



北航学报  
赠阅

ISSN 1001-5965

CODEN BHHDE8

# 北京航空航天大学 学报

JOURNAL OF BEIJING UNIVERSITY OF  
AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS



**2019-01**

Vol.45 No.1

目 次

基于航路点布局的多目标网络结构优化方法 ..... 郑煜坤, 王瑛, 李超, 亓尧, 李正欣 (1)

航空发动机承力结构隔振设计方法及试验 ..... 洪杰, 杨振川, 王永锋, 马艳红 (10)

高速转子连接结构刚度损失及振动特性 ..... 洪杰, 徐翕如, 苏志敏, 马艳红 (18)

基于双层 K 近邻算法航站楼短时客流量预测 ..... 邢志伟, 何川, 罗谦, 蒋祥枫, 刘畅, 丛婉 (26)

人机协作中人的动作终点预测 ..... 陈友东, 刘嘉蕾, 胡澜晓 (35)

氢氧发动机真空羽流干扰试验研究 ..... 吴靖, 蔡国飙, 贺碧蛟 (44)

能量有效的无线传感器网络分簇路由协议 ..... 刘伟, 杜佳鸿, 贾素玲, 蒲菊华 (50)

临近空间风切变特性及其对飞行器的影响 ..... 杨钧烽, 肖存英, 胡雄, 程旋 (57)

一种平均矩独立重要性指标及其拒绝抽样方法 ..... 程蕾, 张磊刚, 雷豹, 梁祖典, 刘鹏 (66)

面向气热耦合的涡轮叶片计算域模型建模方法 ..... 王添, 席平, 胡毕富, 李吉星, 石晓飞 (74)

开关磁阻电机矩角特性模型非线性拟合方法 ..... 叶威, 马齐爽, 徐萍, 张珀铭 (83)

成分数据的空间自回归模型 ..... 黄婷婷, 王惠文, SAPORTA Gilbert (93)

水平井多裂纹同步扩展的偏折分析 ..... 陈旻炜, 李敏, 陈伟民 (99)

高超声速飞行器平稳滑翔弹道扰动运动伴随分析 ..... 赫泰龙, 陈万春, 刘芳 (109)

不同热解温度下酚醛树脂复合材料渗透率测试 .....  
..... 王丽燕, 崔占中, 陈伟华, 王开石, 周启超, 王振峰 (123)

一种面向工业互联网的云存储方法 .....  
..... 孟祥曦, 张凌, 郭皓明, 郭黎敏, 夏乾臣, 吕江花, 马世龙 (130)

低黏度环氧树脂硼胺-酸酐复合固化体系研究 ..... 邢志鹏, 乔英杰, 张晓红, 王晓东 (141)

基于 Adaboost 的填充式防护结构超高速撞击损伤预测 ..... 丁文哲, 李新洪, 杨虹 (149)

遥感图像飞机目标高效搜检深度学习优化算法 ..... 郭琳, 秦世引 (159)

基于多轴同步控制的微尺度双向加载实验系统 ..... 熊晶洲, 万敏, 孟宝, 赵越超, 吴向东 (174)

频率分集阵列对干涉仪的角度欺骗效果 ..... 葛佳昂, 谢军伟, 张浩为, 冯晓宇, 张晶 (183)

二维编织 C/SiC 复合材料板疲劳损伤分析 ..... 陈天雄, 张铮, 王奇志, 林彗星 (192)

空气域与流体域耦合作用下双层电池包散热特性 ..... 赵磊, 朱茂桃, 徐晓明, 胡东海, 李仁政 (200)

S 波自旋单态底夸克偶素衰变到粲夸克对 ..... 孙佳佳, 张玉洁, 熊畅 (212)

基于全局稀疏地图的 AGV 视觉定位技术 ..... 张浩悦, 程晓琦, 刘畅, 孙军华 (218)

期刊基本参数: CN 11-2625/V \* 1956 \* m \* A4 \* 226 \* zh \* P \* ¥50.00 \* 900 \* 25 \* 2019-01

(编辑 张 嵘 李 晶 张欣蔚 孙 芳 王艳梅 贺 伟)

CONTENTS

Multi-objective network structure optimization method based on waypoint layout  
..... ZHENG Yukun, WANG Ying, LI Chao, QI Yao, LI Zhengxin (1)

Vibration isolation design method and experiment of aero-engine supporting structure  
..... HONG Jie, YANG Zhenchuan, WANG Yongfeng, MA Yanhong (10)

Joint stiffness loss and vibration characteristics of high-speed rotor  
..... HONG Jie, XU Xiru, SU Zhimin, MA Yanhong (18)

Terminal building short-term passenger flow forecast based on two-tier  $K$ -nearest neighbor algorithm  
..... XING Zhiwei, HE Chuan, LUO Qian, JIANG Xiangfeng, LIU Chang, CONG Wan (26)

Human motion end point prediction in human-robot collaboration  
..... CHEN Youdong, LIU Jialei, HU Lanxiao (35)

Experimental investigation on vacuum plume interaction of hydrogen/oxygen engines  
..... WU Jing, CAI Guobiao, HE Bijiao (44)

Energy efficient clustering routing protocol for wireless sensor networks  
..... LIU Wei, DU Jiahong, JIA Suling, PU Juhua (50)

Wind shear characteristics in near space and their impacts on air vehicle  
..... YANG Junfeng, XIAO Cunying, HU Xiong, CHENG Xuan (57)

An average moment-independent importance index and its rejection sampling method  
..... CHENG Lei, ZHANG Leigang, LEI Bao, LIANG Zudian, LIU Peng (66)

A conjugated heat transfer oriented modeling method of turbine blade computational domain model  
..... WANG Tian, XI Ping, HU Bifu, LI Jixing, SHI Xiaofei (74)

Nonlinear fitting method for torque-angle characteristic model of switched reluctance motor  
..... YE Wei, MA Qishuang, XU Ping, ZHANG Poming (83)

Spatial autoregressive model for compositional data  
..... HUANG Tingting, WANG Huiwen, SAPORTA Gilbert (93)

Deflection of multi-crack synchronous propagation in horizontal well  
..... CHEN Minwei, LI Min, CHEN Weimin (99)

Adjoint analysis of steady glide trajectory with disturbance motion for hypersonic vehicle  
..... HE Tailong, CHEN Wanchun, LIU Fang (109)

Test on permeability of phenolic composites under different pyrolysis temperatures  
..... WANG Liyan, CUI Zhanzhong, CHEN Weihua, WANG Kaishi, ZHOU Qichao, WANG Zhenfeng (123)

A new approach of cloud storage for industrial Internet  
..... MENG Xiangxi, ZHANG Ling, GUO Haoming, GUO Limin, XIA Qianchen, LYU Jianghua, MA Shilong (130)

Low-viscosity epoxy resin boramine-anhydride composite curing system  
..... XING Zhipeng, QIAO Yingjie, ZHANG Xiaohong, WANG Xiaodong (141)

Hypervelocity impact damage prediction of stuffed Whipple shield based on Adaboost  
..... DING Wenzhe, LI Xinhong, YANG Hong (149)

Deep learning and optimization algorithm for high efficient searching and detection of aircraft targets in remote sensing images  
..... GUO Lin, QIN Shiyin (159)

Micro-scaled biaxial loading test system based on multi-axis synchronous control  
..... XIONG Jingzhou, WAN Min, MENG Bao, ZHAO Yuechao, WU Xiangdong (174)

Angle deception effect of frequency diversity array on interferometer  
..... GE Jiaang, XIE Junwei, ZHANG Haowei, FENG Xiaoyu, ZHANG Jing (183)

Fatigue damage analysis of 2D braided C/SiC composite plate  
..... CHEN Tianxiong, ZHANG Zheng, WANG Qizhi, LIN Huixing (192)

Heat dissipation characteristics of double-layer battery pack under coupling of air and fluid domains  
..... ZHAO Lei, ZHU Maotao, XU Xiaoming, HU Donghai, LI Renzheng (200)

S-wave spin singlet bottomonium decay to charm quark pair  
..... SUN Jiajia, ZHANG Yujie, XIONG Chang (212)

Visual localization technology of AGV based on global sparse map  
..... ZHANG Haoyue, CHENG Xiaoqi, LIU Chang, SUN Junhua (218)

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0157

# 基于航路点布局的多目标网络结构优化方法

郑煜坤<sup>1</sup>, 王瑛<sup>2,\*</sup>, 李超<sup>2</sup>, 亓尧<sup>1</sup>, 李正欣<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学 研究生院, 西安 710051; 2. 空军工程大学 装备管理与无人机工程学院, 西安 710051)

**摘 要:** 为了提高区域航路网络结构的科学性、减轻飞行流量增长对网络运行带来的压力,提出了基于航路点布局的多目标网络结构优化方法。首先,考虑区域航路网络的组成要素,设计了反映网络综合性能的优化目标和约束条件以形成优化模型。然后,建立基于节点移动、融合、分解的航路点布局策略,进而给出优化模型的求解步骤,并利用 NSGA-III 算法完成模型求解。最后,对北京飞行情报区部分区域航路网络进行仿真分析,结果表明,使用 NSGA-III 算法得出的区域航路网络具有良好的综合性能。最优网络在满足约束条件的同时,保证了运行费用和非直线系数基本不变,并使得飞行冲突系数减少了 10.8%。可见,所提优化方法能有效提升区域航路网络的经济性、安全性和可行性,符合中国现行空域环境和管理体制。

**关键词:** 区域航路网络; 网络优化方法; 网络综合性能; 航路点布局; NSGA-III 算法

**中图分类号:** V37; U113

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5965(2019)01-0001-09

中国空域呈现碎片化、多元化特征,且部分区域航路网络结构与飞行流量分布的矛盾十分突出<sup>[1]</sup>。为了规避障碍空域,同时避免因节点失效而导致的网络崩溃,需进行航路网络结构优化。

航路网络结构优化指通过调整航路点及航段的数量和位置以改变原有网络的性质和布局,从而实现优化目标<sup>[2]</sup>。根据规模大小,航路网络结构优化分为全局性优化和区域性优化<sup>[3]</sup>。全局性优化针对主干航路进行,其优化过程复杂,改造成本较大;区域性优化则是在已有航路网的基础上,针对一定范围内的支线航路进行,改造成本较小,应用更为广泛。

目前,国内外学者针对区域航路网络的优化模型和算法进行了大量研究。王世锦和公言会<sup>[4]</sup>根据中国空域实际情况,建立了多目标优化模型,并利用蚁群算法<sup>[5]</sup>和元胞自动机<sup>[6]</sup>完成了模型求解。Dunn 和 Wilkinson<sup>[7]</sup>针对自然灾害造

成的部分航段失效,提出了基于节点重分布的自适应重构策略和永久改航策略。康金霞<sup>[8]</sup>利用复杂网络建模方法对航路网络抗毁性进行分析,提出了单航路点失效时的改航方法。严伟等<sup>[9]</sup>以网络经济性与安全性为基础建立多目标优化模型,并采用烟花算法进行求解。然而,传统规划方法采用的目标函数及约束条件较少,规划策略单一,且未能将网络拓扑设计与飞行流量大小相结合,难以满足实际需要。

本文在对两航路、多航路交叉口容量进行细致讨论的基础上,以网络的最小运行费用、最小飞行冲突系数、最小非直线系数和最小航路角度改变量为优化目标,以“三区”约束、容量约束和优化范围约束为限制条件,建立了区域航路网络优化模型。进而提出移动、融合、分解等航路点优化策略和优化步骤,并使用更为精确的 NSGA-III 算法完成模型求解。实现了网络细节与整体性能的

收稿日期: 2018-03-26; 录用日期: 2018-08-24; 网络出版时间: 2018-09-05 16:26

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180903.1131.002.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180903.1131.002.html)

基金项目: 国家自然科学基金(71601183, 61502521)

\*通信作者. E-mail: [yingwangkdg@163.com](mailto:yingwangkdg@163.com)

**引用格式:** 郑煜坤, 王瑛, 李超, 等. 基于航路点布局的多目标网络结构优化方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 1-9.  
ZHENG Y K, WANG Y, LI C, et al. Multi-objective network structure optimization method based on waypoint layout [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 1-9 (in Chinese).

统筹规划,有效提升了区域航路网络的安全性、精确性和综合性,弥补了传统规划方法的不足。

## 1 区域航路网络建立

### 1.1 组成要素

区域航路网络由航路点和航路构成,且包含了节点连接关系、飞行流量和飞行容量等要素。其中,航路分为境内航路、过境航路和出境航路,它们由多条依次相连的航段组成;航路点分为固定航路点和移动航路点,前者指机场及区域边境点,能够产生和吸收飞行流量,后者指航路交叉点及转向点,能够传递飞行流量<sup>[10]</sup>。

### 1.2 表达形式

为了反映区域航路网络特性,对各组成要素进行数学描述,可表示为  $N(P, \mathbf{D}, f, C)$ , 具体含义如下:

1)  $P(N) = \{P_1, P_2, \dots, P_n, P_{n+1}, \dots, P_{n+m}\}$  为航路点集,前  $n$  项为固定航路点,后  $m$  项为移动航路点。

2)  $\mathbf{D}(N)$  为航路连接距离矩阵,可表示为  $\mathbf{D}(N) = (d_{ij})_{(n+m) \times (n+m)}$   $i, j \in [1, m+n]$

$$d_{ij} = \begin{cases} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} & L(P_i, P_j) = 1 \\ 0 & L(P_i, P_j) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $(x_i, y_i)$  为  $P_i$  坐标;  $L(P_i, P_j)$  用来判断航路点  $P_i$  与  $P_j$  是否相连,若是,值为 1, 若否, 值为 0。

3)  $f(N)$  为网络流量参数,指单位时间内通过某航段或某航路点的航空器数目,包括航段  $P_i P_j$  的流量  $f_{ij}$  和航路点  $P_i$  的流量  $f_i$ 。

4)  $C(N)$  为网络容量参数,包括航段  $P_i P_j$  的容量  $C_{ij}$  和航路点  $P_i$  的容量  $C_i$ 。

### 1.3 容量分析

区域航路网络容量是衡量网络容纳性的参数,分为航段容量和航路点容量。

航段容量指单位时间内航段上某点允许通过的最大飞行架次<sup>[11]</sup>。令航空器巡航速度为  $v$ , 最小管制距离为  $L_{\min}$ , 可得

$$C_{ij} = \frac{v}{L_{\min}} \quad (3)$$

航路点容量指在特定航路结构中的交叉点单位时间内允许通过的最大飞行架次<sup>[6]</sup>, 如图 1 所示。  $P_A P_O$ 、  $P_B P_O$  为汇聚航段,  $P_O P_{D'}$ 、  $P_O P_{H'}$  为离散航段,  $\alpha$ 、  $\beta$ 、  $\phi$ 、  $\varphi$  为航段夹角。

若  $t = 0$  时, 前继航班位于  $P_B P_O$  上的  $O$  点, 后

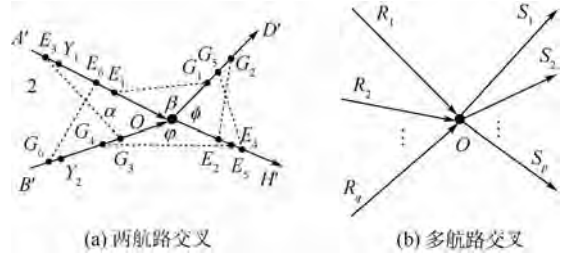


图 1 航路点容量示意图

Fig. 1 Schematic of waypoint capacity

续航班位于  $P_A P_O$  上的  $Y_1$  点,  $L = |Y_1 O|$ , 相邻航班间距为  $F$ , 则存在以下 3 种情况:

1) 当  $t \in (0, L/v)$  时, 前继航班运行至  $G_1$  点, 后续航班运行至  $E_1$  点, 有

$$F = \left\{ (2v^2 + 2v^2 \cos \beta) [t - L/(2v)]^2 + (L^2/2)(1 - \cos \beta) \right\}^{1/2} \quad (4)$$

$$F_{\min} = F|_{t=L/(2v)} = \sqrt{(L^2/2)(1 - \cos \beta)} \geq L_{\min} \quad (5)$$

进一步推导可得, 当  $L \geq \sqrt{2/(1 - \cos \beta)} L_{\min}$  时, 航路点  $O$  能正常运行, 则此状态下  $O$  点的容量为  $v/[L_{\min} \sqrt{2/(1 - \cos \beta)}]$ 。

2) 当  $t \in [L/v, +\infty)$  时, 前继航班运行至  $G_2$  点, 后续航班运行至  $E_2$  点, 有

$$F = \left\{ (2v^2 + 2v^2 \cos \phi) [t - L/(2v)]^2 + (L^2/2)(1 - \cos \phi) \right\}^{1/2} \quad (6)$$

$$F_{\min} = F|_{t=L/v} = \sqrt{L^2} \geq L_{\min} \quad (7)$$

则航路点  $O$  能正常运行时, 其容量为  $v/L_{\min}$ 。

3) 当  $t \in (-\infty, 0]$  时, 前继航班运行至  $G_3$  点, 后续航班运行至  $E_3$  点, 有

$$F = \left\{ (2v^2 - 2v^2 \cos \alpha) [t - L/(2v)]^2 + (L^2/2)(1 + \cos \alpha) \right\}^{1/2} \quad (8)$$

$$F_{\min} = F|_{t=0} = \sqrt{L^2} \geq L_{\min} \quad (9)$$

则航路点  $O$  能正常运行时, 其容量为  $v/L_{\min}$ 。

若  $t = 0$  时, 前继航班位于  $P_A P_O$  上的  $O$  点, 后续航班位于  $P_B P_O$  上的  $Y_2$  点,  $L = |Y_2 O|$ , 相邻航班的间隔为  $F$ 。类比上述推导过程, 可得当前继航班位于  $G_4$  点、  $G_5$  点和  $G_6$  点, 后续航班位于  $E_4$  点、  $E_5$  点和  $E_6$  点时, 航路点  $O$  对应的容量为  $v/[L_{\min} \sqrt{2/(1 - \cos \varphi)}]$ 、  $v/L_{\min}$  和  $v/L_{\min}$ 。

综上所述, 当两航路交叉且来流方向固定时,  $O$  点的容量取值有 6 种情况。在实际运行过程中, 为保证  $O$  点的安全运行, 应使其容量取最小值, 则有

$$C_o = \min(\min(v/[L_{\min} \sqrt{2/(1 - \cos \beta)}], v/L_{\min}), \min(v/[L_{\min} \sqrt{2/(1 - \cos \varphi)}], v/L_{\min})) \quad (10)$$

由于  $\sqrt{2/(1 - \cos \beta)} > 1$ , 可将式(10)化简为

$$C_o = \min(v/[L_{\min}\sqrt{2/(1 - \cos \delta)}]) \quad \delta = \beta, \varphi \quad (11)$$

根据上述思路,当多条航路发生交叉时(见图 1(b)),可将其划分为若干个两航路交叉的情况进行处理,则交叉点  $O$  的容量为

$$C_o = \min(C_{o1}, C_{o2}, \dots, C_{o\omega})$$

$$\omega = C_q^2 C_p^2 \quad (12)$$

$$C_{oi} = \min(v/[L_{\min}\sqrt{2/(1 - \cos \delta_i)}]) \quad \delta_i = \beta_i, \varphi_i \quad (13)$$

式中: $C_{oi}(i=1, 2, \dots, \omega)$ 和 $\delta_i(i=1, 2, \dots, \omega)$ 分别为第  $i$  种两航路交叉情况下对应的点容量和相应航段夹角。

## 2 区域航路网络结构优化模型

### 2.1 模型假设

区域航路网络结构复杂,为了模拟实际运行环境,构建网络优化模型,做出以下假设:

- 1) 网络中的航空器均位于同一高度层,其真航线角为 $[0, \pi]$ 或 $[\pi, 2\pi]$ 。
- 2) 航路点之间的连接关系和飞行流量保持不变,“三区”空域不可穿越。
- 3) 航空器巡航速度为 800 km/h,规定的最小雷达管制间隔为 20 km,航路点的优化范围为  $\pm 50$  km。
- 4) 不考虑进近管制区的飞行冲突。
- 5) 不考虑网络优化过程中的成本。

### 2.2 特性指标及约束

在区域航路网络优化过程中,需要设定若干特性指标以提升网络经济性、安全性和可行性,促进网络结构优化合理。

#### 1) 运行费用

$$T(N) = \sum_{i=1}^{n+m} \sum_{j=1}^{n+m} f_{ij} d_{ij} \quad (14)$$

式中: $T(N)$ 为运行费用; $d_{ij}$ 为航段  $P_i P_j$  的长度。

#### 2) 飞行冲突系数

$$c_i = \sum_{j=1}^{m+n} \sum_{k=j+1}^{m+n} [(2f_{jk}f_{ki}/v)L_{\min} \arccos(\alpha_{jik}/2)/(f_{ji} + f_{ki})] \quad (15)$$

式中: $c_i(i=1, 2, \dots, m+n)$ 为交叉航路点  $P_i$  的飞行冲突系数; $\alpha_{jik}$ 为航段  $P_j P_i$  和航段  $P_k P_i$  的夹角。

#### 3) 非直线系数

$$R(N) = \sum_{ij} I_{ij} \bar{f}_{ij} / \sum_{ij} \bar{f}_{ij} \quad (16)$$

$$I_{ij} = d_{ij} / G_{ij} \quad (17)$$

式中: $R(N)$ 为网络非直线系数; $G_{ij}$ 为航路点  $P_i$  至航路点  $P_j$  的实际距离; $I_{ij}$ 为航路  $P_i - P_j$  的非直线系数; $\bar{f}_{ij}$ 为航路  $P_i - P_j$  上的飞行流量平均值。航路是由若干航段依次连接构成的飞行路径。

#### 4) 航路角度改变量

$$\theta(N) = \sum_{ij} \Delta\theta_{ij} \quad (18)$$

式中: $\Delta\theta_{ij}$ 为航路  $P_i - P_j$  中相邻航段之间的角度改变量。

为了保证网络优化后满足实际需求,必须制定相应约束对航路走向、航路点分布做出限制。

#### 1) “三区”约束

$$\text{line}(P_i, P_j) \cap U(N) = \emptyset \quad (19)$$

式中: $\text{line}(P_i, P_j)$ 为航段  $P_i P_j$  穿越的空域范围; $U(N)$ 为网络中的“三区”空域。

#### 2) 容量约束

$$\begin{cases} f_{ij} \leq \lambda_{ij} C_{ij} \\ f_i < \lambda_i C_i \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\lambda_i, \lambda_{ij}$ 为裕度因子,表示由于管制员、流量增长等因素带来的影响。可避免航段或航路点陷入失效状态,保持网络的运行能力。

#### 3) 优化范围约束

$$\begin{cases} x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max} \\ y_i^{\min} \leq y_i \leq y_i^{\max} \end{cases} \quad (21)$$

式中: $x_i^{\min}, x_i^{\max}$ 为  $P_i$  横坐标的优化范围; $y_i^{\min}, y_i^{\max}$ 为  $P_i$  纵坐标的优化范围。

### 2.3 模型建立

区域航路网络的高效运转不仅取决于其结构的安全合理,还取决于飞行流量与网络容量的匹配关系,结合区域航路网络的特性指标及约束条件,建立以下多目标网络优化模型:

$$\min T(N) = \sum_{i=1}^{n+m} \sum_{j=1}^{n+m} f_{ij} d_{ij} + M \quad (22)$$

$$\min c = \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{j=1}^{m+n} \sum_{k=j+1}^{m+n} [(2f_{jk}f_{ki}/v)L_{\min} \cdot \arccos(\alpha_{jik}/2)/(f_{ji} + f_{ki})] + M \quad (23)$$

$$\min R(N) = \sum_{ij} I_{ij} \bar{f}_{ij} / \sum_{ij} \bar{f}_{ij} + M \quad (24)$$

$$\min \theta(N) = \sum_{ij} \Delta\theta_{ij} + M \quad (25)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} \text{line}(P_i, P_j) \cap U(N) = \emptyset \\ f_{ij} \leq \lambda_{ij} C_{ij} \\ f_i < \lambda_i C_i \\ x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max} \\ y_i^{\min} \leq y_i \leq y_i^{\max} \end{cases} \quad (26)$$

式(22)~式(25)分别表示区域航路网络的最小运行费用、最小飞行冲突系数、最小非直线系

数和最小航路角度改变量。式(26)表示“三区”约束、容量约束和优化范围约束。式中: $c$ 为总飞行冲突系数,表征网络风险水平; $M$ 为罚函数,可将部分约束条件转化为目标函数的一部分,表示如下:

$$M = \sigma \left( \sum_{i=1}^{n+m} \sum_{j=1}^{n+m} \Omega(P_i P_j) + \sum_{i=1}^{m'} \Psi(P_i) \right) \quad (27)$$

$$\Omega(P_i P_j) = \begin{cases} 0 & \text{line}(P_i, P_j) \cap U(N) = \emptyset \\ 1 & \text{line}(P_i, P_j) \cap U(N) \neq \emptyset \end{cases} \quad (28)$$

$$\Psi(P_i) = \begin{cases} 1 & f_i \geq \lambda_i C_i \\ 0 & f_i < \lambda_i C_i \end{cases} \quad (29)$$

其中: $\sigma$ 为罚因子,可取 $\sigma = 1\ 000$ <sup>[12]</sup>;  $m'$ 为航路交叉点个数; $\Omega(P_i P_j)$ 用来判断航段 $P_i P_j$ 是否经过“三区”; $\Psi(P_i)$ 用来判断航路点 $P_i$ 的容量是否符合条件。

### 3 区域航路网络结构优化模型求解

#### 3.1 优化策略

区域航路网络的具体结构取决于移动航路点的布局<sup>[10]</sup>。在优化过程中,为满足实际情况,提高区域航路网络的性能,需制定以下优化策略。

##### 1) 构建空域环境

利用栅格法将空域划分为若干个单位长度为 $l'$ 的栅格以表示初始区域航路网络的基本结构。

##### 2) 增加改航转向点

由于经济发展、历史遗留等客观原因,现有航路布局可能存在缺陷。当航路穿越“三区”时,可采用几何法确定新增改航转向点的初步位置,使飞行器沿“三区”边缘通过<sup>[13]</sup>。

##### 3) 移动航路点

当交叉点或改航点位置不合理,造成局部节点失效或影响网络整体性能时,可利用NSGA-III算法对其布局进行改进,保证区域航路网络正常运转。

##### 4) 融合航路点

当航路交叉点分布密集且飞行流量较小时,空域安全度高,可将一定范围内的多个交叉点融合成单个交叉点,如图2所示,融合后有

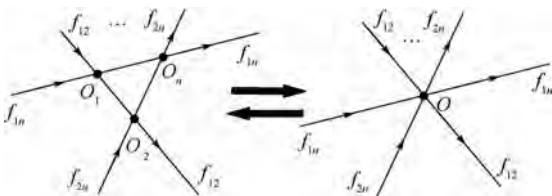


图2 航路点融合、分解示意图

Fig.2 Schematic diagram of waypoint integration and separation

$$\begin{cases} f'_o = \sum_{i=1}^n f_{ij}/2 \\ f'_o \leq \lambda_o C'_o \\ c'_o \leq \sum_{i=1}^n c \end{cases} \quad (30)$$

式中: $f'_o$ 和 $C'_o$ 分别为融合后 $O$ 点流量和容量; $c'_o$ 为融合后 $O$ 点飞行冲突系数; $\lambda_o$ 为裕度因子。

#### 5) 分解航路点

当航路交叉点流量较大,出现容流冲突,影响空域安全时,可将单个交叉点分解为多个交叉点,如图2所示,其关系如下:

$$\begin{cases} f''_{o_i} \leq \lambda_{o_i} C''_{o_i} & i = 1, 2, \dots, n \\ f_o \geq \lambda_o C_o \end{cases} \quad (31)$$

式中: $f''_{o_i}$ 和 $C''_{o_i}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )分别为分解后航路点的流量和容量; $f_o$ 和 $C_o$ 分别为分解前航路点的流量和容量; $\lambda_{o_i}$ 为裕度因子。

### 3.2 优化步骤

区域航路网络优化需综合考虑网络外在结构的合理性和内在运行的稳定性。因此,必须全面系统地统筹优化策略,设计优化方法。根据区域航路网络的结构特征及运行规律,制定以下优化步骤(见图3):

**步骤1** 确定初始区域航路网络。

**步骤2** 判断是否满足“三区”约束。

**步骤3** 若不满足,则根据几何法增加改航转向点,连接转向点生成新航路并利用多目标网络优化模型求解航路点最优布局,执行步骤2。

**步骤4** 若满足,则判断是否符合其他约束。

**步骤5** 若不符合,则采取融合、分解航路点策略,进而利用多目标网络优化模型求解航路点最优布局,执行步骤2。

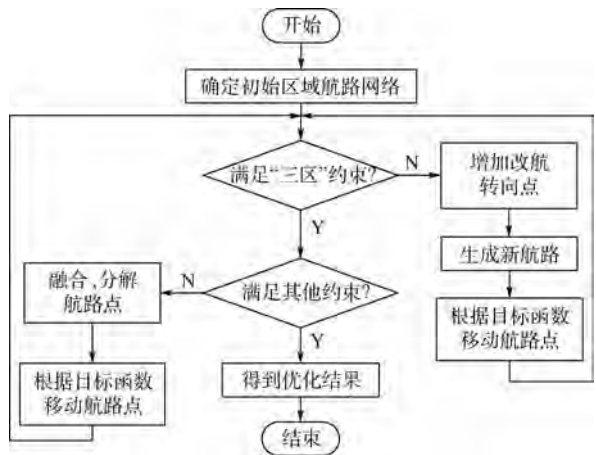


图3 区域航路网络优化步骤

Fig.3 Optimization steps of regional air route network

**步骤 6** 若符合,取其中最优解集,网络优化完毕。

### 3.3 NSGA-III 算法

基于参考点的非支配排序遗传算法,即 NSGA-III 是 Kalyanmoy 和 Himanshu<sup>[14]</sup>提出的第三代多目标规划算法。该算法在继承 NSGA-II 非支配排序的基础上,利用关联操作求解参考距离的方法代替了原来的拥挤度算子,提高了种群多样性。当目标函数较多时,其规划效果明显优于传统多目标规划方法。

#### 1) 染色体构建

区域航路网络结构取决于移动航路点的分布情况,因此可采用实数编码方式构建染色体,如  $x_{11}x_{12}\cdots x_{\alpha 1}x_{\alpha 2}\cdots x_{k1}x_{k2}$ ,  $k$  为移动航路点个数,  $2k$  为染色体长度,  $x_{\alpha 1}$ 、 $x_{\alpha 2}$  分别为航路点  $P_{\alpha}$  的横、纵坐标。

#### 2) 操作算子

为了改进算法性能,提高运算效率,NSGA-III 算法在采取选择、变异、交叉 3 种传统操作算子的同时,引入删除算子,其表述如下:

① 选择算子。计算复合种群所有个体的目标函数值并根据结果进行快速非支配排序,当序号为  $N'$  的个体位于第  $l$  层时,采取关联操作计算第  $l$  层个体到其对应参考线的垂直距离,根据距离筛选符合条件的个体进入子代种群。

② 变异算子。采用基本变异方式,先确定变异个体及位置,进而由变异概率确定是否变异及变异后个体值。

③ 交叉算子。采取模拟二进制交叉算子,先确定交叉个体及位置,进而由交叉概率判断是否发生交叉。

④ 删除算子。对航路点坐标超出规划范围的染色体执行删除操作,重新生成染色体。

#### 3) 算法步骤

NSGA-III 算法的基本步骤与传统遗传算法相似<sup>[15]</sup>,但在选择机制上有所创新,如图 4 所示。

其中,选择操作的具体步骤可描述如下:

**步骤 1** 非支配排序。将种群个体按照非支配规则分为  $m$  层,其中前  $l$  层个体记为  $\Pi_l$ ,数目为  $|\Pi_l|$ ,且  $|\Pi_l| > N'$ 。前  $l-1$  层个体记为  $\Pi_{l-1}$ ,数目为  $|\Pi_{l-1}|$ ,且  $|\Pi_{l-1}| < N'$ 。令  $H = N' - |\Pi_{l-1}|$ ,则需在第  $l$  层中选出  $H$  个个体。

**步骤 2** 定义参考点。若目标函数个数为  $M'$ ,染色体长度为  $2k$ ,则参考点  $j$  个数为  $C_{M'+2k-1}^{2k}$ ,  $j$  可自行设置在  $M'-1$  维的归一化超平面上。

**步骤 3** 归一化目标函数。计算理想点和极

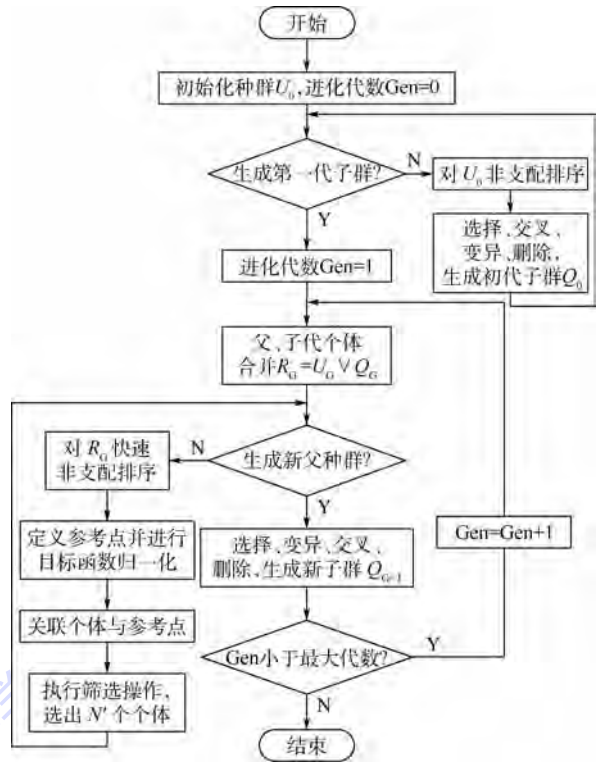


图 4 NSGA-III 算法流程

Fig. 4 Flowchart of NSGA-III algorithm

值点,转换目标函数,最终完成归一化操作。

**步骤 4** 关联操作。连接参考点和原点构成参考线,计算所有个体到与之最近的参考线的距离,将个体与对应参考点进行关联。

**步骤 5** 筛选操作。确定每个参考点  $j$  关联的前  $l-1$  层个体数目  $\rho_j$ ,令关联数目较少的参考点组成集合  $J_{\min} = \{j: \arg \min_j \rho_j\}$ 。从  $J_{\min}$  中随机选择参考点  $j_1$ ,若  $\rho_{j_1} = 0$  且  $j_1$  与多个  $l$  层个体关联,则选取距参考线  $j_1 O$  最近的个体进入下一代;若  $\rho_{j_1} = 0$  且  $j_1$  与第  $l$  层个体无关联,则删除该参考点;若  $\rho_{j_1} \geq 1$  且  $j_1$  与多个  $l$  层个体关联,则随机选择一个个体进入下一代。反复从  $J_{\min}$  中选择参考点,直至个体补充完毕,子代筛选操作完成。

## 4 实例分析

以北京飞行情报区二连浩特  $P_{11}$ 、土木尔台  $P_{12}$  和锡林浩特  $P_{19}$  组成的区域航路网络为例进行结构优化仿真,令航空器的真航线角范围为  $[0, \pi]$ ,栅格边长  $l'$  为 23.58 km,其示意图如图 5 所示。其中,空心圆代表边境点和机场,实心圆代表航路交叉点,  $Z_{T_i}$  为“三区”,箭头指向表示流量运行方向。航段容量为 40 架次/h,令  $\lambda_i = \lambda_{ij} = 0.75$ ,图 5 所示的区域航路网络的相关数据见表 1 和表 2<sup>[16-17]</sup>。

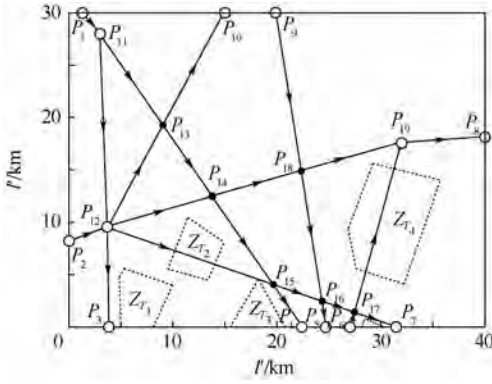


图5 初始区域航路网络

Fig. 5 Initial regional air route network

表1 移动航路点信息

Table 1 Information of mobile waypoint

航路点	汇聚航段 交叉角	航路点流量/ (架次·h <sup>-1</sup> )	航路点容量/ (架次·h <sup>-1</sup> )
P <sub>13</sub>	∠P <sub>11</sub> P <sub>13</sub> P <sub>12</sub>	11.4	20.96
P <sub>14</sub>	∠P <sub>13</sub> P <sub>14</sub> P <sub>12</sub>	12.5	32.31
P <sub>15</sub>	∠P <sub>12</sub> P <sub>15</sub> P <sub>14</sub>	12.9	38.03
P <sub>16</sub>	∠P <sub>15</sub> P <sub>16</sub> P <sub>18</sub>	16.6	34.77
P <sub>17</sub>	∠P <sub>16</sub> P <sub>17</sub> P <sub>6</sub>	14.9	27.04
P <sub>18</sub>	∠P <sub>9</sub> P <sub>18</sub> P <sub>14</sub>	14.9	26.92

