统的设计,本文对扑翼机非线性运动方程(3)解耦并进行小扰动线性化。选择仿鸽扑翼机升降舵的偏转角变化量 $\Delta\delta_e$、机翼扑动角振幅相对于基准值的变化量 ΔA 及机翼扭转角振幅相对于基准值的变化量 ΔR 来作为被控对象的控制输入,即控制输入为 $\boldsymbol{v}=[\Delta\delta_e\quad \Delta A\quad \Delta R]^{\mathrm{T}}$,扑翼机纵向状态量相对于配平值的偏差为 $\boldsymbol{x}=[u\quad w\quad q\quad \theta]^{\mathrm{T}}$;选定速度为 10 m/s、高度为 20 m 表示基准飞行状态,在基准飞行状态下的配平值如表 2所示。

表 2　配平值

Table 2　Trimming values

参数	数值
机体轴 x_b 方向速度 u/(m·s^{-1})	9.962 0
机体轴 y_b 方向速度 w/(m·s^{-1})	0.870 9
扑翼机飞行迎角 α/(m·s^{-1})	0.083 2
俯仰角速度 q/(rad·s^{-1})	0.000 0
俯仰角 θ/rad	0.083 2
高度 h/m	10.000 0
升降舵偏转角 δ_e/rad	0.017 5

最终得到扑翼机的线性状态方程:

$$\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{F}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{G}\boldsymbol{v} \tag{6}$$

式中:

$$\boldsymbol{F}=\begin{bmatrix}a_{11}&a_{12}&a_{13}&a_{14}\\ a_{21}&a_{22}&a_{23}&a_{24}\\ a_{31}&a_{32}&a_{33}&a_{34}\\ 0&0&1&0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{G}=\begin{bmatrix}b_{11}&b_{12}&b_{13}\\ b_{21}&b_{22}&b_{23}\\ b_{31}&b_{32}&b_{33}\\ 0&0&0\end{bmatrix}$$

$\boldsymbol{F}$ 中各元素由气动系数和气动导数构成,在气动系数方面 $\boldsymbol{F}$ 中各元素与升力系数 C_L、阻力系数 C_D 和俯仰力矩系数 C_m 有关,在气动导数方面,a_{11}、a_{21}、a_{31} 与升力、阻力、俯仰力矩对速度 u 的导数 L_u、D_u、M_u 有关,a_{12}、a_{22}、a_{32} 与升力、阻力、俯仰力矩对速度 w 的导数 L_w、D_w、M_w 有关,a_{13}、a_{23}、a_{33} 与升力、阻力、俯仰力矩对角速度 q 的导数 L_q、D_q、M_q 有关。$\boldsymbol{G}$ 中各元素由操纵导数构成,其中 b_{11}、b_{21}、b_{31} 与升力、阻力、俯仰力矩对升降舵偏转角 δ_e 的导数 L_{δ_e}、D_{δ_e}、M_{δ_e} 有关,b_{12}、b_{22}、b_{32} 与升力、阻力、俯仰力矩对机翼扑动角振幅 A 的导数 L_A、D_A、M_A 有关,b_{13}、b_{23}、b_{33} 与升力、阻力、俯仰力矩对机翼扭转角振幅 R 的导数 L_R、D_R、M_R 有关。$\boldsymbol{F}$ 和 $\boldsymbol{G}$ 中各元素的具体表达式可以通过小扰动线性化推导得到。为获取 $\boldsymbol{F}$ 和 $\boldsymbol{G}$ 随机翼运动的周期变化情况,本节将对仿鸽扑翼机的气动系数、气动导数系数及操纵导数系数进行计算。

1.3.1　气动系数计算

特定扑翼翼型下的 C_L、C_D、C_m 大小与雷诺数 Re、扑翼机飞行迎角 α、机翼扑动时的平均迎角 α_w 有关,而 α_w 又与 α、A、f_1、R、f_2、机翼尺寸大小及扑动扭转相位有关。因此,C_L、C_D、C_m 的大小由 Re、α、A、R、f_1、f_2、t 及机翼尺寸大小等元素共同确定。由于仿鸽扑翼机的尺寸大小、飞行速度、Re 与 DOVE 扑翼机[25]基本相似,采用与 DOVE 扑翼机相同的 NACA4408 扑翼翼型,并结合其在 Re 为 70 000 时 C_L、C_D 随迎角的变换规律[20]和夏风[19]给出的计算模型,计算得到各个采样时刻机翼运动产生的 C_L、C_D、C_m 大小。在表 2 中选定的基准飞行状态及表 3 设定的基准机翼运动参数下,即 Re、α、f_1、f_2 均已设为定值,此时可以获得在不同的 A 和 R 下,扑翼机的 C_L、C_D、C_m 在扑动周期内的变化,其变化情况如图 4 和图 5 所示。

表 3　机翼运动参数

Table 3　Motion parameters of wings

参数	数值
基准扑动角振幅 A/rad	0.524
最大扑动角振幅 A_{max}/rad	0.962
最小扑动角振幅 A_{min}/rad	0.086
扑动频率 f_1/Hz	10.0
扑动角起始相位 φ_1/rad	0
基准扭转角振幅 R/rad	0.3
最大扭转角振幅 R_{max}/rad	0.45
最小扭转角振幅 R_{min}/rad	0.15
扭转频率 f_2/Hz	10.0
扭转角起始相位 φ_2/rad	π/2

http://bhxb.buaa.edu.cn

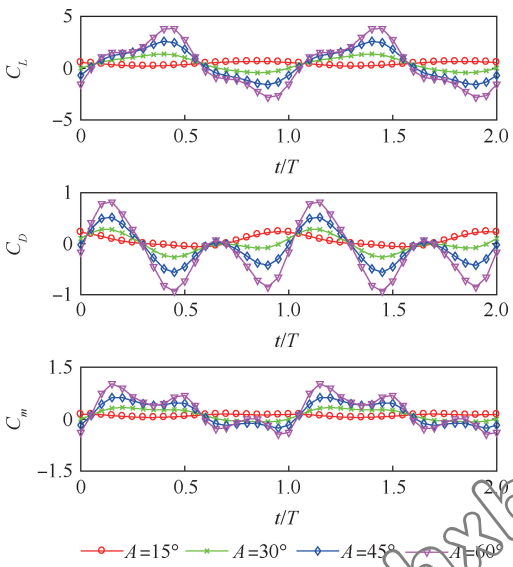


图 4 不同机翼扑动角振幅下气动系数的变化

Fig. 4 Variation of aerodynamic coefficients with different amplitudes of flapping-wing angle

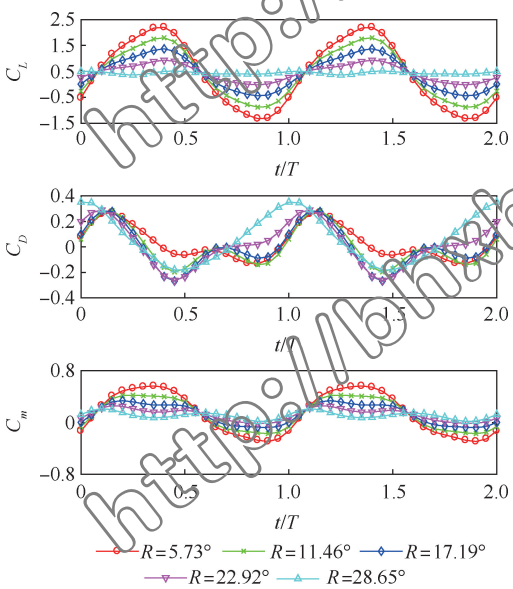


图 5 不同机翼扭转角振幅下气动系数的变化

Fig. 5 Variation of aerodynamic coefficients with different amplitudes of wing torsional angle

由图 4 可以看出随着 A 的增大，扑翼机的 C_L、C_D、C_m 的振幅增大，C_D 的平均值减小，即推力的平均值增大，这与自然界中鸟类的飞行特点相符合。此外，在 $A=15°$ 时 C_L、C_D、C_m 变化较为平缓，且 C_L 的变化趋势与其他3 个不同角振幅下的变化趋势相反，这是因为角振幅过小时机翼的扑动速度减慢，此时机翼的迎角主要受到扭转的影响。另外如图5 所示，当 R 增大时，C_L 的振幅减小，C_m 的振幅也减小。因此，可以期望通过调节 R 来减缓扑翼机飞行中由于 C_L 和 C_m 的变化引起的 θ 的振荡和最大的法向过载。此外，R 不能无限增大。当 R 过大时，会造成机翼扑动时迎角方向反向，从而造成升力反向，使飞行不稳定。由图 5可以看出 $R=28.65°$ 时 C_L 已经开始出现反向，因此 $A=30.03°$ 时，R 不宜超过28.65°。图 4 和图 5 中 T 为周期，$1T=0.1$ s。

1.3.2 气动导数系数和操纵导数系数估算

由于仿鸽扑翼机的平尾布局和作用与常规布局飞机类似，可以采用常规布局飞机的飞行动力学[21]对其进行估算。其中，平尾尾容比 A_{ht}、平尾力臂 l_{ht} 及平尾升力线斜率 $C_{L_{\alpha},t}$ 等参数将直接影响气动导数系数和操纵导数系数的大小，因此，选取合适的 A_{ht}、$l_{ht}/\bar{c}$（$\bar{c}$ 为平均气动弦长）及 $C_{L_{\alpha},t}$ 至关重要。

本文中的仿鸽扑翼机取 $A_{ht}=0.37$，$l_{ht}/\bar{c}=1.67$，对比表 4 的扑翼机平尾容量系数典型值可以知道其 A_{ht} 和 $l_{ht}/\bar{c}$ 的大小均在合理范围内。平尾翼型参考熊超[22]使用的尾翼翼型，其 $C_{L_{\alpha},t}=2.92$，效率系数 $\eta_t=0.85$。基于 A_{ht} 和 $l_{ht}/\bar{c}$ 的数值大小及平尾的翼型和形状，可以估算得到仿鸽扑翼机的气动导数系数和升降舵的操纵导数系数。此外，分别由图 4 和图 5 中的曲线插值可以得到 A 和 R 的操纵导数系数。本节给出了气动导数系数和操纵导数系数的估算方法及重要参数的选取依据，进而可以得到气动导数系数和操纵导数系数的具体数值。

至此，获得了仿鸽扑翼机线性模型中所需的气动系数、气动导数系数及操纵导数系数，构建了一个完整的面向控制的线性时变周期系统模型。

表 4 扑翼机尾容量系数典型值[22]

Table 4 Typical values of tail capacity coefficient of flapping-wing aircraft[22]

名称	类型	A_{ht}	$l_{ht}/\bar{c}$
Delfly(TU Delft)	仿昆虫	0.61	2.7
PY-7C(NPU)	仿鸟	0.33	1.5
PY-7D(NPU)	仿鸟	0.36	1.75
PY-8E(NPU)	仿鸟	0.36	1.80
仿鸽扑翼机	仿鸟	0.37	1.67

1.3.3 状态矩阵特征值分析

在如式(6)所示的仿鸽扑翼机线性时变周期系统中，状态矩阵 $\boldsymbol{F}$ 的特征值变化及短周期阻尼比和自振频率变化情况如图 6 所示，其中，T 为周期，$1T=0.1$ s。

可以看到，机翼的周期性扑动使得线性时变周期系统 $\boldsymbol{F}$ 中的模态极点周期性变化。其中，2 个离虚轴较远的短周期模态极点的周期性变化表明系统短周期的阻尼比和自振频率周期性变化，短周期平均阻尼比为 0.399 9，短周期平均自振频率为 10.371 2 rad/s。虽然短周期模态周期

http://bhxb.buaa.edu.cn

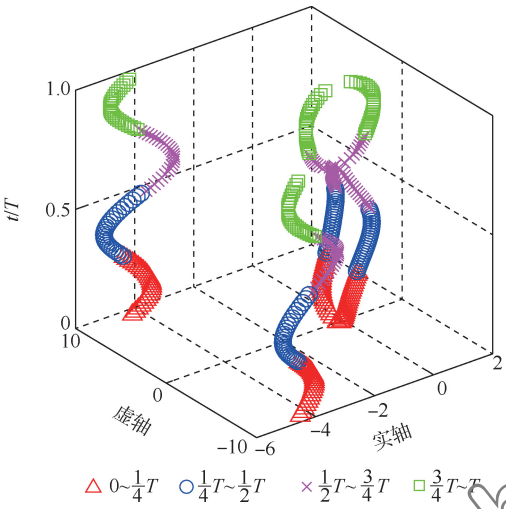


图 6　$\boldsymbol{F}$ 的特征值变化

Fig. 6　Eigenvalues of $\boldsymbol{F}$

性变化，但其是稳定的，这是合理地选择平尾尾容比和平尾力臂等参数的结果。此外还可以看到，2 个离虚轴较近的特征值在复平面的左右两边来回运动，这意味着该系统存在静不稳定的模态。因此，扑翼机是否周期稳定并不能由 $\boldsymbol{F}$ 直接确定，必须通过 Floquet 动稳定性分析确定。

1.4　控制输入各通道操纵效率分析

本节在基准飞行状态下，以估算得到的操纵导数系数为原始数据，用 $\boldsymbol{G}$ 中各元素的表达式，计算得到仿鸽扑翼机的各输入通道的操纵效能，并对其进行分析，以明确各输入的操纵作用，从而为控制器的设计提供依据。

在 2 个扑动周期内，扑翼机升降舵偏转的操纵效能、机翼扑动角振幅的操纵效能及机翼扭转角振幅的操纵效能如图 7 所示，其中 T 为周期，$1T = 0.1$ s。

如图 7 所示，升降舵的偏转主要使 q 的平均值发生变化，从而改变扑翼机的俯仰姿态和平衡扑翼机的俯仰力矩。

此外，u_A、w_A 及 q_A 随机翼的周期扑动而周期变化且其振幅都特别大，这是因为扑翼机的升力和推力主要是由机翼的扑动产生，而扑翼的升力和推力中心线不是一直通过扑翼机重心，而是随着机翼的扑动不断地变化。在一个周期内，u_A、w_A 和 q_A 的平均值分别为 5.066 6 m/(s·rad)、0.676 7 m/(s·rad) 和 19.752 4 s^{-1}。可以看到，A 增大可以使 u 增大，这与增大 A 来增大扑翼机推力的操纵机制相符合。另外，由于 q_A 的平均值较大且振幅较大，A 的改变必将引起 q 的改变。因此，对扑翼机纵向俯仰姿态的控制需要升降舵和机翼扑动角振幅共同配合来完成。

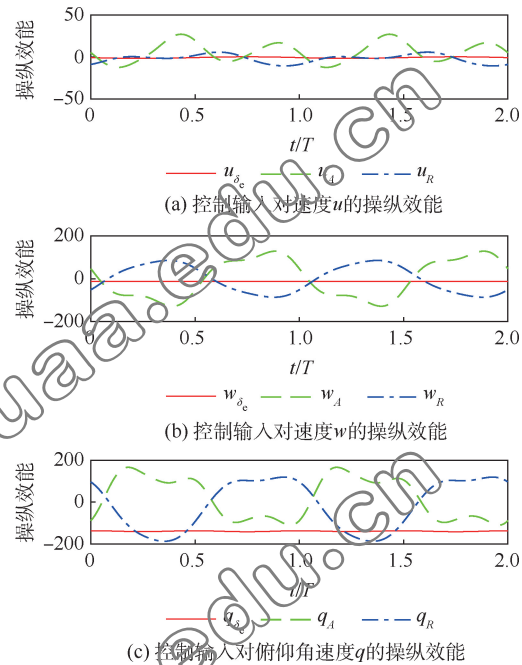


图 7　控制输入的操纵效能

Fig. 7　Control efficiency of inputs

由图 7 可知，R 增大对 u、w 和 q 的平均值影响很小，且对 q 的平均值影响可以通过升降舵来调节。另外，在一个扑动周期内，w_R 的振动方向与 w_A 相反，q_R 的振动方向与 q_A 相反，u_R 的最大值相对于 u_A 较小。因此，在增大 A 的同时调节 R 的大小可以减缓扑翼机飞行时 q 和 θ 的振动及法向过载 n_z 的振动。

2　基于 Floquet 理论的线性时变周期系统的动稳定性分析

考虑到 Floquet 理论具有较高的准确性[26]，本节采用该理论对机翼质量占比为 6.67% 的仿鸽扑翼机线性时变周期系统进行动稳定性分析。

当存在小扰动量时，线性时变周期系统的微分方程为

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{F}(t)\boldsymbol{x}(t) \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{F}(t) \in \mathbf{R}^{n\times n}$ 且 $\boldsymbol{F}(t+T) = \boldsymbol{F}(t)$，$\boldsymbol{x}(t) \in \mathbf{R}^{n\times 1}$。式(7)的基解矩阵为非奇异矩阵 $\boldsymbol{\psi}(t) \in \mathbf{R}^{n\times n}$。

存在非奇异常值矩阵 $\boldsymbol{C} \in \mathbf{R}^{n\times n}$ 满足：

$$\boldsymbol{\psi}(t+T) = \boldsymbol{\psi}(t)\boldsymbol{C} \tag{8}$$

矩阵 $\boldsymbol{C}$ 的特征值 $\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_n$ 即为式(7)的特征乘子。根据 Floquet 理论，可以获得以下关系：

$$x_j(t_0 + kT) = \rho_j^k x_j(t_0) \tag{9}$$

式中：$k \in \mathbf{N}$。此时扰动状态量 x_j 随时间的变化与矩阵 $\boldsymbol{C}$ 的特征值大小有关。当矩阵 $\boldsymbol{C}$ 所有的特征值都在单位圆内时，扰动量将随时间的增加而逐渐消失，系统稳定；否则系统不稳定。

http://bhxb.buaa.edu.cn

在基准飞行状态下,$\boldsymbol{C}$ 的特征值为

$$\boldsymbol{\rho} = [0.390\,4 \pm 0.521\,2\mathrm{i} \quad 0.988\,3 \quad 1.011\,6]$$

$$|\rho_j|_{\max} = 1.011\,6 > 1$$

矩阵 $\boldsymbol{C}$ 特征值模的最大值大于 1,在单位圆外,系统动不稳定。

3 仿真分析

3.1 开环仿真结果

在基准飞行状态下,给升降舵一个脉冲信号,仿鸽扑翼机的开环响应如图 8 所示。

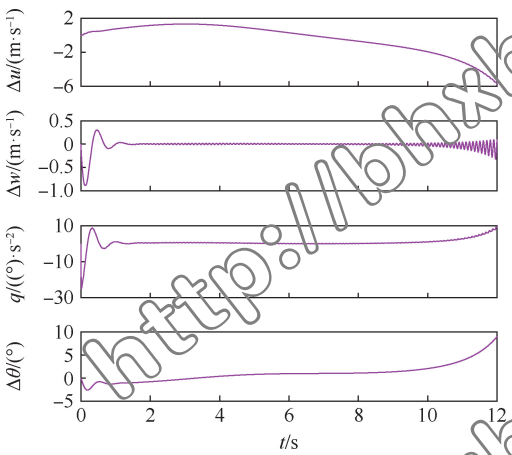


图 8 升降舵脉冲信号下的开环仿真响应

Fig. 8 Open-loop simulation response under elevator pulse signal

如图 8 所示,在给升降舵一个脉冲激励信号后,在短时间范围内,w 和 q 较快地稳定下来,仿鸽扑翼机具有稳定的短周期模态,与 3.3 节分析结果一致。在长时间范围内,u 发散,而其他 3 个状态量先是稳定在一个值上,最终随着 u 的发散而发散,这与第 2 节的分析结果一致。

3.2 经典控制器设计

利用串级 PID 经典控制算法设计了图 9 所示的纵向轨迹跟踪控制器,以 $\Delta\delta_e$、ΔA 和 ΔR 作为控制输入,高度 h 和 u 作为输出。此外,针对操纵输入的冗余问题,考虑到有效集方法具有计算方便、步骤简单、实时性好等优点,采用有效集方法[27],进行控制分配器的设计,实现了升降舵和机翼扭转角振幅对俯仰姿态角回路的联合控制,其中 u_{cmd} 为需要跟踪的 u 的指令信号,h_{cmd} 为需要跟踪的 h 指令信号,符号上方“-”表示负反馈。

3.3 闭环仿真分析

在基准飞行状态下,给定一组周期为 40 s、振幅为 5 m 的正弦高度指令信号,对闭环系统进行仿真。为了验证将 ΔR 作为控制输入的效果,将采用带控制分配的 $\Delta\delta_e$、ΔA 和 ΔR 的三输入闭环仿真结果与只采用 $\Delta\delta_e$ 和 ΔA 二输入的闭环仿真结果进行对比。最终的状态量响应和操纵响应分别如图 10 和图 11 所示。

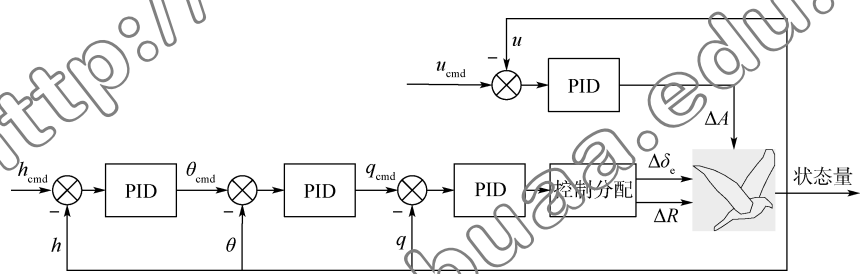


图 9 纵向双通道闭环控制器结构

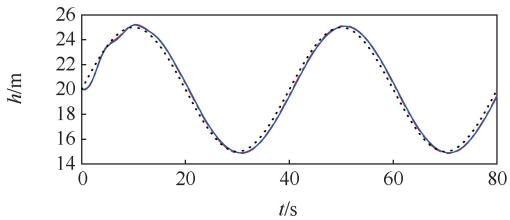
Fig. 9 Structure of longitudinal dual channel closed-loop controller

由图 11(a)可以看出,扑翼机要跟踪 h 指令时,首先要偏转 $\Delta\delta_e$ 来改变 q,从而改变 θ 来实现 h 的变化,同时,由图 11(b)可以看出,为了避免 h 变化引发的 u 变化,要改变 ΔA 来改变机翼扑动的速度。此外,由图 10(a)、图 11(a) 和图 11(b)可以看到,扑翼机并不是完全依靠 $\Delta\delta_e$ 来改变俯仰姿态,如在 30~40 s 扑翼机上升时,$\Delta\delta_e$ 处于上偏状态,这是因为此时 A 增大,其在产生推力的同时也会产生俯仰力矩从而对 q 产生影响,这一点也与图 7 中 q_A 的平均值 19.752 4 s^{-1} 相符合。因此,对扑翼机俯仰姿态的操控是通过 $\Delta\delta_e$ 和 ΔA 的变化共同来完成。

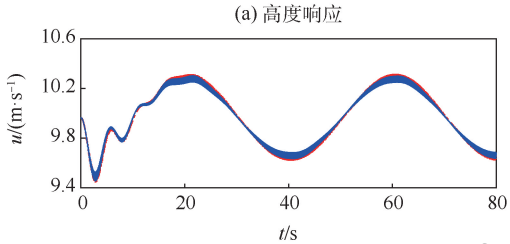
此外,从图 10(c)~图 10(f)可以看出三输入模型的 θ、q 的振幅及 $\dot{q}$ 和 n_z 的最大绝对值要明显小于二输入模型。其原因在于:引入 ΔR 控制输入后,通过机翼在扑动过程中的扭转实时地调整机翼迎角,从而达到调整机翼产生的升力、阻力的大小和方向的目的,进而使得在扑动过程中全机的 C_L 和 C_m 的振幅更小,最终达到减缓 θ、q 的振幅及 $\dot{q}$ 和 n_z 的最大绝对值的效果。

为对引入 ΔR 后的控制效果进行更有效评价,探索了评价指标的构建问题。扑翼机飞行时的实际情况表明,θ 振动过大会对空中投弹、侦查拍摄等任务造成不利影响,$\dot{q}$ 和 n_z 过大会使机体

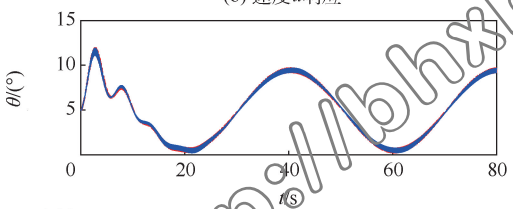
http://bhxb.buaa.edu.cn

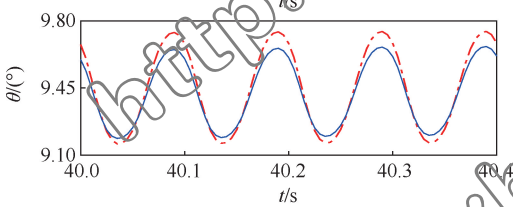


(a) 高度响应

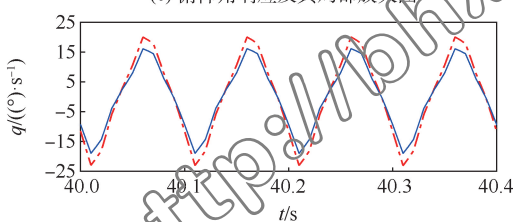


(b) 速度u响应

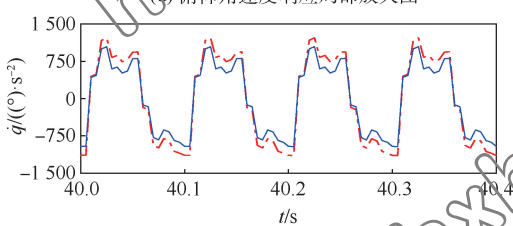




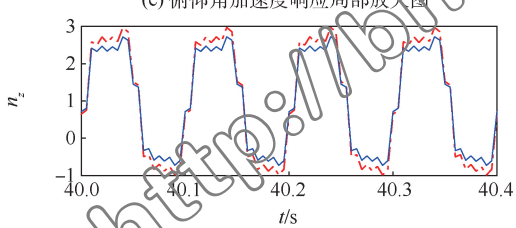
(c) 俯仰角响应及其局部放大图



(d) 俯仰角速度响应局部放大图



(e) 俯仰角加速度响应局部放大图



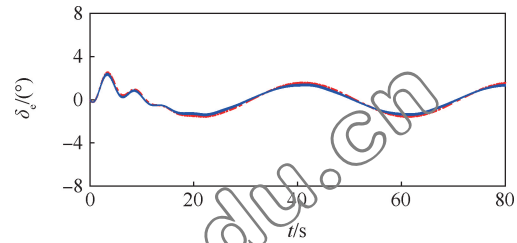
(f) 法向过载响应局部放大图

二输入　三输入　高度指令

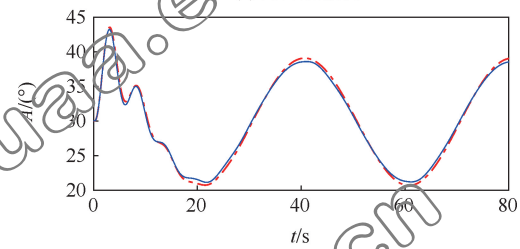
图 10　闭环状态量响应

Fig. 10　States response of closed-loop system

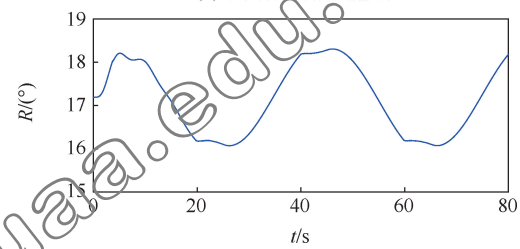
结构承受过大的弯矩和惯性力,从而造成结构疲劳。因此,为了更清晰地表达减缓效果,提出



(a) 升降舵偏转



(b) 机翼扑动角振幅变化



(c) 机翼扭转角振幅变化

二输入　三输入

图 11　闭环系统操纵响应

Fig. 11　Control response of closed-loop system

式(10)所示的状态平缓度指标:

$$J = \frac{1}{\tau_1 - \tau_0}\int_{\tau_0}^{\tau_1}(\kappa_1\theta^2 + \kappa_2\dot{q}^2 + \kappa_3 n_z^2)\,\mathrm{d}t \tag{10}$$

式中:κ_1、κ_2、κ_3 为归一化系数,取值分别为 0.373 4、4.152 5×10⁻⁵、9.809 7;n_z 为法向过载。仿真结果显示,二输入模型的状态平缓度指标为 100.501 9,而三输入模型为 83.450 7,减缓了 17.05。

4　结　论

1) 鸽子飞行时常采用变频率和振幅模式来调控翅膀扑动、扭转以达到高效飞行的目的。研究发现,定周期等振幅扑动翅膀条件下,仅靠尾巴偏转不能既实现高度的控制又实现速度的保持和控制,因此,需要引入机翼扑动角振幅作为控制输入来实现速度的保持,同时也有必要引入机翼扭转角振幅作为控制输入以进一步提升轨迹跟踪飞行的平稳性和高效性。

2) 基于 Floquet 理论对仿鸽扑翼机线性时变周期系统模型展开了动稳定性分析,与开环时域仿真结果一致,表明了仿鸽扑翼机具有缓慢发散模态,从而指明了设计增稳和控制器的必要性。

3) 闭环仿真结果表明机翼扭转角振幅这一

http://bhxb.buaa.edu.cn

输入量的引入能显著提升轨迹跟踪过程的平滑性,使状态平缓度指标降低了17.05,验证了所建模型的有效性及模型输入维度增加带来的模型适应性。

参考文献(References)

[1] 徐韦佳,姚奎,宋阿羚,等. 微型仿生扑翼飞行器研究综述[J]. 信息技术与网络安全,2020,39(10):7-17.
XU W J,YAO K,SONG A L,et al. Survey of research on small and micro bionic flapping wing aircraft[J]. Information Technology and Network Security,2020,39(10):7-17(in Chinese).

[2] 向锦武,孙毅,申童,等. 扑翼空气动力学研究进展与应用[J]. 工程力学,2019,36(4):8-23.
XIANG J W,SUN Y,SHEN T,et al. Research progress and application of flapping wing aerodynamics[J]. Engineering Mechanics,2019,36(4):8-23(in Chinese).

[3] 薛栋,宋笔锋,宋文萍,等. 仿鸟型扑翼飞行器气动/结构/飞行力学耦合研究进展[J]. 空气动力学学报,2018,36(1):88-97.
XUE D,SONG B F,SONG W P,et al. Advances in coupling aeroelasticity and flight dynamics of bird inspired FMAV[J]. Acta Aerodynamica Sinica,2018,36(1):88-97(in Chinese).

[4] 昂海松,肖天航,郑祥明. 微型飞行器的低雷诺数、非定常气动设计与分析[J]. 无人系统技术,2018,1(4):17-32.
ANG H S,XIAO T H,ZHENG X M. Design and analysis of low Reynolds number and unsteady aerodynamic based on micro air vehicles[J]. Unmanned Systems Technology,2018,1(4):17-32(in Chinese).

[5] TAYLOR G K,THOMAS A L R. Dynamic flight stability in the desert locust Schistocerca gregaria[J]. The Journal of Experimental Biology,2003,206(16):2803-2829.

[6] 李智. 扑翼飞行机器人控制系统的设计研究[D]. 北京:北方工业大学,2016:20-31.
LI Z. Design of flapping wing flight robot control system[D]. Beijing:North China University of Technology,2016:20-31(in Chinese).

[7] DIETL J M,GARCIA E. Stability in ornithopter longitudinal flight dynamics[J]. Journal of Guidance,Control,and Dynamics,2008,31(4):1157-1163.

[8] DIETL J M,GARCIA E. Ornithopter control with periodic infinite horizon controllers[J]. Journal of Guidance,Control,and Dynamics,2011,34(5):1412-1422.

[9] KAJAK K M,KARÁSEK M,CHU Q P,et al. A minimal longitudinal dynamic model of a tailless flapping wing robot for control design[J]. Bioinspiration & Biomimetics,2019,14(4):046008.

[10] JIANG T,YANG X S,WANG H W,et al. Longitudinal modeling and control of tailed flapping-wings micro air vehicles near hovering[J]. Journal of Robotics,2019,2019:1-12.

[11] GRAUER J A,HUBBARD J E. Multibody model of an ornithopter[J]. Journal of Guidance,Control,and Dynamics,2009,32(5):1675-1679.

[12] ORLOWSKI C T,GIRARD A R. Modeling and simulation of nonlinear dynamics of flapping wing micro air vehicles[J]. AIAA Journal,2011,49(5):969-981.

[13] 钱辰,方勇纯,李友朋. 面向扑翼飞行控制的建模与奇异摄动分析[J]. 自动化学报,2022,48(2):434-443.
QIAN C,FANG Y C,LI Y P. Control oriented modeling and singular perturbation analysis in flapping-wing flight[J]. Acta Automatica Sinica,2022,48(2):434-443(in Chinese).

[14] ANDERSEN A,PESAVENTO U,WANG Z J. Analysis of transitions between fluttering,tumbling and steady descent of falling cards[J]. Journal of Fluid Mechanics,2005,541:91-104.

[15] SUN M,WANG J K,XIONG Y. Dynamic flight stability of hovering insects[J]. Acta Mechanica Sinica,2007,23(3):231-246.

[16] ARMANINI S F,CAETANO J V,DE VISSER C C,et al. Modelling wing wake and tail aerodynamics of a flapping-wing micro aerial vehicle[J]. International Journal of Micro Air Vehicles,2019,11:1-24.

[17] 年鹏,宋笔锋,宣建林,等. 扑翼飞行器动力系统建模方法[J]. 航空学报,2021,42(9):224646.
NIAN P,SONG B F,XUAN J L,et al. Modeling method for propulsion system of flapping wing vehicles[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2021,42(9):224646(in Chinese).

[18] 昂海松,曾锐,段文博,等. 柔性扑翼微型飞行器升力和推力机理的风洞试验和飞行试验[J]. 航空动力学报,2007,22(11):1838-1845.
ANG H S,ZENG R,DUAN W B,et al. Aerodynamic experimental investigation for mechanism of lift and thrust of flexible flapping-wing MAV[J]. Journal of Aerospace Power,2007,22(11):1838-1845(in Chinese).

[19] 夏风. 扑翼微型飞行器动力学建模与控制算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007:12-35.
XIA F. Research on dynamics modeling and control algorithm of flapping micro aerial vehicle[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2007:12-35(in Chinese).

[20] 杨文青,宋笔锋,宋文萍. N-S方程数值研究翼型对微型扑翼气动特性的影响[J]. 计算力学学报,2011,28(2):214-220.
YANG W Q,SONG B F,SONG W P. The effect of airfoil to aerodynamics characteristics of flapping wing by numerical simulation on Navier-Stokes equations[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics,2011,28(2):214-220(in Chinese).

[21] 方振平,陈万春,张曙光. 航空飞行器飞行动力学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005:214-223.
FANG Z P,CHEN W C,ZHANG S G. Flight dynamics of aircraft[M]. Beijing:Beihang University Press,2005:214-223(in Chinese).

[22] 熊超. 微型扑翼飞行器尾翼的分析与设计方法研究[D]. 西安:西北工业大学,2007:29-58.
XIONG C. Analysis and design methodology of the empennage of the flapping-wing micro air vehicles[D]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University,2007:29-58(in Chinese).

[23] 张杰,吴森堂. 一种变体飞行器的动力学建模与动态特性分析[J]. 北京航空航天大学学报,2015,41(1):58-64.
ZHANG J,WU S T. Dynamic modeling for a morphing aircraft

http://bhxb.buaa.edu.cn

and dynamic characteristics analysis[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2015,41(1):58-64 (in Chinese).

[24] 王进,宋笔锋,王利光,等. 一种无级调幅扑翼驱动机构:CN102285453A[P]. 2011-12-21.
WANG J, SONG B F, WANG L G, et al. Stepless amplitude modulating driving mechanism for flapping wing:CN102285453A[P]. 2011-12-21(in Chinese).

[25] YANG W Q, WANG L G, SONG B F. DOVE: A biomimetic flapping-wing micro air vehicle[J]. International Journal of Micro Air Vehicles,2018,10(1):70-84.

[26] WU J H, SUN M. Floquet stability analysis of the longitudinal dynamics of two hovering model insects[J]. Journal of the Royal Society Interface,2012,9(74):2033-2046.

[27] HARKEGARD O. Efficient active set algorithms for solving constrained least squares problems in aircraft control allocation[C]// Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway: IEEE Press,2002:1295-1300.

Control oriented longitudinal modeling and analysis of pigeon-like flapping-wing aircraft

PENG Cheng, SUN Liguo, WANG Yanyang*, TAN Wenqian, XIAO Feng

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Pigeon usually flaps and twists its wings by changing the frequency or the amplitude to achieve efficient flying. Inspired by this, to provide a generic design and verification platform for the study of flapping-wing aircraft control laws and control allocation algorithms, a dynamic model of a pigeon-like flapping-wing aircraft with three control inputs is established, and then validated through open-loop and closed-loop simulation. Specifically, the longitudinal multi-rigid nonlinear dynamic model of the pigeon-like flapping-wing aircraft is founded based on Kane equation with the inertial forces and moments of the wings considered. The elevator deflection, the varying amplitude of the wing flapping angle and the varying amplitude of the wing torsion angle are selected as the control inputs, and the control mechanism is then given with a fixed wing-flapping time period. The aerodynamic and control derivatives are calculated in a practical way, and the control oriented linear time-varying periodic system model of the pigeon-like flapping-wing aircraft is finally established. The dynamic stability of the linear time-varying periodic system model is then analyzed based on Floquet theory, which indicates the result obtained is consistent with the subsequent open-loop time-domain simulation results. Finally, the closed-loop simulations are performed and show that the model established in this paper can well reflect the time-varying period dynamic characteristics of the pigeon-like flapping-wing aircraft, and lays a foundation for the study of control laws and allocation algorithms on pigeon-like flapping-wing aircraft.

Keywords: flapping-wing aircraft; multi-rigid-body dynamics; linear time-varying periodic system; dynamics stability; control analysis

http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2021-03-22; **Accepted**: 2021-05-14; **Published online**: 2021-06-15 16:25

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210615.1536.007.html

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (20185702003)

* **Corresponding author**. E-mail: wangyanyang@buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0140

环肋翅片管相变传热特性及分形优化

王玮琦[1], 邢玉明[1], 郑文远[2], 郝兆龙[1,*]

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191; 2. 航空机电系统综合航空科技重点实验室, 南京 211106)

摘 要: 基于管壳式相变换热器,通过数值模拟方法研究了35号石蜡在矩形环肋翅片管外的融化传热特性,建立肋片单元三维模型研究热流体温度、肋片高度参数对传热过程的影响,并探究了分形结构翅片的优化传热性能。结果表明:矩形环肋翅片管外相变融化过程分为传热速率差异明显的3段,适用于不同功率需求;提高热流体入口温度和相变材料温差近似等比增强总传热功率;肋片高度由16 cm分别提高至12.5 cm、15 cm时,总融化时间分别缩短42.89%、71.96%,增强传热,但功率重量比降低;分形结构优化翅片总融化时间缩短41.95%,功率提高,为相变翅片管的优化设计提供参考。

关 键 词: 相变换热器; 数值模拟; 环肋翅片; 分形理论; 强化传热
中图分类号: TK124
文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2022)12-2520-09

基于相变材料的储能换热系统具有储能密度大、传热温度稳定、循环性能好等优点,被广泛应用在温度控制、余热回收、电子设备热控制领域[1]。目前,对相变储能换热系统的研究主要包括换热器结构、复合相变材料和相变强化传热等方面[2]。以有机类为代表的低温相变材料大多因导热系数较小的缺点影响传热性能[3]。为克服这一缺点,学者们提出了各种方法来提高相变换热器传热速率,如提高相变材料导热系数或扩大相变材料与热源的接触面积[4]。

复合相变材料相较于纯相变材料具备更高导热性能,因此广泛应用于相变传热领域。赵亮等[5-6]研究了纳米材料与泡沫金属复合相变材料的热物理性质。3% 石墨烯-磷(Gn-P)纳米复合相变材料相较于纯石蜡固相导热系数提高了48.6%,熔融时间缩短了69%。采用泡沫金属复合相变材料可以有效提高相变过程控温效果。Jun 等[7]研究了碳纤维复合相变材料在管壳式换热器中的应用,相较于纯石蜡使储能和释能时间缩短20%。

优化相变换热器的结构是另一种提高传热性能的有效方法。Gürel[8]研究了相变材料凝固过程中相变换热器的几何结构,通过结构优化使完全凝固时间缩短63%。尹点[9]对板式相变换热器进行研究,发现流体侧宽度与相变时间呈负相关,而相变材料侧宽度与相变时间呈正相关,存在等体积下的最优功率配置。董琼[10]针对中低温相变材料的应用,研究了3种换热器结构优化方法。

出于制造和实施方便性考虑,翅片结构是应用最广泛的扩展热交换面积方法[11]。Hosseinzadeh 等[12-13]研究了星形三角形翅片、V形翅片与纳米复合相变材料相结合对相变过程的强化效果,有效缩短了凝固时间。Khan 等[14]研究了纵向翅片对管壳式相变换热器传热性能的影响,并对传热功率进行了调节。Liu 等[15]研究了纵向三角形翅片结构参数对凝固性能的影响,改进后的翅片凝固时间比原翅片缩短了38.3%。欧阳梅[16]研究了翅片结构对相变过程对流效果的影

收稿日期: 2021-03-25; **录用日期**: 2021-05-14; **网络出版时间**: 2021-07-01 11:08
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210701.1015.001.html
基金项目: 航空科学基金 (20172851018)
* **通信作者**. E-mail: haozhaolong@buaa.edu.cn

引用格式: *王玮琦, 邢玉明, 郑文远, 等. 环肋翅片管相变传热特性及分形优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2520-2528. WANG W Q, XING Y M, ZHENG W Y, et al. Phase change heat transfer characteristics and fractal optimization of radial plate fin tube[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2520-2528(in Chinese).*

响,发现熔融过程中的对流效应显著促进传热,同时抑制了凝固过程。Li 等[17]研究了管翅式相变换热器的热管理性能,发现添加石墨烯粉末增强凝固功率。徐灏[18]设计十字分形翅片结构,对相变换热器传热性能进行优化。

本文旨在研究管壳式相变换热器中矩形环肋结构翅片管的相变融化传热特性,并提供基于分形理论进行翅片优化思路,为相变换热器的应用和优化设计提供参考;基于数值模拟方法对矩形环肋结构的相变换热器融化性能进行了探究,分析了热流体温度变化和翅片长度变化对融化性能的影响,为矩形环肋翅片管的设计应用提供参考;设计了分形结构翅片并利用数值模拟探究其传热强化效果,提供相变换热器翅片结构的优化方向。

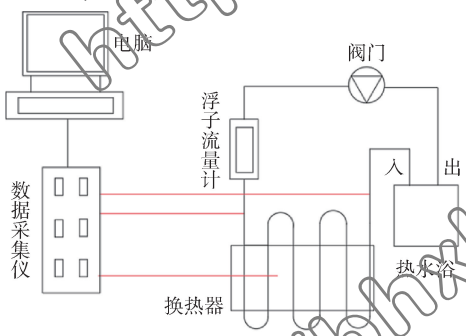
1　相变换热器实验

1.1　实验系统

实验系统如图 1 所示,系统主要包括带翅片的间壁管式换热器、温度控制系统、数据采集系统 3 部分。

间壁管式换热器中事先填充好作为相变材料的 35 号石蜡,热水浴提供作为热流体的热水,相变过程由热电偶采集温度变化,电脑记录时间、温度数据。

间壁管式相变储能换热器中 14 根铜管接头采用同样内径的弯曲铜管焊接,翅片使用铝箔。为便于观察,翅片管式换热器顶部采用聚碳酸酯



(a) 实验装置示意图



(b) 实验装置实物图

图 1　实验装置

Fig. 1　Experimental device

板固定,厚度为 5 mm。热流体管径为 9.52 mm,管间距为 25 mm,翅片厚度为 0.12 mm,翅片高度为 20 mm,翅片间距为 25 mm。聚碳酸酯板外用海绵包裹整个换热器,增大热阻,减小外部环境温度对换热器内部相变过程的影响。

温度控制系统包括恒温水浴槽、阀门、浮子流量计。管内热流体采用 70 ℃及附近温度区间的热水,使用恒温水浴槽进行加热。数据采集仪连接多个热电偶,并将热电偶测得温度数据传回电脑记录。热电偶布置在相变换热器指定位置,用于记录翅片附近相变材料侧温度和热流体进出口温度。

1.2　实验方案

实验开始,打开恒温水浴水泵,热流体从水泵流入换热器内,传热开始,形成水循环。布置在换热器进口的热电偶测到温度升高时,即为热流体流入换热器的时间,随后进行完整流程的温度时间测量记录,在相变材料完全相变后,停止恒温水浴水泵,水循环中止。待相变储能换热器中相变材料在室温下冷却凝固,将换热器和管内残留的水倒出,一个实验周期完成,可以调节入口温度和流量条件进行下一次实验。相变换热器中相变材料为 35 号石蜡,物性参数如表 1 所示。

表 1　35 号石蜡物性参数

Table 1　Physical properties of No. 35 paraffin

参数	数值
密度/(kg·m^{-3})	785
潜热值/(kJ·kg^{-1})	175.24
熔化温度/℃	35 ~ 37
导热系数/(W·(m·K)$^{-1}$)	0.3
比热容/(J·(kg·K)$^{-1}$)	2 850
黏度/(kg·(m·s)$^{-1}$)	0.000 365
热膨胀系数/K^{-1}	0.000 308 5

1.3　换热器储能性能实验

在相变材料不变的情况下可以通过改变换热器热流体进口温度的方式改变传热过程各段的热功率,为此进行不同热流体进口温度的实验,探究相变储能换热器性能。

如图 2 所示,将热流体温度从 70 ℃提高到 75 ℃、80 ℃得到换热器出口温度随时间变化的曲线。热流体通过换热器温度降低 20 ℃以上的时长从 70 ℃工况的 620 s 下降到 75 ℃工况的 570 s,再到 80 ℃工况的550 s。保持 20 ℃以上控温的换热器总传热功率从 70 ℃工况的 2.25 kW 变化到 75 ℃工况的 2.54 kW,再到 80℃工况的 2.74 kW。相变过程的速度随热流体温度升高而加快,传热增强、功率增加,总传热时间缩短。

http://bhxb.buaa.edu.cn

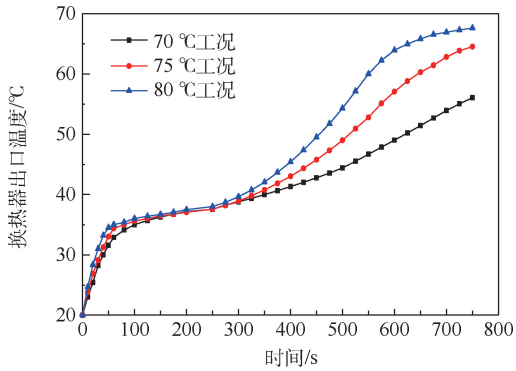


图 2 变工况热流体出口温度

Fig. 2 Outlet temperature of hot fluid under different working conditions

2 物理模型和数学模型

2.1 物理模型

管壳式相变储能换热器中肋片管模型如图 3 所示,换热器中管内流过热流体水,相变材料 35 号石蜡填充在肋片之间,并填满换热器外管壁与换热器外壳间的空隙。管道内径为 8.8 mm、厚度为 0.35mm,材料为铜;翅片高度为 20 mm,宽度为 25 mm,厚度为 0.12 mm,翅片间距为 2.5 mm,材料为铝。换热器总高度为 40 mm,即在肋片上方和肋片下方各有 10 mm 空隙,同样填充满相变材料。

由于换热管上的肋片分布在结构上具有周期性及对称性的特点,因此,可以选取图 3 中一个肋片单元作为研究对象进行模拟研究。

选取的物理模型参数与翅片管式换热器结构参数保持一致。根据管道分布的规律性,选择 2 个相邻翅片和之间填充相变材料的翅片间隙作为计算单元,这个单元可以近似表示管道区域。物理单元长度为 2.62 mm,宽度为 25 mm,高度为 40 mm。生成模型网格如图 4 所示。

为提高翅片表面网格的精度,采用适体坐标法和块结构化网格生成原理相结合的方法生成计算网格。肋片单元将整体 block 划分成 9 块,在中

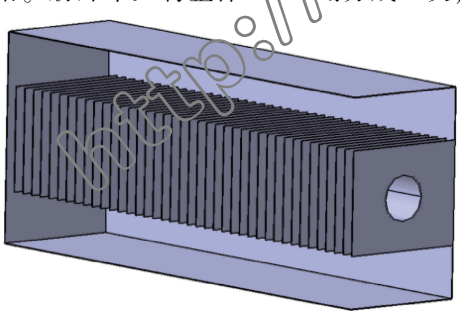


图 3 数值模拟的几何模型

Fig. 3 Geometric layout of simulated model

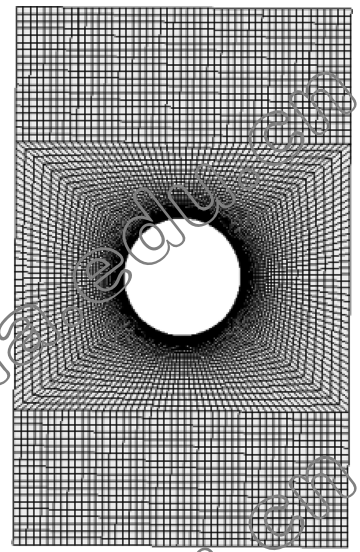


图 4 矩形翅片单元网格

Fig. 4 Rectangular fin cell grid

间 block 轴向方向平面为基创建 *o*-block,将 block 分别与肋片上方区域、肋片覆盖区域、肋片下方区域建立映射,运用块网格划分增高肋片模型网格质量。考虑到相变材料融化后因密度变化和重力影响会形成对流流动,于管壁形成边界层,传热问题的热边界层非常敏感,因此管壁进行网格加密。

换热器管壁设置为恒温壁面边界条件,温度为 70 ℃,材料为铜;换热器上下表面设置为绝热壁面条件;相邻肋片单元中心截面设置为对称面条件。翅片材料设置为铝,各面包裹的区域内为填充满的相变材料,初始温度均为 20 ℃。

2.2 数学模型

根据换热器结构尺寸和流体物性,假定液态相变材料的流动为非稳态、层流、不可压流动,液相相变材料为 Newton 流体,并且服从 Fourier 导热定律。数值模拟使用 Fluent 软件中的 Energy 和 Solidification/Melting 这 2 个模型来模拟工况,基于以上假设和翅片的传热传质理论,有温度梯度引起的浮升力计算引入 Boussinesq 假设,除计算浮升力时密度随温度变化以外,其他情况相变材料的物理参数不变。温度场求解使用焓法,建立固相和液相统一的能量方程,对流-扩散采用迎风格式,压力和速度耦合采用 SIMPLE 算法,能量方程采用二阶迎风算法,压力项采用 Presto 格式,松弛因子采用默认值。建立固相和液相统一的能量方程。

温度场求解使用焓法,建立固相和液相统一的能量方程,总焓值方程为

$$H = h + \Delta H \tag{1}$$

$$h = h_{\mathrm{ref}} + \int_{T_{\mathrm{ref}}}^{T} C_{\mathrm{p}} \mathrm{d}T \tag{2}$$

http://bhxb.buaa.edu.cn

式中：H 为总焓值；h 为焓值；h_{ref} 为基础温度焓值；C_p 为导热系数；ΔH 为相变焓值，该值随 PCM 固-液相变的过程变化，固态时为 0，液态时为潜热值 L；T 为温度；T_{ref} 为基础温度。

因此，引入液体百分数 β 来得到相变焓值：

$$\beta = \begin{cases} \dfrac{\Delta H}{L} = 0 & T \leqslant T_s \\ \dfrac{\Delta H}{L} = 1 & T \geqslant T_l \\ \dfrac{\Delta H}{L} = \dfrac{T - T_s}{T_l - T_s} & T_s < T < T_l \end{cases} \tag{3}$$

式中：T_s 为相变材料融化温度；T_l 为相变材料凝固温度。

焓法模型中系统的控制方程如下。

连续性方程：

$$\mathrm{div}\ U = 0 \tag{4}$$

能量方程：

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla(\rho U H) = \nabla(\lambda \nabla T) \tag{5}$$

动量方程：

$$\frac{\partial U}{\partial t} + (U \cdot \mathrm{grad})U = \mathrm{div}(\mu \cdot \mathrm{grad}\ U) - \frac{1}{\rho}\mathrm{grad}\ P + S_m + S_b \tag{6}$$

式中：U 为 PCM 液相区的流动速度，ρ 为 PCM 的密度；t 为时间；grad 为梯度；μ 为动力黏度；P 为压力；λ 为导热系数；S_m 为动量源项；S_b 为浮升力源项。

S_m 与 S_b 定义如下：

$$S_m = -\frac{A_{mush}(1-\beta^2)}{\rho(\beta^3 + \varepsilon)}U \tag{7}$$

$$S_b = -\frac{g\beta(h - h_{ref})}{C_p} \tag{8}$$

式中：A_{mush} 为糊状区系数，取值为 10^5；ε 为避免源项计算时分母出现 0 而引入的常数，取值 0.001。

2.3　模型验证与无关性分析

为验证 2.2 节中参数设置与模型的可靠性，需要通过实验与数值模拟的结果进行对比加以验证。通过 1.1 节中相变换热器实验台，对翅片管壳式相变换热器在热流体入口温度 70 ℃ 情况下进行融化相变实验，对最接近热流体入口的翅片单元热电偶测试数据和对应点数值模拟结果进行对比，结果如图 5 所示。

由图 5 可知，数值模拟的温度相较于实验结果较高，这是由于实验中存在边壁散热且数值模拟采用管壁恒温边界条件忽略了热流体和管壁热阻。在 900 s 内数值模拟结果相较实验误差小于 10%，曲线变化趋势基本吻合，验证了数值模拟结果的有效性，可以认为所选用的参数设置与模型是可靠的。

对三维模型分别以网格总数为 78 534、110 214、138 294、171 954、204 572 的 5 个方案进行模拟，如图 6 所示。随着网格密度的增加，相变材料完全融化时间呈现下降趋势，但在方案 2 后网格加密下降幅度不大。结合网格计算量和准确度的综合考虑，选择方案 3 作为网格密度方案。

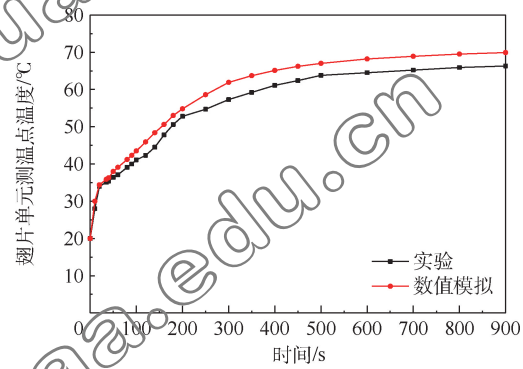


图 5　实验结果与数值模拟对比

Fig. 5　Comparison of experimental results and numerical simulation

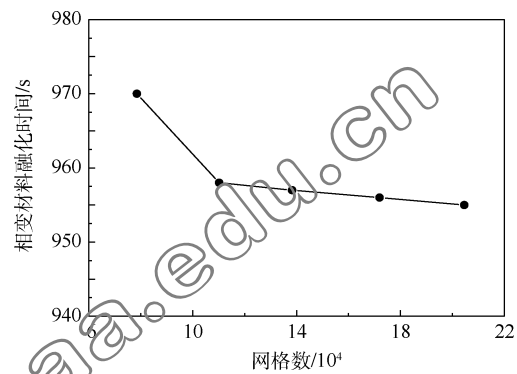


图 6　网格无关性分析

Fig. 6　Grid independence analysis

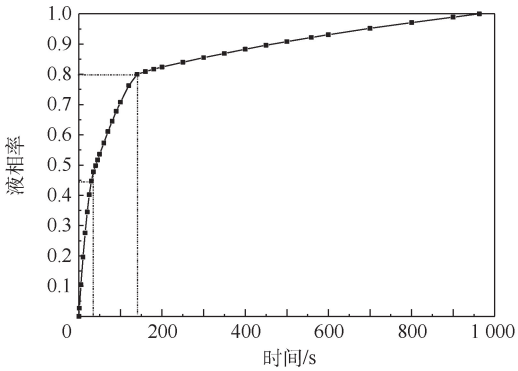
3　结果与分析

3.1　矩形环肋结构相变传热特性

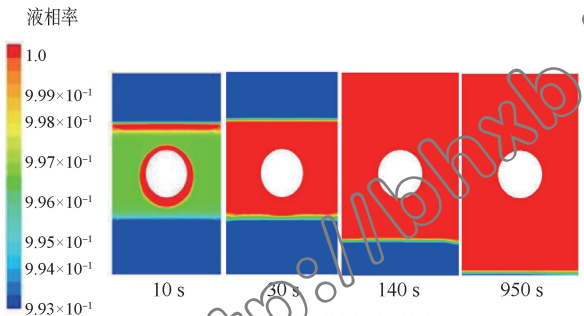
三维肋片模型将相变材料、铝箔翅片的初始温度设置为 25 ℃。管壁设置温度恒为 70 ℃。此时为工程预设工况，使用 Fluent 软件进行数值模拟计算。

对肋片管轴向中央横截面上的相变材料相态进行观察，由相变材料的液相率可以知道相变材料的融化情况，从而得知传热进行情况。相变材料液相百分数在图 7 中以颜色表示，深蓝色液相分数为 0，代表此时相变材料未发生固液相变，全部为固态石蜡。深红色液相分数为 1，代表此时相变材料全部相变为液态石蜡。

http://bhxb.buaa.edu.cn



(a) 翅片单元液相率曲线



(b) 翅片单元液相率云图

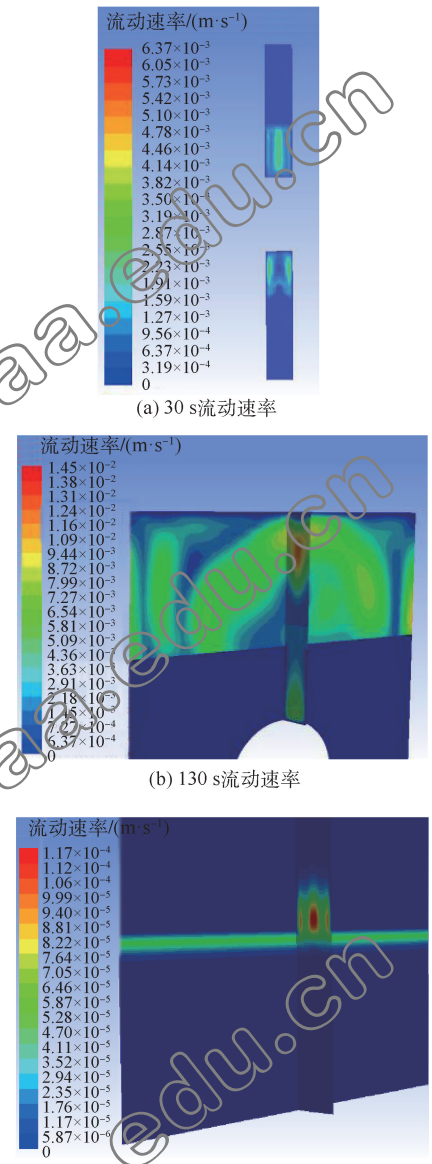
图 7 相变过程液相率云图

Fig. 7 Melting process of phase change reflected by liquid phase rate of PCM

如图 7 所示,肋片单元的传热过程可由 30,140,963 s 为边界划分为 3 个阶段,这 3 个阶段的划分标准为:第 1 阶段至肋片覆盖区域完全融化,第 2 阶段至肋片上方区域完全融化,第 3 阶段至肋片单元完全融化。30 s 时肋片覆盖区域的相变材料已经完全融化,而肋片上下方区域基本没有融化,此时是相变材料融化速度最快、传热速率最高的第 1 阶段。140 s 时肋片上方区域相变材料完全融化,而肋片下方区域融化速率远低于上方,是传热效果第 2 高的第 2 阶段。直到 963 s,肋片下方区域才完全融化,为第 3 阶段。