表2 航段信息

Table 2 Information of air leg

航路	航段	长度/km	流量/(架次·h <sup>-1</sup> )
B548	P <sub>11</sub> P <sub>12</sub>	216.9	8.8
A575	P <sub>11</sub> P <sub>13</sub>	124.9	5.7
A575	P <sub>15</sub> P <sub>4</sub>	59.0	6.9
H13	P <sub>2</sub> P <sub>12</sub>	49.5	10.6
H13	P <sub>18</sub> P <sub>19</sub>	120.0	6.5
H6	P <sub>15</sub> P <sub>16</sub>	58.9	8.2
B339	P <sub>9</sub> P <sub>18</sub>	179.2	8.4
J201	P <sub>6</sub> P <sub>17</sub>	18.9	6.1
B548	P <sub>12</sub> P <sub>3</sub>	113.17	7.2
A575	P <sub>13</sub> P <sub>14</sub>	96.7	5.8
G218	P <sub>12</sub> P <sub>13</sub>	129.7	5.7
H13	P <sub>12</sub> P <sub>14</sub>	122.6	6.7
H13	P <sub>19</sub> P <sub>8</sub>	96.7	5.9
H6	P <sub>16</sub> P <sub>17</sub>	37.7	8.8
B339	P <sub>18</sub> P <sub>16</sub>	148.5	8.4
J201	P <sub>17</sub> P <sub>19</sub>	195.7	6.4
A575	P <sub>1</sub> P <sub>11</sub>	35.47	10.5
A575	P <sub>14</sub> P <sub>15</sub>	122.6	6
G218	P <sub>13</sub> P <sub>10</sub>	141.5	5.7
H13	P <sub>14</sub> P <sub>18</sub>	99.0	6.5
H6	P <sub>12</sub> P <sub>15</sub>	198.0	6.9
H6	P <sub>17</sub> P <sub>7</sub>	51.9	8.7
B339	P <sub>16</sub> P <sub>5</sub>	30.7	7.8

由表1和表2可知,航路交叉点均符合容量约束,但航段P<sub>12</sub>P<sub>15</sub>和航段P<sub>17</sub>P<sub>19</sub>穿越“三区”,需要增加部分改航点,则经过初步规划后的区域航路网络如图6所示。

图6中,区域航路网络的总运行费用为 $5.424 \times 10^3$ ,飞行冲突系数为1.151,非直线系数为1.248,角度改变量为215.9°。根据区域航路网络优化步骤,分别采用NSGA-III算法、NSGA-II算法和粒子群算法对图6中移动航路点的布局进行优化。设置种群大小为100,进化代数为800,变异率为0.1,杂交率为0.15,可得如图7所示的优化结果。

图7中,(a)~(d)为利用NSGA-III算法得到的区域航路网络;(e)、(f)为利用NSGA-II算法和粒子群算法得到的区域航路网络,各网络具体特征值如表3所示。

表3中,⑦为初步规划后的网络,⑧为初始区域航路网络。通过对比可知,各优化网络的运行费用、非直线系数和角度改变量相比于初始网络均有所增加,但是这些网络的飞行冲突系数下降显著,同时实现了对障碍区域的规避,从而使得空域安全性得以提高。其中,网络③、④的运行费用、非直线系数和角度改变量较优,其改进效果最佳;网络①、②的各项指标较为均衡,改进效果良好;网络⑤、⑥的飞行冲突系数较小,但是其多项指标排名靠后,整体性能一般。为突出差异,对各优化网络指标与网络⑦指标的比值进行分析,如图8所示。

不难看出,优化网络②~④的综合性能优于优化网络⑤、⑥,其中优化网络④的改进效果最佳。相比于初步规划后的网络,优化网络④的运行费用减少了0.11%,飞行冲突系数减少了15.6%,非直线系数减少了0.16%,仅角度改变量略有增加;相比于初始网络,优化网络④符合

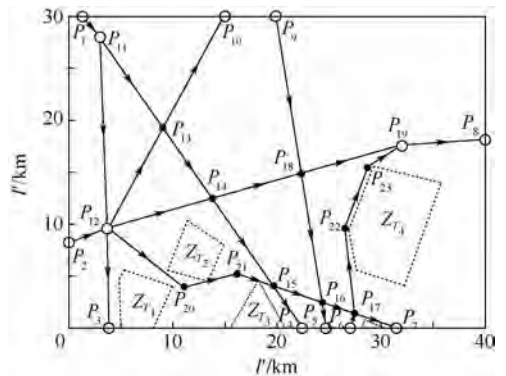


图6 初步规划结果

Fig. 6 Preliminary planning result

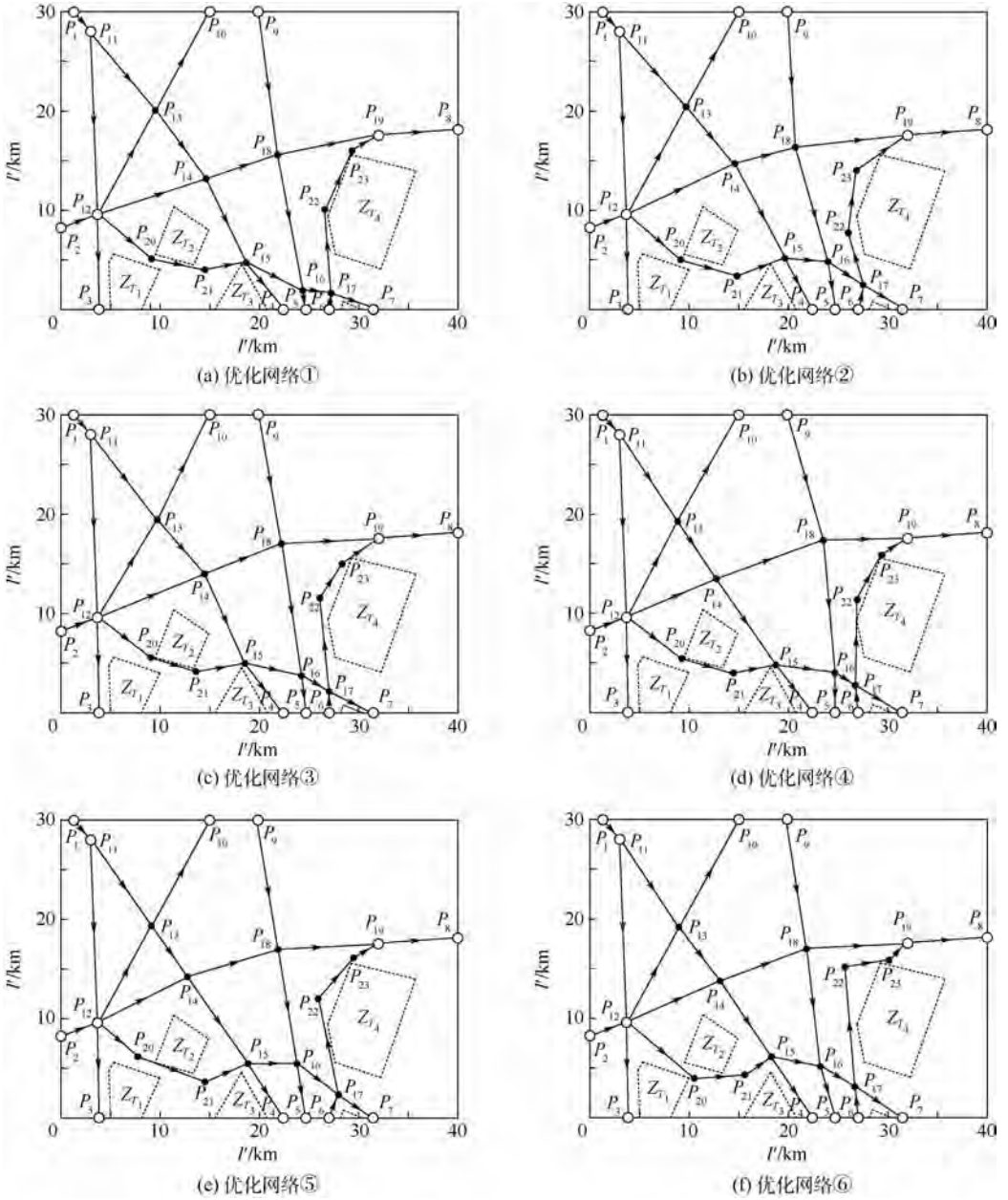


图 7 区域航路网络优化结果示意图

Fig. 7 Schematic of regional air route network optimization results

表 3 区域航路网络特性指标

Table 3 Property indexes of regional air route network

网络序号	运行费用	飞行冲突系数	非直线系数	角度改变量/(°)
①	$5.409 \times 10^3$	1.092	1.244	266.5
②	$5.425 \times 10^3$	0.954	1.251	268.1
③	$5.413 \times 10^3$	0.972	1.245	238.7
④	$5.418 \times 10^3$	0.971	1.246	216.5
⑤	$5.437 \times 10^3$	0.969	1.257	282.3
⑥	$5.495 \times 10^3$	0.879	1.276	330.2
⑦	$5.424 \times 10^3$	1.151	1.248	215.9
⑧	$5.405 \times 10^3$	1.089	1.227	63.34

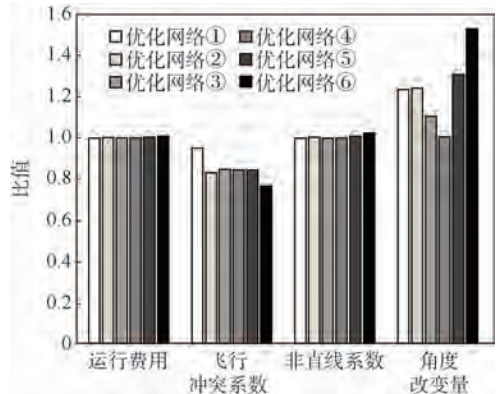


图 8 优化网络对比

Fig. 8 Contrast diagram of optimization network

全部约束条件,同时其飞行冲突系数减少了10.8%,运行费用与非直线系数略有增加,仅角度改变量变化较大。

因此,NSGA-III算法能够有效求解基于航路点布局的网络优化模型,且单次运算可提供多种属性各异的优化网络,方便规划人员在不同任务目标和约束条件下进行选择。

## 5 结 论

本文建立了基于航路点布局的多目标网络结构优化模型,并利用NSGA-III算法对模型进行求解,验证了区域航路网络结构优化方法在解决航路避障和网络节点失效时的可行性。从仿真分析中可以得出:

1) 优化后的网络符合相应约束条件,且飞行冲突系数改进明显,空域安全性显著提升。

2) 利用航路点的移动、融合、分解策略可有效解决容流匹配问题和“三区”避让问题。

3) 利用NSGA-III算法求解多目标优化问题的效果较优,且能为规划者提供多种备选方案。

4) 优化后的网络契合中国空域“碎片化”特点和飞行流量日益增长的实际情况,可有效弥补现有网络缺陷。

区域航路网络与全局航路网络是局部与整体的关系,今后将考虑其关联作用对网络结构优化的影响。

## 参考文献 (References)

- [1] 王世锦,公言会,郇晴云.航路网络规划技术研究综述[J].交通信息与安全,2014,32(6):8-14.  
WANG S J, GONG Y H, LI Q Y. A review of air transportation network planning methods[J]. Transportation Information and Safety, 2014, 32(6): 8-14 (in Chinese).
- [2] 公言会.航路网络规划技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2016.  
GONG Y H. Research on air route network planning technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016 (in Chinese).
- [3] CHEN D, HU M H, ZHANG H H, et al. A network based dynamic air traffic flow model for en route airspace system traffic flow optimization[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2017, 106: 1-19.
- [4] WANG S J, GONG Y H. Research on air route network nodes optimization with avoiding the three areas[J]. Safety Science, 2014, 66: 9-18.
- [5] WANG S J, LI Q Y, CAO X, et al. Optimization of air route network nodes to avoid “three areas” based on an adaptive ant colony algorithm [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 33(4): 469-478.
- [6] WANG S J, CAO X, LI H Y, et al. Air route network optimization in fragmented airspace based on cellular automata[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(3): 1184-1195.
- [7] DUNN S, WILKINSON S M. Increasing the resilience of air traffic networks using a network graph theory approach [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 90: 39-50.
- [8] 康金霞.航路网络特征及其抗毁性研究[D].南京:南京航空航天大学,2016.  
KANG J X. Research on the structure and its invulnerability of China air route network [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016 (in Chinese).
- [9] 严伟,王瑛,孟祥飞,等.航空网络航路点布局的多目标优化设计[J].空军工程大学学报,2017,18(6):20-26.  
YAN W, WANG Y, MENG X F, et al. A multi-objective optimization design for crossing waypoint location in air route network [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2017, 18(6): 20-26 (in Chinese).
- [10] 郇晴云.基于交通流特征的航路网络节点布局优化[D].南京:南京航空航天大学,2016.  
LI Q Y. Air route network node optimization based on traffic flow feature [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016 (in Chinese).
- [11] DU W B, LIANG B Y, YAN G, et al. Identifying vital edges in Chinese air route network via memetic algorithm [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(1): 330-336.
- [12] SAVURAN H, KARAKAYA M. Efficient route planning for an unmanned air vehicle deployed on a moving carrier [J]. Soft Computing, 2016, 20(7): 2905-2920.
- [13] ZHANG X G, MAHADEVAN S. Aircraft re-routing optimization and performance assessment under uncertainty [J]. Decision Support Systems, 2017, 96: 67-82.
- [14] KALYANMOY D, HIMANSHU J. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point based non-dominated sorting approach. Part I: Solving problems with box constraints [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2014, 18(4): 577-601.
- [15] BI X J, WANG C. An improved NSGA-III algorithm based on elimination operator for many-objective optimization [J]. Memetic Computing, 2017, 9(4): 361-383.
- [16] 中国民用航空局.从统计看民航2017[M].北京:中国民航出版社,2018.  
CAAC. From the statistical view of civil aviation 2017 [M]. Beijing: China Civil Aviation Press, 2018 (in Chinese).
- [17] 李明娟.杰普逊航图及应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,2016.  
LI M J. Jeppesen charts and applications [M]. Beijing: Beihang University Press, 2016 (in Chinese).

### 作者简介:

郑煜坤 男,硕士研究生。主要研究方向:航路网络规划与设计、改航路径规划。

王瑛 女,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:装备系统工程与管理决策、空域规划、复杂网络与风险传导。

# Multi-objective network structure optimization method based on waypoint layout

ZHENG Yukun<sup>1</sup>, WANG Ying<sup>2,\*</sup>, LI Chao<sup>2</sup>, QI Yao<sup>1</sup>, LI Zhengxin<sup>2</sup>

(1. College of Graduate, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. College of Equipment Management and Unmanned Aerial Vehicle Engineering,  
Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** In order to improve the scientific nature of regional air route network structure and reduce the network operation pressure made by flight flow growth, a multi-objective network optimization method based on waypoint layout was proposed. First, the constituent elements of regional air route network were considered, and the optimization model was made with the design of optimization targets and constraint conditions which reflected the network comprehensive performance. Then, a waypoint layout strategy was established based on node movement, fusion and decomposition, so the solution procedure of optimization method was provided and the method can be solved by NSGA-III algorithm. Finally, a simulation of partial regional air route network belonging to Beijing flight information region was analyzed and the results demonstrate excellent comprehensive performance of air route networks made by NSGA-III algorithm. While the optimal network satisfies the constraint conditions, the operating cost and non-linear coefficient are basically unchanged, and the flight conflict coefficient is reduced by 10.8%. So this optimization method can promote economic efficiency, safety and feasibility of air route network, which conforms to current airspace environment and management system in China.

**Keywords:** regional air route network; network optimization method; network comprehensive performance; waypoint layout; NSGA-III algorithm

**Received:** 2018-03-26; **Accepted:** 2018-08-24; **Published online:** 2018-09-05 16:26

**URL:** [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180903.1131.002.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180903.1131.002.html)

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (71601183,61502521)

\* **Corresponding author.** E-mail: yingwangkdg@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0196

# 航空发动机承力结构隔振设计方法及试验

洪杰<sup>1,2</sup>, 杨振川<sup>1</sup>, 王永锋<sup>1</sup>, 马艳红<sup>1,2,\*</sup>

1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083; 2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100083)

**摘 要:** 基于先进航空发动机承力框架的结构与力学特征, 通过理论分析与仿真计算验证了高隔振性承力框架结构动力学设计方法。通过对承力结构刚度/质量分布及几何构形突变的优化设计, 提高转子支承结构在宽频域内的机械阻抗, 实现在转子工作转速范围内的高隔振性。根据承力结构刚度/质量分布对隔振性的影响, 采用折返式非连续结构, 设计并搭建了转子-承力框架试验系统, 通过试验进一步验证了高隔振性承力框架设计方法。试验结果表明: 在承力结构中采用非连续性设计可在宽频域内对不同位置支点处激励具有良好的隔振效果。

**关键词:** 承力框架; 隔振性; 刚度/质量分布; 非连续性; 机械阻抗

**中图分类号:** V231.92

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5965(2019)01-0010-08

随着航空发动机推重比/功重比的不断提高, 转子承力结构设计愈发轻量化, 更多使用薄壁板壳结构, 使其振动模态更加密集复杂并表现出一定的几何非线性<sup>[1]</sup>。同时承力结构在工作时承受多种振动载荷(如转子不平衡激励、传动齿轮啮合的机械激励等), 具有复杂的振动特征。在多频交互激励的振动环境下, 承力结构自身以及分布其上的管路附件系统易产生变形、裂纹甚至疲劳破坏。另外, 承力结构上的振动响应可通过轴承传至转子系统, 对转子动力特性产生不利影响。因此, 需要对航空发动机承力结构的隔振特性进行设计理论方法的研究, 使转静子间及静子部件间的振动得到有效隔离, 降低整机振动水平。

对于承力结构的隔振设计, 一般是在结构与基础间施加质量、弹性及阻尼元件, 通过转移和消耗振动能量使振动传递率达到最小<sup>[2]</sup>。根据隔离对象的不同可分为: 减小振源对基础力的传递与减小基础振动对附着结构的运动传递, 即力隔振与运动隔振<sup>[3-4]</sup>。在此方面, 王祖华等<sup>[5]</sup>应用

阻振质量对振动波传递的阻抑特性, 通过构造阻抗失配结构, 为舰船舱壁进行了隔振优化设计。况成玉<sup>[6]</sup>利用周期结构对弹性波传播的抑制效果, 设计出船体隔振浮筏, 并研究了其隔振特性。姜洪源等<sup>[7]</sup>通过对航空发动机用金属橡胶隔振器的实验研究, 验证了其较橡胶更优异的隔振性能。考虑航空发动机承力结构作为板壳组合结构系统, 采用通常方法很难使得各位置都达到理想效果。近年来, 国内外学者提出利用时滞反馈等主动或半主动介入方式<sup>[8]</sup>, 即在系统中引入外界能量产生与主振源相抵消的振动, 实现对振动的有效隔离<sup>[9-10]</sup>。在此方面, Nagai等<sup>[11]</sup>应用神经网络控制方法对列车悬挂系统进行了振动主动控制的研究。梅德庆和陈子辰<sup>[12]</sup>为微制造平台设计了基于磁致伸缩作动器的二维模糊主动隔振系统。但主动隔振器存在输出力与响应时间的限制、信号在传输过程中的迟滞等问题<sup>[13-14]</sup>, 还会对承力结构产生附加质量, 影响发动机工作可靠性的同时也不利于结构减重。马艳红等<sup>[15]</sup>针对

收稿日期: 2018-04-10; 录用日期: 2018-07-05; 网络出版时间: 2018-07-17 09:29

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180713.1851.001.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180713.1851.001.html)

基金项目: 国家自然科学基金(51575022, 51475021); 航空科学基金(20142151024)

\*通信作者. E-mail: mayanh2002@163.com

**引用格式:** 洪杰, 杨振川, 王永锋, 等. 航空发动机承力结构隔振设计方法及试验[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 10-17. HONG J, YANG Z C, WANG Y F, et al. Vibration isolation design method and experiment of aero-engine supporting structure [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 10-17 (in Chinese).

涡轴发动机涡轮级间支承结构隔振设计问题,初步提出相邻部件之间刚度/质量分布差异加大可有效避免耦合振动的设计思想,但缺少相关理论分析及试验的验证。

本文在对先进航空发动机涡轮承力框架结构及其隔振特性分析的基础上,进一步总结提出了通过承力结构几何构形的变化改变其力学特征,利用结构间刚度/质量分布的差异和阶跃,提高结构系统在宽频域内的机械阻抗,实现高隔振性的设计方法。在研究中建立了承力结构隔振特性分析力学模型,并通过转子-承力框架试验系统进行了试验验证。本文研究对于航空发动机承力结构的自主设计与高隔振性改进具有指导意义。

## 1 承力框架结构及力学特征

### 1.1 结构特征

典型涡轮承力框架是由具有板/壳等不同几何构形的部件组成的复杂结构系统。不同部件的受力形式及振动模态都具有局部特征,并表现出一定的正交性。因此,以各部件间连接处为节点,根据不同结构特征,将整个系统离散化为不同的结构单元。图 1 为先进涡轮级间共用承力框架的结构示意图,其主要由涡轮机匣、导流器组件、承力鼓筒、共用轴承座等组成。

导流器外安装边与涡轮机匣通过螺栓连接,外安装边的柔性锥壳结构设计能够减小导流器内外温度梯度下结构内的附加热应力。导流器内环向内延伸出折返式鼠笼,与其他串联的承力部件相比,其具有较弱的径向刚度,决定了承力框架的刚度水平,其位于低温环境下,能够降低承力结构支承刚度对于温度的敏感度;同时柔性折返式鼠笼与承力鼓筒通过法兰-螺栓相连,保证了法兰边

位置的变形协调,提高了连接结构的稳健性。承力鼓筒与共用轴承座后伸安装边通过螺栓相连,二者同样构成折返式结构,与共用轴承座相比具有较弱的径向刚度。前 2 处螺栓连接轴向上处于同一平面,且位于共用轴承座重心位置,避免了附加弯矩产生的同时,减弱了共用轴承座各支点振动的相互影响。

综上所述,典型先进涡轮承力框架结构可看作是由不同几何构形及刚度、质量特征各不相同的结构单元通过多处折返式设计串联而成,具有明显的几何非连续及离散化的结构特征。

### 1.2 刚度/质量分布特征

针对图 1 所示承力框架结构,建立三维有限元模型(见图 2),分析其刚度/质量分布的力学特征。有限元模型中,承力框架材料设为高温合金 GH3652,具体部件材料属性如表 1 所示。

基于有限元模型,对承力框架各部件的质量、等效径向刚度以及刚度/质量特征进行计算,结果如表 2 所示。

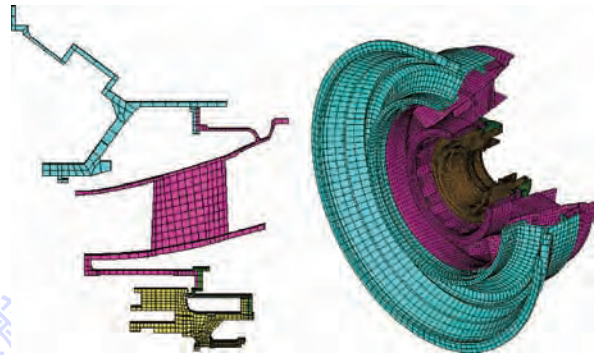


图 2 承力框架有限元模型

Fig. 2 Supporting frame finite element model

表 1 承力框架材料参数

Table 1 Supporting frame material parameters

部件	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/GPa	泊松比
导流器叶片	$8.44 \times 10^3$	164	0.308
其余部件	$8.44 \times 10^3$	205	0.308

表 2 承力框架各部件非连续性刚度/质量分布特征

Table 2 Supporting frame parts' discrete stiffness/mass distribution characteristics

编号	部件	质量/kg	刚度/ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	刚度/ 质量 ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
1	涡轮机匣	21.1	$6.22 \times 10^8$	$2.95 \times 10^7$
2	导流器	13.0	$1.28 \times 10^8$	$9.85 \times 10^6$
3	折返式鼠笼	2.0	$8.13 \times 10^7$	$4.07 \times 10^7$
4	承力鼓筒	0.9	$2.32 \times 10^8$	$2.58 \times 10^8$
5	共用轴承座	8.0	$7.76 \times 10^8$	$9.70 \times 10^7$

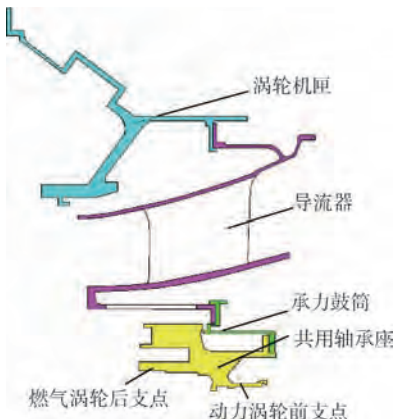


图 1 先进涡轮级间共用承力框架结构

Fig. 1 Advanced shared mid-turbine supporting frame structure

由表2计算结果可知,承力框架结构各相邻部件间的刚度/质量分布特征均具有较大差异和突变,整体刚度/质量分布特征表现为非连续及离散化分布。

## 2 刚度/质量分布对隔振性的影响

### 2.1 理论分析

基于承力框架结构特征,分别建立等刚度/质量分布和变刚度/质量分布承力结构动力学模型,引用机械阻抗表征结构的隔振特性,分析不同刚度/质量分布特征对其产生的影响。模型中暂忽略系统阻尼,如图3所示。

图3(a)为等刚度/质量分布承力框架力学模型。其中,  $M'_0$ 、 $K'_0$  分别为外机匣响应位置的质量、刚度,  $M'_1$ 、 $K'_1$  分别为等刚度/质量分布承力结构的质量、刚度。假设  $M'_0 = m$ ,  $K'_0 = 100k$ ,  $M'_1 = 2m$ ,  $K'_1 = k$ 。图3(b)为变刚度/质量分布承力框架力学模型。其中,  $M_0$ 、 $K_0$  分别为外机匣响应位置的质量、刚度,  $M_1$ 、 $K_1$  分别为大刚度/质量分布特征承力结构的质量、刚度,  $M_2$ 、 $K_2$  分别为小刚度/质量分布特征承力结构的质量、刚度。假设  $M_0 = M_1 = M_2 = m$ ,  $K_0 = K_1 = 100k$ ,  $K_2 = k$ 。2个模型承力结构部分总质量相等、等效刚度近似相等。假设激振力  $F$ 、 $F'$  的频率为  $\omega$ 。应用节点响应法<sup>[16]</sup>分别对2个模型计算激振点与响应位置间的传递阻抗(位移阻抗),并进行对比分析。

类比电网络图,用回路表示系统及振源组成的封闭系统,建立相应机械网络图,如图4所示。

在图4(a)中:

$$\begin{cases} F' - F'_{11} - F'_{12} = 0 \\ F'_{12} - F'_{22} - F'_{23} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

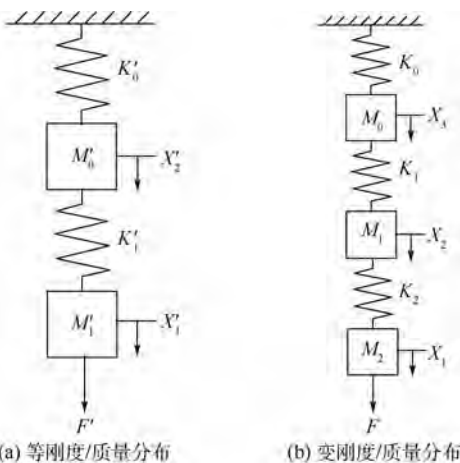


图3 承力结构动力学模型

Fig.3 Supporting structure dynamical model

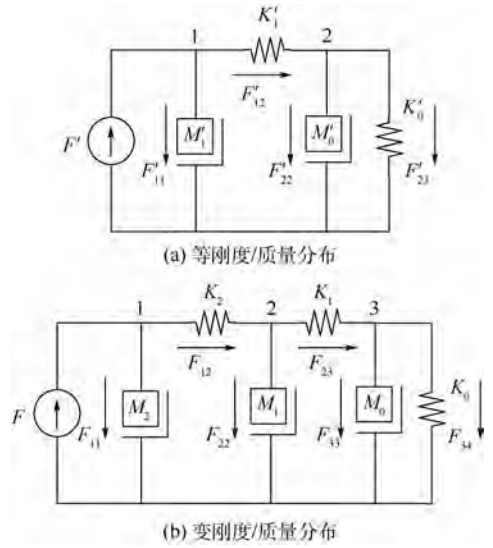


图4 承力结构机械网络

Fig.4 Mechanical network of supporting structure

式中:  $F'_{11} = Z'_1 X'_1$ ,  $F'_{12} = Z'_2 (X'_1 - X'_2)$ ,  $F'_{22} = Z'_3 X'_2$ ,  $F'_{23} = Z'_4 X'_2$ ,  $Z'_1 = -2m\omega^2$ ,  $Z'_2 = k$ ,  $Z'_3 = -m\omega^2$ ,  $Z'_4 = 100k$ ,  $X'_1$ 、 $X'_2$  分别为图4(a)中1、2点的响应值。

代入式(1)求得等刚度/质量分布模型的传递阻抗为

$$Z_a = \frac{F'}{X'_2} = \frac{-203k m \omega^2 + 100k^2 + 2m^2 \omega^4}{k} \quad (2)$$

在图4(b)中:

$$\begin{cases} F - F_{11} - F_{12} = 0 \\ F_{12} - F_{22} - F_{23} = 0 \\ F_{23} - F_{33} - F_{34} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $F_{11} = Z_1 X_1$ ,  $F_{12} = Z_2 (X_1 - X_2)$ ,  $F_{22} = Z_3 X_2$ ,  $F_{23} = Z_4 (X_2 - X_3)$ ,  $F_{33} = Z_5 X_3$ ,  $F_{34} = Z_6 X_3$ ,  $Z_1 = Z_3 = Z_5 = -m\omega^2$ ,  $Z_2 = k$ ,  $Z_4 = Z_6 = 100k$ ,  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  分别为图4(b)中1、2、3点的响应值。

代入式(3)整理可得

$$\begin{cases} Z_{11} X_1 + Z_{12} X_2 = F \\ Z_{21} X_1 + Z_{22} X_2 + Z_{23} X_3 = 0 \\ Z_{32} X_2 + Z_{33} X_3 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:

$$\begin{aligned} Z_{11} &= Z_1 + Z_2 = k - m\omega^2 \\ Z_{22} &= Z_2 + Z_3 + Z_4 = 101k - m\omega^2 \\ Z_{33} &= Z_4 + Z_5 + Z_6 = 200k - m\omega^2 \\ Z_{12} &= Z_{21} = -Z_2 = -k \\ Z_{32} &= Z_{23} = -Z_4 = -100k \end{aligned}$$

代入式(4)求得变刚度/质量分布模型的传递阻抗为

$$Z_b = \frac{F}{X_3} = \frac{\begin{vmatrix} Z_{11} & Z_{12} & 0 \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ 0 & Z_{32} & Z_{33} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} Z_{21} & Z_{22} \\ 0 & Z_{32} \end{vmatrix}} =$$

$$(20\ 200k^3 - 20\ 501k^2m\omega^2 + 302km^2\omega^4 - m^3\omega^6)/(100k^2) \quad (5)$$

比较  $Z_a$  和  $Z_b$  的大小,令  $Z_b - Z_a$  得

$$Z_b - Z_a = \frac{10\ 200k^2 - 201km\omega^2 + 102m^2\omega^4 - m^3\omega^6/k}{100k} \quad (6)$$

化简得

$$Z_b - Z_a = \frac{10\ 200 - 201\lambda + 102\lambda^2 - \lambda^3}{100/k} \quad (7)$$

式中: $\lambda = \omega^2/\omega_n^2$ ,  $\omega_n = \sqrt{k/m}$  为与系统固有频率相关的基量。

根据航空发动机中承力框架固有模态频率与转子不平衡激励频率的关系,可假设激振力频率范围为: $0 < \omega < 10\omega_n$ , 即  $0 < \lambda < 100$ , 可得  $Z_b - Z_a > 0$ , 即  $Z_a < Z_b$  (8)

可见,在航空发动机转子工作转速范围内,承力结构刚度/质量分布非连续性设计相比于等刚度/质量分布具有更大的传递阻抗,表现出更好的隔振性能。

针对图 2 所示的非连续承力框架实际结构,根据各部件刚度/质量分布特征,将其简化为五自由度的弹簧-质量系统,暂忽略系统阻尼,如图 5 所示。由表 2 中各部件的编号,图 5 中的  $m_i$  和  $k_i$  ( $i=1,2,\dots,5$ ) 分别表示涡轮机匣至共用轴承座的质量和刚度。

令激振力  $F$  的频率为  $\omega$ , 则图 5 中质量单元阻抗为  $I_i = -m_i\omega^2$ , 弹簧单元阻抗为  $I'_i = k_i$ ,  $D_1 \sim D_5$  分别表示部件 1 ~ 5 处的位移响应。得到

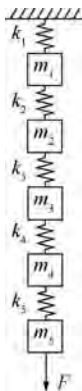


图 5 非连续承力结构动力学模型

Fig. 5 Discrete supporting structure dynamical model

简化阻抗如图 6 所示。

由图 6 可知,令

$$R_1 = I_1 + I'_1$$

$$R_2 = I_2 + \frac{I'_2 R_1}{I'_2 + R_1}$$

$$R_3 = I_3 + \frac{I'_3 R_2}{I'_3 + R_2}$$

$$R_4 = I_4 + \frac{I'_4 R_3}{I'_4 + R_3}$$

根据图 6 中各元件间关系可得

$$\begin{cases} D_5 \frac{I'_5 R_4}{I'_5 + R_4} = D_4 R_4 \\ D_4 \frac{I'_4 R_3}{I'_4 + R_3} = D_3 R_3 \\ D_3 \frac{I'_3 R_2}{I'_3 + R_2} = D_2 R_2 \\ D_2 \frac{I'_2 R_1}{I'_2 + R_1} = D_1 R_1 \end{cases} \quad (9)$$

定义两测点位置的振动响应比值为测点间的振动传递系数,以此表征测点间结构的隔振特性。由式(9)可求得共用轴承座至涡轮机匣的振动传递系数为

$$\frac{D_1}{D_5} = \frac{I'_2 I'_3 I'_4 I'_5}{(I'_2 + R_1)(I'_3 + R_2)(I'_4 + R_3)(I'_5 + R_4)} \quad (10)$$

假设激振力  $F$  频率为 1 000 Hz, 根据表 2 中各部件的刚度、质量值, 计算得到涡轮机匣至共用轴承座的振动传递系数约为 0.07, 近 90% 的振动被衰减, 说明承力板壳结构的非连续性设计具有良好的隔振效果。

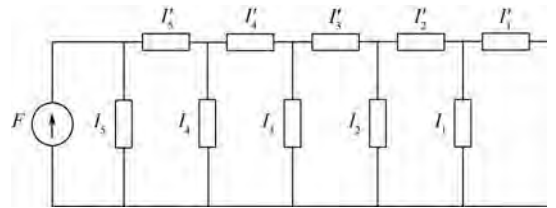


图 6 非连续承力结构简化阻抗示意图

Fig. 6 Schematic of simplified impedance of discrete supporting structure

## 2.2 仿真分析

基于图 2 中非连续承力框架有限元模型,应用谐响应分析方法,通过有限元仿真分析其振动传递特性,并与刚性(连续性)承力框架结构(见图 7)进行对比,以验证承力结构非连续性设计良好的隔振效果。

为模拟承力框架实际工作状态,对涡轮机匣外安装边施加全约束,其余结构为自由状态;在燃

气涡轮后支点处施加径向 1 000 N 作用力,计算频率范围为 0 ~ 1 200 Hz。

分别提取支点与涡轮机匣内安装边位置处的位移响应,计算得到不同激振力频率下不同特征承力框架支点至涡轮机匣的振动传递系数(机匣响应/支点响应),如图 8 所示。

由数值仿真结果可知:①对于非连续性承力框架,相比于支点位置,涡轮机匣内安装边处响应幅值大幅减小,振动传递系数在 0.1 左右;②对于刚性(连续性)承力框架,支点至涡轮机匣的振动传递系数较大,在 0.8 左右,即振动衰减较弱;③在不同激振力频率下,受结构自身振动特性影响,振动传递系数有所不同。

通过上述 2 个模型仿真计算结果的对比,进一步验证了理论分析。结构构形突变及各构件间刚度/质量分布的非连续性设计,可显著降低振动传递系数,具有优异的隔振性能。

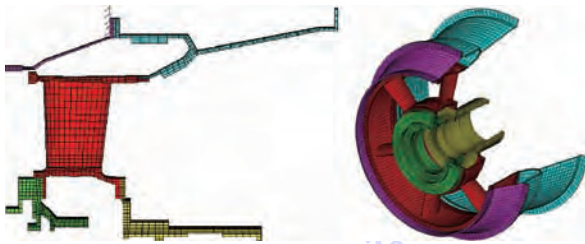


图 7 刚性(连续性)承力框架有限元模型  
Fig. 7 Rigid (continuous) supporting frame finite element model

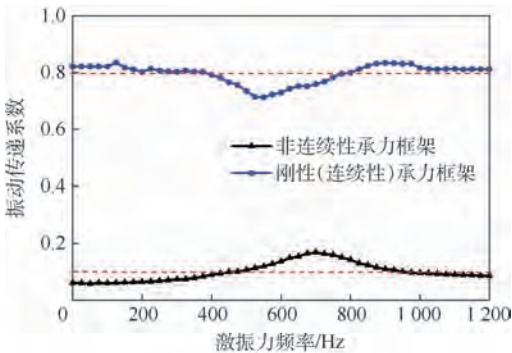


图 8 支点至涡轮机匣的振动传递系数  
Fig. 8 Vibration transfer coefficient from bearing point to turbine motor case

### 3 转子-承力框架试验

#### 3.1 总体设计方案

在转子-承力框架试验系统设计中,转子采用柔性悬臂结构,总长为 580 mm,质量为 3.23 kg (包括轮盘)。利用电机经输出传动轴带动转子系统。采用双支点支承方案,在靠近电机处设置

1<sup>#</sup>支点,采用滚珠轴承、刚性支承。在靠近轮盘处(远离电机一端)设置 2<sup>#</sup>支点,采用滚棒轴承、弹性支承,用作承力框架试验支点,此处可采用单一轴承或双轴承并用支承状态。为了模拟试验支点处承力结构的几何构形及刚度/质量分布非连续特征,分别采用了刚度/质量分布特征各不相同的承力支架、承力鼓筒及折返式鼠笼以折返结构形式相连。轮盘安放在轴的一端,采用伸臂悬置方式。试验系统结构设计方案如图 9 所示。图 10 为装配后的试验系统实物图。