将肋片单元的融化过程按照传热功率差异分为肋片主导段、对流主导段和导热主导段 3 个阶段。对 3 个阶段在不同工况下的传热功率研究,能根据实际需求,更有效的利用翅片管融化特性。

如图 8 所示,30 s 时相变材料流动速率仅为 10^{-3} 量级,此阶段自然对流影响很小,以导热为主导,第 1 阶段的高传热性能是因为肋片结构增大传热面积。130 s 时在肋片上方区域,相变材料融化后液态相变材料相较于固态相变材料密度减小,受到重力影响形成浮升力,液态相变材料自近管壁的相变界面上浮,形成自然对流,在融化面上有一定的速度分布,最大速度达到 1.45×10^{-2} m/s,在此速率下自然对流传热效果较好。第 2 阶段虽然没有肋片结构直接接触增加传热面积,但因为



(a) 30 s流动速率

(b) 130 s流动速率

(c) 950 s流动速率

图 8 肋片单元相变材料速率云图

Fig. 8 Velocity cloud diagram of PCM in fin unit

自然对流效应依然有较高的传热性能。950 s 时在肋片下方区域相变材料融化后液体速度很小,仅因为浮升力作用在靠近肋片位置有 10^{-4} 量级的速度波动,其他区域速率接近 0,对流效应很弱。第 3 阶段为水平截面导热为主导的纯导热段,因此传热效率最低。

3.2 热流体温度对传热性能影响

改变热流体温度,不改变其他参数,由数值模拟得到管壁温度为 70 ℃、75 ℃、80 ℃这 3 种不同加热工况下相变过程各阶段时间。

如图 9 所示,热流体温度升高,温差增大,传热效果增强,在第 2 阶段、第 3 阶段都有明显的速度差异,整个换热器的控温时间也相应缩短。

当热流体温度从 70 ℃升高到 75 ℃、80 ℃,热流体温度与相变材料的温差从 35 ℃分别增长

http://bhxb.buaa.edu.cn

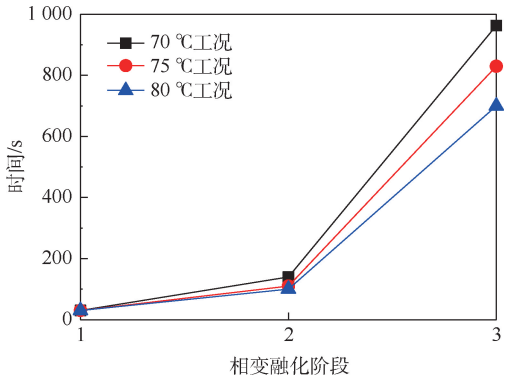


图 9　70 ℃、75 ℃、80 ℃工况 3 阶段时间曲线

Fig. 9　Three stages time curves of 70 ℃, 75 ℃, 80 ℃ working conditions

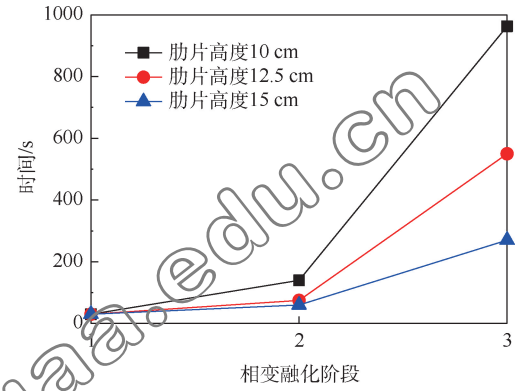


图 10　10 cm、12.5 cm、15 cm 肋片高度 3 阶段时间曲线

Fig. 10　Three stages time curve of fins height 10 cm, 12.5 cm, 15 cm

到 40 ℃、45 ℃,分别增长了 14.29%、28.57%。第 2 阶段的结束时间由 140 s 缩短为 110 s、100 s,分别缩短了21.43%、28.57%。在对流主导段,温差增大会较大提高传热速率,从增长比差异可知,传热效果的提升同时受浮升力的影响较大,而对流传热的速率受肋片结构限制。因此,在温差增大时,对流主导段传热时长会较快缩短到接近某一具体值。

第 3 阶段结束时间由 963 s 缩短为 830 s、700 s,分别缩短了 13.81%、27.31%。纯导热段的影响因素主要是温差,因此热流体温度升高,第 3 阶段时长近乎等比缩短。

根据不同热流体温度工况下,肋片单元各传热阶段的时间变化规律,不同热流体温度下传热速率高的第 1、第 2 阶段变化小,而总传热时长随温度升高近乎等比下降。在 120 s 内,热流体温度高于 75 ℃时,热流体温度对传热速率影响很小。提高热流体温度对完全融化时间影响效果在各温度情况一致。

3.3　肋片高度对传热性能影响

从工程实际考虑,肋片高度是最易改变的结构参数之一,只需要改变肋片尺寸即可按照原方式排列。同时,改变肋片高度也改变肋片上下空间比例,为研究矩形环肋结构传热性能提供参考。改变肋片高度,不改变其他参数,由数值模拟得到肋片高度 10,12.5,15 cm 这 3 种不同肋片结构下传热过程差异。

如图 10 所示,肋片高度增加而第 1 阶段的时间几乎不发生变化,这是因为第 1 阶段主导的传热方式为肋片与相变材料间的导热。肋片高度增加,肋片覆盖区域增大,增大了总传热功率,传热时间则大致不变,传热量大大增加。

肋片高度由 10 cm 增长到 12.5 cm、15 cm,未被肋片覆盖的区域面积分别减小了 25%、50%。第 2 阶段时间由 140 s 减小到 75 s、60 s,分别减小了 46.43%、57.14%。第 3 阶段时间由 963 s 减小到 550 s、270 s,分别减小了 42.89%、71.96%。因为随着肋片覆盖区域的增加,肋片覆盖区域的相变材料几乎同时进行相变,相变材料密度变化迅速,浮升力加剧,对流传热增强,肋片下方区域也受到了对流影响,因此,第 2 阶段和第 3 阶段传热时间都大大缩短。

单位功率体积比由 124 632 kJ/m^3 降至 122 998 kJ/m^3、120 797 kJ/m^3,分别下降了 1.3%、3.1%,单位功率体积比下降不大。当任务需求固定容积内增大传热功率时,增高肋片强度相当有效。单位功率重量比由 145.50 kJ/kg 降至 139.86 kJ/kg、134.33 kJ/kg,分别下降了 3.9%、7.7%,使用增加翅片高度的方式增加对流强度,单位功率重量比也会相应提升,在对重量要求高的场合可能会受到限制。

3.4　分形翅片传热性能分析

在矩形环肋翅片结构基础上,文献[18]以分形理论为指导设计了十字分形结构翅片,按照下一级长度与上一级长度比为 0.5、下一级宽度与上一级宽度比为 0.9 设置了带有正方形孔洞的十字一级分形翅片,保持翅片厚度和翅片总体积与矩形翅片相同,探究等体积储能密度下,应用分形结构的传热性能。

对十字分形翅片结构单元进行了数值模拟探究其相变传热性能并和矩形翅片单元进行对比。使用 Icem 绘制网格如图 11 所示,边界条件和初始条件与 70 ℃工况矩形翅片相同。

分形翅片单元和矩形翅片单元的相变融化过程液相率变化如图 12 所示。第 1 阶段矩形翅片传热功率略高于分形翅片,这是由于矩形翅片没有孔洞,靠近管壁的翅片更紧凑,翅片区域导热率更高,在导热主导的第 1 阶段功率更大。第 1 阶

http://jdxzb.buaa.edu.cn
http://bhxb.buaa.edu.cn
http://bhxb.buaa.edu.cn

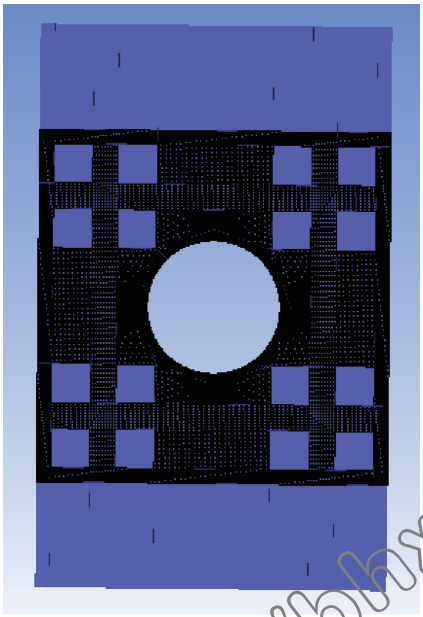


图 11 十字分形翅片单元网格

Fig. 11 Cross fractal fin element mesh

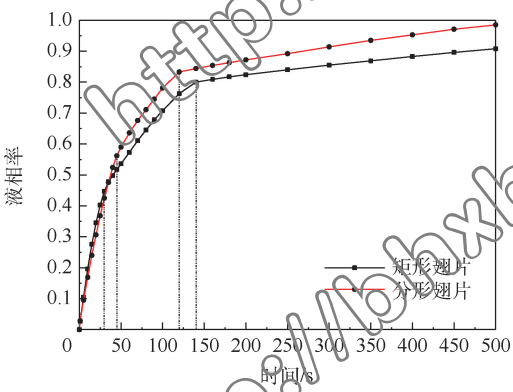


图 12 翅片单元液相率随时间变化曲线

Fig. 12 Liquid phase rate changes with time

段的持续时间分形翅片为 45 s 相较矩形翅片单元更长,且相变材料液相率为 0.562 相较矩形翅片单元更多,这是因为分形翅片的覆盖面积更大,翅片导热传递范围更广,融化的相变材料更多。此时分形翅片结构相较于矩形翅片结构没有融化性能优势。

第 2 阶段分形翅片传热速率明显高于矩形翅片,原因可能为分型翅片结构在第 1 阶段液相率更高,且分形翅片结构肋片上方面积更小,因此自然对流效应更强,翅片上方区域融化速率增高。分型翅片单元第 2 阶段结束时间为 120 s、持续时间为 75 s,为矩形翅片单元第 2 阶段时间的 68.2%,此时分形翅片单元液相率为 0.833,而矩形翅片单元液相率为 0.763。分型翅片结构在第 2 阶段的融化速率更高,持续时间更短,相较于矩形翅片表现出了传热性能优势。

第 3 阶段分形翅片相较于矩形翅片融化速率更高,更快完成相变过程,融化总时长更短。分型翅片单元最终全部融化时间为 559 s,相较于矩形翅片单元总融化时间缩短 41.95%,分形翅片结构在总融化时间上有明显的优化效果。

4 结 论

通过实验和数值模拟,研究了环肋翅片管相变传热特性及分形结构翅片的优化传热性能。主要结论如下:

1)相变换热器中提高热流体温度,增强传热,储能功率增加,总传热时间缩短。

2)矩形环肋翅片单元相变材料融化可分为肋片主导段、对流主导段和导热主导段 3 个阶段,完全融化时间分别为 15,140,950 s,传热效率依次降低。

3)热流体温度由 70℃升至 75 ℃、80 ℃,相变单元完全融化时间分别缩短 13.81%、27.31%,接近等比缩短,温差大于 40 ℃后,提高温度对相变过程的促进效率效果降低。

4)肋片高度由 10 cm 增长到 12.5 cm、15 cm,相变单元完全融化时间分别缩短 42.89%、71.96%。使用增加翅片高度方式可在固定容积内增大传热功率,但在对重量要求高的场合可能会受到限制。

5)优化后的分形翅片结构在肋片主导段传热较弱,之后均优于矩形翅片结构,总融化时间缩短 41.95%。提供了相同功率重量比下相变换热器翅片结构的优化方向。

分形理论优化翅片结构增强传热性能、提高温度均匀性的潜力有进一步研究价值。

参考文献(References)

[1] MAZHAR A R, SHUKLA A, LIU S L. Numerical analysis of rectangular fins in a PCM for low-grade heat harnessing[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2020, 152: 106306.

[2] MILLS A, FARID M, SELMAN J R, et al. Thermal conductivity enhancement of phase change materials using a graphite matrix [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(14-15): 1652-1661.

[3] SHAIKH S, LAFDI K. Effect of multiple phase change materials (PCMs) slab configurations on thermal energy storage[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(15-16): 2103-2117.

[4] TAO Y B, HE Y L. A review of phase change material and performance enhancement method for latent heat storage system [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 93: 245-259.

[5] 赵亮,邢玉明,吕倩,等. 纳米复合相变材料熔化过程数值模拟[J]. 北京航空航天大学学报,2018,44(9):1860-1868.
ZHAO L, XING Y M, LYU Q, et al. Numerical simulation of melting process of nanoparticle-enhanced phase change materials[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astro-

http://bhxb.buaa.edu.cn

nautics,2018,44(9):1860-1868(in Chinese).

[6] 赵亮,邢玉明,刘鑫,等. 基于硬脂酸复合相变材料的被动热沉性能[J]. 北京航空航天大学学报,2019,45(5):970-979.
ZHAO L,XING Y M,LIU X,et al. Performance of a passive heat sink using stearic acid based composite as phase change material[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2019,45(5):970-979(in Chinese).

[7] JUN F K,HAMADA Y,MOROZUMI Y,et al. Improvement of thermal characteristics of latent heat thermal energy storage units using carbon-fiber brushes: Experiments and modeling [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2003,46(23):4513-4525.

[8] GÜREL B. Thermal performance evaluation for solidification process of latent heat thermal energy storage in a corrugated plate heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering,2020,174:115312.

[9] 尹点. 板片式相变储能换热器的数值模拟及其实验研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2017:17-39.
YIN D. A numerical simulation and experimental investigation of a plate-type phase change energy storage heat exchanger [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2017:17-39(in Chinese).

[10] 董琼. 中低温相变材料的储热结构分析与数值模拟[D]. 武汉:武汉理工大学,2014:20-59.
DONG Q. Structural analysis and numerical simulation of thermal storage equipment on mid-low temperature phase change material[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2014: 20-59(in Chinese).

[11] ERMIS K,EREK A,DINCER I. Heat transfer analysis of phase change process in a finned-tube thermal energy storage system using artificial neural network[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2007,50(15-16):3163-3175.

[12] HOSSEINZADEH K,MOGHADDAM M A E,ASADI A,et al. Effect of internal fins along with hybrid nano-particles on solid process in star shape triplex latent heat thermal energy storage system by numerical simulation[J]. Renewable Energy,2020, 154:497-507.

[13] ALIZADEH M,HOSSEINZADEH K,SHAHAVI M H,et al. Solidification acceleration in a triplex-tube latent heat thermal energy storage system using V-shaped fin and nano-enhanced phase change material [J]. Applied Thermal Engineering, 2019,163:168-173.

[14] KHAN Z,KHAN Z A. An experimental investigation of discharge/solidification cycle of paraffin in novel shell and tube with longitudinal fins based latent heat storage system[J]. Energy Conversion and Management,2017,154:157-167.

[15] LIU S,PENG H,HU Z W,et al. Solidification performance of a latent heat storage unit with innovative longitudinal triangular fins[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2019, 138:667-676.

[16] 欧阳梅. 针翅管式相变蓄热换热性能的数值模拟[D]. 重庆:重庆大学,2009:22-34.
OUYANG M. Numerical simulation on heat transfer performance of pin-finned tube phase change heat storage unit [D]. Chongqing: Chongqing University,2009:22-34(in Chinese).

[17] LI D,YANG C X,YANG H. Experimental and numerical study of a tube-fin cool storage heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering,2019,149:712-722.

[18] 徐灏. 分形结构换热器中 PCM 熔化传热特性研究[D]. 苏州:苏州科技大学,2019:12-21.
XU H. Study on heat transfer characteristics of PCM melting in a fractal heat exchanger[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology,2019:12-21(in Chinese).

http://bhxb.buaa.edu.cn

Phase change heat transfer characteristics and fractal optimization of radial plate fin tube

WANG Weiqi[1], XING Yuming[1], ZHENG Wenyuan[2], HAO Zhaolong[1,*]

(1. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aero Electromechanical System Integration, Nanjing 211106, China)

Abstract: Based on the shell and tube phase change heat exchanger, the melting heat transfer characteristics of 35 paraffin outside the rectangular radial plate fin tube were studied by numerical simulation method. The three-dimensional model of fin element was established to study the influence of thermal fluid temperature and fin height parameters on the heat transfer process, and the heat transfer performance of optimal fractal fin was explored. The results show that the melting process can be divided into three stages with different heat transfer rates, which are suitable for different power requirements. Increasing the inlet temperature of the hot fluid and the temperature difference of the phase change material can enhance the total heat transfer power approximately in equal proportion. When the fin height is increased from 10 cm to 12.5 cm and 15 cm, the total melting time is reduced by 42.89% and 71.96%, and the heat transfer is enhanced, but the power to weight ratio is reduced. The total melting time is reduced by 41.95% with fractal structure optimization and the power is increased, which provides a reference for the optimal design of phase change finned tube.

Keywords: phase change heat exchanger; numerical simulation; radial plate fin; fractal theory; enhanced heat transfer

http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2021-03-25; **Accepted**: 2021-05-14; **Published online**: 2021-07-01 11:08
URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210701.1015.001.html
Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (20172851018)
* **Corresponding author**. E-mail: haozhaolong@buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0145

基于 PCC-LSTM 模型的短期负荷预测方法

刘倩倩[1], 刘钰山[1,*], 温烨婷[2], 何杰[1], 李晓[1], 毕大强[2]

(1. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191;
2. 清华大学 电机系, 北京 100084)

摘 要: 短期负荷预测是电网合理调度和平稳运行的基础。为提高短期负荷预测精度,提出了一种基于 Pearson 相关系数(PCC)和长短期记忆(LSTM)神经网络的短期负荷预测方法。该方法运用 Pearson 相关性分析对原始多维输入变量组成的时间序列进行相关性分析,选取与电力负荷数据相关性较大的影响因素作为输入量,实现原始数据的降维和选优;再通过 LSTM 神经网络结合 Adam 优化算法,对与电力负荷相关性较大的影响因素和负荷实际输出序列之间的非线性关系建立网络模型。以嘉捷 BOX 和重庆丽苑维景国际大酒店的负荷数据作为实际算例,并与 Prophet、LSTNet、门控循环(GRU)神经网络模型方法进行对比。结果表明:所提 PCC-LSTM 模型预测精度均在 91% 以上,最高可达 95.44%,有效提高了负荷预测的精度。

关 键 词: Pearson 相关系数; 长短期记忆神经网络; 负荷预测; Adam 算法; 时间序列
中图分类号: V247; TP183
文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2022)12-2529-08

由于电能难以大量存储及负荷需求时变等特点,要求发电、输电、用电要时刻保持动态平衡。电力负荷预测准确率的提高有助于保证电力系统安全可靠运行和提高发电机组的利用率[1],根据预测时间长度分为超短期负荷预测、短期负荷预测、中期负荷预测和长期负荷预测[2]。超短期负荷预测是对当前时刻后的有限时刻进行预测,主要用于实时调度;短期负荷预测是对一天中的每个时刻进行预测,主要用于制定发电日计划;中期负荷预测是对月度负荷进行预测,主要用于月度检修;长期负荷预测是对年度负荷进行预测,主要用于年度检修。

电力系统短期负荷预测是一种基于历史的负荷数据,充分考虑系统的运行特性、天气状况、经济发展情况、工作日和节假日等影响因素,来预测未来一天内的电力负荷用电情况[3]。负荷数据的精准预测有利于改善电力系统的运行规划和实时调度,对电力系统的稳定性大有裨益[4]。

目前,对电力负荷的短期预测方法主要分2类:传统预测方法和机器学习方法[5]。传统预测方法有回归分析法[6-8]、灰色模型法[9-10]、模糊预测法[11]、自回归积分滑动平均模型[12-13]等。这些方法简单、速度快,但多是基于线性关系模型,反映非线性关系的能力有限。机器学习方法有随机森林[14]、支持向量机[15]、专家系统[16]、人工神经网络预测法[17]、深度学习法[18]等。人工神经网络预测法中的长短期记忆(long and short term memory, LSTM)神经网络擅于处理序列型数据,

收稿日期: 2021-03-25; **录用日期**: 2021-07-03; **网络出版时间**: 2021-07-14 11:10
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210714.1004.002.html
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(KG16076201); 电力系统及大型发电设备安全控制和仿真国家重点实验室开放课题(SKLD20M05)
* **通信作者**. E-mail: yushan_liu@buaa.edu.cn

引用格式: 刘倩倩, 刘钰山, 温烨婷, 等. 基于 PCC-LSTM 模型的短期负荷预测方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2529-2536. LIU Q Q, LIU Y S, WEN Y T, et al. Short-term load forecasting method based on PCC-LSTM model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2529-2536(in Chinese).

可以有效减小负荷预测模型需要的数据量维度，充分挖掘时序数据间的内在关系，相较于其他的机器学习算法有较高的准确性。

LSTM 神经网络基于循环神经网络(recurrent neural network, RNN)，通过增加遗忘门、输入门和输出门，有效解决了梯度爆炸和梯度消失的问题。在电力负荷预测中，LSTM 神经网络取得了一定的成果。文献[19]建立了基于 Attention-LSTM 的短期负荷预测模型计算用电量预测值。文献[20]构建了 3 层 LSTM 深度学习负荷预测模型用于预测电力负荷。文献[21]提出了一种深度双向长短期记忆(deep bidirectional long and short term memory, DBiLSTM)和多元线性回归(multiple linear regression, MLR)组合预测模型。文献[22]提出了一种小波分解-最小二乘支持向量机长短期记忆(wavelet deromposition-least squares support vector machine-LSTM, WD-LSSVM-LSTM)神经网络组合模型预测短期负荷。文献[19-22]研究均采用 LSTM 神经网络训练数据，但在选择输入量时，不是未根据影响因素和电力负荷数据的相关关系选择更合适的影响因素作为输入量，就是对输入量的处理过于繁琐。

为提高负荷预测的准确率，本文提出了一种基于 Pearson 相关系数-LSTM(Pearson correlation coefficient-LSTM, PCC-LSTM)模型的多因素短期负荷预测方法。首先对各类影响因素做 Pearson 相关性分析，确定与电力负荷变化的相关程度，选出合适的负荷预测参数作为 LSTM 神经网络的输入量，然后将其输入到由 LSTM 网络层和全连接层构成的模型中进行预测。由于使用了 Pearson 相关性分析方法，PCC-LSTM 模型有效增强了输入数据与预测数据之间的相关性，可以显著降低负荷预测误差。

1 基本原理

1.1 Pearson 相关系数

PCC 是为了分析 2 个变量间的相关程度。2 个任意变量 X、Y 间的 PCC 可表示为

$$\rho_{X,Y}=\frac{E(XY)-E(X)E(Y)}{\sqrt{E(X^2)-(E(X))^2}\sqrt{E(Y^2)-(E(Y))^2}} \tag{1}$$

式中：$\rho_{X,Y}$ 为变量 X、Y 的相关性系数；E 为样本的数学期望。

当 X、Y 两变量无关时，PCC 为 0；当 X、Y 两变量负相关时，PCC 在 $-1\sim0$ 之间；当 X、Y 两变量正相关时，PCC 在 $0\sim1$ 之间。变量的相关程度由相关系数的绝对值表征，绝对值越大相关性越强，具体的系数范围和相关程度如表 1 所示。

表 1 相关系数范围

Table 1 Range of correlation coefficients

相关程度	系数范围
无关	0~0.2
弱相关	0.2~0.5
强相关	0.5~1

1.2 LSTM 神经网络模型

LSTM 神经网络是一种改进的 RNN，通过精巧的网络结构设计，可以学习时间序列中的长短期依赖信息。其网络结构如图 1 所示。

LSTM 神经网络结构包括遗忘门、输入门和输出门。遗忘门决定当前细胞需要遗忘的部分，输入门决定当前细胞需要保留的向量，输出门决定当前细胞的输出内容，如式(2)~式(7)所示[23]：

$$\boldsymbol{f}_t=\sigma(\boldsymbol{W}_{fx}\boldsymbol{x}_t+\boldsymbol{W}_{fh}\boldsymbol{h}_{t-1}+\boldsymbol{b}_f) \tag{2}$$

$$\boldsymbol{i}_t=\sigma(\boldsymbol{W}_{ix}\boldsymbol{x}_t+\boldsymbol{W}_{ih}\boldsymbol{h}_{t-1}+\boldsymbol{b}_i) \tag{3}$$

$$\boldsymbol{g}_t=\tanh(\boldsymbol{W}_{gx}\boldsymbol{x}_t+\boldsymbol{W}_{gh}\boldsymbol{h}_{t-1}+\boldsymbol{b}_g) \tag{4}$$

$$\boldsymbol{o}_t=\sigma(\boldsymbol{W}_{ox}\boldsymbol{x}_t+\boldsymbol{W}_{oh}\boldsymbol{h}_{t-1}+\boldsymbol{b}_o) \tag{5}$$

$$\boldsymbol{S}_t=\boldsymbol{g}_t\odot\boldsymbol{i}_t+\boldsymbol{S}_{t-1}\odot\boldsymbol{f}_t \tag{6}$$

$$\boldsymbol{h}_t=\tanh(\boldsymbol{S}_t)\odot\boldsymbol{o}_t \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{f}_t$、$\boldsymbol{i}_t$ 和 $\boldsymbol{o}_t$ 分别为遗忘门、输入门和输出门；$\boldsymbol{x}_t$、$\boldsymbol{g}_t$、$\boldsymbol{h}_t$ 和 $\boldsymbol{S}_t$ 分别为输入量、输入节点、中间输出和状态记忆单元；$\boldsymbol{W}_{fx}$、$\boldsymbol{W}_{fh}$、$\boldsymbol{W}_{ix}$、$\boldsymbol{W}_{ih}$、$\boldsymbol{W}_{gx}$、$\boldsymbol{W}_{gh}$、$\boldsymbol{W}_{ox}$ 和 $\boldsymbol{W}_{oh}$ 分别为对应门的矩阵权重；$\boldsymbol{b}_f$、$\boldsymbol{b}_i$、$\boldsymbol{b}_g$、$\boldsymbol{b}_o$ 分别为对应门的偏置；$\odot$ 为矩阵的哈达玛积；σ 为 sigmoid 激活函数，可以表示为

$$\sigma(x)=\frac{1}{1+\mathrm{e}^{-x}} \tag{8}$$

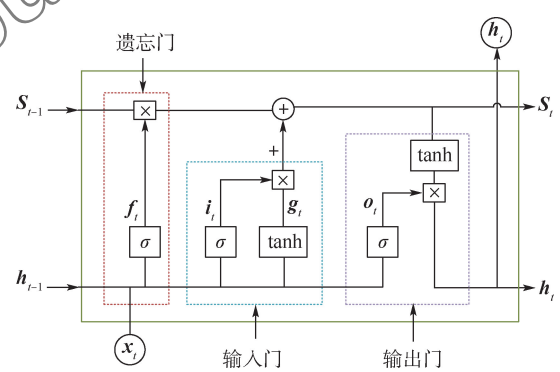


图 1 LSTM 神经网络结构

Fig. 1 Structure diagram of LSTM neural network

2 PCC-LSTM 模型

2.1 PCC-LSTM 模型结构

图 2 为 PCC-LSTM 模型结构。PCC-LSTM 模

http://bhxb.buaa.edu.cn

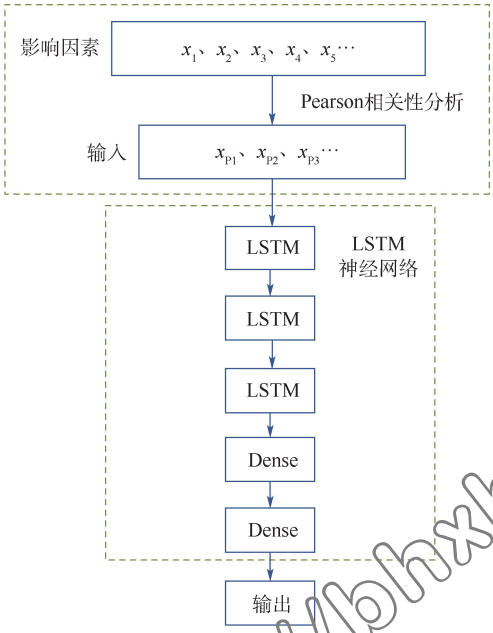


图 2　PCC-LSTM 模型

Fig. 2　PCC-LSTM model

型主要包括 2 部分，Pearson 相关性分析主要负责选取合适的影响因素作为输入量，LSTM 神经网络主要负责负荷预测。采用给出的数据，对影响因素做 Pearson 相关性分析，初步判断所选取的因素是否会真正对负荷用电量产生影响。

通过增加 LSTM 的层数来增加预测模型的深度可以增强预测能力，故本文的预测模型包括 3 个LSTM 网络层。在每个 LSTM 网络层后采用 Dropout 方法防止模型过拟合。在 LSTM 后加一个全连接层（Dense），该全连接层可以汇集不同时间段的历史数据对预测点的影响，对影响进行综合后，最终再通过一个全连接层输出，得到预测日 24 个时间点的电力负荷用电量。

2.2　损失函数

模型训练过程中，使用 Adam 优化算法更新神经元的权重项矩阵和偏置项矩阵，寻找损失函数的最小值[24]。采用均方误差函数为

$$F_{\text{loss}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\boldsymbol{X}_{\text{act}}(t) - \boldsymbol{X}_{\text{pred}}(t))^2 \tag{9}$$

式中：n 为样本个数；$\boldsymbol{X}_{\text{act}}(t)$ 和 $\boldsymbol{X}_{\text{pred}}(t)$ 分别为样本数据的实际值和预测值。

2.3　实验评价指标

使用平均绝对百分比误差 y_{MAPE} 和均方根误差 y_{RMSE} 两项指标来评估预测模型，表达式如下：

$$y_{\text{MAPE}} = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}\left|\frac{\boldsymbol{X}_{\text{act}}(t) - \boldsymbol{X}_{\text{pred}}(t)}{\boldsymbol{X}_{\text{act}}(t)}\right| \times 100\% \tag{10}$$

$$y_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{n}(\boldsymbol{X}_{\text{act}}(t) - \boldsymbol{X}_{\text{pred}}(t))^2}{n}} \tag{11}$$

y_{MAPE} 可以评估模型精度，y_{RMSE} 可以表现预测的精度。y_{RMSE} 的数量级会跟随电力负荷值的数量级变化，是相对值指标。y_{MAPE} 和 y_{RMSE} 的值越小，表明误差越小，负荷预测效果越好。

3　算例分析

3.1　数据预处理

实验基于嘉捷 BOX 和重庆丽苑维景国际大酒店这 2 个实际电力负荷的数据集，将所提的 PCC-LSTM 与 Prophet、LSTNet、门控循环（gate recurrent unit，GRU）神经网络模型方法所得结果进行对比。Prophet 是对负荷数据进行拟合的时间序列模型[25]；LSTNet 是针对多变量时间序列预测的深度学习网络，其模型综合了长期模式和短期模式[26]；GRU 是基于 LSTM 网络模型结构进行优化[27]。

2 个电力负荷数据集均提供了电力负荷数据、工作日信息、节假日信息、天气信息、温度数据和湿度数据，一天采集 24 个点，时间间隔为 1 h。以 2020 年 11 月的数据作为训练数据集，2020 年 12 月的数据作为测试数据集。对于存在的数据丢失问题，取附近前后各 2 个相似日数据的均值进行填补；对于突然变得异常大和突然变为 0 的数据，根据此数据所处时间前后时间段的数据及相似日的数据合理给出数据进行替换。采用 min-max 标准化方法将原始数据归一化到[0，1]之间。对工作日、节假日和天气等影响因素做量化处理，如对于节假日，节假日的预测日置 1，否则置 0。

对各种影响因素做 Pearson 相关性分析，选取其中与电力负荷用电量数据相关性较大的影响因素作为预测模型的输入参数。根据 Pearson 相关性分析方法，对于嘉捷 BOX 2020 年 11 月至 12 月的数据，采用 SPSS 23.0 对 5 个影响因素和电力负荷用电量做 Pearson 相关性分析，结果如表 2 所示。

基于表 2 的分析结果，选取 3 个会对嘉捷 BOX 造成明显影响的因素：湿度、工作日、温度。

表 2　嘉捷 BOX 影响因素相关性分析

Table 2　Correlation analysis of influencing factors of Jiajie BOX

影响因素	工作日	节假日	天气	温度	湿度
用电量相关性	0.320**	—	−0.027 3	−0.222**	−0.372**

注：“**”在 0.01 级别（双尾），相关性显著；“—”由于至少有一个变量为常量，因此无法进行计算。

http://bhxb.buaa.edu.cn

因此输入数据 $\boldsymbol{x}$ 主要由以下特征组成:历史负荷、湿度、工作日、温度。由于待预测日的负荷数据与前一天负荷具有很大的相关性,选取前一天每小时(共 24 h)的特征数据作为输入,待预测日24 h的电力负荷值为输出。

重庆丽苑维景国际大酒店 Pearson 相关性分析结果如表 3 所示。基于此分析结果,选取了1 个会对重庆丽苑维景国际大酒店造成显著影响的因素:湿度。因此输入数据 $\boldsymbol{x}$ 主要由以下特征组成:历史负荷、湿度。类似,选取前一天每小时(共 24 h)的特征数据作为输入,待预测日 24 h 的电力负荷值为输出。

表 3 重庆丽苑维景国际大酒店影响因素相关性分析

Table 3 Correlation analysis of influencing factors of Chongqing International Grand Metropark Liyuan Hotel

影响因素	工作日	节假日	天气	温度	湿度
用电量相关性	-0.022 7	—	-0.089**	0.100**	-0.313**

注:"**"在 0.01 级别(双尾),相关性显著;"—"由于至少有一个变量为常量,因此无法进行计算。

3.2 实验设置

实验使用的是 64 位 Windows10 版本系统的计算机。在此操作系统上,利用 PyCharm Professional Version 2020.3.1 和 Anaconda3 开发环境,使用基于 Keras 深度学习工具的 Tensorflow 框架搭建模型。Keras 库具有模块化的特点,支持神经网络层的自由组合和层层叠加。Prophet 模型调用 Facebook 开源的 fbprophet 包。

3.3 嘉捷 BOX 实验结果分析

PCC-LSTM 模型参数调优采用控制变量法。经实验发现,模型训练初期,预测精度随 LSTM 神经网络层数的增加而提高,但当 LSTM 网络层增加到 3 层时预测精度降低,表示预测模型对训练数据过拟合。因此选择 LSTM 网络层数为 3 层,各层神经元数量均为 500,Dropout 为 0.5,在 LSTM 后加入一个全连接层,神经元数量为 100,迭代次数为 800,学习率为 0.001。

以嘉捷 BOX 2020 年 11 月的数据作为训练集,2020 年 12 月的数据作为测试集,对测试集的电力负荷日用电量进行预测。

图 3 ~ 图 6 为 PCC-LSTM 模型 2020 年 12 月 1 日至 4 日连续 4 日的负荷预测结果,每 1 h 为 1 个时间采样点。对 PCC-LSTM 模型连续 4 日的预测结果计算平均绝对百分比误差 y_{MAPE} 和均方根误差 y_{RMSE},结果如表 4 所示。

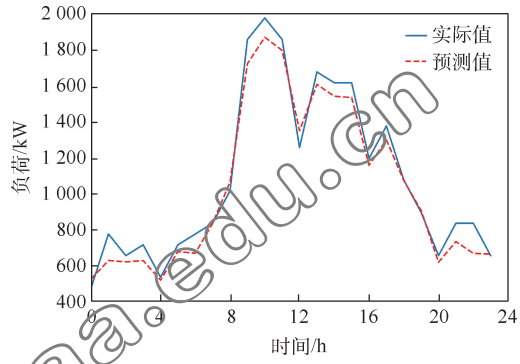


图 3 嘉捷 BOX PCC-LSTM 模型 2020 年 12 月 1 日预测结果

Fig. 3 Predicted curve of PCC-LSTM model of Jiajie BOX on December 1, 2020

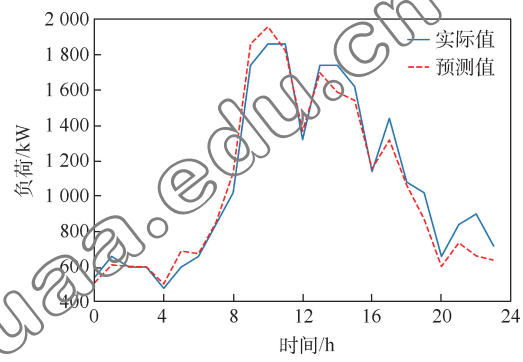


图 4 嘉捷 BOX PCC-LSTM 模型 2020 年 12 月 2 日预测结果

Fig. 4 Predicted curve of PCC-LSTM model of Jiajie BOX on December 2, 2020

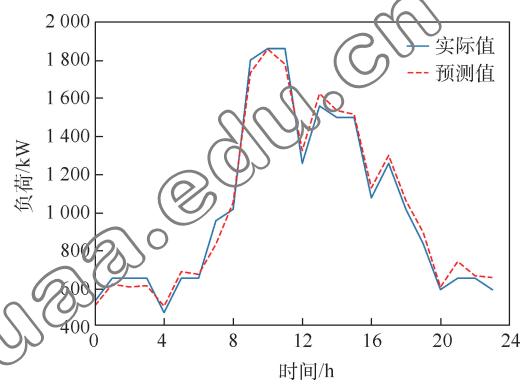


图 5 嘉捷 BOX PCC-LSTM 模型 2020 年 12 月 3 日预测结果

Fig. 5 Predicted curve of PCC-LSTM model of Jiajie BOX on December 3, 2020

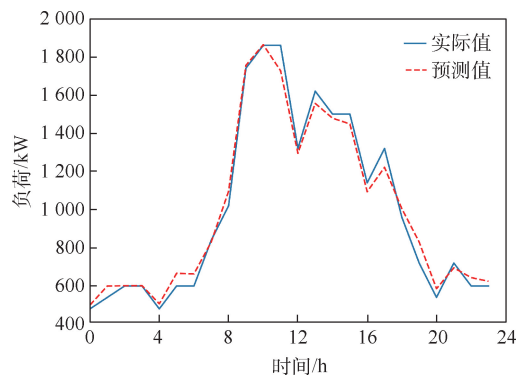


图 6 嘉捷 BOX PCC-LSTM 模型 2020 年 12 月 4 日预测结果

Fig. 6 Predicted curve of PCC-LSTM model of Jiajie BOX on December 4, 2020

http://bhxb.buaa.edu.cn

表 4　嘉捷 BOX PCC-LSTM 模型预测结果 y_{MAPE} 和 y_{RMSE} 对比

Table 4　Comparison of y_{MAPE} and y_{RMSE} of prediction results with PCC-LSTM model of Jiajie BOX

日期	y_{MAPE}/%	y_{RMSE}
2020 年 12 月 1 日	6.086	70.302
2020 年 12 月 2 日	5.402	77.228
2020 年 12 月 3 日	4.781	56.796
2020 年 12 月 4 日	4.892	49.412

从表 4 可以看出，PCC-LSTM 模型的预测误差在 4.78% ~6.09%，预测精度在 93.91% ~95.22%，取得了较好的预测效果。

表 5 为 2020 年 12 月 3 日的电力负荷用电量 Prophet、LSTNet、GRU 和 PCC-LSTM 这 4 种预测模型训练结果对比。可知，PCC-LSTM 模型的预测误差更小，预测精度更高，达到了 95.44%，y_{MAPE} 相比其他 3 种方法分别降低了 22.37%、6.94%、3.02%；y_{RMSE} 分别降低了 194.93、99.37、50.07。PCC-LSTM 模型与其他 3 种方法相比，在平均绝对百分比误差 y_{MAPE} 和均方根误差 y_{RMSE} 上均取得了较好的效果，预测误差更小。同时，由表 5 可以看出，Prophet 用时最短，LSTNet 用时最长，PCC-LSTM 模型用时略长于 GRU，而 Prophet 的高计算效率以低预测精度为代价，PCC-LSTM 模型在增加了 PCC 环节提高精度的情况下，计算效率与 GRU 相当。

嘉捷 BOX 2020 年 12 月 3 日电力负荷用电量的实际值和 4 种模型的预测结果对比如图 7 所示。

表 5　不同方法嘉捷 BOX 日负荷预测结果比较

Table 5　Comparison of results of daily load forecasting by different methods of Jiajie BOX

模型/方法	y_{MAPE}/%	y_{RMSE}	计算时间/h
Prophet	26.931	249.61	0.02
LSTNet	11.497	154.051	20.16
GRU	7.583	104.751	1.56
PCC-LSTM	4.562	54.685	2

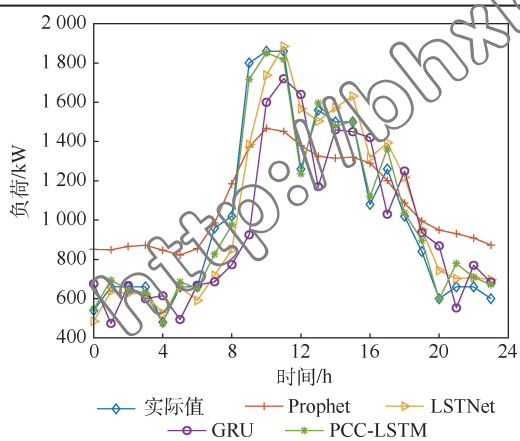


图 7　嘉捷 BOX 2020 年 12 月 3 日负荷预测结果对比

Fig. 7　Comparison of load forecasting results of Jiajie BOX on December 3, 2020

由图 7 可知，PCC-LSTM 模型对电力负荷用电量数据进行了较好的拟合，几乎完全和电力负荷用电量实际值重合，有效预测了负荷未来用电量的变化趋势，精准地把握了负荷变化的内在规律。

3.4　重庆丽苑维景国际大酒店实验结果分析

本次实验经模型调优后，选择 LSTM 网络层数为 3 层，各层神经元数量均为 700，Dropout 为 0.5，在 LSTM 后加入一层全连接层，神经元数量为 100，迭代次数为 700，学习率为 0.001。

以重庆丽苑维景国际大酒店 2020 年 11 月的数据作为训练集，2020 年 12 月的数据作为测试集，对测试集的电力负荷日用电量进行预测。

图 8 ~ 图 11 为 PCC-LSTM 模型 2020 年 12 月 3 日至 6 日连续 4 日的负荷预测结果，每 1 h 为 1 个时间采样点。对模型连续 4 日的预测结果计算平均绝对百分比误差 y_{MAPE} 和均方根误差 y_{RMSE}，结果如表 6 所示。

从表 6 可以看出，PCC-LSTM 模型的预测误差在 4.76% ~8.05%，预测精度在 91.95% ~95.24%，预测精度良好。

表 7 为 2020 年 12 月 5 日的日负荷 Prophet、

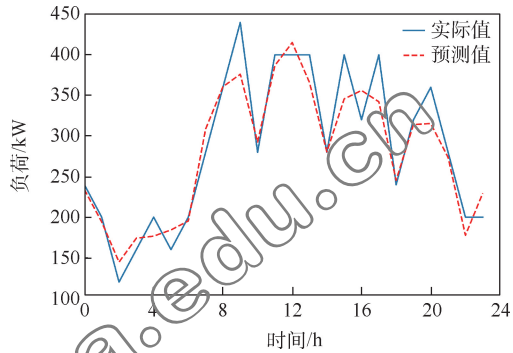


图 8　重庆丽苑维景国际大酒店 PCC-LSTM 模型 2020 年 12 月 3 日预测结果

Fig. 8　Predicted curve of PCC-LSTM model of Chongqing International Grand Metropark Liyuan Hotel on December 3, 2020

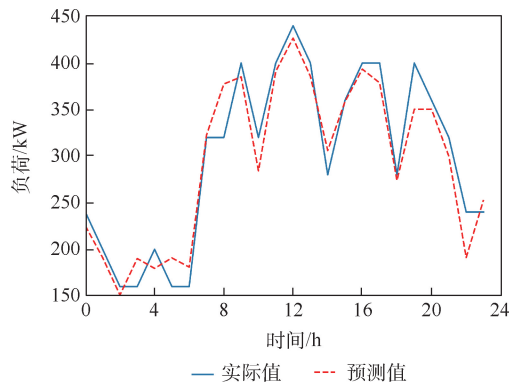


图 9　重庆丽苑维景国际大酒店 PCC-LSTM 模型 2020 年 12 月 4 日预测结果

Fig. 9　Predicted curve of PCC-LSTM model of Chongqing International Grand Metropark Liyuan Hotel on December 4, 2020

http://nbxb.buaa.edu.cn

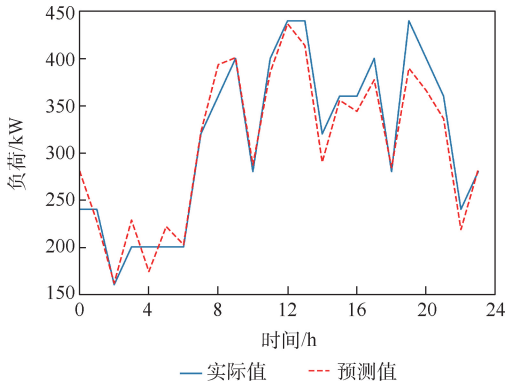


图 10 重庆丽苑维景国际大酒店 PCC-LSTM 模型 2020 年 12 月 5 日预测结果

Fig. 10 Predicted curve of PCC-LSTM model of Chongqing International Grand Metropark Liyuan Hotel on December 5, 2020

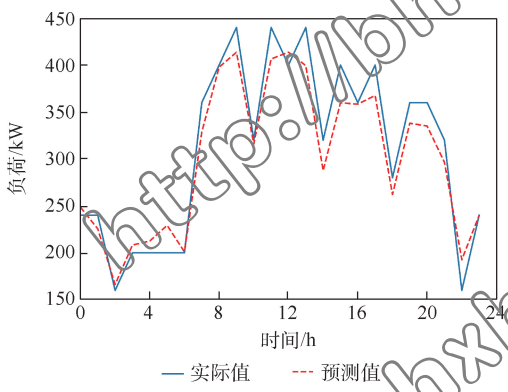


图 11 重庆丽苑维景国际大酒店 PCC-LSTM 模型 2020 年 12 月 6 日预测结果

Fig. 11 Predicted curve of PCC-LSTM model of Chongqing International Grand Metropark Liyuan Hotel on December 6, 2020

表 6 重庆丽苑维景国际大酒店 PCC-LSTM 模型预测结果 y_{MAPE} 和 y_{RMSE} 对比

Table 6 Comparison of y_{MAPE} and y_{RMSE} of prediction results with PCC-LSTM model of Chongqing International Grand Metropark Liyuan Hotel

日期	y_{MAPE}/%	y_{RMSE}
2020 年 12 月 3 日	8.047	28.661
2020 年 12 月 4 日	7.756	25.084
2020 年 12 月 5 日	4.761	18.823
2020 年 12 月 6 日	6.261	24.132

表 7 不同方法重庆丽苑维景国际大酒店日负荷预测结果比较

Table 7 Comparison of results of daily load forecasting by different methods of Chongqing International Grand Metropark Liyuan Hotel

模型/方法	y_{MAPE}/%	y_{RMSE}	计算时间/h
Prophet	13.021	49.532	0.02
LSTNet	18.689	60.934	21.1
GRU	5.069	23.03	2.53
PCC-LSTM	4.866	20.266	3.1

LSTNet、GRU 和 PCC-LSTM 这 4 种预测模型结果对比，经计算可知 PCC-LSTM 模型的预测精度达到了 95.13%，y_{MAPE} 相比其他 3 种方法分别降低了 8.16%、13.82%、0.2%，y_{RMSE} 分别降低了 29.27、40.67、2.76。PCC-LSTM 模型相对于其他 3 种方法在 2 项精度指标上表现更为优异。计算时间由短到长排序为：Prophet、GRU、PCC-LSTM、LSTNet，可见 PCC-LSTM 模型在提高精度的基础上，计算效率与 GRU 方法相当。

重庆丽苑维景国际大酒店 2020 年 12 月 5 日电力负荷用电量实际值和 4 种模型的预测结果对比如图 12 所示。可知，PCC-LSTM 模型在重庆丽苑维景国际大酒店电力负荷用电量变化的 4 个峰谷期均取得了较好的预测效果，更准确地学习了负荷变化的规律，贴近负荷实际值曲线。

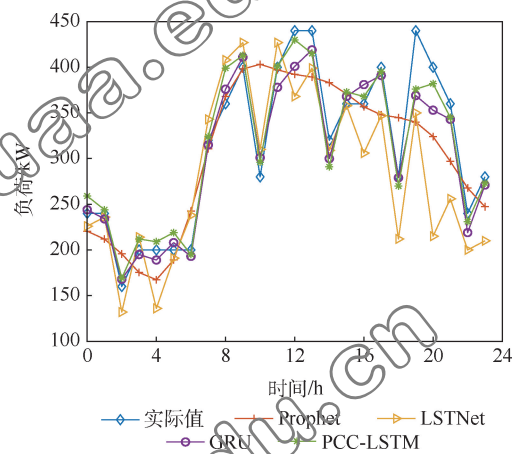


图 12 重庆丽苑维景国际大酒店 2020 年 12 月 5 日负荷预测结果对比

Fig. 12 Comparison of load forecasting results of Chongqing International Grand Metropark Liyuan Hotel on December 5, 2020

4 结 论

本文提出了基于 PCC-LSTM 模型的短期负荷预测方法，包括对 PCC-LSTM 模型的训练、预测及调参等内容。以嘉捷 BOX 和重庆丽苑维景国际大酒店的电力负荷用电量数据作为实际算例，得出以下结论：

1）与时间序列模型（Prophet）相比，PCC-LSTM 模型由于考虑了与电力负荷相关的其他影响因素，对输入量进行了更为细致的分析，有效提高了预测精度。

2）与其他类型的神经网络（LSTNet、GRU）相比，由于 PCC-LSTM 模型在输入量的选择上，采用 Pearson 相关性分析选取合适的影响因素作为输入变量，提升了输入变量与目标变量的相关性，并

http://bhxb.buaa.edu.cn

结合 LSTM 神经网络,充分挖掘时序数据间的内在关系,使得模型的拟合和预测性能整体更好。

3) PCC-LSTM 模型的预测精度对 Dropout 的取值较为敏感,Dropout 取值过低,模型对训练数据过度学习,可能导致过拟合,Dropout 取值过高,模型对训练数据学习不足,可能导致欠拟合,影响模型的性能。

值得说明的是,本文使用深度学习对短期电力负荷用电量进行预测,未来可以考虑组合其他预测方法,对模型输入量和模型架构进行更为详细的划分与分析,进一步提高短期负荷预测精度。

参考文献(References)

[1] 康重庆,夏清,刘梅. 电力系统负荷预测[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
KANG C Q, XIA Q, LIU M. Power system load forecasting [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007 (in Chinese).

[2] 杨英,胡函武,魏晗,等. 电力系统负荷预测分类研究[J]. 电子世界,2018(21):109.
YANG Y, HU H W, WEI H, et al. Research on classification of power system load forecast[J]. Electronics World, 2018(21): 109 (in Chinese).

[3] 康重庆,夏清,张伯明. 电力系统负荷预测研究综述与发展方向的探讨[J]. 电力系统自动化,2004,28(17):1-11.
KANG C Q, XIA Q, ZHANG B M. Review of power system load forecasting and its development [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(17): 1-11 (in Chinese).

[4] 程宇也. 基于人工神经网络的短期电力负荷预测研究[D]. 杭州:浙江大学,2017:31-40.
CHENG Y Y. Short-term electricity demand forecasting based on artificial neural network [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017: 31-40 (in Chinese).

[5] YILDIZ B, BILBAO J I, SPROUL A B. A review and analysis of regression and machine learning models on commercial building electricity load forecasting[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 73: 1104-1122.

[6] BOX G G, BOX G, JENKINS G. Time series analysis: Forecasting and control[J]. Journal of Time, 1976, 31(4): 238-242.

[7] 贺静,韦钢,熊玲玲. 负荷预测线性回归分析法的模糊改进[J]. 华东电力,2003,31(11):21-23.
HE J, WEI G, XIONG L L. Fuzzy improvement of linear regression analysis for load forecasting [J]. East China Electric Power, 2003, 31(11): 21-23 (in Chinese).

[8] 袁诚斌,张涛,朱建良. 基于 MRA 与回归分析法的短期电力负荷预测[J]. 信息技术,2007,31(10):88-90.
YUAN C B, ZHANG T, ZHU J L. Short-term power load forecasting based on MRA and regression analysis[J]. Information Technology, 2007, 31(10): 88-90 (in Chinese).

[9] 李强,王中宇,王卓然. 压力传感器动态校准不确定度评定[J]. 北京航空航天大学学报,2015,41(5):847-856.
LI Q, WANG Z Y, WANG Z R. Uncertainty evaluation for the dynamic calibration of pressure transducer[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(5): 847-856 (in Chinese).

[10] 郭松林,水泉龙,顾翔瑜. 灰色系统理论在负荷预测中运用综述[J]. 工业仪表与自动化装置,2017(3):24-27.
GUO S L, SHUI Q L, GU X Y. Summary of application of gray system theory in load forecasting[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2017(3): 24-27 (in Chinese).

[11] 张国江,邱家驹,李继红. 基于模糊推理系统的多因素电力负荷预测[J]. 电力系统自动化,2002,26(5):49-53.
ZHANG G J, QIU J J, LI J H. Multi-factor short-term load forecasting based on fuzzy inference system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(5): 49-53 (in Chinese).

[12] 艾欣,周志宇,魏妍萍,等. 基于自回归积分滑动平均模型的可转移负荷竞价策略[J]. 电力系统自动化,2017,41(20):26-31.
AI X, ZHOU Z Y, WEI Y P, et al. Bidding strategy for time-shiftable loads based on autoregressive integrated moving average model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(20): 26-31 (in Chinese).

[13] 刘龙龙. 基于 SARIMA 与 SVR 的短期电力负荷预测[D]. 抚州:东华理工大学,2018:7-14.
LIU L L. Short-term power load forecasting based on SARIMA and SVR [D]. Fuzhou: East China Institute of Technology, 2018: 7-14 (in Chinese).

[14] 吴潇雨,和敬涵,张沛,等. 基于灰色投影改进随机森林算法的电力系统短期负荷预测[J]. 电力系统自动化,2015,39(12):50-55.
WU X Y, HE J H, ZHANG P, et al. Power system short-term load forecasting based on improved random forest with grey relation projection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 50-55 (in Chinese).

[15] 李元诚,方廷健,于尔铿. 短期负荷预测的支持向量机方法研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(6):55-59.
LI Y C, FANG T J, YU E K. Study of support vector machines for short-term load forecasting[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2003, 23(6): 55-59 (in Chinese).

[16] 张涛,赵登福,周琳,等. 基于 RBF 神经网络和专家系统的短期负荷预测方法[J]. 西安交通大学学报,2001,35(4):331-334.
ZHANG T, ZHAO D F, ZHOU L, et al. Short-term load forecasting using radial basis function networks and expert system[J]. Journal of Xi' an Jiaotong University, 2001, 35(4): 331-334 (in Chinese).

[17] 李龙,魏靖,黎灿兵,等. 基于人工神经网络的负荷模型预测[J]. 电工技术学报,2015,30(8):225-230.
LI L, WEI J, LI C B, et al. Prediction of load model based on artificial neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 225-230 (in Chinese).

[18] 张倩,马愿,李国丽,等. 频域分解和深度学习算法在短期负荷及光伏功率预测中的应用[J]. 中国电机工程学报,2019,39(8):2221-2230.
ZHANG Q, MA Y, LI G L, et al. Applications of frequency domain decomposition and deep learning algorithms in short-term load and photovoltaic power forecasting[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2019, 39(8): 2221-2230 (in Chinese).

[19] 彭文,王金睿,尹山青. 电力市场中基于 Attention-LSTM 的短期负荷预测模型[J]. 电网技术,2019,43(5):1745-1751.

http://bhxb.buaa.edu.cn

PENG W, WANG J R, YIN S Q. Short-term load forecasting model based on attention-LSTM in electricity market[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1745-1751(in Chinese).

[20] 杨甲甲,刘国龙,赵俊华,等. 采用长短期记忆深度学习模型的工业负荷短期预测方法[J]. 电力建设,2018,39(10):20-27.
YANG J J, LIU G L, ZHAO J H, et al. A long short term memory based deep learning method for industrial load forecasting[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(10): 20-27(in Chinese).

[21] 陈锦鹏,胡志坚,陈纬楠,等. 二次模态分解组合DBiLSTM-MLR的综合能源系统负荷预测[J]. 电力系统自动化,2021,45(13):85-94.
CHEN J P, HU Z J, CHEN W N, et al. Load prediction of integrated energy system based on combination of quadratic modal decomposition and deep bidirectional long short-term memory and multiple linear regression[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(13): 85-94(in Chinese).

[22] 赵倩,郑贵林. 基于WD-LSSVM-LSTM模型的短期电力负荷预测[J/OL]. 电测与仪表,2021(2021-02-26)[2021-03-21]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210226.1041.004.html.
ZHAO Q, ZHENG G L. Short-term load forecasting based on WD-LSSVM-LSTM model[J/OL]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2021(2021-02-26)[2021-03-21]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210226.1041.004.html(in Chinese).

[23] 陆继翔,张琪培,杨志宏,等. 基于CNN-LSTM混合神经网络模型的短期负荷预测方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(8):131-137.
LU J X, ZHANG Q P, YANG Z H, et al. Short-term load forecasting method based on CNN-LSTM hybrid neural network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 131-137(in Chinese).

[24] 王增平,赵宾,纪维佳,等. 基于GRU-NN模型的短期负荷预测方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(5):53-58.
WANG Z P, ZHAO B, JI W J, et al. Short-term load forecasting method based on GRU-NN model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 53-58(in Chinese).

[25] FENG M C, ZHENG J B, REN J C, et al. Big data analytics and mining for effective visualization and trends forecasting of crime data[J]. IEEE Access, 2019, 7: 106111-106123.

[26] HUANG B, LIANG Y Y, QIU X L. Wind power forecasting using attention-based recurrent neural networks: A comparative study[J]. IEEE Access, 2021, 9: 40432-40444.

[27] AFRASIABI M, MOHAMMADI M, RASTEGAR M, et al. Advanced deep learning approach for probabilistic wind speed forecasting[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(1): 720-727.

Short-term load forecasting method based on PCC-LSTM model

LIU Qianqian[1], LIU Yushan[1,*], WEN Yeting[2], HE Jie[1], LI Xiao[1], BI Daqiang[1]

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Short-term load forecasting is the basis for reasonable dispatch and smooth operation of the power grid. To improve the accuracy of short-term load forecasting, a method based on Pearson correlation coefficient (PCC) and long and short term memory (LSTM) neural network is proposed. This method uses Pearson correlation analysis to analyze the correlation of the time series composed of original multi-dimensional input variables, and selects the influencing factors with greater correlation with the power load data as the input to achieve the dimensionality reduction of the original data. Then, through the combination of LSTM neural network and Adam optimization algorithm, a network model is established for the nonlinear relationship between the influencing factors that have a greater correlation with the power load and the actual output sequence of the load. Taking the load data of Jiajie BOX and Chongqing International Grand Metropark Liyuan Hotel as calculation examples, the proposed model is compared with Prophet, LSTNet, and gated recurrent unit (GRU) models. Results show that the prediction accuracy of the proposed model is above 91%, with the highest up to 95.44%, thus effectively improving the accuracy of load forecasting.

Keywords: Pearson correlation coefficient; long and short term memory neural network; load forecasting; Adam algorithm; time series

Received: 2021-03-25; **Accepted**: 2021-07-03; **Published online**: 2021-07-14 11:10

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210714.1004.002.html

Foundation items: The Fundamental Research Funds for the Central Universities (KG16076201); Project Funded by the State Key Laboratory of Safety Control and Simulation for Power Systems and Large Power Generation Equipment (SKLD20M05)

* **Corresponding author**. E-mail: yushan_liu@buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0150

基于特征融合与抗遮挡的卫星视频目标跟踪方法

刘耀胜[1,2], 廖育荣[2], 林存宝[2,*], 李兆铭[2], 杨新岩[2]
(1. 航天工程大学 研究生院, 北京 101416; 2. 航天工程大学 电子与光学工程系, 北京 101416)

摘 要: 卫星视频中的目标易受到遮挡和复杂环境干扰等影响,造成对目标的运动状态估计不够准确,导致目标跟踪失败。基于此,在核相关滤波(KCF)算法的基础上设计2种算法提高目标跟踪的成功率,实现鲁棒性的目标跟踪。通过提取目标的方向梯度直方图(HOG)特征、灰度特征和高斯曲率特征表述目标的外观模型;联合响应图的峰值和平均峰值相关能量(APCE)对目标的响应图进行自适应加权融合,并将融合后的响应图峰值作为置信度对目标的模型进行自适应更新;通过使用卡尔曼滤波的方法对遮挡的目标进行位置预测,当目标遮挡结束时,对目标进行重新跟踪,解决卫星视频中目标被遮挡的问题。大量实验结果表明:所改进的相关滤波算法对卫星视频中的目标跟踪,尤其是在复杂环境、目标被遮挡及场景光照发生变化的情况下,具有良好的效果,并且在目标跟踪的精度和成功率等方面都有很大的提高,为进一步对卫星视频中的目标跟踪奠定了基础。

关 键 词: 卫星视频; 相关滤波; 自适应特征融合和模型更新; 卡尔曼滤波; 目标跟踪
中图分类号:
文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2022)12-2537-11

近年来,随着科技的发展,目标跟踪技术已经成为计算机视觉的重要研究课题,在人工智能、无人驾驶、人机交互及军事监控等方面应用十分广泛[1],其主要作用是在已获得的视频图像中寻找感兴趣的目标,并且在下一帧中对其进行精确地跟踪。目前,随着遥感技术的日趋成熟,各国遥感卫星的数量也越来越多,并且遥感卫星拍摄的高分辨率视频能够观测和测量地球表面上的移动物体,提供丰富的信息进行分析决策,如石油储量、自然灾害的监测[2],交通状况及生态系统干扰的监测[3]等。高分辨率视频卫星作为一种新型的对地观测卫星,与传统的观测卫星相比较,其最大的优势是采用“凝视”[4]的成像模式对某个区域进行连续观察,并且以视频成像的方式获得丰富的信息,实现对卫星视频中目标持续跟踪的能力,从而将目标跟踪技术应用到遥感卫星领域。

目前,各国已经陆续发射多颗高分辨率视频卫星。例如,2007 年印度尼西亚将“印度尼西亚国家航空航天研究所-柏林技术大学卫星”送入太空,2013 年美国的 Skybox 公司成功发射 2 颗视频卫星,而中国在 2014 年成功将自主研制的“天拓二号”卫星发射升空,在 2015 年中国长光卫星技术股份有限公司将研制的“吉林一号”视频卫星顺利升空。由于视频卫星拍摄的图像幅宽较大,空中环境复杂,并且容易受到相似目标的干扰,以及存在目标被遮挡等问题,对卫星视频中的目标进行跟踪存在较大的挑战,以往的目标跟踪算法几乎都是对地面上的目标进行跟踪,对卫星视频

收稿日期: 2021-03-29; **录用日期**: 2021-12-27; **网络出版时间**: 2022-02-15 12:24
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20220214.1635.009.html
基金项目: 国家自然科学基金 (61805283)
* **通信作者**. E-mail: cunbaolin@163.com

引用格式: *刘耀胜, 廖育荣, 林存宝, 等. 基于特征融合与抗遮挡的卫星视频目标跟踪方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2537-2547. LIU Y S, LIAO Y R, LIN C B, et al. Feature-fusion and anti-occlusion based target tracking method for satellite videos[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2537-2547(in Chinese).*

http://bhxb.buaa.edu.cn

中的目标进行跟踪将会成为一个新的热点问题。

针对卫星视频中的目标跟踪,一般通过目标检测获得初始帧目标的位置信息,或在初始帧手动获得目标的相关信息,再在每一帧估计所跟踪目标的位置。近年来,在目标跟踪领域产生了多种性能优异的算法。Bolme 等[5]首次将相关滤波的思想应用到目标跟踪领域,提出了一种基于最小误差输出平方和(minimum output sum of squared error, MOSSE)的滤波跟踪器。之后,Henriques 等[6]基于相关滤波的思想,发展设计了循环核结构(circulant structure kernel, CSK)的跟踪器和核相关滤波(kernelized correlation filters, KCF)跟踪器[7],提高了目标跟踪的速度和准确率。杜博等[8]通过将三帧差法和 KCF 算法相结合,提出了一种新的卫星目标跟踪方法。轩诗宇等[9]将运动估计的方法和 KCF 算法相融合,以解决卫星视频中目标无法进行快速跟踪的问题。而随着深度学习的兴起,尤其是卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)在视觉跟踪中的广泛应用,研究人员开始探索使用 CNN 提取卫星视频中目标的特征,增强对目标的表示能力,提高目标跟踪的准确度。胡兆鹏等[10]提出将简单的回归模型与卷积层和梯度下降算法相结合,利用丰富的背景知识构建强大的目标跟踪器。邵佳等[11]提出一种用于卫星视频跟踪的预测注意启发式 Siamese 网络(PASiam),该网络提取目标的浅层特征,采用高斯混合模型检测目标的运动状态,并且使用卡尔曼滤波预测和校正目标的位置。马成洋等[12]通过对颜色特征和方向梯度直方图(histogram of oriented gradient, HOG)特征进行融合,弥补了目标在光照变化和形变情况下的特征表示缺陷,可以在目标轻微遮挡时对目标进行跟踪。Heimbach 等[13]通过特征响应调整卡尔曼滤波器中的协方差参数,从而提高在目标遮挡情况下跟踪的准确性。杨剑锋等[14]通过引入块均值漂移算法跟踪部分遮挡的目标,提高算法抵抗目标遮挡的能力。

然而,以上方法通常提取目标有限的特征进行表述,当目标发生光照变化或进入复杂环境中时,跟踪模型通常会产生较大的误差,从而影响跟踪器的鲁棒性。而基于深度学习的算法虽然对目标跟踪的效果较好,但在利用 CNN 等网络提取目标特征时,一般需要较大的计算量,对跟踪算法整体的实时性上受到了不利的影响。上述目标跟踪算法在传统的图像上具有不错的跟踪精度和鲁棒性,但是在应用于卫星视频中的目标跟踪时仍存在较大问题,尤其是当目标出现遮挡、复杂背景及发生光照变化等情况时,将会发生目标跟踪丢失的问题,最终导致跟踪失败。

为确保目标跟踪具有较高的稳健性和准确性,同时也考虑到目标跟踪的精度和速度,本文采用 KCF 算法作为基础目标跟踪框架,同时考虑到单一的目标特征无法较为准确地对目标进行描述,设计了一种特征自适应融合和模型自适应更新的方法。根据响应区域的最大值和平均峰值相关能量获得权重,进行自适应特征融合,提高对单一目标特征的描述能力;采用自适应更新的方法对相关滤波模型进行更新,使相关滤波模型能够克服目标因光照变化等影响而产生的微小变化;借助卡尔曼滤波的方法预测遮挡目标在下一帧的位置,从而解决由于目标被遮挡而造成的目标跟踪失败的问题。

1 本文算法

1.1 KCF 算法

KCF 算法[7]属于判别式目标跟踪算法,将目标及周围的矩形区域作为训练样本,通过循环矩阵构造大量的正负样本,以此增强分类器的训练效果。同时利用循环矩阵对角化的性质,将训练样本进行对角化,以此减少计算量,使用岭回归函数对样本进行分类,并对其进行约束优化获得最终的分类器。具体步骤如下:

假设目标的训练样本为 $\boldsymbol{x}_i$,用 $\boldsymbol{y}_i$ 表示目标的高斯函数响应,采用岭回归函数并引入高斯核函数对大量样本进行训练,寻找一个合适的 $\boldsymbol{w}$,使得函数 $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_i)=\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}_i$ 和高斯函数响应 $\boldsymbol{y}_i$ 之间的平方误差和最小,即

$$\min_{\boldsymbol{w}} \sum_{i=1}^{n} (\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_i)-\boldsymbol{y}_i)^2 + \lambda \|\boldsymbol{w}\|^2 \tag{1}$$

式中:λ 为正则化参数,目的是防止过度拟合。

将式(1)转换成矩阵形式并求导,可得分类器权重系数 $\boldsymbol{w}$ 的最优解,即

$$\boldsymbol{w}=(\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}+\lambda)^{-1}\boldsymbol{X}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{y} \tag{2}$$

假设目标样本 $\boldsymbol{x}$ 为 $n\times 1$ 的基本向量,可以表示为 $\boldsymbol{x}=[\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{x}_2,\cdots,\boldsymbol{x}_n]$,将其通过循环矩阵进行移位,从而获得大量的训练样本。循环矩阵如下所示:

$$\boldsymbol{X}=\boldsymbol{C}(\boldsymbol{x})=\begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_1 & \boldsymbol{x}_2 & \boldsymbol{x}_3 & \cdots & \boldsymbol{x}_n \\ \boldsymbol{x}_n & \boldsymbol{x}_1 & \boldsymbol{x}_2 & \cdots & \boldsymbol{x}_{n-1} \\ \boldsymbol{x}_{n-1} & \boldsymbol{x}_n & \boldsymbol{x}_1 & \cdots & \boldsymbol{x}_{n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \boldsymbol{x}_2 & \boldsymbol{x}_3 & \boldsymbol{x}_4 & \cdots & \boldsymbol{x}_1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中:第 1 行为目标样本,其他行都由第 1 行循环移位而来,因此可得到样本循环具有周期性。利用循环矩阵对角化的性质,将训练样本 $\boldsymbol{X}$ 进行离

http://bhxb.buaa.edu.cn

散傅里叶变换可得

$$\hat{\boldsymbol{w}} = \frac{\hat{\boldsymbol{x}} \odot \hat{\boldsymbol{y}}}{\hat{\boldsymbol{x}}^* \odot \hat{\boldsymbol{x}} + \lambda} \tag{4}$$

式中:"⊙"表示矩阵与矩阵之间点积。

由于样本在低维空间通常难以进行线性分类,需要将样本转化到高维空间,本文结合核函数 $\boldsymbol{k}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{z}') = \langle \boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}), \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{z}') \rangle$,目标样本的线性函数可以表示为

$$\boldsymbol{w} = \sum_i \boldsymbol{\alpha}_i \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{x}_i) \tag{5}$$

因此可得

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{z}) = \sum_i \boldsymbol{\alpha}_i \boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}_i)\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{z}_i) = \sum_i \boldsymbol{\alpha}_i \boldsymbol{k}(\boldsymbol{x}_i,\boldsymbol{z}_i) \tag{6}$$

式中:$\boldsymbol{k}(\boldsymbol{x}_i,\boldsymbol{z}_i)$为核函数;$\boldsymbol{\alpha}_i$ 为滤波系数。

本文选择高斯核函数,该函数可以表示为

$$\boldsymbol{k}^{\boldsymbol{xz}'} = \exp\left\{ -\frac{1}{\sigma_1^2}\left[\|\boldsymbol{x}\|^2 + \|\boldsymbol{z}'\|^2 - 2\boldsymbol{F}^{(-1)}(\hat{\boldsymbol{x}}^* \odot \hat{\boldsymbol{z}}') \right] \right\} \tag{7}$$

式中:$\boldsymbol{z}'$表示待检测的图像块;$\boldsymbol{F}^{(-1)}$ 表示离散傅里叶逆变换;σ_1 为高斯核函数的带宽。

因此,式(4)可以转换为

$$\hat{\boldsymbol{\alpha}} = \frac{\hat{\boldsymbol{y}}}{\hat{\boldsymbol{k}}^{\boldsymbol{xz}'} + \lambda} \tag{8}$$

式中:$\hat{\boldsymbol{y}}$ 表示高斯函数 $\boldsymbol{y}$ 的傅里叶变换;$\hat{\boldsymbol{\alpha}}$ 表示滤波器模型。

在下一帧图像中,获取与前一帧目标大小相同的矩形区域 $\boldsymbol{z}$,可得下一帧目标的响应区域为

$$\hat{\boldsymbol{f}}(\boldsymbol{z}) = \boldsymbol{F}^{(-1)}(\hat{\boldsymbol{k}}^{\boldsymbol{xz}'} \odot \hat{\boldsymbol{\alpha}}) \tag{9}$$

式中:$\hat{\boldsymbol{f}}(\boldsymbol{z})$表示下一帧目标区域的输出响应值。

将 $\hat{\boldsymbol{f}}(\boldsymbol{z})$ 进行离散傅里叶逆变换得到 $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{z})$,$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{z})$中的最大值即为下一帧目标所在的位置。

本文目标跟踪算法主要是对 KCF 算法的改进,具体表现在特征提取、自适应特征融合、自适应模型更新及解决目标遮挡的问题。

1.2　提取的目标梯度纹理特征

在目标跟踪算法中,提取的目标特征是否有效直接决定跟踪效果的好坏。为提高目标跟踪的效果,本文提出一种自适应融合目标特征表示方法,通过提取目标的 HOG 特征[15]、灰度特征及基于高斯曲率和平均曲率的特征[16],并分析比较各种特征对目标的描述能力,从而选择合适的方法对目标进行特征融合。因 HOG 特征和灰度特征已在相关文献中有所阐述,本文不再赘述。重点对基于高斯曲率和平均曲率的特征[16]提取方法进行介绍。

在进行目标特征描述时,由于梯度可有效描述图像像素的方向信息,被广泛用于描述目标的特征,如 HOG 特征、Sobel 特征等。然而,由于梯度信息一般仅能够反映目标边缘变化剧烈的程度,而对图像中曲率等非线性特征的描述存在一定难度,本文提出采用高斯函数来计算目标的高斯曲率特征和平均曲率特征,从而获得包括梯度纹理特征在内的更为充分的特征描述。

通过高斯函数对图像进行卷积运算通常可以获得更加突出的纹理和强度信息,因此高斯导数滤波器通常被用来作为提取纹理特征的基本模型。高斯函数可以表示为

$$\boldsymbol{G}(x,y) = \mathrm{e}^{\frac{-(x^2+y^2)}{\sigma_2^2}} \tag{10}$$

式中:x、y 分别为图像像素的横、纵坐标;σ_2 为高斯函数的带宽。

本文使用高斯函数的一阶和二阶偏导数与图像 $\boldsymbol{I}$ 进行卷积,从而获得图像的部分特征信息。公式如下:

$$\begin{cases} \boldsymbol{I}_x = \boldsymbol{I} * \boldsymbol{G}_x \\ \boldsymbol{I}_y = \boldsymbol{I} * \boldsymbol{G}_y \\ \boldsymbol{I}_{xx} = \boldsymbol{I} * \boldsymbol{G}_{xx} \\ \boldsymbol{I}_{xy} = \boldsymbol{I} * \boldsymbol{G}_{xy} \\ \boldsymbol{I}_{yy} = \boldsymbol{I} * \boldsymbol{G}_{yy} \end{cases} \tag{11}$$

式中:$\boldsymbol{G}_x$、$\boldsymbol{G}_y$、$\boldsymbol{G}_{xx}$、$\boldsymbol{G}_{yy}$、$\boldsymbol{G}_{xy}$分别为高斯函数对 x 的一阶偏导数、对 y 的一阶偏导数、对 x 的二阶偏导数、对 y 的二阶偏导数、对 xy 的二阶偏导数;"$*$"表示对图像进行卷积操作。

将图像所有像素由二维空间转到三维空间,通常可以得到一个三维曲面。为体现图像的局部性质,可以通过计算图像三维曲面的平均曲率,从而获得图像的局部特征。但是,当图像中的边缘发生距离变化时,通过平均曲率提取目标的局部特征就会存在较大误差,此时可以使用具有旋转不变性的高斯曲率特征获得图像中边缘变化剧烈的信息,从而提取目标更加详细的纹理特征。图像的高斯曲率公式可以表示为

$$\boldsymbol{V} = \frac{\boldsymbol{I}_{xx}\boldsymbol{I}_{yy} - \boldsymbol{I}_{xy}^2}{(1 + \boldsymbol{I}_x^2 + \boldsymbol{I}_y^2)^2} \tag{12}$$

平均曲率公式为

$$\boldsymbol{B} = \frac{\boldsymbol{I}_{xx}(1 + \boldsymbol{I}_y^2) + \boldsymbol{I}_{yy}(1 + \boldsymbol{I}_x^2) + 2\boldsymbol{I}_x\boldsymbol{I}_y\boldsymbol{I}_{xy}}{(1 + \boldsymbol{I}_x^2 + \boldsymbol{I}_y^2)^{3/2}} \tag{13}$$

因此,图像的梯度纹理特征 $\boldsymbol{E}$ 可以由式(14)计算:

$$\boldsymbol{E} = \rho\boldsymbol{B} + (1 - \rho)\boldsymbol{V} \tag{14}$$

式中:ρ 为权重,设置为 0.5。

通过对图像的梯度纹理特征分析,可以检测到图像中相邻像素的显著特征。

http://bhxb.buaa.edu.cn

1.3 自适应特征融合

为了提高目标跟踪的准确率,将目标的梯度纹理特征和灰度特征进行并联融合得到特征MIX,再将HOG特征和MIX特征分别训练KCF滤波器,从而获得最终的目标响应图,即

$$\begin{cases} \boldsymbol{f}_{\mathrm{HOG}}(z) = \boldsymbol{F}^{(-1)}(\hat{\boldsymbol{k}}^{xz}_{\mathrm{HOG}} \odot \hat{\boldsymbol{\alpha}}_{\mathrm{HOG}}) \\ \boldsymbol{f}_{\mathrm{MIX}}(z) = \boldsymbol{F}^{(-1)}(\hat{\boldsymbol{k}}^{xz}_{\mathrm{MIX}} \odot \hat{\boldsymbol{\alpha}}_{\mathrm{MIX}}) \end{cases} \tag{15}$$

式中:$\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{\mathrm{HOG}}$、$\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{\mathrm{MIX}}$分别表示2种特征的相关滤波器;$\hat{\boldsymbol{k}}^{xz}_{\mathrm{HOG}}$和$\boldsymbol{k}^{xz}_{\mathrm{MIX}}$分别表示各自特征的目标样本和下一帧候选区域之间的高斯核相关;$\boldsymbol{f}_{\mathrm{HOG}}(z)$、$\boldsymbol{f}_{\mathrm{MIX}}(z)$分别表示相关响应图。

最终响应图$\boldsymbol{f}(z)$可由2个特征的响应图进行加权得到,即

$$\boldsymbol{f}(z) = \eta_{\mathrm{HOG}}\boldsymbol{f}_{\mathrm{HOG}}(z) + \eta_{\mathrm{MIX}}\boldsymbol{f}_{\mathrm{MIX}}(z) \tag{16}$$

式中:η_{HOG}、η_{MIX}为融合权重。

本文将基于响应图的最大值和平均峰值相关能量(APCE)计算融合权重。其中,APCE定义为

$$\mathrm{APCE} = \frac{(\boldsymbol{f}_{\max} - \boldsymbol{f}_{\min})^2}{\frac{1}{MN}\sum_{i,j}(\boldsymbol{f}(i,j) - \boldsymbol{f}_{\min})^2} \tag{17}$$

式中:$\boldsymbol{f}_{\max}$和$\boldsymbol{f}_{\min}$分别为响应图中的最大值和最小值;$\boldsymbol{f}(i,j)$为响应图中的值;M和N分别为响应图的宽和高。

取响应图的最大值$\boldsymbol{f}_{\max}$和APCE值,则结果$\boldsymbol{f}_{\mathrm{MA}}$由式(18)可得

$$\boldsymbol{f}_{\mathrm{MA}} = \boldsymbol{f}_{\max} \times \mathrm{APCE} \tag{18}$$

将其进行归一化,即通过将之前所有帧的$\boldsymbol{f}_{\mathrm{MA}}$之和求均值,可得到最终的权重计算公式为

$$\zeta = \frac{f_{\mathrm{MA}}(t)}{\mathrm{mean}(f_{\mathrm{MA}}(t), f_{\mathrm{MA}}(t-1), \cdots, f_{\mathrm{MA}}(1))} \tag{19}$$

最终,HOG特征和MIX特征的权重ζ_{HOG}和ζ_{MIX}可以定义为

$$\eta_{\mathrm{HOG}} = \frac{\zeta_{\mathrm{HOG}}}{\zeta_{\mathrm{HOG}} + \zeta_{\mathrm{MIX}}} \tag{20}$$

$$\eta_{\mathrm{MIX}} = 1 - \eta_{\mathrm{HOG}} \tag{21}$$

通过自适应特征融合构建稳健性的目标外观,并且特征互补可以提高目标跟踪的准确度。

1.4 自适应模型更新

在目标跟踪的过程中,由于目标和背景随时都会发生变化,滤波器的模型和目标的特征要及时进行更新,才能适应这种变化[17]。本文提出一种新的方法对目标的模型进行自适应更新,当前帧的融合响应图中最大值与之前所有帧融合后响应图中最大值之和的均值之比定义为θ,θ可以表示为

$$\theta = \frac{f(t)_{\max}}{\mathrm{mean}(\mathrm{sum}(f(1), \cdots, f(t-1), f(t))} \tag{22}$$

式中:t为帧的索引;$f(t)_{\max}$为响应最大值。

由于相关滤波器的模型是由线性插值而得的,可以将其做出如下改进,具体如下:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\alpha}'_t = (1-\theta\gamma)\boldsymbol{\alpha}'_{t-1} + \theta\gamma\boldsymbol{\alpha}_t \\ \boldsymbol{\Gamma}'_t = (1-\theta\gamma)\boldsymbol{\Gamma}'_{t-1} + \theta\gamma\boldsymbol{\Gamma}_t \end{cases} \tag{23}$$

式中:$\boldsymbol{\alpha}'_{t-1}$和$\boldsymbol{\alpha}_t$分别表示第$t-1$帧的滤波器模型和第$t$帧的滤波器模型;$\boldsymbol{\alpha}'_t$表示经过线性插值后的滤波器模型;$\boldsymbol{\Gamma}'_{t-1}$和$\boldsymbol{\Gamma}_t$分别表示第$t-1$帧的目标特征和第$t$帧的目标特征;$\boldsymbol{\Gamma}'_t$表示经过线性插值后的目标特征;$\gamma$为初始的学习率,设为0.012。

1.5 目标遮挡的解决方法

目标遮挡处理一直是目标跟踪的难点问题。当目标被遮挡时,目标的外观模型会发生变化,而跟踪器由于无法进行判断,通常会将错误的模型进行学习,从而丢失真正的目标,最终导致目标跟踪失败。卡尔曼滤波[18]通过输入观测数据,经过最优估计方法最终获得相对准确的结果。通过对卫星视频目标跟踪问题的分析,本文提出引入卡尔曼滤波算法解决目标遮挡问题,通过响应图的APCE值判断目标是否被遮挡,从而决定是否使用卡尔曼滤波算法对遮挡目标进行位置预测。

卫星视频中典型的运动目标是车辆、舰船和飞机,当目标处于转弯、紧急停止时[9],可以假设目标在短时间内均匀的运动。卡尔曼滤波算法的时间更新方程为

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}_k = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_{k-1} + \boldsymbol{C}\boldsymbol{u}_{k-1} \\ \boldsymbol{P}_k = \boldsymbol{A}\boldsymbol{P}_{k-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{Q} \end{cases} \tag{24}$$

式中:$\boldsymbol{x}_{k-1}$为$k-1$时刻的状态估计值;$\boldsymbol{C}$为控制矩阵;$\boldsymbol{u}_{k-1}$为控制增益,可以设置为0;$\boldsymbol{A}$为状态转移矩阵;$\boldsymbol{x}_k$为k时刻的状态估计值,所选择的状态量$\boldsymbol{x}_k = [\boldsymbol{L}_x, \boldsymbol{L}_y, \boldsymbol{V}_x, \boldsymbol{V}_y]$,$(\boldsymbol{L}_x, \boldsymbol{L}_y)$表示第$k$时刻目标中心位置点的横、纵坐标,$(\boldsymbol{V}_x, \boldsymbol{V}_y)$表示第$k$时刻目标在水平方向和竖直方向的速度大小;$\boldsymbol{P}_{k-1}$为第$k-1$时刻的状态估计协方差;$\boldsymbol{Q}$为过程噪声的协方差。

卡尔曼滤波状态更新方程可以表示为

$$\begin{cases} \boldsymbol{K}_k = \boldsymbol{P}_k\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}/(\boldsymbol{H}\boldsymbol{P}_k\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{R}) \\ \hat{\boldsymbol{x}}_k = \boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{K}_k(z_k - \boldsymbol{H}\boldsymbol{x}_k) \\ \boldsymbol{P}_k = (\boldsymbol{U} - \boldsymbol{K}_k\boldsymbol{H})\boldsymbol{P}_k \end{cases} \tag{25}$$

式中:$\boldsymbol{K}_k$为卡尔曼增益;z_k表示前一时刻的目标测量结果;$\boldsymbol{H}$为测量矩阵;$\boldsymbol{R}$为测量噪声矩阵;$\boldsymbol{U}$为单位矩阵。

在本文中,设$z_k = [\boldsymbol{P}_x, \boldsymbol{P}_y]$,$\boldsymbol{P}_x$、$\boldsymbol{P}_y$分别表示目标中心位置的横、纵坐标,测量噪声$\boldsymbol{R}$值很小,可以设为$\boldsymbol{R} = 10^{-6}\boldsymbol{I}_{2\times2}$。而过程噪声$\boldsymbol{Q}$值较大,可设为$0.1\boldsymbol{I}_{4\times4}$。其他参数可以定义为

http://bhxb.buaa.edu.cn

$$\begin{cases} \boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \tag{26}$$

通过引入卡尔曼滤波算法可以预测遮挡目标的位置,能够进行实时地跟踪,从而解决目标被遮挡的问题。经过多次实验证明,该方法极大地提高了目标跟踪的成功率。算法流程如图 1所示。

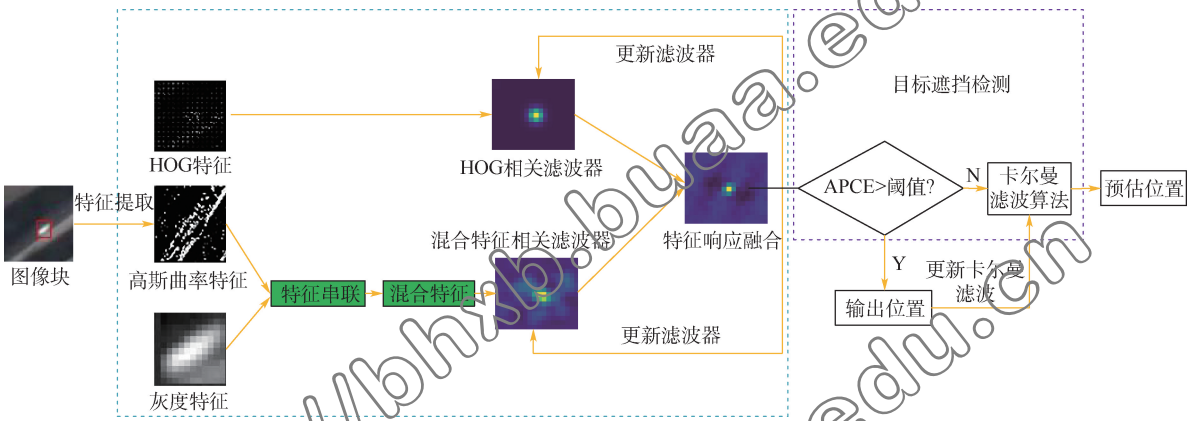


图 1　基于改进的相关滤波卫星视频目标跟踪算法流程

Fig. 1　Flowchart of target tracking algorithm in satellite videos based on improved correlation filter

2　仿真实验结果与分析

2.1　仿真实验环境及参数

本文实验环境如下:Win10 系统,处理器 Intel Xeon CPU E3-1240(3.50 GHz),16 GB 内存,仿真环境为 Python 3.7。为体现算法的一致性,设置的参数与原始 KCF 算法的参数基本相同。HOG 特征的胞元大小为 4 像素×4 像素,直方图方向设置为 9 个,搜索区域为原始矩形框区域的 1.5 倍,正则化参数为 0.000 1。卫星视频为“吉林一号”卫星数据,选取 4 个具有代表性的卫星视频,包含空中飞机、地面车辆和海面舰船目标。每个视频约为 300 帧,采用手动标记确定目标真实边界框。

2.2　评价方法

为定量分析本文改进算法对卫星视频中目标跟踪的性能,选取中心位置误差(center location error, CLE)、距离精度(distance precision, DP)、重叠率(overlap precision, OP)[19] 作为算法性能评价指标。中心位置误差定义为

$$\mathrm{CLE} = \sqrt{(x_i - x_{i\text{-gt}})^2 + (y_i - y_{i\text{-gt}})^2} \tag{27}$$

式中:(x_i, y_i) 为由跟踪器计算所得的目标中心位置;$(x_{i\text{-gt}}, y_{i\text{-gt}})$ 为目标的实际中心位置。CLE 值越小,说明目标跟踪的精度就越高。

距离精度定义为

$$\mathrm{DP} = \frac{\mathrm{frames}(\mathrm{CLE} \leqslant d)}{N} \tag{28}$$

式中:frames(a) 表示满足条件 a 的帧数;N 为图像的总帧数。由于卫星视频中目标比较小,阈值 $d = 3$。

重叠率定义为

$$\mathrm{OS} = \frac{\mathrm{frames}\left(\dfrac{S_i \cap S_{i\text{-gt}}}{S_i \cup S_{i\text{-gt}}} \leqslant \tau\right)}{N} \tag{29}$$

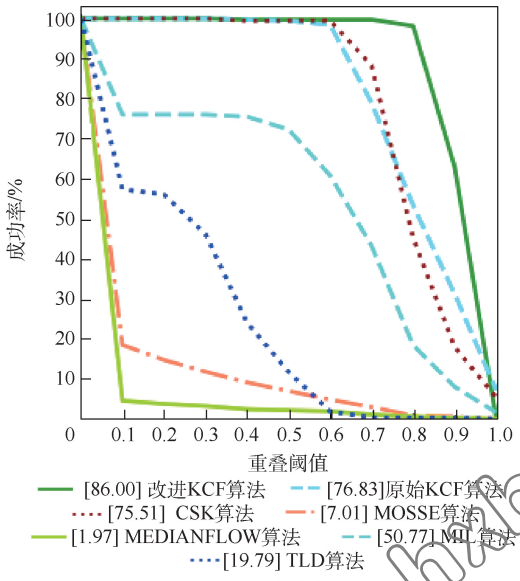
式中:S_i 和 $S_{i\text{-gt}}$ 分别表示第 i 帧的图像边界框和手工标记的边界框;“∪”和“∩”分别表示并集和交集。重叠率表示重叠面积占 2 个边界框面积之和的百分比小于或等于阈值 τ 的帧数占总帧数的百分比,阈值 τ 设为 0.75,重叠率越大,说明目标跟踪的成功率就越高。

2.3　实验过程分析

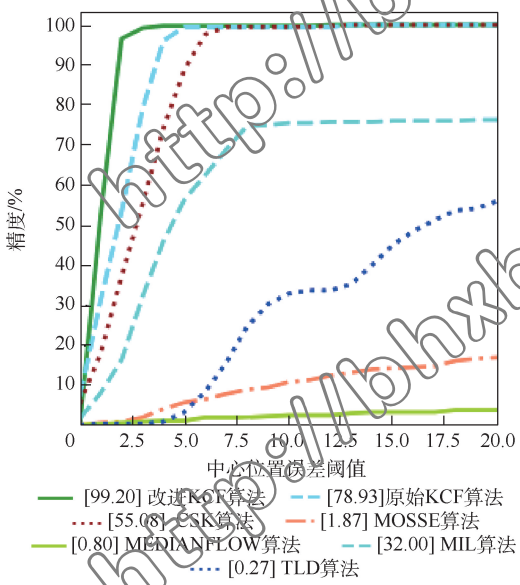
选用几种经典的算法进行对比,分别为原始的 KCF 算法[7]、CSK 算法[6]、MOSSE 算法[5]、MIL 算法[20]、TLD 算法[21] 和 MEDIANFLOW 算法[22]。MOSSE 算法首次将相关滤波的思想应用到目标跟踪领域的算法;CSK 算法通过循环矩阵构建大量样本,并且将核函数应用到目标跟踪领域;KCF 算法提取目标的多通道特征,即 HOG 特征,同时使用不同的核函数;TLD 算法和 MEDIANFLOW 算法都基于光流法对目标进行跟踪,且 TLD 算法通过对目标进行重新检测,防止目标丢失或者发生漂移,从而提高目标的成功率。

由于遥感图像的幅宽较大,本文通过截取目标跟踪的局部区域进行算法验证。图 2 ~ 图 5 为目标跟踪的精度和成功率曲线,图 6 为实验的 4 组卫星视频图像,图 7 为目标跟踪结果的部分可

http://bhxb.buaa.edu.cn



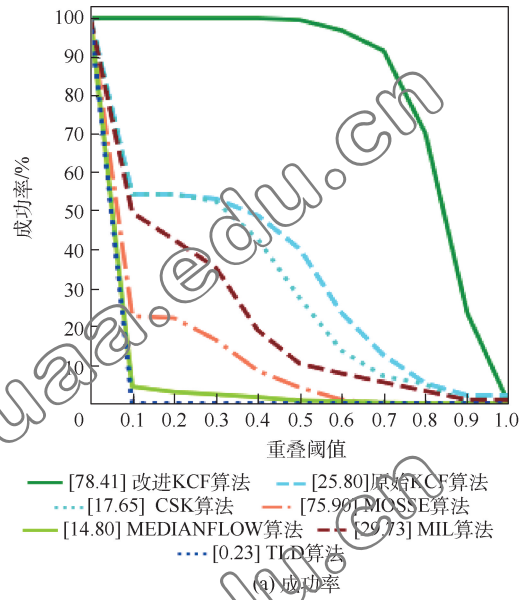
(a) 成功率



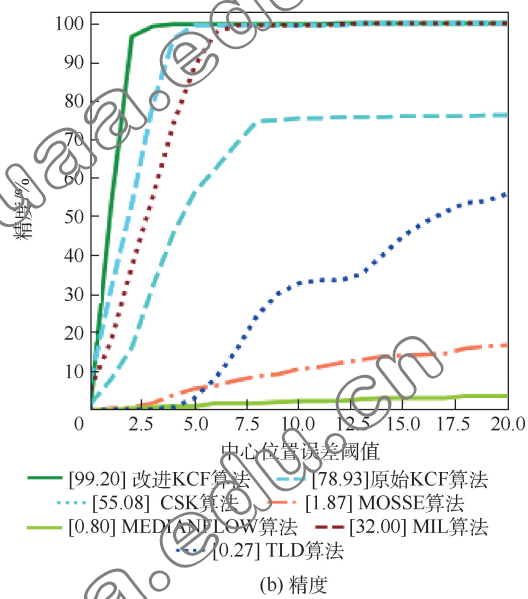
(b) 精度

图 2 空中目标跟踪结果的精度和成功率曲线

Fig. 2 Precision and success curves of target tracking results in Plane sequences



(a) 成功率



(b) 精度

图 3 遮挡目标跟踪结果的精度和成功率曲线

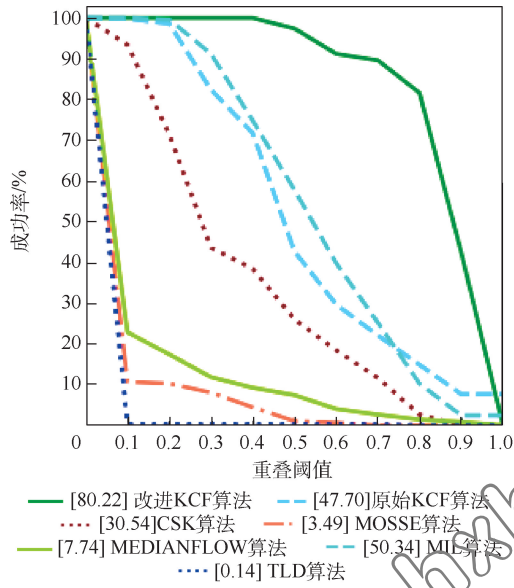
Fig. 3 Precision and success curves of occluded target tracking results in Car1 sequences

视化图像。图 7 中:左上角数字表示视频图像的帧数,蓝色框表示目标的运动区域,其他矩形框表示目标跟踪算法的跟踪结果。

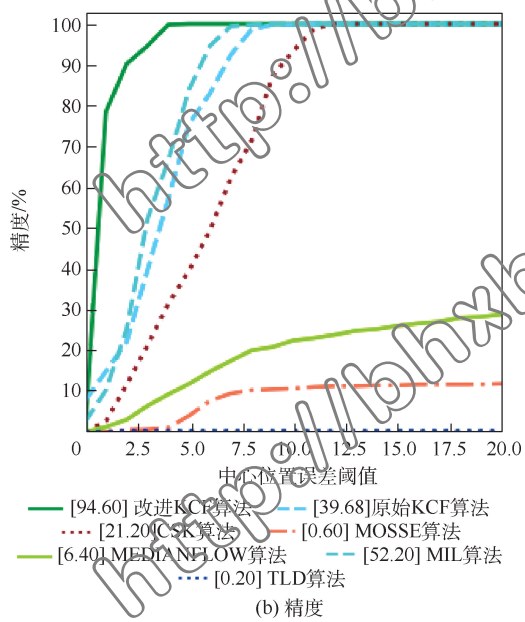
对空中目标(Plane)进行跟踪,从跟踪结果分析可得,图 5 的精度曲线和成功率曲线及表 1 表明,本文算法与其他几种算法相比,成功率和精度都有较大提高,与原始 KCF 算法比较,提高了 30% 和 21%。曲线下面积(AUC)也作为一个跟踪算法性能的评价指标。说明本文算法具有良好的鲁棒性,取得不错的跟踪效果。从图 7 中 Plane 视频序列图像也可以看出,不同算法对目标跟踪的结果不同,对目标进行跟踪时,原始 KCF 算法和 CSK 算法的跟踪结果与改进 KCF 算法跟踪结果相差不大,但随着目标的运动,导致各种算法的误差累积越来越大。从最终结果可以看出,本文算法对空中目标进行跟踪具有不错的效果。

对遮挡目标(Car1)进行跟踪,从跟踪结果分析得出,通过对图 3 和表 2 中跟踪结果的分析可得,本文算法由于引入了卡尔曼滤波,能够对遮挡目标进行较为准确的跟踪,与原始 KCF 算法相比,成功率和精度提高了约 80% 和 70%。从图 7 中 Car1 视频序列中可以得到,当目标在运动过程中,由于目标的尺寸较小,且被大桥遮挡造成目标丢失,最终导致目标跟踪失败。在第 48 帧时,原始 KCF 算法和 CSK 算法可以对未遮挡的目标进行跟踪,取得了不错的结果。而在第 225 帧时,由

http://bhxb.buaa.edu.cn



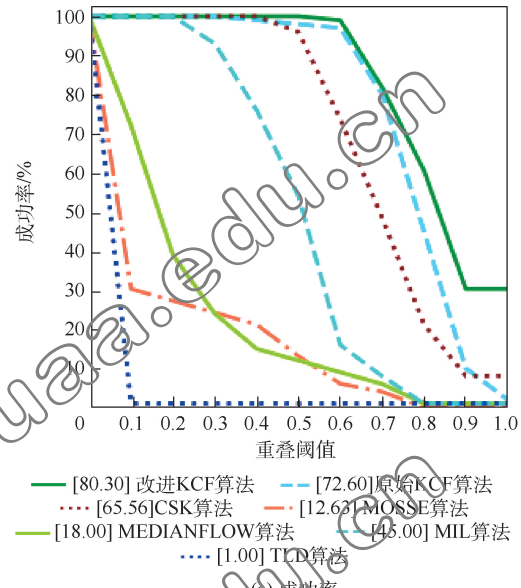
(a) 成功率



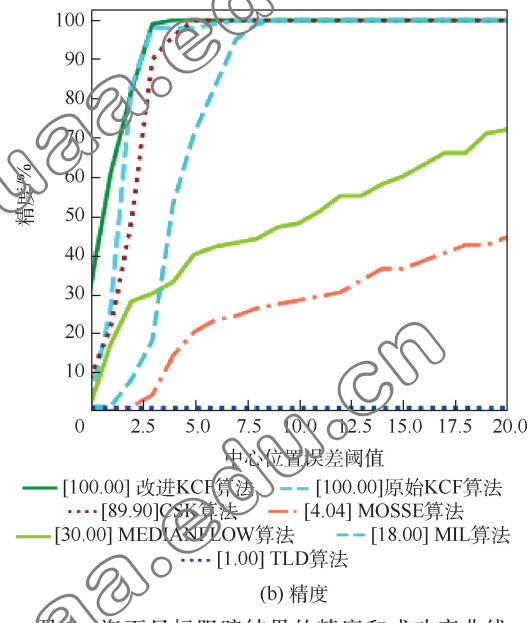
(b) 精度

图 4　运动目标跟踪结果的精度和成功率曲线

Fig. 4　Precision and success curves of target tracking results in Car2 sequences



(a) 成功率



(b) 精度

图 5　海面目标跟踪结果的精度和成功率曲线

Fig. 5　Precision and success curves of target tracking results in Ship sequences

于前期误差的存在,部分算法跟踪的结果出现目标丢失或者漂移,而当目标被遮挡时,由于其他算法没有解决目标遮挡的能力,导致目标重新出现时,无法对目标进行重新跟踪,从而造成目标跟踪失败。本文算法通过引入卡尔曼滤波算法,可以对遮挡的目标进行位置预测,并且设置遮挡阈值,对目标是否遮挡进行判断,如图 8 所示,红色曲线表示阈值,经过多次实验,选取阈值为 18,蓝色曲线表示每一帧的 APCE 值,当 APCE 值小于该阈值时,可以认为目标被遮挡,此时对目标进行位置预测,同时目标不进行模板更新;当 APCE 值大于该阈值时,表示目标并没有被遮挡,此时对目标进行正常跟踪。因此,可以表明本文算法对遮挡目标的跟踪也有不错的效果,从而解决目标遮挡的问题。

对运动目标(Car2)进行跟踪,从跟踪结果分析得到,图 4 和表 3 表明,改进 KCF 算法可以适用于地面的目标跟踪,并且精度和成功率也有较大提高,图 7 中 Car2 视频序列说明了部分算法在第 61 帧时对目标跟踪的结果就出现了偏差,而在第 112 帧及后续出现的帧中都出现了很大的跟踪误差。因此,这几种典型的目标跟踪算法对卫星视频中的小目标进行跟踪存在一定的困难,需要对其进行改进,可能会达到较好的跟踪效果。而本文算法由于对原始 KCF 算法进行改进,提高对目标外观的描述能力,从而提高目标的跟踪结果。

http://bhxb.buaa.edu.cn

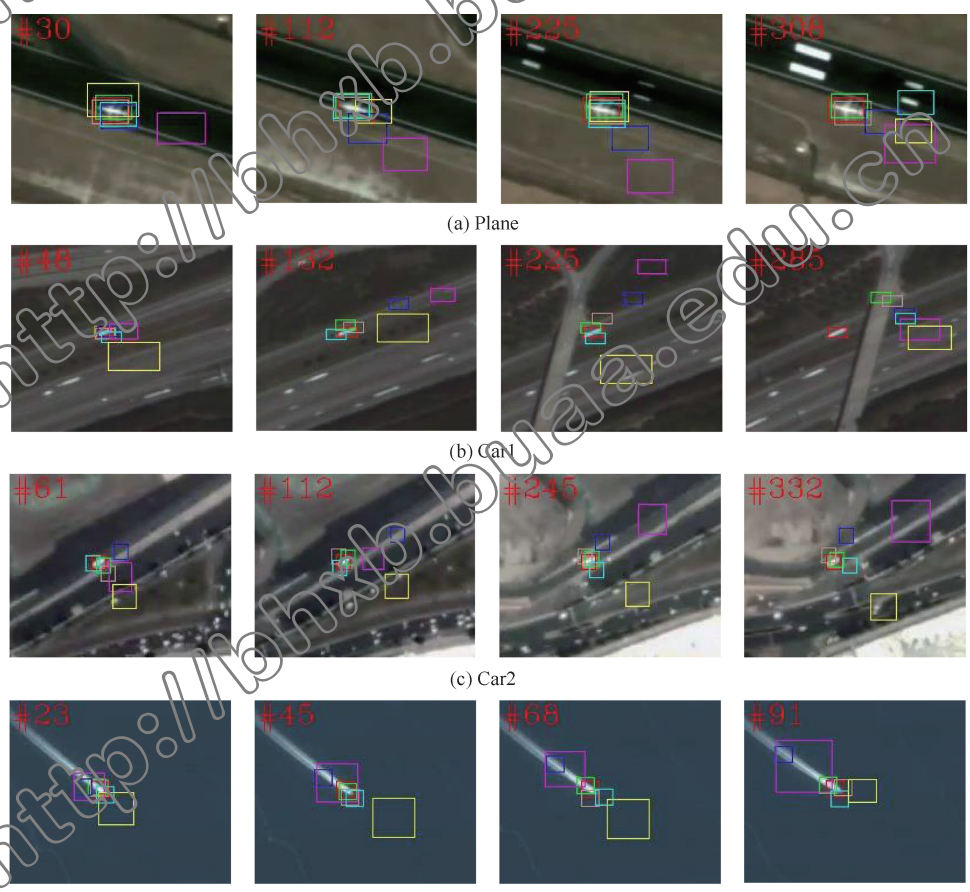


(a) Plane (b) Car1

(c) Ship (d) Car2

图6 卫星视频的运动目标及运动区域

Fig. 6 Moving target and moving area of satellite videos



(a) Plane

(b) Car1

(c) Car2

(d) Ship

改进KCF算法 原始KCF算法 CSK算法 MOSSE算法 MEDIANFLOW算法 MIL算法 TLD算法

图7 目标的可视化跟踪结果

Fig. 7 Visualization tracking results of targets

http://bhxb.buaa.edu.cn

表 1　Plane 视频序列中目标跟踪结果

Table 1　Target tracking results in Plane video sequences

算法	成功率/%	精度/%	AUC/%
改进 KCF 算法	99.47	99.20	86.00
原始 KCF 算法	69.87	78.93	76.83
CSK 算法	72.46	55.08	75.51
MOSSE 算法	1.34	1.87	7.01
MEDIANFLOW 算法	1.07	0.80	1.91
MIL 算法	36.00	32.00	50.77
TLD 算法	0.27	0.27	19.79

表 2　Car1 视频序列中遮挡目标跟踪结果

Table 2　Occluded target tracking results in Car1 video sequences

算法	成功率/%	精度/%	AUC/%
改进 KCF 算法	86.59	97.73	78.41
原始 KCF 算法	5.23	27.50	25.80
CSK 算法	3.42	8.88	17.65
MOSSE 算法	0	3.19	7.59
MEDIANFLOW 算法	0.45	0.68	1.48
MIL 算法	8.86	29.32	29.73
TLD 算法	0.23	0.23	0.23

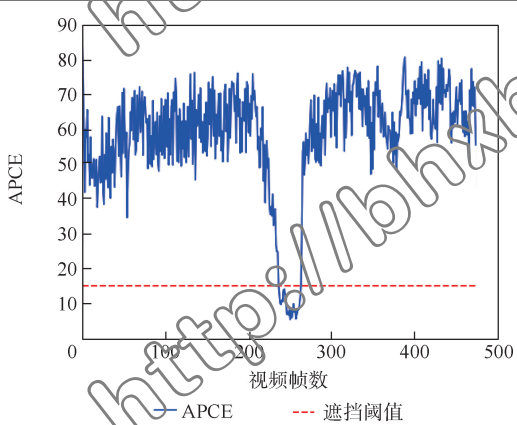


图 8　APCE 值和视频帧数的关系

Fig. 8　Relationship between APCE values and number of video frames

对海面舰船(Ship)目标进行跟踪,并对跟踪结果分析可得,从图 5 和表 4 可以得出,本文算法比原始 KCF 算法在成功率方面提高了约 20%,而在精度方面并没有提高,但这并不能表示本文算法没有效果,而恰恰说明原始 KCF 算法可以对船只进行跟踪也达到了较好的跟踪效果,但从成功率和 AUC 来说,本文算法比原始 KCF 算法效果相比,具有较好的跟踪效果。从图 7 中 Ship 视频序列中可以看出,船只在运动过程中,由于产生很多的波浪,对目标跟踪存在一定的干扰,有可能造成跟踪器对目标误判。而 KCF 算法由于提取的是目标的 HOG 多通道特征,可以对目标进行描述,而本文通过将灰度特征和高斯平均曲率特征融合在一起,进行自适应特征融合,从而对目标的外观进行较为详细的描述,提高目标跟踪的成功率。

表 3　Car2 视频序列中目标跟踪结果

Table 3　Target tracking results in Car2 video sequences

算法	成功率/%	精度/%	AUC/%
改进 KCF 算法	88.0	94.60	80.22
原始 KCF 算法	14.83	39.68	47.70
CSK 算法	2.60	21.20	30.54
MOSSE 算法	0	0.60	3.49
MEDIANFLOW 算法	1.4	6.40	7.74
MIL 算法	10.2	52.20	50.34
TLD 算法	0	0.20	0.14

表 4　Ship 视频序列中目标跟踪结果

Table 4　Target tracking results in Ship video sequences

算法	成功率/%	精度/%	AUC/%
改进 KCF 算法	85.86	100	80.30
原始 KCF 算法	65.00	100	72.60
CSK 算法	47.47	89.90	65.56
MOSSE 算法	0	4.04	12.63
MEDIANFLOW 算法	4.00	30.00	18.00
MIL 算法	7.00	18.00	45.00
TLD 算法	1.00	1.00	1.00

综上,本文算法通过对卫星视频中目标进行跟踪,所获得的精度和成功率都得到极大的提高。

3　结　论

本文提出一种基于改进相关滤波的卫星视频目标跟踪算法,可以对目标进行较为准确的跟踪。

1)通过提取目标的高斯曲率特征,作为补充特征,提高对目标外观的描述能力,经过实验表明,通过提取目标的多种特征,可有效提高目标跟踪的成功率,从而达到稳健的跟踪效果。

2)本文算法通过设计一种自适应特征融合和自适应模型更新的方法,获得鲁棒性的特征和模型,从而提高目标跟踪的精度。

3)本文算法通过引入卡尔曼滤波算法解决目标在运动过程中存在的遮挡问题,通过预测遮挡目标在下一帧中的位置,当遮挡结束目标重新出现时,可以对目标进行较为准确的跟踪,经过在多种卫星视频数据上进行实验验证,可以有效解决目标遮挡的问题。

实验结果表明,在相似目标干扰、目标遮挡及复杂环境下,本文算法均能够对卫星视频中的目标进行跟踪,并且具有良好的鲁棒性。但由于本文实验只考虑了刚性目标,而未对非刚性目标进行处理,当目标发生尺度变化时,本文算法可能会跟丢目标。因此,目标的尺度变化问题将是下一步研究的重点。

http://bhxb.buaa.edu.cn

参考文献（References）

[1] 孟琭,杨旭. 目标跟踪算法综述[J]. 自动化学报,2019,45(7):1244-1260.
MENG L,YANG X. A survey of target tracking algorithms[J]. Acta Automatica Sinica,2019,45(7):1244-1260(in Chinese).

[2] KOPSIAFTIS G, KARANTZALOS K. Vehicle detection and traffic density monitoring from very high resolution satellite video data[C]//2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Piscataway:IEEE Press,2015:1881-1884.

[3] YANG T,WANG X W,YAO B W,et al. Small moving vehicle detection in a satellite video of an urban area[J]. Sensors,2016,16(9):1528.

[4] 赵学敏,马文坡,刘兆军. 低轨卫星面阵凝视成像技术研究[J]. 航天返回与遥感,2007,28(2):10-14.
ZHAO X M,MA W P,LIU Z J. Study on area array staring imaging technology for low-orbit satellite[J]. Spacecraft Recovery and Remote Sensing,2007,28(2):10-14(in Chinese).

[5] BOLME D S,BEVERIDEG J R,DRAPER B A,et al. Visual target tracking using adaptive correlation filters[C]//2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway:IEEE Press,2010:2544-2550.

[6] HENRIQUES J F,CASEIRO R,MARTINS P,et al. Exploiting the circulant structure of tracking-by-detection with kernels[C]// Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Berlin:Springer,2012:702-715.

[7] HENRIQUES J F,CASEIRO R,MARTINS P,et al. High-speed tracking with kernelized correlation filters[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2015,37(3):583-596.

[8] DU B,SUN Y J,CAI S,et al. Target tracking in satellite videos by fusing the kernel correlation filter and the three-frame-difference algorithm[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2018,15(2):168-172.

[9] XUAN S Y,LI S Y,HAN M F,et al. Tracking in satellite videos by improved correlation filters with motion estimations[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2020,58(2):1074-1086.

[10] HU Z P,YANG D Q,ZHANG K,et al. Target tracking in satellite videos based on convolutional regression network with appearance and motion features[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing,2020,13:783-793.

[11] SHAO J,DU B,WU C,et al. PASiam:Predicting attention inspired Siamese network,for space-borne satellite video tracking[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Piscataway:IEEE Press,2019:1504-1509.

[12] MA C Y,YU G. An improved kernel correlation filter for occlusion target tracking[C]// IEEE 4th International Conference on Image,Vision and Computing(ICIVC). Piscataway:IEEE Press,2019:674-678.

[13] HEIMBACH M,EBADI K,WOOD S. Improving target tracking accuracy in video sequences subject to noise and occlusion impediments by combining feature tracking with Kalman filtering[C]//IEEE 52nd Asilomar Conference on Signals,Systems,and Computers. Piscataway:IEEE Press,2018:1499-1502.

[14] 杨剑锋,冰建鹏. 基于核相关滤波的长时间目标跟踪[J]. 激光与光电子学进展,2019,56(2):149-155.
YANG J F,ZHANG J P. Long-term target tracking based on nuclear correlation filtering[J]. Progress in Laser and Optoelectronics,2019,56(2):149-155(in Chinese).

[15] FELZENSZWALB P F,GIRSHICK R B,MCALLESTER D,et al. Target detection with discriminatively trained part-based models[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2010,32(9):1627-1645.

[16] HANBAY K,ALPASLAN N. Continuous rotation invariant features for gradient-based texture classification[J]. IEEE Computer Vision and Image Understanding,2015,132:87-101.

[17] 王鹏,王春平,李军,等. 特征融合和模型自适应更新相结合的相关滤波目标跟踪[J]. 光学精密工程,2016,24(8):2059-2066.
WANG W,WANG C P,LI J,et al. Correlation filter tracking based on feature fusing and model adaptive updating[J]. Optics and Precision Engineering,2016,24(8):2059-2066(in Chinese).

[18] 石龙伟,邓欣,王进,等. 基于光流法和卡尔曼滤波的多目标跟踪[J]. 计算机应用,2017,37(S1):131-136.
SHI L W,DENG X,WANG J,et al. Multiple target tracking based on optical flow and Kalman filtering[J]. Journal of Computer Applications,2017,37(S1):131-136(in Chinese).

[19] KALAL Z, MIKOLAZYK K, MATAS J. Forward-backward error:Automatic detection of tracking failures[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Pattern Recognition. Piscataway:IEEE Press,2010:2756-2759.

[20] BABENKO B,YANG M H,BELONGIE S. Robust target tracking with online multiple instance learning[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2011,33(8):1619-1632.

[21] KALAL Z,MIKOLAZYK K,MATAS J. Tracking-learning-detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2011,34(7):1409-1422.

[22] WU Y,LIM J,YANG M H. Online target tracking:A benchmark[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway:IEEE Press,2013,2411-2418.

http://bhxb.buaa.edu.cn

Feature-fusion and anti-occlusion based target tracking method for satellite videos

LIU Yaosheng[1,2], LIAO Yurong[2], LIN Cunbao[2,*], LI Zhaoming[2], YANG Xinyan[2]

(1. Postgraduate School, Space Engineering University, Beijing 101416, China;
2. Department of Electronic and Optical Engineering, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: Targets in satellite videos are susceptible to occlusion and interference from complex environments, resulting in inaccurate estimation of the target motion state, eventually leading to target tracking failure. Therefore, based on the kernelized correlation filter (KCF) algorithm, two algorithms are designed to improve the success rate of target tracking to achieve robust target tracking. Firstly, extracting the different features (HOG features, gray features and Gaussian curvature features) of the target, then adaptively weighted fusion is carried out on the correlation response of different features of the target, whose purpose is to improve the anti-interference ability of the target against complex environments; Secondly, calculating the weight according to the maximum and average peak correlation energy (APCE) of the target response patch and using it as the confidence level to adaptively update the target model; Finally, the issue of the target being occluded in satellite videos can be resolved by employing the Kalman filter method to anticipate the position of the occluded target after the occlusion of the target is over and reappears. Many experimental results show that the improved correlation filter algorithm has sound effects on target tracking, especially in complex environments, occluded targets, and illumination variation. The success rate and precision have dramatically improved, laying the foundation for further target tracking in satellite videos.