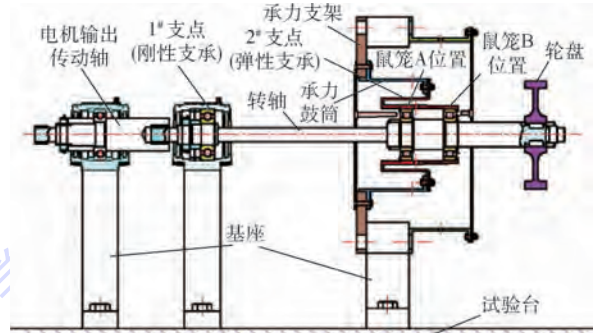


图 9 转子-承力框架试验系统设计方案  
Fig. 9 Rotor-supporting frame experimental apparatus design scheme

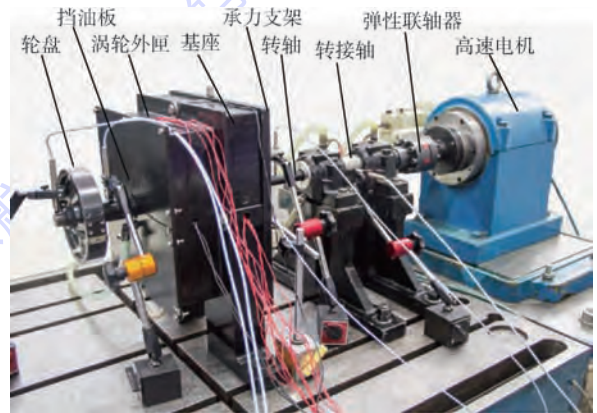


图 10 转子-承力框架试验系统实物图  
Fig. 10 Picture of rotor-supporting frame experimental apparatus

#### 3.2 测点布置

本试验主要针对承力框架各关键位置进行振动测量,具体测试项目为承力框架各位置的加速度信号。图 11 为试验系统测点位置分布示意图,分别在承力框架的支点、承力鼓筒以及承力支架外端布置接触式加速度传感器(图中①、②、⑤位置)。由传感器获取的振动信号,通过前置放大器与电荷放大器转换为电压信号,统一输入到 DASP 采集卡中,通过 DASP-V10 智能数据采集和信号处理系统进行分析。

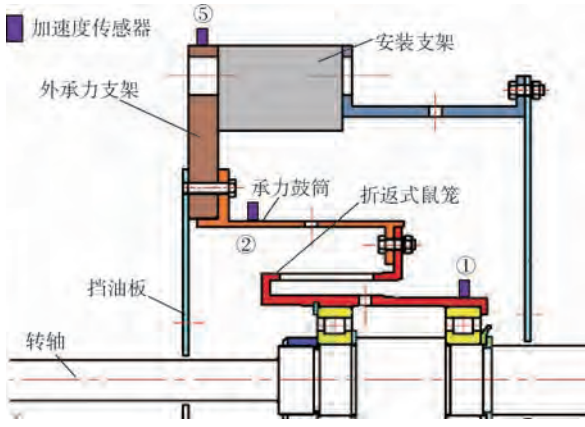


图 11 转子-承力框架试验系统测点位置分布  
Fig. 11 Rotor-supporting frame experimental apparatus measuring point layout

### 3.3 试验状态

根据各支承状态下临界转速测试结果,选取振动响应测试转速。双轴承并用时,最高试验转速选为 5 500 r/min,单一轴承时最高试验转速选为 5 000 r/min,采用阶梯转速控制方式。试验过程中转子不平衡量选为 43.5 g·mm。

### 3.4 试验结果与分析

对试验支点处采用单一轴承支于鼠笼 B 位置状态进行试验测试,得到承力框架各测点位置径向振动响应信号(加速度信号)的幅频特性曲线,如图 12 所示。

由图 12 可知,承力框架不同位置振动响应不同,其变化规律为:距转子系统最近的支点位置(测点①)振动响应幅值最大;振动经折返式鼠笼传递至承力鼓筒位置(测点②)后,振动响应幅值大幅减小;距转子系统最远的承力支架位置(测点⑤)振动响应幅值最小。

分别将测点①、测点②、测点⑤位置振动响应

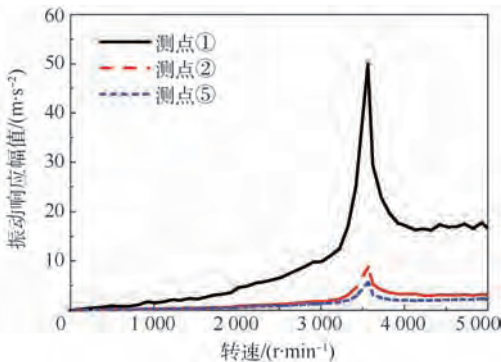


图 12 单一轴承支于鼠笼 B 位置的振动响应幅频曲线  
Fig. 12 Vibration response amplitude frequency curves of single bearing on squirrel cage B position

幅值记为  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_5$ ,可得各转速下不同结构间振动传递系数  $A_5/A_1$ 、 $A_3/A_2$  与  $A_2/A_1$ ,如图 13 所示。

由图 13 可知,本承力框架试验件由支点至承力支架外端的振动传递系数约为 0.13,振动传递系数较小,可见所设计的刚度/质量分布非连续承力框架试验件具有较为优异的振动隔离特性。

通过对承力框架试验件各部分的力学特征分析可知:测点①、测点②间的承力鼓筒-折返式鼠笼结构与测点⑤、测点②间的承力支架相比,具有较大的刚度/质量分布特征差异,试验中测得振动由支点经折返式鼠笼至承力鼓筒的振动传递系数 ( $A_2/A_1$ ) 在 0.2 左右,远小于承力鼓筒至承力支架外端的振动传递系数 ( $A_5/A_2$ ) (约 0.65 以上),可见结构较大的刚度/质量分布特征差异能够对振动起到更有效的衰减作用。

改用单一轴承支于鼠笼 A 位置以及双轴承并用不同支承状态,进一步探究承力框架试验件不同轴承支承位置与数量对隔振特性的影响。改用另外 2 种支承状态后承力框架试验件的振动传递系数如图 14 所示。

由图 13 和图 14 可知,双轴承并用情况下,承力

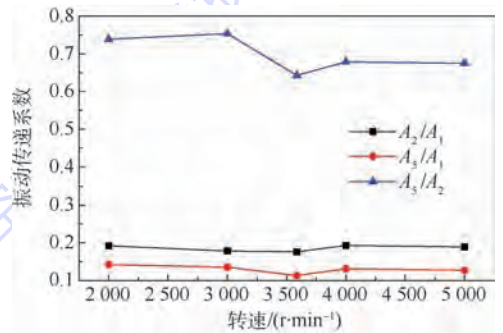


图 13 单一轴承支于鼠笼 B 位置的振动传递系数  
Fig. 13 Vibration transfer coefficient of single bearing on squirrel cage B position

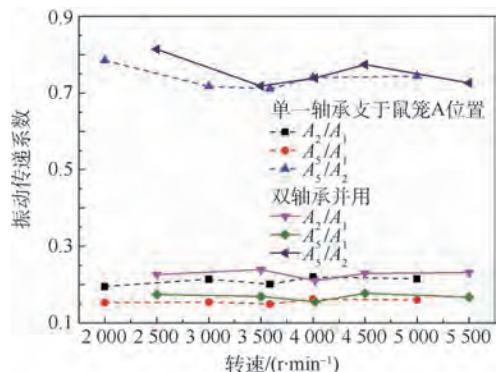


图 14 双轴承并用与单一轴承状态振动传递系数对比  
Fig. 14 Comparison of vibration transfer coefficient between double bearings and single bearing

框架试验件各测点间的振动传递系数与单一轴承支承不同位置时相近,波动变化区间基本一致,说明双轴承并用不会改变承力结构内阻抗特性,对承力结构内振动传递与衰减特征无明显影响,此承力框架试验件在宽频域内对不同位置支点处的激励均具有良好的隔振性。

## 4 结 论

本文通过对先进航空发动机涡轮承力框架结构、力学特征的分析,结合理论模型、仿真计算和试验验证,提出高隔振性承力结构设计理论,为航空发动机承力结构的设计与高隔振性改进提供指导。

1) 典型高隔振性航空发动机承力框架的板壳结构具有几何构形突变与离散化特点,以及刚度/质量分布非连续的力学特征。理论分析与仿真计算表明,非连续承力结构支点至涡轮机匣的振动传递系数约 0.1 左右。而在刚性(连续性)承力结构中振动传递系数可达 0.8 以上,远高于非连续结构。板壳支承结构的非连续性设计可实现结构内较大的机械阻抗及良好的隔振性能。

2) 转子-承力框架试验系统的试验结果表明,承力框架整体振动传递系数约为 0.13,在刚度/质量分布具有阶跃变化特征的折返式鼠笼及承力鼓筒位置振动传递系数约为 0.2,而刚度/质量分布均匀处振动传递系数较高,验证了结构非连续性和离散性特征可产生优异的隔振效果。

## 参考文献 (References)

- [1] 温登哲. 航空发动机机匣模型的若干动力学特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.  
WEN D Z. Several dynamic characteristics of aero-engine case model[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015 (in Chinese).
- [2] 陆泽琦,陈立群. 非线性被动隔振的若干进展[J]. 力学学报,2017,49(3):550-564.  
LU Z Q, CHEN L Q. Some recent progresses in nonlinear passive isolations of vibration[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, 49(3): 550-564 (in Chinese).
- [3] 方同,薛璞. 振动理论及应用[M]. 西安:西北工业大学出版社,1998.  
FANG T, XUE P. Theory of vibration with applications[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University Press, 1998 (in Chinese).
- [4] CREDE C E. Vibration and shock isolation[M]. New York: John Wiley and Sons, 1951.
- [5] 王祖华,周海波,计方. 典型舰船舱壁结构隔振优化设计[J]. 船舶,2011,22(1):26-33.  
WANG Z H, ZHOU H B, JI F. Vibration isolation design of typical hull bulkhead structures[J]. Ship and Boat, 2011, 22(1): 26-33 (in Chinese).
- [6] 况成玉. 周期结构浮筏设计及隔振性能研究[D]. 上海:上海交通大学,2011.  
KUANG C Y. Design and vibration isolation characteristics research of a floating raft constructed with periodic structures[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011 (in Chinese).
- [7] 姜洪源,董春芳,敖宏瑞,等. 航空发动机用金属橡胶隔振器动静态性能的研究[J]. 航空学报,2004,25(2):140-142.  
JIANG H Y, DONG C F, AO H R, et al. Research on dynamic and static characteristics of metal rubber isolator used in aero-engine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(2): 140-142 (in Chinese).
- [8] 徐鉴. 振动控制研究进展综述[J]. 力学季刊,2015,36(4):547-565.  
XU J. Advances of research on vibration control[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2015, 36(4): 547-565 (in Chinese).
- [9] 张春红,汤炳新. 主动隔振技术的回顾与展望[J]. 河海大学常州分校学报,2002,16(2):1-5.  
ZHANG C H, TANG B X. The retrospection and prospection of active vibration isolation technique[J]. Journal of Hohai University Changzhou, 2002, 16(2): 1-5 (in Chinese).
- [10] 张磊,付永领,刘永光,等. 主动隔振技术及其应用与发展[J]. 机床与液压,2005(2):5-8.  
ZHANG L, FU Y L, LIU Y G, et al. Active vibration isolation and its application and development[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2005(2): 5-8 (in Chinese).
- [11] NAGAI M, MORAN A, TAMURA Y, et al. Identification and control of nonlinear active pneumatic suspension for railway vehicles using neural networks[J]. Control Engineering Practice, 1997, 5(8): 870-877.
- [12] 梅德庆,陈子辰. 微制造平台的精密隔振系统研究[J]. 光学精密工程,2001,9(6):506-510.  
MEI D Q, CHEN Z C. Research on precision isolation system of micro manufacturing platform[J]. Optics and Precision Engineering, 2001, 9(6): 506-510 (in Chinese).
- [13] FULLER C C, ELLIOTT S, NELSON P A. Active control of vibration[M]. New York: Academic Press, 1996.
- [14] GAWRONSKI W K. Advanced structural dynamics and active control of structures[M]. New York: Springer, 2004.
- [15] 马艳红,曹冲,李鑫,等. 涡轴发动机涡轮级间支承结构设计关键技术[J]. 航空发动机,2014,40(4):34-40.  
MA Y H, CAO C, LI X, et al. Key design technology of mid turbine frame for turboshaft engine[J]. Aeroengine, 2014, 40(4): 34-40 (in Chinese).
- [16] 顾家柳,丁奎元,刘启洲,等. 转子动力学[M]. 北京:国防工业出版社,1985.  
GU J L, DING K Y, LIU Q Z, et al. Rotordynamics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1985 (in Chinese).

**作者简介:**

洪杰 男,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:航空发动机结构完整性与可靠性、转子动力学。

杨振川 男,硕士研究生。主要研究方向:航空发动机振动控制。

王永锋 男,博士研究生。主要研究方向:航空发动机振动控制。

马艳红 女,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:航空发动机整机动力学、旋转机械振动控制、智能结构与新型阻尼材料等。

## Vibration isolation design method and experiment of aero-engine supporting structure

HONG Jie<sup>1,2</sup>, YANG Zhenchuan<sup>1</sup>, WANG Yongfeng<sup>1</sup>, MA Yanhong<sup>1,2,\*</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China;

2. Collaborative Innovation Center of Advanced Aero-Engine, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on the structural and dynamic characteristics of advanced aero-engine supporting frames, the design method of high vibration isolation supporting frames is verified by theoretical analysis and simulation calculation. The structural mechanical impedance in wide frequency band is increased and high vibration isolation within rotor working speed range is achieved by the optimized design of stiffness/mass distribution and configuration break in supporting structure. According to the effect of structural stiffness/mass distribution on vibration isolation, the rotor-supporting frame experimental apparatus is designed and established in folded discrete structure, and the high vibration isolation supporting frame design method is further verified by the experiment. The experimental results show that the discrete design in supporting structure possesses good vibration isolation effect to the excitation on different bearing positions in wide frequency band.

**Keywords:** supporting frame; vibration isolation; stiffness/mass distribution; discreteness; mechanical impedance

**Received:** 2018-04-10; **Accepted:** 2018-07-05; **Published online:** 2018-07-17 09:29

**URL:** [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180713.1851.001.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180713.1851.001.html)

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (51575022,51475021); Aeronautical Science Foundation of China (20142151024)

\* **Corresponding author.** E-mail: mayanh2002@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0222

# 高速转子连接结构刚度损失及振动特性

洪杰<sup>1,2</sup>, 徐翕如<sup>1</sup>, 苏志敏<sup>3</sup>, 马艳红<sup>1,2,\*</sup>

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083; 2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100083;  
3. 中国航发湖南航空动力机械研究所, 株洲 412002)

**摘 要:** 高负荷航空发动机转子的转速和支点跨度不断加大,使得转子弯曲刚度下降,并在工作中具有一定弯曲变形。转子弯曲变形时,连接界面会存在刚度损失,需考虑转子弯曲变形对连接界面刚度特性及转子系统振动特性的影响。提出了定量描述连接界面刚度损失的力学模型,并针对非连续转子系统的动力学设计,提出了基于应变能分布优化的连接结构刚度损失抑制方法。数值仿真结果表明:转子弯曲变形下,连接界面刚度损失显著,会使转子弯曲临界转速大幅降低;通过转子应变能分布优化设计可有效降低连接界面刚度损失对转子系统振动特性的影响,对转子系统振动特性优化设计具有重要的指导意义。

**关键词:** 连接界面; 刚度损失; 结构非连续性; 转子系统; 振动特性; 应变能

**中图分类号:** V231.96

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5965(2019)01-0018-08

现代航空发动机为了控制结构质量在总体布局上采取了多种措施。涡轴发动机为减少支点和承力框架,多采用涡轮级间共用承力框架,使得燃气发生器转子多采用1-0-1大跨度支承方案。高转速大跨度的燃气发生器转子的工作转速位于多阶临界转速以上,且最大工作转速靠近弯曲临界,在工作过程中会产生一定的弯曲变形,为准刚性转子<sup>[1]</sup>。

由于材料及加工、装配的限制,转子中存在各种连接结构,如止口、端齿等。转子弯曲变形会造成连接结构连接界面间产生应力分布急剧变化或相对位移,导致转子弯曲刚度降低,这是造成转子振动过大的隐患<sup>[2]</sup>。因此,对于高转速的准刚性转子系统,必须考虑弯曲变形时连接界面对振动特性的影响。

早期转子动力学分析中通常忽略连接结构的动力学效果<sup>[3,4]</sup>,但带连接界面的非连续转子系

统的振动特性具有一些不同的特点,近年来国内外学者在连接结构对转子系统振动特性的影响方面已开展了大量的研究工作。目前,转子动力学分析中考虑连接结构刚度特性的方法主要包括等效弹簧法<sup>[5,9]</sup>、虚拟材料法<sup>[10-12]</sup>和修正刚度矩阵法<sup>[13-14]</sup>等。等效弹簧法是采用弹簧元件等效表征界面刚度特性。Hartwigsen<sup>[5]</sup>和Song<sup>[6]</sup>等通过瞬态激励试验得到螺栓连接梁响应,从中识别界面力学参数,并与整体构件的矩阵进行组集构成系统的动力学方程;Link等<sup>[7]</sup>为考虑界面的非线性特性,引入非线性弹簧,非线性弹簧刚度由基础激励试验获得,采用类似方法植入系统的动力学方程中;Luan等<sup>[8]</sup>采用双线性弹簧描述连接界面轴向拉压刚度特性,分析了拉压刚度不对称对结构轴向响应的影响;Gao等<sup>[9]</sup>将界面等效为铰链和角向弹簧的组合,建立了应变能与角向弹簧刚度之间的关系。虚拟材料法借助薄层单元在有限

收稿日期: 2018-04-23; 录用日期: 2018-07-28; 网络出版时间: 2018-08-21 13:22

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180819.1328.001.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180819.1328.001.html)

基金项目: 国家自然科学基金(51575022,11672017)

\* 通信作者: E-mail: mayanh2002@163.com

**引用格式:** 洪杰, 徐翕如, 苏志敏, 等. 高速转子连接结构刚度损失及振动特性[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 18-25.  
HONG J, XU X R, SU Z M, et al. Joint stiffness loss and vibration characteristics of high-speed rotor[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 18-25 (in Chinese).

元模型中模化连接特性。Iranzad 和 Ahmadian<sup>[10]</sup> 基于弹塑性薄层单元有效模拟了螺栓连接界面由完全接触到产生微滑移以及宏滑移的变化过程;姚星宇等<sup>[11-12]</sup> 基于分布式薄层单元法研究了结构参数与载荷对连接刚度的影响。修正刚度矩阵法将界面作为一个特殊截面,通过修正连接界面处的抗弯刚度考虑界面对结构刚度的影响。Caddemi 等<sup>[13]</sup> 采用奇异点描述连接结构弯曲刚度的阶跃特征;卢明剑等<sup>[14]</sup> 基于 Riccati 传递矩阵,引入接触修正系数、预紧修正系数和拉杆修正系数,对拉杆转子接触轴段的刚度矩阵进行修正,研究了非连续拉杆组合转子的动力学特征。

根据上述已有研究可知,目前研究中多借助轴向拉压刚度及角向刚度描述连接界面刚度特性,而界面作为一个特殊截面,对其等效抗弯刚度与载荷环境及转子力学特性间的交互影响缺乏研究。本文基于连接界面的力学特性,建立了连接界面刚度损失模型,分析了刚度损失产生机理。针对非连续转子系统动力学设计,提出了基于应变能分布优化的刚度损失抑制方法,为高转速准刚性转子系统的动力学优化设计提供参考。

## 1 带连接界面的转子结构力学特征

### 1.1 转子结构非连续性

图 1 为先进涡轴发动机结构。燃气发生器转子采用 1-0-1 支承方案,转子长径比约为 13,整体弯曲刚性较弱,导致转子工作转速靠近弯曲临界,在工作过程中会产生弯曲变形。由于结构功能和质量的限制,转子结构由不同材料通过连接结构形成组合体,转子结构特征参数(几何尺寸、材料性质)在连接界面处产生突变,进而造成力学特征参数(刚度、阻尼)及其分布产生阶跃,具有非连续特征。

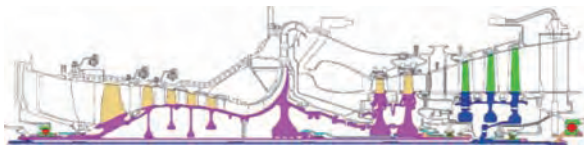


图 1 先进涡轴发动机

Fig. 1 Advanced turboshaft engine

### 1.2 连接界面刚度特性

航空发动机转子中的连接结构(如止口、螺栓等),均为多个构件在预紧力  $F$  作用下通过连接界面连接形成的非连续结构,在工作过程中需承受弯曲载荷。如图 2 所示,以带有连接界面的非连续鼓筒结构为例,研究弯曲变形下连接界面

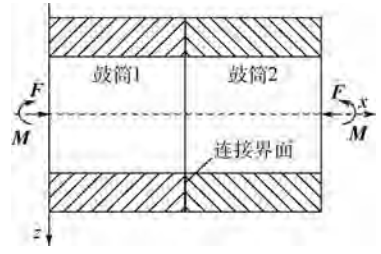


图 2 带连接界面的非连续结构

Fig. 2 Discontinuous structure with joint interfaces

的刚度特性。

上述问题为空间轴对称问题,可采用位移函数法进行求解。基于弯曲载荷  $M$  作用下,端面切应力沿鼓筒厚度方向按抛物线形式分布,提出如下位移假设:

$$\begin{cases} u(x, z) = \alpha'(x)z - \frac{\beta'(x)z^3}{3} + \frac{Fx}{EA} \\ w(x, z) = \alpha(x) + B^2\beta(x) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u(x, z)$  和  $w(x, z)$  分别为对应  $x, z$  坐标下的轴向位移和径向位移; $\alpha, \beta$  为与鼓筒结构参数有关的函数; $A$  为鼓筒的横截面积; $B$  为与鼓筒结构参数有关的常数; $E$  为材料弹性模量。

进一步根据几何关系得到

$$\begin{cases} \gamma_{yz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = 2\alpha'(x) + \beta'(x)(B^2 - z^2) \\ \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \alpha''(x)z - \frac{z^3\beta''(x)}{3} + \frac{F}{EA} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\gamma_{yz}$  为连接界面处切应变; $\varepsilon_x$  为连接界面处正应变。故连接界面处应力分布为

$$\begin{cases} \tau_{yz} = G[2\alpha'(x) + \beta'(x)(B^2 - z^2)] \\ \sigma_x = \begin{cases} E\left(\alpha''(x)z - \frac{z^3\beta''(x)}{3} + \frac{F}{EA}\right) & \varepsilon_x > 0 \\ 0 & \varepsilon_x < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\tau_{yz}$  为连接界面处切应力; $\sigma_x$  为连接界面处正应力; $G$  为材料剪切模量。

由式(3)可知,在弯曲载荷作用下,弯曲拉应力大于预紧压应力的区域上,界面间将失去力的相互作用,因此连接界面上的应力分布与外载荷密切相关且呈现非连续特征。连接界面刚度特性不仅与结构特征参数有关,同时也受到配合参数和载荷参数的影响。

## 2 转子连接结构刚度损失模型

由于连接界面只能承受压力而不能承受拉力,在外载荷作用下其力学特征表现为:界面有效接触面积不连续,界面应力分布非线性,界面间转

角不连续,使得连接界面处产生抗弯刚度损失。通过建立考虑这三方面的力学模型,采用刚度综合修正系数  $\eta$  定量描述刚度损失,综合修正系数由3个修正系数相乘得到

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \quad (4)$$

### 2.1 界面接触面积修正系数

以2个具有不同刚度特性的弹性构件间存在连接界面为例,通过施加预紧力  $F$  确定构件间的相对位置,并使连接界面间产生接触作用,如图3所示。预紧力作用下,若有效接触面积  $mn$  小于界面总面积,会导致界面等效抗弯刚度减小,产生刚度损失。

可根据连接界面有效接触面积的抗弯刚度对界面刚度进行修正。界面抗弯刚度可通过  $EI$  的乘积来表示( $I$ 为惯性矩)。定义界面接触面积修正系数  $\eta_1$  为有效接触面积的抗弯刚度  $EI'$  与界面总面积的抗弯刚度  $EI$  之比,即

$$\eta_1 = \frac{EI'}{EI} \quad (5)$$



图3 连接界面有效接触面积示意图  
Fig.3 Schematic of effective contact area of joint interface

### 2.2 界面应力修正系数

由于连接界面仅传递压力,界面压应力的大小反映了连接界面提供约束的能力,进而反映了连接界面的刚度特性。

对于连接界面,由于应力与外载荷和界面接触状态等多种因素间存在交互的力学关系,弯曲载荷作用下连续界面上的应力多呈非线性分布,如图4(a)所示。假设初始状态下轴向预紧力  $F$  在有效接触面积  $\Omega$  上产生均匀的正应力,且弯矩作用下连接界面有效接触面积保持不变。

假设在弯曲载荷作用下界面正应力与到中性轴的距离  $y$  呈二次曲线关系,即

$$\sigma_x = \begin{cases} \frac{F}{\Omega} + ay^2 & y > 0 \\ \frac{F}{\Omega} - ay^2 & y < 0 \end{cases} \quad (6)$$

根据连接界面弯矩平衡方程:

$$\int_{\Omega} \sigma_x y ds = M \quad (7)$$

式中:  $ds$  为连接界面上的面积微元。

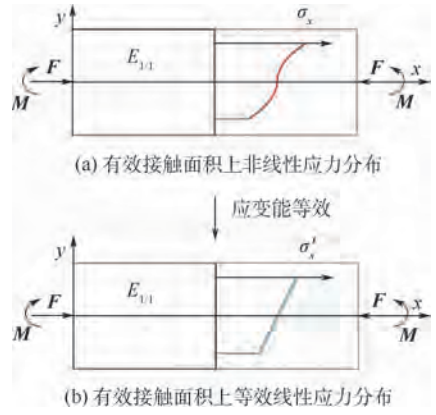


图4 连接界面应力等效模型

Fig.4 Stress equivalent model of joint interface

求得系数  $a$ :

$$a = \frac{M}{f(m, n)} \quad (8)$$

式中:  $f(m, n)$  为通过有效接触面积几何参数表示的函数。

为定量描述弯曲载荷作用下连接界面的抗弯刚度,可将连接界面非线性应力分布按照应变能相等的原则等效为线性应力分布,如图4(b)所示。

用正应力表示的连接界面总应变能为

$$V_e = \int_{\Omega} v_e ds = \frac{1}{2E} \int_{\Omega} \sigma_x^2 ds \quad (9)$$

式中:  $v_e$  为每个面积微元上的应变能。

假设等效的线性分布  $\sigma'_x$  的表达式为

$$\sigma'_x = \frac{M}{I''} y + \frac{F}{\Omega} \quad (10)$$

根据应变能相等的等效原则:

$$V_e = \frac{1}{2E} \int_{\Omega} \sigma_x^2 ds = \frac{1}{2E} \int_{\Omega} \sigma_x'^2 ds \quad (11)$$

可求得连接界面在弯曲载荷作用下的等效惯性矩  $I''$ 。定义在弯曲载荷作用下等效抗弯刚度  $EI''$  与在初始状态下连接界面的抗弯刚度  $EI'$  之比为界面应力修正系数,表达式为

$$\eta_2 = \frac{EI''}{EI'} \quad (12)$$

由上述分析可知,连接界面在弯曲载荷作用下应力呈非线性分布,界面的等效抗弯刚度降低,是产生刚度损失的原因之一。

### 2.3 界面弯曲变形修正系数

在弯曲载荷作用下,连接界面上应力呈非线性分布,当界面只产生弹性形变时,由胡克定律可知,界面上的应变也呈非线性分布,即非连续结构在弯曲变形时连接界面变为曲面,如图5(a)所示。

根据界面应力修正系数,将连接界面的应力分布等效为线性分布,即将弯曲变形后变为曲面

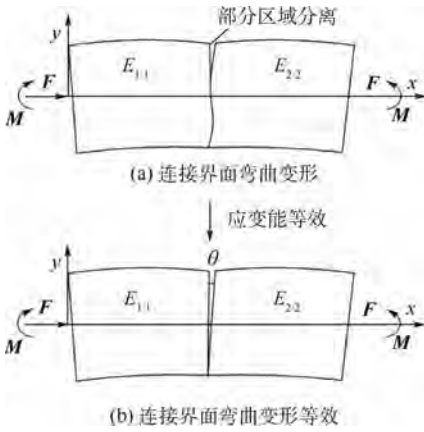


图 5 非连续结构转角不连续示意图

Fig.5 Schematic of discontinuous rotation of discontinuous structure

的连接界面等效为平面,如图 5(b)所示。当连接界面间部分区域在弯曲载荷作用下发生分离时,等效后连接界面间将会产生相对转角  $\theta$ 。

非连续结构在受弯曲载荷时连接界面部分区域分离导致的界面间产生相对转角是造成非连续结构弯曲刚度损失的原因之一。在工程实际中,可通过有效接触面积(黏滞区域和滑移区域面积总和)对界面间相对转角进行定量分析,即定义界面弯曲变形修正系数为在弯曲载荷作用下界面有效接触面积与无弯曲载荷作用下界面有效接触面积之比。界面弯曲变形修正系数反映了连接界面间相对转角对非连续结构弯曲角变形的影响。

综上,连接界面在弯曲载荷作用下,有效接触面积及受力状态产生变化,约束失效,造成连接结构弯曲刚度损失,可通过有效接触面积、应力分布和界面弯曲变形这 3 方面的力学特征参数对其进行定量描述。

### 3 止口连接转子系统振动特性

对于高转速准刚性转子系统,若连接结构在工作循环中存在较大的弯曲变形,则应考虑连接结构刚度损失对转子系统振动特性的影响。应变能的大小可准确定量地反映结构的弯曲变形程度,因此可通过优化应变能分布,降低连接结构处的应变能,抑制连接结构处刚度损失及其对转子系统振动特性的影响。

图 6 为三级轴流压气机试验器转子结构。转子采用大跨度支承,并带有多个止口连接结构,转子最大工作转速为 40 000 r/min。在 ANSYS 中,采用实体单元 SOLID185 模拟转子结构,弹簧单元 COMBIN14 模拟前后支点,假定各连接界面为刚性连接,建立转子整体模型,共计 206 437 个单

元。在不考虑转子结构非连续性所产生的弯曲刚度损失时,其弯曲临界转速为 55 020 r/min,共振安全裕度约为 37%。

由图 7 中转子弯曲振型及应变能分布可知,转子弯曲变形下,止口连接结构附近应变能较大,刚度损失的影响不可忽视。

弯曲振型下各连接结构应变能占比如表 1 所示。各连接结构处均具有一定的弯曲变形,其中转接盘与后轴颈间止口 D 应变能占比最高,弯曲变形程度较大,该止口处的刚度损失最为显著。

进一步建立带连接界面的转子模型,分析弯曲载荷对界面刚度特性的影响。中心拉杆的轴向变形对转子产生预紧作用,因预紧力的大小与转子载荷环境有关,本文采用设置接触面初始偏移位移的方式施加预紧力。经计算,图 6 中部螺母 M 处接触面初始偏移量为 1.5 mm 时,预紧力近似为 120 000 N;在压气机转子压紧的基础上,后部螺母 N 处接触面初始偏移量为 1.2 mm 时,预紧力近似为 80 000 N。仿真得到装配状态下止口 D 连接界面接触状态如图 8(a)所示,采用上述刚度损失计算方法,得到界面接触面积修正系数(见表 2);对转子施加最大工作转速,并将转子质

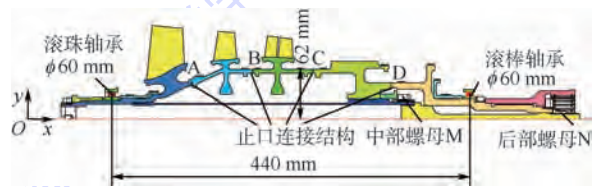


图 6 三级轴流压气机试验器转子结构

Fig.6 Rotor structure of three-stage axial compressor tester

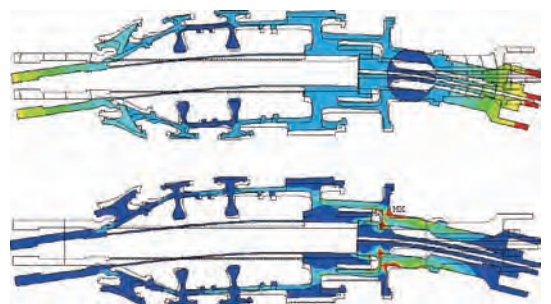


图 7 弯曲振型及其应变能分布

Fig.7 Bending mode of vibration and its strain energy distribution

表 1 弯曲振型下连接结构应变能占比

Table 1 Ratio of strain energy of joint structure under bending mode of vibration					%
连接结构	止口 A	止口 B	止口 C	止口 D	
应变能占比	0.7	1.1	1.8	2.9	

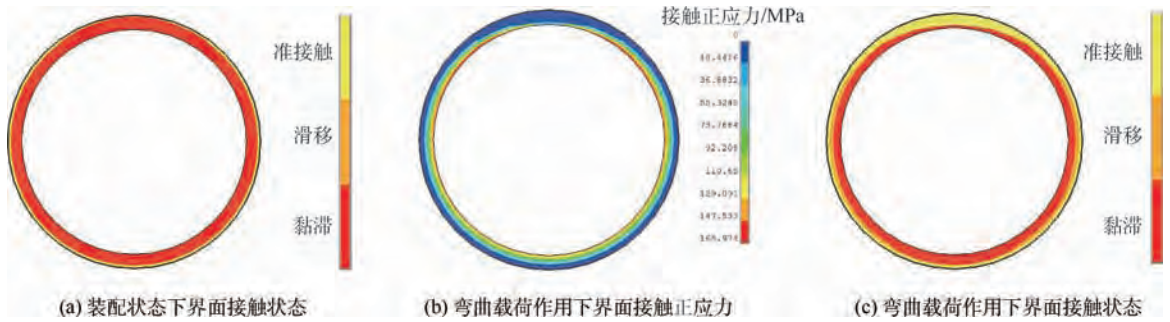


图8 连接界面接触状态及接触正应力

Fig. 8 Joint interface contact state and contact normal stress

心所在截面的  $y$  方向位移进行耦合,并施加 1 000 N 的  $y$  方向载荷,作为模拟高负荷转子弯曲变形状态的等效横向载荷。连接界面接触应力和接触状态如图 8(b)、(c) 所示,界面应力修正系数和弯曲变形修正系数如表 3 和表 4 所示。

根据式(4)可求得界面刚度综合修正系数为 0.40。结果表明:在弯曲变形下,连接结构处刚度显著降低。根据应变能占比对转子不同位置连接结构刚度综合修正系数进行估算,结果如表 5 所示。

结构弯曲刚度由其各截面抗弯刚度  $EI$  所决定,为了便于将连接结构的弯曲刚度损失组集到转子系统的动力学模型中,本文采用修正弹性模量的方法,即不改变结构几何特征( $I$  不变),同时连接界面处设为固接,与转子整体模型共同进行

表 2 界面接触面积修正系数

Table 2 Interfacial contact area correction coefficient

界面总面积的抗弯刚度 $EI/(\text{Pa} \cdot \text{mm}^4)$	有效接触面积抗弯刚度 $EI'/(\text{Pa} \cdot \text{mm}^4)$	界面接触面积修正系数 $\eta_1$
$1.5 \times 10^4$	$0.82 \times 10^4$	0.55

表 3 界面应力修正系数

Table 3 Interfacial stress correction coefficient

等效线性应力分布	等效抗弯刚度 $EI''/(\text{Pa} \cdot \text{mm}^4)$	界面应力修正系数 $\eta_2$
$\sigma'_x = 1.19 \times 10^4 y + 5.16$	$0.72 \times 10^4$	0.88

表 4 界面弯曲变形修正系数

Table 4 Interfacial bending deformation correction coefficient

受力状态	有效接触面积/ $\text{mm}^2$	界面弯曲变形修正系数 $\eta_3$
装配状态	1 170.7	
弯曲变形	956.2	0.82

表 5 各连接结构刚度综合修正系数

Table 5 Comprehensive correction coefficient of stiffness for different joint structures

连接结构	止口 A	止口 B	止口 C	止口 D
刚度综合修正系数	0.86	0.77	0.63	0.40

网格划分,并根据刚度综合修正系数降低连接结构局部材料弹性模量  $E$ 。该方法可较好地模拟连接结构刚度损失的局部特征。

选择修正区域的方法为:在弯曲载荷作用下,采用刚度修正模型计算得到的结构变形特征与采用接触模型的计算结果基本一致,具有相似变形弹性线,即可认为修正区域选择合理。若出现变形特征不一致情况,则应适当增大或减小修正区域,直至修正前后变形特性相近,如图 9 所示。

表 6 给出了连接结构刚度损失对转子系统振动特性影响的计算结果。结果表明,连接结构刚度损失对平动和俯仰临界转速影响较小,对弯曲

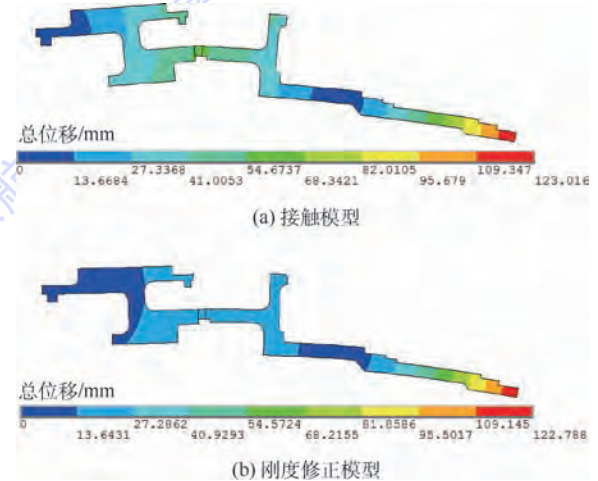


图 9 接触模型与刚度修正模型变形总位移云图

Fig. 9 Contour of total displacement deformation of contact model and stiffness correction model

表 6 刚度损失对转子系统临界转速的影响

Table 6 Effect of stiffness loss on critical speed of rotor system

振型	临界转速/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$		考虑刚度损失后 临界转速下降比例/%
	不考虑刚度损失	考虑刚度损失	
平动	8 640	8 460	2
俯仰	16 140	15 720	3
弯曲	55 020	42 915	22

临界转速影响较大。考虑连接结构刚度损失后,转子弯曲临界转速下降约 22%,共振安全裕度降低至 7%。

为抑制连接结构刚度损失及其对转子弯曲振型临界转速的影响,应降低弯曲振型下连接结构处应变能。根据转子系统振动特性与支承刚度的相关性<sup>[15-16]</sup>,可调整支承刚度以优化应变能分布及弯曲临界转速。图 10 给出了前支点支承刚度的变化对连接结构应变能的影响。由于前支点远离转子弯曲振型的节点,连接结构应变能对该支承刚度的变化较为敏感。

由图 10 可知,将前支点支承刚度由  $1 \times 10^7$  N/m (设计值)调整为  $3 \times 10^7$  N/m 后,连接结构处的应变能总和降低 20%。对于工程中常用的鼠笼式弹性支承,通过增加筋条数目或增大筋条厚度可使支承刚度提高。将前支点刚度调整为  $3 \times 10^7$  N/m,按相同方法得到优化后连接结构刚度损失对转子系统振动特性的影响,如表 7 所示。

结果表明,通过将转子连接结构应变能占比降低 20%,降低了刚度损失对转子系统弯曲临界转速的影响,共振安全裕度提高至 36%。为保证

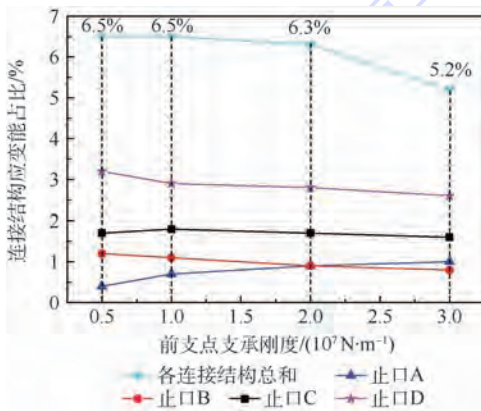


图 10 弯曲振型下连接结构应变能随前支点支承刚度的变化

Fig. 10 Variation of strain energy of joint structure with support stiffness of front bearing under bending mode of vibration

表 7 优化后刚度损失对转子系统临界转速的影响

Table 7 Effect of stiffness loss on critical speed of rotor system after optimization

振型	临界转速/( $r \cdot \min^{-1}$ )		考虑刚度损失后 临界转速下降比例/%
	不考虑刚度 损失	考虑刚度 损失	
平动	9 745	9 581	2
俯仰	18 086	17 728	2
弯曲	62 564	54 436	13

具有多个连接界面的高转速准刚性转子振动特性较优,通过调整支承刚度对转子弯曲振型下应变能分布进行优化设计,降低连接结构处应变能,可有效抑制弯曲变形下连接结构处的刚度损失,降低转子弯曲临界转速对刚度损失的敏感度,保证转子系统振动特性的稳健性。

## 4 结 论

通过理论与仿真分析,本文得到主要结论如下:

1) 对于高转速准刚性转子系统,由于转子结构弯曲刚度较低,在工作中容易产生弯曲变形,在弯曲变形下,转子连接结构处会产生弯曲刚度损失,进而对转子系统振动特性产生影响。

2) 分析了连接结构刚度损失的产生机理。转子产生弯曲变形时,连接界面间由于有效接触面积和受力状态的变化,会产生约束失效,造成连接结构刚度损失。可通过连接界面的有效接触面积、应力分布和界面弯曲变形这 3 方面的力学特征参数对其进行定量描述。

3) 为带连接界面的高转速转子系统振动特性优化设计提供了参考。连接结构刚度损失会导致转子弯曲临界转速大幅降低。为有效抑制连接结构处刚度损失,可通过调整支承刚度,对转子应变能分布进行优化设计,降低连接结构处应变能,使转子弯曲临界转速对刚度损失不敏感,保证转子系统振动特性的稳健性。

后续将开展高速转子连接结构刚度损失对转子振动特性影响的试验研究。

## 参考文献 (References)

[1] 李松柏. 小型挠性转子(准刚性转子)动平衡的工艺分析[J]. 南方航空科技, 1994(1): 22-25.  
LI S B. Process study of dynamic balance of small flexible rotor (quasi-rigid rotor)[J]. Southern Aeronautics Technology, 1994 (1): 22-25 (in Chinese).