Keywords: satellite videos; correlation filter; adaptive feature fusion and model updating; Kalman filter; target tracking

http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2021-03-29; **Accepted**: 2021-12-27; **Published online**: 2022-02-15 12:24

URL: kns.cnki.net/detail/11.2625.V.20220214.1635.009.html

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61805283)

* **Corresponding author**. E-mail: cunbaolin@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0153

机载 PLC 信道传递函数建模与概率保证分析

戚佳艺, 李峭*, 熊华钢, 严若文
(北京航空航天大学 电子与信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 采用电源线通信(PLC)技术替代部分机载电子设备之间的数据电缆可以简化布线并实现减重。根据机载电源线环境及航空电子通信要求,需要解决信道衰落及噪声干扰条件下 PLC 实时性能评价问题。针对机载电源线的布线拓扑结构,采用"自底向上"构造电压比方程的形式给出了 PLC 信道传递函数的建模方法;推导得出信道传递函数、信道增益和瞬时信道容量之间的关系;在有效容量理论框架下,通过论证积压队列的非空概率与服务质量(QoS)指数的关系,使得能够从瞬时信道容量简便地求得延迟违规概率,用以评价实时性能的概率保证。通过仿真验证了延迟违规概率算法的准确性,并得到不同信道传递函数条件下延迟界限与违规概率的关系,说明了信道衰落显著地影响延迟约束下机载 PLC 系统的概率保证实时通信速率。

关 键 词: 航空电子; 电源线通信; 信道传递函数; 概率保证; 实时性能
中图分类号: V221+.3; TB553
文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2022)12-2548-08

电源线通信(power line communication, PLC)是使用供电用直流或交流电缆传输数据的系统,在家用宽带电源线通信如 HomePlug AV 2.0 中可实现高达 1.5 Gbit/s 的通信速率[1]。目前,PLC 的应用集中于住宅和工业场所。近年来,随着飞机航空电子系统正在向着综合和减重方向发展,工业界不断寻求利用 PLC 技术替代部分数据电缆使飞机减重并降低布线复杂度,呈现出应用潜力。文献[2]探讨了 PLC 在飞机上应用的可行性。文献[3]提出的系统架构将控制电子设备放置在更靠近各个执行器的位置,从而减少了大型飞机的长导线走线。文献[4]研究了如何使用电源线在飞行控制和远程电子设备之间进行数据通信。然而,由于电源线并非按照通信的传输特性而设计,PLC 信道具有较强的频率选择性衰落,对网络拓扑及负载依赖性强;同时存在高背景噪声、脉冲噪声复杂等恶劣因素;且机载应用还必须满足航空安全关键性要求,存在实时约束、电磁兼容问题等多方面限制。PLC 在机载环境中应用的信道建模方法及其性能保证是必须解决的关键问题。

目前,对于 PLC 信道的研究主要包括其物理层的信道衰落及噪声干扰。信道建模方法主要分为自顶而下(top-down)或者自底向上(bottom-up)2 种方案。前者把 PLC 看作一个黑箱,通过分析描述信道的响应并与测量结果相校验,在时域上被称为"回波模型"(echo model)[5-6]。这种方法可以进行快速信道模拟,但是缺乏与物理实现的联系。后者需要完全了解目标电源线网络,包括其拓扑结构,使用的电力线电缆和终端负载阻抗。其中,"ABCD 矩阵"法[7-8]、散射矩阵法[9]及电压比法[10]是常见的"自底向上"建模方法。

PLC 信道的噪声干扰分为多种类型,主要包

收稿日期: 2021-03-29; **录用日期**: 2021-06-29; **网络出版时间**: 2021-07-13 09:32
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210712.1441.005.html
基金项目: 国家自然科学基金 (62071023)
* **通信作者**. E-mail: avionics@buaa.edu.cn

引用格式: 戚佳艺, 李峭, 熊华钢, 等. 机载 PLC 信道传递函数建模与概率保证分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2548-2555. QI J Y, LI Q, XIONG H G, et al. Airborne PLC channel modeling by transfer function and its probabilistic guarantee analysis[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2548-2555(in Chinese).

括有色背景噪声、窄带噪声、工频同步脉冲噪声、工频异步脉冲噪声和随机脉冲噪声[11]。其中,随机脉冲噪声的产生主要是由于电源线网络中的电子设备开关及雷电电击的瞬间干扰,持续时间较短。飞行器的电子设备在复杂的大气环境中应考虑因雷电耦合产生的随机脉冲噪声[12]。

电源线物理层信道衰落对可达通信速率的影响也影响了航电互连的实时通信;而 PLC 系统的实时性能需要对流量排队情况进行分析,必须在数据链路层上结合物理层信道模型进行,并主要围绕服务质量(quality of service, QoS)保证展开。具有借鉴意义的是无线数字通信的处理方法,文献[13]将有效容量引入无线通信性能分析,使 QoS 的概率保证与延迟约束下信道最大可达传输速率联系起来;基于有效容量,学者们分析了多种信道衰落条件下无线通信的延迟性能[14],包括考虑信道随机变量的分布函数是 Fox 的 H 函数的特例,H 变换能够将多个随机变量的代数关系转换为序列的算术运算[15],运用 H 变换进行复杂信道模型下无线通信的有效容量分析[16],易于得出简明的表达式[17]。这些概率保证的分析方法也可被用于指导 PLC 物理层与数据链路层的联合性能分析。

本文的主要贡献在于:①借鉴文献[10]中的信道建模方法,并与机载布线拓扑结构有机结合,给出了一种"自底向上"的机载 PLC 信道传递函数建模方法。②具体化地推导出了信道传递函数、信道增益和瞬时信道容量之间的关系,使 PLC 信道物理层特性与数据链路层实时性能相互关联。③根据有效容量模型,针对积压队列的非空概率和 QoS 指数的简便计算方法[12]给出了具体的论证过程,使得能够从瞬时信道容量简便地求得延迟违规概率,用以评价实时性能的概率保证。④通过仿真实验验证了简便算法的准确性,仿真结果表明,信道衰落显著影响统计延迟约束下可以保证的通信速率。⑤在信道建模与实时性能分析中考虑了噪声干扰的影响。

1　PLC 物理层信道模型

PLC 信道是从发送端接入点到接收端接入点的通信信号传播媒介。调制后的信号由于电源线阻抗不匹配和用电负载的变化产生时变衰落,同时会收到各种噪声干扰。信道模型的基本框图如图 1 所示,包含乘性的信道衰落和加性的信道噪声。

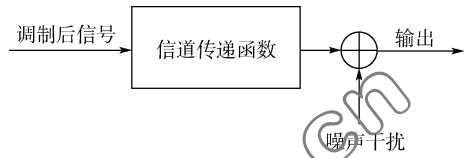


图 1　PLC 信道模型框图

Fig. 1　Block diagram of PLC channel model

1.1　信道传递函数

运用文献[10]提出的"自底向上"的建模方式,具体方法是:设定合理的电源线网络拓扑结构,再利用电压比法进行计算。

飞机的配电系统是复杂的电源线网络结构,是确定性模型和随机模型的组合。本文借鉴文献[4]的设定,根据不同功能区域接口疏密的不同,设定运输机上的布线构型(见图 2)。其中,机翼尾翼上的远程传感器结构较为简单且接口较少,通常每个电子设备直接与相应的配电装置相连,其配置和连接关系的模型参数是确定的。而飞机机身中的航电舱、客货舱等区域的接口较多,电源线网络建模用随机模型表示,每个随机子网络中都有一个配电盒和若干电源接口。该设定的原则不失一般性,应用于具体飞机时可根据实际拓扑同理进行建模计算。

使用电压比法将上述拓扑结构重映射成主干及周围的分支[10]。主干是从发送端到接收端的最短信号路径。每个分支代表一个子网络,每个子网络中的配电盒连接到主干,子网络中的其他接口按照不同的连接方式与配电盒相连。以此类推,可将整个电源线网络重新映射成如图 3 所示树状结构。

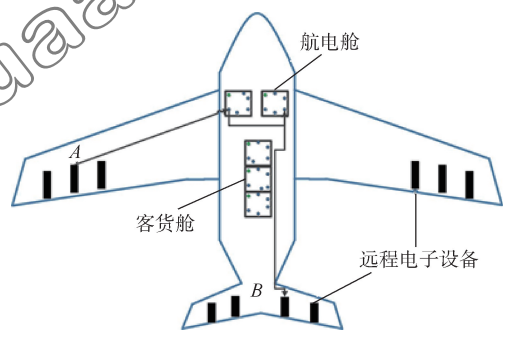


图 2　机载 PLC 拓扑结构示意图

Fig. 2　Schematic diagram of airborne PLC topology

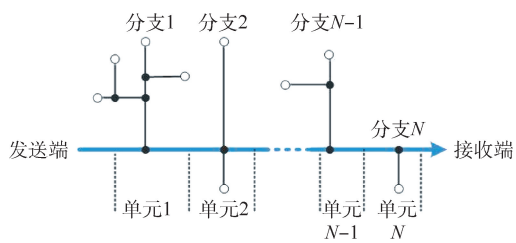


图 3　树状结构

Fig. 3　Tree structure

http://bhxb.buaa.edu.cn

假设电源线信道为 TEM 或准 TEM 传播模式。考虑一段长度为 l 的电源线,其特征阻抗为 Z_C,传播常数为 Γ,终端负载阻抗为 Z_L。根据传输线理论,可以计算出线路输入端的等效阻抗 Z_R,如下:

$$Z_R = Z_C \frac{Z_L + Z_C \tanh(\Gamma l)}{Z_C + Z_L \tanh(\Gamma l)} = Z_C \frac{1 + \rho_L e^{-2\Gamma l}}{1 - \rho_L e^{-2\Gamma l}} \quad (1)$$

式中:$\rho_L = (Z_L + Z_C)/(Z_L - Z_C)$。

在复杂的电源线网络分析中,可以将树状分支上每个单元的电阻化简成只有一级分支的等效阻抗。考虑图 4(a),节点 n_2 上的接口 o_1 和 o_2 分别连接着负载。可根据式(1)计算出节点 n_2 处的等效阻抗,得到图 4(b)中的等效电路。重复该过程,最终获得图 4(c)中电路节点 n_0 的等效阻抗。由此,就将分支上的复杂负载结构化简成与主干直接相连的等效负载。

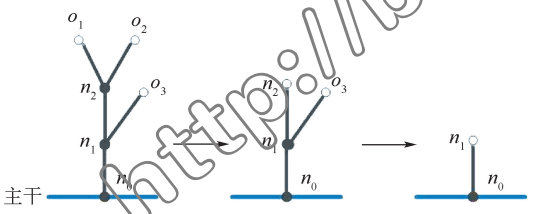


图 4 阻抗化简过程

Fig. 4 Impedance reduction process

如图 5 所示,假设单元 b 是主干中任一单元,并且在其输入端有一并联分支,设该并联分支的负载阻抗为 Z_{Rb}。Z_{Cb} 和 γ_b 分别为长度 l_b 的主干上的特性阻抗和传播常数。连接在节点 n_b 分支的等效阻抗用 Z_{Bb} 表示。根据传输线理论可以写出节点 n_b 和 n_{b-1} 电压的表达式为

$$V_b = V(e^{\Gamma_b l_b} + \rho_{Lb} e^{-\Gamma_b l_b}) \quad (2)$$

$$V_{b-1} = V(1 + \rho_{Lb}) \quad (3)$$

式中:电压常数 V 为与边界条件相关的函数,对于节点 n_b 和 n_{b-1} 相等。

由此,可以写出单元 b 的电压比公式即信道传递函数,如下:

$$H_b = \frac{V_{b-1}}{V_b} = \frac{1 + \rho_{Lb}}{e^{\Gamma_b l_b} + \rho_{Lb} e^{-\Gamma_b l_b}} \quad (4)$$

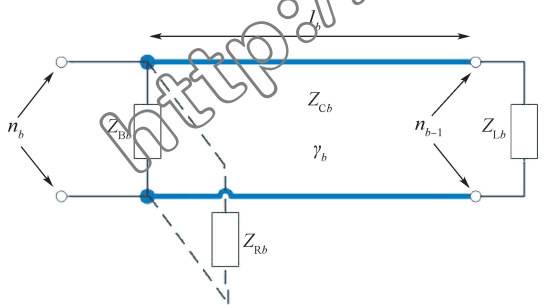


图 5 任一单元 b 的阻抗

Fig. 5 Impedance of any unit b

发送端和接收端节点之间以电压比表示的信道传递函数为每段单元输出输入电压比 H_b 的连乘,表达式为

$$H(f) = \frac{V_0(f)}{V_{N+1}(f)} = \prod_{b=1}^{N+1} H_b(f) \quad (5)$$

1.2 噪声干扰

PLC 信道噪声的主要特点为:①连续性。噪声始终存在。②随机性。噪声的产生通常是由于电力设备开关、雷电干扰等,具有随机性。③多变性。不同时刻电源线网络的噪声强度相差很大,同一时刻电力线网络不同位置上的噪声强度大小也不同。

PLC 信道 100 kHz ~ 30 MHz 的频带上主要包含有色背景噪声、窄带噪声、工频同步脉冲噪声、工频异步脉冲噪声和随机脉冲噪声 5 种。脉冲噪声由于振幅较大且随机性较强,对于通信系统的影响也比较大。飞机上交流电源的工作频率与通常的 50 Hz 电源频率不同,其频率为 400 Hz。故 PLC 信道中会存在相应的 400 Hz 工频同步脉冲噪声及工频异步脉冲噪声。而机载衰落信道条件下需要重点考察的是随机脉冲噪声。

随机脉冲噪声与前 2 种脉冲噪声最大的不同就在于其脉冲的出现并没有周期性,而是随机产生的。随机脉冲噪声的产生主要是由于电源线网络中的电子设备开关及雷电电击的瞬间干扰,一般持续时间较短。飞机在空中受到雷电电击或者高速飞行时与空气摩擦而产生电荷,而这些电荷在释放的过程中就会影响飞机的电力设备及通信系统,产生随机脉冲噪声。由于其作用时间短,频谱很宽,功率谱密度较高,能量较为集中,会给通信质量造成瞬时的恶劣影响。

2 PLC 系统实时性能的概率保证

目前,对于电源线载波通信性能分析的研究大多关注于物理层的信噪比、平均误码率等,很少与链路层乃至更高层的确定性排队理论相结合。而航空电子系统对通信的实时性有严格的要求,因此本文在建立物理层模型后,将电源线载波的性能指标从物理层提升到链路层来考虑,对通信系统的实时性能进行概率保证分析。

2.1 有效容量

Wu 和 Negi[13] 将有效容量的概念引入考虑信道随机模型的无线数字通信系统。有效容量模型是一种基于随机网络演算的信道链路层模型。令 $r(t)$ 为信道香农容量在 t 时刻的瞬时值。定义

http://bhxb.buaa.edu.cn

$S(t) = \int_0^t r(\tau)\mathrm{d}\tau$,$S(t)$为信道提供的服务曲线,仅取决于瞬时信道容量。假设$S(t)$的渐近对数矩生成函数定义为

$$\Lambda(-u) = \lim_{t\to\infty}\frac{1}{t}\ln E[\mathrm{e}^{-uS(t)}] \tag{6}$$

式(6)对于所有 $u>0$ 成立。则将具有瞬时信道容量 $r(t)$ 的实时系统的有效容量函数定义为

$$\alpha(u) = \frac{-\Lambda(-u)}{u} \qquad \forall u \geqslant 0 \tag{7}$$

有效容量函数表征了信道在给定 QoS 保证下可以支持的最大源速率。

设发送端具有完好的信道状态信息(channel state information, CSI),当瞬时信道容量小于需要发送速率时,缓冲待发送的数据。设缓冲区长度为 L,队列缓冲区的积压影响了排队延迟。考虑数据源速率为 μ、缓冲区无限大的队列。通过运用大偏离原理[18]可以证明如果 $\alpha(u)$ 存在,则 $D(\infty)$超过最大延迟界限 $D_{\max}$的概率满足:

$$\sup_t \Pr\{D(t) > D_{\max}\} \approx \gamma(\mu)\mathrm{e}^{-\theta(\mu)D_{\max}} \tag{8}$$

此概率被称为延迟违规概率,设为 P_{vo}。则保证概率 $P_{\mathrm{gua}} = 1 - P_{\mathrm{vo}}$。式(8)中,$\{\gamma(\mu),\theta(\mu)\}$为源速率 μ 的函数,仅取决瞬时信道容量 $r(t)$。对于给定源速率 μ, 可得

$$\gamma(\mu) = \Pr\{D(t) > 0\} \tag{9}$$

式中:$\gamma(\mu)$为缓冲区在任意时间 t 积压队列的非空概率。

QoS 指数 $\theta(\mu)$定义为

$$\theta(\mu) = \mu\alpha^{-1}(\mu) \tag{10}$$

式中:以 $\alpha^{-1}(\mu)$表示有效容量函数 $\alpha(\mu)$的反函数。QoS 指数是衡量 QoS 要求严格程度的参数。

由式(8)可知,通过计算$\{\gamma(\mu),\theta(\mu)\}$即可求得信道的延迟保证概率,从而实现对信道实时性能的分析与评价。由此可见,$\{\gamma(\mu),\theta(\mu)\}$是基于有效容量方法的链路层模型的 2 个核心参数,也被称为有效容量参数。

建立了有效容量模型后,如果直接利用式(10)计算 $\theta(\mu)$需要求出有效容量函数的反函数,计算过程非常繁琐。文献[12]用式(11)对 $\theta(\mu)$进行估算,但该文献及其引用的文献未具体说明推导过程。附录 A 中给出了从式(8)得到式(11)的推导过程。

$$\frac{\gamma(\mu)}{\theta(\mu)} = E[D(t)] = \tau(\mu) + \frac{E[Q(t)]}{\mu} \tag{11}$$

式中:$\tau(\mu)$为正在服务的数据包的平均剩余服务时间;$Q(t)$为在 t 时刻等待排队的流量大小。

由式(11)可以进一步求得 $\theta(\mu)$:

$$\theta(\mu) = \frac{\gamma(\mu)\mu}{\mu\tau(\mu) + E[Q(t)]} \tag{12}$$

这样,式(9)和式(12)即构成积压队列的非空概率 $\gamma(\mu)$和 QoS 指数 $\theta(\mu)$的简便计算公式。

2.2　实时性能的跨层分析

通过建立有效容量模型可以有效地对通信系统的实时性能进行分析。由于 PLC 信道传递函数与无线信道同样是时变的,符合衰落信道的特征,而且与宽带无线通信同样存在由于深度衰落导致通信中断的情况,严重影响了信息传递的及时性。因此,本文采用有效容量模型来对 PLC 信道数据链路层进行建模。但由于现有的电源线并不是按照通信电缆或波导传输线的方式设计,阻抗不匹配和反射会造成信道传递函数的恶劣衰落,使得电源线通信既不同于有线数据通信,也不同于无线互连通信,具有一定的特殊性。因此,在 PLC 的实时性能分析中,需充分考虑电源线物理层信道所具有的频率选择性衰落及随机脉冲噪声的影响,即进行相应的实时性能跨层分析。

文献[12]指出有效容量模型中的积压非空概率 $\gamma(\mu)$与物理层的边际累积分布函数(CDF)有关,QoS 指数 $\theta(\mu)$与多普勒频率扩展有关(信号频谱通过信道后会展宽,尽管这不是像无线通信那样由于相对移动造成,但仍被称为多普勒频率扩展)。但是仅通过 CDF 和多普勒频率扩展无法直接计算出$\{\gamma(\mu),\theta(\mu)\}$。在 PLC 通信中,可以通过信道增益将物理层信道函数与瞬时信道容量建立关系,并根据瞬时信道容量进一步求得$\{\gamma(\mu),\theta(\mu)\}$。瞬时信道容量 $r(t)$ 根据香农容量公式可以表示为

$$r(t) = B_{\mathrm{c}}\log_2(1 + G^2(t)P_0/P_{\mathrm{N}}) \tag{13}$$

式中:B_{c} 为信道总带宽;P_0 和 P_{N} 分别为信号功率和噪声功率;G 为信道增益。

可采用 1.1 节中的建模方法得到信道传递函数 $H(f)$,并根据式(14)由 $H(f)$计算出信道增益的初始增益 G_0[19]:

$$G_0 = \frac{1}{n_2 - n_1}\sum_{i=n_1}^{n_2}|H(iF_{\mathrm{s}})|^2 \tag{14}$$

式中:F_{s} 为采样频率间隔。

在求出初始信道增益 G_0 后,可根据 PLC 信道的时变特性利用一阶自回归模型拟合出信道增益 G_n,G_n 的表达式为

$$G_n = \kappa G_{n-1} + v_n \tag{15}$$

式中:κ 为常数;v_n 为独立同分布的均值为 0、方差为 1 的复高斯变量。常数 κ 的计算过程为:先

http://bhzb.buaa.edu.cn

计算相干时间 $T_c \approx 9/(16\pi f_m)$($f_m$ 为多普勒频率扩展,在本文仿真中取 PLC 通信的典型值 100 Hz[20]),再计算常数 $\kappa = 0.5^{T_s/T_c}$,其中,T_s 为一个 OFDM 符号的持续时间长度。

在求得信道增益 G_n 后,再根据 1.2 节所述的机载电源线的信道噪声环境建立噪声模型,并求出噪声功率 P_N。由此,可以将信道传递函数及噪声干扰这 2 个 PLC 物理层特性与数据链路层的瞬时信道容量相关联。利用瞬时信道容量进一步计算出系统的延迟违规概率,得到通信系统实时性能的概率保证的评价方法。

3 仿真实验与结果分析

3.1 信道传递函数仿真

在图 2 所示的机载 PLC 拓扑结构中选择了由 A 点到 B 点的信道路径作为案例,采用电压比法计算信道传递函数。该案例的路径上包含了飞机机翼上的远程传感器、航电舱中的核心控制设备及机尾的电子传动装置,具有代表性。主要的导线参数设置与物理常数如表 1 所示。

表 1 机载 PLC 信道参数与物理常数

Table 1 Airborne PLC channel parameters and physical constants

参数	数值
导线间距/mm	3
导线半径/mm	1.2
介电常数/(F·m^{-1})	8.85×10^{-12}
真空磁导率/(H·m^{-1})	$4\pi\times10^{-7}$
电导率/(S·m^{-1})	5.8×10^{-7}

如图 2 所示,从 A 点到 B 点的信道中包含 3 段主干单元,需要分别求出 3 段的信道传递函数,再进行连乘得出总的信道传递函数。

各个单元上信道传递函数的具体计算步骤为:运用传输线参数公式计算出单位长度上的电阻 R、电感 L 和电容 C。根据传输线理论,使用 R、L、C 三种参数可以分别计算出特征阻抗和传播常数:

$$Z_C = \sqrt{\frac{R + j2\pi fL}{G + j2\pi fC}} \approx \sqrt{\frac{R + j2\pi fL}{j2\pi fC}} \tag{16}$$

$$\Gamma = \sqrt{j2\pi fC(R + j2\pi fL)} \tag{17}$$

最后,将式(16)和式(17)分别代入电压比公式,即可求出此单元的信道传递数 $H(f)$。

实验中设定的频率范围为 1 ~ 30 MHz,仿真中采样频率间隔为 100 kHz,求得 A 点到 B 点的信道传递函数 $H(f)$,并画出了 $H(f)$ 的幅频曲线(见图 6)。从信道传递函数的幅频曲线可以看出,PLC 信道具有明显的频率选择性。

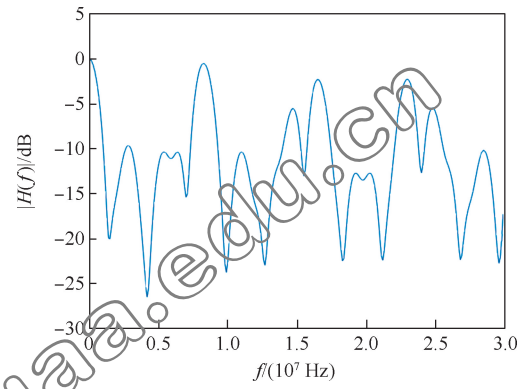


图 6 信道传递函数的幅频曲线

Fig. 6 Amplitude-frequency curve of channel transfer function

3.2 噪声干扰仿真

考虑飞机飞行条件下易受雷电干扰及静电感应等,属于随机脉冲噪声,因此在仿真设置了随机脉冲噪声模型。随机脉冲噪声可以用衰减的正弦信号[21]来表示,随机脉冲噪声的脉冲强度、脉冲间隔、脉冲宽度等在参数服从指数分布,其表达式为

$$N(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}}\sin(2f(t - t_0) + \phi) \tag{18}$$

式中:A 为脉冲幅度;τ 为时间常数,其与脉冲宽度有关,约为脉冲宽度的五分之一;t_0 为脉冲到达时间;f 为衰减正弦波的频率;ϕ 为相位常数。

仿真后得出的随机脉冲噪声的时域响应如图 7所示。

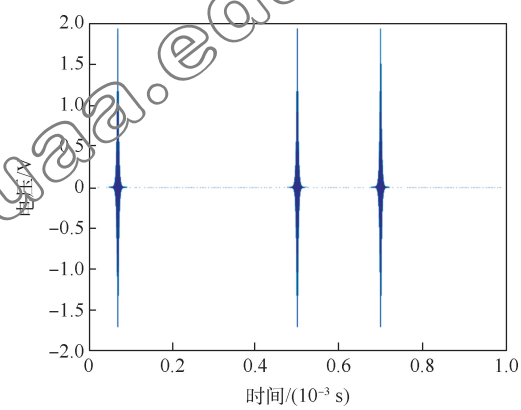


图 7 随机脉冲噪声的时域响应

Fig. 7 Time domain response of random impulse noise

3.3 概率保证分析

在机载 PLC 信道传递函数和噪声干扰的条件下,对机载 PLC 系统的延迟违规概率进行仿真实验并加以分析。根据图 8 所示的离散事件系统进行仿真。在该系统中,设数据源以恒定速率 μ 生成数据包。将生成的数据包发送到发送器的缓冲区,设其队列长度为 Q_n,n 为第 n 个采样间隔。设队列中的行首分组在衰落信道以数据速率 r_n

http://bhxb.buaa.edu.cn

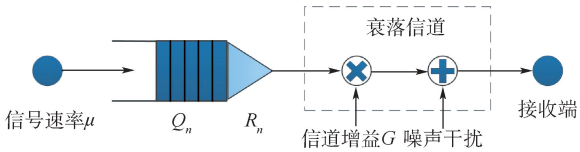


图 8　离散通信系统排队模型

Fig. 8　Queuing model of discrete communication system

传输。假设发射机在每个采样间隔都有比较完备的信道状态信息。因此,可以使用速率自适应传输,假设数据包会被源端的队列缓存而不会由于瞬时的信道衰落而出错。这是一种理想的机会通信的假设条件,使得传输速率 r_n 也就等于衰落信道的瞬时信道容量,根据式(13)可得

$$r_n = r(n) = B_c \log_2(1 + G_n^2 P_0 / P_N) \tag{19}$$

将 3.1 节得到的机载 PLC 信道传递函数 $H(f)$ 代入式(14)计算得到初始信道增益 G_n。根据 PLC 信道的时变特性利用一阶自回归模型拟合出信道增益。在求得信道增益 G_n 后,再根据 3.2 节中仿真出的脉冲噪声模型求得噪声功率 P_N,分别代入式(19)求得瞬时信道容量 $r(t)$。得到 $r(t)$ 后,根据式(12)给出的简便计算方法算出有效容量参数 $\{\gamma(\mu), \theta(\mu)\}$,最终根据式(8)得到系统延迟超过 D_{max} 界限的违例概率 $\sup \Pr\{D(t) \geqslant D_{max}\}$,进而得到保证概率值。

为了与本文提出的分析方法得到的结果相对比,通过离散系统在设定的随机信道条件下进行仿真,并计算出由于排队导致的延迟。仿真中共记录了 10^6 个样本,并以样本的取值超过 D_{max} 的概率作为延迟违规概率的仿真结果。

图 9 给出了不同传输速率下延迟违规概率的仿真结果与分析结果。可以看出,信号发送速率越高,信道的延迟违规概率越大。这是因为:信号发送速率越高,形成的突发传输的绝对数据量就越大,但是信道能够传送的数据量(即瞬时信道容量)是一定的,所以就会造成延迟违规概率增大。该现象也说明本文建立的仿真模型是符合实际排队情况的。此外,由图 9 可以看出,延迟违规概率分析结果与仿真结果接近,说明本文中根据有效容量模型得到的分析方法及其简便计算手段是合理的。

图 10 展示了不同信道增益条件下延迟违规概率仿真结果与最大延迟的关系,可见延迟违规概率的量级与以 dB 为单位的信道增益之间的关系。信道增益 G 与信道传递函数的幅值有式(14)的正相关关系,因此图 10 的仿真结果也说明了信道传递函数的幅值越小,系统的延迟违规概率越大。进一步通过图 11 展示的仿真数据

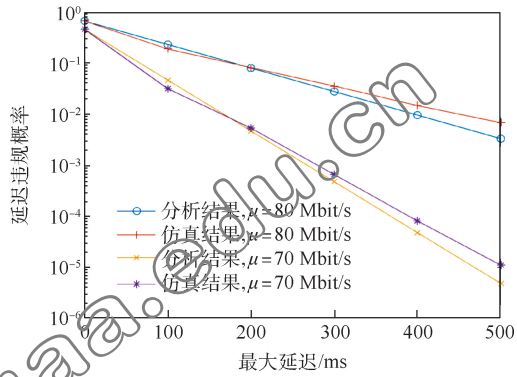


图 9　不同传输速率下延迟违规概率的仿真结果与分析结果

Fig. 9　Simulation results and analysis results of delay violation probability under different transmission rates

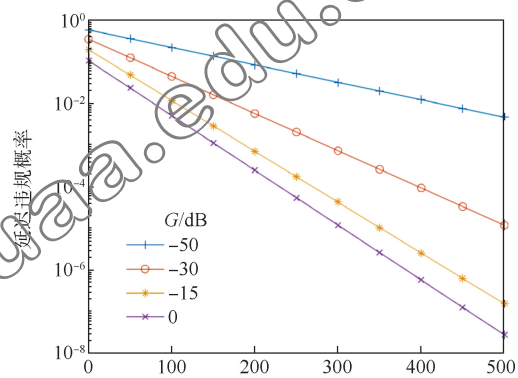


图 10　不同信道增益下延迟违规概率与最大延迟关系

Fig. 10　Relationship between delay violation probability and maximum delay under different channel gain conditions

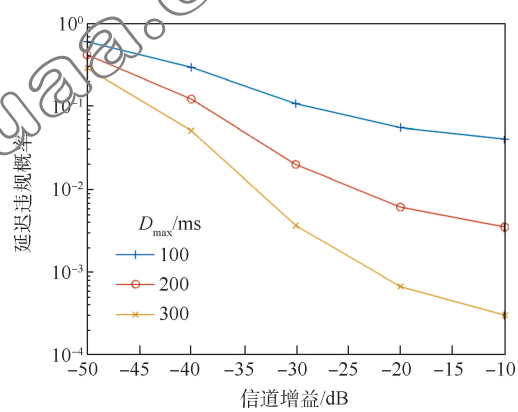


图 11　不同最大延迟下延迟违规概率与信道增益关系

Fig. 11　Relationship between delay violation probability and channel gain under different maximum delay conditions

可以看出,随着信道增益的减小,延迟违规概率随之上升。由于在基于传递函数的 PLC 信道模型中信道增益综合地体现了信道的衰落情况,仿真结果表明信道衰落会显著影响通信系统的实时性能。

http://bkb.buaa.edu.cn

4 结 论

直接利用现有电源线进行通信会由于阻抗不匹配、噪声干扰等因素的影响导致PLC信道条件恶劣,特别是对于考虑延迟约束的机载实时通信。本文考虑了机载电源线网络的信道物理层传递函数,并将其纳入有效容量分析。对于实时通信的概率保证分析,得出了如下结论:

1)利用"自底向上"的信道建模方法,并结合机载电源线拓扑结构仿真出的信道传递函数模型,能够准确地反映出机载PLC信道衰落的频率选择性。

2)在有效容量理论框架下,通过论证积压队列的非空概率与服务质量指数的关系,使得能够在香农容量的基础上简便地求得延迟违规概率,仿真结果与分析结果的比较验证了该分析计算方法的合理性。

3)结合典型的机载PLC案例,对不同传递函数条件下的延迟违规概率进行仿真实验,仿真结果说明信道衰落会显著影响概率保证下通信系统的实时性能。

参考文献(References)

[1] NOUVEL F, LAMPE L. Power line communications: Principles, standards and applications from multimedia to smart grid[M]. 2nd ed. New York: Wiley Publishing, 2016.

[2] DEGARDIN V, JUNQUA I, LIENARD M, et al. Theoretical approach to the feasibility of power-line communication in aircrafts [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(3): 1362-1366.

[3] GODO E L. Flight control system with remote electronics[C]// The 21st Digital Avionics Systems Conference. Piscataway: IEEE Press, 2002, 2: 13B1.

[4] O'BRIEN J, KULSHRESHTHA A. Distributed and remote control of flight control actuation using power line communications [C]// IEEE/AIAA 27th Digital Avionics Systems Conference. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1. D. 4-1-1. D. 4-12.

[5] TANG L T, SO P L, GUNAWAN E, et al. Characterization and modeling of in-building power lines for high-speed data transmission[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 69-77.

[6] PHILIPPS H. Modeling of powerline communication channels [C]// Proceedings of 3rd International Symposium on Power-Line Communications and its Applications, 1999: 14-21.

[7] GALLI S, BANWELL T C. A deterministic frequency-domain model for the indoor power line transfer function[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(7): 1304-1316.

[8] ESMAILIAN T, KSCHISCHANG F R, GULAK P G. In-building power lines as high-speed communication channels: Channel characterization and a test channel ensemble[J]. International Journal of Communication Systems, 2003, 16(5): 381-400.

[9] MENG H, CHEN S, GUAN Y, et al. Modeling of transfer characteristics for the broadband power line communication channel [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1057-1064.

[10] TONELLO A M, VERSOLATTO F. Bottom-up statistical PLC channel modeling—Part I: Random topology model and efficient transfer function computation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 891-898.

[11] 周海勇. 飞机电力线载波数据通信关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
ZHOU H Y. Research on key technologies of aircraft power line carrier data communication[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005(in Chinese).

[12] BIGLIERI E. Coding and modulation for a horrible channel [J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(5): 92-98.

[13] WU D, NEGI R. Effective capacity: A wireless link model for support of quality of service[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2(4): 630-643.

[14] AMJAD M, MUSAVIAN L, REHMANI M H. Effective capacity in wireless networks: A comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(4): 3007-3038.

[15] JEONG Y, SHIN H, WIN M Z. H-transforms for wireless communication[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2015, 61(7): 3773-3809.

[16] YOU M, SUN H, JIANG J, et al. Unified framework for the effective rate analysis of wireless communication systems over MISO fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(4): 1775-1785.

[17] ALHENNAWI H R, EL AYADI M M H, ISMAIL M H, et al. Closed-form exact and asymptotic expressions for the symbol error rate and capacity of the *H*-function fading channel[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(4): 1957-1974.

[18] CHOUDHURY G L, LUCANTONI D M. Squeezing the most out of ATM[J]. IEEE Transactions on Communications, 1996, 44(2): 203-217.

[19] TONELLO A M, VERSOLATTO F. Bottom-up statistical PLC channel modeling—Part II: Inferring the statistics[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2356-2363.

[20] CORRIPIO F, ARRABAL J, DEL RIOL D, et al. Analysis of the cyclic short-term variation of indoor power line channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(7): 1327-1338.

[21] 台新. 电力线通信信道噪声分析与建模仿真[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
TAI X. Analysis and simulation for the noise in power line communication channel[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013(in Chinese).

附录A:式(11)的证明

设延迟$D(t)$的概率密度为$f(t)$,由式(8)可得

http://bhxb.buaa.edu.cn

$$\Pr\{D(t) \geqslant D_{\max}\} = \int_{D_{\max}}^{+\infty} f(t)\,\mathrm{d}t = \gamma \mathrm{e}^{-\theta D_{\max}}$$

求解积分可得:$f(t) = \gamma\theta \mathrm{e}^{-\theta t}$。

再求出 $D(t)$的期望:

$$E[D(t)] = \int_0^{+\infty} tf(t)\,\mathrm{d}t = \int_0^{+\infty} t\gamma\theta \mathrm{e}^{-\theta t}\mathrm{d}t = -\gamma t\mathrm{e}^{-\theta t} - \frac{\gamma}{\theta}\mathrm{e}^{-\beta t} + C \Big|_0^{+\infty} = \frac{\gamma}{\theta}$$

延迟时间 $D(t)$可分为正在服务的数据包的平均剩余服务时间 $\tau(\mu)$和等待排队流量的服务时间 $E[Q(t)]/\mu$。式(11)得证。

Airborne PLC channel modeling by transfer function and its probabilistic guarantee analysis

QI Jiayi, LI Qiao*, XIONG Huagang, YAN Ruowen

(School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Wiring can be made simpler and lighter by using power line communication (PLC) technology to replace some of the data cables used to connect avionics systems. According to airborne power line environment and avionics communication requirements, it is necessary to solve the problem of evaluating the real-time performance of PLC under the conditions of channel fading and interference. First of all, according to the wiring topology of the power lines in a certain aircraft, a modeling method of the PLC channel by transfer function is achieved in the form of a "bottom-up" construction with voltage ratio equations. Subsequently, the relationship between the transfer function, channel gain and instantaneous Shannon capacity is deduced. According to the effective capacity theory, by exploiting the relationship between the non-empty probability of the backlog queue and the quality of service (QoS) factor, it is possible to easily obtain the delay violation probability from the instantaneous Shannon capacity to evaluate the probabilistic guaranteeing of real-time performance. Simulation results verify the accuracy of our models and analysis to estimate the delay violation probabilities, and show the relationship between the delay limit and the violation probability under different channel transfer functions. They also demonstrate how the channel fading significantly affects the sustained real-time rate for airborne PLC systems under the probabilistic guaranteeing delay constraint.

Keywords: avionics; power line communication; channel transfer function; probability guarantee; real-time performance

Received: 2021-03-29; **Accepted**: 2021-06-29; **Published online**: 2021-07-13 09:32

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210712.1441.005.html

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (62071023)

* **Corresponding author**. E-mail: avionics@buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0155

基于 ELMo-GCN 的核电领域命名实体识别

荆鑫[1], 王华峰[1,2,*], 刘潜峰[3], 罗嗣梧[2], 张凡[4]

(1. 北方工业大学 信息学院, 北京 100144; 2. 北京航空航天大学 软件学院, 北京 100191;
3. 清华大学 核能与新能源技术研究院, 北京 100084; 4. 太原理工大学 软件学院, 太原 030024)

摘 要: 在核电领域的知识管理过程中,需要使用命名实体识别技术抽取高质量语义实体,以进行核电领域文本的智能分析和处理。在现有研究的基础上,通过增强网络对上下文信息的提取能力,提升模型对嵌套命名实体的识别准确率。经实验验证,所提方法较现有方法在准确率与召回率指标上提升显著,与 BiFlaG 网络对比,准确率提高 9.52%,召回率提高 8.51%,F_1 值提高 9.02%。所提方法对嵌套命名实体识别优于 BiFlaG 等网络。

关 键 词: 命名实体识别; 核电; 双向语言模型; 图卷积神经网络; 自注意力机制
中图分类号: TP391
文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2022)12-2556-10

新智能时代向工业 5.0 新形态演进的进程已经全面启动[1]。在《中国能源革命进展报告(2020)》中提出,要加速融合新一代信息技术与能源技术,推动多能互补智慧能源系统建设步伐[2]。在这一进程中,需要对数十年核电发展所积累的信息进行处理、分析和管理,以达到提升工作效率、优化产业结构的目的。因此,如何从海量的非结构化文本信息中提取到有用信息,是计算机智能技术在核电领域应用的难点。这里便需要用到自然语言处理(natural language processing, NLP)技术对其文本数据进行语义理解和语义分析。

NLP 作为人工智能的子领域,是将人类交流所使用的语言通过某种算法转化为机器可以理解的机器语言的技术。其中,命名实体识别(named entity recognition, NER)是 NLP 中一个重要的文本预处理工具,其主要作用是识别出文本中表示命名实体(named entity, NE)的成分,并对其进行分类,故而也被称为命名实体识别和分类(named entity recognition and classification, NERC)。而由于核电领域本身的特殊性,NER 任务缺乏相应的研究。

早期的命名实体任务主要针对以英语为主的印欧语系,该任务仅限于一个或多个严格指示词的实体,严格指示词包括专有名称及某些自然类术语,如生物物种和物质[3]。随后,NER 任务转为一般意义上的“专有名称”,研究最多的就是“Person”、“Location”与“Organization” 3 种实体类型,这些类型统称为“Enamex”。直到 1995 年第六次信息理解会议(MCU)明确将“命名实体”定义为研究对象,此后 NER 便成为一项单独的研究任务。在定义这一任务时,研究人员发现某些命名实体是文本中的重要信息单元,这就诞生了命名实体最初的 7 种实体类型:“Person”、“Organization”和“Location”,以及“Time”、“Date”、“Currency”、“Percentage”的数字表达式[4]。在实验过程中,研究者们发现以上7 种实体类型无法满足研究需要,因此,结合实际添加了一系列细粒度实体子类型。例如,Fleischman[5]与 Lee 等[6]将“Lo-

收稿日期: 2021-03-30; **录用日期**: 2021-05-31; **网络出版时间**: 2021-07-13 17:04
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210713.1416.001.html
基金项目: 北京市教育委员会科研计划(KM202110009001); 河北省科研计划(203777116D)
* **通信作者**. E-mail: wanghuafeng@buaa.edu.cn

引用格式: 荆鑫, 王华峰, 刘潜峰, 等. 基于 ELMo-GCN 的核电领域命名实体识别[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2556-2565. JING X, WANG H F, LIU Q F, et al. Named entity recognition in nuclear power field based on ELMo-GCN[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2556-2565(in Chinese).

cation”划分为多个细粒度实体子类型:“City”、“State”、“Country”等;Fleischman 与 Hovy[7] 将“Person”的细粒度实体子类型划分为“Politician”、“Entertainer”等;Bodenreider 和 Zweigenbaum[8] 将“Person”与“Drug”、“Disease”相结合进行命名实体分类。

目前,由于 NER 技术在一些开放数据集中已经取得了很高的准确率,部分学术界学者认为 NER 技术并不具备进一步的研究价值。但是,在当前研究中,NER 研究面临着诸多问题需要解决:

1) 数据来源与处理问题。核电相关的大部分资料(如检查报告、设计方案及日程安排等)均不能进行公开的研究,因此在数据来源的选择方面可参考内容少,数据范围小,在核能领域中的 NER 技术研究更是稀缺。同时在研究中,还需考虑如何有效地对核安全文本中的命名实体进行分类。

2) 文本类型对 NER 任务有着很大的影响。诸如核电、生物医学领域的文本数据中,频繁出现的技术词汇、特定术语及其缩写、不完整句子等,直接导致网络模型无法像通用数据集一样构建全面合理的实体特征,神经模型的预测结果与通用数据集相差甚远[9]。

3) NER 研究中存在的具有挑战性的问题,如嵌套命名实体识别(nested named entity recognition,Nested NER)、歧义文本及标注语料数据老旧等[10]。嵌套命名实体(nested named entity,Nested NE)是一种特殊形式的命名实体,即在一个命名实体的内部还存在一个或多个其他类型的命名实体,层次结构较为复杂,传统的基于序列标注的 NER 网络模型不能很好地解决 Nested NER 任务。

针对现今核电领域 NER 研究面临的挑战,本文主要贡献如下:

1) 研究伊始面临的主要问题是缺乏数据集。考虑到核安全相关的大部分资料不能进行公开的研究,基于数据特征具有代表性和数据易于搜集 2 个方面,本文以核反应堆相关基础理论作为基础文本数据。在命名实体分类过程中,本文参考了核反应堆方面的相关研究,对现有文本数据进行分类,得到“专有名词类”、“冷却与冷却剂类”、“燃料与材料类”与“反应堆类”四大类。此外,本文还通过 BIO 数据标注方式对搜集到的文本数据进行标注,得到标记数据 141 057 条。

2) 针对 Nested NER 问题,本文在现有研究的基础上,提出了结合动态、张量的图卷积神经网络模型(graph convolutional neural network model with dynamic tensor, DTGCN),模型中加入了句子处理器,通过提取句中的动态张量并计算的方式,获取上下文信息,同时使用 Self-Attention 模型学习句子中实体之间的依赖关系,获取句子的内部结构信息。之后经由 GCN 网络,利用核电语料中实体的内部关系与相邻关系,完成核电命名实体的细粒度识别,进而处理 Nested NER 问题。

3) 构建校正模块进行后处理,基于命名实体类型的特征制定规则,并使用该规则对网络预测结果中的实体类型正确而边界判断错误的情况进行校正,以提高模型的容错率。

1　相关理论与方法

研究人员在 NER 工作中已经取得了一定的进展。Goller 和 Kuchler[11] 使用循环神经网络(recurrent neural network, RNN),使模型可以变长输入且具有长期记忆,但由于 RNN 结构本身的缺陷,存在梯度消失和梯度爆炸的问题。Hammerton[12] 首次将长短记忆网络(long short-term memory, LSTM)应用于 NER,LSTM 网络中使用遗忘门、记忆门结合的方式,成功避免了梯度消失和梯度爆炸问题。2015 年,Huang 等[13] 在 LSTM 的基础上,使用 BiLSTM + CRF 模型,正向 LSTM 获取“过去特征”,反向 LSTM 获取“未来特征”,由此对上下文信息作出进一步发掘。Peters 等[14] 利用双层 LSTM,提出基于语言模型的上下文相关的词向量表示(embeddings from language model, ELMo),得到的 ELMo 词向量具有更深层次的语义表征,但由于 LSTM 本身的结构约束,一旦输入语句序列过长,模型的学习能力将大幅下降。

2014 年,Sutskever 等[15] 在研究过程中首次引入 Attention 机制。2017 年,Vaswani 等[16] 提出了 Transformer 结构,通过 Self-Attention 计算词与词之间的关系权重,使每个词都有全局的语义信息。2019 年,Devlin 等[17] 提出了基于 Transformer 的双向编码器(bidirectional encoder representation from Transformer, BERT)模型。BERT 在 11 项 NLP 任务中表现优异,在其他网络模型最优指标的基础上有了新的突破。不过,BERT 模型依然存在一定缺陷:①数据总量要求高,若总量不够,则最终训练效果较差;②运算量大,BERT 中的 BERT-Base 模型参数为 1.1 亿,BERT-Large 模型的参数更是达到 3.4 亿,计算量大,所需成本高。

在 NER 研究中,Nested NE 广泛存在于多种

http://bhxb.buaa.edu.cn

语料之中。例如,以蛋白质和 DNA 等实体类型标记的 GENIA 语料库[18],Nested NE 占全部命名实体的 17%;西班牙语和加泰罗尼亚语报纸的 AnCora 语料库中[19],Nested NE 占 50%左右;在 ACE-2004 中,42% 的句子包含 Nested NE,Nested NE 占比达 47%[20]。

对于 Nested NE 的研究一直在进行。Finkel 和 Manning[21]提出了一种基于条件随机场(conditional random field, CRF)的分区解析器,将句子作为解析树,句中单词和每个事宜相对应的短语作为解析树的叶子,该解析树还将词性包含其中,以此共同对实体和词性进行建模;Alex 等[22]提出将多模型级联的方式,分别为多组实体提供训练。此外,Lu 和 Dan[23]提出了一种基于超图的模型来解决 Nested NER 问题,通过输入给定的字符序列,获取内部所有的实体指代关系,计算得出分数最高的输出路径;Xia[24]提出了多粒度 NER 模型来解决 Nested NER 问题,该模型分为检测器和分类器 2 部分,检测器负责检测所有可能的实体位置,分类器则将检测到的实体进行分类;Luo 和 Zhao[25]结合 LSTM 与 GCN,将 LSTM 部分作为最外层实体信息提取工具,再由 GCN 结合实体关系图抽取实体信息。

2 结构模型

如图 1 所示,DTGCN 模型主要分为 2 部分,即外部模块(OuterModule)和内部模块(InnerModule),分别学习外层实体信息和内部实体信息。核电语料集中的实体(Word)和语句(Sentence)分别进入外部模块的字处理器(Word Processor)和句子处理器(Sentence Processor)。字处理器负责提取单个字的信息及输入语句中字与字之间的关系,主要使用 BiLSTM 网络;句子处理器是以整个句子的层面进行信息提取,主要通过生成动态张量的方式,得到命名实体在不同语义环境下不同的张量特征,以此增加网络对实体上下文信息的提取能力;通过 Self-Attention 模块获取实体之间的相关度信息。

内部模块使用 GCN 将实体与实体间的关系建模(其中 Adjacency Graph Model 和 Entity Graph Model 部分分别对外部实体和内部实体进行处理),通过迭代其传播信息,学习内部实体特征。GCN 将其学习到的信息输入到 CRF 模块,对预测结果进行分类。通过校正模块(Corrected Module)对预测结果中实体类型正确而边界判断错误的情况进行校正。

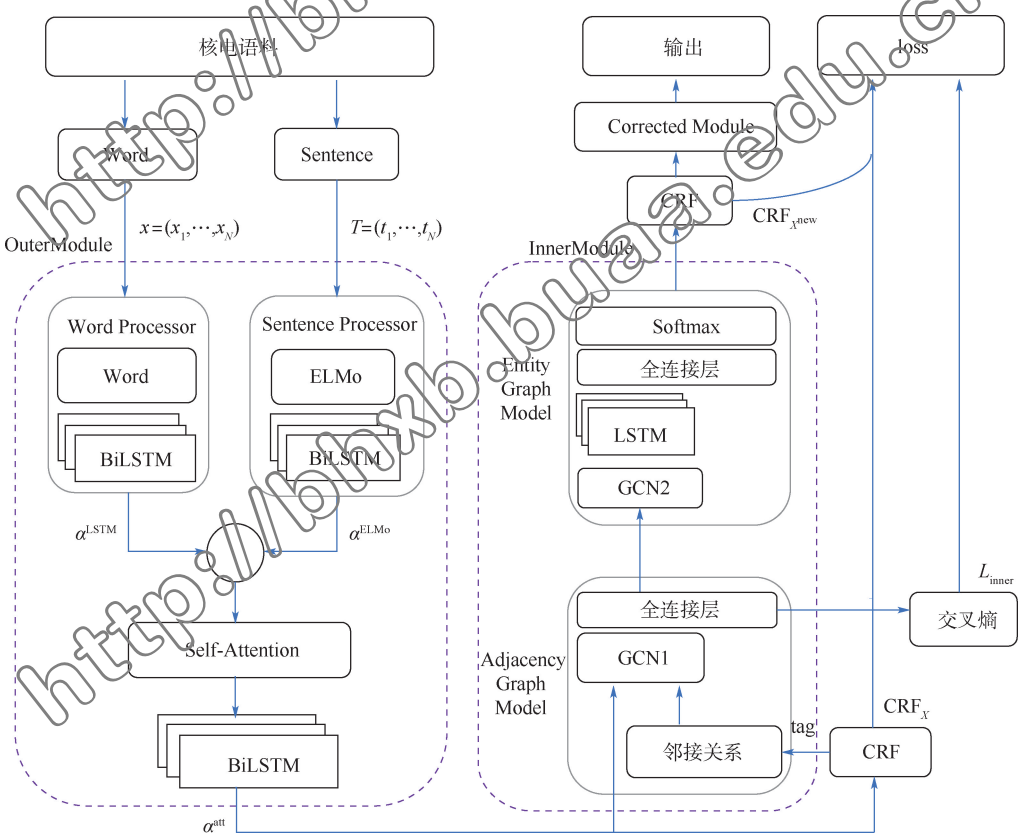


图 1 DTGCN 网络模型

Fig. 1 DTGCN network model

http://bhxb.buaa.edu.cn

2.1　数　据

由于目前没有开放的核电数据集,笔者手动构建了一个语料集用于研究。本文数据来自于核反应堆相关基础理论分析[26-27],对实体分为4 类:“专有名词类”(NOU)、“冷却与冷却剂类”(COO)、“燃料与材料类”(FUE)与“反应堆类”(REA)。

由图 2 和表 1 可知,核电语料集共 8 023 句 141 057 字,所用汉字 1 384 个,其中专有名词类实体 684 个,所用汉字 407 字,114 字无嵌套关系,占 28%;燃料与材料类实体 207 个,所用汉字 197 字,54 字无嵌套关系,占 27%;冷却与冷却剂类实体1 365个,所用汉字 491 字,146 字无嵌套关系,占 30%;反应堆类实体 251 个,所用汉字 232 字,37 字无嵌套关系,占 16%。此外,表 1 还统计了每个实体的数量及实体的出现频率,出现频率统计了对应类型实体出现的总次数,便于从数据方面对不同网络模型中实体分类结果进行分析。

综上,核电语料集中 Nested NE 占总实体的 68%,远高于 GENIA[18]、AnCora[19]、ACE-2004[20] 等语料库中 Nested NE 所占比例,因而进行 NER 研究的难度也更高。

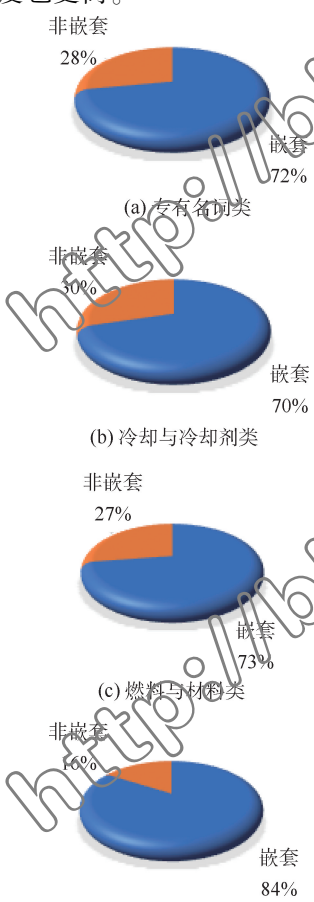


图 2　核电语料中嵌套命名实体比例

Fig. 2　Proportion of nested named entities in nuclear power corpus

核电语料通过 BIO 实现对序列数据的联合标注,如表 1 所示,其中,“B-”表示命名实体中的第1 个字,“I-”表示命名实体中间字和结尾字,“O”表示非实体字符,核电语料实体标注示例如图 3 所示。

表 1　核电语料实体标注方法及实体数量和出现频率

Table 1　Nuclear power corpus labeling methodology, count, and frequency of appearance

实体类型	实体开始	实体内部及结尾	实体数量	出现次数
专有名词类	B-NOU	I-NOU	684	3 548
冷却与冷却剂类	B-COO	I-COO	1 365	6 894
燃料与材料类	B-FUE	I-FUE	207	1 198
反应堆类	B-REA	I-REA	251	2 134

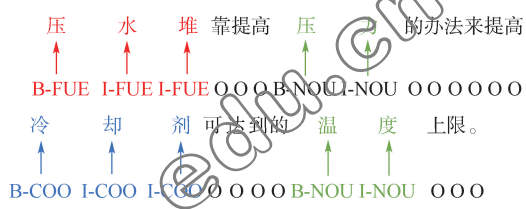


图 3　核电语料命名实体标注示例

Fig. 3　Example of nuclear power corpus named entity labeling

2.2　字处理器

文字中存在着的隐藏信息往往隐含在上下文中,体现在字与字之间的前后关系上。因此,本文模型使用 BiLSTM 作为字处理器,提取单个字的信息及输入语句内字与字之间的关系。

给定一个包含 N 个字符的输入语句 $T=(t_1,t_2,\cdots,t_N)$,对每个字符 $t_k(1\leqslant k\leqslant N)$ 进行字嵌入后表示为:$x_k=[w_k]$,w_k 为预训练获得的字嵌入模型。

$$i_k=\sigma(W_{ii}x_k+b_{ii}+W_{hi}h_{k-1}+b_{hi}) \tag{1}$$

$$f_k=\sigma(W_{if}x_k+b_{if}+W_{hi}h_{k-1}+b_{hf}) \tag{2}$$

$$g_k=\tanh(W_{ig}x_k+b_{ig}+W_{hg}h_{k-1}+b_{hg}) \tag{3}$$

$$o_k=\sigma(W_{io}x_k+b_{io}+W_{ho}h_{k-1}+b_{ho}) \tag{4}$$

$$C_k=f_k\otimes C_{k-1}+i_k\otimes g_k \tag{5}$$

$$h_k=o_k\otimes\tanh(C_k) \tag{6}$$

如图 4 所示,结合式(1)~式(6),$\boldsymbol{W}$ 和 $\boldsymbol{b}$ 为 LSTM 的参数,$\boldsymbol{W}$ 为权重向量,$\boldsymbol{b}$ 为偏置向量,σ 为激活函数,$\otimes$表示正交,i_k、f_k和o_k分别代表 k 时刻的输入门、遗忘门和输出门,C_k、h_k和g_k分别表示 LSTM 中的细胞状态、隐藏状态和新状态。x_k经过 BiLSTM 的输出得到 k 时刻字符的隐藏状态h_k(其中包含前向隐藏状态$\overrightarrow{h_k}$和后向隐藏状态$\overleftarrow{h_k}$):

$$\overrightarrow{h_k}=\mathrm{LSTM}(x_k,\overrightarrow{h_{k-1}}) \tag{7}$$

$$\overleftarrow{h_k}=\mathrm{LSTM}(x_k,\overleftarrow{h_{k+1}}) \tag{8}$$

$$h_k=[\overrightarrow{h_k};\overleftarrow{h_k}] \tag{9}$$

因此,字符信息x_k通过字处理器后得到 LSTM 输出特征 $\alpha^{\mathrm{LSTM}}\in\mathbf{R}^{N\times d_l}$($d_l$ 为 BiLSTM 隐藏层大小):

$$\alpha^{\mathrm{LSTM}}=\mathrm{BiLSTM}(x_k) \tag{10}$$

http://bhxb.buaa.edu.cn

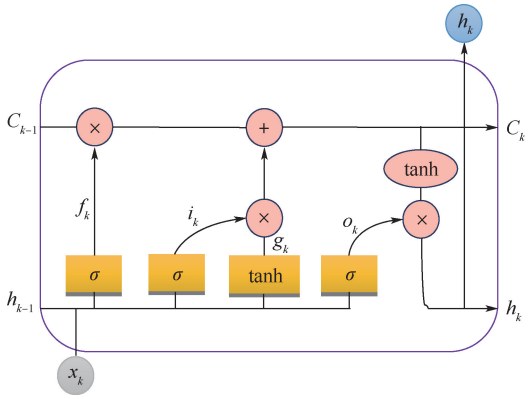


图 4 LSTM 结构

Fig. 4 Structure of LSTM

2.3 句子处理器

同样的词在不同的语境条件下,表达含义有所不同。传统的 Word2Vec 或 Glove 方式生成的词向量模型是固定的,这显然不符合实际语境的使用情况。基于此,模型中使用 ELMo[14] 作为句子处理器,生成动态张量,使实体在不同语境下生成不同的特征张量,以获取更加丰富的上下文信息。

对于输入语句 $T=(t_1,t_2,\cdots,t_N)$,前向语言模型通过$(t_1,t_2,\cdots,t_{k-1})$条件下 $t_k(1<k\leqslant N)$的概率建模计算整个序列的概率:

$$p(t_1,t_2,\cdots,t_N)=\prod_{k=1}^{N}p(t_k\mid t_1,t_2,\cdots,t_{k-1}) \tag{11}$$

后向语言模型也是同理:

$$p(t_1,t_2,\cdots,t_N)=\prod_{k=1}^{N}p(t_k\mid t_{k+1},t_{k+2},\cdots,t_N) \tag{12}$$