[2] IBRAHIM R A, PETTIT C L. Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 279(3): 857-936.

[3] 陈萌, 马艳红, 刘书国, 等. 航空发动机整机有限元模型转子动力学分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(9): 1013-1016.  
CHEN M, MA Y H, LIU S G, et al. Rotordynamic analysis of whole aero-engine models based on finite element method[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(9): 1013-1016 (in Chinese).

[4] 谢强. 转子活塞发动机动力学特性研究与分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013: 36-38.

- XIE Q. The dynamic characteristics research and analysis of the rotor engine [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013:36-38 (in Chinese).
- [5] HARTWIGSEN C J, SONG Y, MCFARLAND D M, et al. Experimental study of non-linear effects in a typical shear lap joint configuration [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 277(1-2):327-351.
- [6] SONG Y, HARTWIGSEN C J, MCFARLAND D M, et al. Simulation of dynamics of beam structures with bolted joints using adjusted Iwan beam elements [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 273(1-2):249-276.
- [7] LINK M, BOESWALD M, LABORDE S, et al. An approach to non-linear experimental modal analysis [C] // Proceedings of the IMAC-XXVII, 2011:119-128.
- [8] LUAN Y, GUAN Z Q, CHENG G D, et al. A simplified nonlinear dynamic model for the analysis of pipe structures with bolted flange joints [J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 331(2):325-344.
- [9] GAO J, YUAN Q, LI P, et al. Effects of bending moments and pretightening forces on the flexural stiffness of contact interfaces in rod-fastened rotors [J]. Proceedings of the ASME Turbo Expo, 2012, 134(10):1492-1494.
- [10] IRANZAD M, AHMADIAN H. Identification of nonlinear bolted lap joint models [J]. Computers & Structures, 2012, 96-97(4):1-8.
- [11] 姚星宇, 王建军, 翟学. 航空发动机螺栓连接薄层单元建模方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(12):2269-2279.  
YAO X Y, WANG J J, ZHAI X. Modeling method of bolted joints of aero engine based on thin-layer element [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(12):2269-2279 (in Chinese).
- [12] 姚星宇, 王建军. 航空发动机螺栓连接载荷与结构参数对接刚度影响规律 [J]. 推进技术, 2017, 38(2):424-433.
- YAO X Y, WANG J J. Effects of load and structure parameters of aero engine bolted joints on joint stiffness [J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(2):424-433 (in Chinese).
- [13] CADDEMI S, CALIO I, CANNIZZARO F. Closed-form solutions for stepped Timoshenko beams with internal singularities and along-axis external supports [J]. Archive of Applied Mechanics, 2013, 83(4):559-577.
- [14] 卢明剑, 孙岩桦, 周健, 等. 拉杆组合转子的刚度修正及动力学建模 [J]. 航空动力学报, 2016, 31(9):2203-2209.  
LU M J, SUN Y H, ZHOU J, et al. Stiffness modification and dynamic modeling of a rod fastening rotor [J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(9):2203-2209 (in Chinese).
- [15] 凤朝军. 新式支承布局反向旋转双转子系统动力特性研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2016:15-20.  
FENG C J. The research of the dynamic characteristics of the new bearing layout counter-rotating dual-rotor system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016:15-20 (in Chinese).
- [16] 史亚杰, 王孝利, 洪杰, 等. 柔性转子动力特性研究 [J]. 航空发动机, 2005, 31(1):14-17.  
SHI Y J, WANG X L, HONG J, et al. Investigation of dynamic characteristics of flexible rotor system [J]. Aeroengine, 2005, 31(1):14-17 (in Chinese).

#### 作者简介:

**洪杰** 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 航空发动机转子动力学、航空发动机整机动力学、智能结构与新型阻尼材料等。

**马艳红** 女, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 航空发动机整机动力学、旋转机械振动控制、智能结构与新型阻尼材料等。

## Joint stiffness loss and vibration characteristics of high-speed rotor

HONG Jie<sup>1,2</sup>, XU Xiru<sup>1</sup>, SU Zhimin<sup>3</sup>, MA Yanhong<sup>1,2,\*</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China;

2. Collaborative Innovation Center of Advanced Aero-Engine, Beijing 100083, China;

3. AECC China Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

**Abstract:** To achieve high loading and light weight, the speed and the support span of aero-engine rotor continue to increase, which leads to the degradation of rotor bending stiffness and the bending deformation of the rotor. There will be bending stiffness loss at interfaces when the rotor has bending deformation. It is necessary to consider the effect of rotor bending deformation on joint interface stiffness characteristics and rotor system's vibration characteristics. A mechanical model for quantitatively describing the stiffness loss mechanism at the interface was proposed. For the dynamic design of discontinuous rotor system, the method for reduction of stiffness loss based on the strain energy distribution optimization was proposed. The numerical simulation results show that for large-span discontinuous rotor system, the stiffness loss is significant with bending deformation, which will greatly reduce the critical speed of the rotor. The sensitivity of rotor vibration characteristics to the stiffness loss can be controlled by optimizing the strain energy distribution of rotor. This method has important guiding significance for the optimal design of rotor vibration characteristics.

**Keywords:** joint interface; stiffness loss; discontinuous structure; rotor system; vibration characteristics; strain energy

**Received:** 2018-04-23; **Accepted:** 2018-07-28; **Published online:** 2018-08-21 13:22

**URL:** [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180819.1328.001.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180819.1328.001.html)

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (51575022,11672017)

\* **Corresponding author.** E-mail: mayanh2002@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0259

# 基于双层 $K$ 近邻算法航站楼短时客流量预测

邢志伟<sup>1,2</sup>, 何川<sup>1,2</sup>, 罗谦<sup>2,3,\*</sup>, 蒋祥枫<sup>2</sup>, 刘畅<sup>2</sup>, 丛婉<sup>2</sup>

(1. 中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300; 2. 中国民用航空局第二研究所, 成都 610041;  
3. 民航成都信息技术有限责任公司, 成都 611430)



**摘 要:** 航站楼离港客流量在短时期内呈现准周期性规律变化, 易受航班计划、天气等多种因素影响, 表现出复杂的非线性特点。为了实现航站楼短时客流量的准确预测, 在传统  $K$  近邻 (KNN) 算法基础上增加了航班计划状态模式匹配方法, 以航班计划包含的多维属性作为特征选取相似历史运营日作为预测基准向量, 建立基于航站楼短时客流量预测的双层  $K$  近邻模型。通过实例分析, 与 ARIMA 模型和传统  $K$  近邻模型等进行比较, 证明双层  $K$  近邻模型预测误差更小, 精度更高, 模型拟合度相对传统  $K$  近邻模型提高了 8% ~ 10%, 为航站楼短时客流量精确预测提供了一种新的解决思路。

**关键词:** 航站楼客流量; 短时预测; 模式匹配; 预测模型; 双层  $K$  近邻

**中图分类号:** F562

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5965(2019)01-0026-09

近年来中国民航业高速发展, 民航旅客运输量逐年递增, 2016 年全国旅客吞吐量首次突破 10 亿人次, 比 2015 年增长 11.1%。航站楼传统的资源配置方式已不能满足机场客流量增长的需求。全国各大机场不同程度地出现了旅客排队时间长、旅客服务质量下降等现象。国内外学者力图通过研究航站楼旅客服务流程优化与航站楼资源配置优化问题来提高旅客服务效率与质量。其中, 航站楼客流量预测是航站楼旅客服务流程优化的关键核心问题, 其预测精度的高低直接影响了上述难题的破解效果。

Grosche 等<sup>[1]</sup>采用重力学模型方法, 将经济增长趋势与机场吞吐量相结合, 建立了相关联的机场吞吐量重力学模型, 该模型能对新建机场及已建机场的吞吐量做出较为准确的预测。Letavkova 等<sup>[2]</sup>结合小波变换和时间序列模型提出了一个

机场吞吐量预测新方法, 很好地预测了奥斯特拉瓦和蒙特利尔机场的旅客流量。黄飞虎等<sup>[3]</sup>利用民航旅客订座数据分析了航空旅客群体移动的特性, 发现吞吐量具有一定的周期性, 易受节假日的影响, 且与其相互通航的城市数量有很大关系。上述研究都属于机场宏观客流量的预测范畴, 其颗粒度较大, 无法指导机场每天甚至每小时资源精细化的配置。在微观客流量预测方面, Ashford 和 Ndoh<sup>[4]</sup>提出了一种基于概率密度函数的航站楼短时客流量预测方法, 证明离港旅客从出发到抵达航站楼的行程时间是随机变量, 该方法需建立概率密度函数, 花费大量时间确定与调节参数。Kim 等<sup>[5]</sup>将离港旅客到达航站楼的行程时间按长短分为 12 个组, 12 个概率密度函数分别属于正态或 Pearson Type III 分布, 从而计算出不同目标时刻航站楼离港旅客数量, 该方法在旅

收稿日期: 2018-05-07; 录用日期: 2018-07-28; 网络出版时间: 2018-08-22 20:29

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180821.1108.002.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180821.1108.002.html)

基金项目: 国家自然科学基金 (U1533203); 民航安全能力建设资金 (FDSA0032); 四川省科技支撑计划 (2016GZ0068); 成都市战略性新兴产业产品研发补贴项目 (2015-CP01-00158-GX)

\* 通信作者. E-mail: luoqian@caacetc.com

**引用格式:** 邢志伟, 何川, 罗谦, 等. 基于双层  $K$  近邻算法航站楼短时客流量预测 [J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45 (1): 26-34. XING Z W, HE C, LUO Q, et al. Terminal building short-term passenger flow forecast based on two-tier  $K$ -nearest neighbor algorithm [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45 (1): 26-34 (in Chinese).

客到达人数少的情况下预测精度不高。邢志伟等<sup>[6-7]</sup>从人类行为动力学出发,以单航班离港旅客为研究对象,证明了单航班离港旅客抵达航站楼受航班离港时刻驱动对泊松特性的偏离且服从重尾分布,但仅以单航班作为研究对象,若将单航班客流量叠加预测多航班客流量,则会造成较大误差,对误差修正需花费大量时间。针对非线性时间序列的预测,田中大、李树江等<sup>[8-12]</sup>采用组合预测法,成功对混沌时间序列<sup>[8]</sup>、风速<sup>[9]</sup>、网络流量<sup>[10-12]</sup>进行预测,并取得了良好的预测效果。受此启发,本文拟借鉴组合预测思想研究航站楼短时客流量预测问题。由于航站楼短时客流量受如航班计划、天气等多种因素的影响呈现出复杂的非线性特点,基于确定数学模型的预测方法在模型构建和求解上都存在困难,同时,这类方法参数调整上需花费大量时间,难以满足航站楼资源配置优化实时性的需要。 $K$  近邻算法( $K$ -Nearest Neighbor, KNN)<sup>[13-14]</sup>是另一类无数学模型的预测算法,不需要任何的先验知识,其具备良好的移植与数据挖掘性能,新的数据可以方便地加入到模型中,符合航站楼短时客流量复杂的非线性特点。

但传统  $K$  近邻算法在预测场景中的精度并不高,多数学者针对不同预测场景做了相应的算法改进<sup>[15-20]</sup>,并取得了良好的预测效果。受文献[3,7,21]研究启发,具有相似航班计划的运营日,同一个目标时刻上的客流量变化波动具有相似的特征,以相似特征日作为基准向量用  $K$  近邻算法进行预测,模型精度将会提高。

综上,为了有效应对航站楼短时客流量准确预测,本文在传统  $K$  近邻算法基础上增加了航班计划状态模式匹配步骤,选取具有航班计划特征的相似历史运营日作为预测基准向量,建立基于航站楼短时客流量预测的双层  $K$  近邻模型。通过实例分析,与 ARIMA 算法<sup>[12]</sup>和传统  $K$  近邻算法等进行比较,证明双层  $K$  近邻模型预测误差更小,精度更高,模型拟合度相对传统  $K$  近邻模型提高了 8%~10%,平均拟合度高达 90%,为机场资源的动态分配提供了指导性的意见。

## 1 $K$ 近邻模型

### 1.1 数据来源与算法构造

本文选取某航空公司离港旅客自助值机数据作为历史数据库。旅客进入航站楼后在完成值机、安检业务之前往往带有一定的焦虑心理,因此极少旅客会在值机之前在机场逗留。而自助值机

时间通常在 1 min 之内完成,且排队时间较短,因此可将自助值机时间近似看作旅客到达时间。

航站楼客流量预测分为短期、中期、长期,认为预测单位小于 1 天为短期预测,以天和周为预测单位为中期预测,以季度和年为预测单位为长期预测。根据实际业务情况,飞机起飞前 1 h 对航站楼值机柜台、安检口、登机口等资源的需求几乎已经确定,不能再更改,因此以 1 h 为预测时间间隔更具有实际意义,但为了进一步验证算法的鲁棒性,综合考虑,选择更小的 30 min 为时间间隔。

选取 2016-03-26—2016-10-26 期间旅客自助值机数据,将测试数据与预测数据之前的数据作为历史数据库,以 30 min 为间隔,一天分为 48 个时段。建立异常数据识别标准,对必要冗余数据剔除,这样便完成了历史数据库的建立。

构建大容量且包含了客流量变化趋势和典型规律历史数据库后,再设定  $K$  近邻非参数回归模型中状态向量、距离度量准则、近邻  $K$  值的取值及预测算法等相关要素,从历史数据库中找到与预测日相匹配的近邻。

通过上述相关要素近邻匹配,假设在历史数据库中找出  $K$  个近邻,实际数据和这  $K$  个近邻的距离为  $d_i$  ( $i=1,2,\dots,K$ ),设  $p$  为客流量,则  $p(t)$  为第  $t$  时刻客流量, $p(t+1)$  为第  $t+1$  时刻客流量,这些近邻所对应的历史时刻航站楼旅客到达客流量为  $p_{hi}(t)$  ( $i=1,2,\dots,K$ )。再利用预测算法,便可得到预测日各个时段的客流量。

等权重的预测算法采用如下形式:

$$p(t) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K p_{hi}(t) \quad (1)$$

带权重的预测算法采用如下形式:

$$\begin{cases} p(t) = \sum_{i=1}^K \beta_i p_{hi}(t) \\ \beta_i = \frac{d_i^{-1}}{\sum_{i=1}^K d_i^{-1}} \end{cases} \quad (2)$$

采用带权重的预测算法认为距离小的近邻在预测值中占有更大的权重,该算法符合人们的一般认知,更能体现出航站楼旅客到达状况变化趋势,因此本文采取带权重的预测算法。该算法流程可以简要表述为图 1。

### 1.2 结果分析

在对  $K$  近邻模型的相关要素定义完成后,通过  $K$  近邻算法对预测日各个时段的客流量进行预测。随机抽取连续 5 天(2016-09-09—2016-09-

13)作为预测日,选择预测日的前一天作为预测基准向量,并选择相应基准向量前半部分运营日作为历史数据库,其中  $K=7$ ;选择3个评价指标:平均绝对误差 MAE、均方误差 MSE、拟合优度  $R^2$  来评价本文所有实验的预测精度,MAE、MSE 与  $R^2$  的定义式分别为

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (3)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4)$$

$$R^2 = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \right] \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $y_i$  为真实值;  $\hat{y}_i$  为预测值;  $\bar{y}$  为平均值。

预测精度评价指标如表 1 所示,其预测结果如图 2 所示。

从表 1 与图 2 可以看出,传统  $K$  近邻模型在机场场景中直接使用的缺点明显,预测精度变化波动较大,其中 2016-09-11—2016-09-13 这 3 日的预测精度相差了近 10%,说明其不具备良好的鲁棒性。这是因为传统  $K$  近邻模型单纯选择预测日的前一天作为预测基准向量,并没有考虑到影响旅客到达航站楼规律的因素。在机场项目中,影响旅客流量的主要因素有天气、航班计划、节假日、突发事件和机场周围交通状况。对于不

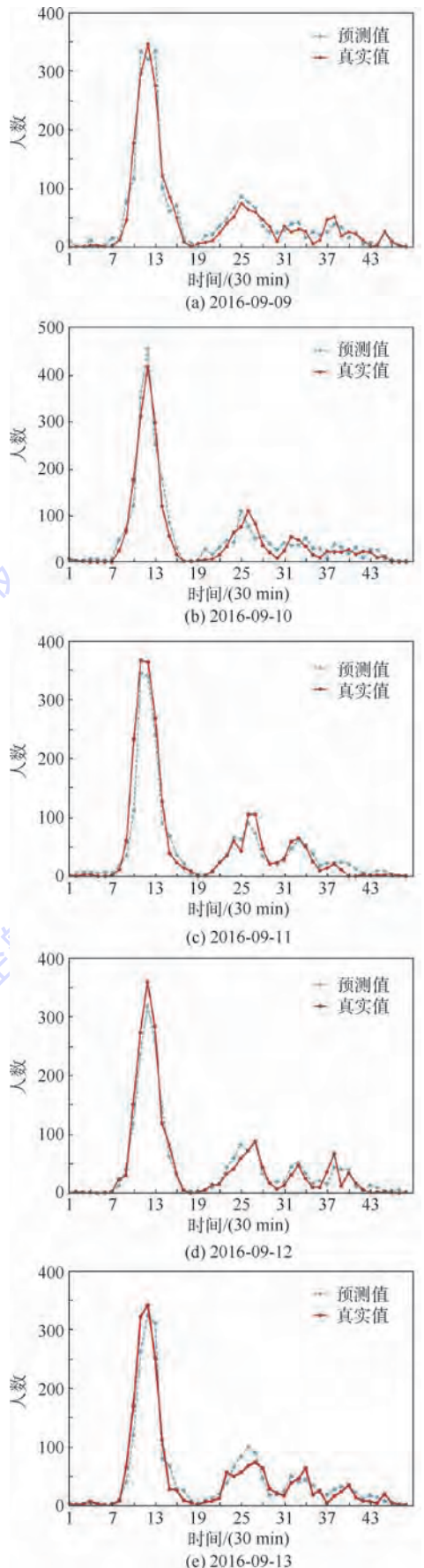


图 2  $K$  近邻模型预测值与真实值对比  
Fig. 2 Comparison of predictive value of KNN model with true value

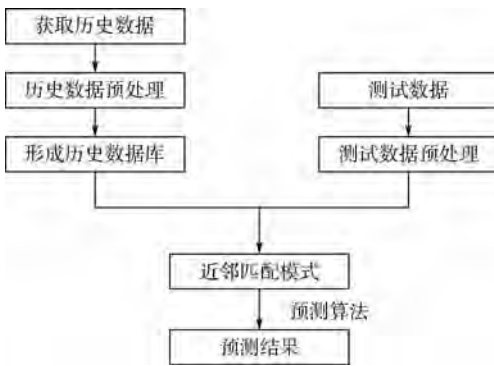


图 1  $K$  近邻算法流程

Fig. 1 Flowchart of KNN algorithm

表 1  $K$  近邻模型预测精度分析

Table 1 KNN model prediction accuracy analysis

日期	MSE	MAE	$R^2/\%$
2016-09-09	351.8930	11.4511	83.65
2016-09-10	386.6752	12.2549	82.33
2016-09-11	345.3651	10.9315	89.31
2016-09-12	342.4783	10.5472	89.54
2016-09-13	411.5792	13.3673	79.14

同的两日,若其特征因子差异过大,则两日中目标时刻上航站楼客流量大小也会有较大差异,从历史数据库中选取  $K$  个近邻日,利用加权平均得出短时客流量的预测值则会与预测日有较大的误差。综上,传统  $K$  近邻模型不适合在机场短时客流量预测场景中直接使用。

基于相似日的预测算法<sup>[21]</sup>起源于电力系统短期负荷预测,是电力负荷预测的基本方法之一。在电力系统短期负荷预测中,通常认为在气象状况、日类型等影响因素相似的 2 天,负荷也比较接近。若以历史上相似日为预测基准向量进行预测,再根据相似日的负荷加以修正,则可以很好地预测结果。

借鉴电力系统的预测方法,考虑各个运营日的特征属性,将历史运营日的特征与预测日的特征进行匹配,选取相似历史运营日内各个时刻客流量的测定序列作为训练序列来对预测日目标时

刻的客流量进行预测有望解决此难题。然而,如何确定一个运营日的特征属性及如何选取与预测日相似的历史运营日是一个关键的问题。

根据文献[7]可知,旅客出行受到航班离港时刻的强制约束,会在航班起飞前一段时间密集到达航站楼,旅客到达航站楼的绝大多数情况为早于航班起飞 1~2.5 h,离港航班量直接决定了航站楼旅客的聚集量。整个航站楼旅客的聚集可以看做是多个航班离港时刻约束条件下的结果,旅客聚集趋势与航班离港时刻直接相关。

综上所述,旅客行为从本质上来讲是由截止时间约束的群体行为,因此每个时段的航班计划是影响旅客航站楼聚集的重要因素。如图 3 所示, $t$  时段的旅客聚集人数是由后期时段的航班计划  $m_4$ 、 $m_5$ 、 $m_6$  影响。所以确定航班计划为一个运营日的特征属性,并通过航班计划特征属性来选取与预测日相似的历史运营日。

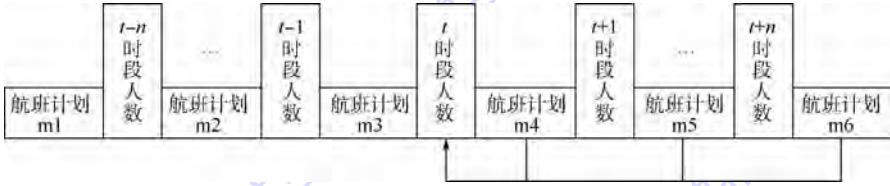


图 3 航班计划对旅客聚集量的影响

Fig. 3 Influence of flight schedule on arrived passenger number

## 2 改进 $K$ 近邻模型

### 2.1 双层 $K$ 近邻算法

通过第 1 节的分析,离港旅客的聚集行为由航班离港时刻即航班计划驱动。本节将选取航班计划为一个运营日的特征属性,在传统  $K$  近邻算法基础上增加航班计划状态模式匹配步骤,采取  $K$  最近邻法( $K=1$ )选取与预测日相似的历史运营日,并将选取相似历史运营日内各个时刻客流量的测定序列作为训练序列对预测日目标时刻的客流量进行预测。

**定义 1** 设在机场场景中,不同运营日一天中各个时段在相似的航班计划条件下为相似特征运营日。

**定义 2** 设  $\mathbf{X}(t)$  表示当前时段的状态向量,同时有相邻航班计划  $v(t)$  和相邻时段旅客流量  $p(t)$  两个指标,以此来表示数据特征。 $\mathbf{X}_h(t)$  表

示历史同一时段的状态向量,且近邻产生于历史同一时段。则状态向量可表示为

$$\mathbf{X}(t) = [v(t), v(t+1), p(t), p(t+1)]$$

$$\mathbf{X}_h(t) = [v_h(t), v_h(t+1), p_h(t), p_h(t+1)]$$

**定义 3** 设  $K$  为近邻个数; $R$  为历史数据状态向量的维数; $\mathbf{P}(t)$  为第  $t$  时段的客流量状态向量; $\mathbf{V}(t)$  为第  $t$  时段的航班计划状态向量; $d$  为两向量之间的欧氏距离。

历史客流量状态向量为

$$\mathbf{P}_{hi}(t) = [p_{hi}(t), p_{hi}(t+1), \dots, p_{hi}(t+n)]$$

$$i = 1, 2, \dots, R$$

历史航班计划状态向量为

$$\mathbf{V}_{hi}(t) = [v_{hi}(t), v_{hi}(t+1), \dots, v_{hi}(t+n)]$$

$$i = 1, 2, \dots, R$$

为了方便、直观地分析各时段客流量与航班计划,分别给出客流量状态矩阵及航班计划状态矩阵。

客流量状态矩阵为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_1(t) & p_2(t) & \dots & p_m(t) & \dots & p_R(t) \\ p_1(t+1) & p_2(t+1) & \dots & p_m(t+1) & \dots & p_R(t+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ p_1(t+n) & p_2(t+n) & \dots & p_m(t+n) & \dots & p_R(t+n) \end{bmatrix}$$

历史数据库中一共有  $R$  天的客流量数据,  $p_1(t)$  表示第一天  $t$  时刻的客流量, 则  $p_R(t)$  代表

第  $R$  天  $t$  时刻的客流量。  
航班计划状态矩阵为

$$V = \begin{bmatrix} v_1(t) & v_2(t) & \cdots & v_m(t) & \cdots & v_R(t) \\ v_1(t+1) & v_2(t+1) & \cdots & v_m(t+1) & \cdots & v_R(t+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ v_1(t+n) & v_2(t+n) & \cdots & v_m(t+n) & \cdots & v_R(t+n) \end{bmatrix}$$

历史数据库中一共有  $R$  天的航班计划数据,  $v_1(t)$  表示第一天  $t$  时刻的航班计划, 则  $v_R(t)$  代表第  $R$  天  $t$  时刻的航班计划。

在双层  $K$  近邻(T-KNN)客流量预测模型中, 先计算当前航班计划状态向量  $V(t)$  与历史状态向量  $V_{hi}(t)$  之间的度量距离, 即欧氏距离  $d_i$  为

$$d_i = \|V(t) - V_{hi}(t)\| = \sqrt{\sum_{i=1}^R (v(t) - v_{hi}(t))^2} \quad i = 1, 2, \dots, R \quad (6)$$

选择与预测日航班计划状态向量距离最小的一天, 设其航班计划状态向量为  $V_m(t) = [v_m(t), v_m(t+1), \dots, v_m(t+n)]$ , 则其对应的客流量状态向量为  $P_m(t) = [p_m(t), p_m(t+1), \dots, p_m(t+n)]$ , 并在历史航班计划状态矩阵及客流量状态矩阵中除去对应向量。再计算  $P_m(t)$  与历史客流量状态向量  $P_{hi}(t)$  之间的度量距离, 即欧氏距离  $d_i$  为

$$d_i = \|P_m(t) - P_{hi}(t)\| = \sqrt{\sum_{i=1}^{R-1} (p_m(t) - p_{hi}(t))^2} \quad i = 1, 2, \dots, R \quad (7)$$

按照距离从小到大排序, 并选择出  $K$  个最近历史客流量状态向量  $P_{hi}(t) = [p_{hi}(t), p_{hi}(t+1), \dots, p_{hi}(t+n)] (i=1, 2, \dots, K)$ 。再计算当前  $t$  时刻的客流量  $p_i(t)$ , 并作为预测值, 表达式为

$$\begin{cases} p(t) = \sum_{i=1}^K \beta_i p_{hi}(t) \\ \beta_i = \frac{d_i^{-1}}{\sum_{i=1}^K d_i^{-1}} \end{cases}$$

建立针对航站楼短时客流量预测的双层  $K$  近邻模型, 该模型具体步骤如下:

**步骤 1** 将旅客自助值机数据进行预处理, 通过建立异常数据识别标准, 对必要冗余数据剔除, 完成历史数据库的建立, 并将测试数据做同样的处理。

**步骤 2** 根据已有数据的实际情况、算法效率、工程限制及数据获取的限制, 提取数据中航班计划与相邻时段旅客流量 2 个特征作为状态向

量。设  $X(t) = [v(t), v(t+1), p(t), p(t+1)]$  表示当前时段的状态向量,  $v(t)$  表示当前时段航班计划,  $p(t)$  表示当前时段旅客流量。

**步骤 3** 根据测试数据第  $N$  天的航班计划及  $K$  最近邻法 ( $K=1$ ), 利用式(6), 计算当前航班计划状态向量  $V(t) = [v(t), v(t+1), \dots, v(t+n)]$  与历史航班计划状态向量  $V_{hi}(t) = [v_{hi}(t), v_{hi}(t+1), \dots, v_{hi}(t+n)]$  之间的欧氏距离, 根据距离从小到大进行排序, 再根据距离从历史数据库中寻找与其最接近的基准向量第  $M$  天 ( $M < N$ )。

**步骤 4** 以第  $M$  天基准向量的一天中间隔 30 min 的旅客到达人数作为基础, 在历史数据库中除去第  $M$  天, 利用式(7), 计算第  $M$  天的客流量  $P_m(t) = [p_m(t), p_m(t+1), \dots, p_m(t+n)]$  与历史客流量  $P_{hi}(t) = [p_{hi}(t), p_{hi}(t+1), \dots, p_{hi}(t+n)]$  之间的欧氏距离, 根据距离从小到大排序, 找到  $K$  个与  $M$  天最相近的天数, 并利用加权平均预测算法 (即式(2)) 得到预测值。

**步骤 5** 计算 3 个评价指标: 平均绝对误差 MAE、均方误差 MSE、拟合优度  $R^2$  值, 并进行误差分析。

双层  $K$  近邻算法流程如图 4 所示。

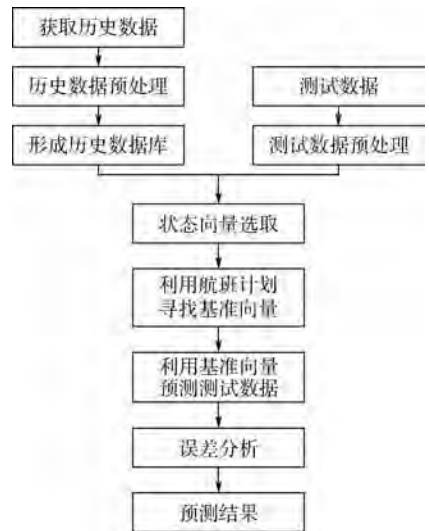


图 4 双层  $K$  近邻算法流程

Fig. 4 Flowchart of T-KNN algorithm

## 2.2 结果分析

为了深入探究 2.1 节建立的双层  $K$  近邻模型在航站楼短时客流量预测的适用性,本文从方法与时间 2 个维度验证分析。选择 2016-09-09—2016-09-13 这 5 日作为预测日,预测日之前的航班数据作为测试日,并与传统  $K$  近邻模型、文献[7]的航班离港时刻主导的单航班离港旅客聚集(Arrived Passenger Model in Single Flight based on the Time of Departure, TD-SFAPM)模型、文献[12]的自回归求和滑动平均(Autoregressive Integrated Moving Average, ARIMA)模型、文献[22]的支持向量机(Support Vector Machine, SVM)模型作预测精度对比。

在对双层  $K$  近邻模型的相关要素定义完成后,先进行航班计划状态模式匹配步骤,根据 2.1 节中步骤 3、式(6),利用  $K$  最近邻法( $K=1$ )在 2016-03-26—2016-09-08 数据中找出与 2016-09-09—2016-09-13 航班计划最接近的一天,即相似历史运营日。根据实验,最近的一天依次为 2016-06-10、2016-04-11、2016-04-18、2016-05-09 和 2016-08-10。

根据 2.1 节中步骤 4,以相似历史运营日作为对应预测日的基准向量,选取  $K=7$ ,利用式(7)对 2016-09-09—2016-09-13 每天中 48 个时段客流量进行预测。同时,预测结果与传统  $K$  近邻模型、TD-SFAPM 模型<sup>[7]</sup>、ARIMA 模型<sup>[12]</sup>、SVM 模型<sup>[22]</sup>对比。

由于文章篇幅限制,预测仿真对比图只展示 2016-09-09 这一天,如图 5 所示。各预测日精度评价指标平均绝对误差 MAE、均方误差 MSE、拟合优度  $R^2$  结果如表 2 所示。

从预测方法维度对比分析,根据 2016-09-09—2016-09-13 实验结果表明,传统  $K$  近邻模型的评价指标 MSE 与 MAE 均小于其相对应的 ARIMA 模型,拟合优度  $R^2$  均大于 ARIMA 模型,表明传统  $K$  近邻模型预测效果优于 ARIMA 模型。这是由于 ARIMA 模型仅对平稳的时间序列有较好的预测效果,对具有复杂性、不确定性和非线性特点的航站楼短时客流量来讲,数据并不是十分平稳。TD-SFAPM 模型仅针对单航班预测,若将其直接叠加预测多航班客流量则会造成更大的误差,且误差修正需花费大量时间,不满足短时预测的实时性要求。SVM 模型虽然针对非线性时间序列有较好的效果,但其参数难以确定,预测精度受核函数影响很大,参数调整费时,也很难满足机场资源配置实时性的需求。

传统  $K$  近邻模型单纯选择预测日的前一日作为预测基准向量,忽略了航站楼客流量在短时期内体现准周期的规律性变化,且受航班计划、天气等多种因素的影响。若预测日与其前一日在目标时刻客流量波动较大,则选择预测日的前一