综上,最大似然函数为

$$\sum(\lg p(t_k\mid t_1,t_2,\cdots,t_{k-1};\theta_x,\overrightarrow{\theta_{\mathrm{LSTM}}},\theta_s)+\lg p(t_k\mid t_{k+1},t_{k+2},\cdots,t_N;\theta_x,\overleftarrow{\theta_{\mathrm{LSTM}}},\theta_s)) \tag{13}$$

式中:θ_x 为字符向量的参数;θ_s 为 Softmax 层的参数。

ELMo 是 BiLSTM 的中间层表示任务的特定组合,对于每一个x_k,一个 L 层双向语言模型可以得到 $2L+1$ 个结果。

$$R=\{x_k^{\mathrm{LM}},\overrightarrow{h_{k,j}^{\mathrm{LM}}},\overleftarrow{h_{k,j}^{\mathrm{LM}}}\mid j=1,2,\cdots,L\}=\{h_{k,j}^{\mathrm{LM}}\mid j=0,1,\cdots,L\} \tag{14}$$

式中:$h_{k,0}^{\mathrm{LM}}$ 为 Embedding 层,$h_{k,j}^{\mathrm{LM}}=[\overrightarrow{h_{k,j}^{\mathrm{LM}}};\overleftarrow{h_{k,j}^{\mathrm{LM}}}]$ 为 BiLSTM 层。

而在通常情况下,查找字符向量的方法仅为查找表中的字符提供一层表示。

$$\mathrm{ELMo}_k=\gamma\sum_{l=0}^{L}u_jh_{k,l}^{\mathrm{LM}} \tag{15}$$

式中:ELMo_k 为字符t_k的 ELMo 词向量;u 为 Softmax 的正则化权重;γ 为缩放因子,允许任务模型缩放整个 ELMo 向量。

ELMo 模型输出含有上下文信息的结果 α^{ELMo}:

$$\alpha^{\mathrm{ELMo}}=\mathrm{ELMo}(t_k) \tag{16}$$

2.4 自注意力模块

对上下文字信息建模的方式一般是将所有字符表示形式连接起来或取平均值,但是当存在许多不相关的上下文词汇信息时,这一方式的结果并不理想。为了选取高度相关的上下信息,采用 Sself-Attention 模型[16] 来获取上下文与实体之间的关联性。

$$\mathrm{Attention}(\boldsymbol{Q},\boldsymbol{K},\boldsymbol{V})=\mathrm{softmax}\left(\frac{\boldsymbol{QK}^{\mathrm{T}}}{\sqrt{d_k}}\right)\boldsymbol{V} \tag{17}$$

式中:$\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{K}$、$\boldsymbol{V}$ 三个矩阵来自同一输入;d_k 为 $\boldsymbol{Q}$ 和 $\boldsymbol{K}$ 向量的维度。

Self-Attention 计算后可得

$$\alpha^{\mathrm{cat}}=\alpha^{\mathrm{LSTM}}\oplus\alpha^{\mathrm{ELMo}} \tag{18}$$

$$\alpha^{\mathrm{att}}=\mathrm{Self_Attention}(\alpha^{\mathrm{cat}}) \tag{19}$$

式中:α^{cat} 为将 α^{LSTM} 与 α^{ELMo} 的拼接结果;⊕表示将 2 个特征进行拼接;α^{att} 为 Self-Attention 模型输出的含有实体间相关程度的信息。

2.5 条件随机场

LSTM 等模型得出的结果是字符对应各个类型的分数,最高分数对应的类型便是预测结果。然而这样的分类方式忽略了字符对应于其他类型的分数,经常会预测出一些非合法实体类型情况(如“B-ORG I-PER”)。

CRF 是给定一组输入序列条件下另一组输出序列的条件概率分布模型[28]。通过 CRF 加入一些约束来保证最终预测结果的正确性,这些约束可以在训练数据的过程中被 CRF 自动学习。CRF 的最终得分是通过计算转移特征概率和状态特征概率实现的。目前,CRF 已经广泛应用于诸多 NER 模型(如文献[29-31])。

输入特征向量为 $\boldsymbol{\alpha}=(\alpha_1,\alpha_2,\cdots,\alpha_N)$,其对应的标签序列(tag)为 $Y=\{y_1,y_2,\cdots,y_N\}$,定义分数为

$$\mathrm{score}(\boldsymbol{\alpha},Y)=\sum_{i=0}^{N-1}\boldsymbol{A}_{y_i,y_{i+1}}+\sum_{i=1}^{N}\boldsymbol{P}_{\alpha_i,y_i} \tag{20}$$

式中:$\boldsymbol{A}_{y_i,y_{i+1}}$ 为转移矩阵,表示从标签 y_i 到标签 y_{i+1} 的传输得分;$\boldsymbol{P}_{\alpha_i,y_i}$ 为经过 LSTM 编码后的 α_i 字符的 y_i 标签的得分。

CRF 定义了在所有可能的标签序列 Y 上的条件概率 $p(y_i\mid\alpha_i)$ 为

$$p(y_i\mid\alpha_i)=\frac{\mathrm{e}^{\mathrm{score}(\alpha_i,y_i)}}{\sum_{y'\in Y}\mathrm{e}^{\mathrm{score}(\alpha_i,y')}} \tag{21}$$

训练过程中,使用最大条件似然估计方法,选择使对数似然 L 最大化的参数,并使用一阶 Viterbi 算法在输入序列上找到得分最高的标签序列,

http://bhxb.buaa.edu.cn

求解最优路径:

$$y^* = \arg\max_{y' \in Y}(\boldsymbol{\alpha}, y') \tag{22}$$

2.6　图卷积神经网络

区别于日常的图片,本文的“图”是一种数据格式,可以用于表示各种具有抽象意义的拓扑关系网络,如通信网络、蛋白分子网络、社交网络等,图中的节点表示网络中的个体,边表示个体间的连接关系。传统的卷积主要针对欧氏数据空间,而在非欧氏数据空间无法保持“平移不变性”。为了提取和挖掘非欧氏数据空间的有效空间关系进行建模学习,Kipf 和 Welling[32] 引入了 GCN。

在 GCN 中,每个图都可以定义为 $\boldsymbol{G} = (\boldsymbol{Z}, \boldsymbol{E})$,$\boldsymbol{Z}$ 为节点(字)的集合,$\boldsymbol{S}$ 为边(关系)的集合。图中第 l 层输出特征 $\boldsymbol{H}^{(l)}$ 计算如下:

$$\boldsymbol{H}^{(l)} = \sigma(\tilde{\boldsymbol{D}}^{-\frac{1}{2}}\tilde{\boldsymbol{A}}\tilde{\boldsymbol{D}}^{-\frac{1}{2}}\boldsymbol{H}^{(l-1)}\boldsymbol{W}^{(l-1)}) \tag{23}$$

$$\tilde{\boldsymbol{A}} = \boldsymbol{A} + \boldsymbol{I}_N \tag{24}$$

$$\tilde{\boldsymbol{D}}_{ii} = \sum_j \tilde{\boldsymbol{A}}_{ij} \tag{25}$$

式中:第 l 层网络的输入为 $\boldsymbol{H}^{(l-1)} \in \mathbf{R}^{N\times D}$(初始输入为 $\boldsymbol{H}^{(0)} = \boldsymbol{X}$),$N$ 为图中节点数量(即句子长度),每个节点使用 D 维特征向量表示;$\tilde{\boldsymbol{A}}$ 为添加了自连接的邻接矩阵,$\boldsymbol{A}$ 为邻接矩阵,$\boldsymbol{I}_N$ 为单位矩阵;$\tilde{\boldsymbol{D}}$ 为度矩阵;$\boldsymbol{W}^{(l-1)} \in \mathbf{R}^{D\times D}$ 为待训练参数;σ 为激活函数。

本文中,在这一基础上加入偏置,可以得图特征为

$$f = \mathrm{ReLU}(\tilde{\boldsymbol{D}}^{-\frac{1}{2}}\tilde{\boldsymbol{A}}\tilde{\boldsymbol{D}}^{-\frac{1}{2}}(\boldsymbol{W}\alpha + \boldsymbol{b})) \tag{26}$$

式中:$\boldsymbol{W}$ 为权重,$\boldsymbol{b}$ 为偏置,均为可训练参数;α 为输入 GCN 网络的实体特征;ReLU 为非线性激活函数。

本文中,G^1 和 G^2 分别为对于实体的实体相邻图和关系图的图网络(见图 5 和图 6)。G^2 中,对于从外部模块中提取的实体中的所有节点,在任意 2 个节点 $e_{ij} = (v_i, v_j)$ 之间添加边,start $\leqslant i < j \leqslant$ end,其中包含最外层实体信息;G^1 中,主要是对于句子中相邻实体字符,从左到右添加一个有向边,从而可以利用局部上下文信息。

$$f = \boldsymbol{W}_c(\boldsymbol{f}^1 \oplus \boldsymbol{f}^2) + \boldsymbol{b} \tag{27}$$

式中:$\boldsymbol{f}^1$ 和 $\boldsymbol{f}^2$ 分别为 G^1 和 G^2 的图特征;$\boldsymbol{W}_c \in \mathbf{R}^{d_f \times \frac{d_f}{2}}$、$\boldsymbol{b}_c \in \mathbf{R}^{d_f}$ 分别为权重和偏置参数,可以通过模型进行训练,d_f 为 GCN 隐藏层层数。

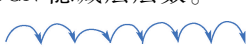


图 5　G^1 实体相邻图

Fig. 5　Entity adjacent graph (G^1)

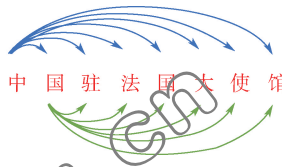


图 6　G^2 实体关系图

Fig. 6　Entity relationship graph (G^2)

通过 GCN 获取图特征 $\boldsymbol{F} = \{f_1, f_2, \cdots, f_N\}$ 后,可以求得内层的实体得分 $\boldsymbol{M} \in \mathbf{R}^{N\times N\times L}$:

$$M_{ij} = \mathrm{softmax}(\boldsymbol{W}_3\mathrm{ReLU}(\boldsymbol{W}_1\boldsymbol{f}_i \oplus \boldsymbol{W}_2\boldsymbol{f}_j)) \tag{28}$$

式中:$\boldsymbol{W}_1, \boldsymbol{W}_2 \in \mathbf{R}^{d_f \times \frac{d_f}{2}}$,$\boldsymbol{W}_3 \in \mathbf{R}^{d_f \times L}$,$L$ 为实体类型数量;$M_{ij} \in \mathbf{R}^L$ 表示范围的类型概率从 t_i 开始到 t_j 结束。对于内部实体,将字符(t_i,t_j)中的真实实体定义为 $\hat{M}_{ij}$,t_i 为起点,t_j 为终点。计算交叉熵(cross entropy)得

$$L_{\text{inner}} = -\left[\sum(\hat{M}_{ij}\lg(M_{ij}))\cdot I(O) + \sum(\hat{M}_{ij}\lg(M_{ij}))\right](1 - I(O)) \tag{29}$$

式中:$I(O)$ 用来区分非实体“O”和其他实体类型的损失,定义如下:

$$I(O) = \begin{cases} 1 & \text{type} = \text{“O”} \\ 0 & \text{type} \neq \text{“O”} \end{cases} \tag{30}$$

对于外层实体,采用 CRF 计算损失,CRF_X 为外部模块获取的最外层实体损失,$\mathrm{CRF}_{X^{\text{new}}}$ 为经过 GCN 提取后的最外层实体损失:

$$L_{\text{outer}} = \mathrm{CRF}_X + \mathrm{CRF}_{X^{\text{new}}} \tag{31}$$

模型预测最外层实体和内部实体,损失定义为

$$\text{loss} = (1 - \lambda_1)L_{\text{outer}} + \lambda_1 L_{\text{inner}} \tag{32}$$

式中:λ_1 为外部模块和内部模块损失之间的权重。

2.7　实体校正模块

校正模块属于后处理内容。神经网络最后的输出结果一般为字符对应各个类型的分数。由于模型预测的部分结果并不准确,即使经过 CRF 处理,也依然会出现一些实体类型正确而边界判断错误的情况。假设网络经过一系列运算后,最终得到的是一个 $m \times n$ 的向量,m 为当前输入模型的句子长度,n 为实体类型数量,则该 $m \times n$ 的向量是模型对这一语句每个字所属类型的评分,最高评分所在列的索引就是模型预测的实体类型。

实际预测结果中,会出现一些实体类型正确而边界判断错误的情况。以图 7 中“轻水堆”为例,预测结果为“9　9　9”(对应标签为“I-REA I-REA I-REA”),对照表 2,该实体属于“反应堆类”,实体类型判断正确,但“轻水堆”的实际类型应该是“8　9　9”(对应标签为“B-REA I-REA I-REA”)。

http://bhxb.buaa.edu.cn



图 7 核电语料实体类型对比

Fig. 7 Comparison of nuclear power corpus entity types

表 2 实体类型编号对照

Table 2 Table of entity type number

类型	命名	编号
非实体	O	1
专有名词类	B-NOU	2
	I-NOU	3
冷却与冷却剂类	B-COO	4
	I-COO	5
燃料与材料类	B-FUE	6
	I-FUE	7
反应堆类	B-REA	8
	I-REA	9

3 实验结果与分析

3.1 实验参数设置

实验中,随机划分 60% 的语料作为训练集,20% 作为测试集,20% 作为开发集。字向量维度为 50 维,迭代次数 epoch 为 50 次,梯度下降学习率为 0.000 1,学习率衰减因子为 0.8,使用 Adam 优化算法加快收敛速度,以交叉熵计算模型损失函数。

3.2 实验指标

模型评价采用准确率 P、召回率 R 和 F_1 值作为评价指标,其中 F_1 值综合了准确率和召回率,可以体现模型的均衡性,各项指标计算公式为

$$P=\frac{\mathrm{TP}+\mathrm{TN}}{\mathrm{TP}+\mathrm{TN}+\mathrm{FP}+\mathrm{FN}} \tag{33}$$

$$R=\frac{\mathrm{TP}}{\mathrm{TP}+\mathrm{FP}} \tag{34}$$

$$F_1=\frac{2PR}{P+R} \tag{35}$$

式中:TP 为正类预测为正类数;TN 为负类预测为负类数;FP 为负类预测为正类数(误报);FN 为正类预测为负类数(漏报)。

3.3 实验结果比较

表 3 将本文模型与其他模型在核电数据集中进行比较。结果表明,本文模型在各项指标均优于其他模型。与本文模型相比,常用的 LSTM 模型[12]对于 Nested NER 预测效果差,无法对文中的实体进行准确识别;BiFlaG[25]的侧重点偏向于实体间的关系,忽略了句子中上下文信息的提取;BiLSTM + CRF[13]对 Nested NER 所占比例大的语料中命名实体的分词能力有限,无法获取实体与实体之间的关系;MGNER 模型[24]中预测实体后,根据实体内部关系进行细粒度判断,这样的判断方式更加适用于英文。

总的来看,本文模型相较 MGNER,P 提高 6.31%,R 提高 7.6%,F_1 提高 6.95%;相较BiFlaG,P 提高 9.52%,R 提高 8.51%,F 提高9.02%,网络各方面性能均优于其他网络。

表 4 对 BiFlaG 模型和 MGNER 模型在核电数据集中的 4 种分类进行了详细比较。从结果来看,3 个模型对“专有名词类”(NOU)的识别准确率最高,而“燃料与材料类”(FUE)识别准确率较差。从数据的角度分析这一情况,在“专有名词类”实体中,Nested NER 在文本中的词频较低,因而在训练过程中对网络判断造成的干扰不大,结果正确率普遍较高;“燃料与材料类”的实体识别效果不佳,是由于该类命名实体在文本中,数量及出现频率都低于其他 3 类,直接导致在神经网络训练过程中,神经网络对该类命名实体类型判断出现误判,导致准确率较低。

表 3 模型实验结果对比

Table 3 Comparison of model experimental results

%

模型	P	R	F_1
LSTM[12]	52.47	50.26	51.34
BiLSTM + CRF[13]	60.63	70.63	65.25
ELMo[14]	67.98	70.12	69.03
BiFlaG[25]	71.73	73.81	72.76
MGNER[24]	74.94	74.72	74.83
DTGCN	81.25	82.32	81.78

http://bhxb.buaa.edu.cn

表 4　分类结果对比

Table 4　Comparison of classification results　　%

分类	DTGCN			BiFlaG[25]			MGNER[24]		
	P	R	F_1	P	R	F_1	P	R	F_1
NOU	90.7	76.3	82.9	73.4	69.2	71.2	83.8	65.5	73.5
COO	82.7	90.8	86.6	72.3	81.8	76.7	73.5	84.1	78.4
FUE	60.0	66.7	63.2	71.7	53.0	60.9	48.0	59.9	53.3
REA	79.9	68.8	74.5	82.4	63.0	71.4	80.4	76.7	78.5

3.4　消融实验

本文使用 ELMo 从句子的角度获取实体信息,用 Self-Attention 获取实体与句中其他实体的依赖关系,校正模块则将模型预测结果中实体类型正确而边界判断错误的情况进行校正。本节进行消融实验验证其有效性。表 5 中,“①”指本文模型本身;“②”指 Self-Attention,不含ELMo与校正模块;“③”指 ELMo,不含 Self-Attention 与校正模块;“④”指校正模块,不含 Self-Attention 与 ELMo;“⑤”指 Self-Attention 与校正模块;“⑥”指校正模块与ELMo;“⑦”指 Self-Attention 与 ELMo。总的来看,自注意力模块对网络的准确率 P 提高为 1.03%;ELMo 对网络准确率 P 提高为1.81%;校正模块对网络准确率 P 提高为 2.96%。

表 5　消融实验结果

Table 5　Experimental results of abiation　　%

序号	P	R	F_1
①	81.25	82.32	81.78
②	74.53	77.47	75.97
③	75.31	76.51	75.90
④	76.46	79.10	77.76
⑤	78.10	77.29	77.69
⑥	78.61	79.67	79.13
⑦	77.22	80.73	78.94

4　结　论

1) 本文完成了数据搜集工作,其主要来源是反应堆热工分析与反应堆物理分析,这些数据在很大程度上可以代表核安全文本的数据特征,且不涉密、资料多,是理想的研究对象。

2) 完成了数据的分类工作,主要分为“专有名词类”、“冷却与冷却剂类”、“燃料与材料类”与“反应堆类”四大类。“冷却与冷却剂类”实体数量最多,有 1 365 个,“燃料与材料类”实体数量最少,仅 207 个。同时完成了语料的标注工作,标注数据 8 023 句 141 057 条。

3) 通过对比实验,验证多个网络在当前数据集中的性能。结合研究中遇到的嵌套命名实体问题,在现有研究的基础上进行改进,得到 DTGCN 网络。网络中包含外部模块和内部模块,2 个模块分别学习外部实体信息和内部实体信息,结合规则判定的方法对实体类型正确而边界判断错误的预测结果进行校正。实验结果表明,本文模型对于嵌套命名实体的识别效果优于其他模型,在准确率与召回率指标上提升显著,如较 BiFlaG 模型,准确率提高 9.52%,召回率提高8.51%,F_1 值提高 9.02%。

参考文献 (References)

[1] 王心默,孙奇,江国进,等. 核能 5.0:智能时代的核电工业新形态与体系架构[J]. 自动化学报,2018,44(5):922-934.
WANG F Y, SUN Q, JIANG G J, et al. Nuclear energy 5.0: New formation and system architecture of nuclear power industry in the new IT era[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(5):922-934(in Chinese).

[2] 国务院发展研究中心资源与环境政策研究所. 中国能源革命进展报告(2020)[M]. 北京:石油工业出版社,2020.
Institute of Resources and Environmental Policy, Development Research Center of the State Council. The energy development report of China(2020)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2020(in Chinese).

[3] KRIPKE S, DAVIDSON D, HARMAN G. Naming and necessity[M]. Cambridge: Harvard University Press, 1980:253-355.

[4] CHINCHOR N. MUC-6 named entity task definition[C]//Conference on Message Understanding, 1995.

[5] FLEISCHMAN M. Automated subcategorization of named entities[C]//Association for Computational Linguistic, 2001.

[6] LEE S, LEE G. Heuristic methods for reducing errors of geographic named entities learned by bootstrapping[C]//Natural Language Processing. Berlin: Springer, 2005, 3651:658-669.

[7] FLEISCHMAN M, HOVY E. Fine grained classification of named entities[C]//Proceedings of the 19th International Conference on Computational Linguistics, 2002:1-7.

[8] BODENREIDER O, ZWEIGENBAUM P. Identifying proper names in parallel medical terminologies[J]. Studies in Health Technology and Informatics, 2000, 77:443-447.

[9] SHEN D, ZHANG J, ZHOU G D, et al. Effective adaptation of a hidden Markov model-based named entity recognizer for biomedical domain[C]//Proceedings of the ACL 2003 Workshop on Natural Language Processing in Biomedicine, 2003, 13: 49-56.

[10] GOYAL A, GUPTA V, KUMAR M. Recent named entity recog-

http://bhxb.buaa.edu.cn

nition and classification techniques: A systematic review[J]. Computer Science Review, 2018, 29: 21-43.

[11] GOLLER C, KUCHER A. Learning task-dependent distributed representations by backpropagation through structure[C]// Proceedings of International Conference on Neural Networks. Piscataway: IEEE Press, 1996, 1: 347-352.

[12] HAMMERTON J. Named entity recognition with long short-term memory[C]// Proceedings of the 7th Conference on Natural Language Learning, 2003, 4: 172-175.

[13] HUANG Z H, XU W, YU K. Bidirectional LSTM-CRF models for sequence tagging[EB/OL]. (2015-08-09)[2021-03-01]. https://arxiv.org/abs/1508.01991.

[14] PETERS M, NEUMANN M, IYYER M, et al. Deep contextualized word representations[C]// Proceedings of the 2018 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, 2018, 1: 2227-2237.

[15] SUTSKEVER I, VINYAL S O, LE Q V. Sequence to sequence learning with neural networks[C]// Proceedings of the 27th International Conference on Neural Information Processing Systems. Cambridge: MIT Press, 2014, 2: 3104-3112.

[16] VASWANI A, SHAZEER N, PARMAR N, et al. Attention is all you need[C]// Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems, 2017: 5998-6008.

[17] DEVLIN J, CHANG M W, LEE K, et al. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding[C]// Proceedings of the 2019 Conference of the North, 2019, 1: 4171-4186.

[18] KAZAMA J, MAKINO T, OHTA Y, et al. Tuning support vector machines for biomedical named entity recognition[C]// Proceedings of the ACL-02 Workshop on Natural Language Processing in the Biomedical Domain, 2002, 3: 1-8.

[19] TAULÉ M, MARTÍ M A, RECASENS M. AnCora: Multilingual and multilevel annotated corpora[C]// LREC 2008, 2008: 96-101.

[20] DODDINGTON G R, MITCHELL A, PRZYBOCKIM A, et al. The automatic content extraction (ACE) program-tasks, data, and evaluation[C]// LREC 2004, 2004: 837-840.

[21] FINKEL J R, MANNING C D. Nested named entity recognition[C]// Proceedings of the 2009 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, 2009, 1: 141-150.

[22] ALEX B, HADDOW B, GROVER C. Recognising nested named entities in biomedical text[C]// Proceedings of the Workshop on BioNLP 2007 Biological, Translational, and Clinical Language Processing, 2007: 65-72.

[23] LU W, DAN R. Joint mention extraction and classification with mention hypergraphs[C]// Proceedings of the 2015 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, 2015: 857-867.

[24] XIA C Y, ZHANG C W, YANG T, et al. Multi-grained named entity recognition[C]// Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, 2019: 1430-1440.

[25] LUO Y, ZHAO H. Bipartite flat-graph network for nested named entity recognition[C]// Proceedings of the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, 2020: 6408-6418.

[26] 于平安, 朱瑞安, 喻真烷, 等. 核反应堆热工分析[M]. 3版. 上海: 上海交通大学出版社, 2002.
YU P A, ZHU R A, YU Z W, et al. Nuclear reactor thermal analysis[M]. 3th ed. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2002(in Chinese).

[27] 谢仲生, 吴宏春, 张少鸿. 核反应堆物理分析(修订版)[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
XIE Z S, WU H C, ZHANG S H. Nuclear reactor physical analysis(Revised Edition)[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2020(in Chinese).

[28] LAFFERTY J D, MCCALLUM A, PEREIRA F C N. Conditional random fields: Probabilistic models for segmenting and labeling sequence data[C]// Proceedings of the 18th International Conference on Machine Learning. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 2001: 282-289.

[29] LAMPLE G, BALLESTEROS M, SUBRAMANIAN S, et al. Neural architectures for named entity recognition[C]// Proceedings of the 2016 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, 2016: 260-270.

[30] MA X Z, HOVY E. End-to-end sequence labeling via bi-directional LSTM-CNNs-CRF[C]// Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, 2016, 1: 1064-1074.

[31] YANG J, ZHANG Y. NCRF + +: An open-source neural sequence labeling toolkit[C]// Proceedings of ACL 2018, 2018: 74-79.

[32] KIPF T N, WELLING M. Semi-supervised classification with graph convolutional networks[EB/OL]. (2017-02-22)[2021-03-01]. https://arxiv.org/abs/1609.02907v3.

http://bhxb.buaa.edu.cn

Named entity recognition in nuclear power field based on ELMo-GCN

JING Xin[1], WANG Huafeng[1,2,*], LIU Qianfeng[3], LUO Siwu[2], ZHANG Fan[4]

(1. School of Information Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;
2. School of Software, Beihang University, Beijing 100191, China;
3. Institute of Nuclear and New Entergy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
4. College of Software, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In the process of knowledge management in nuclear power, it's necessary to use named entity recognition to extract high-quality semantic entities for intelligent analysis and processing of text in nuclear power. On the basis of existing research, the recognition precision rate of the model for nested named entities is improved by enhancing the ability of the network rate to extract context information. The experimental results show that the proposed method improves the precision and recall rate significantly compared with the existing methods. Compared with the BiFlaG network, the precision rate is increased by 9.52%, the recall rate is increased by 8.51%, and the F_1 value is increased by 9.02%.

Keywords: named entity recngnition; nuclear power; embeddings from language model; graph convolutional networks; self attention

http://bhxb.buaa.edu.cn
http://bhxb.buaa.edu.cn
http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2021-03-30; **Accepted**: 2021-05-31; **Published online**: 2021-07-13 17:04

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210713.1416.001.html

Foundation items: Beijing Municipal Commission of Education Scientific Research Program (KM202110009001); Scientific Research Program of Hebei Province (203777116D)

* **Corresponding author**. E-mail: wanghuafeng@buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0164

一种新的基于信号导频的射频指纹识别方法

曾盛[1], 朱丰超[1,*], 杨剑[2]

(1. 火箭军工程大学 作战保障学院, 西安 710025; 2. 火箭军工程大学 导弹工程学院, 西安 710025)

摘 要: 现有基于深度学习的射频指纹识别技术大多采用原始数据样本作为网络输入,未考虑信号携带内容对分类结果产生的影响,网络结构相对单一。为此,针将信号导频部分作为网络输入展开了研究,提出了一种新的导频提取算法,对10个ADALM-PLUTO软件定义无线电设备(SDR)辐射出的信号提取其导频,并建立了3种不同距离条件下的导频数据集。提出将Inception网络结构用于射频指纹识别,在10 m无线传输距离下达到了98.58%的分类精度,相较于现有基于AlexNet网络改进的卷积神经网络(CNN),分类精度有所提升。

关 键 词: 射频指纹识别; 深度学习; 无线通信; 导频提取; 卷积神经网络
中图分类号: TN918.91
文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2022)12-2566-10

互联网技术的快速发展在给人们的生活带来诸多便利的同时,也对信息安全防护与个人隐私保护提出了挑战[1]。传统的信息安全技术基于密码算法或者公私钥加密技术,但是该技术存在一定的局限性:①具有高计算量和高复杂度;②存在一定时延;③存在密钥泄露风险和被破解可能,难以满足人们对信息安全防护的需求。而基于物理层的信息安全技术具有低复杂度、低时延和理论上不可破解的优势,得到了国内外学者的广泛关注[2-4]。

1995年,Choe等[5]首次提出了利用无线通信设备发出的瞬态信号所包含的“指纹”信息来进行设备识别认证的方法。正如人类的指纹一样,无线通信设备工作时向外辐射的信号会因为设备固有特性产生细微的差异,如晶体振荡器产生的载频误差、定时器产生的误差等,这种误差综合起来会使通信设备发出的信号之间可以区分。因此,射频指纹识别技术能够应用于辐射源个体识别、设备认证、无线电管理等诸多领域,拥有广阔的应用前景[6]。1996—2020年期间,文献[7-10]先后提出了基于信号瞬态部分和稳态部分的射频指纹识别技术,并采用传统的机器学习算法进行分类,然而该类方法需要提前选取信号的指纹特征,特征选取的合适与否直接影响到最终的分类效果,对于不同种类的设备和信号,很难确定最优特征。因此,传统的机器学习射频指纹分类方法存在特征选取复杂度高、识别精度不高的缺陷。随着机器学习技术的快速发展,深度神经网络在射频指纹识别领域的应用有效解决了特征选取复杂度高这一问题[11-14],其中,基于AlexNet网络改进的卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)结构在射频指纹识别领域取得的效果最好。

虽然相比于传统的机器学习分类算法,现有基于深度神经网络的方法有效解决了特征选取复杂度高这一问题,而且取得了很不错的分类效果,然而仍然存在一定的改进空间。①现有基于深度

收稿日期: 2021-04-01; **录用日期**: 2021-06-20; **网络出版时间**: 2021-07-12 15:21
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210712.1100.001.html
基金项目: 国家自然科学基金(61601474,62071480)
* **通信作者**. E-mail: fengchao_zhu@126.com

引用格式: 曾盛, 朱丰超, 杨剑. 一种新的基于信号导频的射频指纹识别方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2566-2575. ZENG S, ZHU F C, YANG J. A new RF fingerprint identification method based on preamble of signal[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2566-2575(in Chinese).

http://bhxb.buaa.edu.cn

学习的射频指纹识别方法网络输入大都是原始的I/Q序列,未考虑信号负载信息对分类结果的影响,随着通信技术的发展,为了方便接收机的设计,IEEE 802.15.4无线通信协议[15]为传输信号添加了导频部分,导频具有固定的内容,与负载内容无关,因此只包含信号的指纹信息,利用信号的导频部分作为网络输入能有效避免信号负载对射频指纹识别结果带来的不利影响。②深度学习方法如果只考虑单一卷积核,同时仅关注网络深度而没有兼顾网络宽度时,就会造成网络无法从多个尺度上学习信号的指纹特征,识别精度仍然存在一定的提升空间。

针对以上问题,本文基于IEEE 802.15.4无线通信协议设计了一种新的导频提取算法,提取出信号的导频部分作为网络的输入。同时,提出了一种基于Inception网络[16]的射频指纹识别方法,相比于单一结构的卷积神经网络,Inception网络具有更加复杂的网络结构,能够从多种特征尺度上学习信号的指纹信息,显著提升分类精度。

1　系统模型

如图1所示,假设通信双方分别为Alice和Bob, Alice为发送方,Bob为接收方,待发送的信息为二进制比特序列 $\boldsymbol{d}_{1\times n}$。

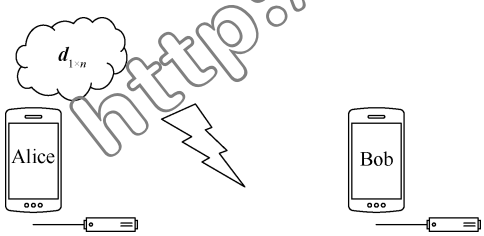


图1　通信系统模型

Fig. 1　Communication system model

为了方便通信系统的设计,IEEE 802.15.4无线通信协议[15]规定信息在传输前需要进行帧包装。图2给出了包装后的物理层帧结构。其中,SHR表示物理层同步帧头,PHR表示物理层帧头,PHY Payload表示物理层负载,Preamble表示导频,SFD表示开始帧分隔符。将得到的数据帧进行一次直接序列扩频,增强信号的抗干扰性和抗多径干扰能力。对于正交四相相移键控(orthogonal quaternary phase shift keying, OQPSK)调制方式的通信系统,发送端信号处理的全过程如图3所示。

首先,将二进制比特序列 $\boldsymbol{d}_{1\times n}$ 包装成数据帧,

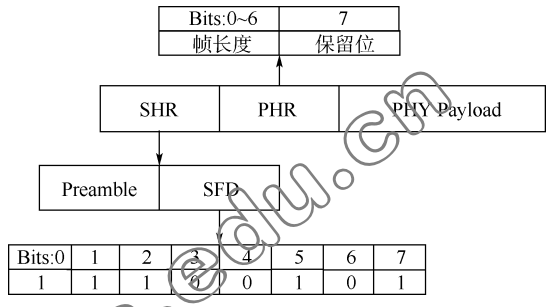


图2　物理层帧结构

Fig. 2　Frame structure of physical layer

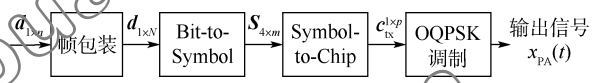


图3　发送端信号处理过程

Fig. 3　Signal processing at transmitter

得到帧序列 $\boldsymbol{d}_{1\times N}$;然后,将 $\boldsymbol{d}_{1\times N}$ 每4个bit映射成一个符号 $\boldsymbol{s}_i$(Symbol),所有的符号构成一个符号矩阵 $\boldsymbol{S}_{4\times m}$:

$$\boldsymbol{S}_{4\times m}=[\boldsymbol{s}_1,\cdots,\boldsymbol{s}_i,\cdots,\boldsymbol{s}_m]=[(\boldsymbol{d}_{1\times N}(1:4))^{\mathrm{T}},\cdots,(\boldsymbol{d}_{1\times N}(j:(j+3)))^{\mathrm{T}},\cdots,(\boldsymbol{d}_{1\times N}((N-3):N))^{\mathrm{T}}] \tag{1}$$

式中:$m=N/4$。

每个符号 $\boldsymbol{s}_i$ 映射成一个包含32 bit的码片 $\boldsymbol{chip}_i^{1\times 32}$,得到发送端的扩频序列 $\boldsymbol{c}_{\mathrm{tx}}^{1\times p}$:

$$\boldsymbol{c}_{\mathrm{tx}}^{1\times p}=[G(\boldsymbol{s}_1),G(\boldsymbol{s}_2),\cdots,G(\boldsymbol{s}_i),\cdots,G(\boldsymbol{s}_m)] \tag{2}$$

式中:$p=32\times m$;$G(\cdot)$表示Symbol-to-Chip映射关系。

当传输中心频率为2.45 GHz和2.38 GHz时,Symbol-to-Chip映射关系如表1所示。

将得到的扩频序列 $\boldsymbol{c}_{\mathrm{tx}}^{1\times p}$ 通过OQPSK调制电路得到待发送信号 $x_{\mathrm{PA}}(t)$。因此,射频前端发送出去的信号 $x_{\mathrm{PA}}(t)$ 可以表达为

$$x_{\mathrm{PA}}(t)=[x_{\mathrm{Preamble}};x_{\mathrm{SFD}};x_{\mathrm{PHR}};x_{\mathrm{Payload}}] \tag{3}$$

式中:x_{Preamble} 为需要提取出来的信号导频部分。x_{SFD} 为信号 $x_{\mathrm{PA}}(t)$ 的帧首界定符,x_{PHR} 为物理层数据帧头部分,x_{Payload} 表示有效载荷部分。

现有研究虽然已经证明了基于信号导频的射频指纹识别技术具有很好的发展前景,但是均没有提出一种有效的信号导频提取方法。文献[8]中基于窗函数和功率上升的方法对于接收机采样率要求很高,而且只能大概估计导频位置;文献[9]中基于瞬态起点估计的方法受信道噪声影响大,不能准确找到导频的起始位置,基于人眼识别的方法更是效率低下。针对以上现状,本文基于IEEE 802.15.4无线通信协议[15]设计了一种新的导频提取算法,有效解决了以上问题。

http://bhxb.buaa.edu.cn

表1 2.45 GHz Symbol-to-Chip映射关系

Tabel 1 Mapping relationship of 2.45 GHz Symbol-to-Chip

s_i	$\mathbf{chip}_i^{1\times32}$
s_0:0000	$\mathbf{chip}_0^{1\times32}$:1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0
s_1:0001	$\mathbf{chip}_1^{1\times32}$:1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0
s_2:0010	$\mathbf{chip}_2^{1\times32}$:0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0
s_3:0011	$\mathbf{chip}_3^{1\times32}$:0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1
s_4:0100	$\mathbf{chip}_4^{1\times32}$:0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 1 1
s_5:0101	$\mathbf{chip}_5^{1\times32}$:0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0
s_6:0110	$\mathbf{chip}_6^{1\times32}$:1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1
s_7:0111	$\mathbf{chip}_7^{1\times32}$:1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1
s_8:1000	$\mathbf{chip}_8^{1\times32}$:1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1
s_9:1001	$\mathbf{chip}_9^{1\times32}$:1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1
s_{10}:1010	$\mathbf{chip}_{10}^{1\times32}$:0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1
s_{11}:1011	$\mathbf{chip}_{11}^{1\times32}$:0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0
s_{12}:1100	$\mathbf{chip}_{12}^{1\times32}$:0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0
s_{13}:1101	$\mathbf{chip}_{13}^{1\times32}$:0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1
s_{14}:1110	$\mathbf{chip}_{14}^{1\times32}$:1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0
s_{15}:1111	$\mathbf{chip}_{15}^{1\times32}$:1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0

2 导频提取算法

图4给出了无线通信流程框架。假设接收端接收到的信号记为$r(t)$:

$$r(t) = h(x_{\mathrm{PA}}(t)) + n(t) \tag{4}$$

式中:$h(\cdot)$为无线信道;$n(t)$为信道噪声。从$r(t)$中精确找到信号的导频部分需要经历2步。

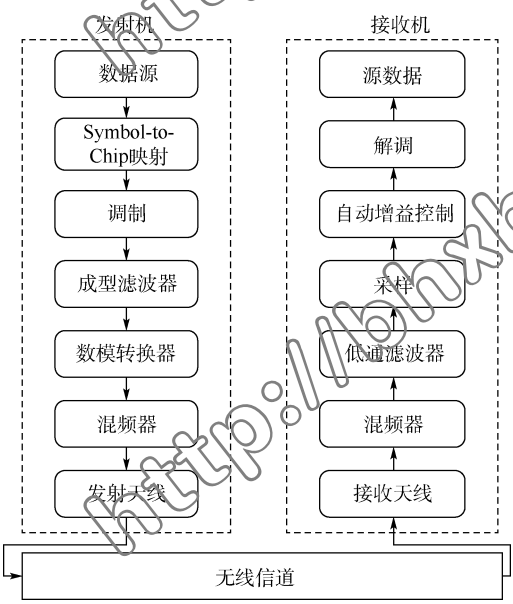


图4 无线通信流程框架

Fig. 4 Frame diagram of wireless communication

2.1 解 调

首先利用混频器对信号进行下变频至基带信号,然后通过低通滤波器滤除带外噪声,在模数转换器中对信号进行奈奎斯特采样得到数字信号序列$\boldsymbol{r}[s]$:

$$r_{\mathrm{LP}}(t) = r(t)\cos(\omega_{\mathrm{c}}t) \otimes h_{\mathrm{LP}}(t)$$
$$\boldsymbol{r}[s] = r_{\mathrm{LP}}(t)\delta_{T_{\mathrm{s}}}(t) \tag{5}$$

式中:ω_{c}为载波频率;$\boldsymbol{r}[s]$为采样后的离散数字信号序列;$\otimes$表示卷积运算;$h_{\mathrm{LP}}(t)$表示低通滤波函数;$r_{\mathrm{LP}}(t)$为经过下变频和低通滤波后的信号;$\delta_{T_{\mathrm{s}}}(t)$为周期性单位冲激脉冲,$T_{\mathrm{s}}$为采样周期。

由于信号在无线信道中传播后会受到噪声干扰,需要在接收端对采样后的信号进行自动增益控制(automatic gain control, AGC),提高信噪比:

$$\boldsymbol{r}_{\mathrm{AGC}}[s] = F_{\mathrm{AGC}}(\boldsymbol{r}[s]) \tag{6}$$

式中:$F_{\mathrm{AGC}}(\cdot)$为AGC模块。

经过自动增益控制后,再对信号进行匹配滤波(matched filter, MF)得到$\boldsymbol{r}_{\mathrm{MF}}[s]$,匹配滤波的目的同样是为了提高信号信噪比:

$$\boldsymbol{r}_{\mathrm{MF}}[s] = H_{\mathrm{MF}}(\boldsymbol{r}_{\mathrm{AGC}}[s]) \tag{7}$$

式中:$H_{\mathrm{MF}}(\cdot)$为MF模块。

信号在传输过程中会产生频率偏移,对存在频率偏移的信号进行解码会引入误差,导致误码率上升,因此需要对信号进行频率补偿。首先使用基于快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)的方法进行粗频率补偿,该方法对$\boldsymbol{r}_{\mathrm{MF}}[s]$平方,得到2个谱峰,然后对2个谱峰的频率进行平均和减半,从而得到粗补偿频率$\Delta\hat{f}$。

http://bhxb.buaa.edu.cn

$$\hat{\Delta f} = \frac{f_{\text{samp}}}{Nm}\arg\max_{f}\left|\sum_{s=0}^{N-1}\boldsymbol{r}_{\text{MF}}^{m}[s]\mathrm{e}^{\frac{-\mathrm{j}2\pi st}{N}}\right| \\ -\frac{R_{\text{sym}}}{2}\leqslant f\leqslant\frac{R_{\text{sym}}}{2} \tag{8}$$

式中:f_{samp}为采样频率;m 为调制阶数;R_{sym}为符号速率;N 为采样数。

粗频率补偿后得到信号 $\boldsymbol{r}_{\text{CC}}[s]$为

$$\boldsymbol{r}_{\text{CC}}[s] = \boldsymbol{r}_{\text{MF}}[s]\cdot\mathrm{e}^{\mathrm{j}(2\pi\hat{\Delta f}sT+\theta)m} \tag{9}$$

式中:T 为符号周期;θ 为载波相位。

精频率补偿基于文献[17]中描述的 OQPSK 载波恢复算法,算法框图如图 5 所示。

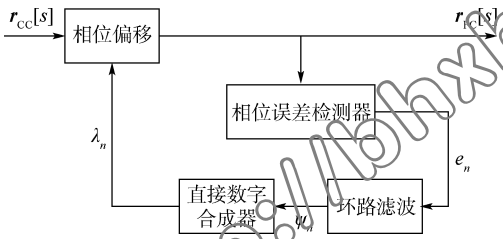


图 5　精频率补偿算法框图

Fig. 5　Block diagram of fine frequency compensation algorithm

$$\boldsymbol{r}_{\text{FC}}[s] = \boldsymbol{r}_{\text{CC}}[s]\mathrm{e}^{\mathrm{i}\lambda_n} \tag{10}$$

式中:λ_n 为直接数字合成器(direct digital synthesizer,DDS)的输出,由 e_n 和 ψ_n 确定:

$$\lambda_n = (g_{\text{p}}e_{n-1}+\psi_{n-1})+\lambda_{n-1} \tag{11}$$

其中:$g_{\text{p}} = \dfrac{4\zeta(\theta/d)}{K_{\text{p}}K_{\text{o}}}$,$K_{\text{p}}$ 为相位误差检测器的增益,由调制方式确定,对于 OQPSK 调制方式,$K_{\text{p}}=2$,K_{o} 为相位恢复增益,其值等于每个符号的样本数,$\theta = B_n\Big/\left(\zeta+\dfrac{1}{4\zeta}\right)$,$d = 1+2\zeta\theta+\theta^2$,$B_n$ 为归一化环路带宽,ζ 为阻尼因子;e_n 为相位误差,相位误差计算方法与调制方式有关,对于 OQPSK 调制方式:

$$e_n = \text{sgn}(\text{Re}\{\boldsymbol{r}_{\text{CC}}[s]-\text{SamplePerSymbol}/2\})\cdot \\ \text{Im}\{\boldsymbol{r}_{\text{CC}}[s]-\text{SamplePerSymbol}/2\}- \\ \text{sgn}(\text{Im}\{\boldsymbol{r}_{\text{CC}}[s]\})\text{Re}\{\boldsymbol{r}_{\text{CC}}[s]\} \tag{12}$$

式中:SamplePerSymbol 为符号采样速率。

ψ_n 为环路滤波器第 n 个采样点的输出:

$$\psi_n = g_{\text{I}}e_n+\psi_{n-1} \tag{13}$$

式中:g_{I} 为积分器增益系数,即

$$g_{\text{I}} = \frac{4(\theta^2/d)}{K_{\text{p}}K_{\text{o}}} \tag{14}$$

对得到的 $\boldsymbol{r}_{\text{FC}}[s]$进行时间同步,对时间同步后的信号进行串并变换,再进行判决就能得到解调后的 Chip 序列,记为 $\boldsymbol{c}_{\text{rx}}^{1\times p}$。

2.2　提取信号导频

IEEE 802.15.4 无线通信协议[15]规定了物理层数据帧结构,因此 $\boldsymbol{c}_{\text{rx}}^{1\times p}$也应具有如下格式:

$$\boldsymbol{c}_{\text{rx}}^{1\times p} = [\boldsymbol{c}_{\text{rx,Preamble}};\boldsymbol{c}_{\text{rx,SFD}};\boldsymbol{c}_{\text{rx,PHR}};\boldsymbol{c}_{\text{rx,Payload}}] \tag{15}$$

式中:$\boldsymbol{c}_{\text{rx,Preamble}}$为需要确定的导频部分。

IEEE 802.15.4 无线通信协议[15]规定了导频内容为 8 个 $\boldsymbol{s}_0$,经过直接序列扩频后,扩频为 8 个 $\boldsymbol{chip}_0^{1\times32}$ 进行传输,因此,

$$\boldsymbol{c}_{\text{rx,Preamble}} = 8\boldsymbol{chip}_0^{1\times32}$$

只需在解调后得到的 Chip 序列 $\boldsymbol{c}_{\text{rx}}^{1\times p}$中找出连续 8 个 $\boldsymbol{chip}_0^{1\times32}$,就能找到信号的导频部分。采用滑动窗函数方法,窗口长度为一个 chip 长度,即为 32 bit,每次滑动一个 bit,当找到第一个 $\boldsymbol{chip}_0^{1\times32}$ 时,下次滑动 32 bit,若连续出现 8 个 $\boldsymbol{chip}_0^{1\times32}$,则该段信号对应为原信号中的导频序列。为防止误检测,利用同样的扩频关系检测导频结束后的 SFD 序列,SFD 由 $\boldsymbol{s}_7$ 和 $\boldsymbol{s}_{10}$两个符号组成,对应为 $\boldsymbol{chip}_7^{1\times32}$ 和 $\boldsymbol{chip}_{10}^{1\times32}$。因此,若检测出连续 8 个 $\boldsymbol{chip}_0^{1\times32}$ 和 $\boldsymbol{chip}_7^{1\times32}$、$\boldsymbol{chip}_{10}^{1\times32}$,则证明检测出了信号的导频序列,导频序列为从第一个 $\boldsymbol{chip}_0^{1\times32}$ 的第一位开始,之后连续的 $32\times8=256$ 个 bit。图 6给出了滑动过程,图 7 给出了算法框架。图中:PreambleStart 表示帧的起始位置,chipNo 表示找出来的 Chip 号。

此时提取出来的导频序列并非是原始信号中的导频,而是经过解调后的导频,其中不再包含设备的射频指纹信息。最终的任务是根据解调后的导频序列定位到原始信号中的导频部分,即式(3)中的 $\boldsymbol{x}_{\text{Preamble}}$。原始信号经过自动增益控制、匹配滤波、粗频率补偿、精频率补偿后只改变了帧的幅值,并未改变帧的长度大小。经过时间同步后,信号的长度已经发生了改变,为定位原始信号中的导频带来了困难。为了解决这一问题,采取窗口同步的方法,窗口长度为一个帧的长度,即一次只对一个帧长度的信号进行时间同步。若当前窗口中的信号同步后未能检测出导频,说明此段信号的起点并非是一个帧的起点,下一步将

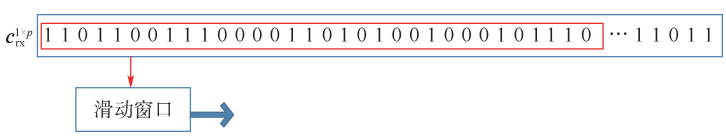


图 6　滑动过程

Fig. 6　Sliding process

http://bhxb.buaa.edu.cn

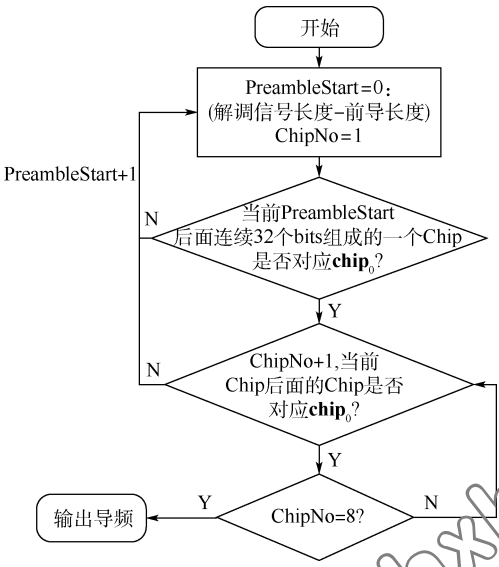


图7 算法框架

Fig. 7 Framework of algorithm

窗口在原始信号中滑动一个样本点,直到目前帧中成功检测出了导频,b一次则直接滑动一个帧的长度,这样大大降低了算法的运算次数及复杂度,同时也解决了无法定位到原始信号中导频位置的问题。此时原始信号中的导频即为从当前帧窗口起点开始之后连续的512个采样点,在提取导频过程中,每次传输1 635个帧,能够提取出1 635个导频,提取率能够达到100%。

现有的导频提取算法一般分为3类:①文献[8]中所提出利用绝对值和窗口函数从信号中提取信号的导频序列,将窗口长度设置为导频中样本个数,在信号上滑动窗口,选择具有最大能量的窗口作为信号的导频,该方法只能估计导频大概位置,无法完全区分导频信号与瞬态信号。②文献[9]中提出先估计出瞬态起点,再将瞬态起点后面的信号作为导频信号,然而实际上瞬态起点估计受噪声影响严重,当信号受到噪声干扰时往往难以准确估计出瞬态起点,存在估计误差,因此不能完全准确地找到信号的导频部分。③通过肉眼识别的方式提取导频,该方法效率低下,工作量大,且提取精度不高。

图8给出了本文算法的导频检测结果(浅色部分为原始信号,深色部分为导频部分)。从图8(a)、(b)可以看出,相较于文献[8]中提出的导频提取算法,本文提出的导频提取算法能够精确地找到信号导频部分的起始位置和结束位置,而且对于连续信号,导频提取率也能达到100%。从图8(c)可以看出,相较于文献[9]中所提出的算法,本文算法抗噪声性能好,在10 m无线信道传输条件下也能达到100%的导频提取率。

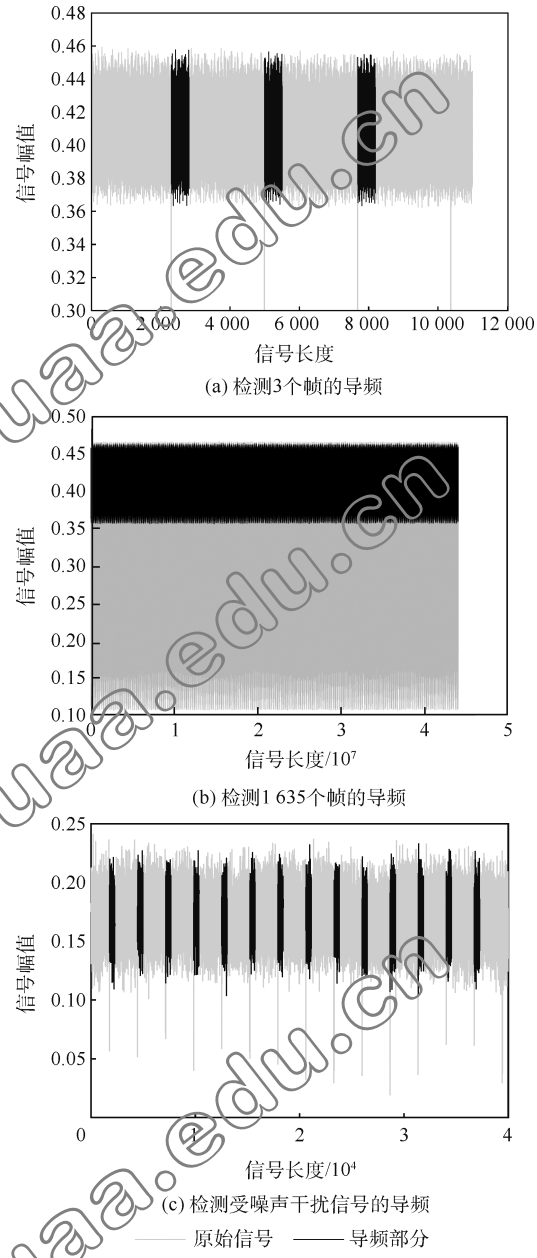


图8 导频检测结果

Fig. 8 Preamble extraction results

利用本文算法建立了3种不同传输距离下的导频数据集,并利用简化后的Inception网络测试其分类效果。

3 Inception网络

近年来,深度学习在射频指纹识别领域的快速发展证明了基于神经网络的射频指纹识别技术拥有着优于传统机器学习分类方法的识别效果,然而,目前大多数基于深度学习的射频指纹识别方法采用的都是结构单一的卷积神经网络,只考虑了网络深度,没有考虑到网络宽度,卷积核单一,无法从多个尺度上学习信号的指纹特征,因此在分类精度上仍然存在着一定的提升空间。2014年,Google公司首次提出了Inception网络结构[16],用

http://bhxb.buaa.edu.cn

于 ImageNet 大规模图像识别与分类领域,并在该领域取得了非常好的识别效果。由于 Inception 网络结构能够增加网络的宽度,同时具备从多种尺度上学习不同特征的能力,本文尝试将 Inception 网络结构迁移到射频指纹识别领域。图 9 展示了本文使用的 Inception 网络结构。

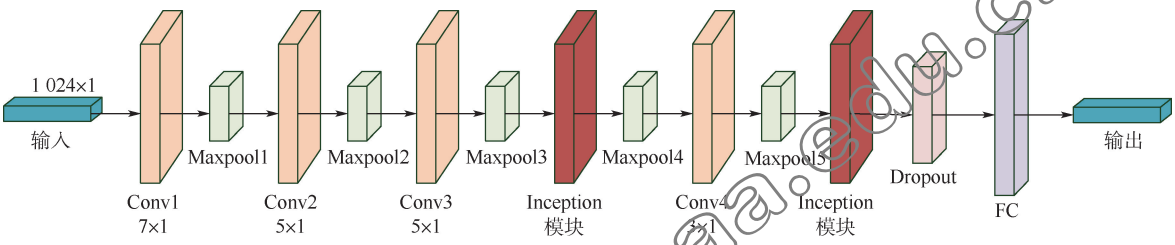


图 9　本文使用的 Inception 网络结构

Fig. 9　Inception network used in this paper

原始的导频序列是 512 位的复数序列,对其进行串并变换后恢复成 1 024 位的实数序列作为网络输入。首先,对输入信号进行卷积和池化操作,其目的是从输入信号中提取特征并降低特征的维数,对于射频信号而言,由于信号中所包含的设备指纹特征对信道指纹特征比较敏感,受环境影响比较大,而在不同的池化操作(如平均池化、最大池化、随机池化、全局平均池化)中,平均池化会模糊设备指纹特征与信道指纹特征,不利于设备指纹特征的提取,一般选择最大池化(Maxpool)操作。最大池化选择池化区域中的最大元素作为输出,保留特征的同时降低了特征图的维数,而且减少了网络中参数和计算量,因此提供了更好的性能。池化后的信号随后通过激活函数引入非线性,使网络的输出不再是输入的线性表达,因此理论上可以逼近任意函数,在常见的激活函数中,sigmoid 函数和 tanh 函数计算量相较于 Relu 函数要大很多,尤其是对于 Inception 这样的深层网络结构,sigmoid 函数在反向传播时易出现梯度消失的情况,从而导致网络无法正常训练。因此,为了减少计算量,本文选择使用 Relu 函数作为网络的激活函数。

初步处理后的结果被输入到 Inception 模块,本文网络中共使用了 2 个 Inception 模块,第 2 个 Inception 模块的输出作为全连接层(FC)的输入,可以得到 10 个标签的最终分类结果。Inception 模块作为 Inception 网络最核心的部分,其本身就可以看作为一层小型的卷积网络,其结构如图 10 所示。

Inception 模块共有 3 个输出通道,每个通道先进行 1×1 的卷积操作,降低上一层的输出通道数,从而达到降低网络参数数量的目的。同时每个通道上都设置了不同尺度的卷积层,如图 10 所示,本文使用的 Inception 模块共包含了 1×1、3×1 和 5×13 种不同尺度的卷积核,使得每个 Inception 模块能够同时从 3 种不同的特征尺度上学习信号的指纹特征,而且在输出处能够将不同通道的输出信息组合起来,最大程度避免了由于卷积核大小选择不当导致的网络性能差的问题,增加了网络对不同尺度特征的适应性。因此,Inception 网络相较于传统卷积神经网络具有更好的分类性能。值得注意的是,不同通道的输出在进行拼接时要求数据具有相同的长、宽维度,而每个通道的卷积核大小不同会导致输出数据维度不一样,为了避免这种情况发生,需要给每个通道的输入在进行卷积操作前进行 padding。1×1 的卷积核不会影响数据维度,因此不需要进行 padding,对于 5×1 卷积核的通道,需要对输入数据上下各 padding 2 行,对于 3×1 卷积核的通道,需要对数据上下各 padding 1 行。