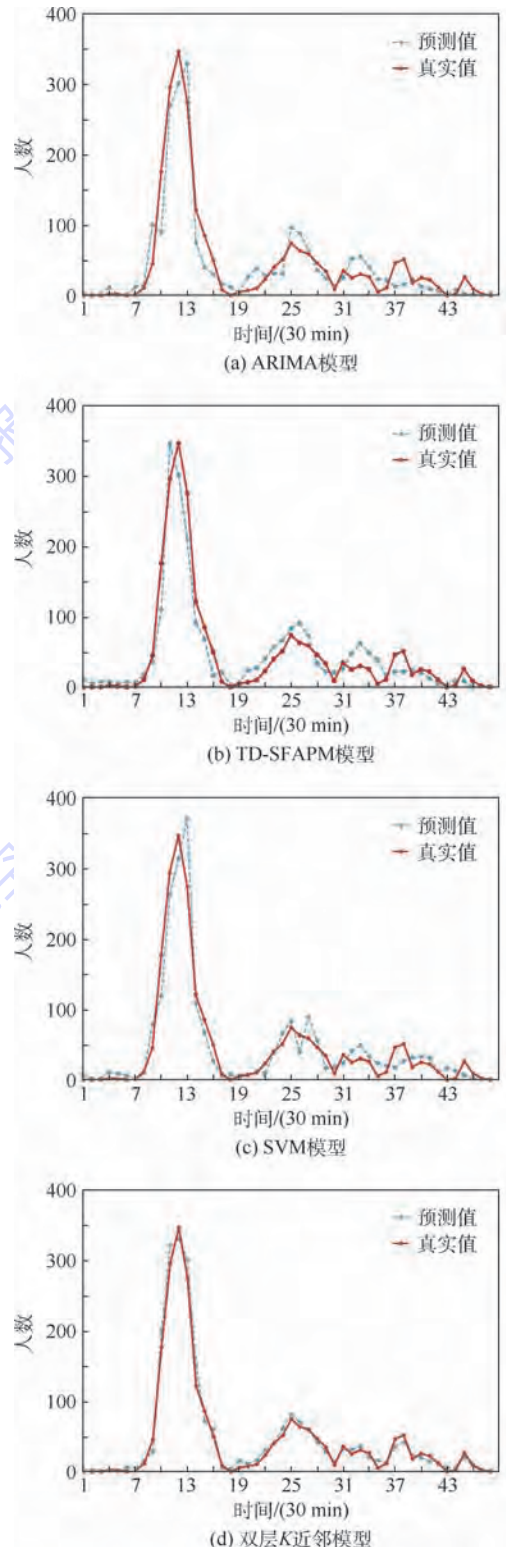


图 5 不同模型预测值与真实值对比

Fig. 5 Comparison of predictive value of different models with true value

表2 不同模型预测精度分析

Table 2 Different models prediction accuracy analysis

日期	模型	MSE	MAE	$R^2/\%$
2016-09-09	ARIMA	393.7357	13.1953	80.27
	KNN	351.8930	11.4511	83.65
	TD-SFAPM	411.3586	13.2589	79.11
	SVM	343.2568	12.1589	83.35
	T-KNN	273.2535	10.3325	90.31
2016-09-10	ARIMA	423.6581	14.6528	78.13
	KNN	386.6752	12.2549	82.33
	TD-SFAPM	422.5987	14.8570	77.28
	SVM	379.8763	12.2689	83.22
	T-KNN	289.3265	10.6599	90.21
2016-09-11	ARIMA	387.3657	13.9863	81.55
	KNN	345.3651	10.9315	89.31
	TD-SFAPM	404.586	13.8967	79.58
	SVM	385.897	11.8570	81.80
	T-KNN	271.3259	9.5879	91.13
2016-09-12	ARIMA	435.5789	14.5873	77.97
	KNN	342.4783	10.5472	89.54
	TD-SFAPM	412.5830	14.0580	78.20
	SVM	378.3687	11.2358	82.58
	T-KNN	286.6872	10.2531	90.63
2016-09-13	ARIMA	426.8753	13.0875	78.96
	KNN	411.5792	13.3673	79.14
	TD-SFAPM	385.350	13.5897	80.25
	SVM	365.257	11.5870	82.58
	T-KNN	268.6578	9.3246	91.35

日作为基准向量会带来较大的误差。

相对传统  $K$  近邻模型, 双层  $K$  近邻模型借鉴电力系统的预测方法, 选取航班计划为一个运营日的特征属性, 将历史运营日的航班计划特征与预测日的航班计划特征进行匹配, 选取相似历史运营日内各个时刻客流量的测定序列作为训练序列来对预测日目标时刻的客流量进行预测。该方法合理避免了因天气、节假日等随机因素对航站楼客流量造成的影响, 选择的相似历史运营日与预测日客流量波动不大, 使得双层  $K$  近邻模型拥有更高的精度。

从双层  $K$  近邻模型评价指标来看, 其拟合优度  $R^2$  稳定在 90% 左右, 相对传统  $K$  近邻模型平均提高了 8% ~ 10%。双层  $K$  近邻模型良好的预测效果也证明了具有相似航班计划的不同两日为相似特征运营日, 其客流量大小及波动具有一定相似性, 且以相似特征运营日作为基准向量预测预测日短时客流量的精度更高, 具体表现为: 双层  $K$  近邻模型相对传统  $K$  近邻模型平均绝对误差 MSE 与均方误差 MAE 减小, 拟合优度  $R^2$  增大。

为了排除随机性对双层  $K$  近邻模型的影响, 本文再从时间维度出发, 随机抽取 5 日验证分析, 并且每个预测日都分布在不同的月份。实验结果

如表 3 所示。

实验结果表明, 双层  $K$  近邻模型在时间维度上有很好的契合效果, 并无较大波动, 与真实数据的平均拟合度达到 90% 以上, 相对于传统  $K$  近邻模型提高了 8% ~ 10%, 显示了双层  $K$  近邻模型良好的鲁棒性。

表3 不同模型时间维度预测精度分析

Table 3 Time dimension prediction accuracy analysis of different models

日期	模型	MSE	MAE	$R^2/\%$
2016-04-05	ARIMA	372.3546	13.2579	79.32
	KNN	331.3896	12.1324	82.65
	TD-SFAPM	393.251	14.2589	77.52
	SVM	345.3674	13.2357	81.25
	T-KNN	252.1786	10.2589	90.71
2016-05-20	ARIMA	365.5789	13.1896	80.56
	KNN	342.2365	11.4381	81.36
	TD-SFAPM	362.5768	13.0257	81.03
	SVM	332.2160	11.2687	82.03
	T-KNN	265.7963	10.5686	89.62
2016-07-15	ARIMA	363.5897	12.3286	81.36
	KNN	342.3586	11.3273	83.22
	TD-SFAPM	421.3540	14.2589	78.70
	SVM	378.2355	12.9630	80.25
	T-KNN	275.2658	10.9811	90.26
2016-08-08	ARIMA	378.9985	14.2657	78.25
	KNN	353.8657	11.1882	83.55
	TD-SFAPM	423.5879	15.0257	77.25
	SVM	373.5680	12.5240	82.56
	T-KNN	266.7884	9.7123	91.68
2016-10-01	ARIMA	355.5623	11.5896	80.33
	KNN	324.3378	11.0451	82.44
	TD-SFAPM	380.2579	13.2570	79.33
	SVM	352.2487	11.5687	81.57
	T-KNN	258.3657	9.8652	91.70

### 3 结 论

本文通过分析某航空公司旅客自助值机数据, 展开对航站楼短时客流量变化规律的探究, 研究表明:

1) 传统  $K$  近邻算法适用于短时交通流的预测, 但针对航站楼短时客流量预测场景时需要对其算法进行改进。

2) 旅客到达航站楼受到航班离港时刻的强制约束, 具有相似航班计划特征的运营日同一个目标时刻上的客流量变化波动具有相似特征。

3) 增加航班计划状态模式匹配步骤选取相似历史运营日的各个时刻客流量的测定序列作为训练序列来对预测日目标时刻的客流量进行预测时, 即利用双层  $K$  近邻模型时预测误差更小, 精

度更高,模型拟合度相对传统  $K$  近邻模型提高了 8% ~ 10%。

人类行为是高度复杂的,影响旅客到达航站楼的规律因素也错综复杂。本文模型在构建时只将航班计划作为旅客到达航站楼驱动力来寻找相似特征运营日,因此尚存在一定不足。未来将借助机场运行控制中心大数据平台,进一步挖掘运营日的特征属性(如天气状况、淡、旺季类型)来确定与预测日相似的历史运营日,完善理论模型,提高模型的普适性。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] GROSCHKE T, ROTHLAUF F, HEINZL A. Gravity models for airline passenger volume estimation [ J ]. *Journal of Air Transport Management*, 2007, 13 ( 4 ): 175-183.
- [ 2 ] LETAVKOVA D, MATUSKOVA S, KEBO V, et al. Simulation model for regional airport passenger throughputs [ C ] // *International Carpathian Control Conference*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2015: 295-299.
- [ 3 ] 黄飞虎, 彭舰, 由明阳. 航空旅客群体移动行为特性分析 [ J ]. *物理学报*, 2016, 65 ( 22 ): 2289011.  
HUANG F H, PENG J, YOU M Y. Analyses of characteristics of air passenger group mobility behaviors [ J ]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65 ( 22 ): 2289011 ( in Chinese ).
- [ 4 ] NDOH N N, ASHFORD N. Evaluation of airport access level of service [ J ]. *Transportation Research Record*, 1993, 1423: 34-39.
- [ 5 ] KIM W, PARK Y, KIM B J. Estimating hourly variations in passenger volume at airports using dwelling time distributions [ J ]. *Journal of Air Transport Management*, 2004, 10 ( 6 ): 395-400.
- [ 6 ] 邢志伟, 文涛, 罗谦, 等. 基于效用价值驱动的旅客出行动力学研究与建模 [ J ]. *北京航空航天大学学报*, 2018, 44 ( 2 ): 250-256.  
XING Z W, WEN T, LUO Q, et al. Utility value driven passenger travel dynamic study and modeling [ J ]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 44 ( 2 ): 250-256 ( in Chinese ).
- [ 7 ] 邢志伟, 冯文星, 罗谦, 等. 基于航班离港时刻主导的单航班离港旅客聚集模型 [ J ]. *电子科技大学学报*, 2015, 44 ( 5 ): 719-724.  
XING Z W, FENG W X, LUO Q, et al. Arrived passenger model in single flight based on the time of departure [ J ]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2015, 44 ( 5 ): 719-724 ( in Chinese ).
- [ 8 ] TIAN Z D, LI S J, WANG Y H, et al. A prediction method based on wavelet transform and multiple models fusion for chaotic time series [ J ]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2017, 98: 158-172.
- [ 9 ] 田中大, 李树江, 王艳红, 等. 基于 ARIMA 与 ESN 的短期风速混合预测模型 [ J ]. *太阳能学报*, 2016, 37 ( 6 ): 1603-1610.  
TIAN Z D, LI S J, WANG Y H, et al. Short-term wind speed hybrid prediction model based on ARIMA and ESN [ J ]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2016, 37 ( 6 ): 1603-1610 ( in Chinese ).
- [ 10 ] TIAN Z D, LI S J. A network traffic prediction method based on IFS algorithm optimised LSSVM [ J ]. *International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation*, 2017, 19 ( 4 ): 200-213.
- [ 11 ] 田中大, 李树江, 王艳红, 等. 基于混沌理论与改进回声状态网络的网络流量多步预测 [ J ]. *通信学报*, 2016, 37 ( 3 ): 55-70.  
TIAN Z D, LI S J, WANG Y H, et al. Network traffic multi-step prediction based on chaos theory and improved echo state network [ J ]. *Journal on Communications*, 2016, 37 ( 3 ): 55-70 ( in Chinese ).
- [ 12 ] 田中大, 李树江, 王艳红, 等. 高斯过程回归补偿 ARIMA 的网络流量预测 [ J ]. *北京邮电大学学报*, 2017, 40 ( 6 ): 65-73.  
TIAN D Z, LI S J, WANG Y H, et al. Network traffic prediction based on ARIMA with Gaussian process regression compensation [ J ]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2017, 40 ( 6 ): 65-73 ( in Chinese ).
- [ 13 ] DAVIS G, NIHAN N. Nonparametric regression and short-term freeway traffic forecasting [ J ]. *Journal of Transportation Engineering*, 1991, 117 ( 2 ): 178-188.
- [ 14 ] 林川. 基于  $K$  近邻非参数回归的短时交通流预测算法研究 [ D ]. 成都: 电子科技大学, 2015: 30-40.  
LIN C. Short-term traffic flow prediction algorithm based on  $K$ -nearest neighbor [ D ]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015: 30-40 ( in Chinese ).
- [ 15 ] 张涛, 陈先, 谢美萍, 等. 基于  $K$  近邻非参数回归的短时交通流预测方法 [ J ]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30 ( 2 ): 376-384.  
ZHANG T, CHEN X, XIE M P, et al.  $K$ -NN based nonparametric regression method for short-term traffic flow forecasting [ J ]. *Systems Engineering-Theory and Practice*, 2010, 30 ( 2 ): 376-384 ( in Chinese ).
- [ 16 ] 于滨, 邬珊华, 王明华, 等.  $K$  近邻短时交通流预测模型 [ J ]. *交通运输工程学报*, 2012, 12 ( 2 ): 105-111.  
YU B, WU S H, WANG M H, et al.  $K$ -nearest neighbor model of short-term traffic flow forecast [ J ]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2012, 12 ( 2 ): 105-111 ( in Chinese ).
- [ 17 ] 谢海红, 戴许昊, 齐远, 等. 短时交通流预测的改进  $K$  近邻算法 [ J ]. *交通运输工程学报*, 2014, 14 ( 3 ): 87-94.  
XIE H H, DAI X H, QI Y, et al. Improved  $K$ -nearest neighbor algorithm for short-term traffic forecasting [ J ]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2014, 14 ( 3 ): 87-94 ( in Chinese ).
- [ 18 ] 豆飞, 贾利民, 秦勇, 等. 铁路客运专线模糊  $k$  近邻客流预测模型 [ J ]. *中南大学学报 ( 自然科学版 )*, 2014, 45 ( 12 ): 4422-4430.  
DOU F, JIA L M, QIN Y, et al. Fuzzy  $k$ -nearest neighbor passenger flow forecasting model of passenger dedicated line [ J ]. *Journal of Central South University ( Science and Technology )*, 2014, 45 ( 12 ): 4422-4430 ( in Chinese ).
- [ 19 ] 张晓利, 贺国光, 陆化普. 基于  $k$ -邻域非参数回归短时交通流预测方法 [ J ]. *系统工程学报*, 2009, 24 ( 2 ): 178-183.  
ZHANG X L, HE G G, LU H P. Short-term traffic flow forecast-

- ting based on  $k$ -nearest neighbors nonparametric regression[J]. Journal of Systems Engineering, 2009, 24(2): 178-183 (in Chinese).
- [20] CAI P L, WANG Y P, LU G Q, et al. A spatiotemporal relative  $k$ -nearest neighbor model for short-term traffic multistep forecasting [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 62: 21-34.
- [21] 陈通, 孙国强, 卫志农, 等. 基于相似日和 CAPSO-SNN 的光伏发电功率预测[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 66-71. CHEN T, SUN G Q, WEI Z N, et al. Photovoltaic power generation forecasting based on similar day and CAPSO-SNN [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 66-71 (in Chinese).
- [22] WANG Y S, WU D L, GUO C X, et al. Short-term wind speed prediction using support vector regression [C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2010: 1-6.

## 作者简介:

邢志伟 男, 博士, 教授。主要研究方向: 民航智能规划与调度、民航装备与系统。

何川 男, 硕士研究生。主要研究方向: 机场运行与控制工程。

罗谦 男, 博士, 研究员。主要研究方向: 机场运营管理、民航智能规划与调度。

蒋祥枫 男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 民航智能规划与调度。

刘畅 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 机场运行与控制工程。

丛婉 女, 硕士。主要研究方向: 通信工程、电子信息。

## Terminal building short-term passenger flow forecast based on two-tier $K$ -nearest neighbor algorithm

XING Zhiwei<sup>1,2</sup>, HE Chuan<sup>1,2</sup>, LUO Qian<sup>2,3,\*</sup>, JIANG Xiangfeng<sup>2</sup>, LIU Chang<sup>2</sup>, CONG Wan<sup>2</sup>

(1. Electronic Information and Automation Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. The Second Research Institute of Civil Aviation Administration of China, Chengdu 610041, China;

3. Civil Aviation Information Technology Co., Ltd., Chengdu 611430, China)

**Abstract:** Outbound passenger flow of terminal building shows the quasi-periodic variation in a short period of time and also shows complex nonlinear characteristics because of many factors such as flight schedule and weather. In order to accurately predict the short-term passenger flow of terminal building, the flight schedule state pattern matching procedure is added on the basis of the traditional  $K$ -nearest neighbor (KNN) algorithm. The flight schedule including multi-dimensional attributes is taken as a feature to select historical similar operation days as forecast reference vectors. The two-tier  $K$ -nearest neighbor model based on terminal building short-term passenger flow forecast is built. Through instance analysis and comparison with ARIMA model and traditional  $K$ -nearest neighbor model, it is proved that two-tier  $K$ -nearest neighbor model has smaller prediction error and higher precision, and the model fitting degree increases by 8% - 10% compared with traditional  $K$ -nearest neighbor model. Thus the model provides a new solution for accurately forecasting terminal building short-term passenger flow.

**Keywords:** passenger flow of terminal building; short-term forecast; pattern matching; forecast model; two-tier  $K$ -nearest neighbor

**Received:** 2018-05-07; **Accepted:** 2018-07-28; **Published online:** 2018-08-22 20:29

**URL:** [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180821.1108.002.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180821.1108.002.html)

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (U1533203); Safety Capacity Constructing Funds Project of CAAC (FDSA0032); Science and Technology Support Program of Sichuan Province (2016GZ0068); Strategic Emerging Product R & D Subsidy Project of Chengdu (2015-CP01-00158-GX)

\* **Corresponding author.** E-mail: [luoqian@caacetc.com](mailto:luoqian@caacetc.com)

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0256



# 人机协作中人的动作终点预测

陈友东\*, 刘嘉蕾, 胡澜晓

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

**摘 要:** 为实现安全高效的人机协作(HRC),需要机器人及时对人的动作做出预测,从而积极主动地辅助人工作。为解决在HRC装配场景中机器人对人的动作终点预测问题,提出了一种基于长短时记忆(LSTM)网络的动作终点预测方法。在训练阶段,用人的动作序列与对应的动作终点组成的样本训练LSTM网络,构建动作序列与动作终点之间的映射。在应用阶段,根据人的动作的初始部分对动作终点提前做出预测。通过在装配场景中,对人抓取工具或零件的动作终点进行预测,验证了所提方法的有效性。在观测到50%的动作片段时,预测准确率达到80%以上。

**关键词:** 人机协作(HRC); 终点预测; 伸及动作; 长短时记忆(LSTM); 意图识别  
**中图分类号:** TP242.6

**文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5965(2019)01-0035-09

在制造业中,机器人越来越多地与人共存于同一工作空间<sup>[1]</sup>。机器人具有速度、精度的优势,人具有感知和灵活适应的优势,人机协作(Human-Robot Collaboration, HRC)很好地结合了机器人和人的优势<sup>[2-3]</sup>。机器人和人协同合作,共同完成工作任务。这种新的工作模式对生产装配而言尤其有益,比如,可以通过使机器人为装配人员定位工具或传递零件等方式,减少完成任务的时间。而HRC装配的成功实践,离不开机器人对人类运动的可靠预测<sup>[4-5]</sup>。

在HRC领域中,一些研究旨在通过对人和机器人执行任务的离散动作进行分析,利用动作之间的转移关系来预测后续动作。Hawkins等<sup>[6]</sup>则通过贝叶斯网络推理预测之后的行为。Nikolaidis和Shah<sup>[7]</sup>通过马尔可夫决策过程对人和机器人的角色信息进行编码从而推断下一步的动作。文献<sup>[8]</sup>将一个任务定义为不同动作的集合,使用有限状态机对HRC过程进行建模。这些研究均

聚焦于对后续动作的预测,而未强调对当前动作的预测。高效的HRC,应该实现机器人对人的动作的实时预测。同时,这些研究仅利用了动作的先后次序信息,而没有利用动作本身的几何或运动学信息。

对动作本身的研究隶属于动作识别、行为理解领域。而在大多数动作识别<sup>[9-10]</sup>或行为理解<sup>[11-12]</sup>的研究中,多通过对完整的人体动作或行为进行分析,提取时空特征,然后进行分类或识别。这些研究中区分的对象(动作或行为)是粗粒度的(如走、跑、跳),并且没有提前预测。本文根据动作的初始部分提前对人的动作终点做出预测。

在运动预测的相关研究中,Mainprice等<sup>[13]</sup>认为单臂的伸及动作(reaching motion)对于一个未知的成本函数而言是最优的。通过学习该成本函数,用随机轨迹优化算法<sup>[14]</sup>来迭代地规划人的运动轨迹,从而实现预测人类运动的目的。

收稿日期: 2018-05-04; 录用日期: 2018-06-08; 网络出版时间: 2018-06-26 17:00

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180626.1417.002.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180626.1417.002.html)

基金项目: 国家科技支撑计划(2015BAF01B04); 北京市科技计划(D161100003116002)

\* 通信作者. E-mail: chenyd@buaa.edu.cn

**引用格式:** 陈友东, 刘嘉蕾, 胡澜晓. 人机协作中人的动作终点预测[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 35-43.

CHEN Y D, LIU J L, HU L X. Human motion end point prediction in human-robot collaboration[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 35-43 (in Chinese).

在 Mainprice 和 Berenson 的另一篇文章中<sup>[15]</sup>, 基于高斯混合模型 (Gaussian Mixture Model, GMM) 构建了人类的运动库, 进而利用回归方法对人的运动提前做出预测。然而模型未考虑时间特征等因素, 导致在运动的早期阶段, 预测结果的准确率非常低。Pérez-D' Arpino 和 Shah<sup>[5]</sup> 通过时间序列分析的方法, 对人的伸及动作的终点进行预测, 盖因模型强调实时性, 而忽视了预测的准确率。

人的动作不是瞬时性的行为, 而是一个连续的过程, 因此常用时间序列数据对其进行分析。隐马尔可夫模型 (HMM) 被认为是对动作序列进行建模和分类的有效工具<sup>[16-17]</sup>。但 HMM 仅考虑各状态的转移概率, 难以表示动作的上下文意义。

在机器学习领域, 对动态序列数据的建模一直是研究的热点之一。静态模型, 如卷积神经网络 (Convolutional Neural Networks, CNN) 和深度置信网络 (Deep Belief Network, DBN), 只专注于数据特征而不考虑时间依赖性。动态模型试图寻找时序数据之间的联系, 其中循环神经网络 (Recurrent Neural Network, RNN)<sup>[18]</sup> 是一种对动态序列建模的有效方法<sup>[19]</sup>, 已经被证明在人体动作建模方面表现优异<sup>[20-21]</sup>。但是, 传统的 RNN 由于存在梯度消失等问题<sup>[22]</sup>, 难以对较长的序列进行建模。

为解决这一问题, Hochreiter 和 Schmidhuber<sup>[23]</sup> 提出了长短时记忆 (LSTM) 网络。LSTM 网络的神经元使用多个功能不同的门来控制神经元并存储信息, 具有保存更长时间的重要信息的能力。这种信息保存特性使得 LSTM 网络在处理、分类或预测复杂动态序列方面表现优异。研究表明, LSTM 网络在处理一些实际问题时, 如在语言建模、语音识别<sup>[24]</sup>、机器翻译、行为识别<sup>[25]</sup>、视频分析<sup>[26]</sup>、交通流速预测<sup>[27]</sup> 等研究领域, 取得了很好的效果<sup>[28-30]</sup>。

本文提出一种基于 LSTM 网络的动作终点预测方法。通过采集少量人的动作数据, 对数据做增强处理, 训练 LSTM 网络, 构建动作序列与动作终点之间的映射。应用时, 根据人的动作的初始部分, 通过模型对动作终点提前做出预测。本文方法在一定程度上避免了大量数据采集的困难, 避免了直接处理或分析图像或视频等多媒体数据的对硬件和时间的要求, 利用少量的数据, 对动作终点做出了提前预测, 并取得了较好的预测效果。

## 1 问题阐述

### 1.1 应用场景

本文首先通过一个实例来阐述将要研究的人的动作终点预测问题。

考虑如下场景: 在装配工位上, 一名装配工人与一台机器人, 二者相互配合, 完成某个装配体的组装。整个装配任务由一系列操作组成, 在装配过程中, 装配工人从零件区或工具箱中陆续捡取零件或工具执行各种操作。在这种模式下, 机器人基本处于闲置状态。而事实上, 机器人配备了摄像头和机械手, 能够观测装配空间内的活动, 可以帮助人固定装配的部件, 也可以向人提供工具或零部件。

为了提高装配效率, 可以使机器人在观察人类操作的基础上, 提前预测出装配工人要捡取哪件工具或零部件, 从而迅速规划自身运动, 快速反应, 配合装配工人工作。

### 1.2 问题分析

通常情况下, 装配线上的装配工位由零件区、工具区以及装配区 3 部分构成, 其中可能的布局如图 1 所示。待组装的零部件从流水线上来, 装配所需的连接件放置在零件区, 装配所用的工具放置在工具区。零件区和工具区又分别由若干个不同的区域组成, 不同的区域摆放着不同的联结件 (如螺栓、螺母等) 或工具 (如扳手、钳子等)。

一项装配任务往往由一系列具体的操作组成, 每项操作又常与一定的对象 (零件和工具) 相关联。而在上述的装配工位中, 各个对象又与特定的区域 (或位置) 相关联。因此, 可以通过预测人的抓取动作的终点位置, 再依据位置与对象的对应关系, 获知人要抓取的对象。即需要研究如何通过 (部分) 动作序列, 提前预测动作的终点位置。



图 1 装配工位示意图

Fig. 1 Schematic of assembly station

### 1.3 数学模型

通过上述分析可知,需要让机器人对人当前的动作进行分析,预测人的动作终点位置,从而预测人要抓取的对象(工具或零件)。当然,无条件的预测是不存在的,科学的预测建立在充分的依据之上。为此,本文选择机器学习的方法来赋予机器人预测人动作终点位置的能力。

如果将动作序列与动作终点位置的组合看作一个动作样本,将到达同一终点位置的所有动作样本视为一个类别,那么动作终点的预测问题就可以抽象为机器学习中的分类问题。问题的输入是一个动作序列,问题的输出是人的动作终点。要实现的目标,即根据动作的起始部分,从固定而有限的终点位置的集合中,选取后验概率最大的终点位置。

动作终点位置的预测问题可以通过以下 2 步来解决:

**步骤 1** 构建模型,即根据给定的动作序列  $\mathbf{X} = (\mathbf{x}_t \in \mathbf{R}^N, t = 1, 2, \dots, T)$  及与之对应的终点位置  $y$ , 构建从动作  $\mathbf{X}$  到终点  $y$  的映射  $f_{\theta^*}$ 。其中,  $\mathbf{x}_t$  为动作执行过程中第  $t$  帧的数据,  $T$  为动作序列的长度;  $N$  为动作序列中每一帧数据的维度;  $y$  代表动作的终点位置, 来自一个有限集  $\tilde{Y} = \{y_j, j = 1, 2, \dots, K\}$ ,  $y_j$  为第  $j$  个终点位置,  $K$  为可能的终点位置的个数。  $\theta$  为决定映射关系的参数, 当前的任务是要在参数空间  $\Theta$  中寻找恰当的参数  $\theta^*$ , 使得在动作序列  $\mathbf{X}$  下, 终点位置  $y$  的可能性最大。即

$$\theta^* = \arg \max_{\theta \in \Theta} P(y | \mathbf{X}; \theta) \quad (1)$$

**步骤 2** 使用模型进行预测, 即根据给定的(未完成的)动作序列  $\bar{\mathbf{X}} = (\mathbf{x}_t \in \mathbf{R}^N, t = 1, 2, \dots, \bar{T})$  (其中  $\bar{T} < T$ ) 及由参数  $\theta^*$  决定的映射关系  $f_{\theta^*}$ , 从可能的终点位置集合  $\tilde{Y}$  中, 确定最有可能的终点位置  $\bar{y}$ 。即

$$\bar{y} = \arg \max_{y \in \tilde{Y}} P(y | \bar{\mathbf{X}}; \theta^*) \quad (2)$$

## 2 预测方法

### 2.1 模型框架

让机器人通过自主学习的方式, 从人的多次演示中获取知识, 从而逐渐具备预测装配工人动作终点位置的能力。整个过程分为 2 个阶段: ①训练(学习)阶段; ②预测(应用)阶段。在训练阶段, 通过采集人的动作序列, 从中提取动作特征, 然后将动作特征与真实的终点位置关联起来,

以此作为训练样本, 训练 LSTM 网络, 获得最优的模型参数。在应用阶段, 当仅观测到部分动作序列时(动作未完成, 序列不完整), 提取动作特征, 作为模型的输入, 对动作的终点位置进行预测。这 2 个阶段的内容分别对应 1.3 节中的 2 个步骤。

值得说明的是: 在动作分类或行为识别领域中, 往往是根据完整的动作序列来确定动作的类别。即待分类的动作序列与用来训练模型的动作序列长度一致。如果用  $\bar{T}$  表示待预测(待识别)的动作序列  $\bar{\mathbf{X}}$  的长度, 用  $T$  表示(训练所用的)完整动作序列  $\mathbf{X}$  的长度, 那么在这类问题中, 有  $\bar{T} = T$ 。而在终点位置预测问题中, 要在动作尚未完成之际, 根据动作序列的起始部分, 确定其终点位置。即待预测终点位置的动作序列  $\bar{\mathbf{X}}$  与用来训练模型的动作序列  $\mathbf{X}$  的长度不一致, 且  $\bar{T} < T$ 。

为了充分利用已有数据中的信息, 使模型能够展现出更好的预测效果, 本文将对训练数据进行增强处理, 一方面是要对样本的数量进行扩充, 另一方面则是要尽量使训练数据与测试数据具有相近的分布(详见第 3 节实验部分)。

### 2.2 LSTM 网络

LSTM 网络是一种特殊的 RNN。其对传统 RNN 的神经元做了改进, 使得网络对序列中较长时间之前的输入也有了记忆的能力, 从而更有利于对时间序列数据的处理和分析。改进后的神经元称为一个 LSTM 单元, 由记忆单元、输入门、遗忘门、输出门组成。记忆单元用于存储状态信息, 门则用于控制何时及如何更新记忆单元的状态。输入门用于控制该单元接受输入信息; 遗忘门用于控制将上一时刻的输出保留到该单元; 输出门则决定输出存储在记忆单元中的信息。网络的前向计算过程, 即根据输入和模型参数计算输出, 由式(3)~式(7)共同完成:

$$\mathbf{f}_t = \sigma(\mathbf{W}_f \cdot [\mathbf{h}_{t-1}, \mathbf{x}_t] + \mathbf{b}_f) \quad (3)$$

$$\mathbf{i}_t = \sigma(\mathbf{W}_i \cdot [\mathbf{h}_{t-1}, \mathbf{x}_t] + \mathbf{b}_i) \quad (4)$$

$$\mathbf{c}_t = \mathbf{f}_t \odot \mathbf{c}_{t-1} + \mathbf{i}_t \odot \tanh(\mathbf{W}_c \cdot [\mathbf{h}_{t-1}, \mathbf{x}_t] + \mathbf{b}_c) \quad (5)$$

$$\mathbf{o}_t = \sigma(\mathbf{W}_o \cdot [\mathbf{h}_{t-1}, \mathbf{x}_t] + \mathbf{b}_o) \quad (6)$$

$$\mathbf{h}_t = \mathbf{o}_t \odot \tanh(\mathbf{c}_t) \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{x}_t$  为 LSTM 的输入向量;  $\mathbf{f}_t$  为遗忘门的激活向量;  $\mathbf{i}_t$  为输入门的激活向量;  $\mathbf{c}_t$  为单元状态向量;  $\mathbf{o}_t$  为输出门的激活向量;  $\mathbf{h}_t$  为 LSTM 单元的输出向量;  $\mathbf{W}$  和  $\mathbf{b}$  分别为需要训练的权重矩阵和偏置值;  $\sigma$  为 sigmoid 函数;  $\tanh$  为双曲函数;  $\odot$  表示逐点相乘;  $[\cdot, \cdot]$  表示向量拼接。

LSTM 网络的训练方法采用的是基于时间的

反向传播 (Back Propagation Through Time, BPTT) 算法<sup>[28]</sup>, 该算法主要包括 4 个步骤: ①按照前向计算方法(式(3)~式(7))计算 LSTM 网络的输出值; ②反向计算每个 LSTM 单元的误差项, 包括按时间和网络层级 2 个反向传播的方向; ③根据相应的误差项, 计算各个权重的梯度; ④使用基于梯度下降的优化算法更新权重。

基于梯度下降的优化算法多种多样, 如随机梯度下降 (Stochastic Gradient Descent, SGD)<sup>[31]</sup>、AdaGrad<sup>[32]</sup>、RMSProp<sup>[33]</sup>。本文选用文献[34]提出的 Adam 算法。Adam 算法是一种基于梯度下降的有效随机优化方法, 该算法结合了 AdaGrad 和 RMSProp 的优势, 能够对不同的参数分别计算相适应的学习率并且占用的存储资源较少。相比于其他的随机优化方法, Adam 算法在实际应用中的整体表现更加优越。

### 2.3 基于 LSTM 网络的动作终点预测

本文将人的动作表示为一个形如  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_t, \dots, x_T\}$  的多元时间序列。

将可能的终点位置  $y_j (j = 1, 2, \dots, K)$  用数字按从小到大的顺序编号, 并编码为独热码 (one-hot coding) 向量。网络结构示意图如图 2 所示。

网络输入层的神经元个数与动作序列的长度 ( $T$ ) 相等, 网络最终输出层的神经元个数与可能的终点位置总数 ( $K$ ) 相等。将动作序列按时序赋给网络的输入神经元, 即将动作第  $t$  帧的数据  $x_t$  作为网络输入层第  $t$  个神经元的输入。输入层的输出经过网络的 2 个隐藏层 (隐藏层的神经元是 LSTM 单元) 进行非线性变换。网络第 2 个隐藏层的最后一个单元的输出是 LSTM 网络的原始输出。首先, 在原始输出层之后增加一个全连接层, 对原始输出做线性变换, 使其输出与网络的最终输出维度相等。然后, 通过一个 softmax 层, 将全

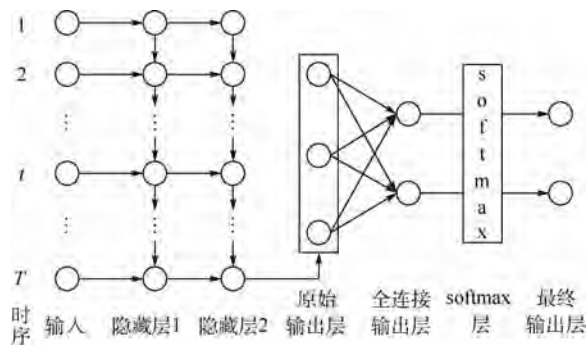


图 2 网络结构示意图

Fig. 2 Schematic of network structure

连接层的输出归一化, 转化为各个可能的终点位置对应的概率。最后, 选择后验概率最大的终点位置作为预测结果。

## 3 实验

### 3.1 实验设置

为研究人的动作终点预测问题, 邀请被试人员站在实验台前, 伸手去抓实验台上的某件工具, 采集人抓取不同工具的动作数据。

实验场景如图 3 所示, 图中左下角黄色矩形框中的是微软 Kinect 传感器, 摄像头正对着实验台, 用于采集动作数据; 红色矩形框中的是实验台上摆放的工具, 也就是被试人员要抓取的对象。

实验台的桌面则被划分为 9 个小区域, 每个区域内放置着一种工具, 如图 4 所示。

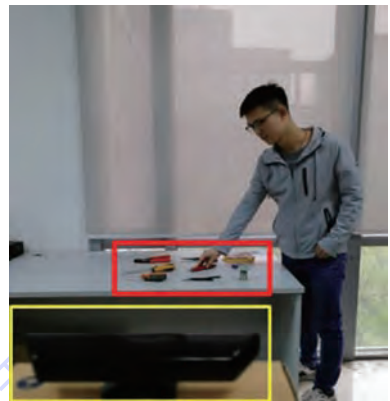


图 3 实验场景

Fig. 3 Experimental scene



图 4 实验台的布置

Fig. 4 Layout of experiment table

### 3.2 实验数据

#### 3.2.1 数据选择

机器学习中最重要的一步是特征提取。很多情况下, 特征选择的好坏决定了模型的效果。在传统机器学习方法中, 特征提取往往是根据人类专家的经验开发相应的算法来完成的。而在深度学习中, 特征提取是由网络通过多层非线性变换

完成的。

不同于动作识别领域研究的走、跑、跳等粗粒度的动作,其特征比较明显,相对易于区分。在 HRC 装配场景中的常见动作有人伸手去工位上捡起某件零件或工具,伸手去接收机器人递来的工具,亦或是伸手将零件递给机器人等。这些动作,于人而言,执行的都是一个伸及动作,即将手伸到某一位置。对于这样的动作,区分起来是困难的,因为抓取(或捡起、接收、传递)不同对象时,动作本质上并无明显的差别,难以根据动作的固有特征来区分,达到预测动作终点位置的目的。

通过 1.2 节的分析可知,被抓取的对象是与特定的位置关联的。在 HRC 装配案例中,主要的运动对象是手,手的运动能够更加直接地表征人的抓取动作。在抓取某一对象的过程中,手的轨迹在空间的分布是不同的。而且,不同于行为分析研究中直接处理大量的图像或视频数据,手的轨迹数据结构简单,便于处理和分析。因此,可以通过手的轨迹来区分抓取不同对象的动作。进而,可以根据动作起始部分的轨迹对抓取动作进行区分,从而对动作的终点位置提前做出预测。

### 3.2.2 数据采集

实验使用微软的 Kinect 传感器,以 30 帧/s 的传输速率记录人的动作。Kinect 采集的数据包含颜色、深度和点云信息,以 RGB-D 图像序列的形式传输。Kinect 采集的原始 RGB-D 图像序列如图 5 所示。

为从图像序列中获取人手的轨迹,基于 OpenCV 库,使用 C++ 语言开发了图像获取与处理程序,从 Kinect 传感器传回的 RGB-D 图像流中,实时地获取手的空间坐标,构成人手的空间轨迹。程序的流程如图 6 所示。

实验邀请了 5 名被试人员,每次抓取前,被试人员站在实验台前,待“开始”指令发出,马上伸手去抓取实验台上的一件工具。为保证样本的代表性,抓取动作的起点不完全一致;由于人的运动的灵活性,抓取动作的速度也不尽相同;而且,不同的人的抓取动作的特点也不尽相同。

实验中让每位被试人员依次抓取 9 种工具,

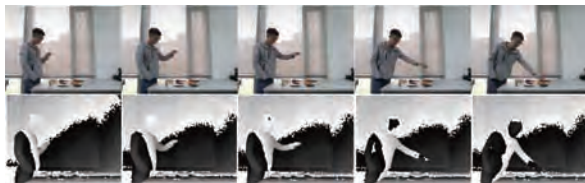


图 5 Kinect 采集的原始 RGB-D 图像

Fig. 5 Original RGB-D images captured by Kinect

对每种工具抓取 8 次。在每次执行抓取操作的过程中,采集 100 帧数据,从而获得代表人手位置的 100 个点的坐标,构成一条空间轨迹。

以下将抓取同种工具的若干条轨迹视为一组。绘制这 9(组)×5(人)×8(次)抓取动作的轨迹,如图 7 所示。图中,轨迹的起点位置在右侧,终点位置在左侧。轨迹的起点由人站立的位置确定,在实验中的差异并不是很大。轨迹的终点位置则由物体在实验台上的摆放位置决定(见图 4)。

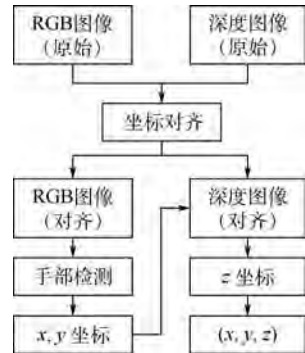


图 6 从 RGB-D 图像中获取手的坐标

Fig. 6 Hand coordinates obtained from RGB-D images

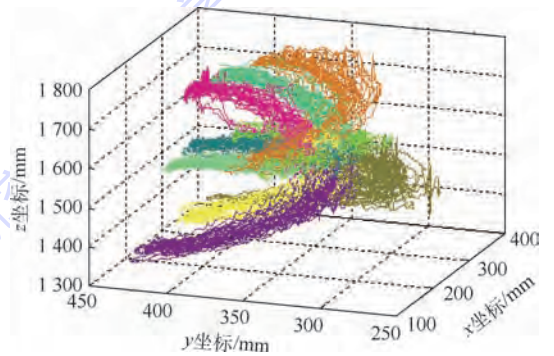


图 7 轨迹的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of trajectories

### 3.2.3 数据预处理

由于传感器的误差等原因,采集到的轨迹数据中包含异常数据与大量噪声。为此,先通过设置固定阈值的方式,去除轨迹中存在的明显异常坐标;再采用滑动平均法,去除轨迹中的噪声。因为轨迹数据在时间上是有先后顺序的,为此给轨迹加入时间维度,每一帧轨迹数据变为  $x_i = (t, x, y, z)$ 。由于人体动作的灵活性,抓取动作的速度不同,运动轨迹在时间轴上不对等。为方便后续处理,这里采用动态时间归整(Dynamic Time Warping, DTW)算法<sup>[35]</sup>将轨迹进行时序对齐。图 8 为 DTW 算法的示意图,其中,  $t_i$  和  $s_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 7$ ) 分别为轨迹模板和轨迹样本在第  $i$  时刻的数据。

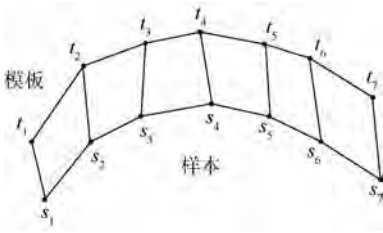


图8 DTW算法示意图

Fig. 8 Schematic of DTW algorithm

### 3.2.4 数据增强

LSTM网络作为一种数据驱动的深度学习模型,需要大量的数据进行训练。而对于本文中所研究的问题,无论是在实验中,还是在实际应用中,采集如此大量的数据过于耗时费力,实不可取。为此,本文对预处理后的数据进行数据增强(data augmentation),获得更多的训练数据。

图像处理领域为了增强数据<sup>[36]</sup>,通常会采用给原始图像添加噪声、旋转等方式。在本文中,需要尽量保证动作轨迹的特征,不宜采用给轨迹加噪声的方式。考虑到动作轨迹的时序特性以及LSTM网络的输入特点,通过对原轨迹进行再采样的方式,生成新的轨迹。

现有轨迹数据共9组,每组包括40个轨迹序列,每个序列包含100个时刻,每一时刻的数据有4个维度,即 $x_t = (t, x, y, z)$ 。为适应LSTM模型的输入特点,将处理后的序列长度统一设定为30个时刻,即 $T = 30$ 。以此作为(原始)训练集,并采用如下2种方式来增强训练集的数据。

1) 等距采样:从原轨迹序列的100个时刻中“隔三取一”(下标为小数时圆整),抽取30个时刻的数据,按时间先后顺序排列,组成新的轨迹序列。具体过程如下:

①从序列的下标(1~97)中等间隔抽30个数并圆整,按抽到的下标,将完整的原轨迹序列分割,得到新的轨迹序列 $X = \{x_1, x_4, x_8, \dots, x_{97}\}$ 。

②参照过程①中的操作,对原轨迹序列按下标值(2~98), (3~99), (4~100)做类似处理。

对训练集中的每个轨迹序列都重复上述过程①和②操作。这样,通过等距采样将原训练集的数据增加了4倍。

2) 截断采样:将原轨迹序列按百分比截断,然后等距采样,从中随机不重复地抽取30个时刻,按时间顺序排列,组成新的轨迹。具体过程如下:

①将原轨迹序列按下标值(1~30)截断,得到新的轨迹序列 $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_{30}\}$ 。

②从序列的下标值(1~40)中等间隔抽30个

数并圆整,按抽到的下标,将完整的原轨迹序列分割,得到新的轨迹序列 $X = \{x_1, x_2, x_4, \dots, x_{40}\}$ 。

③参照过程②的操作,对原轨迹序列按下标值(1~50), (1~60),  $\dots$ , (1~90)做类似处理。

对训练集中的每个轨迹序列,重复上述过程①~③。这样,通过截断采样的方式将原训练集的数据又扩增了7倍。

采用方式1)和方式2)进行数据增强之后,(新的)训练集共包含9组数据,每组有440个轨迹序列。

### 3.3 模型训练

实验使用配有Pentium E5800 3.2 GHz CPU的台式机,在Win 7 64位操作系统上,使用Python 3.5.4,基于Google的开源深度学习框架tensorflow 1.4.0,参照2.3节中的网络结构搭建LSTM网络。

如1.3节所述,训练样本是动作轨迹序列与对应终点的组合,其形式为 $(X, y)$ 。

通过设定学习率、迭代步数等超参数,随机初始化网络的权重和偏置参数,应用Adam优化算法不断更新网络的权重。实验中所设定的相关参数如表1所示。

整个训练过程耗时约9200 s(约2.5 h),在迭代5000轮之后,训练损失不再降低,模型收敛。此时,将网络的参数保存下来,用于预测。

表1 LSTM网络的相关参数

Table 1 Related parameters for LSTM network

参数	数值
输入层节点个数	30
输出层节点个数	9
隐藏层层数	2
隐藏层单元维度	32
初始学习率	0.000 1
正则项系数	0.001 5
训练样本批量	100
迭代次数	5000

### 3.4 实验结果

#### 3.4.1 预测效果

在测试阶段,同样邀请了5名被试人员,站立在实验台前,随机抓取实验台上的9种工具,每人抓取同种工具5次。采集的数据用来做测试。即测试集包含9组轨迹数据,每组包括25个完整的(100个时刻)轨迹序列。

为了模拟在线预测的情形,将测试集的完整轨迹序列按比例(30%, 40%,  $\dots$ , 90%)截断,以模拟观测到部分动作片段的情形。

然后,从截断后的轨迹序列中等间隔抽30个

时刻的数据,按时间的先后顺序组成新的轨迹序列,作为测试数据,输入 LSTM 网络,预测动作的终点位置。

实验结果表明,在观测到 30% 的动作片段时,对动作终点位置预测的准确率可以达到 67.7%;当观测到 60% 的动作片段时,预测准确率可以达到 87.5%。详情如图 9 所示。

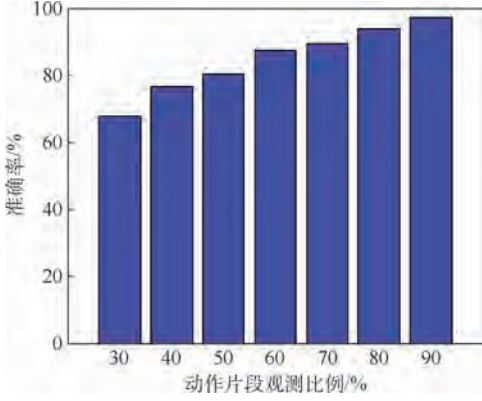


图 9 预测效果

Fig.9 Prediction results

### 3.4.2 对比分析

基于实验采集的数据,分别训练 GMM 和传统的 RNN 模型并进行测试,预测结果如表 2 和图 10 所示。

随机预测 (Random),即不进行学习而直接“盲目”预测。根据古典概率模型,共有 9 种情况,每种情况等可能发生,因此预测结果的准确率即为  $1/9$  (11.1%)。该结果明显低于通过各种模型建模后的预测结果,难以为机器人的提前响应提供参考,这说明机器人的学习是有效而且必要的。

在实验中 GMM 模型使用的是未进行增强的原始数据。原因在于,使用 GMM 模型时要计算协方差矩阵的逆,而增强后的轨迹与原始轨迹有内在关联,数据间存在线性相关,导致矩阵不

表 2 不同模型预测效果统计

Table 2 Prediction results statistics among different models

动作片段 观测比例/%	准确率/%				
	Random	GMM	RNN	LSTM-1	LSTM-2
30	11.1	56.5	54.2	24.4	67.7
40	11.1	67.7	61.1	27.8	76.4
50	11.1	73.6	66.3	32.8	80.3
60	11.1	78.8	74.2	41.1	87.5
70	11.1	83.0	83.1	54.1	89.2
80	11.1	87.7	89.3	65.4	93.9
90	11.1	92.7	95.4	89.1	97.2

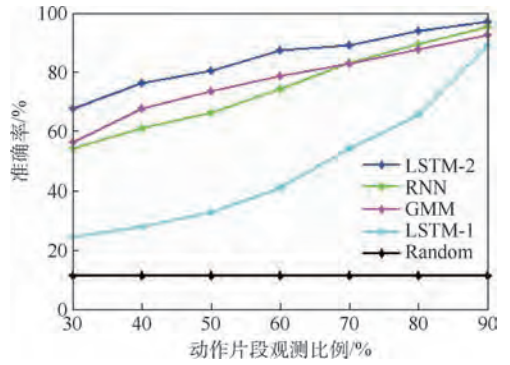


图 10 不同模型预测效果对比

Fig.10 Comparison of prediction results among different models

可逆,模型无法求解。RNN 模型使用的是通过 2 种增强方式处理后的数据。在较短的观测时间内(动作刚开始),GMM 效果比 RNN 好,但是随着动作的继续进行,GMM 因不能捕获动作的时序信息,其预测效果逐渐被赶超,并最终落于下风。

LSTM-1 代表仅通过“等距采样”(方式 1))增强训练数据后,训练 LSTM 网络并进行预测的结果;LSTM-2 代表通过 2 种方式进行数据增强后,训练 LSTM 网络并进行预测的结果。在仅采用方式 1)进行数据增强后,每组数据有 160 个序列,模型的预测效果较差;通过 2 种方式进行数据增强后,每组数据有 440 个序列,预测结果的准确率得到了很大的提升,说明 LSTM 网络对数据的依赖性较强。

在整个观测过程中,LSTM 模型的预测效果始终优于 GMM 模型和 RNN 模型,原因在于,传统 RNN 模型比 LSTM 模型的神经元结构简单,而 LSTM 由于加入了门结构,能够更好地对序列数据进行建模。

## 4 结 论

1) 研究了在 HRC 装配的特定场景下,机器人对人的动作终点位置的预测问题。实验结果表明,机器人在学习的基础上,能够根据人体动作的初始部分对动作的终点做出预测。并且,随着观测时间的持续,预测结果的准确率在不断提高。这既证明了本文方法的有效性,也符合人们的直观认知。

2) LSTM 网络与 GMM 及传统 RNN 等模型相比,在处理序列问题方面确实具有独到的优势。同时,深度学习作为一种数据驱动方法,对训练数据的需求量非常大,而数据采集又常常耗时且费力。本文所使用的数据增强方法,可供在使用深

度学习方法解决时间序列等相关问题时借鉴。

3) 通过实验验证了本文方法预测抓取动作的终点位置的有效性。事实上,在 HRC 装配过程中,人的很多动作都具有与抓取动作相似的性质,如接收、传递、放置动作。通过预测这种伸及动作的终点,能够使机器人更好地配合人的操作,或者是提供辅助,或者是避免妨碍。

### 参考文献 (References)

- [1] 何玉庆,赵忆文,韩建达,等. 与人共融——机器人技术发展的新趋势[J]. 机器人产业,2015(5):74-80.  
HU Y Q,ZHAO Y W,HAN J D, et al. Coincidence with people—New trend of robot technology development[J]. Robot Industry Forum,2015(5):74-80 (in Chinese).
- [2] 张含阳. 人机协作:下一代机器人的必然属性[J]. 机器人产业,2016(3):37-45.  
ZHANG H Y. Human-robot collaboration: The inevitable property of the next generation robot[J]. Robot Industry Forum, 2016(3):37-45 (in Chinese).
- [3] 邹方. 人机协作标准及应用动态研究[J]. 航空制造技术, 2016,59(23):58-63.  
ZOU F. Standard for human-robot collaboration and its application trend[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2016, 59(23):58-63 (in Chinese).
- [4] LIU H, WANG L. Human motion prediction for human-robot collaboration[J]. Journal of Manufacturing Systems,2017,44: 287-294.
- [5] PÉREZ-D' ARPINO C, SHAH J A. Fast target prediction of human reaching motion for cooperative human-robot manipulation tasks using time series classification[C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE Press,2015:6175-6182.
- [6] HAWKINS K P, VO N, BANSAL S, et al. Probabilistic human action prediction and wait-sensitive planning for responsive human-robot collaboration[C] // IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. Piscataway, NJ: IEEE Press,2013: 499-506.
- [7] NIKOLAIDIS S, SHAH J. Human-robot cross-training: Computational formulation, modeling and evaluation of a human team training strategy[C] // 8th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI). Piscataway, NJ: IEEE Press,2013:33-40.
- [8] DING H, SCHIPPER M, MATTHIAS B. Collaborative behavior design of industrial robots for multiple human-robot collaboration[C] // International Symposium on Robotics. Piscataway, NJ: IEEE Press,2014:1-6.
- [9] 李瑞峰,王亮亮,王珂. 人体动作行为识别研究综述[J]. 模式识别与人工智能,2014,27(1):35-48.  
LI R F, WANG L L, WANG K. A survey of human body action recognition[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2014,27(1):35-48 (in Chinese).
- [10] 朱煜,赵江坤,王逸宁,等. 基于深度学习的人体行为识别算法综述[J]. 自动化学报,2016,42(6):848-857.  
ZHU Y,ZHAO J K,WANG Y N, et al. A review of human action recognition based on deep learning[J]. Acta Automatica Sinica,2016,42(6):848-857 (in Chinese).
- [11] BORGES P V K, CONCI N, CAVALLARO A. Video-based human behavior understanding: A survey[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology,2013,23(11): 1993-2008.
- [12] VISHWAKARMA S, AGRAWAL A. A survey on activity recognition and behavior understanding in video surveillance[J]. Visual Computer,2013,29(10):983-1009.
- [13] MAINPRICE J, HAYNE R, BERENSON D. Goal set inverse optimal control and iterative replanning for predicting human reaching motions in shared workspaces[J]. IEEE Transactions on Robotics,2016,32(4):897-908.
- [14] KALAKRISHNAN M, CHITTA S, THEODOROU E, et al. STOMP: Stochastic trajectory optimization for motion planning[C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE Press,2011:4569-4574.
- [15] MAINPRICE J, BERENSON D. Human-robot collaborative manipulation planning using early prediction of human motion[C] // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press,2013:299-306.
- [16] JOSLIN C, EL-SAWAH A, CHEN Q, et al. Dynamic gesture recognition[C] // 2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006: 1706-1711.
- [17] GEHRIG D, KUEHNE H, WOERNER A, et al. HMM-based human motion recognition with optical flow data[C] // 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. Piscataway, NJ: IEEE Press,2010:425-430.
- [18] HÜSKEN M, STAGGE P. Recurrent neural networks for time series classification[J]. Neurocomputing,2003,50:223-235.
- [19] LIPTON Z C, BERKOWITZ J, ELKAN C. A critical review of recurrent neural networks for sequence learning[EB/OL]. (2015-10-17) [2018-05-04]. <https://arxiv.org/abs/1506.00019>.
- [20] ESCHRODT F, BUTZ M V. Just imagine! learning to emulate and infer actions with a stochastic generative architecture[J]. Frontiers in Robotics and AI,2016,3:5
- [21] BUTEPAGE J, BLACK M J, KRAGIC D, et al. Deep representation learning for human motion prediction and classification[C] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017: 1591-1599.
- [22] HOCHREITER S, BENGIO Y, FRASCONI P, et al. Gradient flow in recurrent nets: The difficulty of learning long-term dependencies[M] // KREMER S C, KOLEN J F. A field guide to dynamical recurrent networks. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2001:237-243.
- [23] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory[J]. Neural Computation,1997,9(8):1735-1780.
- [24] SAK H, SENIOR A, BEAUFAYS F. Long short-term memory based recurrent neural network architectures for large vocabulary speech recognition[C] // 15th Annual Conference of the International Speech Communication Association. Baixas: ISCA,

- 2014;338-342.
- [25] DU Y, WANG W, WANG L. Hierarchical recurrent neural network for skeleton based action recognition [C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2015; 1110-1118.
- [26] SRIVASTAVA N, MANSIMOV E, SALAKHUTDINOV R. Un-supervised learning of video representations using LSTMs [C] // International Conference on International Conference on Machine Learning, 2015; 843-852.
- [27] MA X L, TAO Z M, WANG Y H, et al. Long short-term memory neural network for traffic speed prediction using remote microwave sensor data [J]. Transportation Research Part C, 2015, 54; 187-197.
- [28] GRAVES A, SCHMIDHUBER J. Framewise phoneme classification with bidirectional LSTM and other neural network architectures [J]. Neural Networks, 2005, 18(5); 602-610.
- [29] BACCOUCHE M, MAMALET F, WOLF C, et al. Sequential deep learning for human action recognition [C] // International Conference on Human Behavior Understanding. Berlin: Springer-Verlag, 2011; 29-39.
- [30] GRAVES A, MOHAMED A R, HINTON G. Speech recognition with deep recurrent neural networks [C] // 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2013; 6645-6649.
- [31] AMARI S I. Backpropagation and stochastic gradient descent method [J]. Neurocomputing, 1993, 5(4-5); 185-196.
- [32] DUCHI J, HAZAN E, SINGER Y. Adaptive subgradient methods for online learning and stochastic optimization [J]. Journal of Machine Learning Research, 2011, 12(7); 257-269.
- [33] YEUNG S, RUSSAKOVSKY O, JIN N, et al. Every moment counts; Dense detailed labeling of actions in complex videos [J]. International Journal of Computer Vision, 2018, 126(2-4); 375-389.
- [34] KINGMA D P, BA J. Adam: A method for stochastic optimization [C] // 3rd International Conference for Learning Representations, 2015.
- [35] BERNDT D J, CLIFFORD J. Using dynamic time warping to find patterns in time series; WS-94-03 [R]. Palo Alto: AAAI, 1994; 359-370.
- [36] HOWARD A G. Some improvements on deep convolutional neural network based image classification [EB/OL]. (2013-12-19) [2018-05-04]. <http://arxiv.org/abs.1312.5402>.

#### 作者简介:

陈友东 男,博士,副教授。主要研究方向:机器人控制、人机协作。

刘嘉蕾 男,硕士研究生。主要研究方向:人机协作。

胡澜晓 男,硕士研究生。主要研究方向:机器人动力学与控制。

## Human motion end point prediction in human-robot collaboration

CHEN Youdong\*, LIU Jialei, HU Lanxiao

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** To realize a safe and effective human-robot collaboration (HRC), it is necessary for the robot to predict human motions in a timely manner, so as to assist human more actively in the cooperative work. In order to solve the problem of human motion prediction in HRC assembly scenario, a motion end point prediction method based on long short-term memory (LSTM) network is proposed. In the training phase, the LSTM network is trained with samples of human motion sequences and corresponding motion end points, and the mapping between motion sequences and motion end points is constructed. In the application phase, the motion end point is predicted in advance based on the initial part of the human motion sequence. The effectiveness of the proposed method is verified by predicting the end points of motion of a human grasping tool or part in an assembly scenario. When 50% of the motion fragments are observed, the accuracy rate of prediction is above 80%.

**Keywords:** human-robot collaboration (HRC); end point prediction; reaching motion; long short-term memory (LSTM); intention recognition

**Received:** 2018-05-04; **Accepted:** 2018-06-08; **Published online:** 2018-06-26 17:00

**URL:** [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180626.1417.002.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180626.1417.002.html)

**Foundation items:** National Key Technology Research and Development Program of China (2015BAF01B04); Beijing Science and Technology Plan (D161100003116002)

\* **Corresponding author.** E-mail: [chenyd@buaa.edu.cn](mailto:chenyd@buaa.edu.cn)

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0233



# 氢氧发动机真空羽流干扰试验研究

吴靖<sup>1,\*</sup>, 蔡国飙<sup>2</sup>, 贺碧蛟<sup>2</sup>

(1. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福州 350116; 2. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083)

**摘 要:** 为了研究航天器发动机多股羽流产生的羽流干扰对流场结构及参数的影响,在北京航空航天大学真空羽流效应试验系统(PES)中,采用总压皮托管阵列对60 N 氢氧模拟发动机单机羽流和双机干扰羽流的压力场进行了测量。试验结果表明:单机羽流流场压力随着轴向距离的增大而迅速降低;受到钟形喷管产生的压缩波束影响,同一轴向距离上的压力最大值逐渐偏离喷管轴线;双机羽流干扰发生于两股发动机羽流主流之间的区域,干扰流的作用范围和强度随着轴向距离的增大而增大,干扰流压力最高可以达到单机羽流相同位置处压力的5倍以上;受到干扰流压缩波束边界的影响,同一轴向距离上的压力最大值逐渐偏离双发动机对称面。

**关键词:** 真空羽流; 羽流干扰; 氢氧发动机; 压力场; 压缩波束

**中图分类号:** V411.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5965(2019)01-0044-06

航天器在执行飞行任务时,往往需要使用多台发动机共同工作提供更大推力或实现复杂机动,例如高空火箭配备的发动机组、卫星平台的推力器阵列等。距离不太远的多台发动机同时工作时产生的多股羽流在膨胀过程中发生气体相互碰撞、流场形态改变、气流参数变化的现象,称为羽流干扰(或羽流相互作用)。羽流干扰会造成羽流流场结构的变化,可能导致羽流气动、气动热及污染效应增强,影响航天器正常工作,带来结构强度或热防护方面的风险。因此,需要对发动机双机工作时的羽流干扰效应进行评估。

研究羽流效应的基础是要对羽流形成的流场有充分的认识。一般来说,羽流干扰形成的流场参数不能用各发动机羽流的流场参数进行线性叠加,流场中膨胀波束和压缩波束(或激波)的交汇和叠加导致了较为复杂的流动特性<sup>[1-3]</sup>。

在已有的羽流干扰研究中,研究对象主要以卫星平台上的小推力发动机或以中性气体为工质

的模拟推力器产生的羽流,发动机或推力器的流量较小、间距较大(一般大于5倍喷管出口直径),羽流干扰区域距发动机较远,处于流场远场。研究手段以数值模拟为主<sup>[4-6]</sup>,试验研究由于受到真空设备抽气能力的限制,只进行了以中性气体(如N<sub>2</sub>、Ar、CO<sub>2</sub>等)为工质的羽流流场参数测量<sup>[7-12]</sup>,未见到以真实发动机燃烧气体进行羽流干扰试验的相关文献。

本文基于以CZ-5二级主发动机为原型设计的60 N 氢氧模拟发动机<sup>[13]</sup>,开展发动机单机羽流和双机干扰羽流流场的试验研究,测量流场压力,对双机羽流干扰造成的流场增强效应进行分析。

## 1 试验系统

### 1.1 真空羽流效应试验系统

氢氧发动机真空羽流流场测量试验在北京航空航天大学真空羽流效应试验系统(PES)<sup>[14-16]</sup>中

收稿日期: 2018-04-26; 录用日期: 2018-05-25; 网络出版时间: 2018-06-26 20:18

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180626.1348.001.html

\* 通信作者. E-mail: wujing@fzu.edu.cn

引用格式: 吴靖, 蔡国飙, 贺碧蛟. 氢氧发动机真空羽流干扰试验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 44-49.

WU J, CAI G B, HE B J. Experimental investigation on vacuum plume interaction of hydrogen/oxygen engines [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 44-49 (in Chinese).

进行。PES 真空舱(如图 1 所示)为外径 5.2 m、长度 12.6 m 的卧式圆柱形 316 L 不锈钢筒体,两端为标准椭圆形封头。真空获取系统包括外置式真空抽气系统及内置式低温吸附系统。其中外置式真空抽气系统包括螺杆泵、罗茨泵、分子泵及低温泵。内置式低温吸附系统为双层通过液氮制冷的热沉。有效试验空间为  $\phi 4.2 \text{ m} \times 9.9 \text{ m}$ ,系统抽速可达到  $10^6 \text{ L/s}$ ,极限真空度可达到  $10^{-4} \text{ Pa}$ 。真空舱内背景真空度通过置于舱壁上的皮拉尼真空计和热阴极电离真空计进行监测。



图 1 PES 真空舱

Fig.1 Vacuum chamber of PES

### 1.2 氢氧模拟发动机

氢氧模拟发动机与 CZ-5 二级主发动机具有相同工质、相同混合比及等比例的喷管型面<sup>[13]</sup>,推力为 60 N,混合比为 6.43,燃烧室压力为 0.6 MPa,喷管出口直径为 71.6 mm,扩张比为 80,缩放系数为 1:14.7。结构如图 2 所示。

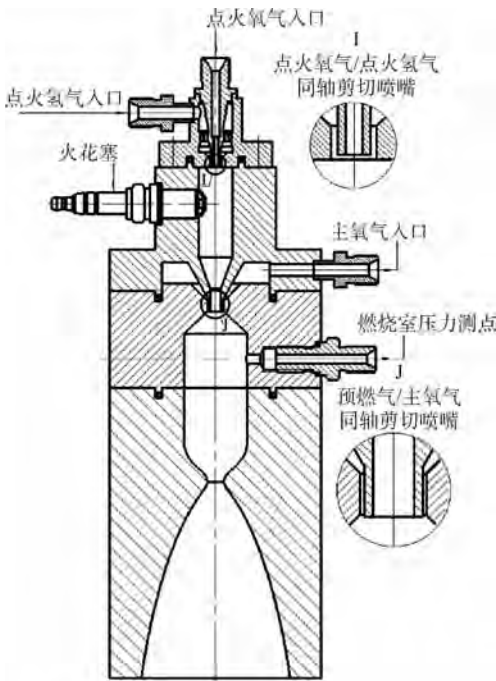


图 2 氢氧模拟发动机结构

Fig.2 Structure of simulated hydrogen/oxygen engine

### 1.3 流场压力测量装置

为了在一次点火过程中获得更多的压力数据,采用总压皮托管阵列进行羽流流场压力的测量,皮托管阵列及微差压传感器示意图如图 3 所示。皮托管阵列由 15 根相同的总压皮托管组成,皮托管材料为 304 不锈钢,外径为 5.0 mm,内径为 3.8 mm。皮托管互相平行且入口保持平齐,两两间距 20 mm。传感器输出测量端和参考端的压力差,即皮托管入口的激波后总压<sup>[17]</sup>。

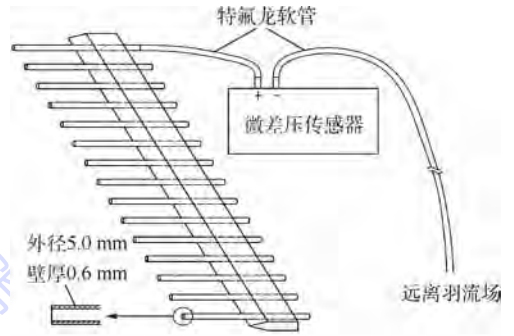


图 3 皮托管阵列及微差压传感器示意图

Fig.3 Schematic of pitot tube array and differential pressure transducer

## 2 试验流程

发动机单机工作时,另一台发动机的存在对羽流主流区造成的影响可忽略不计,故设计统一的双机安装支架,一次安装,单机、双机试验在一次关舱试验中完成。

图 4 为试验系统空间位置关系示意图。两台发动机的喷管出口中心相聚 150 mm,轴线夹角为  $5^\circ$ ,位于同一水平面  $xOy$  上。单机和双机羽流流场试验采用同一坐标系,即以 1 号发动机喷管出口中心为坐标原点  $O$ ,以 1 号发动机轴线为  $x$  轴,以 1 号发动机喷管出口远离 2 号发动机的半径方向为  $y$  轴。单机试验为 1 号发动机工作,双机试验为两台发动机同时工作。皮托管阵列移动范围距发动机出口平面 140 ~ 600 mm,在同一位置分别测量单机和双机工作时羽流流场压力,可对双机工作时的羽流干扰效应进行分析。

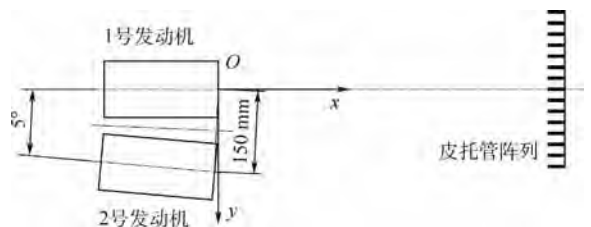


图 4 试验系统空间位置关系

Fig.4 Spatial relation of experimental system

氢氧发动机大气条件下单机和双机热试车如图5所示,燃烧室压力及喷管出口火焰稳定,证明发动机工作正常,燃烧状态稳定。进行真空羽流流场测量时,模拟发动机采用重复脉冲工作方式,点火时间设置为300 ms,保证舱内动态真空度以维持相对稳定的羽流流场形态,并保证燃烧室及喷管热结构安全。单机和双机点火工作时的动态真空度分别约为3 Pa和6 Pa。

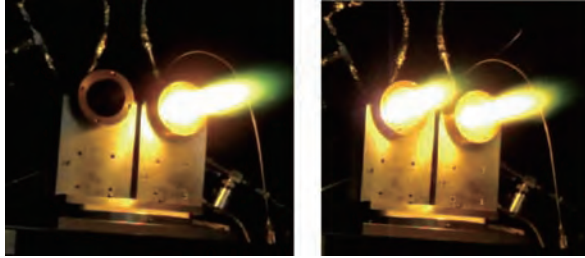


图5 大气环境下氢氧发动机单机和双机热试车  
Fig.5 Hot firing tests of single and dual hydrogen/oxygen engine(s) in atmospheric environment

### 3 结果与分析

图6和图7分别为皮托管阵列测得的氢氧发

动机单机羽流和双机干扰羽流的流场波后压力云图,云图通过离散测点线性插值生成。

通过对比,可以明显看出两台发动机中间的流场( $y = 140$  mm附近)形成了一块新的压力较高的“羽流干扰区”,这是由于两台发动机各自产生的羽流在膨胀过程中发生相互作用,羽流气体分子的碰撞在双机中线附近产生了2束压缩波,导致气流速度降低而压力升高。若把发动机自身产生的羽流称为“主流”,可以认为主流在干扰区产生了一股新的羽流,称为“干扰流”。干扰流向下游的膨胀速度比主流慢,使得在距发动机出口相同距离的羽流远场位置,干扰流压力高于主流压力,因此形成了向下游突出的流场压力图像。

通过云图的对比还可以看出,双机工作时羽流干扰的范围逐渐沿 $y$ 方向扩张,在 $x = 600$  mm处,羽流干扰范围未超过1号发动机喷管轴线,因此1号发动机轴线上半部分的流场未受到羽流干扰的影响,基本与单机工况流场相同。

图8(a)~(f)分别为皮托管阵列入口距1号发动机出口140、166、240、350、450和600 mm时,在单机和双机工况下测得的波后压力对比。从

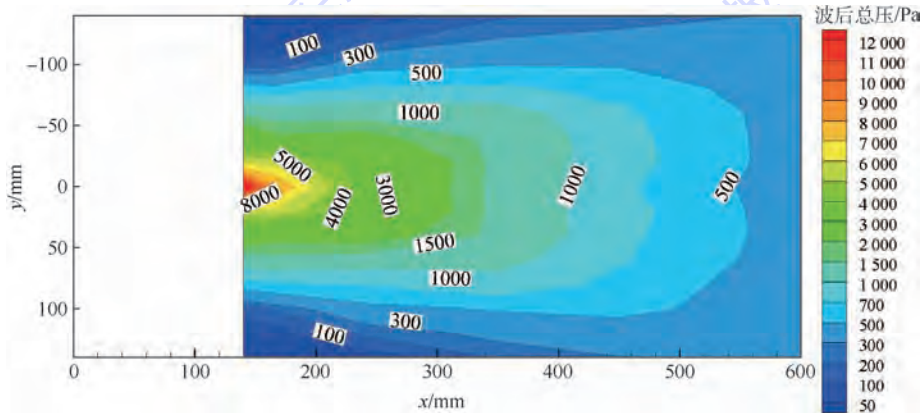


图6 氢氧发动机单机羽流流场波后压力云图

Fig.6 Plume flow field contour of pressure behind shock wave for single hydrogen/oxygen engine

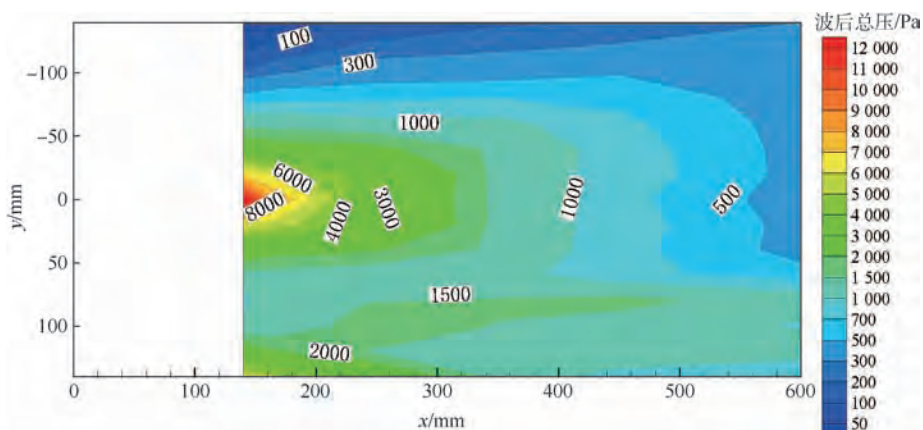


图7 氢氧发动机双机干扰羽流流场波后压力云图

Fig.7 Interacted plume flow field contour of pressure behind shock wave for dual hydrogen/oxygen engines

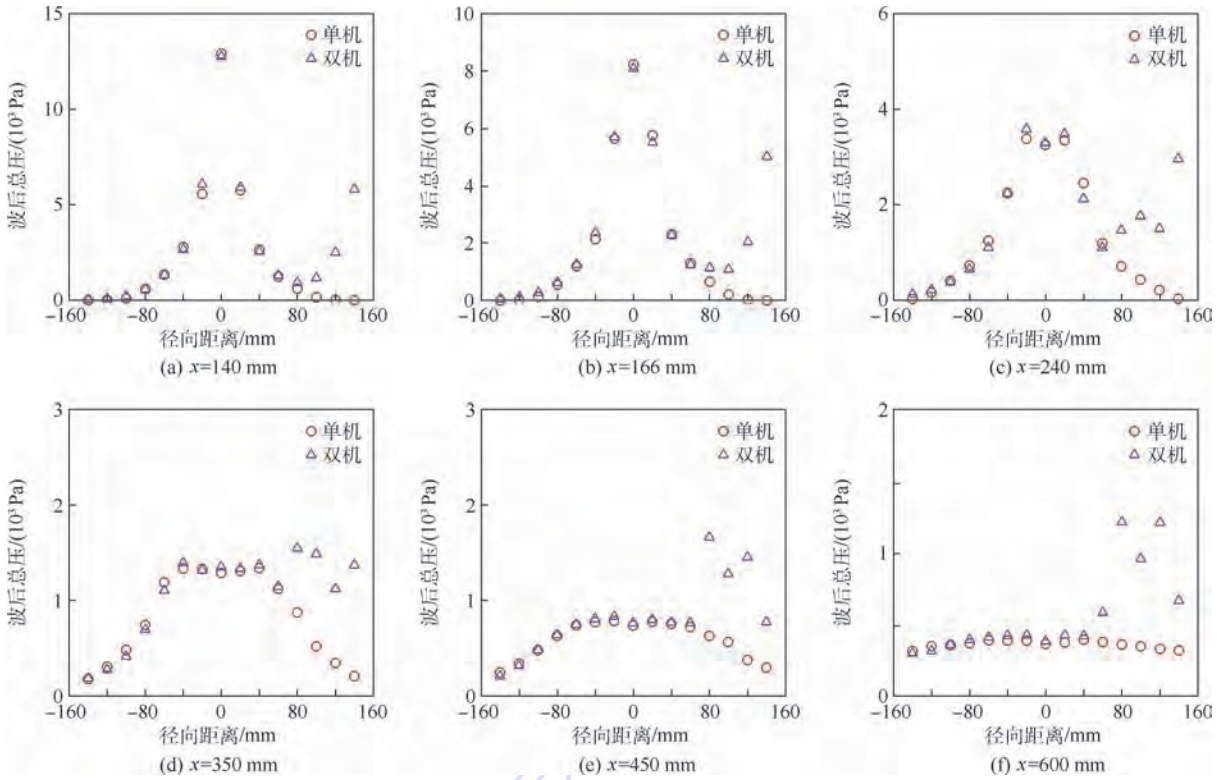


图 8 不同轴向距离的单机和双机羽流流场波后总压对比

Fig. 8 Comparison of plume flow field's total pressure behind shock wave between single engine and dual engines at different axial distances