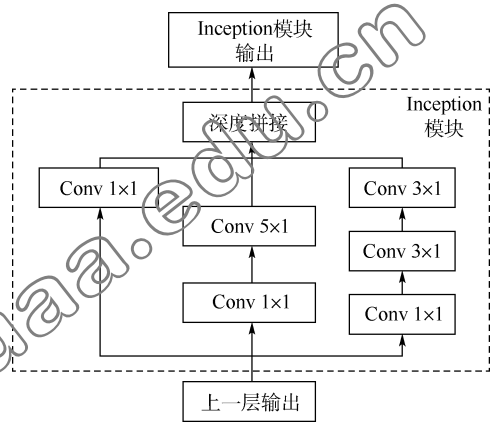


图 10　Inception 模块结构

Fig. 10　Structure of Inception module

网络超参数的选择对于整个网络的最终表现同样至关重要,本文选择训练批次大小(batch_size)、Dropout 率和学习率 lr 三种网络超参数。训练批次大小是指每次训练时在训练集中调用的数据集大小,即导频个数,训练批次大小设置太小会导致训练时间太长,工作站内存利用率不高,因此适当加大训练批次大小有利于提高工作站利用率,加大对相同数据的处理速度,同样的,当训练

http://bhxb.buaa.edu.cn

批次大小设置过大时也会导致网络收敛到局部最优点,因此合适的批次大小设置十分重要,在最后的实验验证过程中,经过多次尝试,最终发现当训练批次大小设置为 32 时本文的数据集在该网络下具有最好的分类性能。为了防止网络训练发生过拟合,在全连接层前设置了 Dropout 率,并且 Dropout 率大小设置为最常用的 0.5。Inception 网络的学习率决定了网络权重更新时当前权重受影响的程度,学习率设置太小会导致权重更新慢,学习率过大又会导致跨过最优解,因此,为了避免这 2 种情况发生,本文选择动态调整学习率的方式,在训练开始时设置较大的学习率,随着迭代次数增加,网络开始逼近最优解的时候开始逐步减小学习率的大小,学习率设置如下:

$$lr = 0.005 \times 0.95^{epoch}$$

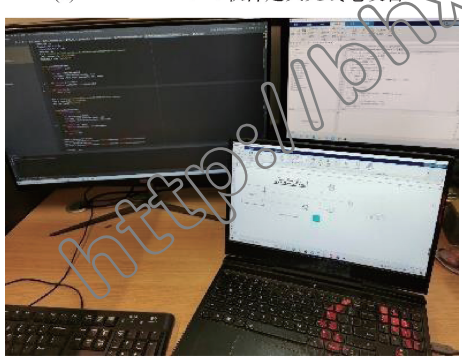
式中:epoch 为迭代次数,本文共迭代 100 次。

4 实验平台搭建

硬件平台包括 11 个 ADALM-PLUTO 软件定义无线电设备和 1 台工作站,如图 11 所示。ADALM-PLUTO 是一款独立自足的便携式射频学习模块,射频频率范围为 325 MHz ~ 3.8 GHz,可调信道带宽为 200 kHz ~ 20 MHz,调制精度小于或等于 -40 dB,集成 12 位 ADC(接收端)和 DAC(发送端),含有一个发射器和一个接收器,支持半双工或全双工。本文使用 10 个 ADALM-PLUTO 软件定义无线电设备作为发射设备,1 个作为接收设备,基于 IEEE 802.15.4 无线通信协议,采用 OQPSK 调制方式,发射信号中心频率设置为 2.45 GHz,接收机基带采样率为 4 MHz,接收增益为 0 dB。工作站配置如下:①显卡:华硕 RTX2080TI-011G-GAMING。②主板:华硕 PRIME X299 MARK2。③CPU:因特尔酷睿-i9-9900X,3.5 GHz × 10 核/20 线程。



(a) ADALM-PLUTO软件定义无线电设备



(b) 工作站

图 11 ADALM-PLUTO 软件定义无线电设备和工作站

Fig. 11 ADALM-PLUTO software-defined radio equipment and workstation

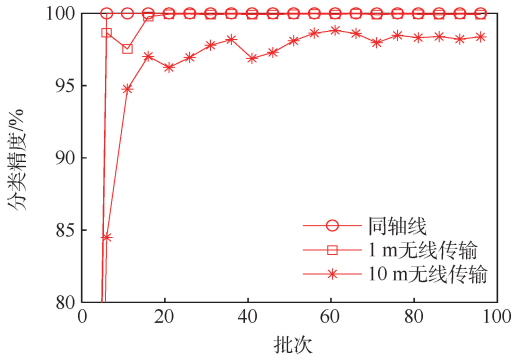
本文使用的网络框架为 PyTorch,编程语言为 Python,操作系统为 Windows10。

5 实验结果及分析

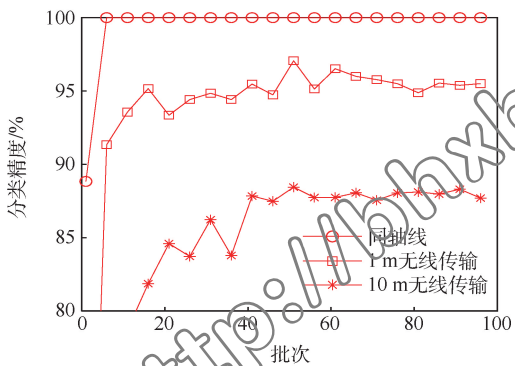
为了分析信道对射频指纹识别结果的影响及本文使用的 Inception 网络结构对信道变化的鲁棒性,共建立了 3 种不同传输距离下的导频数据集,分别为同轴线连接条件、1 m 无线传输和 10 m 无线传输条件,每种距离条件下的数据集均包含 10 个设备的导频数据,共 16 000 × 10 = 160 000 个导频数据。首先,利用该数据集测试了 Inception 网络的分类效果;然后,利用同样的数据集测试了文献[11-12,14]中使用的基于 AlexNet 网络改进的卷积神经网络,该网络结构是目前射频指纹识别领域最常用的网络结构,也是取得效果最好的一种网络结构,文献[11-12]中所使用的网络共包含 2 层卷积层、2 层池化层和1 层全连接层,文献[14]中使用的网络包含6 层卷积层、6 层池化层和 1 层全连接层,3 种网络的分类结果如图 12 所示。

图 12(a)为本文所使用 Inception 网络的分类结果,图 12(b)为文献[11-12]中使用的 2 层卷积神经网络的分类结果,图 12(c)为文献[14]中使用的 6 层卷积神经网络的分类结果。从 3 种分类结果不难看出,3 种网络结构对于同轴线连接条件下的导频数据集都有很好的分类效果,但是随着传输距离增加,分类精度都有所降低。这是因为:在无线传输过程中,多径效应和信道噪声的影响会给信号引入信道指纹,因此分类器记住的是信道指纹与设备指纹之和,当传输距离增加时,无线信道条件恶化,信号受信道指纹的影响就会增大,从而模糊设备本身的指纹特征,从而导致了分类精度的下降,同时也能够看到,随着传输距离的增加,Inception 网络分类精度下降的幅度相较于其他 2 种网络要小,由此可以说明,Inception 网络对于信道的鲁棒性要强于另外 2 种网络。为了更

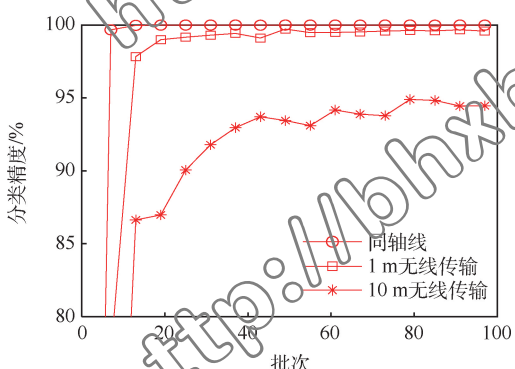
http://bhxb.buaa.edu.cn



(a) Inception网络的分类结果



(b) 文献[11-12]中网络的分类结果



(c) 文献[14]中网络的分类结果

图 12　三种网络的分类结果

Fig. 12　Classification results of three kinds of networks

直观地说明 Inception 网络的优势,图 13 对比了 1 m和 10 m 距离下 3 种网络的分类结果。

从分类结果可以看出,Inception 网络的分类效果整体上要优于基于 AlexNet 改进的卷积神经网络方法,在 1m 距离条件下,相较于文献[11-12]中的方法分类精度提高了 5% 左右,相较于文献[14]中的方法分类精度提高了约 1%,在 10 m 距离条件下,相较于文献[11-12]中的方法分类精度提高了 10% 左右,相较于文献[14]中的方法分类精度提高了约 3%,且 Inception 网络即便是在 10 m 距离条件下分类精度也仍然高达 98.58%。

为了进一步讨论 Inception 网络的性能,表 2 从每秒浮点运算次数(Flops)、网络参数量和网络训练时间 3 个方面对比了 3 种网络的复杂度。

从表 2 可以看出,Iceptincon 网络 Flops 相较于其他 2 种网络结构都有所减少,同时网络参数量也有所降低,这是因为 Inception 网络能通过多次使用 1×1 卷积核的方式来降低输入数据的通道数,从而达到减少网络参数和复杂度的目的。

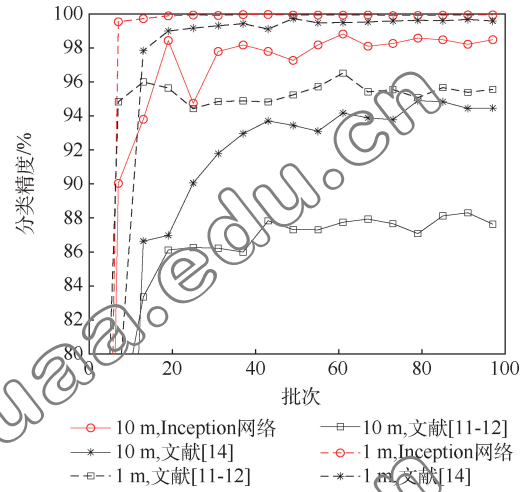


图 13　1 m 和 10 m 距离下 3 种网络分类结果对比

Fig. 13　Comparisons of classification results of three networks at 1 m and 10 m

表 2　网络复杂度对比

Tabel 2　Network complexity comparison

网络	Flops/次	网络参数量	网络训练时间/s
Inception	183 066 880	137 610	4 166
文献[11-12]	348 888 640	146 700	1 218
文献[14]	126 8891 200	188 590	2 421

总的来说,Inception 网络相较于目前射频指纹识别领域中使用最多的 AlexNet 模型,无论是分类精度还是网络复杂度方面,整体性能都有所提升。

6　结　论

1) 本文基于 IEEE 802.15.4 无线通信协议提出的导频提取算法,在一定程度上解决了现有基于信号导频的射频指纹识别技术不能精确提取出信号导频的问题,在不同的距离条件和噪声干扰程度下,导频识别和提取率均能达到 100%。建立了 3 种不同距离条件下的导频数据集用于射频指纹识别技术的研究。

2) 本文采用深度学习的方法对信号导频数据集进行分类,将 Inception 网络用于射频指纹识别领域,与目前射频指纹识别领域最常用的 AlexNet 网络结构相比,分类精度有所提升,在 10 m 距离下分类精度仍能达到 98.58%。

参考文献(References)

[1] 任品毅,徐东阳. 无线物理层认证技术:昨天、今天和明天

http://bhxb.buaa.edu.cn

[J]. 中兴通讯技术,2020,26(4):58-66.
REN P Y,XU D Y. Wireless physical layer authentication technology:Yesterday,today,and tomorrow[J]. ZTE Communications,2020,26(4):58-66(in Chinese).

[2] 俞佳宝,胡爱群,朱长明,等. 无线通信设备的射频指纹提取与识别方法[J]. 密码学报,2016,3(5):433-446.
YU J B,HU A Q,ZHU C M,et al. RF fingerprinting extraction and identification of wireless communication devices[J]. Journal of Cryptologic Research,2016,3(5):433-446(in Chinese).

[3] 张振,贾济铖,康健,等. 射频指纹识别技术方法综述[J]. 无线电通信技术,2021,47(3):249-258.
ZHANG Z,JIA J C,KANG J,et al. Overview of RF fingerprint identification technology methods[J]. Radio Communications Technology,2021,47(3):249-258(in Chinese).

[4] 曾勇虎,陈翔,林云,等. 射频指纹识别的研究现状及趋势[J]. 电波科学学报,2020,35(3):305-315.
ZENG Y H,CHEN X,LIN Y,et al. Review of radio frequency fingerprinting identification[J]. Chinese Journal of Radio Science,2020,35(3):305-315(in Chinese).

[5] CHOE H C,POOLE C E,YU A M,et al. Novel identification of intercepted signals from unknown radio transmitters[C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering,1995,2491:504-517.

[6] 郑娜娥,王盛,张靖志,等. 基于射频指纹的辐射源个体识别技术综述[J]. 信息工程大学学报,2020,21(3):285-289.
ZHENG N E,WANG S,ZHANG J Z,et al. Overview of emitter identification techniques based on radio frequency fingerprinting[J]. Journal of Information Engineering University,2020,21(3):285-289(in Chinese).

[7] URETEN O,SERINKEN N. Detection of radio transmitter turn-on transients[J]. Electronics Letters,1999,35(23):1996-1997.

[8] KENNEDY I O,SCANLON P,MULLANY F J,et al. Radio transmitter fingerprinting:A steady state frequency domain approach[C]//2008 IEEE 68th Vehicular Technology Conference. Piscataway:IEEE Press,2008:1-5.

[9] SUSKI W C,TEMPLE M A,MENDENHALL M J,et al. Using spectral fingerprints to improve wireless network security[C]// IEEE GLOBECOM 2008-2008 IEEE Global Telecommunications Conference. Piscataway:IEEE Press,2008:1-5.

[10] 王培. 基于稳态信号的射频指纹算法的研究[D]. 成都:电子科技大学,2020:20-52.
WANG P. Research on RF fingerprint algorithm based on steady state signal[D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China,2020:20-52(in Chinese).

[11] RIYAZ S,SANKHE K,IOANNIDIS S,et al. Deep learning convolutional neural networks for radio identification[J]. IEEE Communications Magazine,2018,56(9):146-152.

[12] SANKHE K,BELGIOVINE M,FAN Z,et al. ORACLE:Optimized radio classification through convolutional neural networks [EB/OL]. (2018-12-03)[2020-12-13]. https://arxiv.org/abs/1812.01124v1.

[13] 秦嘉. 基于深度学习的通信辐射源个体识别[D]. 北京:北京邮电大学,2019:22-23.
QIN J. Individual identification of communication emmiter based on deep learning[D]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications,2019:22-23(in Chinese).

[14] ELMAGHBUB A,HAMDAOUI B. Leveraging hardware-impaired out-of-band information through deep neural networks for robust wireless device classification[EB/OL]. (2020-04-23)[2021-03-28]. https://arxiv.org/abs/2004.11126v1.

[15] IEEE 802.15 Working Group. IEEE stardard for low-rate wireless networks:IEEE 802.15.4[S]. Piscataway:IEEE,2006.

[16] SZEGEDY C,LIU W,JIA Y,et al. Going deeper with convolutions[EB/OL]. (2014-09-17)[2021-03-28]. https://arxiv.org/abs/1409.4842.

[17] RICE M. Digital communications:A discrete-time approach [M]. New York:Pearson Education India,2009.

http://bhxb.buaa.edu.cn

A new RF fingerprint identification method based on preamble of signal

ZENG Sheng[1], ZHU Fengchao[1,*], YANG Jian[2]

(1. Combat Support Academy, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;
2. Missile Engineering Academy, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: Deep learning-based RF fingerprint recognition methods now primarily use raw data samples as the input of the network, never taking into account how the signal's content affects classification outcomes, and the structure of the network is relatively simple. In response to the above problems, the preamble of the signal as the input of the network was studied and we proposed a new preamble extraction algorithm. We extracted the preamble of 10 ADALM-PLUTO software-defined radios (SDR) and built the preamble data sets at three different distances. The Inception network structure is proposed to be used in RF fingerprint identification in this paper, and the classification accuracy is still 98.58% under the wireless transmission distance of 10 m. The classification accuracy is increased as compared to the pre-existing convolutional neural network (CNN) built on the AlexNet network.

Keywords: radio frequency fingerprint identification; deep learning; wireless communication; preamble extraction; convolutional neural network

http://bhxb.buaa.edu.cn
http://bhxb.buaa.edu.cn
http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2021-04-01; **Accepted**: 2021-06-20; **Published online**: 2021-07-12 15:21
URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210712.1100.001.html
Foundation items: National Natural Science Foundation of China (61601474,62071480)
* **Corresponding author**. E-mail: fengchao_zhu@126.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2020.0608

地月空间的远距离逆行轨道族及其分岔研究

陈冠华[1,2], 杨驰航[1,2], 张晨[1], 张皓[1,*]
(1. 中国科学院空间应用工程与技术中心 太空应用重点实验室, 北京 100094; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 地月系统中存在着一类绕月逆行、高度稳定的轨道族,称为远距离逆行轨道族(DRO)。以圆型限制性三体问题(CR3BP)为动力学模型研究了DRO轨道族周边的动力系统结构。利用Broucke稳定性图寻找分叉点,判断分叉类型,基于数值延拓计算分岔后产生的一系列新轨道分支。分叉类型主要有切分叉与多倍周期分叉(从3倍周期开始),轨道维度包含平面轨道族与三维轨道族。计算新轨道族的特征,包括形状、周期、能量、稳定性、双曲流形结构等。探讨周期轨道的轨道周期与能量的关系,以几何化的方式展现分叉结构、多周期轨道的双曲流形结构等。该动力结构将为基于DRO轨道族的地月空间任务提供重要的理论支持。

关 键 词: 远距离逆行轨道; 分岔; 多周期轨道; 数值延拓; 轨道稳定性
中图分类号: P173.1; P173.3; P132+.2; V412
文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2022)12-2576-13

地月空间是近地轨道与月球轨道之间的空间区域,拥有丰富的战略资源。近年来,地月空间逐渐受到关注。2017年,NASA提出将在未来十年内建立一个连接地月空间与深空的空间运输网络[1]。对于深空中长期执行的科学研究任务,稳定及近似稳定的轨道,如远距离逆行轨道(distant retrograde orbit, DRO)、近直线晕轨道(near-rectilinear halo orbit, NRHO)及三角平动点轨道(triangular libration points orbits),是这类任务的潜在应用轨道。NASA已经提出了在围绕月球的NRHO轨道上部署深空门户空间站的方案[2]。在NASA的小行星重定向任务(ARM)中,航天器与近地小行星交会并将其捕获至地月系统DRO上,如此小行星能够长期维持轨道稳定而不需要施加控制[3]。

DRO是圆型限制性三体问题(circular restricted three-body problem, CR3BP)中的一类特殊周期轨道。地月系统的DRO位于月球公转平面,绕月逆行,其运动范围广,有着高度稳定性,对地球和月球都有良好的覆盖性,因而是本文关注的重点。

过去数年,学者们对地月空间、日地系统及其他CR3BP系统的DRO轨道特性、轨道转移和应用方案进行了一系列的研究。

在DRO的轨道特性方面,目前学者的理论研究主要集中在轨道有界性、稳定性、摄动力影响及延拓求解等方面。对地月空间的DRO,Bezrouk等[4-5]研究了地月系统中摄动力对DRO的影响,证明了大幅值DRO的轨道稳定性主要由太阳光压影响,而小幅值DRO的轨道稳定性主要由月球固体潮所影响;彭超等[6]利用延拓求解DRO共振轨道,并分析了其非开普勒特性与轨道稳定性;吴小婧等[7]研究了DRO在实际力学环境中的摄动,发现太阳引力、月球偏心率是主要的摄动因素,为DRO的精确建模和标称轨道设计奠定了一定的理论基础。对火星系统的DRO,陈泓儒等[8]研究了在火卫一附近如何设计具有期望稳定特性和观测

收稿日期: 2020-10-30; **录用日期**: 2021-01-22; **网络出版时间**: 2021-02-24 16:57
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210224.1539.004.html
基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1900605); 中国科学院重点部署项目(ZDRW-KT-2019-1-0102)
* **通信作者**. E-mail: hao.zhang.zhr@csu.ac.cn

引用格式: 陈冠华, 杨驰航, 张晨, 等. 地月空间的远距离逆行轨道族及其分岔研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2576-2588. CHEN G H, YANG C H, ZHANG C, et al. Distant retrograde orbits and its bifurcations in Earth-Moon system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2576-2588(in Chinese).

特性的有界轨道,并验证了稳定性水平。

在 DRO 的轨道转移方面,目前学者的理论研究集中在 DRO 与地球低轨道(low Earth orbit, LEO)、NRHO、深空轨道等轨道之间的低能耗转移。在地月空间中,Capdevila 等[9-10]利用脉冲机动实现从 LEO 到 DRO、从 DRO 到周边的周期轨道,以及 DRO 与 NRHO 之间的转移,并将有代表性的解转化到星历模型,比较了任务成本;张瑞康等[11]研究了从 DRO 向轨道倾角为0°~90°的月球低轨道之间的转移,对转移路径进行了分类,并比较了脉冲成本和飞行时间;曾豪等[12]研究了 NRHO 与 DRO 的低能往返轨道转移在月球探测中的应用,结合天体借力飞行技术和混合优化技术系统分析了关键参数的影响,给出了往返轨道设计初值的选择策略。在深空转移方面,Cavallari 等[13]研究了从地月系统 DRO 到火星的低能耗转移;Conte 和 Spencer[14]设计了从 LEO 出发进入火星系统 DRO 轨道的转移方案,并探讨了地月系统 DRO 作为中转站的可行性;Scott 和 Spencer[15]计算了从 LEO 到日地系统 DRO 的转移轨道族;Ocampo 和 Rosborough[16]研究了使用脉冲和连续推力从近地停泊轨道转移到日地系统 DRO 的能量。

在 DRO 的轨道应用方面,对地月空间的 DRO,徐明和徐世杰[17]提出在 DRO 上放置中继卫星的概念;王文彬等[18]将 DRO 用于深空自主导航,提出在 DRO 卫星与另一个卫星之间进行星间测距以确定绝对轨道状态,并给出了动态模型误差和星载时钟误差下的导航性能评估。对其他系统的 DRO,Ocampo 和 Rosborough[16]提出了在日地系统 DRO 上部署太阳风暴预警系统等应用;在木星冰封卫星任务中,木星系统 DRO 为航天器在木卫二欧罗巴周围的逃逸和捕获提供了瞬时稳定的转移路径[19];在欧洲航天局的 DePhine 任务中,火星系统 DRO 被用作该项目中火卫一与火卫二基地的备选轨道之一[20-21]。

可以看出,尽管目前与 DRO 的应用相关的研究有很多,但对 DRO 的轨道基础特性研究仍待完善。由于 DRO 的稳定性,长期的轨道保持所需的燃料成本较低,但其缺乏双曲流形结构,进出 DRO 轨道附近区域的转移轨道的设计会受到一定制约,并可能需要更高的燃料成本;另外,由于 DRO 位于小天体绕大天体的公转平面内,其应用受到了该平面的诸多限制。因此,对 DRO 附近动力结构的进一步探索,有助于深入了解该区域复杂的轨道特性和设计转移轨道。例如,由于分岔成三维的 DRO 轨道族具有平面外法向振幅,可用于规避日食、保持和地球连续通信等,其应用范围更广,而多周期 DRO 的周边可能存在流形结构,因此通过 DRO 轨道族的分岔研究其附近的周期性结构,能为轨道转移提供很大的设计便利。为此,本文探讨了地月系统 DRO 轨道族的相关特性。首先,给出了动力学模型、周期轨道和流形的计算方法、稳定性理论相关的理论知识;然后,研究了 DRO 轨道族的分岔、稳定性及周边的流形结构;最后,讨论了不同分支平均轨道周期与能量的关系。

1　周期轨道与流形计算

1.1　圆型限制性三体问题

采用 CR3BP 进行建模。在该近似模型中,地球 P_1 与月球 P_2 围绕其公共质心做圆周运动,航天器 P_3 受地月 2 个天体引力的影响。在图 1 所示的旋转坐标系中,原点 O 设在 P_1 和 P_2 的共同质心,x 轴沿 P_1 指向 P_2,z 轴与系统角动量方向平行,y 轴由右手定则确定。本文将其无量纲化处理:2 个主天体质量 $m_1+m_2=1$,定义 $\mu=m_2/(m_1+m_2)$ 为系统质量参数,则通过计算可知:$m_1=1-\mu$,$m_2=\mu$。P_1 和 P_2 的位置坐标分别为 $(-\mu,0,0)$ 和 $(1-\mu,0,0)$。

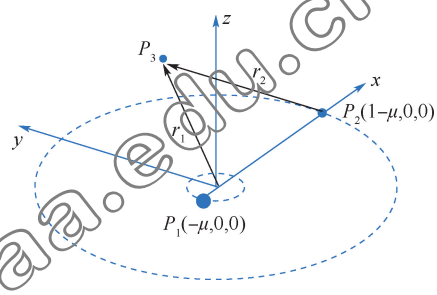


图 1　圆型限制性三体问题

Fig. 1　Circular restricted three-body problem

在上述系统中,航天器 P_3 的状态矢量为 $\boldsymbol{x}=[x,y,z,v_x,v_y,v_z]^{\mathrm{T}}$,其动力学方程可表示为[21]

$$\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})=\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ x+2v_y-\dfrac{(1-\mu)(x+\mu)}{r_1^3}-\dfrac{\mu(x+\mu-1)}{r_2^3} \\ y-2v_x-\dfrac{(1-\mu)y}{r_1^3}-\dfrac{\mu y}{r_2^3} \\ -\dfrac{(1-\mu)z}{r_1^3}-\dfrac{\mu z}{r_2^3} \end{bmatrix} \tag{1}$$

http://bhxb.buaa.edu.cn

式中：$r_1 = [(x+\mu)^2 + y^2 + z^2]^{1/2}$；$r_2 = [(x+\mu-1)^2 + y^2 + z^2]^{1/2}$。

在天体力学中，定义系统能量的 -2 倍为雅可比积分常数 J，数学表示为[22]

$$J(x,y,z,v_x,v_y,v_z) = -(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) + (x^2 + y^2) + \frac{2(1-\mu)}{r_1} + \frac{2\mu}{r_2} + \mu(1-\mu) \quad (2)$$

1.2 周期轨道的微分修正与数值延拓

记方程(1)的解为 $\boldsymbol{x}_t = \phi(\boldsymbol{x}_0, t)$，表示从初始状态 $\boldsymbol{x}_0$ 运动 t 时间后的状态。则方程(1)的周期解需要满足：

$$\boldsymbol{x}_T - \boldsymbol{x}_0 = \boldsymbol{0} \quad (3)$$

式中：T 为轨道周期。求解周期解实际上即为求解满足式(3)的轨道初值 $\boldsymbol{x}_0$ 与周期 T。

一般采用庞加莱截面降低式(3)的维度，庞加莱截面是多维相空间中的一种广义曲面，动力系统中连续的轨迹映射在庞加莱截面上表现为同性质的离散的点[23-24]。由于 DRO 轨道族在旋转系中关于 x-z 平面对称，本文选取平面 $y=0$ 作为庞加莱截面。需注意，在计算轨道周期 T 时，单周期轨道的周期 T 为穿越一次庞加莱平面的时间，而 N-周期轨道的周期 T 为穿越 N 次庞加莱平面的时间。

对平面周期轨道的求解，在应用庞加莱截面后，维度降低的迭代初值记为 $\boldsymbol{w} = [x_0, v_{y,0}]^{\mathrm{T}}$，对应的周期轨道初值为 $\boldsymbol{x}_0 = [x_0, 0, 0, v_{y,0}, 0]^{\mathrm{T}}$。此时，周期轨道需要满足的式(3)改写为

$$\boldsymbol{h}(\boldsymbol{w}) = \begin{bmatrix} x_T - x_0 \\ v_{x,T} \\ v_{y,T} - v_{y,0} \end{bmatrix} = \boldsymbol{0} \quad (4)$$

式(4)可以通过牛顿迭代法进行求解。在求出一个周期解之后，就可以进行数值延拓，求解得到整个周期解族。在延拓时，选择合适的延拓参数(本文选择轨道能量 J)，延拓初值可以由式(5)预测：

$$\boldsymbol{w}_{k+1} = \boldsymbol{w}_k + \frac{\partial \boldsymbol{w}}{\partial J}\delta J \quad (5)$$

式中：k 为周期轨道族中的轨道编号。

对三维周期轨道的求解，在应用庞加莱截面后，维度降低的迭代初值记为 $\boldsymbol{w} = [x_0, z_0, v_{y,0}]^{\mathrm{T}}$，对应的周期轨道初值为 $\boldsymbol{x}_0 = [x_0, 0, z_0, 0, v_{y,0}, 0]^{\mathrm{T}}$。此时，周期轨道需要满足的式(3)改写为

$$\boldsymbol{h}(\boldsymbol{w}) = \begin{bmatrix} x_T - x_0 \\ z_T - z_0 \\ v_{x,T} \\ v_{y,T} - v_{y,0} \\ v_{z,T} \end{bmatrix} = \boldsymbol{0} \quad (6)$$

对式(6)的延拓求解时，选取参数为 z。延拓方程如下：

$$\boldsymbol{w}_{k+1} = \boldsymbol{w}_k + \frac{\partial \boldsymbol{w}}{\partial z}\delta z \quad (7)$$

周期解求出之后，求解其变分方程就可以得到其单值矩阵 $\boldsymbol{M}$。$\boldsymbol{M}$ 是该周期轨道一个轨道周期的状态转移矩阵，数学表示如下[25]：

$$\dot{\boldsymbol{M}} = \left[\frac{\partial \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})}{\partial \boldsymbol{x}}\right]\boldsymbol{M} \quad (8)$$

满足初始条件 $\boldsymbol{M}(0) = \boldsymbol{I}$。

1.3 流形的计算

由单值矩阵 $\boldsymbol{M}$ 的特征值对应的特征向量所张成的空间称为该系统的不变流形。在 CR3BP 中，周期轨道单值矩阵 $\boldsymbol{M}$ 的特征值集 C 具有如下形式[25]：

$$C = \left(1, 1, \lambda_1, \frac{1}{\lambda_1}, \lambda_2, \frac{1}{\lambda_2}\right) \quad (9)$$

式中：$\lambda_1 < 1$ 为系统的稳定特征值，对应的特征向量 $\boldsymbol{v}_1$ 产生了稳定流形；$1/\lambda_1 > 1$ 为系统的不稳定特征值，对应的特征向量 $\boldsymbol{v}_2$ 产生了不稳定流形。由于稳定流形和不稳定流形关于 x-z 平面对称，在得到稳定流形后通过翻转即可得到不稳定流形[22]。

记对应稳定流形和不稳定流形的特征向量分别为 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{s}}$ 和 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{u}}$。沿着 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{s}}$ 方向给一个小扰动 ε，得到稳定流形的积分初值：

$$\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}} = \boldsymbol{x}_{\mathrm{p}} \pm \varepsilon \boldsymbol{v}_{\mathrm{s}} \quad (10)$$

式中：$\boldsymbol{x}_{\mathrm{p}}$ 为周期轨道的初值；在地月系统中一般取 $\varepsilon = 50$ km；“±”表示沿 x 轴正负方向稳定流形的 2 个分支。对 $\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}}$ 数值积分即可得到 $\boldsymbol{x}_{\mathrm{p}}$ 初值对应稳定流形上的 2 条轨道。对周期轨道均匀取若干个离散点，分别按照上述方法计算其轨道，则可以绘制出该周期轨道的流形结构。

对于多周期轨道等几何形状较为复杂的轨道，直接绘制其流形会显得杂乱，不利于后续分析。因此，仍采用庞加莱截面的方式呈现流形，即定义一个庞加莱截面，记录流形穿越该截面的坐标。一个周期轨道的流形将会在该截面上构成一个或多个封闭的形状。

2 稳定性理论

衡量轨道稳定性的指标是稳定性指数，定义为

$$v_i = \frac{1}{2}\left(\|\lambda_i\| + \left\|\frac{1}{\lambda_i}\right\|\right) \quad (11)$$

式中：λ_i 为单值矩阵 $\boldsymbol{M}$ 的特征值，$i = 1, 2, 3$。若所

http://bhxb.buaa.edu.cn

有稳定性指数 $v_i = 1$,则该轨道线性稳定,并具有稳定子空间;若任何一个稳定性指数 $v_i > 1$,则轨道不稳定,轨道存在稳定及不稳定流形[25]。

在 CR3BP 下,非平凡(不为 1)的特征值的特征方程有以下形式[26]:

$$P(\lambda) = \lambda^4 + \alpha\lambda^3 + \beta\lambda^2 + \alpha\lambda + 1 \tag{12}$$

式中:α 与 β 可由单值矩阵 $\boldsymbol{M}$ 与周期 T 计算得出:

$$\begin{cases} \alpha = 2 - \mathrm{Tr}(\boldsymbol{M}) \\ \beta = \dfrac{1}{2}(\alpha^2 + 2 - \mathrm{Tr}(\boldsymbol{M}^2)) \end{cases} \tag{13}$$

求解特征方程 $P(\lambda)=0$ 可得 λ_i,从而可以判断周期解的稳定性。实际上,可以通过直接观察 α 和 β 的值而得到周期解稳定性情况,而不必求解四次方程 $P(\lambda)=0$。

稳定性与 α-β 的几何关系称为 Broucke 图,如图 2 所示[26]。Broucke 图中有 3 条关键曲线:$\beta = -2\alpha - 2$,$\beta = 2\alpha - 2$,$\beta = \alpha^2/4 + 2$。这 3 条曲线将 α-β 参数空间分为若干区域,每一个区域对应了不同的稳定性。中心区域内部所代表的特征值都在复平面单位圆上,表示轨道稳定,而其余区域均有不稳定流形。同一周期轨道族在 Broucke 图中体现为一条连续曲线,该曲线与上述关键曲线相交的地方就会产生分岔。分岔是动力系统中一种常见的现象,会出现稳定性变化或/和产生新的轨道族分支。本文主要考虑了切分岔、倍周期分岔、二次 Hopf 分岔与修正二次 Hopf 分岔,如表 1所示[25-28]。

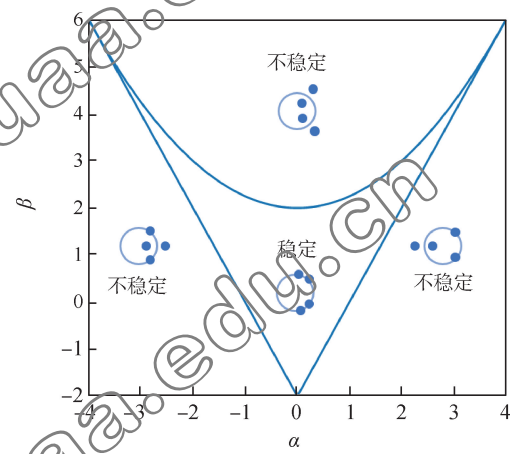


图 2　稳定性图[26]

Fig. 2　Stability diagram[26]

表 1　分岔类型[25-28]

Table 1　Bifurcation type[25-28]

分岔类型	方程	稳定性
切分岔	$\beta = -2\alpha - 2$	变化
2 倍周期分岔	$\beta = 2\alpha - 2$	变化
3 倍周期分岔	$\beta = \alpha + 1$	不变
4 倍周期分岔	$\beta = 2$	不变
5 倍周期分岔	$\beta = \alpha/(2\cos(4\pi/5)) - (\cos(8\pi/5)+1)/\cos(4\pi/5)$ $\beta = \alpha/(2\cos(8\pi/5)) - (\cos(16\pi/5)+1)/\cos(8\pi/5)$	不变
二次 Hopf 分岔	$\beta = \alpha^2/4 + 2, -4 < \alpha < 4$	变化
修正二次 Hopf 分岔	$\beta = \alpha^2/4 + 2, \alpha \in [-\infty, -4] \cup [4, \infty]$	不变

3　DRO 轨道族的分岔及延拓

3.1　DRO 轨道族的稳定性与分岔

研究的 DRO 轨道族的能量范围为 $2 \leqslant J \leqslant 3.2$,涵盖了地月之间大部分区域,轨道形状如图 3 所示。在这个能量范围内绘制 DRO 轨道族的稳定性指数随轨道能量的变化,如图 4 所示。

观察可知,当 $2.365 \leqslant J \leqslant 3.2$ 时,所有稳定性指数 $v_i = 1$,表示该范围的 DRO 轨道均线性稳定。而当 $J < 2.365$ 时,稳定性指数开始偏离,并始终略大于 1,此时对应的平面 DRO 轨道略不稳定。

为了更深入理解 DRO 轨道族的特征结构演化,在 Broucke 稳定性图上绘制了其特征参数 α 和 β 的变化,如图 5 所示。

观察可知,DRO 轨道族主要发生的分岔类型为切分岔和倍周期分岔。分岔方程分别使用不同颜色的虚线标注,DRO 在与分岔方程的相交点处发生分岔,用与分岔方程相同颜色的“ * ”标记,

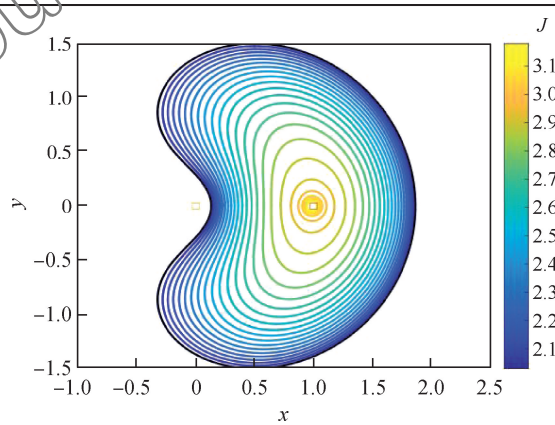


图 3　地月空间 DRO

Fig. 3　DRO in Earth-Moon system

http://bhxb.buaa.edu.cn

此时产生对应分岔类型的轨道族。可以看到，$J>2.355$时的交叉点均发生倍周期分岔；而在$J<2.355$时，DRO轨道族的稳定性曲线与切分岔轨迹线相交并过渡到不稳定区域，平面DRO不再稳定。这时产生了新的轨道族，即三维的DRO。

分岔到三维的DRO分支的几何特征如图6所示。三维DRO轨道族均具有z向的振幅，其中某些轨道能够避开月球的遮挡，与地球进行连续通信。

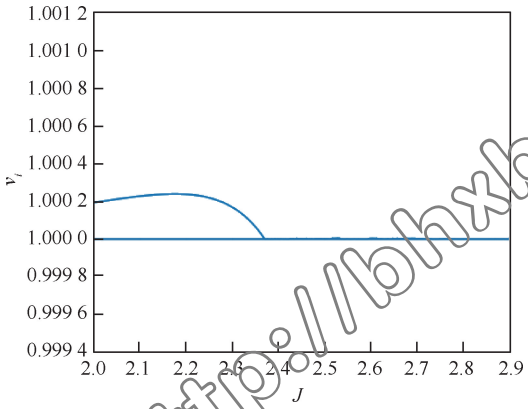


图4 DRO稳定性指数

Fig. 4 Stability indices of DRO

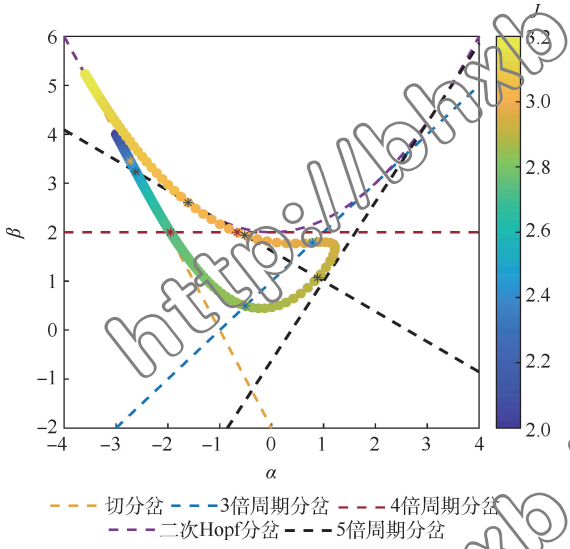


图5 DRO轨道族的Broucke稳定性图

Fig. 5 Broucke stability diagram of DRO family

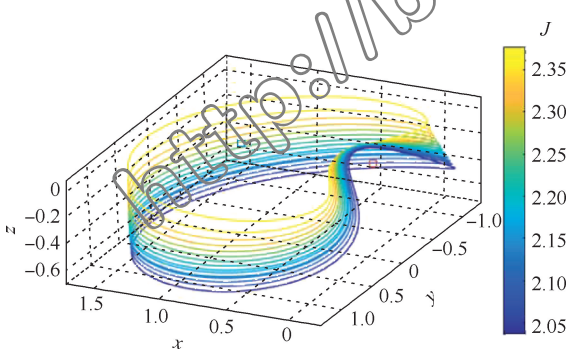


图6 三维DRO

Fig. 6 3D DRO

三维DRO轨道族分支的稳定性指数如图7所示。所有稳定性指数$v_i=1$，轨道均线性稳定。这是因为在发生切分岔时，单值矩阵的2个非平凡特征值趋于统一，此时$\lambda_1=1$、$\lambda_1=+1$，轨道稳定性从平面DRO过渡到了三维DRO分支上[29-30]。

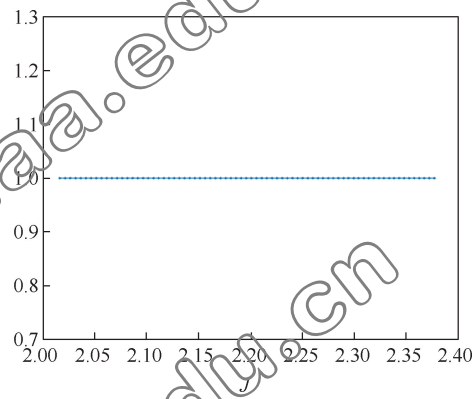


图7 三维DRO的稳定性指数

Fig. 7 Stability indices of 3D DRO

3.2 DRO周边多周期轨道族的延拓与稳定性

在$J>2.355$的稳定区域内，从Broucke图的分岔点处向外延拓求解其余周期轨道分支，得到如下一系列多周期轨道族。

1）三周期平面DRO

在Broucke图上，DRO与3倍周期分岔方程（见图5中深蓝色虚线）分别在$J=2.85$、$J=2.955$两处相交。三周期平面DRO（P3DRO）在整个$2\leqslant J\leqslant 3.2$范围内都存在，均为平面轨道。图8为P3DRO的延拓结果。

图9分别展示了该轨道族在不同延拓阶段下的几何形状，对应了不同的轨道能量。可见，随着J的数值从2开始逐渐增大，P3DRO的轮廓逐渐变小缩窄，轨道之间的间隔也不断缩小；直到$J=2.85$处，P3DRO与DRO重合。当J开始偏离2.85时，P3DRO立即与DRO分离。随着J的增大，一开始其内侧轨道相对外侧轨道的缩小速度

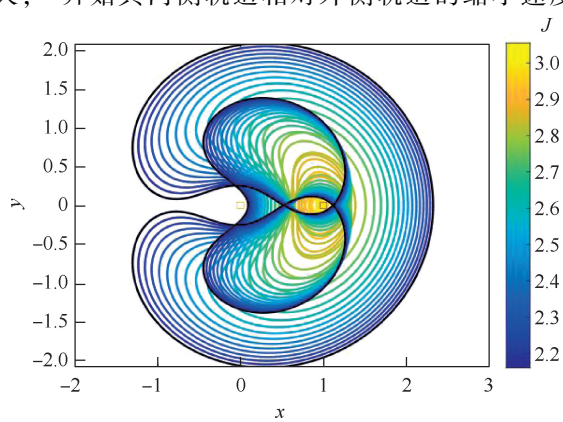


图8 P3DRO

Fig. 8 P3DRO

http://bhxb.buaa.edu.cn

更大,随后外侧轨道相对缩小速度加快,最终在 $J=2.955$ 处 P3DRO 再次与 DRO 重合。当 J 偏离 2.955 后 P3DRO 又分离演变成另一种形状。可以看出,同一轨道分支在发生分岔前后的几何形状差异很大,可以根据几何形状应用于多种任务场景。

图 10 展示了 P3DRO 的稳定性指数。可以发现,除 2 处分岔点之外,其余轨道均有 $\nu_i>1$,轨道均非常不稳定。

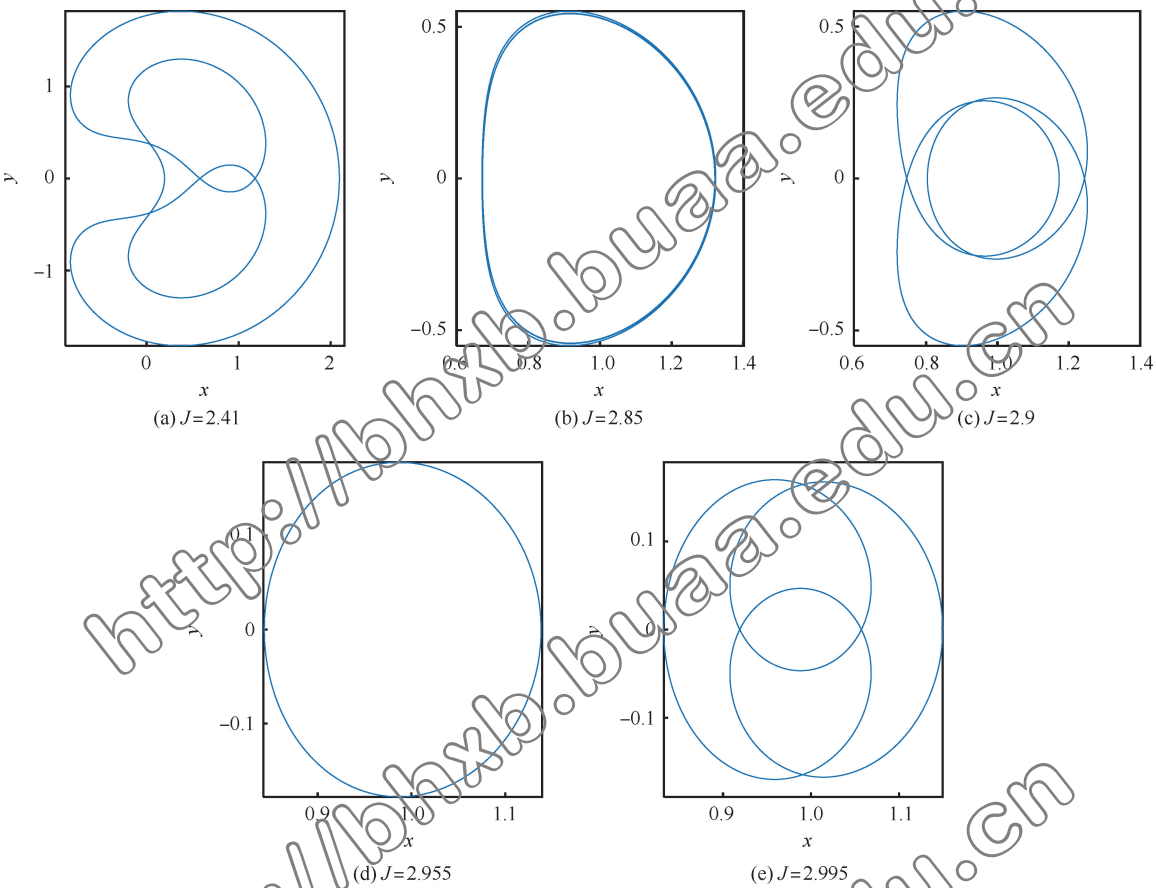


图 9　P3DRO 的几何特性

Fig. 9　Geometric properties of P3DRO

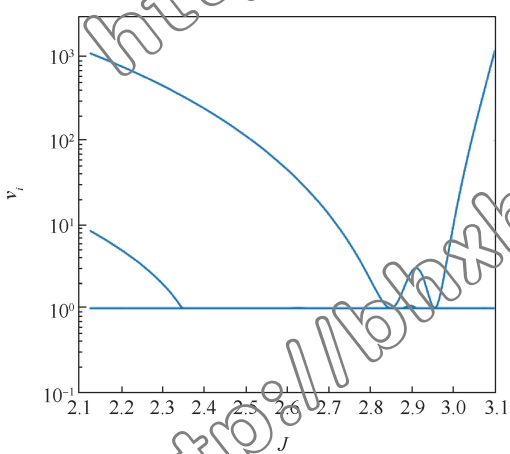


图 10　P3DRO 的稳定性指数

Fig. 10　Stability indices of P3DRO

2) 四周期平面 DRO

在 Broucke 图上,DRO 与 4 倍周期分岔方程(见图 5 中红色虚线)分别在 $J=2.72$、$J=2.995$ 两处相交,沿 $J\leqslant 2.72$ 及 $J\geqslant 2.995$ 方向延拓出 2 个平面分支。图 11 和图 12 显示了四周期平面 DRO(P4DRO)2 个分支的延拓结果。

可以看出,P4DRO 的前一个分支在 $J\geqslant 2.43$ 的范围内线性稳定,而后一个分支均不稳定。

3) 五周期平面与三维 DRO

在 Broucke 图上,DRO 与 5 倍周期分岔方程(见图 5 中黑色虚线)分别在 $J=2.45$、$J=2.9$、$J=2.99$、$J=3.025$ 四处相交,发生了 4 次分岔。其中,在$J\leqslant 2.45$、$J\geqslant 3.025$ 两处延拓出 2 个平面分支,而在 $J\leqslant 2.9$、$J\geqslant 2.99$ 两处延拓出 2 个三维分支。图 13 和图 14 展示了五周期平面与三维 DRO(P5DRO)的 2 个平面分支。图 15 和图 16 则展示了三维 P5DRO。

P5DRO 的 2 个平面分支均不稳定。对三维分支而言,能量在 $J=2.9$ 附近的 P5DRO 分支均线性稳定,而后一个三维 P5DRO 分支在 $J>2.996$处开始则表现不稳定。仔细观察可以发现,P5DRO 存在同一能量对应超过 3 个稳定性指数的现象,这是因为在 P5DRO 的分支中,可能存在

http://bhxb.buaa.edu.cn

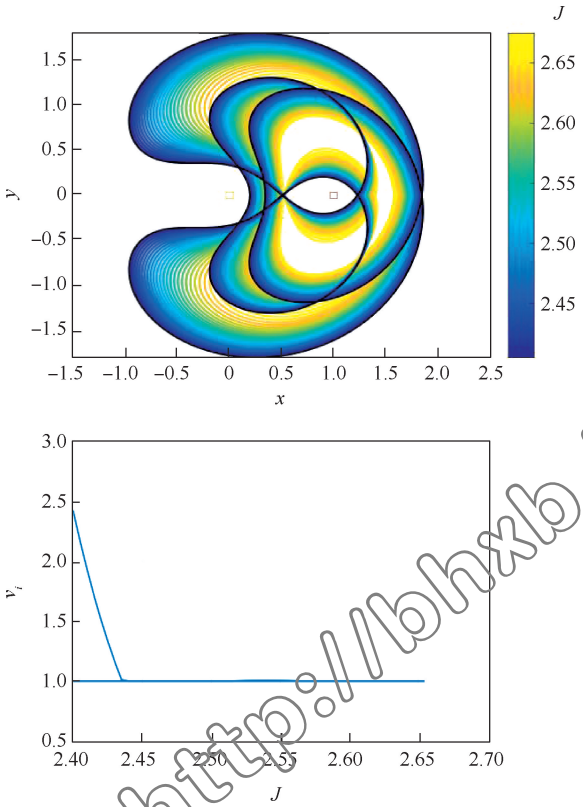


图 11 P4DRO 分支 1 的延拓及其稳定性指数

Fig. 11 Stability indices of P4DRO-1

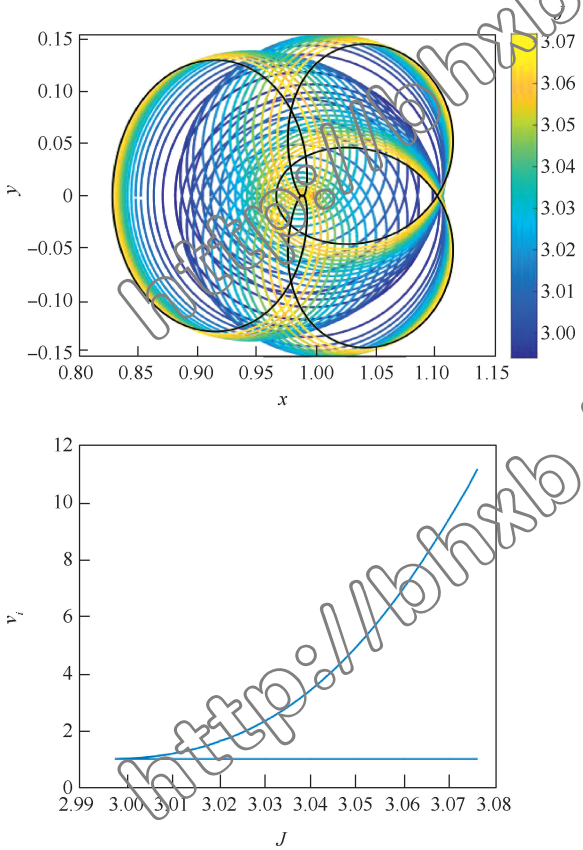


图 12 P4DRO 分支 2 的延拓及其稳定性指数

Fig. 12 Stability indices of P4DRO-2

同一能量下对应多个轨道的情况,如图 17 所示。此时需要根据延拓情况更改延拓参数的选择。

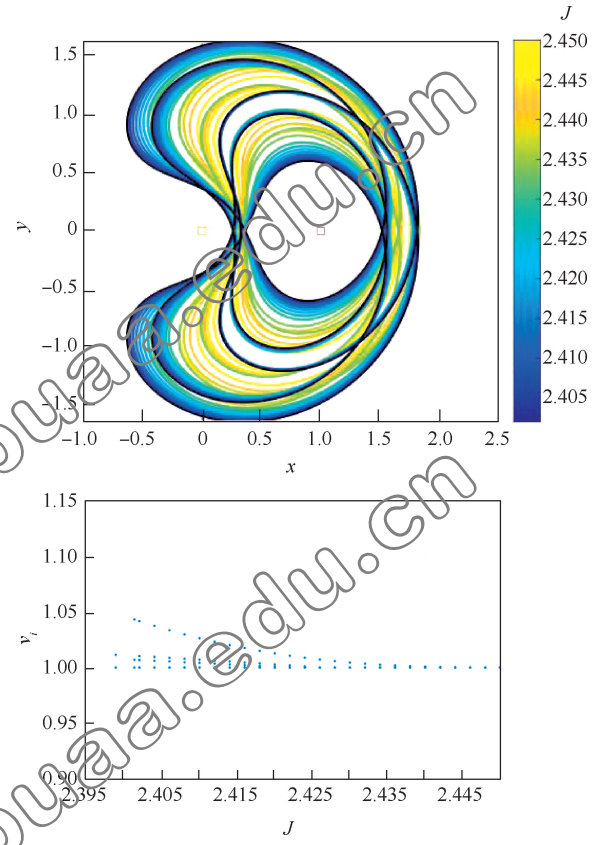


图 13 P5DRO 平面分支 1 的延拓及其稳定性指数

Fig. 13 Stability indices of 2D-P5DRO-1

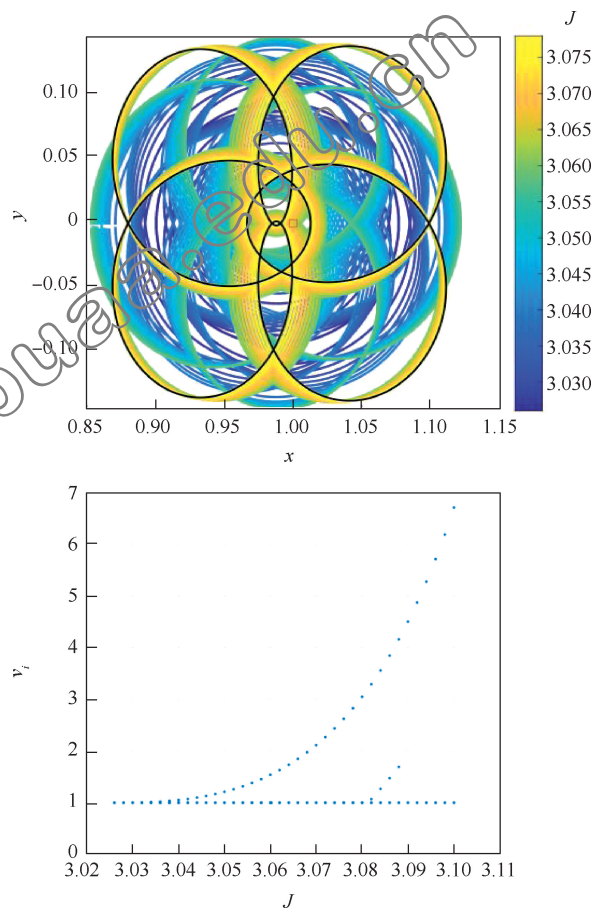


图 14 P5DRO 平面分支 2 的延拓及其稳定性指数

Fig. 14 Stability indices of 2D-P5DRO-2

http://bhxb.buaa.edu.cn

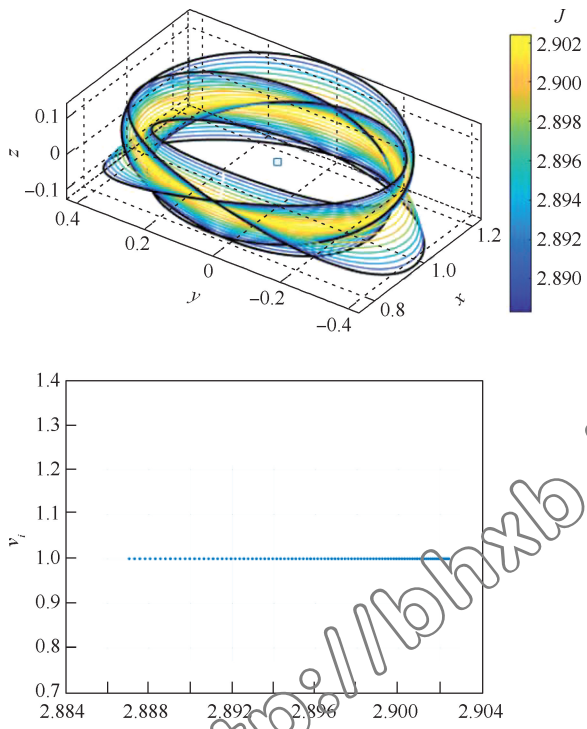


图 15　P5DRO 三维分支 1 的延拓及其稳定性指数

Fig. 15　Stability indices of P5DRO-3D-1

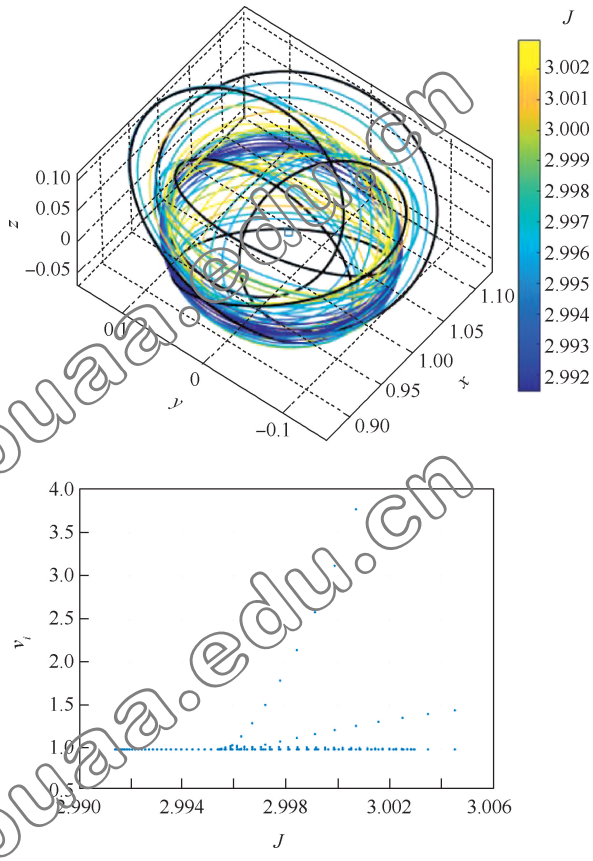
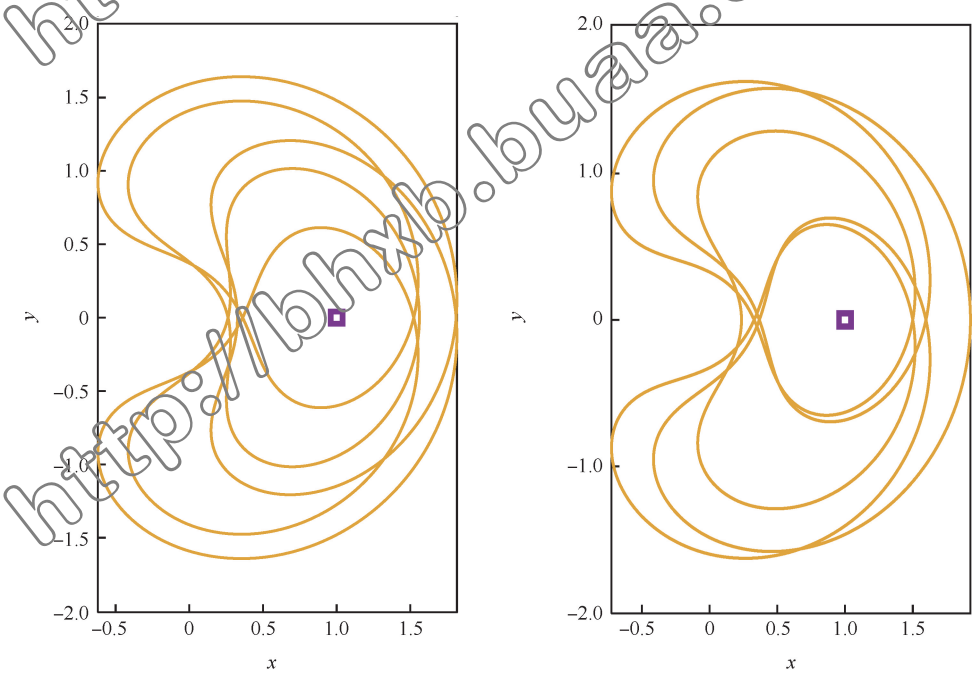