图中可以看出,单机羽流流场波后压力显示了较好的对称性,沿  $y$  轴正方向,流场压力总体上先增大后减小。当  $x \geq 240$  mm 的工况开始时,压力最大值偏移了发动机轴线,这是由于气流经钟形喷管内敛形的壁面产生了压缩波束,压缩波束向流场下游传播的时候穿过了喷管轴线,导致该处压力变大。随着轴向距离  $x$  的增大,发动机轴线上的压力迅速降低,而径向上远离轴线的测点处的压力逐渐升高,因此同一径向上的压力梯度变小,压力散点显示的形状逐渐平缓,这是发动机羽流向真空中膨胀的结果。

通过图 8 中单、双机羽流流场波后总压的对比可以明显看出双机羽流干扰对流场压力的增强及其影响范围。需要注意的是当轴向距离较近时 ( $x \leq 240$  mm 的工况),双机工况测量结果右端散点的压力较高并不是羽流干扰的结果,而是因为测点位于 2 号发动机羽流主流区内。

由于羽流干扰发生在发动机双机对称面附近,可以计算得到对应不同轴向距离  $x$  的双机对称面的  $y$  坐标,如表 1 所示,即代表该坐标附近为不同轴向距离时羽流干扰发生的区域。将不同轴向距离  $x$  对应的  $y$  坐标与图 8 对照,可以看出随着轴向距离的增大,羽流干扰也逐渐增强,双机工

况压力与单机工况压力的比值增大,最高可以达到 5 倍以上。同时,羽流干扰的范围也随着轴向距离的增大而增大:当  $x = 140$  mm,仅有  $y = 80$  mm 这个测点位于羽流干扰区内;而当  $x = 600$  mm 时,  $y \geq 60$  mm 的 5 个测点都位于羽流干扰区内。

由图 8(e) 和 (f) 可以看出,在羽流干扰区内,位于双机对称面测点的压力小于相邻测点的压力,这是由于羽流干扰的压缩波束边界偏离双机对称面,气流受到压缩波束作用压力升高,越过压缩波束后压力降低,因此压力最大值偏离对称面(图 8(a) ~ (d) 由于测点位置的问题未能明显看出)。

表 1 不同轴向距离  $x$  对应的双机对称面所在的  $y$  坐标  
Table 1  $y$  coordinate at symmetry plane of dual engines corresponding to different axial distances  $x$  mm

轴向距离 $x$	对称面 $y$ 坐标
140	81.2
166	82.3
240	85.6
350	90.4
450	94.7
600	99.3

## 4 结 论

本文基于北京航空航天大学真空 PES 对氢氧发动机真空羽流干扰流场进行了试验研究,利用皮托管阵列测量了氢氧发动机单机羽流和双机干扰羽流的激波后总压场,分析了羽流干扰对流场参数的增强效应,结论如下:

1) 氢氧发动机单机羽流流场显示了良好的对称性,羽流在真空中迅速膨胀,压力沿喷管轴线方向快速下降。随着钟形喷管内敛型壁面产生的压缩波束穿过喷管轴线,在流场下游的位置,同一径向上的压力最大值偏离喷管轴线。随着轴向距离的增大,压力最大值偏移距离随之增大,同时压力分布变得平缓。

2) 氢氧发动机双机干扰羽流流场表明,两台发动机羽流主流之间的区域发生了羽流干扰,形成了 2 束压缩波,压缩波间的区域构成了羽流“干扰流”,干扰流的压力受到明显的增强,最高压力可达到单机羽流在相同位置压力的 5 倍以上。羽流干扰范围随着轴向距离的增大而增大,但在试验中未超过喷管轴线。随着气流穿过干扰流的压缩波束边界而到达发动机双机对称面,同一径线方向干扰流最大压力值的位置偏离对称面。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] ERMOLOV V I, LANGRAN J C, REBROV A K, et al. Experimental study of the interaction of a pair of hypersonic jets [ J ]. Journal of Applied Mechanics & Technical Physics, 1983, 24 ( 3 ): 379-383.
- [ 2 ] DANKERT C, KOPPENWALLNER G. Experimental study of the interaction between two rarefied free jets [ C ] // Proceedings of the 14th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics. New York: AIP Publishing, 1984: 477-484.
- [ 3 ] WU J, CAI G, HE B, et al. Experimental and numerical investigations of vacuum plume interaction for dual hydrogen/oxygen thrusters [ J ]. Vacuum, 2016, 128: 166-177.
- [ 4 ] DAGUM L, ZHUH S K. Three-dimensional particle simulation of high altitude rocket plumes: AIAA-92-2913 [ R ]. Reston: AIAA, 1992.
- [ 5 ] XIAO Z, CHENG H, ZHOU H. Plume interaction in parallel multi-thrusters propulsion system and the effect on backflow: AIAA-2006-3599 [ R ]. Reston: AIAA, 2006.
- [ 6 ] DAGUM L, ZHU S K. Direct simulation Monte Carlo simulation of the interaction between rarefied free jets [ J ]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1994, 31 ( 6 ): 960-964.
- [ 7 ] CHIROKOV I A, ELIZAROVA T G, LENGAND J C, et al. Experimental and numerical investigation of rarefied interacting plumes [ C ] // Proceedings of the 23rd International Symposium

on Rarefied Gas Dynamics. New York: AIP Publishing, 2003: 572-579.

- [ 8 ] GERASIMOV Y I, KRYLOV A N, YARYGIN V N. Structure and gas parameters of plume expiring into vacuum from four nozzles located around the space vehicle case [ C ] // Proceedings of the 25th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics. New York: AIP Publishing, 2006: 610-615.
- [ 9 ] GERASIMOV Y I, YARYGIN V N. Problems of gas-dynamical and contaminating effect of exhaust plumes of orientation thrusters on space vehicles and space stations [ C ] // Proceedings 25th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics. New York: AIP Publishing, 2006: 805-811.
- [ 10 ] GERASIMOV Y I, YARYGIN V N, KRYLOV A N, et al. Modelling of the flow structure in a composite jet behind two thrusters located near the spacecraft case [ J ]. Thermophysics and Aeromechanics, 2009, 16 ( 3 ): 375-383.
- [ 11 ] YARYGIN V N, GERASIMOV Y I, KRYLOV A N, et al. Gas dynamics of spacecraft and orbital stations ( review ) [ J ]. Thermophysics and Aeromechanics, 2011, 18 ( 3 ): 333-358.
- [ 12 ] HOLZ A, DETLEFF G, HANNEMANN K, et al. Experimental investigation of two interacting thruster-plumes downstream of the Nozzles [ C ] // Space Propulsion. Göttingen: DLR, 2012: 205-208.
- [ 13 ] 吴靖, 张国舟, 蔡国飙. 真空应用电火花点火的氢氧发动机设计与试验 [ J ]. 航空动力学报, 2014, 29 ( 2 ): 398-404.
- WU J, ZHANG G Z, CAI G B. Design and experiment of gaseous hydrogen/oxygen engine igniting with electric spark igniting in vacuum [ J ]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29 ( 2 ): 398-404 ( in Chinese ).
- [ 14 ] WANG W, CAI G, ZHOU J. Large-scale vacuum vessel design and finite element analysis [ J ]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25 ( 2 ): 189-197.
- [ 15 ] 王文龙, 周建平, 蔡国飙. 羽流效应地面模拟试验系统关键技术发展 [ J ]. 航空动力学报, 2012, 27 ( 4 ): 900-906.
- WANG W L, ZHOU J P, CAI G B. Development of vacuum plume effects ground simulation experimental system key technology [ J ]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27 ( 4 ): 900-906 ( in Chinese ).
- [ 16 ] 凌桂龙, 蔡国飙, 张建华. 基于真空羽流试验的洁净真空系统设计 [ J ]. 航空动力学报, 2013, 28 ( 5 ): 1173-1179.
- LING G L, CAI G B, ZHANG J H. Oil-free vacuum system design based on vacuum plume experiment [ J ]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28 ( 5 ): 1173-1179 ( in Chinese ).
- [ 17 ] 马树微, 吴靖, 贺碧蛟, 等. 氢氧发动机模型真空羽流场试验和仿真研究 [ J ]. 航天器环境工程, 2015, 32 ( 2 ): 157-161.
- MA S W, WU J, HE B J, et al. Experimental and numerical study of vacuum plume field for a hydrogen/oxygen model thruster [ J ]. Spacecraft Environment Engineering, 2015, 32 ( 2 ): 157-161 ( in Chinese ).

### 作者简介:

吴靖 男, 博士, 讲师, 硕士生导师。主要研究方向: 真空羽流及其效应、流场显示。

蔡国飙 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 真空羽

流及其效应、火箭发动机仿真优化设计与重复使用技术、固液混合火箭发动机技术及应用。

贺碧蛟 男,博士,教授,硕士生导师。主要研究方向:真空羽流及其效应。

## Experimental investigation on vacuum plume interaction of hydrogen/oxygen engines

WU Jing<sup>1,\*</sup>, CAI Guobiao<sup>2</sup>, HE Bijiao<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** To investigate the effects of plume interaction caused by multiple spacecraft engines on the flow field structure and parameters, the pressure fields of single plume and dual plumes generated by hydrogen/oxygen engines with 60 N thrust were determined using a pitot tube array in vacuum plume effect experimental system (PES) of Beihang University. The experimental results show that the pressure in the single plume field decreases rapidly with the increase of axial distance, and the location of the maximum pressure along the same axial distance gradually deviates from the nozzle axis due to the compression waves generated from the bell nozzle. Plume interaction occurs in the region between the dual prime plumes, whose action range and intensity increase with the increase of axial distance. To the highest degree, the pressure of the interacted plume can be more than 5 times that of the single plume at the same point. The location of the maximum pressure along the same axial distance gradually deviates from the symmetry plane of the dual engines due to the compression waves' boundary of the interacted plume.

**Keywords:** vacuum plume; plume interaction; hydrogen/oxygen engine; pressure field; compression waves

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0251

# 能量有效的无线传感器网络分簇路由协议

刘伟<sup>1,2</sup>, 杜佳鸿<sup>2,3</sup>, 贾素玲<sup>1</sup>, 蒲菊华<sup>2,3,\*</sup>

(1. 北京航空航天大学 经济管理学院, 北京 100083; 2. 深圳北航新兴产业技术研究院, 深圳 518057;  
3. 北京航空航天大学 计算机学院, 北京 100083)

**摘 要:** 无线传感器网络(WSNs)的应用前景非常广阔,得到了越来越广泛的关注,其中网络节能、降低功耗、延长寿命是WSNs必须解决的问题。对WSNs中典型的分簇路由协议进行了详细分析,通过对比研究,提出了一种基于节点间相关性的能量有效分簇路由协议——BCCP协议。在BCCP协议中,能耗均衡分簇算法利用节点间位置相关性与节点剩余能量,降低分簇迭代次数,得到分布均匀的簇首节点,降低簇内成员节点与簇首节点的通信能耗,以此降低网络能耗;降低能耗分簇算法利用节点间数据相似性与节点间协同性,降低簇内通信、簇间通信的数据量,以此降低网络能耗。实验结果表明,BCCP协议在能耗均衡、网络存活节点数、降低能耗方面与其他方法相比均有明显的优势。

**关键词:** 无线传感器网络(WSNs); 能耗; 均衡; 分簇; 路由

**中图分类号:** V221+.3; TB553

**文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5965(2019)01-0050-07

微电子技术、无线通信技术的发展以及计算技术的提高,推动了多功能的低功耗传感器的进步,使其在自身微小体积内能够实现采集信息、处理数据和无线通信等多种功能。无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)是一种分布式传感器网络,其末梢是可以感知外部世界的廉价传感器,目的是共同感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息。

WSNs作为当今信息领域新的研究热点,待发现和研究的新技术有很多,主要包括:定位技术、路由协议、网络安全、时间同步以及数据融合等<sup>[1]</sup>。其中核心是路由技术,由于WSNs受环境以及自身约束的影响,不同实际情况中的路由协议差别可能很大,因此对于路由协议,没有一个通用的方法,而是根据具体的要求提出独有的设计标准<sup>[2]</sup>。

从路由结构要素出发,可以设计为2种路由

协议:平面路由协议和层次路由协议,其中层次路由协议又叫做分簇路由协议。前者设计简单,健壮性良好,但建立、维护路由的开销大,适合小规模网络;后者扩展性好,适合大规模网络,且簇首节点是整个网络的关键,其失效将导致路由失败<sup>[3]</sup>。分簇式的拓扑结构有利于实际中的分布式算法,因此国内外有许多科研人员对WSNs中的分簇路由协议进行了研究,并提出了许多算法、协议<sup>[4]</sup>。

低功耗自适应集簇分层型(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH)协议是最典型的分簇算法,网络生命的时间被分为多个回合(rounds),每个回合包括2个阶段:簇建立阶段、数据传输阶段。然而LEACH算法在很多方面还存在的不足,簇首选择只是随机选择,非簇首节点在选择加入簇时,仅依据接收信号的强度。国内外因此已经采取了很多策略进行改进,如对

收稿日期: 2018-05-02; 录用日期: 2018-07-28; 网络出版时间: 2018-09-03 09:57

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180830.1110.002.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180830.1110.002.html)

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1002000); 航空科学基金; 国家自然科学基金(61502320); 深圳市基础研究计划(JCYJ20160419152942010)

\* 通信作者. E-mail: [pujh@buaa.edu.cn](mailto:pujh@buaa.edu.cn)

**引用格式:** 刘伟, 杜佳鸿, 贾素玲, 等. 能量有效的无线传感器网络分簇路由协议[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 50-56. LIU W, DU J H, JIA S L, et al. Energy efficient clustering routing protocol for wireless sensor networks[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 50-56 (in Chinese).

DCHS<sup>[5]</sup>、LEACH-improve<sup>[6]</sup>和 LEACH-CH<sup>[1,7]</sup>都提出了一些改进。之后,固定簇半径的分簇协议(Hybrid Energy-Efficient Distributed clustering, HEED)<sup>[8]</sup>算法又被提出,HEED考虑节点剩余能量和通信代价 2 个指标来选举簇首节点。然而在实际情况下,由于基站一般离整个网络的距离很远,频繁多次地远距离传输会加大节点的消耗能量,为了解决这些问题,国内外的学者也提出了一些改进算法,如 PEGASIS<sup>[9]</sup>、TEEN<sup>[10]</sup>、EEUC<sup>[11]</sup>、OHEED<sup>[1,12]</sup>和 HEED-FT<sup>[1,13]</sup>,但这些协议的一个主要弊端都是簇首节点的能量消耗过大,导致网络生存周期变短。针对具体环境,Mini 等<sup>[14]</sup>针对目标覆盖问题,使用人工蜂群算法和粒子群优化算法,解决了节点部署问题,以使满足覆盖要求的最少节点处于工作状态,延长了网络寿命。

通用设计的目标一般需要考虑以下的设计:算法简洁性、算法可靠性、网络自适应性、服务质量及优化能力<sup>[15]</sup>。目前的分簇路由协议在网络能耗均衡与降低能耗方面还有较大的提升空间,虽然部分协议能够得到分布均匀的簇首节点,但是其在簇建立阶段牺牲了较多的能耗与较大的时延,在节点通信开销方面仍存在改进的方法。因此,针对以上问题,本文提出了一种基于节点间相关性的能量有效分簇路由协议——BCCP 协议。

## 1 BCCP 协议整体设计

在 LEACH、HEED 路由协议的基础上,BCCP 协议还考虑了以下相关因素:①节点间位置相关性,在 WSNs 中,节点间位置相距近,距离小,其通信能量消耗也小。②节点间数据相似性,传感器节点的感知数据、感知类型与其他邻近节点监测体现的价值相似。成簇时应获得更多的数据相似节点,数据融合效率才会更高,数据量才会降低。③节点间协同性,WSNs 中的节点不是各自独立的,网络需要节点间合作才能产生具有价值的信息。具有协同性的节点应在同一簇内,以降低数据传输能耗。

当前的大多数分簇路由协议在进行簇首节点选择时一般的选举因素只是剩余能量,没有考虑节点与节点之间的其他相关性因素<sup>[16]</sup>。因此,本文提出了一种基于节点间相关性的能量有效分簇路由协议——BCCP 协议,该协议主要分为 2 个部分:第 1 部分为能耗均衡分簇算法 BCCP-EBA,该算法是 BCCP 协议的主要支撑,考虑了节点自身的剩余能量、节点能耗以及节点位置相关性来选择簇首节点和剩余节点入簇,使得簇首节点选

举阶段时间短、开销小。第 2 部分为降低能耗分簇算法 BCCP-ESA,该算法是对 BCCP-EBA 能耗均衡分簇算法的完善,考虑了节点间位置相关性,能耗协同性作为节点入簇的依据,以及数据相似性和节点能耗作为簇内通信的依据,以此降低簇内通信以及网络整体的能耗。图 1 展示了 BCCP 协议的整体设计。

与 LEACH、HEED 等路由协议相比,BCCP 协议使用一种基于节点间相关性的新颖的簇建立方式与数据传输方式,可以达到降低网络能耗以及延长节点生存时间的目的。



图 1 BCCP 协议整体设计

Fig. 1 Integrated design for BCCP

## 2 能耗均衡分簇算法 BCCP-EBA

为了实现能耗均衡的 WSNs,本文提出了一种基于节点间位置相关性与节点剩余能量的 WSNs 能耗均衡分簇算法 BCCP-EBA。基于该算法的分簇路由协议按照轮次进行工作,簇建立阶段分为多个迭代处理进行,一个迭代代表着一个节点接听全部邻居节点信息的过程。该分簇算法将节点间的位置相关性加入至分簇路由协议中,选取分布均匀的簇首节点,选取通信能耗低的簇内成员节点加入簇。

节点间的位置相关性体现于节点间的通信能耗之中,位置远的节点间通信能耗大。因此,可以

将节点与周围邻居节点间的通信层次作为能耗判断参数。任意节点拥有多个通信能级,该节点通过变换通信能级与远近不一的邻居节点通信,即与该节点位置近的节点选择低通信能级,与该节点位置远的节点选择高通信能级。使用节点最小通信能耗关系式获得该节点与所有邻居节点进行通信的最小能量消耗为

$$N_{\text{cost}} = \frac{\sum_{i=1}^M M_i}{M} \quad (1)$$

式中: $M$ 为该节点的邻居节点数目; $M_i$ 为节点 $A$ 与第 $i$ 个邻居节点间进行通信时使用的通信能级。

协议同样采用节点自身剩余能量与节点间的位置相关性作为分簇参数选举簇首节点以及选择加入簇。参考节点自身剩余能量来选择随机选择节点当选为临时簇首节点的概率,这样会增大剩余能量大的节点临时簇首节点的概率。通过节点自身剩余能量与周围邻居节点的剩余能量共同决定节点成为临时簇首节点的概率,以此增加簇建立阶段初始时的临时簇首节点数目,加速簇首节点选举的过程。节点随机生成临时簇首节点的概率 $C_{\text{prob}}$ 计算式为

$$C_{\text{prob}} = \max\left(C_{\text{prob}} \frac{E_{\text{residual}}}{E_{\text{max-ner}}}, P_{\text{min}}\right) \quad (2)$$

式中: $C_{\text{prob}}$ 为初始成为临时簇首节点的百分比; $E_{\text{residual}}$ 为节点的剩余能量; $E_{\text{max-ner}}$ 为该节点的邻居中剩余能量最大的节点的剩余能量值; $P_{\text{min}}$ 为 $C_{\text{prob}}$ 的最小值。节点以 $C_{\text{prob}}$ 与随机数 $\text{Ran}$ 进行比较,若大于或者等于 $\text{Ran}$ ,则该节点成为临时簇首节点,反之则为普通节点。

在选择完最终簇首节点后,非簇首节点直接在邻居簇首节点中选择通信能耗最小的簇首节点作为自己加入的簇首节点。

### 3 降低能耗分簇算法 BCCP-ESA

为了进一步降低簇首节点的能耗以及簇内通信能耗,本文对节点间的数值相似性、协同性进行了研究,提出了一种降低能耗分簇算法 BCCP-ESA。

该算法在能耗均衡分簇算法 BCCP-EBA 的基础上改进分簇路由协议,将节点间数据相似性引入簇首节点选举阶段、节点入簇阶段,以此选择通信能耗小且数值相似的簇首节点;将节点间数据相似性引入网络数据传输阶段,以此降低簇内通信数据量;将节点间协同性引入网络数据传输阶段,以此降低簇内、簇间通信数据量。

在能耗均衡分簇算法 BCCP-EBA 的能量消

耗计算中加入数值差异通信能耗,以此加入节点间数值相似性对簇首节点选举以及节点选择加入簇的影响。引入数值差异通信能耗后的节点通信能耗计算式为

$$N_{\text{A-cost}} = \alpha \frac{\sum_{i=1}^M M_i}{M} + \beta \frac{\sum_{i=1}^M A_i}{M} \quad (3)$$

式中: $\alpha$ 为节点间位置相关性对通信能耗的影响因子; $\beta$ 为节点间数据相似性对通信能耗的影响因子,且 $\alpha + \beta = 1$ ; $A_i$ 为第 $i$ 个节点与计算节点间通信时传输的数值平均位数。

簇首节点选择完成后,对于任意协同的节点,若该节点与其他节点具有协同性,该节点的邻居节点中存在最终簇首节点且此簇首节点与该节点具有协同性,则该节点选择此簇首节点作为簇首节点;若该节点的邻居节点中存在多个最终簇首节点,则选择通信能耗小的簇首节点作为自己的簇首节点;若该节点的邻居节点中不存在与该节点具有协同性的簇首节点,则该节点在协同节点中选择与簇首节点通信能耗最小的节点作为协同中转节点,并将此中转节点的簇首节点作为自己加入的簇首节点。

将降低能耗分簇算法 BCCP-ESA 加入分簇路由协议中,可以降低簇内通信的数据量,降低簇间通信的数据量,以此保护节点能耗,延长网路偶的生命周期。

对于 BCCP-ESA 算法,在簇建立阶段,利用式(3)修改节点间的通信能耗,修改通信能耗计算后,利用能耗均衡分簇算法 BCCP-EBA 的分簇机制对网络中的簇首节点选择及节点选择入簇产生影响。在数据传输阶段,进行簇内通信时直接使用节点间数值差异传输即可。

簇首节点选举完成后,利用节点间协同性选择协同节点的簇首节点、中继节点,对于任意节点在选择加入通信能耗最小的簇首节点时,按照如下步骤进行:

**步骤 1** 该节点感知周围存在的簇首节点以及与该节点具有协同性的节点,转至步骤 2。

**步骤 2** 判断该节点的邻居节点中是否存在与该节点协同的节点,若不存在,则转至步骤 3,若存在,转至步骤 4。

**步骤 3** 在邻居簇首节点中选择通信能耗最小的簇首节点作为该节点加入的簇首节点,若该节点被最终簇首节点覆盖,则结束。

**步骤 4** 判断该节点的邻居协同节点中是否存在簇首节点,若存在,转至步骤 5,否则,转至步骤 6。

**步骤 5** 该节点将邻居协同节点中的簇首节点作为该节点加入的簇首节点,若该节点被最终簇首节点覆盖,则结束。

**步骤 6** 该节点在协同节点中选择与簇首节点通信能耗最小的节点作为协同中转节点,并将此节点的簇首节点作为该节点加入的簇首节点,若该节点被最终簇首节点覆盖,则结束。

## 4 仿真实验

在 WSNs 中,由于其自身的特点,对于大规模部署的 WSNs,在真实物理环境的测量中很难实现,只能利用计算机的模拟仿真实验对研究的协议、算法等进行测试,对其性能进行分析评价。本文提出的 BCCP 分簇路由协议采用 MATLAB 平台进行仿真实验。

### 4.1 仿真环境设置

本实验的仿真基于 MATLAB 7.1 平台上进行,仿真参数设计如表 1 所示。

仿真实验主要选择了 LEACH、HEED 分簇路由协议与 BCCP 协议进行比较,并且分别与 BCCP 协议中的能耗均衡分簇算法 BCCP-EBA 与降低能耗分簇算法 BCCP-ESA 进行比较,验证算法的有效性,主要的指标有簇建立消耗能量、网络存活节点、网络整体能耗。本文实验以 50% 的节点死亡作为网络失效的标志。

表 1 仿真环境参数设置

Table 1 Parameter setting of simulation environment

参数	数值
网络区域/(m × m)	1000 × 1000
节点数量	1000
数据报文大小/(Byte · package <sup>-1</sup> )	2000
随机生成的临时簇首节点百分比	5
随机生成临时簇首节点概率最小值	$5 \times 10^{-4}$
节点初始能量/J	4

### 4.2 实验结果分析

为了分析 BCCP-EBA 与 BCCP-ESA 对 BCCP 协议的影响,将 BCCP 协议分为 3 个版本:①能耗均衡分簇算法 BCCP-EBA;② BCCP-VALUE,在 BCCP-EBA 基础上加入节点间数据相似性后实现的分簇路由协议;③ BCCP-COO,在 BCCP-EBA 基础上加入节点间协同性后实现的分簇路由协议。

为了对比节点间数据相似性与节点间协同性对网络能耗的影响,在 LEACH 协议基础上实现了如下 2 个协议:① LEACH-VALUE,在 LEACH 的基础上加入节点间数据相似性后实现的分簇路由协议;② LEACH-COO,在 LEACH 基础上加入节

点间协同性后实现的分簇路由协议。

#### 4.2.1 BCCP-EBA 协议仿真结果

LEACH、HEED 和 BCCP-EBA 分簇路由协议在每软次簇建立阶段消耗的能量随时间的变化曲线如图 2 所示。图中,横坐标为网络工作进行的轮数,用来代表网络工作的时间,纵坐标为协议在簇建立阶段消耗的能量。

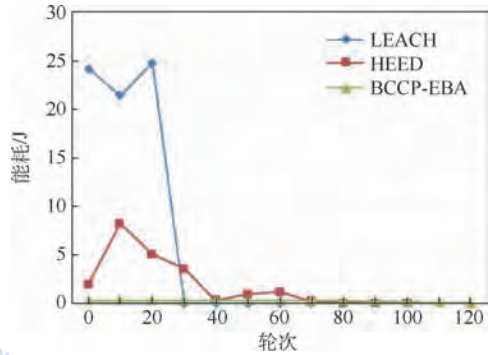


图 2 簇建立阶段消耗的能量对比

Fig. 2 Comparison of energy consumption for construction of clusters

由图 2 可知,BCCP-EBA 分簇路由协议在簇建立阶段的能耗一直处于一个较低的水平;HEED 分簇路由协议在存活节点较多时需要消耗较多的能量进行分簇,存活节点数目小时,簇建立阶段的能耗也较低;LEACH 分簇路由协议中的分簇能耗较大,主要是因为其簇内部存在个别成员节点与簇首节点距离过大,导致能耗过大。

LEACH、LEACH-COO、BCCP-EBA 和 BCCP-COO 分簇路由协议的存活节点数目随轮次的变化如图 3 所示。图中纵坐标为整个网络中的存活节点的数目。图 4 中 LEACH-COO 分簇路由协议相对于 LEACH 协议,其生存时间得到了微小的提升;图 3 中 BCCP-COO 分簇路由协议相对于 BCCP-EDA 协议,其生存时间得到了一定程度的提升,将网络的生存时间延长了 5% 左右。

LEACH、LEACH-COO、BCCP-EBA 和 BCCP-COO 分簇路由协议的网络整体能耗随轮次的变化曲线如图 4 所示。图 4 中在 LEACH 引入节点间数据相似性要素后,其网络整体能耗有了一定的改善,但是效果很不明显;图 4 中在 BCCP-EBA 分簇路由协议中引入节点间数据相似性要素后,网络整体能耗降低了 5% 左右。所以,引入节点间数据相似性要素可以降低网络的能耗,但是效果不明显。

#### 4.2.2 BCCP 协议仿真结果

BCCP-EBA、BCCP-COO、BCCP-VALUE 和 BCCP 分簇路由协议的存活节点数目随软次的变

化曲线如图5所示。由图5可知,在将能耗均衡分簇算法 BCCP-EBA 与降低能耗分簇算法 BCCP-EA 进行融合后, BCCP分簇路由协议能够更

好地进行工作,存活节点数目、网络生存时间均有改善。

BCCP-VALUE 协议中节点位置相关性  $\alpha$  与节点数据相似性  $\beta$  在进行分簇时的权重比例对网络的影响如图6所示。由图6可知,节点位置相关性对于网络能耗的影响强于节点数据相似性,当节点数据相似性为0.7时,网络性能最优。这是因为在节点的通信模型中,能耗与  $kd^2$  成正比,  $k$  为数据量,即节点数据相似性的影响因素;  $d$  为节点间距离,即为节点位置相关性的影响因素。因此,节点位置相关性对网络性能影响较大。

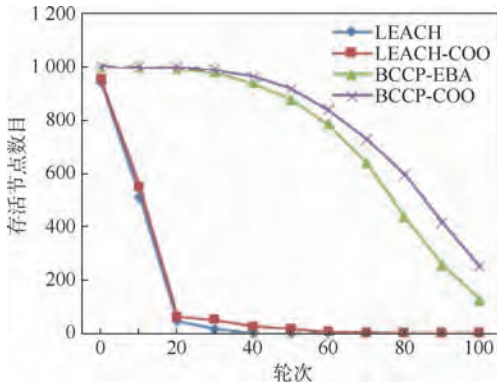


图3 LEACH、LEACH-COO、BCCP-EBA 和 BCCP-COO 分簇路由协议的网络存活节点数目对比  
Fig. 3 Comparison of number of live nodes in network of LEACH, LEACH-COO, BCCP-EBA and BCCP-COO clustering routing protocol

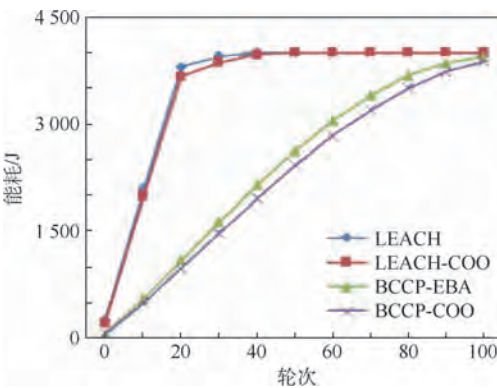


图4 网络整体能耗对比

Fig. 4 Comparison of complete network energy consumption

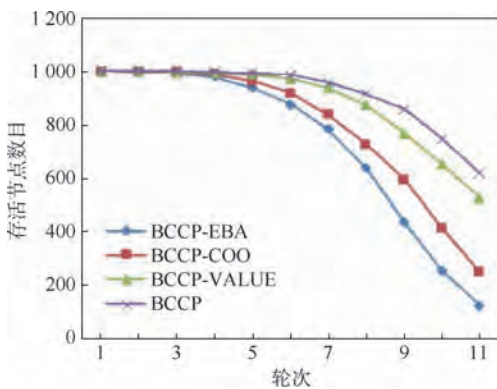


图5 BCCP-EBA、BCCP-COO、BCCP-VALUE 和 BCCP 分簇路由协议的网络存活节点数目对比  
Fig. 5 Comparison of number of live nodes in network of BCCP-EBA, BCCP-COO, BCCP-VALUE and BCCP clustering routing protocol

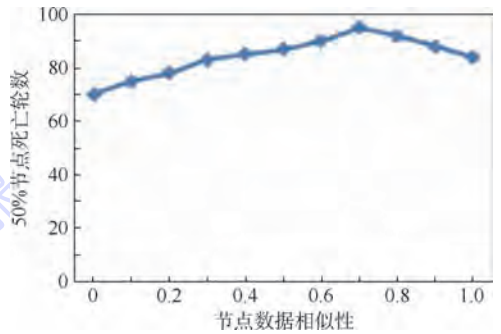


图6 不同  $\alpha, \beta$  取值对网络性能的影响  
Fig. 6 Influence of different  $\alpha$  and  $\beta$  on network performance

## 5 结论

1) 以节点间的位置相关性为依据计算节点能耗,以节点自身的剩余能量与邻居节点最大剩余能量计算随机生成簇首节点的概率,以节点能耗为依据得到分布均匀的簇首节点,以节点能耗作为节点入簇的依据,以此使得簇首节点选举阶段时间短、开销小,初始时随机生成的临时簇首节点数目稳定。

2) 以节点间的位置相关性和节点间数据相似性为依据共同计算节点能耗,以节点能耗和协同性作为节点入簇的依据,以节点间数据相似性和协同性作为簇内单跳通信的依据,以此降低簇内通信、簇间通信的数据量,降低节点自身、网络整体的能耗。

## 参考文献 (References)

[ 1 ] PRABHU B, MAHALAKSHMI R, NITHYA S, et al. A review of energy efficient clustering algorithm for connecting wireless sensor network fields [ J ]. Social Science Electronic Publishing, 2013, 2(4) : 477-481.  
[ 2 ] IWANICKI K, STEEN M V. Multi-hop cluster hierarchy maintenance in wireless sensor networks: A case for gossip-based protocols [ C ] // Proceedings of the 6th European Conference on

- Wireless Sensor Networks. Berlin:Springer,2009:102-117.
- [ 3 ] IWANICKI K,STEEN M V. On hierarchical routing in wireless sensor networks[C]// International Conference on Information Processing in Sensor Networks. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009:133-144.
- [ 4 ] WENDI R H, ANANTHA C, HARI B. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]// Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2000:1-10.
- [ 5 ] HANDY M J, HAASE M, TIMMERMANN D. Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection[C]// 4th International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2002:368-372.
- [ 6 ] 黄利晓,王晖,袁利永,等. 基于能量均衡高效 WSN 的 LEACH 协议改进算法[J]. 通信学报, 2017, 38( Z2 ):2017270.
- HUANG L X, WANG H, YUAN L Y, et al. Improved LEACH protocol algorithm for WSN based on energy balance and high efficiency[J]. Journal of Communications, 2017, 38( Z2 ): 2017270(in Chinese).
- [ 7 ] 陈晨,杨丽红. 无线传感器网络 LEACH 协议能耗的改进[J]. 计算机系统应用, 2017, 26(11):205-212.
- CHEN C, YANG L H. Energy consumption improvement of LEACH in WSNs[J]. Computer Systems & Applications, 2017, 26(11):205-212(in Chinese).
- [ 8 ] YOUNIS O, FAHMY S. HEED: A hybrid energy-efficient distributed clustering approach for Ad hoc sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4): 366-379.
- [ 9 ] LINDSEY S, RAGHAVENDRAC S. PEGASIS: Power efficient gathering in sensor information systems[C]// Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2002:1125-1130.
- [ 10 ] MANJESHWAR A, AGRAWAL D. TEEN: A routing Protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks[C]// Proceedings 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2001:2009-2015.
- [ 11 ] LI C, YE M, CHEN G H, et al. An energy-efficient unequal clustering mechanism for wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems(MASS'05). Piscataway, NJ: IEEE Press, 2005:596-604.
- [ 12 ] GUPTA P, SHARMA A K. Clustering-based optimized HEED protocols for WSNs using bacterial foraging optimization and fuzzy logic system[J]. Soft Computing, 2017(1):1-20.
- [ 13 ] ZHOU Y, WANG X, WANG T, et al. Fault-tolerant multipath routing protocol for WSN based on HEED[J]. International Journal of Sensor Networks, 2016, 20(1):37-45.
- [ 14 ] MINI S, UDGATA S, SABAT S L. Sensor deployment and scheduling for target coverage problem in wireless sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(3):636-644.
- [ 15 ] SHEMSHAKI M, SHAHHOSEINI S. Energy efficient clustering algorithm with direct paths supports[C]// International Conference on Signal Processing Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009:277-281.
- [ 16 ] SUNDEEP P, BHASKAR K, RAMESH G. The impact of spatial correlation on routing with compression in wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2004:28-35.

#### 作者简介:

刘伟 男,博士研究生,助理研究员。主要研究方向:数据分析、信息系统和无线传感器网络。

杜佳鸿 男,硕士研究生。主要研究方向:城市大数据。

贾素玲 女,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:管理信息系统。

蒲菊华 女,博士,副教授,硕士生导师。主要研究方向:智慧城市、城市计算和无线传感器网络。

# Energy efficient clustering routing protocol for wireless sensor networks

LIU Wei<sup>1,2</sup>, DU Jiahong<sup>2,3</sup>, JIA Suling<sup>1</sup>, PU Juhua<sup>2,3,\*</sup>

(1. School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100083, China;

2. Research Institute of Beihang University in Shenzhen, Shenzhen 518057, China;

3. School of Computer Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Wireless sensor networks (WSNs) have attracted extensive attention due to their wide range of potential applications. Network energy conservation, energy consumption reduction and lifetime extension are problems which must be solved. In this paper, some concrete analyses on the typical clustering protocols have been made, and based on the comparative study, an energy efficient clustering routing protocol—BCCP based on node correlation for wireless sensor networks is proposed. With the use of node location correlation and residual energy, energy consumption balancing algorithm reduces clustering iteration times. Then uniform distribution of cluster head nodes is obtained and communication energy consumption between cluster head nodes and member nodes is reduced. Therefore, the algorithm reduces energy consumption of network. With the use of data similarity and cooperative correlation among nodes, energy consumption reduction algorithm reduces data traffic of internal-cluster and external-cluster communication. Therefore, the algorithm reduces energy consumption of network. The experimental results show that BCCP has a distinct advantage in balancing, number of live nodes and reducing energy consumption comparing to other current methods.