图 16　P5DRO 三维分支 2 的延拓及其稳定性指数

Fig. 16　Stability indices of P5DRO-3D-2

3.3　多周期轨道族的流形

对于 3.2 节得到的轨道分支，可以看到不同轨道分支的最大稳定性指数范围各异，除了 P3DRO 的最大稳定性指数涵盖了 $[10^0,10^3]$ 区间范围以外，其余轨道分支稳定性指数大都有 $v_{\max}<10$。为了更直观理解稳定性指数大小对轨道流形的影响，分别选取了最大稳定性指数为 12.319 9、22.711 7、61.241 4、129.665 6 的多个 P3DRO 进行对比，绘制 2 个轨道周期时间内的稳定流形，如图 18 所示；以及最大稳定性指数为 6.634 4 的三维 P5DRO 在 3 个周期时间内的轨道稳定流形，如图 19 所示。其中，黄色和绿色分别表示稳定流形



(a) J=2.404

http://bhxb.buaa.edu.cn

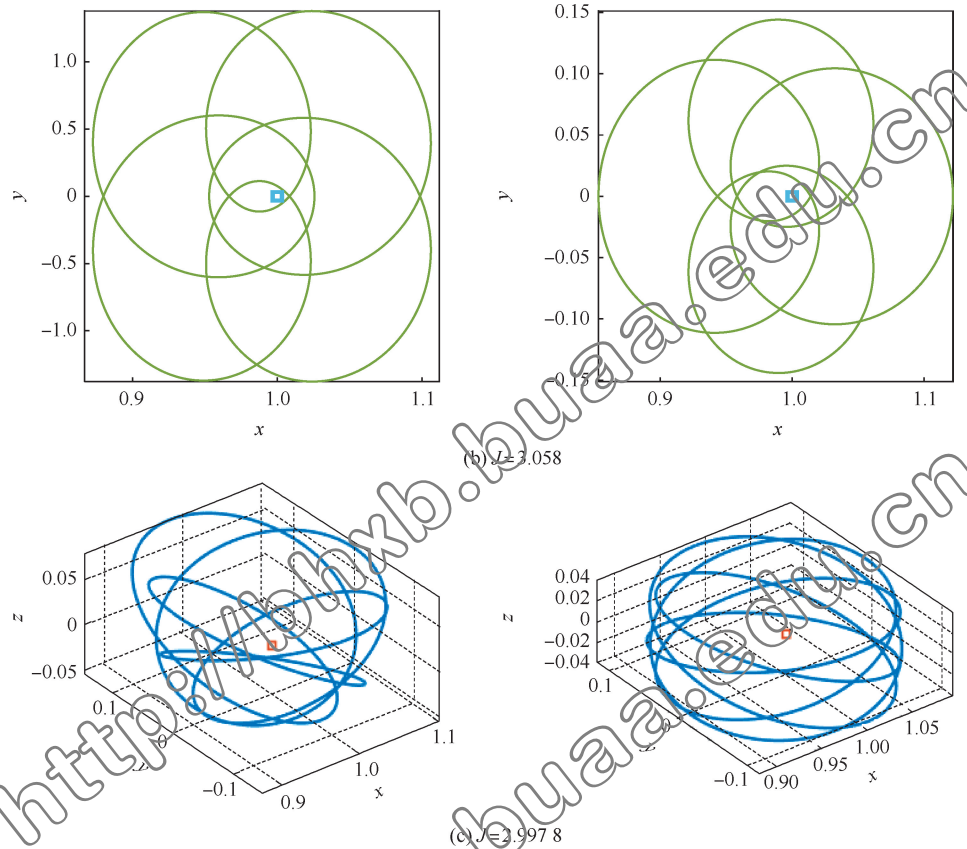


图 17 同一能量对应多个 P5DRO

Fig. 17 Different P5DRO with same Jacobi energy

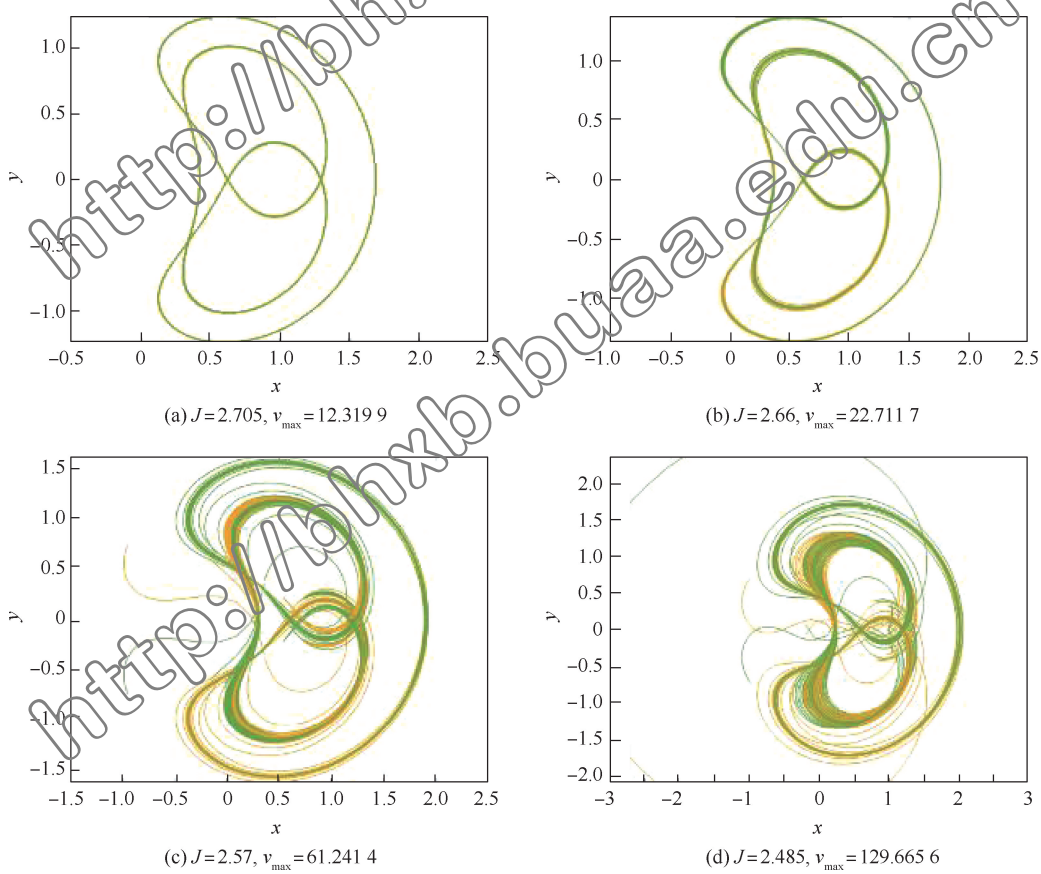


图 18 不同稳定性指数下的稳定流形

Fig. 18 Manifold in different stability indices

http://bhxb.buaa.edu.cn

沿正负方向的 2 个分支。观察可知,当最大稳定性指数 $v_{\max}<10$ 时,其轨道流形并不明显。在之前各周期轨道的延拓分支中,三维 DRO 及三维 P5DRO 的其中一个分支均线性稳定,其余轨道分支稳定性指数大都处于近似稳定或略微不稳定的状态。因此在设计转移轨道时,可主要利用 P3DRO 周围的流形。

为了在设计转移轨道时能更方便地利用流形,选取了 $v_{\max}=55.495\ 2$ 的二维 P3DRO 和 $v_{\max}=6.634\ 4$ 的三维 P5DRO,在庞加莱截面分别绘制了稳定流形穿越的坐标,如图 20 和图 21 所示。对平面轨道,选取 $y=0$ 作为截面,绘图坐标分别为 x 和 v_x;对于三维轨道,选取 $x=1-\mu$ 作为截面,绘图坐标分别考虑为 y-z-v_x 和 y-z-v_y。其中,蓝色和灰色分别表示积分 3、12 个轨道周期内的流形映射在截面上的点,红色点表示周期轨道本身。从这些区域的点中读取状态信息,可选取合适的值进行转移轨道的设计。

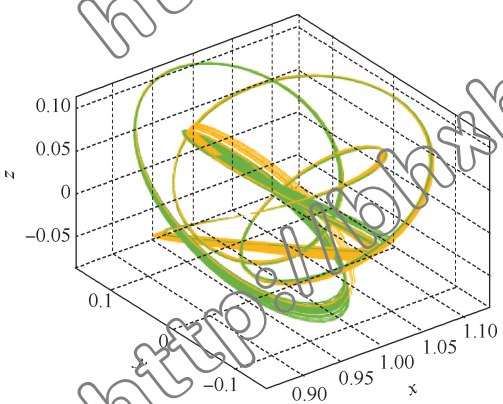


图 19　不同稳定性指数下的稳定流形

($J=3.003\ 5$, $v_{\max}=6.634\ 4$)

Fig. 19　Manifold in different stability indices

($J=3.003\ 5$, $v_{\max}=6.634\ 4$)

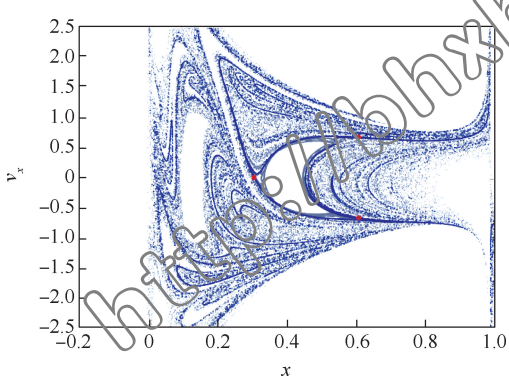


图 20　$y=0$ 截面处二维 P3DRO 的稳定流形

($J=2.58$, $v_{\max}=55.495\ 2$)

Fig. 20　Manifold section of 2D P3DRO in $y=0$ section

($J=2.58$, $v_{\max}=55.495\ 2$)

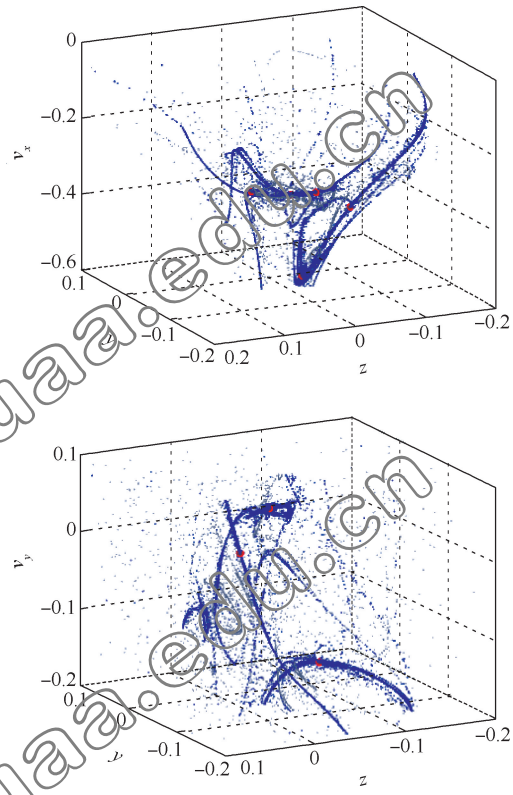


图 21　$x=1-\mu$ 截面处三维 P5DRO 的稳定流形

($J=3.003\ 5$, $v_{\max}=6.634\ 4$)

Fig. 21　Manifold section of 3D P5DRO in $x=1-\mu$ section

($J=3.003\ 5$, $v_{\max}=6.634\ 4$)

3.4　分岔结构与轨道周期

将 DRO 轨道族发生分岔后的延拓结果绘制成如图 22 所示的能量-状态(J-x-v_y)关系图,可以更清晰地展示 DRO 轨道族的分岔结构。

定义 N-周期 DRO 的平均周期为 T/N,T 为轨道完整重复一次的轨道周期。图 23 绘制了不同周期轨道族的能量与平均周期关系,图 24 为放大显示的 P5DRO 四个分支的能量与平均周期关系。

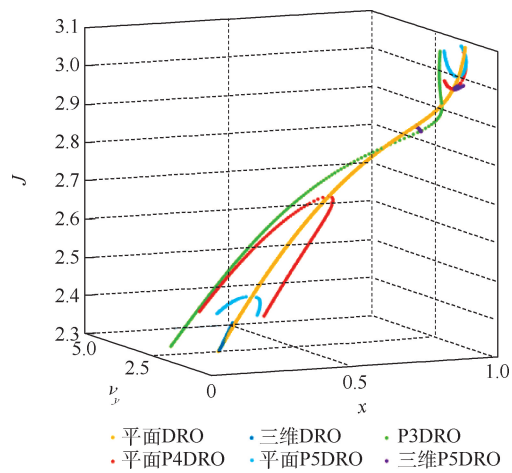


图 22　分岔图

Fig. 22　Bifurcation chart

http://bhxb.buaa.edu.cn

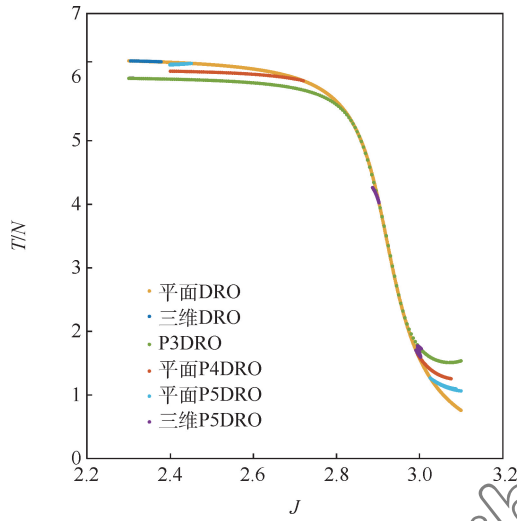


图23 能量-周期关系

Fig. 23 Relationship between energy and period

由图23可知,不同周期轨道的平均周期T/N均随J的增加而单调下降。其中,分岔到三维的DRO分支与平面DRO的平均周期相同。P3DRO的中间分支,即在$2.85 \leqslant J \leqslant 2.955$处,其平均周期与DRO相同。三维P5DRO与平面P5DRO的能量-周期关系放大后如图24所示,存在同一能量对应多个轨道周期的情况。二维平面的倍周期分岔轨道的平均周期均在P3DRO与DRO的周期范围之间。研究周期轨道族的平均周期T/N,可以为一些空间任务提供选择初始参数的参考依据,如对在DRO的多个轨道族上进行卫星编队进行周期匹配等。

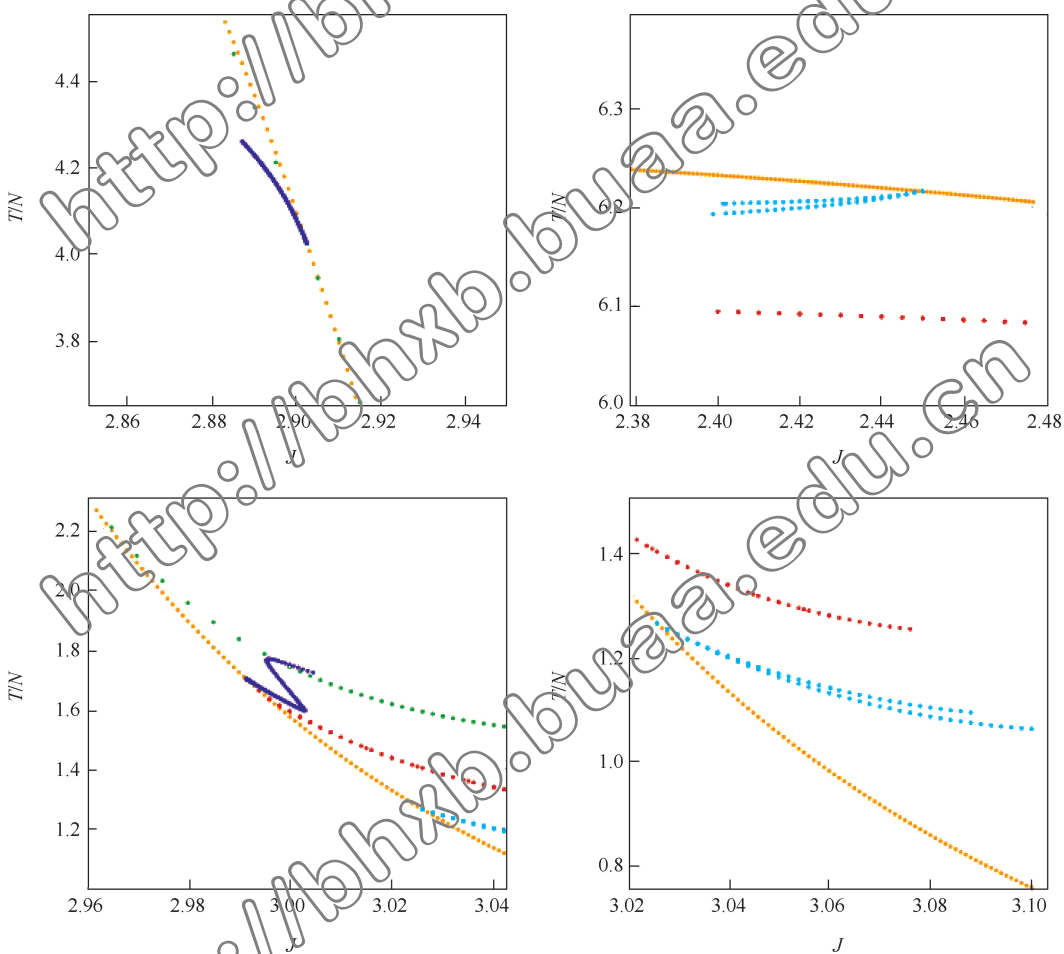


图24 P5DRO的能量-周期关系放大图

Fig. 24 Relationship between energy and period of P5DRO and its local magnification

4 结 论

1)DRO轨道族主要发生切分岔和倍周期分岔,其中切分岔会改变轨道稳定性,倍周期分岔的稳定性则不变。分岔后的不同分支之间几何形状差异大。

2)P3DRO的稳定性指数范围最大,流形结构明显,其余轨道分支则线性稳定或近似稳定。

3)DRO轨道族的平均周期T/N随着能量值J升高而单调下降。其中分岔到三维的DRO分支与平面DRO的周期相同,P5DRO存在同一能量对应多个轨道周期的情况,平面倍周期分岔轨道的平均周期介于DRO与P3DRO之间。

http://bhxb.buaa.edu.cn

参考文献(References)

[1] STRANGE N, LANDAU D, MCELRATH T, et al. Overview of mission design for NASA asteroid redirect robotic mission concept[C]//3rd International Electric Propulsion Conference, 2013:1-12.

[2] HAMBLETON K. Deep space gateway to open opportunities for distant destinations[EB/OL]. (2018-04-25)[2020-10-27]. https://www.nasa.gov/feature/deep-space-gateway-to-open-opportunities-for-distant-destinations/.

[3] GATES M, MUIRHEAD B, NAASZ B, et al. NASA's asteroid redirect mission concept development summary[C]//2015 IEEE Aerospace Conference. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-13.

[4] BEZROUK C J, PARKER J. Long duration stability of distant retrograde orbits[C]//AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference. Reston: AIAA, 2014:4424.

[5] BEZROUK C J, PARKER J. Long term evolution of distant retrograde orbits in the Earth-Moon system[J]. Astrophysics and Space Science, 2017, 362(9): 176.

[6] 彭超,温昶煊,高扬.地月空间 DRO 与 HEO(3:1/2:1)共振轨道延拓求解及其稳定性分析[J].载人航天,2018,24(6):703-718.
PENG C, WEN C X, GAO Y. Solution and stability analysis of resonance orbits of DRO and HEO (3:1/2:1) in Earth Moon space[J]. Manned Spaceflight, 2018, 24(6): 703-718(in Chinese).

[7] 吴小婧,曾凌川,巩应奎. DRO 计算及其在地月系中的摄动力研究[J].北京航空航天大学学报,2020,46(5):48-57.
WU X J, ZENG L C, GONG Y K. DRO calculation and its perturbation in the Earth-Moon system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(5): 48-57(in Chinese).

[8] CHEN H R, CANALIAS E, HESTROFFER D, et al. Effective stability of quasi-satellite orbits in the spatial problem for Phobos exploration[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2020, 43(12): 1-12.

[9] CAPDEVILA L R, GUZZETTI D, HOWELL K C. Various transfer options from Earth into distant retrograde orbits in the vicinity of the Moon[J]. Advances in the Astronautical Sciences, 2014, 152: 3659-3678.

[10] CAPDEVILA L R, HOWELL K C. A transfer network linking Earth, Moon, and the triangular libration point regions in the Earth-Moon system[J]. Advances in Space Research, 2018, 62(7): 1826-1852.

[11] ZHANG R K, WANG Y, ZHANG H, et al. Transfers from distant retrograde orbits to low lunar orbits[J]. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 2020, 132(8): 1-30.

[12] 曾豪,李朝玉,彭坤,等.地月空间 NRHO 与 DRO 在月球探测中的应用研究[J].宇航学报,2020,41(7):910-919.
ZENG H, LI C Y, PENG K, et al. Application of Earth Moon space NRHO and DRO in lunar exploration[J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(7): 910-919(in Chinese).

[13] CAVALLARI I, PETITDEMANGE R, LIZY-DESTREZ S. Transfer from a lunar distant retrograde orbit to Mars through Lyapunov orbits[C]//27th International Symposium on Space Flight Dynamics (ISSFD). Melbourne: Engineers Australia Press, Royal Aeronautical Society, 2019: 1393-1398.

[14] CONTE D, SPENCER D B. Mission analysis for Earth to Mars-Phobos distant retrograde orbits[J]. Acta Astronautica, 2018, 151: 761-771.

[15] SCOTT C J, SPENCER D B. Calculating transfer families to periodic distant retrograde orbits using differential correction[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2010, 33(5): 1592-1605.

[16] OCAMPO C A, ROSBOROUGH G W. Transfer trajectories for distant retrograde orbits of the Earth[R]. [S. l.]: NASA STI/Recon Technical Report A, 1993, 95: 1323-1337.

[17] 徐明,徐世杰.绕月飞行的大幅值逆行轨道研究[J].宇航学报,2009,30(5):1785-1791.
XU M, XU S J. Exploration of distant retrograde orbits around Moon[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(5): 1785-1791(in Chinese).

[18] WANG W B, SHU L Z, LIU J K, et al. Joint navigation performance of distant retrograde orbits and cislunar orbits via LiAISON considering dynamic and clock model errors[J]. Navigation, 2019, 66(4): 781-802.

[19] LAM T, WHIFFEN G J. Exploration of distant retrograde orbits around Europa[C]//15th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting. Reston: AIAA, 2005.

[20] WALLACE M, PARKER J, STRANGE N, et al. Orbital operations for Phobos and Deimos exploration[C]//AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference. Reston: AIAA, 2012: 5067.

[21] GIL P J S, SCHWARTZ J. Simulations of quasi-satellite orbits around Phobos[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2010, 33(3): 901-914.

[22] 赵育善,师鹏,张晨.深空飞行动力学[M].北京:中国宇航出版社,2016:131-157.
ZHAO Y S, SHI P, ZHANG C. Dynamics of deep space flight[M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2016: 131-157(in Chinese).

[23] KOON W S, LO W Y, MARSDEN J E, et al. Dynamical systems, the three-body problem and space mission design[C]//International Conference on Differential Equations, 2000: 1167-1181.

[24] MOON F C. Nonlinear dynamics[M]//MEYERS R A. Encyclopedia of physical science and technology. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2003: 523-535.

[25] HOWELL K C, CAMPBELL E T. Three-dimensional periodic solutions that bifurcate from halo families in the circular restricted three-body problem[J]. Advances in the Astronatical Sciences, 1999, 102: 891-910.

[26] ZIMOVAN-SPREEN E M, HOWELL K C, DAVIS D C. Near rectilinear halo orbits and nearby higher-period dynamical structures: Orbital stability and resonance properties[J]. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 2020, 132(5): 1-25.

[27] DOUSKOS C, KALANTONIS V, MARKELLOS P. Effects of resonances on the stability of retrograde satellites[J]. Astrophysics and Space Science, 2007, 310(3-4): 245-249.

[28] WINTER O C. The stability evolution of a family of simply peri-

http://bhxb.buaa.edu.cn

odic lunar orbits[J]. Planetary and Space Science, 2000, 48(1):23-28.

[29] CAMPBELL E T. Bifurcations from families of periodic solutions in the circular restricted problem with application to trajectory design[D]. West Lafayette:Purdue University,1999.

[30] BOSANAC N. Leveraging natural dynamical structures to explore multi-body systems[D]. West Lafayette:Purdue University,2016.

Distant retrograde orbits and its bifurcations in Earth-Moon system

CHEN Guanhua[1,2], YANG Chihang[1,2], ZHANG Chen[1], ZHANG Hao[1,*]

(1. Key Laboratory of Space Utilization, Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: There exists a type of stable retrograde orbit around the Moon called distant retrograde orbit (DRO) in the Earth-Moon system. The circular restricted three-body problem (CR3BP) is taken as the dynamical model to study the dynamical structure around DRO. It is possible to determine the bifurcation point and type using Broucke's stability diagram. The numerical continuation method is used to calculate several new orbital branches. Tangent and multi-period bifurcations are the two primary forms of DRO bifurcations (starting from period tripling). New orbit families include planar orbits and 3D orbits. The characteristics of the new orbit family are discussed, including shape, period, energy, stability, hyperbolic manifold structure. The relationship between orbital period and energy is discussed. The bifurcation structure and the hyperbolic manifold structure of multi-periodic orbits are presented geometrically. The dynamic structure will provide theoretical support for the mission based on DRO families.

Keywords: distant retrograde orbit; bifurcation; multi-period orbit; numerical continuation; orbital stability

http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2020-10-30; **Accepted**: 2021-01-22; **Published online**: 2021-02-24 16:57

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210224.1539.004.html

Foundation items: National Key R & D Program of China (2018YFB1900605); Key Research Program of the Chinese Academy of Sciences (CAS) (ZDRW-KT-2019-1-0102)

* **Corresponding author**. E-mail: hao.zhang.zhr@csu.ac.cn

北 京 航 空 航 天 大 学 学 报

2022 年　第 48 卷　　总目次

(总第 347 期 ~ 总第 358 期)

北京航空航天大学学报 2022 年第 48 卷第 1 期 (总第 347 期)

8240 新型双轴式圆弧型大尺寸渐开线样板的工作原理 …… 陈洪芳,梁超伟,李宝山,谢华琨,石照耀 (1)
8241 基于 SVM 的低空飞行冲突探测改进模型 …… 王尔申,宋远上,佟刚,王传云,曲萍萍,徐嵩 (8)
8242 基于区间估计与透射率自适应约束的去雾算法 …… 杨燕,张金龙,张浩文 (15)
8243 涂层加速老化与自然曝晒试验的相关性分析 …… 汪鹏飞,贺小帆,张涵,李玉海 (27)
8244 复杂背景下机场道面细带状结构病害检测算法 …… 李海丰,韩红阳 (36)
8245 基于条件生成对抗网络的 HDR 图像生成方法 …… 贝悦,王琦,程志鹏,潘兴浩,杨默涵,丁丹丹 (45)
8246 基于智能优化箱粒子滤波的移动机器人 FastSLAM …… 罗景文,秦世引 (53)
8247 Durbin 法在阻尼梁动响应求解中的运用分析 …… 张夏阳,张凯,招启军,王博 (67)
8248 飞行员头盔夜视镜系统气流吹袭性能研究 …… 赵彦鹏,吴明磊,刘何庆,洪涛,李军,张友刚 (79)
8249 航天飞行器铸件舱段结构快速设计方法 …… 郑成成,王捷冰,吴曼乔,许大帅,杨晨,陈爽 (87)
8250 旋翼翼型高维多目标气动优化设计 …… 宋超,周铸,李伟斌,罗骁 (95)
8251 基于 Bootstrap 理论的小子样寿命评估模型 …… 赵远,杨琳 (106)
8252 网联混合动力汽车能量优化控制 …… 陈飞,谢和辉,杨世春,冯松,刘健,高新华 (113)
8253 纤维素航油缩合-加氢工艺能耗分析 …… 黄星华,董升飞,杨晓奕 (121)
8254 大型客机机翼挂架接合位置定常吹气控制分析 …… 刘睿,白俊强,邱亚松,李宇飞 (132)
8255 基于注意力机制与特征相关性的人脸表情识别 …… 兰凌强,刘淇缘,卢树华 (147)
8256 立体物料仓库单元的机械系统 FMEA 分析 …… 卞仁鹏,贾志新,毕温海,李威 (156)
8257 基于蛇形通道的电池组液冷方案设计与优化 …… 王明悦,林家源,刘新华,张金刚,闫啸宇,杨世春 (166)
8258 连接方式对电池模块一致性与产热影响 …… 丁昌明,文华 (174)
8259 考虑倍率的平流层飞艇储能电池建模与分析 …… 刘松松,孙康文 (182)

北京航空航天大学学报 2022 年第 48 卷第 2 期 (总第 348 期)

8260 基于 fastText 算法的行业分类技术 …… 吴震,冉晓燕,苗权,刘纯艳,张栋,魏娜 (193)
8261 自适应短文本关键词生成模型 …… 王永剑,孙亚茹,杨莹 (199)
8262 基于变分推理的网络舆情传播模式分类 …… 唐红梅,唐文忠,李瑞晨,王衍洋,王丽宏 (209)
8263 基于启发式遗传算法的模糊测试样本集优化方案 …… 王志华,王浩帆,程漫漫 (217)
8264 Android 恶意软件检测低冗余特征选择方法 …… 郝靖伟,潘丽敏,李蕊,杨鹏,罗森林 (225)
8265 基于随机森林的物联网设备流量分类算法 …… 李锐光,段鹏宇,沈蒙,祝烈煌 (233)
8266 大规模物联网恶意样本分析与分类方法 …… 何清林,王丽宏,罗冰,杨黎斌 (240)
8267 面向异构大数据环境的数据脱敏模型 …… 佟玲玲,李鹏霄,段东圣,任博雅,李扬曦 (249)
8268 基于异质信息网络的恶意代码检测 …… 刘亚姝,侯跃然,严寒冰 (258)
8269 加密文档排序中保序加密算法的最优化选取 …… 张久岭,黄道超,沈时军 (266)
8270 电信大数据分析下的时空区域经济可视化应用 …… 李娜,刘文敏,孟繁瑞,刘岩 (273)
8271 一种基于深度学习的恶意代码克隆检测技术 …… 沈元,严寒冰,夏春和,韩志辉 (282)
8272 TLS 密码套件的流量数据随机性分析 …… 郭帅,程光 (291)
8273 基于情感对象识别和情感规则的微博倾向性分析 …… 王泽辰,王树鹏,孙立远,张磊,王勇,郝冰川 (301)

http://bhxb.buaa.edu.cn

8274 基于能源分解的用户用电行为模式分析 …… 卢瑞瑞，于海阳，杨震，赖英旭，杨石松，周明（311）
8275 面向智能电网嵌入式设备的网络威胁动态评估方法 …… 吕卓，郭志民，陈岑，莫坚松，常朝稳（324）
8276 基于 LIME 的恶意代码对抗样本生成技术 …… 黄天波，李成扬，刘永志，李燈辉，文伟平（331）
8277 一种基于攻击距离的对抗样本攻击组筛选方法 …… 刘洪毅，方宇彤，文伟平（339）
8278 基于抽象汇编指令的恶意软件家族分类方法 …… 李玉，罗森林，郝靖伟，潘丽敏（348）
8279 基于关键字的海报自动合成系统 …… 关帅鹏，于海阳，杨震，周明，赖英旭（356）

北京航空航天大学学报 2022 年第 48 卷第 3 期（总第 349 期）

8280 飞机燃油系统全飞行剖面热边界模拟与温度预测 …… 王瑞卿，李栋，李运华，王曦（369）
8281 未知载荷条件下机械系统剩余寿命预测方法 …… 许丹，肖小琦，冯至昕（376）
8282 基于有效中转时间预测的不正常航班恢复技术 …… 何坚，果红艳，姚远，卞磊，唐红武，王殿胜（384）
8283 基于有限时间引导律的欠驱智能船舶循迹控制 …… 冯辉，胡胜，余文曌，徐海祥（394）
8284 阻力和升力加速度指令快速解析与跟踪制导 …… 刘刚（401）
8285 CO_2 在 RP5 航空燃油中的质扩散系数测量 …… 李超越，冯诗愚，徐雷，王志凌（412）
8286 星载 GNSS 海洋反射信号建模与仿真 …… 王峰，杨东凯，张波，李博闻，张国栋（419）
8287 变质心固定翼无人机动力学分析与抗扰控制 …… 邱潇颀，高长生，荆武兴（430）
8288 泡沫铜/低熔点合金复合相变材料凝固放热分析 …… 侯天睿，邢玉明，郑文远，郝兆龙（438）
8289 基于最大熵法和遗传算法的 SMSP 干扰对抗方法 …… 周长霖，王春阳，宫健，谭铭，赵英健（447）
8290 基于搜索意图交互的无人机集群协同搜索算法 …… 王宁，李哲，梁晓龙，侯岳奇，吴傲（454）
8291 捆绑火箭气动载荷分布不确定性分析 …… 董欣心，刘莉，葛佳昊，王志（464）
8292 基于释热率分析的钝体贫油熄火过程分析 …… 邢竞文，金捷，王方（473）
8293 脉冲射流对环量控制翼型气动性能的影响 …… 雷玉昌，张登成，张艳华，苏光旭（485）
8294 一种基座姿态可控空间机器人的通用避奇异算法 …… 赵龙泽，余浩平，黄良伟，黄龙飞（495）
8295 基于深度学习的焊缝 PAUT 数据智能化分析方法 …… 朱甜甜，宋波，毛捷，廉国选（504）
8296 基于 A2-RO 电路版图填充的硬件木马抗植入方法 …… 李宗哲，何家骥，马浩诚，刘燕江，秦国轩，赵毅强（514）
8297 基于深度神经网络的像素级别可见光图像配准 …… 黄晨威，程景春，潘雄，宋凝芳，刘冰（522）
8298 基于调制卷积神经网络的空地数据链信道估计 …… 刘春辉，王美琳，董赞亮，王沛（533）
8299 机载中空纤维膜组件壳程气体流动数值模拟 …… 刘国田，白文涛，潘江丽，陈广豪，潘俊，冯诗愚（544）

北京航空航天大学学报 2022 年第 48 卷第 4 期（总第 350 期）

8300 机场跑道水泥混凝土道面板尺寸分析 …… 张献民，李梦晓，陈宇，李长辉，徐博庆（551）
8301 基于自编码器和 HMM 的民机接地点远事件检测 …… 霍纬纲，李继龙，王慧芳（560）
8302 含孔隙缺陷三维五向编织复合材料偏轴拉伸力学性能分析 …… 杨志贤，张明，李昂，张超（569）
8303 颅缝早闭手术中颅骨切割方案生成方法 …… 罗杨宇，贺佳宾，谢东升，陆珅宇，宫剑（578）
8304 电力场景下基于无人机视觉的运动目标追踪方法 …… 冯雪，杜猛俊，向新宇，钱锦，张敏（586）
8305 复杂曲面上的自动铺放路径规划方法 …… 赵安安，何大亮，王晗，郭俊刚，柯映林（595）
8306 水下燃料组件转运系统耦合振动分析 …… 袁占航，李运华，刘昊东（602）
8307 下肢康复机器人动力学建模约束违约抑制 …… 徐亚茹，李克鸿，刘佳，刘荣，张建成（609）
8308 纤维素类生物质水热法制备航油前驱物能耗分析 …… 董升飞，黄星华，杨晓奕（620）

http://nhxb.buaa.edu.cn
http://bhxb.buaa.edu.cn

8309 基于 SINS/RFID 的隧道列车高精度定位方法 …… 张辰东，王兆瑞，金声震，艾国祥 (632)
8310 一种基于地转风模型的平流层风场插值方法 …… 胡康，周江华，张晓军 (639)
8311 基于双重属性信息的跨模态行人重识别算法…… 陈琳，高赞，宋雪萌，王英龙，聂礼强 (647)
8312 单元构架式抛物面天线张紧绳索多层设计方法…… 王辉，何天宇，都显琛，王春洁 (657)
8313 柔性翼气动力和变形特性的实验研究 …… 王涵斌，贺曦，王晋军 (665)
8314 基于联合分布适配的智能电表运行状态评价 …… 许升，李游，李贺龙 (674)
8315 底凹结构减阻效应数值分析 …… 李彪，王良明，杨志伟 (682)
8316 基于 QZSS L1 信号的岸基 GNSS-R 码延迟海面测高 …… 储倜，贺凯飞，高凡，贺匀峤，孟馨悦，徐天河 (691)
8317 复合材料层板冰雹高速冲击损伤预测及失效分析 …… 张超，方鑫，刘建春 (698)
8318 账户型区块链可扩展存储模型 …… 张栩豪，牛保宁，弓婷 (708)
8319 低复杂度自适应容积卡尔曼滤波算法 …… 李春辉，马健，杨永建，甘轶 (716)

北京航空航天大学学报 2022 年第 48 卷第 5 期 (总第 351 期)

8320 基于正负极动力学特性的锂离子电池优化充电方法 …… 张彩萍，李峰，张琳静，王宇斌，贾新羽，张维戈 (725)
8321 一种分布式异构多 AUV 任务分配鲁棒拍卖算法 …… 李鑫滨，郭力争，韩松 (736)
8322 基于混合遗传算法的多箱型集装箱装载问题分析 …… 张长勇，刘佳瑜 (747)
8323 时变方差自回归模型的联合估计函数方法推断 …… 韩玉，田宝成，王书鹏 (756)
8324 基于副气囊的平流层浮空器高度控制 …… 林康，马云鹏，郑泽伟，武哲 (762)
8325 基于 CE-PF 算法的舰载机离场调度优化问题 …… 万兵，韩维，苏析超，刘洁 (771)
8326 面向可靠性预计的软件运行时行为模型构造方法 …… 李秋英，陆民燕，古廷阳 (786)
8327 Android 恶意 APP 多视角家族分类方法 …… 郝靖伟，罗森林，张寒青，杨鹏，潘丽敏 (795)
8328 基于贪心策略的直角坐标机器人动态分拣规划 …… 陈林，毕树生，李大寨，林闯，欧阳铜 (805)
8329 基于熵理论的复杂装备费用测算模型 …… 魏东涛，刘晓东，丁刚，陈玉金 (816)
8330 一种修正的马氏距离判别法 …… 王珂瑶，王惠文，赵青，王珊珊 (824)
8331 腹板开口对复合材料梁腹板剪切承载性能的影响 …… 周睿，高维成，刘伟 (831)
8332 基于 LMI 的过渡态主控回路闭环控制律优化设计 …… 缪柯强，王曦，朱美印 (841)
8333 融合低秩和稀疏先验的结构性缺失图像修复 …… 胡循勇，杨晓梅，李昊怡，梅宇博，郑秀娟，刘凯 (855)
8334 基于合作博弈的多机冲突解脱算法…… 张宏宏，甘旭升，辛建霖，刘一群，陈旭祎 (863)
8335 基于深度学习的无人机视觉目标检测与跟踪 …… 蒲良，张学军 (872)
8336 基于通道注意力机制的行人重识别方法…… 孙义博，张文靖，王蓉，李冲，张琪 (881)
8337 基于神经网络的车辆强制换道预测模型 …… 崔洁茗，余贵珍，周彬，李存金，马继伟，徐国艳 (890)
8338 多飞行器突防打击一体化微分对策制导律设计 …… 程涛，周浩，董晓飞，陈万春 (898)
8339 基于 DDPG 算法的变体飞行器自主变形决策…… 桑晨，郭杰，唐胜景，王肖，王子瑶 (910)
8340 导弹增量式自适应容错控制系统设计 …… 方艺忠，陆宇婷，韩拓，胡庆雷 (920)

北京航空航天大学学报 2022 年第 48 卷第 6 期 (总第 352 期)

8341 直升机前飞状态旋翼结冰风洞试验研究…… 黄明其，王亮权，袁红刚，彭先敏，章贵川 (929)
8342 近距空战训练中的智能虚拟对手决策与导引方法 …… 孟光磊，刘德见，周铭哲，朴海音，陈耀飞 (937)
8343 基于损伤力学的增材制造金属材料疲劳寿命预测 …… 洪海铭，詹志新，王佳莹 (950)
8344 基于朝向约束和重识别特征的目标轨迹关联方法 … 艾明晶，单国志，刘鹏高，杨澎钢 (957)
8345 基于 μCT 图像的 PVC 泡沫微观试样几何模型生成算法 …… 周勇，薛斌，郭昀鑫，王人鹏 (968)
8346 金属蜗杆与塑料斜齿轮不等齿距啮合方法 …… 任继华，石照耀，王得峰，余石鹏 (979)

http://bhxb.buaa.edu.cn

8347 卷积神经网络卫星信号自动调制识别算法…… 崔天舒，崔凯，黄永辉，赵文杰，安军社（986）
8348 产品协同设计中异构模型数据融合的有效策略 …… 薛俊杰，周军华，施国强，宋晓，蒋炎红，全红艳（995）
8349 一种基于自动分区的海量科学数据计算框架…… 田杨，晏海华（1004）
8350 移动机器人自主动态避障方法 …… 张贺，缪存孝，唐友军，闫晓强，时彦洋，余远金（1013）
8351 基于 VMD-MPE 的开关磁阻电机功率变换器故障诊断 …… 张竞文，熊立新，马宏昌，边敦新（1022）
8352 基于多任务辅助推理的近眼视线估计方法 …… 王小东，谢良，闫慧炯，闫野，印二威，李卫国（1030）
8353 输入受限下多无人机三维协同路径跟踪控制 … 刘宗华，刘树光，张博洋，王欢，李伟（1038）
8354 一种改进 PSO-ARMA 半球谐振陀螺温度误差建模方法 …… 吴宗收，汪立新，李新三，李灿（1050）
8355 基于 AK-IS 法的航空齿轮泵滑动轴系可靠性分析 …… 高宁，李华聪，洪林雄，曹瑞，符江锋（1057）
8356 吸气流动控制对翼身融合飞机气动特性的影响 …… 贾媛，曹翔，吴江浩（1065）
8357 基于 KF-LESO-PID 洛伦兹惯性稳定平台控制 …… 熊颖，刘强，任元，樊亚洪，孙津济（1072）
8358 基于 ESO 的电液位置伺服系统反步滑模控制 …… 张震阳，汪成文，郭新平，陈帅（1082）
8359 多四旋翼无人机系统分布式分层编队合围控制 …… 郑伟铭，徐扬，罗德林（1091）
8360 采用改进导重法的拓扑结构灰度单元过滤技术 …… 高翔，王林军，杜义贤，付君健（1106）

北京航空航天大学学报 2022 年第 48 卷第 7 期（总第 353 期）

8361 基于任务映射的暗硅芯片功耗预算方法 …… 李鑫，李智，周巍，吴瑞祺，唐浩然，陈业航（1115）
8362 部分可观 Petri 网故障的量子贝叶斯诊断 …… 刘久富，张信哲，汪恒宇，A. M. TOMAS DIAS，王志胜，杨忠（1125）
8363 基于零速修正与姿态自观测的惯性行人导航算法 …… 戴洪德，张笑宇，郑百东，戴邵武，郑伟伟（1135）
8364 一种多机协同打击的快速航迹规划方法 …… 陈清阳，辛宏博，王玉杰，唐硕南，贾高伟，朱炳杰（1145）
8365 基于多分辨率特征自选择的遮挡物识别算法 … 谢祥颖，来广志，那峙雄，骆欣，王栋（1154）
8366 气动舵机高压反向直动式减压阀的设计及特性 …… 刘延斌，王学生，秦新亚，王浩，陈琴珠，赵赛（1164）
8367 高速干摩擦机械密封的端面变形及摩擦磨损 …… 马润梅，赵祥，陈潇竹，李双喜，杨海超（1174）
8368 抽吸气流量对催化惰化系统性能影响 …… 王晨臣，潘俊，王洋洋，段伟杰（1183）
8369 二维有限长度柔性壁面上 T-S 波演化的数值研究 …… 洪正，叶正寅（1190）
8370 基于状态空间涡格法的阵风减缓分析 …… 杨澜，安朝，谢长川，杨超（1200）
8371 磁悬浮转子状态反馈解耦自抗扰控制方法 …… 尹增愿，蔡远文，任元，王卫杰，陈晓岑，于春淼（1210）
8372 基于高效注意力和上下文感知的目标跟踪算法 …… 柏罗，张宏立，王聪（1222）
8373 基于 DDQN 的片上网络混合关键性消息调度方法 …… 李国梁，李峭，徐亚军，熊华钢（1233）
8374 基于离散系数改进的 VWKNN 位置指纹定位算法 …… 许甜，何泾沙，朱娜斐，邓万航，吴霜，他永君（1242）
8375 大行程解耦三平动微定位平台的设计与优化 …… 林苗，孟刚，居勇健，徐伟胜，曹毅（1252）
8376 基于 PM 算法的涡旋电磁波引信超分辨测向方法 …… 孙丽华，闫晓鹏，刘强，郝新红，章鸿运（1263）
8377 结构引导的图像修复 …… 胡凯，赵健，刘昱，牛余凯，姬港（1269）
8378 基于 SVC 视频流的低复杂度多播组分解算法 …… 杨静璇，徐桢（1278）
8379 小天体环的轨道动力学…… 吴太泷，王悦（1287）

8380 基于平面变换的高精度相机标定方法 …… 彭妍，郭君斌，于传强，柯冰 (1297)
8381 基于注意力机制的光伏组件热斑检测算法 …… 樊涛，孙涛，刘虎 (1304)
8382 一种新的气动伺服弹性失稳模式的机理分析 …… 姜宇，杨超，吴志刚 (1314)
8383 面向扑翼翼面运动参数的优化设计 …… 吴越，谢长川，杨超，安朝 (1324)
8384 空间光学遥感器高精度 6-DOF 并联平台设计与实现 …… 梁凤超，谭爽，黄刚，范建凯，林喆，康晓军 (1332)

北京航空航天大学学报 2022 年第 48 卷第 8 期（总第 354 期）

8385 面向目标检测的双驱自适应遥感图像超分重建方法 …… 成科扬，荣兰，蒋森林，詹永照 (1343)
8386 基于深度强化学习与扩展卡尔曼滤波相结合的交通信号灯配时方法 …… 吴兰，吴元明，孔凡士，李斌全 (1353)
8387 基于改进大气散射模型的单幅图像去雾方法 …… 杨勇，邱根莹，黄淑英，万伟国，胡威 (1364)
8388 面向量化分块压缩感知的区域层次化预测编码 …… 刘浩，郑浩然，黄荣 (1376)
8389 HEVC 对偶编码单元划分优化算法 …… 刘美琴，徐晨铭，姚超，林春雨，赵耀 (1383)
8390 基于 IoU 约束的孪生网络目标跟踪方法 …… 周丽芳，刘金兰，李伟生，雷帮军，何宇，王一涵 (1390)
8391 基于动态语义记忆网络的长尾图像描述生成 …… 刘昊，杨小汕，徐常胜 (1399)
8392 结合多层特征及空间信息蒸馏的医学影像分割 …… 郑宇祥，郝鹏翼，吴冬恩，白琮 (1409)
8393 基于彩色三要素的无参考对比度失真图像质量评价方法 …… 丁盈秋，杨杨，成茗，张卫明 (1418)
8394 基于图对比注意力网络的知识图谱补全 …… 刘丹阳，方全，张晓伟，胡骏，钱胜胜，徐常胜 (1428)
8395 文本信息辅助图像差异描述生成 …… 陈玮婧，王维莹，金琴 (1436)
8396 一种傅里叶域海量数据高速谱聚类方法 …… 张熳，徐兆瑞，沈项军 (1445)
8397 面向鱼眼图像的人群密度估计 …… 杨家林，林春雨，聂浪，刘美琴，赵耀 (1455)
8398 用于遥感图像变化检测的全尺度特征聚合网络 …… 刘国强，房胜，李哲 (1464)
8399 基于改进空间通道信息的全局烟雾注意网络 …… 董泽舒，袁非牛，夏雪 (1471)
8400 基于图对比的上下位关系检测 …… 张雅丽，方全，王允鑫，胡骏，钱胜胜，徐常胜 (1480)
8401 基于立体图像的多路径特征金字塔网络 3D 目标检测 …… 苏凯琪，阎维青，徐金东 (1487)
8402 基于时空注意力机制的新冠肺炎疫情预测模型 …… 鲍昕，谭智一，鲍秉坤，徐常胜 (1495)
8403 基于三维 Saab 变换的高光谱图像压缩方法 …… 徐艾明，黄宇星，沈秋 (1505)
8404 真实场景水下语义分割方法及数据集 …… 马志伟，李豪杰，樊鑫，罗钟铉，李建军，王智慧 (1515)
8405 外观动作自适应目标跟踪方法 …… 熊珺瑶，王蓉，孙义博 (1525)
8406 基于多标签协同学习的跨域行人重识别 …… 李慧，张晓伟，赵新鹏，路昕雨 (1534)
8407 基于球场重建的球员运动数据分析 …… 吉晓琪，宋子恺，于俊清 (1543)

北京航空航天大学学报 2022 年第 48 卷第 9 期（总第 355 期）

8408 复杂电磁环境辐射-散射耦合场快速预估方法 …… 苏东林，崔朔，白江飞，李尧尧 (1553)
8409 从网格到“东数西算”：构建国家算力基础设施 …… 钱德沛，栾钟治，刘轶 (1561)
8410 材料基因工程加速新材料设计与研发 …… 孙志梅，王冠杰，张烜广，周健 (1575)
8411 星基 ADS-B 系统及关键技术发展综述 …… 张学军，谭元晧，李雪缘，简鑫慧 (1589)
8412 基于“时间-特征”协同注意力的机场快轨客流预测 … 杜文博，石婉君，廖盛时，朱熙 (1605)
8413 飞机液压泵二维性能退化的可靠性评估 …… 王少萍，陈仁同，张超 (1613)
8414 基于指数平均动量鸽群优化的多无人机协同目标防御 …… 段海滨，仝秉达，刘冀川 (1624)
8415 重油航空活塞发动机燃油喷射技术 …… 丁水汀，邵龙涛，赵帅，朱锟，杜发荣，周煜 (1630)
8416 超临界二氧化碳闭式布莱顿循环系统研究进展 …… 邹正平，王一帆，姚李超，刘火星，许鹏程，李辉 (1643)
8417 基于边界元法的三维结构体滑跳运动数值仿真 …… 杨超，姜宇，吴志刚 (1678)

http://bhxb.buaa.edu.cn

8418 时间积分方法的研究进展与挑战 …… 邢誉峰，季奕，张慧敏 (1692)
8419 旋转部件 SGBEM-FEM 耦合热弹性断裂分析 …… 董雷霆，贺双新 (1702)
8420 运动信息引导的目标检测算法 …… 胡海苗，沈柳青，高立崑，李明竹 (1710)
8421 自动铺丝成型构件缺陷在线检测技术进展 …… 丁希仑，罗伟恒，刘斐，王国栋，陈维强，张武翔 (1721)
8422 面向智能化管理的数字孪生电池构建方法 …… 杨世春，李强伟，周思达，张正杰，马源，陈飞 (1734)
8423 新型扭簧电连接器的确信可靠性正向设计优化 …… 康锐，刘浩然，张清源，余丽，翟国富 (1745)
8424 流动拓扑对液体射流失稳与雾化的影响 …… 杨立军，黄东骐，韩旺，李敬轩，富庆飞 (1757)
8425 基于电磁超声横波的管道剩余厚度检测 … 徐立军，刘福禄，丁一清，李正勇，谢跃东 (1767)
8426 基于电润湿液体透镜的显微成像技术 …… 王琼华，袁荣英，刘超 (1774)
8427 仿生减阻表面的进展与挑战 …… 刘明杰，吴青山，严昊，于存明，蔺存国，张金伟，赵天艺 (1782)
8428 磷酸掺杂型高温质子交换膜燃料电池关键材料研究进展 …… 相艳，李文，郭志斌，张劲，卢善富 (1791)
8429 无人机高机动抗扰轨迹跟踪控制方法 …… 王英勋，宋欣屿，赵江，蔡志浩 (1806)
8430 飞行过程中头盔对飞行员颈部损伤的影响 …… 王丽珍，刘景龙，赵彦鹏，卜伟平，柳松杨，樊瑜波 (1818)
8431 基于层次分析的信息物理网络多维攻击损毁评估 …… 洪晟，岳天羽，李新建 (1827)
8432 多飞行器攻击时间一致性协同制导进展综述与展望 …… 董希旺，于江龙，化永朝，李清东，任章 (1836)

北京航空航天大学学报 2022 年第 48 卷第 10 期 (总第 356 期)

8433 Iridium/ORBCOMM 机会信号融合定位技术 …… 秦红磊，李志强，赵超 (1845)
8434 背景压强对电推进羽流场影响的数值模拟 …… 翁惠焱，蔡国飙，郑鸿儒，刘立辉，张百一，贺碧蛟 (1854)
8435 复杂多环路连杆机构曲柄判定的分支图识别法 …… 聂良益，丁华锋，王君，毕树生 (1863)
8436 超低轨道热层大气密度原位探测 …… 李永平，朱光武，郑晓亮，艾洪赵，闫亚飞，周建华 (1875)
8437 高高原低气压环境对锂离子电池循环性能的影响 …… 谢松，平现科，巩译泽 (1883)
8438 r 型网格自适应在间断 Galerkin 有限元激波捕捉中的应用 …… 冀小权，吴晓军，唐静，李明，张健 (1889)
8439 基于功耗残差的航天器 CMG 退化特征提取方法 …… 田利梅，梁梦彤，唐荻音，韩丹阳，于劲松，李春伟 (1899)
8440 基于阵列天线波束形成的卫星导航信号提纯 …… 史鹏亮，王晓宇，薛瑞 (1906)
8441 多级降压调节阀内部流动特性数值模拟 …… 方毅芳，项高翔，唐春娥，石月娟 (1915)
8442 基于遗传算法的护理机器人逆运动学求解方法 …… 张立博，李宇鹏，朱德明，付永领 (1925)
8443 基于模型的民机验证需求捕获及应用技术 …… 郭泰，钱馨，宫綦，任文明，杨栓宝，徐清刚 (1933)
8444 基于雾计算的无线传感器网络联合入侵检测算法 …… 朱梦圆，陈卓，刘鹏飞，吕娜 (1943)
8445 折叠翼无人机冷气发射装置动态特性分析及优化 …… 张钊，彭一明，周福亮，魏小辉，聂宏，杨刚 (1951)
8446 函数型正则广义典型相关分析 …… 王志超，TENENHAUS Arthur，王惠文，赵青 (1960)
8447 基于 PSO-BP 神经网络的平流层风场短期快速预测 … 龙远，邓小龙，杨希祥，侯中喜 (1970)
8448 高超声速变外形飞行器建模与有限时间控制 …… 张远，黄万伟，路坤锋，白文艳，于江龙 (1979)
8449 考虑制造约束的印刷电路板式换热器优化设计 …… 杜默，孟宝，潘丰，万敏 (1994)
8450 多尺度特征融合的 Anchor-Free 轻量化舰船要害部位检测算法 …… 李晨瑄，顾佼佼，王磊，钱坤，冯泽钦 (2006)

8451 基于特征根有界摄动分析的高超声速飞行器双通道控制 …… 杨雨宸，张增辉，闫佳宁，张晶，杨凌宇（2020）
8452 基于 BABFA 的 XNOR/OR 电路面积优化 …… 周宇豪，何振学，梁新艺，范新超，霍志胜，肖利民（2031）
8453 不同温控模式下直升机惰化系统性能对比 …… 白文涛，刘国田，邹博，王晨臣，陈广豪，冯诗愚（2040）
8454 基于交通状态的离场航班动态协同排序方法 …… 江灏，刘继新，董欣放（2048）
8455 磁悬浮控制敏感陀螺角动量包络分析 …… 杨洋，王卫杰，汪洲，樊亚洪，薛乐（2061）
8456 基于双谱分析的高原灌木回波信号分类 …… 李立元，栗苹，李国林，张广为（2070）
8457 电动汽车双边 LCC 无线充电系统传导电磁干扰 …… 吕梦圆，翟丽，胡桂兴（2079）

北京航空航天大学学报 2022 年第 48 卷第 11 期（总第 357 期）

8458 抵御对抗样本攻击的指纹室内定位方法 …… 张学军，鲍俊达，何福存，盖继扬，田甲，黄海燕（2087）
8459 微小卫星隐身构型设计及优化分析 …… 秦远田，孙汗青，岳鑫（2102）
8460 高速气膜镶装式浮环密封的开启特性 …… 郑娆，陈潇竹，李双喜，赵祥，施任杰，宋子锋（2111）
8461 基于径向基函数代理模型的 M 形杆刚度优化 …… 杨慧，范硕硕，王岩，刘荣强，肖洪（2121）
8462 高超声速飞行器命中精度高准确度评估 …… 彭维仕（2130）
8463 基于 PPO 的移动平台自主导航 …… 徐国艳，熊绎维，周彬，陈冠宏（2138）
8464 NO 快速检测光腔结构设计与光路仿真 …… 李文，蔡永青，陈梦凡，刘鹏（2146）
8465 冰雪天气下基于 MFOA-KELM 残差修正的跑道温度混合预测 …… 陈斌，刘悦，李庆真，丁宇，王立文（2153）
8466 基于燃料电池的复合电源式装载机分层控制 …… 张志文，杜文杰，梁君飞，张艳岗，武雅文（2165）
8467 基于 CC1310 芯片的多通道高速率低功耗无线传感系统 …… 段瑞枫，吕燕洁，杜文基，周游（2177）
8468 基于注意机制的轻量化稠密连接网络单幅图像去雨 …… 柴国强，王大为，芦宾，李竹（2186）
8469 GPS P(Y)码功率增强监测分析 …… 李文玄，侯文海，王凯，邱瑞瑾，孙淑贤（2193）
8470 基于 ESO 的超局部无模型 PMSM 转速预测控制 …… 许令亮，陈桂明，李乔扬（2204）
8471 星载原子钟在轨剩余寿命预测方法研究 …… 凤建广，郑紫霞，龙东腾，周波，陆明泉，郑恒（2215）
8472 高精度球面洛伦兹力磁轴承设计与分析 …… 傅百恒，王卫杰，王元钦，樊亚洪，聂辰，贾海鹏（2222）
8473 旋转抛物-锥形蚀坑模型及其应用 …… 刘德俊，田干，金国锋，杨正伟，任碧云，魏花丽（2230）
8474 基于群体意志统一的无人机协同围捕策略 …… 刘峰，魏瑞轩，周凯，丁超（2241）
8475 基于无监督学习和粒子滤波的非视距信号检测 …… 侯宁宁，李灯熬，赵菊敏（2250）
8476 飞机旋转表面结冰数值模拟 …… 郭琦，申晓斌，林贵平，张世娟（2259）
8477 基于凸优化和 LQR 的火箭返回轨迹跟踪制导 …… 吴杰，张成，李淼，熊芬芬（2270）
8478 一种基于激光位移测量的机械臂参数标定方法 …… 邵鑫，季力，邹怀武，解杨敏（2281）
8479 基于障碍物代价势场的移动机器人避障算法 …… 迟胜凯，谢永芳，陈晓方，彭帆（2289）
8480 数据立方体关联挖掘在红外抗干扰中的应用 …… 吴鑫，伍友利，牛得清，蔡宇轩，徐洋，陈鞭（2304）
8481 基于混合稀疏表示的二维压缩感知 SAR 成像 … 熊世超，倪嘉成，张群，罗迎，王岩松（2314）
8482 基于 SOM 和关联规则的民机运行风险 …… 熊明兰，王华伟，倪晓梅，蔺瑞管（2325）
8483 基于优化 CenterNet 的低空无人机检测方法 …… 张瑞鑫，黎宁，张夏夏，ZHOU Huiyu（2335）

http://bhxb.buaa.edu.cn

8484 基于动态四叉树搜索的民航行李车码放算法 …… 邢志伟, 侯翔开, 李彪, 张涛, 文涛 (2345)
8485 基于 MM-GGIW-PMBM 滤波的扩展目标跟踪算法 …… 吴孙勇, 周于松, 谢雪, 蔡加华, 樊向婷 (2356)
8486 机场到港旅客换乘时间效率评价指标优选 …… 罗谦, 李琦, 文涛, 陈丰华, 朱萍 (2365)
8487 丝束同轴冷阴极电子束熔丝特性及 TC4 成形组织 …… 许海鹰, 杨光, 张伟, 杨波, 桑兴华, 王壮 (2373)
8488 嵌入注意力机制的多尺度深度可分离表情识别 …… 宋玉琴, 高师杰, 曾贺东, 熊高强 (2381)
8489 复合材料层板低速倾斜冲击损伤分析 …… 张超, 刘建春, 方鑫 (2388)
8490 航空铝试块疲劳裂纹相控阵超声成像检测 …… 彭朝勇, 胥松柏, 杜创洲, 张杰 (2398)
8491 红外低轨星座突发任务多重策略调度方法 …… 张晟宇, 朱振才, 胡海鹰 (2405)
8492 一种方形腔体的目标散射特性及测量方法 …… 赵京城, 娄长玉, 李家碧, 杨宗凯 (2415)
8493 基于云模型的民航监察员队伍能力综合评价 …… 李敬强, 樊天辰, 周妍汝, 房秋 (2425)
8494 预浸料贮存时间对 MT700/603 复合材料力学性能的影响 …… 王荣, 于雅琳, 王乐辰, 莫申思, 黄玉清, 周翔 (2434)
8495 miniSAR 卫星精密参考轨道设计 …… 廖祥, 郑靖, 汪永生, 谢成清, 丁强强 (2442)
8496 基于图卷积网络的卷积神经网络耗时预测算法 …… 李哲暘, 张如意, 谭文明, 任烨, 雷鸣, 吴昊 (2450)
8497 湿热环境中含脱层复合材料层合板的界面裂纹扩展 … 夏飞, 薛江红, 何赞航, 金福松 (2460)
8498 基于 RCA-HicksHenne 方法的几何不确定性稳健优化设计 … 张威, 王强, 路嘉晨, 阎超 (2473)
8499 Tanabe 模型和 Smith 热调节模型结合预测皮温效果分析 …… 王涛, 张万欣, 李猛, 卜雪琴, 张宸, 王海亮 (2482)
8500 开裂式阻力方向舵流固耦合机理分析 …… 李永昌, 戴玉婷, 杨超 (2494)
8501 可变后掠翼联动驱动机构设计与尺寸综合 …… 都显琛, 刘学翱, 董洋, 王辉, 何天宇, 王春洁 (2502)
8502 面向控制的仿鸽扑翼机纵向动力学建模与分析 …… 彭程, 孙立国, 王衍洋, 谭文倩, 肖峰 (2510)
8503 环肋翅片管相变传热特性及分形优化 …… 王玮琦, 邢玉明, 郑文远, 郝兆龙 (2520)
8504 基于 PCC-LSTM 模型的短期负荷预测方法 …… 刘倩倩, 刘钰山, 温烨婷, 何杰, 李晓, 毕大强 (2529)
8505 基于特征融合与抗遮挡的卫星视频目标跟踪方法 …… 刘耀胜, 廖育荣, 林存宝, 李兆铭, 杨新岩 (2537)
8506 机载 PLC 信道传递函数建模与概率保证分析 …… 戚佳艺, 李峭, 熊华钢, 严若文 (2548)
8507 基于 ELMo-GCN 的核电领域命名实体识别 …… 荆鑫, 王华峰, 刘潜峰, 罗嗣梧, 张凡 (2556)
8508 一种新的基于信号导频的射频指纹识别方法 …… 曾盛, 朱丰超, 杨剑 (2566)
8509 地月空间的远距离逆行轨道族及其分岔研究 …… 陈冠华, 杨驰航, 张晨, 张皓 (2576)

http://bbxb.buaa.edu.cn

JOURNAL OF BEIJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS

2022 Vol. 48 Total Contents

(Sum 347 ~ Sum 358)

http://bhxb.buaa.edu.cn

Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics 2022 Vol. 48 No. 1 (Sum 347)

8240 Working principle of novel double-axis arc-shaped large-size involute artifact
…… CHEN Hongfang, LIANG Chaowei, LI Baoshan, XIE Huakun, SHI Zhaoyao (1)

8241 Improved conflict detection model of low-altitude flight based on support vector machine
…… WANG Ershen, SONG Yuanshang, TONG Gang, WANG Chuanyun, QU Pingping, XU Song (8)

8242 Dehazing algorithm based on interval estimation and adaptive constraints of transmittance
…… YANG Yan, ZHANG Jinlong, ZHANG Haowen (15)

8243 Correlation between accelerated aging of coating and natural exposure test
…… WANG Pengfei, HE Xiaofan, ZHANG Han, LI Yuhai (27)

8244 Algorithm to detect thin strip-shaped structural diseases on airport pavement in complex background
…… LI Haifeng, HAN Hongyang (36)

8245 HDR image generation method based on conditional generative adversarial network
…… BEI Yue, WANG Qi, CHENG Zhipeng, PAN Xinghao, YANG Mohan, DING Dandan (45)

8246 FastSLAM for mobile robot based on box particle filter with intelligence optimization
…… LUO Jingwen, QIN Shiyin (53)

8247 Application analysis of Durbin method in solving dynamic response of damped beam
…… ZHANG Xiayang, ZHANG Kai, ZHAO Qijun, WANG Bo (67)

8248 Windblast performance of pilot helmet-mounted night vision goggle system
…… ZHAO Yanpeng, WU Minglei, LIU Heqing, HONG Tao, LI Jun, ZHANG Yougang (79)

8249 Rapid design method of spacecraft casting cabin structure
…… ZHENG Chengcheng, WANG Jiebing, WU Manqiao, XU Dashuai, YANG Chen, CHEN Shuang (87)

8250 Many-objective aerodynamic optimization design for rotor airfoils
…… SONG Chao, ZHOU Zhu, LI Weibin, LUO Xiao (95)

8251 Lifetime evaluation model of small sample based on Bootstrap theory
…… ZHAO Yuan, YANG Lin (106)

8252 Energy optimal control of hybrid electric vehicles in connected environment
…… CHEN Fei, XIE Hehui, YANG Shichun, FENG Song, LIU Jian, GAO Xinhua (113)

8253 Energy consumption of condensation-hydrogenation process to prepare alkanes from lignocellulose biomass
…… HUANG Xinghua, DONG Shengfei, YANG Xiaoyi (121)

8254 Steady blowing control at wing-engine junction of airliner
…… LIU Rui, BAI Junqiang, QIU Yasong, LI Yufei (132)

8255 Facial expression recognition based on attention mechanism and feature correlation
…… LAN Lingqiang, LIU Qiyuan, LU Shuhua (147)

8256 FMEA analysis of mechanical system of three-dimensional material warehouse unit
…… BIAN Renpeng, JIA Zhixin, BI Wenhai, LI Wei (156)

8257 Design and optimization of battery pack liquid cooling scheme based on serpentine channel
…… WANG Mingyue, LIN Jiayuan, LIU Xinhua, ZHANG Jingang, YAN Xiaoyu, YANG Shichun (166)

8258 Influence of connection mode on consistency and heat production of battery modules
…… DING Changming, WEN Hua (174)

8259 Modeling and analysis of stratospheric airship's energy storage battery considering rate
…… LIU Songsong, SUN Kangwen (182)

Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics 2022 Vol. 48 No. 2 (Sum 348)

8260 Industry classification technology based on fastText algorithm
…… WU Zhen, RAN Xiaoyan, MIAO Quan, LIU Chunyan, ZHANG Dong, WEI Na (193)

8261 Adaptive short text keyword generation model
…… WANG Yongjian, SUN Yaru, YANG Ying (199)

8262 Classification of network public opinion propagation pattern based on variational reasoning
…… TANG Hongmei, TANG Wenzhong, LI Ruichen, WANG Yanyang, WANG Lihong (209)

8263 Fuzzing testing sample set optimization scheme based on heuristic genetic algorithm
…… WANG Zhihua, WANG Haofan, CHENG Manman (217)

8264 Low redundancy feature selection method for Android malware detection
…… HAO Jingwei, PAN Limin, LI Rui, YANG Peng, LUO Senlin (225)
8265 Traffic classification algorithm of Internet of things devices based on random forest
…… LI Ruiguang, DUAN Pengyu, SHEN Meng, ZHU Liehuang (233)
8266 Large-scale IoT malware analysis and classification method
…… HE Qinglin, WANG Lihong, LUO Bing, YANG Libin (240)
8267 Data masking model for heterogeneous big data environment
…… TONG Lingling, LI Pengxiao, DUAN Dongsheng, REN Boya, LI Yangxi (249)
8268 Malicious code detection based on heterogeneous information network
…… LIU Yashu, HOU Yueran, YAN Hanbing (258)
8269 Optimal choice of order preserving encryption scheme in encrypted document ranking
…… ZHANG Jiuling, HUANG Daochao, SHEN Shijun (266)
8270 Application of space time regional economy visualization based on telecom big data analysis
…… LI Na, LIU Wenmin, MENG Fanrui, LIU Yan (273)
8271 Malicious code clone detection technology based on deep learning
…… SHEN Yuan, YAN Hanbing, XIA Chunhe, HAN Zhihui (282)
8272 Randomness of traffic data in TLS cipher suite
…… GUO Shuai, CHENG Guang (291)
8273 Weibo tendency analysis based on sentimental object recognition and sentimental rules
…… WANG Zechen, WANG Shupeng, SUN Liyuan, ZHANG Lei, WANG Yong, HAO Bingchuan (301)
8274 User electricity consumption behavior mode analysis based on energy decomposition
…… LU Ruirui, YU Haiyang, YANG Zhen, LAI Yingxu, YANG Shisong, ZHOU Ming (311)
8275 A dynamic network threat evaluation method for smart grid embedded devices
…… LYU Zhuo, GUO Zhimin, CHEN Cen, MO Jiansong, CHANG Chaowen (324)
8276 Adversarial sample generation technology of malicious code based on LIME
…… HUANG Tianbo, LI Chengyang, LIU Yongzhi, LI Denghui, WEN Weiping (331)
8277 A method for filtering the attack pairs of adversarial examples based on attack distance
…… LIU Hongyi, FANG Yutong, WEN Weiping (339)
8278 Malware family classification method based on abstract assembly instructions
…… LI Yu, LUO Senlin, HAO Jingwei, PAN Limin (348)
8279 Automatic poster synthesis system based on keywords
…… GUAN Shuaipeng, YU Haiyang, YANG Zhen, ZHOU Ming, LAI Yingxu (356)

Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics 2022 Vol. 48 No. 3 (Sum 349)

8280 Thermal boundary simulation and temperature prediction for aircraft fuel system with full flight profile
…… WANG Ruiqing, LI Dong, LI Yunhua, WANG Xi (369)
8281 Remaining life prediction method of mechanical system under uncertain loads
…… XU Dan, XIAO Xiaoqi, FENG Zhixin (376)
8282 Irregular flight recovery technique based on accurate transit time prediction
…… HE Jian, GUO Hongyan, YAO Yuan, BIAN Lei, TANG Hongwu, WANG Diansheng (384)
8283 Finite-time line-of-sight guidance law path following control for underactuated intelligent ships
…… FENG Hui, HU Sheng, YU Wenzhao, XU Haixiang (394)
8284 Drag and lift acceleration commands rapid calculation and tracking guidance
…… LIU Gang (401)
8285 Measurement of mass diffusion coefficient of CO_2 in RP5 jet fuel
…… LI Chaoyue, FENG Shiyu, XU Lei, WANG Zhiling (412)
8286 Modeling and simulation of spaceborne GNSS ocean-reflectometry
…… WANG Feng, YANG Dongkai, ZHANG Bo, LI Bowen, ZHANG Guodong (419)
8287 Dynamic analysis and disturbance rejection control of mass-actuated fixed-wing UAV
…… QIU Xiaoqi, GAO Changsheng, JING Wuxing (430)
8288 Solidification heat release of copper foam/low-melting-point alloy composite phase change material
…… HOU Tianrui, XING Yuming, ZHENG Wenyuan, HAO Zhaolong (438)
8289 SMSP jamming countermeasure method based on maximum entropy method and genetic algorithm
…… ZHOU Changlin, WANG Chunyang, GONG Jian, TAN Ming, ZHAO Yingjian (447)
8290 Cooperative search algorithm for UAV swarm based on search intention interaction
…… WANG Ning, LI Zhe, LIANG Xiaolong, HOU Yueqi, WU Ao (454)
8291 Uncertainty analysis of aerodynamic load distribution on strap-on launch vehicle
…… DONG Xinxin, LIU Li, GE Jiahao, WANG Zhi (464)
8292 Lean blowoff process of bluff body based on heat release rate analysis
…… XING Jingwen, JIN Jie, WANG Fang (473)

http://bhxb.buaa.edu.cn

8293 Effect of pulsed jet on aerodynamic performance of circulation control airfoil
…… LEI Yuchang, ZHANG Dengcheng, ZHANG Yanhua, SU Guangxu (485)
8294 A general singularity avoidance algorithm for pedestal-controllable space manipulator
…… ZHAO Longze, SHE Haoping, HUANG Liangwei, HUANG Longfei (495)
8295 PAUT data intelligent analysis method of welding seams based on deep learning
…… ZHU Tiantian, SONG Bo, MAO Jie, LIAN Guoxuan (504)
8296 A hardware Trojan insertion prevention method based on layout filling with A2-RO circuit
…… LI Zongzhe, HE Jiaji, MA Haocheng, LIU Yanjiang, QIN Guoxuan, ZHAO Yiqiang (514)
8297 Pixel-wise visible image registration based on deep neural network
…… HUANG Chenwei, CHENG Jingchun, PAN Xiong, SONG Ningfang, LIU Bing (522)
8298 Channel estimation of air-ground data link based on modulated convolutional neural network
…… LIU Chunhui, WANG Meilin, DONG Zanliang, WANG Pei (533)
8299 Numerical simulation of shell-side gas flow of airborne hollow fiber membrane module
…… LIU Guotian, BAI Wentao, PAN Jiangli, CHEN Guanghao, PAN Jun, FENG Shiyu (544)

Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics 2022 Vol. 48 No. 4 (Sum 350)

8300 Size of cement concrete pavement slab of airport runway
…… ZHANG Xianmin, LI Mengxiao, CHEN Yu, LI Changhui, XU Boqing (551)
8301 Civil aircraft long touchdown exceedance detection based on autoencoder and HMM
…… HUO Weigang, LI Jilong, WANG Huifang (560)
8302 Off-axis tensile mechanical properties of 3D five-directional braided composites with void defects
…… YANG Zhixian, ZHANG Ming, LI Ang, ZHANG Chao (569)
8303 Skull cutting plan generation method in craniosynostosis surgery
…… LUO Yangyu, HE Jiahui, XIE Dongsheng, LU Shenyu, GONG Jian (578)
8304 UAV vision-based moving target tracking scheme in electric scenario
…… FENG Xue, DU Mengjun, XIANG Xinyu, QIAN Jin, ZHANG Min (586)
8305 Automatic paving path planning method on complex surfaces
…… ZHAO An'an, HE Daliang, WANG Han, GUO Jungang, KE Yinglin (595)
8306 Coupled vibration of underwater fuel assembly transfer system
…… YUAN Zhanhang, LI Yunhua, LIU Haodong (602)
8307 Constraint violation suppression for dynamics modeling of lower limb rehabilitation robot
…… XU Yaru, LI Kehong, LIU Jia, LIU Rong, ZHANG Jiancheng (609)
8308 Energy consumption for production of jet fuel precursors from cellulosic biomass by hydrothermal method
…… DONG Shengfei, HUANG Xinghua, YANG Xiaoyi (620)
8309 High-precision positioning method based on SINS/RFID for trains in tunnel
…… ZHANG Chendong, WANG Zhaorui, JIN Shengzhen, AI Guoxiang (632)
8310 A stratospheric wind field interpolation method based on geostrophic wind model
…… HU Kang, ZHOU Jianghua, ZHANG Xiaojun (639)
8311 A cross-modal pedestrian Re-ID algorithm based on dual attribute information
…… CHEN Lin, GAO Zan, SONG Xuemeng, WANG Yinglong, NIE Liqiang (647)
8312 Multi-layer design method of tension rope for paraboloid antenna
…… WANG Hui, HE Tianyu, DU Xianchen, WANG Chunjie (657)
8313 Experimental study on aerodynamic and deformation characteristics of flexible membrane wing
…… WANG Hanbin, HE Xi, WANG Jinjun (665)
8314 Operating status evaluation of smart electricity meters based on joint distribution adaption
…… XU Dan, LI You, LI Helong (674)
8315 Numerical analysis on drag reduction effect of base cavity
…… LI Biao, WANG Liangming, YANG Zhiwei (682)
8316 Coastal GNSS-R ocean altimetry based on code delay of QZSS L1 signal
…… CHU Ti, HE Kaifei, GAO Fan, HE Yunqiao, MENG Xinyue, XU Tianhe (691)
8317 Damage prediction and failure mechanism of composite laminates under high-velocity hailstone impact
…… ZHANG Chao, FANG Xin, LIU Jianchun (698)
8318 Account-based blockchain scalable storage model
…… ZHANG Xuhao, NIU Baoning, GONG Ting (708)
8319 Low-complexity adaptive cubature Kalman filter algorithm
…… LI Chunhui, MA Jian, YANG Yongjian, GAN Yi (716)

Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics 2022 Vol. 48 No. 5 (Sum 351)

8320 Optimized charging method of lithium-ion batteries based on dynamic characteristics of electrodes
…… ZHANG Caiping, LI Feng, ZHANG Linjing, WANG Yubin, JIA Xinyu, ZHANG Weige (725)

http://bhxb.buaa.edu.cn

8321 A robust auction algorithm for distributed heterogeneous multi-AUV task assignment
…… LI Xinbin, GUO Lizheng, HAN Song (736)
8322 Multi-box container loading problem based on hybrid genetic algorithm
…… ZHANG Changyong, LIU Jiayu (747)
8323 A combined estimation functions method for autoregressive model with time-varying variance
…… HAN Yu, TIAN Baocheng, WANG Shupeng (756)
8324 Height control of stratospheric aerostat based on secondary airbag
…… LIN Kang, MA Yuppeng, ZHENG Zewei, WU Zhe (762)
8325 Carrier-based aircraft departure scheduling optimization based on CE-PF algorithm
…… WAN Bing, HAN Wei, SU Xichao, LIU Jie (771)
8326 Construction method of software runtime behavior model for reliability prediction
…… LI Qiuying, LU Minyan, GU Tingyang (786)
8327 Android malicious APP multi-view family classification method
…… HAO Jingwei, LUO Senlin, ZHANG Hanqing, YANG Peng, PAN Limin (795)
8328 Dynamic sorting planning of Cartesian robot based on greedy strategy
…… CHEN Lin, BI Shusheng, LI Dazhai, LIN Chuang, OUYANG Tong (805)
8329 Complex equipment cost estimation model based on entropy theory
…… WEI Dongtao, LIU Xiaodong, DING Gang, CHEN Yujin (816)
8330 A modified Mahalanobis distance discriminant method
…… WANG Keyao, WANG Huiwen, ZHAO Qing, WANG Shanshan (824)
8331 Effects of web cutout on bearing performance of composite beam webs under shear load
…… ZHOU Rui, GAO Weicheng, LIU Wei (831)
8332 Optimal design of transient main closed-loop control law based on LMI
…… MIAO Keqiang, WANG Xi, ZHU Meiyin (841)
8333 Structural-missing image inpainting based on low rank and sparse prior
…… HU Xunyong, YANG Xiaomei, LI Haoyi, MEI Yubo, ZHENG Xiujuan, LIU Kai (855)
8334 Multi-aircraft conflict resolution algorithm based on cooperative game
…… ZHANG Honghong, GAN Xusheng, XIN Jianlin, LIU Yiqun, CHEN Xuyi (863)
8335 Deep learning based UAV vision object detection and tracking
…… PU Liang, ZHANG Xuejun (872)
8336 Pedestrian re-identification method based on channel attention mechanism
…… SUN Yibo, ZHANG Wenjing, WANG Rong, LI Chong, ZHANG Qi (881)
8337 Mandatory lane change decision-making model based on neural network
…… CUI Jieming, YU Guizhen, ZHOU Bin, LI Cunjin, MA Jiwei, XU Guoyan (890)
8338 Differential game guidance law design for integration of penetration and strike of multiple flight vehicles
…… CHENG Tao, ZHOU Hao, DONG Xiaofei, CHEN Wanchun (898)
8339 Autonomous deformation decision making of morphing aircraft based on DDPG algorithm
…… SANG Chen, GUO Jie, TANG Shengjing, WANG Xiao, WANG Ziyao (910)
8340 Design of missile incremental adaptive fault tolerant control system
…… FANG Yizhong, LU Yuting, HAN Tuo, HU Qinglei (920)

Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics 2022 Vol. 48 No. 6 (Sum 352)

8341 Icing wind tunnel investigation of helicopter rotor model in forward flight state
…… HUANG Mingqi, WANG Liangquan, YUAN Honggang, PENG Xianmin, ZHANG Guichuan (929)
8342 Intelligent virtual opponent decision making and guidance method in short-range air combat training
…… MENG Guanglei, LIU Dejian, ZHOU Mingzhe, PIAO Haiyin, CHEN Yaofei (937)
8343 Damage mechanics-based fatigue life prediction for additive manufacturing metal materials
…… HONG Haiming, ZHAN Zhixin, WANG Jiaying (950)
8344 Target trajectory association method based on orientation constraint and re-identification feature
…… AI Mingjing, SHAN Guozhi, LIU Penggao, YANG Penggang (957)
8345 An algorithm for generating geometric models of microscopic specimens of PVC foam based on μCT images
…… ZHOU Yong, XUE Bin, GUO Yunxin, WANG Renpeng (968)
8346 Method of unequal pitch meshing of metal worm and plastic helical gear
…… REN Jihua, SHI Zhaoyao, WANG Defeng, YU Shipeng (979)
8347 Convolutional neural network based algorithm for automatic modulation recognition of satellite signals
…… CUI Tianshu, CUI Kai, HUANG Yonghui, ZHAO Wenjie, AN Junshe (986)
8348 Effective strategy of heterogeneous model data fusion in product collaborative design
…… XUE Junjie, ZHOU Junhua, SHI Guoqiang, SONG Xiao, JIANG Yanhong, QUAN Hongyan (995)
8349 A computing framework for massive scientific data based on auto-partitioning algorithm
…… TIAN Yang, YAN Haihua (1004)

http://bbxb.buaa.edu.cn

8350 Dynamic obstacle avoidance method for mobile robots
…… ZHANG He, MIAO Cunxiao, TANG Youjun, YAN Xiaoqiang, SHI Yanyang, YU Yuanjin (1013)
8351 Fault diagnosis of switched reluctance motor power converter based on VMD-MPE
…… ZHANG Jingwen, XIONG Lixin, MA Hongchang, BIAN Dunxin (1022)
8352 Near-eye gaze estimation based on multitasking auxiliary reasoning
…… WANG Xiaodong, XIE Liang, YAN Huijiong, YAN Ye, YIN Erwei, LI Weiguo (1030)
8353 3D cooperative path following control of multi-UAVs with input saturation
…… LIU Ronghua, LIU Shuguang, ZHANG Boyang, WANG Huan, LI Wei (1038)
8354 An improved PSO-ARMA method for temperature error modeling of hemispherical resonator gyroscope
…… WU Zongshou, WANG Lixin, LI Xinsan, LI Can (1050)
8355 Reliability analysis of journal bearings inside aero-gear pump based on AK-IS method
…… GAO Ning, LI Huacong, HONG Linxiong, CAO Rui, FU Jiangfeng (1057)
8356 Influence of suction flow control on aerodynamic characteristics of blended-wing-body aircraft
…… JIA Yuan, CAO Xiang, WU Jianghao (1065)
8357 Lorentz inertial stability platform control based on KF-LESO-PID
…… XIONG Ying, LIU Qiang, REN Yuan, FAN Yahong, SUN Jinji (1072)
8358 Backstepping sliding mode control of electro-hydraulic position servo system based on ESO
…… ZHANG Zhenyang, WANG Chengwen, GUO Xinping, CHEN Shuai (1082)
8359 Distributed hierarchical formation-containment control of multiple quadrotor UAV systems
…… ZHENG Weiming, XU Yang, LUO Delin (1091)
8360 Gray element filtering technology of topology structure based on improved guide-weight method
…… GAO Xiang, WANG Linjun, DU Yixian, FU Junjian (1106)

Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics 2022 Vol. 48 No. 7 (Sum 353)

8361 A power budgeting method for dark silicon chips based on task mapping
…… LI Xin, LI Zhi, ZHOU Wei, WU Ruiqi, TANG Haoran, CHEN Yehang (1115)
8362 Partial observable Petri nets fault diagnosis with quantum Bayesian learning
…… LIU Jiufu, ZHANG Xinzhe, WANG Hengyu, A. M. TOMAS DIAS, WANG Zhisheng, YANG Zhong (1125)
8363 Inertial pedestrian navigation algorithm based on zero velocity update and attitude self-observation
…… DAI Hongde, ZHANG Xiaoyu, ZHENG Baidong, DAI Shaowu, ZHENG Weiwei (1135)
8364 A rapid path planning method for multiple UAVs to cooperative strike
…… CHEN Qingyang, XIN Hongbo, WANG Yujie, TANG Zhongnan, JIA Gaowei, ZHU Bingjie (1145)
8365 Occlusion recognition algorithm based on multi-resolution feature auto-selection
…… XIE Xiangying, LAI Guangzhi, NA Zhixiong, LUO Xin, WANG Dong (1154)
8366 Design and characteristics of reverse direct-acting high-pressure reducing valve for pneumatic actuator
…… LIU Yanbin, WANG Xuesheng, QIN Xinya, WANG Hao, CHEN Qinzhu, ZHAO Sai (1164)
8367 End face deformation and friction and wear of high-speed dry friction mechanical seal
…… MA Runmei, ZHAO Xiang, CHEN Xiaozhu, LI Shuangxi, YANG Haichao (1174)
8368 Effect of suction flow rate on performance of catalytic inerting system
…… WANG Chenchen, PAN Jun, WANG Yangyang, DUAN Weijie (1183)
8369 Numerical investigation on evolution of T-S wave on a two-dimensional compliant wall with finite length
…… HONG Zheng, YE Zhengyin (1190)
8370 Gust load alleviation analysis based on vortex lattice method in state-space form
…… YANG Lan, AN Chao, XIE Changchuan, YANG Chao (1200)
8371 Decoupled active disturbance rejection control method for magnetically suspended rotor based on state feedback
…… YIN Zengyuan, CAI Yuanwen, REN Yuan, WANG Weijie, CHEN Xiaocen, YU Chunmiao (1210)
8372 Target tracking algorithm based on efficient attention and context awareness
…… BAI Luo, ZHANG Hongli, WANG Cong (1222)
8373 A DDQN-based mixed-criticality messages scheduling method for network-on-chip
…… LI Guoliang, LI Qiao, XU Yajun, XIONG Huagang (1233)
8374 VWKNN location fingerprint positioning algorithm based on improved discrete coefficient
…… XU Tian, HE Jingsha, ZHU Nafei, DENG Wanhang, WU Shuang, TA Yongjun (1242)
8375 Design and optimization of large-stroke decoupled three-translational micro-positioning platform
…… LIN Miao, MENG Gang, JU Yongjian, XU Weisheng, CAO Yi (1252)
8376 PM based super-resolution method of azimuth detection for electromagnetic vortex wave fuze
…… SUN Lihua, YAN Xiaopeng, LIU Qiang, HAO Xinhong, ZHANG Hongyun (1263)
8377 Images inpainting via structure guidance
…… HU Kai, ZHAO Jian, LIU Yu, NIU Yukai, JI Gang (1269)
8378 Low computational-cost multicast subgrouping for SVC streams
…… YANG Jingxuan, XU Zhen (1278)

http://bhxb.buaa.edu.cn

8379 Orbital dynamics of rings of small bodies
…… WU Tailong, WANG Yue (1287)
8380 Calibration method for high precision camera based on plane transformation
…… PENG Yan, GUO Junbin, YU Chuanqiang, KE Bing (1297)
8381 Hot spot detection algorithm of photovoltaic module based on attention mechanism
…… FAN Tao, SUN Tao, LIU Hu (1304)
8382 Mechanism analysis of a new aeroservoelastic instability mode
…… JIANG Yu, YANG Chao, WU Zhigang (1314)
8383 Optimal design of motion parameters of flapping wing
…… WU Yue, XIE Changchuan, YANG Chao, An Chao (1324)
8384 Design and implementation of a high precision 6-DOF parallel platform for a space optical remote sensor
…… LIANG Fengchao, TAN Shuang, HUANG Gang, FAN Jiankai, LIN Zhe, KANG Xiaojun (1332)

Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics 2022 Vol. 48 No. 8 (Sum 354)

8385 Double drive adaptive super-resolution reconstruction method of remote sensing images for object detection
…… CHENG Keyang, RONG Lan, JIANG Senlin, ZHAN Yongzhao (1343)
8386 Traffic signal timing method based on deep reinforcement learning and extended Kalman filter
…… WU Lan, WU Yuanming, KONG Fanshi, LI Binquan (1353)
8387 Single image dehazing method based on improved atmospheric scattering model
…… YANG Yong, QIU Genying, HUANG Shuying, WAN Weiguo, HU Wei (1364)
8388 Region-hierarchical predictive coding for quantized block compressive sensing
…… LIU Hao, ZHENG Haoran, HUANG Rong (1376)
8389 Dual coding unit partition optimization algorithm of HEVC
…… LIU Meiqin, XU Chenming, YAO Chao, LIN Chunyu, ZHAO Yao (1383)
8390 Object tracking method based on IoU-constrained Siamese network
…… ZHOU Lifang, LIU Jinlan, LI Weisheng, LEI Bangjun, HE Yu, WANG Yihan (1390)
8391 Long-tail image captioning with dynamic semantic memory network
…… LIU Hao, YANG Xiaoshan, XU Changsheng (1399)
8392 Medical image segmentation based on multi-layer features and spatial information distillation
…… ZHENG Yuxiang, HAO Pengyi, WU Dong'en, BAI Cong (1409)
8393 No reference quality assessment method for contrast-distorted images based on three elements of color
…… DING Yingqiu, YANG Yang, CHENG Ming, ZHANG Weiming (1418)
8394 Knowledge graph completion based on graph contrastive attention network
…… LIU Danyang, FANG Quan, ZHANG Xiaowei, HU Jun, QIAN Shengsheng, XU Changsheng (1428)
8395 Image difference caption generation with text information assistance
…… CHEN Weijing, WANG Weiying, JIN Qin (1436)
8396 A high-speed spectral clustering method in Fourier domain for massive data
…… ZHANG Man, XU Zhaorui, SHEN Xiangjun (1445)
8397 Crowd density estimation for fisheye images
…… YANG Jialin, LIN Chunyu, NIE Lang, LIU Meiqin, ZHAO Yao (1455)
8398 A full-scale feature aggregation network for remote sensing image change detection
…… LIU Guoqiang, FANG Sheng, LI Zhe (1464)
8399 Improved spatial and channel information based global smoke attention network
…… DONG Zeshu, YUAN Feiniu, XIA Xue (1471)
8400 Hypernymy detection based on graph contrast
…… ZHANG Yali, FANG Quan, WANG Yunxin, Hu Jun, QIAN Shengsheng, XU Changsheng (1480)
8401 3D object detection based on multi-path feature pyramid network for stereo images
…… SU Kaiqi, YAN Weiqing, XU Jindong (1487)
8402 Prediction model of COVID-19 based on spatiotemporal attention mechanism
…… BAO Xin, TAN Zhiyi, BAO Bingkun, XU Changsheng (1495)
8403 Hyperspectral image compression method based on 3D Saab transform
…… XU Aiming, HUANG Yuxing, SHEN Qiu (1505)
8404 A real scene underwater semantic segmentation method and related dataset
…… MA Zhiwei, LI Haojie, FAN Xin, LUO Zhongxuan, LI Jianjun, WANG Zhihui (1515)
8405 Appearance and action adaptive target tracking method
…… XIONG Junyao, WANG Rong, SUN Yibo (1525)
8406 Multi-label cooperative learning for cross domain person re-identification
…… LI Hui, ZHANG Xiaowei, ZHAO Xinpeng, LU Xinyu (1534)
8407 Player movement data analysis on soccer field reconstruction
…… JI Xiaoqi, SONG Zikai, YU Junqing (1543)

http://bhxb.buaa.edu.cn
http://bhxb.buaa.edu.cn
http://bhxb.buaa.edu.cn

8408 Fast prediction method for radiated and scattered coupled fields in complex electromagnetic environment
…… SU Donglin, CUI Shuo, BAI Jiangfei, LI Yaoyao (1553)
8409 From grid to "East-west Computing Transfer": Constructing national computing infrastructure
…… QIAN Depei, LUAN Zhongzhi, LIU Yi (1561)
8410 Novel material design and development accelerated by materials genome engineering
…… SUN Zhimei, WANG Guanjie, ZHANG Xuanguang, ZHOU Jian (1575)
8411 A review of development of space-based ADS-B system and its key technologies
…… ZHANG Xuejun, TAN Yuanhao, LI Xueyuan, JIAN Xinhui (1589)
8412 Passenger flow forecasting of airport express based on time and feature cooperative attention
…… DU Wenbo, SHI Wanjun, LIAO Shengshi, ZHU Xi (1605)
8413 Reliability estimation for aircraft hydraulic pump based on bivariate performance degradation analysis
…… WANG Shaoping, CHEN Rentong, ZHANG Chao (1613)
8414 Coordinated target defense for multi-UAVs based on exponentially averaged momentum pigeon-inspired optimization
…… DUAN Haibin, TONG Bingda, LIU Jichuan (1624)
8415 Fuel injection technology of heavy fuel aircraft piston engine
…… DING Shuiting, SHAO Longtao, ZHAO Shuai, ZHU Kun, DU Farong, ZHOU Yu (1630)
8416 Progress in research of closed supercritical carbon dioxide Brayton cycle system
…… ZOU Zhengping, WANG Yifan, YAO Lichao, LIU Huoxing, XU Pengcheng, LI Hui (1643)
8417 Numerical simulation of skipping motion of three-dimensional structure based on boundary element method
…… YANG Chao, JIANG Yu, WU Zhigang (1678)
8418 Advances and challenges in time integration methods
…… XING Yufeng, JI Yi, ZHANG Huimin (1692)
8419 SGBEM-FEM coupling for thermoelastic fracture mechanics analysis of rotational components
…… DONG Leiting, HE Shuangxin (1702)
8420 Object detection algorithm guided by motion information
…… HU Haimiao, SHEN Liuqing, GAO Likun, LI Mingzhu (1710)
8421 Review on automated fiber placement-induced defects and their online monitoring technology
…… DING Xilun, LUO Weiheng, LIU Fei, WANG Guodong, CHEN Weiqiang, ZHANG Wuxiang (1721)
8422 Construction of digital twin model of lithium-ion battery for intelligent management
…… YANG Shichun, LI Qiangwei, ZHOU Sida, ZHANG Zhengjie, MA Yuan, CHEN Fei (1734)
8423 Function oriented belief reliability design and optimization of new torsion spring electrical connectors
…… KANG Rui, LIU Haoran, ZHANG Qingyuan, YU Li, ZHAI Guofu (1745)
8424 Influence of flow topology on instability and atomization of liquid jets
…… YANG Lijun, HUANG Dongqi, HAN Wang, LI Jingxuan, FU Qingfei (1757)
8425 Residual thickness detection of pipeline based on electromagnetic ultrasonic shear wave
…… XU Lijun, LIU Fulu, DING Yiqing, LI Zhengyong, XIE Yuedong (1767)
8426 Microscopic imaging technology with electrowetting liquid lens
…… WANG Qionghua, YUAN Rongying, LIU Chao (1774)
8427 Progress and challenges of bionic drag reduction surfaces
…… LIU Mingjie, WU Qingshan, YAN Hao, YU Gunming, LIN Cunguo, ZHANG Jinwei, ZHAO Tianyi (1782)
8428 Research progress on key materials of phosphoric acid doped high-temperature proton exchange membrane fuel cells
…… XIANG Yan, LI Wen, GUO Zhibin, ZHANG Jin, LU Shanfu (1791)
8429 Anti-disturbance trajectory tracking control method for aggressive quadrotors
…… WANG Yingxun, SONG Xinyu, ZHAO Jiang, CAI Zhihao (1806)
8430 Effect of helmet on neck injury of pilots in flight
…… WANG Lizhen, LIU Jinglong, ZHAO Yanpeng, BU Weiping, LIU Songyang, FAN Yubo (1818)
8431 Multidimensional attack damage assessment of cyber-physical systems based on hierarchical analysis
…… HONG Sheng, YUE Tianyu, LI Xinjian (1827)
8432 Review and prospect of cooperative guidance with attack time consensus for multiple aerial vehicles
…… DONG Xiwang, YU Jianglong, HUA Yongzhao, LI Qingdong, REN Zhang (1836)

8433 Fusion positioning based on Iridium/ORBCOMM signals of opportunity
…… QIN Honglei, LI Zhiqiang, ZHAO Chao (1845)
8434 Numerical simulation of effect of background pressure on electric propulsion plume field
…… WENG Huiyan, CAI Guobiao, ZHENG Hongru, LIU Lihui, ZHANG Baiyi, HE Bijiao (1854)

http://bhxb.buaa.edu.cn

8435 Branch graph method for crank judgement of complex multi-loop linkage
…… NIE Liangyi, DING Huafeng, WANG Jun, BI Shusheng (1863)
8436 In-situ measurement of atmospheric density in very low Earth orbits
…… LI Yongping, ZHU Guangwu, ZHENG Xiaoliang, AI Jiangzhao, YAN Yafei, ZHOU Jianhua (1875)
8437 Effect of high altitude and low pressure on cycle performance of lithium-ion batteries
…… XIE Song, PING Xianke, GONG Yize (1883)
8438 Application of r-grid adaptive for shock capturing in discontinuous Galerkin finite element method
…… GONG Xiaoquan, WU Xiaojun, TANG Jing, LI Ming, ZHANG Jian (1889)
8439 Degradation indicator extraction for aerospace CMG based on power consumption analysis
…… TIAN Limei, GONG Mengtong, TANG Diyin, HAN Danyang, YU Jinsong, LI Chunwei (1899)
8440 Purification method of satellite navigation signal based on array antenna beamforming
…… SHI Pengliang, WANG Xiaoyu, XUE Rui (1906)
8441 Numerical simulation on internal flow performances of multi-stage pressure drop valve
…… FANG Yifang, XIANG Gaoxiang, TANG Chun'e, SHI Yuejuan (1915)
8442 Inverse kinematic solution of nursing robot based on genetic algorithm
…… ZHANG Libo, LI Yupeng, ZHU Deming, FU Yongling (1925)
8443 Methodology for model based verification requirements capturing and application in civil aircraft development
…… GUO Tai, QIAN Xin, GONG Qi, REN Wenming, YANG Shuanhao, XU Qinggang (1933)
8444 Fog computing-based federated intrusion detection algorithm for wireless sensor networks
…… ZHU Mengyuan, CHEN Zhuo, LIU Pengfei, LYU Na (1943)
8445 Analysis and optimization of dynamic characteristics of air-cooled launcher for fold-rotor UAV
…… ZHANG Zhao, PENG Yiming, ZHOU Fuliang, WEI Xiaohui, NIE Hong, YANG Gang (1951)
8446 Functional regularized generalized canonical correlation analysis
…… WANG Zhichao, TENENHAUS Arthur, WANG Huiwen, ZHAO Qing (1960)
8447 Short-term rapid prediction of stratospheric wind field based on PSO-BP neural network
…… LONG Yuan, DENG Xiaolong, YANG Xixiang, HOU Zhongxi (1970)
8448 Modeling and finite-time control for hypersonic morphing flight vehicle
…… ZHANG Yuan, HUANG Wanwei, LU Kunfeng, BAI Wenyan, YU Jianglong (1979)
8449 Optimal design of printed circuit heat exchanger considering manufacturing constraints
…… DU Mo, MENG Bao, PAN Feng, WAN Min (1994)
8450 Warship's vital parts detection algorithm based on lightweight Anchor-Free network with multi-scale feature fusion
…… LI Chenxuan, GU Jiaojiao, WANG Lei, QIAN Kun, FENG Zeqin (2006)
8451 Dual-channel control of hypersonic flight vehicles based on bounded perturbation analysis of eigenvalues
…… YANG Yuchen, ZHANG Zenghui, YAN Jianing, ZHANG Jing, YANG Lingyu (2020)
8452 Optimization of XNOR/OR circuit area based on BABFA
…… ZHOU Yuhao, HE Zhenxue, LIANG Xinyi, FAN Xinchao, HUO Zhisheng, XIAO Limin (2031)
8453 Performance comparison of helicopter inerting system under different temperature control modes
…… BAI Wentao, LIU Guotian, ZOU Bo, WANG Chenchen, CHEN Guanghao, FENG Shiyu (2040)
8454 Dynamic collaborative sequencing for departure flights based on traffic state
…… JIANG Hao, LIU Jixin, DONG Xinfang (2048)
8455 Momentum envelope analysis of magnetically suspended control sensitive gyroscope
…… YANG Yang, WANG Weijie, WANG Zhou, FAN Yahong, XUE Le (2061)
8456 Classification of plateau shrub echo signal based on bispectrum analysis
…… LI Liyuan, LI Ping, LI Guolin, ZHANG Guangwei (2070)
8457 Conducted electromagnetic interference of wireless charging system with bilateral LCC of electric vehicle
…… LYU Mengyuan, ZHAI Li, HU Guixing (2079)

Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics 2022 Vol. 48 No. 11 (Sum 357)

8458 A fingerprint indoor localization method against adversarial sample attacks
…… ZHANG Xuejun, BAO Junda, HE Fucun, GAI Jiyang, TIAN Feng, HUANG Haiyan (2087)
8459 Stealthy configuration design and optimization analysis of microsatellite
…… QIN Yuantian, SUN Hanqing, YUE Xin (2102)
8460 Opening characteristics of inlaid floating ring seal with high-speed gas film
…… ZHENG Rao, CHEN Xiaozhu, LI Shuangxi, ZHAO Xiang, SHI Renjie, SONG Zifeng (2111)
8461 Stiffness optimization of M-shaped boom based on radial basis function surrogate model
…… YANG Hui, FAN Shuoshuo, WANG Yan, LIU Rongqiang, XIAO Hong (2121)
8462 Evaluation of high hitting accuracy performance of hypersonic vehicle
…… PENG Weishi (2130)

http://bhxb.buaa.edu.cn

8463 Autonomous navigation based on PPO for mobile platform
…… XU Guoyan, XIONG Yiwei, ZHOU Bin, CHEN Guanhong (2138)
8464 Optical path simulation and design of NO rapid detection optical cavity structure
…… LI Wen, CAI Yongqing, CHEN Mengfan, LIU Peng (2146)
8465 Runway temperature hybrid prediction based on MFOA-KELM residual correction under ice and snow
…… CHEN Bin, LIU Yue, LI Qingzhen, DING Yu, WANG Liwen (2153)
8466 Layered control of hybrid power loader based on fuel cell
…… ZHANG Zhiwen, DU Wenjie, LIANG Junfei, ZHANG Yangang, WU Yawen (2165)
8467 Multi-channel wireless sensor system based on CC1310 chip with high speed and low power consumption
…… DUAN Ruifeng, LYU Yanjie, DU Wenji, ZHOU You (2177)
8468 Lightweight densely connected network based on attention mechanism for single-image deraining
…… CHAI Chaoqiang, WANG Dawei, LU Bin, LI Zhu (2186)
8469 Monitoring and analysis on GPS P(Y) code power enhancement
…… LI Wenxuan, JIAO Wenhai, WANG Kai, QIU Ruijin, SUN Shuxian (2193)
8470 Ultra-local model-free speed predictive control based on ESO for PMSM
…… XU Lingliang, CHEN Guiming, LI Qiaoyang (2204)
8471 Method for predicting on-orbit residual life of satellite atomic clock
…… FENG Jianguang, ZHENG Zixia, LONG Dongteng, ZHOU Bo, LU Mingquan, ZHENG Heng (2215)
8472 Design and analysis of high precision for spherical Lorentz force magnetic bearing
…… FU Baiheng, WANG Weijie, WANG Yuanqin, FAN Yabong, NIE Chen, JIA Haipeng (2222)
8473 Rotating parabolic-conical corrosion pit model establishment and its application
…… LIU Dejun, TIAN Gan, JIN Guofeng, YANG Zhengwei, REN Biyun, WEI Huali (2230)
8474 Multi-UAV round up strategy based on unity of group will
…… LIU Feng, WEI Ruixuan, ZHOU Kai, DING Chao (2241)
8475 Non-line-of-sight signal detection based on unsupervised learning and particle filtering
…… HOU Ningning, LI Deng'ao, ZHAO Jumin (2250)
8476 Numerical simulation of icing on aircraft rotating surfaces
…… GUO Qi, SHEN Xiaobin, LIN Guiping, ZHANG Shijuan (2259)
8477 Rocket return trajectory tracking guidance based on convex optimization and LQR
…… WU Jie, ZHANG Cheng, LI Miao, XIONG Renfen (2270)
8478 A parameter calibration method for manipulators based on laser displacement measurement
…… SHAO Xin, JI Li, ZOU Huaiwu, XIE Yangmin (2281)
8479 Obstacle avoidance method of mobile robot based on obstacle cost potential field
…… CHI Shengkai, XIE Yongfang, CHEN Xiaofang, PENG Fan (2289)
8480 Application of data cube association mining in infrared anti-jamming
…… WU Xin, WU Youli, NIU Deqing, CAI Yuxuan, XU Yang, CHEN Bian (2304)
8481 2-D compressed sensing SAR imaging based on mixed sparse representation
…… XIONG Shichao, NI Jiacheng, ZHANG Qun, LUO Ying, WANG Yansong (2314)
8482 Operation risk of civil aircraft based on SOM and association rules
…… XIONG Minglan, WANG Huawei, NI Xiaomei, LIN Ruiguan (2325)
8483 Low-altitude UAV detection method based on optimized CenterNet
…… ZHANG Ruixin, LI Ning, ZHANG Xiaxia, ZHOU Huiyu (2335)

Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics 2022 Vol. 48 No. 12 (Sum 358)

8484 Civil aviation luggage cart stacking algorithm based on dynamic quadtree search
…… XING Zhiwei, HOU Xiangkai, LI Biao, ZHANG Tao, WEN Tao (2345)
8485 Extended target tracking algorithm based on MM-GGIW-PMBM filter
…… WU Sunyong, ZHOU Yusong, XIE Yun, CAI Ruhua, FAN Xiangting (2356)
8486 Optimization of transfer time efficiency evaluation index for airport arriving passengers
…… LUO Qian, LI Qi, WEN Tao, CHEN Fenghua, ZHU Ping (2365)
8487 Properties of gas discharge electron beam coaxial wire of fuse additive manufacturing and microstructure of TC4 titanium alloy …… XU Haiying, YANG Guang, ZHANG Wei, YANG Bo, SANG Xinghua, WANG Zhuang (2373)
8488 Multi-scale depthwise separable convolution facial expression recognition embedded in attention mechanism
…… SONG Yuqin, GAO Shijie, ZENG Hedong, XIONG Gaoqiang (2381)
8489 Damage analysis in composite laminates under low velocity oblique impact
…… ZHANG Chao, LIU Jianchun, FANG Xin (2388)
8490 Ultrasonic phased array imaging on aviation aluminum block fatigue crack
…… PENG Chaoyong, XU Songbai, DU Chuangzhou, ZHANG Jie (2398)

http://bhxb.buaa.edu.cn

8491 Burst tasks scheduling method for infrared LEO constellation based on multi-strategies
…… ZHANG Shengyu, ZHU Zhencai, HU Haiying (2405)
8492 Scattering characteristics and measurement method of a square cavity
…… ZHAO Jingcheng, LOU Changyu, LI Jiabi, YANG Zongkai (2415)
8493 Comprehensive evaluation on capability of civil aviation supervisor team based on cloud model
…… LI Jingqiang, FAN Tianchen, ZHOU Yanru, FANG Qiu (2425)
8494 Effects of prepreg ambient-temperature storage life on mechanical properties of MT700/603 composites
…… WANG Rong, YU Yalin, WANG Lechen, MO Shenzhong, HUANG Yuqing, ZHOU Xiang (2434)
8495 Precise references orbit design of miniSAR satellite
…… LIAO Xiang, ZHENG Jing, XU Yongsheng, XIE Chengqing, DING Qiangqiang (2442)
8496 A graph convolution network based latency prediction algorithm for convolution neural network
…… LI Zheyang, ZHANG Ruyi, TAN Wenming, REN Ye, LEI Ming, WU Hao (2450)
8497 Interfacial crack growth of delaminated composite laminates under hygrothermal environment
…… XIA Fei, XUE Jianghong, HE Zanhang, JIN Fusong (2460)
8498 Robust optimization design under geometric uncertainty based on PCA-HicksHenne method
…… ZHANG Wei, WANG Qiang, LU Jiachen, YAN Chao (2473)
8499 Performance analysis of skin temperature prediction model combining Smith's thermoregulation model with Tanabe model
…… WANG Tao, ZHANG Wanxin, LI Meng, BU Xueqin, ZHANG Chen, WANG Hailiang (2482)
8500 Fluid and structure coupling analysis of split drag rudder
…… LI Yongchang, DAI Yuting, YANG Chao (2494)
8501 Design and dimensional synthesis of a variable wing sweep mechanism
…… DU Xianchen, LIU Xue'ao, DONG Yang, WANG Hui, HE Tianyu, WANG Chunjie (2502)
8502 Control oriented longitudinal modeling and analysis of pigeon-like flapping-wing aircraft
…… PENG Cheng, SUN Ligue, WANG Yanyang, TAN Wenqian, XIAO Feng (2510)
8503 Phase change heat transfer characteristics and fractal optimization of radial plate fin tube
…… WANG Weiqi, XING Yuming, ZHENG Wenyuan, HAO Zhaolong (2520)
8504 Short-term load forecasting method based on PCC-LSTM model
…… LIU Qianqian, LIU Yushan, WEN Yeting, HE Jie, LI Xiao, BI Daqiang (2529)
8505 Feature-fusion and anti-occlusion based target tracking method for satellite videos
…… LIU Yaosheng, LIAO Yurong, LIN Cunbao, LI Zhaoming, YANG Xinyan (2537)
8506 Airborne PLC channel modeling by transfer function and its probabilistic guarantee analysis
…… QI Jiayi, LI Qiao, XIONG Huagang, YAN Ruowen (2548)
8507 Named entity recognition in nuclear power field based on ELMo-GCN
…… JING Xin, WANG Huafeng, LIU Qianfeng, LUO Siwu, ZHANG Fan (2556)
8508 A new RF fingerprint identification method based on preamble of signal
…… ZENG Sheng, ZHU Fengchao, YANG Jian (2566)
8509 Distant retrograde orbits and its bifurcations in Earth-Moon system
…… CHEN Guanhua, YANG Chihang, ZHANG Chen, ZHANG Hao (2576)

http://bhxb.buaa.edu.cn

《北京航空航天大学学报》征稿简则

《北京航空航天大学学报》是北京航空航天大学主办的以航空航天科学技术为特色的综合性自然科学学术期刊(月刊)。本刊以反映航空航天领域研究成果与动态、促进学术交流、培养科技人才和推动科技成果向社会生产力转化为办刊宗旨。本刊为中国自然科学技术核心期刊,并被 Ei Compendex 等国内外权威文献检索系统收录。本刊向国内外公开发行,为进一步提高办刊质量和所刊出文章的学术水平,特制定本简则。

1 论文作者及内容

1.1 本刊面向海内外所有学者。

1.2 主要刊载与航空航天科学技术有关的材料科学及工程、飞行器设计与制造、宇航科学与工程、信息与电子技术、控制技术和自动化工程、流体力学和动力工程、计算机科学及应用技术、可靠性工程与失效分析等领域的研究文章。航空航天科学技术民用方面以及具有航空航天工程背景的应用数学、应用物理、应用力学和工程管理等方面的文章也在本刊优先考虑之列。

2 来稿要求

2.1 论文应具有创新性、科学性、学术性和可读性。

2.2 论文为原创作品,尚未公开发表过,并且不涉及泄密问题。若发生侵权或泄密问题,一切责任由作者承担。

2.3 主题明确,数据可靠,图表清晰,逻辑严谨,文字精练,公式符号标准规范,标点符号正确。

2.4 文稿撰写顺序:中文题名(一般不超过 20 个汉字),作者中文姓名、单位、所在城市、邮政编码(作者顺序始终不得更改),中文摘要(包括目的、方法、结果及结论),中文关键词(5 ~ 8 个),中图分类号,引言,正文,参考文献,英文题名,作者英文姓名、单位、所在城市、邮政编码、国别,英文摘要,英文关键词。首、末页下角注明基金项目名称及编号,作者信息。

2.5 作者请登录本刊网页进行在线投稿。

3 稿件的审核、录用与版权

3.1 来稿须经专家两审和主编、编委讨论后决定刊用与否。

3.2 若来稿经审查后认定不宜在本刊发表,将及时告知作者。如果在投稿满 3 个月后仍未收到本刊任何通知,作者有权改投其他刊。在此之前,请勿一稿多投,否则一切后果自负。

3.3 来稿一经作者签字并在本刊刊出,即表明所有作者都已经认可其版权转至本刊编辑部。本刊在与国内外文献数据库或检索系统进行交流及合作时,不再征询作者意见。

邮寄地址:100191 北京市海淀区学院路 37 号 《北京航空航天大学学报》编辑部
办公地点:北京航空航天大学办公楼 405,407 房间
电　　话:(010)82316698,82316981,82315499,82317448
E-mail: jbuaa@ buaa. edu. cn
http://bhxb. buaa. edu. cn
http://www. buaa. edu. cn

http://bhxb.buaa.edu.cn

《北京航空航天大学学报》
第五届编辑委员会

主　任（主　编）：赵沁平

（以下按姓氏笔画为序）

副主任（副主编）：丁希仑　王少萍　孙志梅　李秋实　李焕喜　杨嘉陵
苗俊刚　相　艳　徐立军　钱德沛　曹晋滨

编　委：马殿富　王　琪　王　聪　邓小燕　王青云　王荣明　刘　宇
刘　红　江　洁　刘　强　闫　鹏　朱天乐　刘铁钢　齐铂金
陈万春　邹正平　苏东林　杨世春　沈成平　邱志平　宋知人
杨树斌　张晓林　杨晓奕　杨继萍　李惠峰　吴新开　张瑞丰
杨照华　宋凝芳　周　锐　林宇震　林贵平　战　强　姚仰平
胡庆雷　赵秋红　段海滨　赵巍胜　席　平　郭　宏　徐　洁
徐世杰　郭洪波　康　锐　翟　锦　熊华钢

北京航空航天大学学报

Beijing Hangkong Hangtian Daxue Xuebao

（原《北京航空学院学报》）

（月刊　1956年创刊）

第48卷 第12期　2022年12月

JOURNAL OF BEIJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS

(JBUAA)

(Monthly, Started in 1956)

Vol.48 No.12 December 2022

主管单位　中华人民共和国工业和信息化部
主办单位　北京航空航天大学
主　　编　赵沁平
编辑出版　《北京航空航天大学学报》编辑部
邮　　编　100191
地　　址　北京市海淀区学院路37号
印　　刷　北京科信印刷有限公司
发　　行　《北京航空航天大学学报》编辑部
发行范围　国内外发行
联系电话　(010) 82316698 82316981
82315499 82317448
电子信箱　jbuaa@ buaa.edu.cn

Administrated by Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China
Sponsored by Beijing University of Aeronautics and Astronautics (BUAA)
(Beijing 100191, P. R. China)
Chief Editor ZHAO Qinping
Edited and Published by Editorial Board of JBUAA
Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.
Distributed by Editorial Board of JBUAA
Telephone (010) 82316698 82316981
82315499 82317448
E-mail jbuaa@buaa.edu.cn
http://bhxb.buaa.edu.cn

中国标准连续出版物号：ISSN 1001-5965 / CN 11-2625/V　　国内定价：50.00元／期

ISSN 1001-5965



http://bhxb.buaa.edu.cn