**Keywords:** wireless sensor networks (WSNs); energy consumption; balance; clustering; routing

**Received:** 2018-05-02; **Accepted:** 2018-07-28; **Published online:** 2018-09-03 09:57

**URL:** [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180830.1110.002.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180830.1110.002.html)

**Foundation items:** National Key R & D Program of China (2017YFB1002000); Aeronautical Science Foundation of China; National Natural Science Foundation of China (61502320); Science Foundation of Shenzhen City in China (JCYJ20160419152942010)

\* **Corresponding author.** E-mail: pujh@buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0175

# 临近空间风切变特性及其对飞行器的影响

杨钧烽<sup>1</sup>, 肖存英<sup>1,\*</sup>, 胡雄<sup>1</sup>, 程旋<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 基于 MERRA 再分析资料的风场数据, 根据数理统计理论, 对酒泉 (39.1°N, 98.5°E) 上空临近空间的 20~78 km 的大气风场进行了风切变特征分析, 并分析了临近空间风切变对飞行器的影响。研究表明, 临近空间最多风向在 1 月和 10 月为西风, 7 月为东风, 4 月在 50 km 以下为西风, 以上为东风; 99% 概率最大风速在 1 月最大; 最大风引起的风切变存在一定的高度范围。根据最大风和最小风给出了综合矢量风。此外发现临近空间风切变对飞行器产生的风攻角显著, 对马赫数为 3、5 和 8 的飞行器产生风攻角在 69 km 最大, 分别为 8.5°、5.1°和 3.2°。

**关键词:** 临近空间; 风切变; 综合矢量风; 飞行器; 风攻角

**中图分类号:** V419; V219; P351; P421

**文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5965(2019)01-0057-09

临近空间是距离地面 20~100 km 的空间范围, 是航空和航天的结合区域<sup>[1]</sup>。临近空间环境特殊, 在军事方面既可以减少地面攻击, 也可以提高军事侦察和对地攻击的精度; 另外, 临近空间也可以应用于通信、天气预报、环境监测等民用领域。因此临近空间具有显著的战略优势, 日益成为各国激烈争夺的制高点。近几年, 临近空间飞行器发展迅速, 出现了飞艇、气球、超高空飞机、再入滑翔飞行器、高超声巡航飞行器、火箭动力飞行器等类别, 临近空间飞行器是当今科学研究的热门领域<sup>[2-3]</sup>。

临近空间是火箭的通过区、临近空间飞行器的飞行区域, 是返回式卫星、无控再入目标、危险小行星陨落等的必经区。这一区域的大气环境直接影响临近空间飞行器的设计、技术验证和作战使用<sup>[4-6]</sup>。例如: 临近空间温度直接影响飞行器的仪器性能和材料温度疲劳损伤; 臭氧具有很强的腐蚀性; 中子辐射能引起单粒子效应等; 密度、

风场对临近空间飞行器的姿态和位置产生影响<sup>[7-9]</sup>。而且临近空间大气环境复杂多变, 地域、时域变化强, 在时间和空间上存在多种尺度的变化。这是由于临近空间存在复杂的动力-辐射和光化学过程。临近空间同时受到上下层的影响<sup>[10]</sup>, 例如: 热层的氧原子吸收紫外辐射等过程可以激发大气潮汐波; 地形和锋面、对流等非地形激发的重力波能够穿过对流层向上传播, 耗散或者破碎释放动量通量对临近空间环境产生作用<sup>[11-12]</sup>。因此, 对临近空间大气环境的研究有助于临近空间飞行器的安全<sup>[13]</sup>。

临近空间大气风场是飞行器飞行过程中一个重要的环境因素<sup>[14]</sup>。最大风切变在飞行器的姿态控制系统设计、制导精度分析和载荷分析中, 起到尤为重要的作用。分析临近空间大气风切变的特性, 研究其对飞行器的影响对精确飞行有重要的参考价值。

目前而言, 地面风和对流层区域的风切变特

收稿日期: 2018-04-02; 录用日期: 2018-08-10; 网络出版时间: 2018-09-12 15:17

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180911.1038.002.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180911.1038.002.html)

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFB0501503); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA17010301); 国家高分辨率对地观测青年基金 (GFZX04061502); 中国科学院“十三五”信息化建设专项 (XXH13505-04-03)

\* 通信作者. E-mail: xiaocy@nsse.ac.cn

**引用格式:** 杨钧烽, 肖存英, 胡雄, 等. 临近空间风切变特性及其对飞行器的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 57-65. YANG J F, XIAO C Y, HU X, et al. Wind shear characteristics in near space and their impacts on air vehicle[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 57-65 (in Chinese).

性,及对火箭的影响研究已经比较成熟。在实际工作中,酒泉、西昌和太原卫星发射中心已根据地面风和对流层风场数据研制出风场分析结果,并应用于相应的运载火箭设计中。但对临近空间的风场特性研究仍然比较缺乏。临近空间大气风场随时间、高度和经纬度的变化与地面风和对流层有明显的区别,有必要针对临近空间大气风场的时空分布特点、风切变特性进行研究,以及对飞行器的影响进行分析。

本文利用 MERRA(the Modern Era Retrospective-analysis for Research and Applications)再分析资料 2009—2013 年共 5 年的风场数据,建立临近空间 20 ~ 78 km 的风切变设计模型,以酒泉(39.1°N,98.5°E)上空为例,给出最多风向、99% 概率的最大风速、平均条件风、最小条件风、最大风切变和综合矢量风分析结果;并且评估了临近空间风切变对飞行器的影响,计算出风场对低动态飞行器(马赫数为 3)和高动态飞行器(马赫数为 5 和 8)产生的风攻角。

## 1 数据和分析方法

### 1.1 MERRA 再分析资料

MERRA 数据是由美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)戈达德航天飞行中心(Goddard Space Flight Center, GSFC)下属的全球建模和同化办公室(Global Modeling and Assimilation Office, GMAO)发布的再分析气象资料。该数据也是 NASA 戈达德地球观测系统(Goddard Earth Observation Systems, GEOS)的资料同化系统(Data Assimilation Systems, DAS)版本 5.2 所生成的产品。MERRA 是 NASA 为卫星时代提供的再分析资料,其卫星资料包含的多种探测数据,有地基和卫星数据,例如 MODIS、SSM/I、ERS-1、GEOS 和 AIRS,其主要致力于天气和气候时间尺度与水循环相关领域。MERRA 数据覆盖时间是从 1979 年至今。MERRA 的时间分辨率为 6 h,水平分辨率是 1.9°(纬度)×2.5°(经度),垂直范围从地面到 78 km,共 72 层。MERRA 再分析资料的详细描述见文献[15]。本文数据选取 2009—2013 年共 5 年数据。

### 1.2 分析方法

分析方法中采用赵人濂等高空风场统计分析方法<sup>[16]</sup>,作为中华人民共和国航空航天工业部航天工业标准《地地导弹、运载火箭风场设计规范》,该方法适用于大子样、大尺度高空风数据的

统计分析,不适用于小尺度阵风,涉及风场分布的各类飞行器设计可参照使用。

飞行器在飞行时,将在不同的高度遇到不同出现概率的最大风干扰,包括风切变和最小风。在设计中,选取对飞行器飞行影响最大的高度(称为参考高度),给出一定出现概率下的最大风速,那么在其他各高度上出现的风切变称为“条件切变”,由此切变造成的各高度的风速称为“条件风速”。这些风速沿高度分布就构成了综合矢量风剖面。这里的参考高度,一般只选取风速较大的区域,因为只有这些高度的风才是构成最危险条件设计的因素。风场设计中采用最危险条件设计,主要表现在概率设计上。这种风速既能反映实测风场,又不能在一次实测中完全重复;既能保证最危险条件设计,又不能无限保守约束条件。

本文首先采用三倍标准偏差去除异常值,插值计算酒泉上空 20 ~ 78 km 的纬向风和经向风,因为 MERRA 再分析资料的网格为规则网格,所以采用双线性插值方法可以确保精度。其次,分别计算最多风向、99% 概率最大风速、平均条件风、最小条件风和最大风切变,进而给出综合矢量风。最后,分析临近空间风切变特性对飞行器的影响。

#### 1) 最多风向

风场在某段时间存在大致确定的方向,此时风向满足二维正态分布。在极坐标系下,将风速从 0 ~ ∞ 积分二维正态分布式后,得到风向 α 的概率密度分布:

$$g_1(\alpha) = \frac{d_1}{a^2} e^{-\frac{1}{2}} \left[ 1 + \sqrt{2\pi} \frac{b}{a} e^{\frac{1}{2}} \left( \frac{b}{a} \right)^2 \varphi\left(\frac{b}{a}\right) \right] \quad (1)$$

式中:

$$\varphi\left(\frac{b}{a}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{b/a} e^{-\frac{1}{2}t^2} dt \quad (2)$$

$$a^2 = \frac{1}{1-\rho^2} \left( \frac{\overline{\cos^2 \alpha}}{\sigma_u^2} - \frac{2\rho \overline{\cos \alpha \sin \alpha}}{\sigma_u \sigma_v} + \frac{\overline{\sin^2 \alpha}}{\sigma_v^2} \right) \quad (3)$$

$$b = \frac{1}{1-\rho^2} \left[ \frac{\overline{u \cos \alpha}}{\sigma_u^2} - \frac{\rho(\overline{u \sin \alpha} + \overline{v \cos \alpha})}{\sigma_u \sigma_v} + \frac{\overline{v \sin \alpha}}{\sigma_v^2} \right] \quad (4)$$

$$d_1 = \frac{1}{2\pi \sigma_u \sigma_v \sqrt{1-\rho^2}} \quad (5)$$

其中: $\overline{u}$  和  $\sigma_u$  分别为纬向风  $u_i$  的数学期望和标准偏差; $\overline{v}$  和  $\sigma_v$  分别为经向风  $v_i$  的数学期望和标准偏差; $\rho$  为纬向风和经向风的相关系数; $\alpha$  为数学角度,与气象角度  $\theta$  的关系为

$$\alpha + \theta = 270^\circ$$

其中:气象角度的正北为  $0^\circ$ , 角度顺时针旋转。对风向进行统计, 得到概率密度最大的最多风向  $\theta^*$ 。

### 2) 给定风向时风速的条件分布

在给定方向  $\alpha_0$  时, 利用条件分布, 在极坐标系中确定风速。此时, 在已知风向  $\alpha_0$  时, 风速  $\omega$  的分布条件为

$$P_\omega = \{ \omega \leq \omega^* \mid \alpha = \alpha_0 \} = 1 - \frac{\frac{d_1}{a^2} e^{-\frac{1}{2}c^2} e^{\frac{1}{2}(\frac{b}{a})^2} \left[ e^{-\frac{1}{2}\omega_s^2} + \sqrt{2\pi} \frac{b}{a} (1 - \varphi(\omega_s)) \right]}{g_1(\alpha_0)} \quad (6)$$

式中:  $c^2 = \frac{1}{1 - \rho^2} \left( \frac{\bar{u}^2}{\sigma_u^2} - \frac{2\rho \bar{u}\bar{v}}{\sigma_u\sigma_v} + \frac{\bar{v}^2}{\sigma_v^2} \right)$   $\alpha_0$  为某特定风向;  $\omega_s = a\omega^* - b/a$ , 在最多风向  $\alpha^* (\theta^*)$  方向, 大率  $P_\omega$  已定时, 可以求出最大的风速  $\omega^*$ 。对于导弹而言, 一般取  $P_\omega = 99\%$ ; 对于运载火箭而言, 一般取  $P_\omega = 95\%$ 。本文以导弹为例, 取  $99\%$  概率。

### 3) 条件风切变的统计特征量

风切变是 2 个高度上的风速差:

$$\begin{cases} u' = u_k - u \\ v' = v_k - v \end{cases} \quad H < H_k \quad (7)$$

$$\begin{cases} u' = u - u_k \\ v' = v - v_k \end{cases} \quad H > H_k$$

式中:  $H_k$  为参考高度;  $u_k$  和  $v_k$  分别为  $H_k$  高度的纬向风和经向风;  $H$  为其他高度;  $u$  和  $v$  分别为  $H$  高度的纬向风和经向风。

条件风切变是指在参考高度出现最大风条件下的条件切变。条件风切变的数学期望为

$$\begin{cases} E(u' \mid u^*) = \bar{u}' + \rho_{uu'} \frac{\sigma_{u'}}{\sigma_u} (u^* - \bar{u}) \\ E(v' \mid v^*) = \bar{v}' + \rho_{vv'} \frac{\sigma_{v'}}{\sigma_v} (v^* - \bar{v}) \end{cases} \quad (8)$$

标准偏差为

$$\begin{cases} \sigma(u' \mid u^*) = \sigma_{u'} \sqrt{1 - \rho_{uu'}^2} \\ \sigma(v' \mid v^*) = \sigma_{v'} \sqrt{1 - \rho_{vv'}^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $u^*$  和  $v^*$  分别为最大风速下的纬向分量和经向分量;  $u', v', \bar{u}', \bar{v}', \sigma_{u'}, \sigma_{v'}$  分别为纬向风切变、经向风切变及其相对应的数学期望和标准偏差;  $\rho_{uu'}, \rho_{vv'}$  为风速与切变间的相关系数。由计算可知,  $\sigma(u' \mid u^*) \approx \sigma(v' \mid v^*)$ , 而且  $\rho_{vv'}$  很小, 所以切边(实为条件切变)为二维圆分布, 条件风标准偏差为

$$\sigma_{w'} = \sqrt{\sigma^2(u' \mid u^*) + \sigma^2(v' \mid v^*)} \quad (10)$$

### 4) 条件风的统计特征量

在参考高度  $H_k$  上出现最大风条件下, 其他高度  $H$  上的风都是由风切边而得来的, 称为条件风。条件风的数学期望:

$$\begin{cases} E(u \mid u^*) = u^* - E(u' \mid u^*) \\ E(v \mid v^*) = v^* - E(v' \mid v^*) \\ E(u \mid u^*) = u^* + E(u' \mid u^*) \\ E(v \mid v^*) = v^* + E(v' \mid v^*) \end{cases} \quad H < H_k$$

$$\begin{cases} E(u' \mid u^*) = 0 \\ E(u \mid u^*) = u^* \\ E(v' \mid v^*) = 0 \\ E(v \mid v^*) = v^* \end{cases} \quad H > H_k$$

$$\begin{cases} E(u' \mid u^*) = 0 \\ E(u \mid u^*) = u^* \\ E(v' \mid v^*) = 0 \\ E(v \mid v^*) = v^* \end{cases} \quad H = H_k \quad (11)$$

条件风概率圆的方程为

$$(X - E(u \mid u^*))^2 + (Y - E(v \mid v^*))^2 = \lambda_c^2 \sigma_{w'}^2 \quad (12)$$

式中:  $X$  和  $Y$  分别为条件风风速的纬向分量和经向分量;  $\lambda_c = \sqrt{-\ln(1 - P(\lambda_c))}$ ,  $P(\lambda_c)$  为出现概率, 取值  $99\%$ 。

### 5) 综合矢量图剖面

对应于一个参考高度上确定的最大风速, 可在其他高度做出无数的条件风圆。这些圆的集合可构成表示风特性的空间图形, 它是以前参考高度最大风为定点的上下 2 个对顶锥(见文献[16]图 1)。锥体上任一点沿高度的轨迹, 从理论上都是风的空间分布。借助最多风向这个条件, 利用最多风向构成一个高度平面, 切取对顶锥, 可得到 2 条交线, 考虑最大切变, 可得到靠近高度轴的交线, 称为最小条件风。

最多风向平面方程为

$$\dot{v} = m^* \dot{u} \quad (13)$$

式中:  $m^*$  为经向风分量  $\dot{v}$  和纬向风分量  $\dot{u}$  比值, 即

$$m^* = \tan \alpha^* \quad (14)$$

$$\alpha^* = 270^\circ - \theta^* \quad (15)$$

最多风向平面与对顶锥的交点坐标为

$$u_* = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (16)$$

$$v_* = m^* u_* \quad (17)$$

式中:  $u_*$  和  $v_*$  分别为最小条件风的纬向分量和经向分量。

$$A = 1 + m^{*2} \quad (18)$$

$$B = -2[E(u \mid u^*) + m^* E(v \mid v^*)] \quad (19)$$

$$C = E^2(u|u^*) + E^2(v|v^*) - \lambda_c^2 \sigma_w^2 \quad (20)$$

由于考虑最大风切变,因而取2个根中最小值(绝对值),这样最小条件风  $W_*$  为

$$W_* = \sqrt{u_*^2 + v_*^2} \quad (21)$$

## 2 临近空间风切变特性分析

### 2.1 临近空间风场气候特征

利用 MERRA 再分析资料 2009—2013 年共 5 年的数据,分析临近空间 20 ~ 78 km 纬圈平均纬向风在 1、4、7、10 月份的气候态纬度-高度分布特征,分别代表冬、春、夏、秋的特点,结果如图 1 所示。在 1 月份,北半球纬向风以西风为主,在 35°N 上空 71 km 高度有极大值约 46 m/s,南半球纬向风以东风为主,在 35°S 上空 67 km 高度有极大值约 82 m/s。在 7 月份,纬圈平均纬向风分布特征与 1 月份基本相反,北半球纬向风以东风为主,在 35°N 上空 64 km 高度有极大值约 61 m/s,南半球纬向风以西风为主,在 46°S 上空 51 km 高度有极大值约 96 m/s。对于 4、10 月份,大气纬向风为夏季和冬季之间过渡的特征。

图 2 给出了临近空间 20 ~ 78 km 纬圈平均经向风在 1、4、7、10 月份的气候态纬度-高度分布特征。在 1 月份,经向风在 60 km 以上南北半球都以南风为主,60 km 以下中低纬度(约 40°S ~ 40°N 附近区域)以南风为主,其他纬度以北风为主;经向风范围为 -4 ~ 13 m/s,经向风极大值出现在中间层。在 7 月份,纬圈平均经向风风向与 1 月份特征基本相反。对于 4、10 月份,大气经向风也是夏季和冬季之间过渡的特征。临近空间经向风明显弱于纬向风。

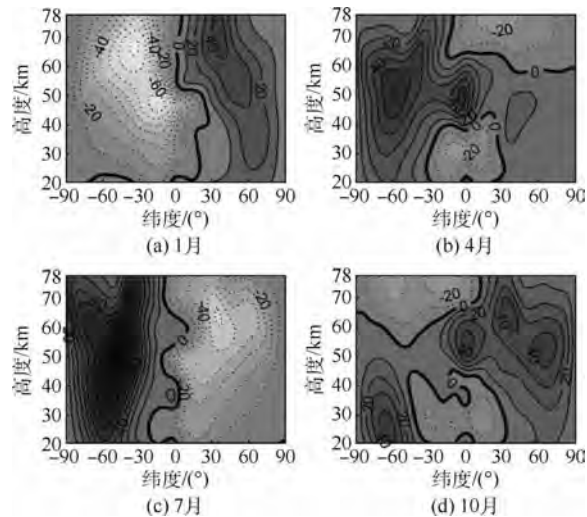


图 1 MERRA 再分析资料纬圈平均纬向风分布

Fig. 1 Zonal mean zonal wind distribution from MERRA reanalysis data

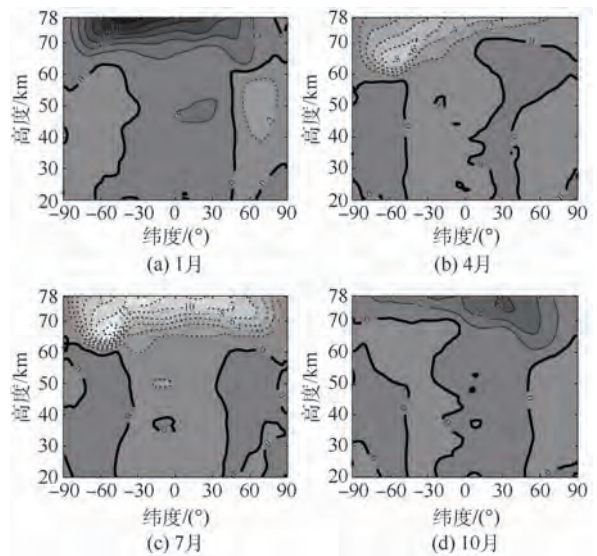


图 2 MERRA 再分析资料纬圈平均经向风分布

Fig. 2 Zonal mean meridional wind distribution from MERRA reanalysis data

综上所述,临近空间大气风场存在明显的季节变化特征。对风切变的特性分析需要风向属于正态分布,因此本文对不同月份进行计算和分析。

### 2.2 临近空间 20 ~ 78 km 风切变特性

酒泉卫星发射中心(39.1°N, 98.5°E)是中国科学卫星、技术试验卫星和运载火箭的发射试验基地之一,是中国最早建立的运载火箭发射试验基地。本文选取酒泉为例,开展其上空临近空间风切变特性分析。

风向在某时间内具有大致确定的风向。在每个参考高度上的最多风向下找到一定出现概率的最大风速,这就需要首先确定最多风向,然后在这一风向下确定最大风速。图 3 给出 1、4、7、10 月

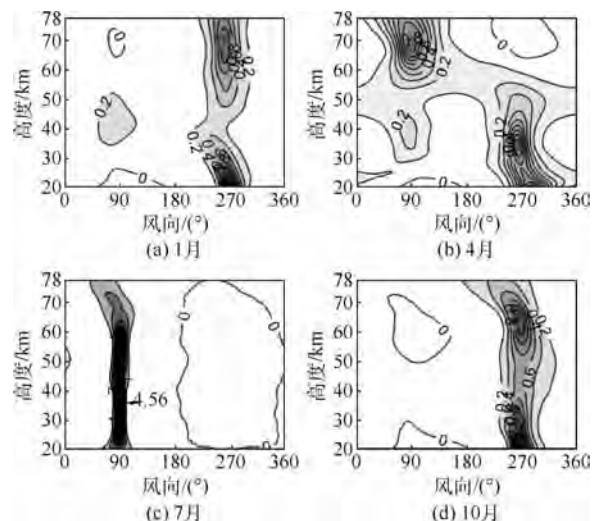


图 3 酒泉上空风向概率密度分布

Fig. 3 Probability density distribution of wind direction over Jiuquan

份的各个风向概率密度随高度的分布,0°为北风、90°为东风、180°为南风、270°为西风。从图中可以看出:1月份,风向概率密度在大部分高度极大值出现在270°附近,最多风以西风为主;在35~55 km高度存在双峰,在90°(东风)和270°(西风)附近有极大值。4月份,20~50 km以西风为最多风向,50~78 km高度的最多风向为东风。7月份,风向概率密度在所有高度在90°附近有极大值,最多风向出现在东风方向附近。10月份,风向概率密度在270°附近最大,最多风向为西风。

在给定最多风向后,可利用条件分布计算每个参考高度的最大风速。图4给出1、4、7、10月份的99%概率最大风速随高度的变化。图中最大的特点是1月份最大风速比其他月份强。1月份最大风速基本随高度增加,在40 km高度附近出现凹陷的区域与图3(a)在该高度附近有东西风交替相对应。7月份最大风速在20~64 km基本呈增大趋势,在65~73 km略微减小,之后又增大。10月份变化趋势与7月份相似,但两者的风向正好相反,前者是西风,后者是东风。4月份最大风速在20~35 km递增,在35~50 km递减,之后又缓慢增加。

对于每个参考高度,连接条件风圆的圆心可以得到平均条件风。考虑最大风切变,计算最小条件风。平均条件风可供精度分析使用,最小条件风可供姿态控制系统设计和载荷计算使用。从图1中看出风速的极大值一般出现在50~70 km,以60 km为参考高度。图5给出了以60 km为参考高度的平均条件风和最小条件风。图5中2条廓线的交点就是60 km的99%概率最大风速。某高度的最大风速与此最小条件风的差就是60 km最大风速引起的最大风切变,见图6。某高度的

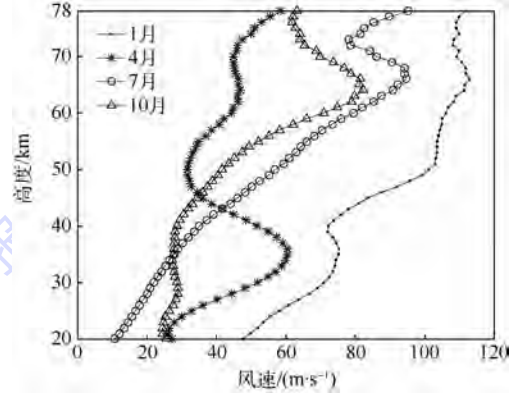


图4 酒泉上空99%概率最大风速  
Fig.4 Maximum wind speed over Jiuquan with 99% probability

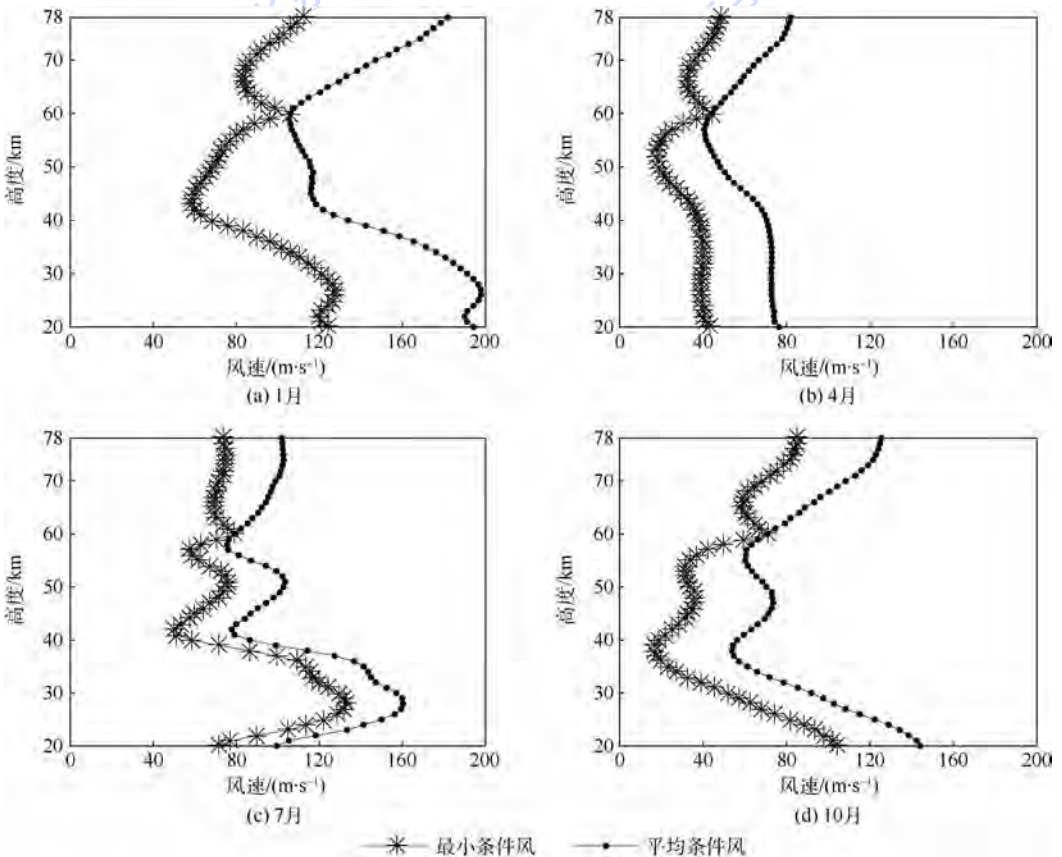


图5 酒泉上空60 km最大风速引起的最小条件风和平均条件风

Fig.5 Minimum and mean conditional wind caused by maximum wind speed at 60 km over Jiuquan

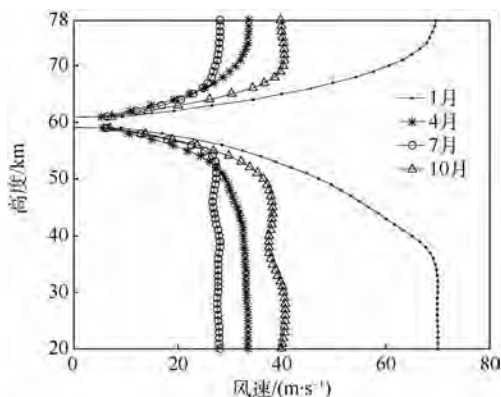


图6 酒泉上空60 km 99%概率最大风速引起的最大风切变

Fig. 6 Maximum wind shear caused by maximum wind speed at 60 km over Jiuquan with 99% probability

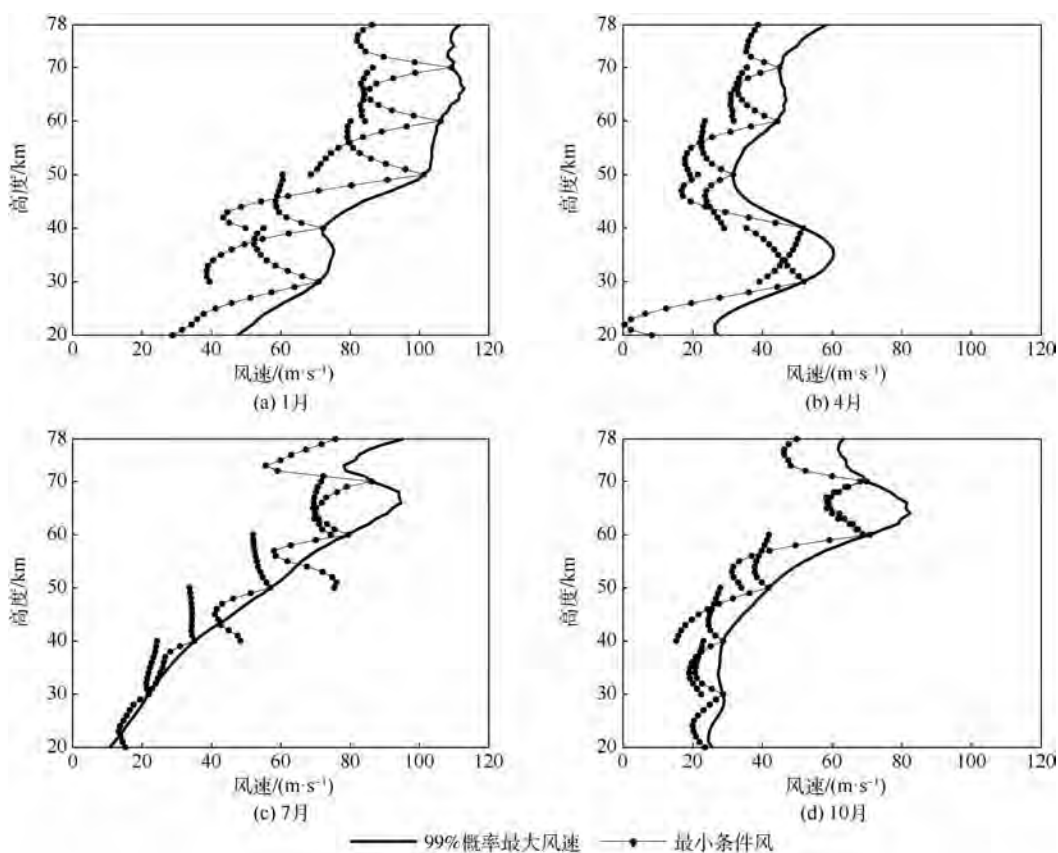


图7 酒泉上空综合矢量风剖面图

Fig. 7 Synthetical wind vector profile over Jiuquan

### 3 风切变对飞行器影响

风切变对飞行器的影响主要是在风作用下产生风攻角<sup>[15]</sup>。计算式为

$$T = T_{wp} + T_{wq} \quad (22)$$

$$T_{wp} = \arctan\left(\frac{W_p}{V}\right) \quad (23)$$

$$T_{wq} = \arctan\left(\frac{W_q}{V}\right) \quad (24)$$

式中:  $T$  为风攻角;  $W_p$  为最小条件风;  $W_q$  为条件

最大风切变在一定范围内随着与参考高度60 km的距离逐渐增大,但到超过一定距离有基本保持不变。例如,4、7和10月份最大风切变影响范围约为 $\pm 10$  km,1月份可能达到 $\pm 20$  km,这可能与1月份的最大风速较强有关。

综合矢量风剖面是以各个高度一定出现的最大风为包络,不同高度各具特点的最小条件风综合出来的一个剖面图。本文研究高度为临近空间20~78 km,风场随高度变化显著。选取30、40、50、60和70 km为参考高度,给出99%概率最大风的综合矢量风剖面图,见图7。考虑最大风速引起的风切变影响有一定范围,图中只给出参考高度的 $\pm 10$  km高度范围的最小条件风。

风切变;  $V$  为飞行器飞行速度;  $T_{wp}$  和  $T_{wq}$  分别为最小条件风  $W_p$  和条件风切变  $W_q$  引起的风攻角。

根据速度的不同,飞行器通常可分为低动态和高动态2类:低动态飞行器飞行速度一般不超过马赫数3,高动态飞行器马赫数大于5,通过采用特殊的动力装置,可实现超声速和高超声速飞行<sup>[17-18]</sup>。假设低动态飞行器马赫数为3和高动态马赫数为5和8,图8给出了风攻角随高度和季节的变化。其中最小条件风和条件风切变分别来自于参考高度对 $-5$  km高度风场的影响,例如

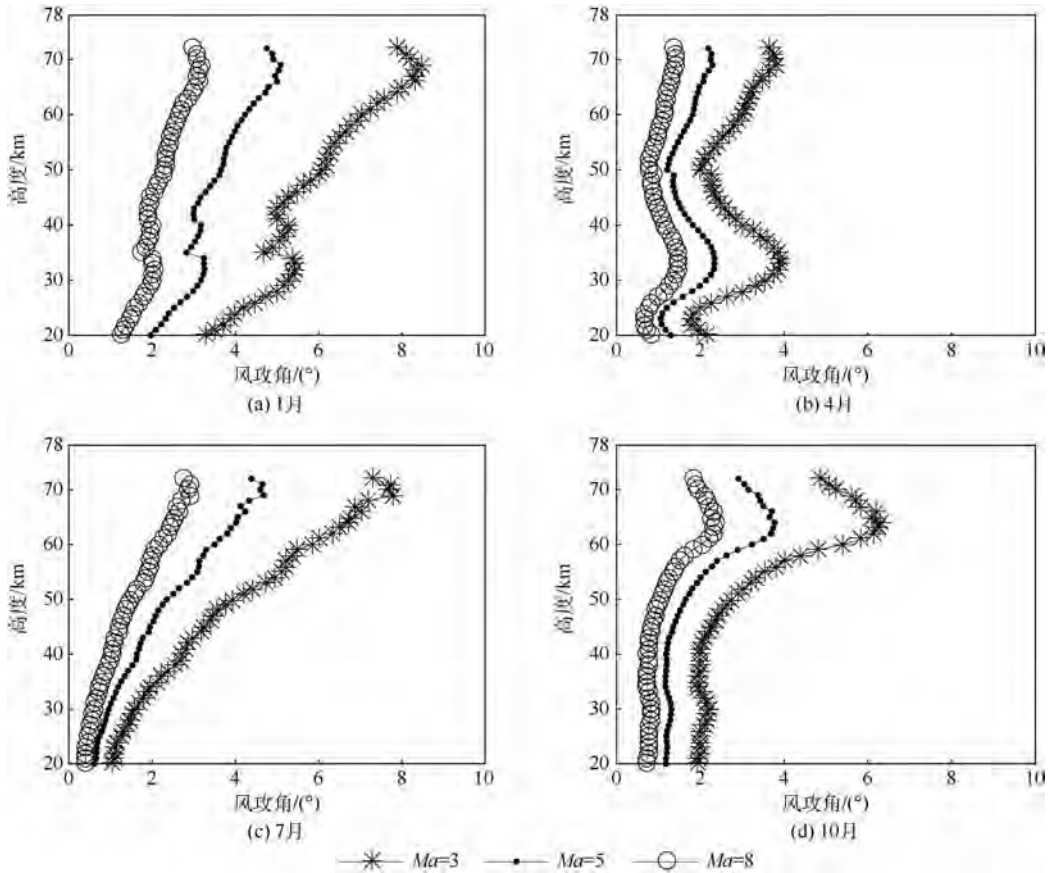


图 8 风攻角分布

Fig. 8 Wind attack angle distribution

50 km 风攻角来自于 55 km 参考高度 99% 概率最大风速引起的 50 km 最大风切变。1 月和 10 月的风攻角随高度基本逐渐增加:1 月份飞行器(马赫数为 3、5、8)风攻角最小值在 20 km 处为 3.3°、2.0°和 1.3°,最大值在 69 km 处为 8.5°、5.1°和 3.2°;7 月份飞行器(马赫数为 3、5、8)风攻角最小值在 20 km 处为 1.1°、0.6°和 0.4°,最大值在 69 km 处为 8.5°、5.1°和 3.2°。飞行器马赫数越高,飞行速度越快,风攻角越小。相同马赫数飞行器在 1 月份的风攻角最大。火箭需要的最大风概率取 95%,针对火箭的风攻角会比以上结果小 8%~27%。

## 4 结 论

本文利用 MERRA 再分析资料 2009—2013 年 5 年的风场数据开展了临近空间的 20~78 km 的风切变统计分析研究,得出:

1) 临近空间纬向风和经向风存在显著的季节变化。1 月份北半球纬向风以西风为主,南半球纬向风以东风为主;经向风在 60 km 以上以南风为主,60 km 以下中纬度和低纬度以南风为主,其他纬度以北风为主。在 7 月份,纬圈平均纬向

风和经向风风向与 1 月份特征基本相反。4、10 月份大气风场主要为夏季和冬季之间过渡的特征。

2) 以酒泉(39.1°N,98.5°E)为例开展临近空间风切变特性分析:最多风向在 1、10 月份以西风为主,7 月份以东风为主,4 月份在 50 km 以下为西风,以上为东风。1 月的 99% 概率最大风速最大。参考高度的最大风速能够引起风切变,但最小风切变在距离参考高度一定范围逐渐增大,然后基本不变。根据各个参考高度的最大风和最小风切变可给出了综合矢量风。

3) 临近空间 99% 概率最大风引起的风切变对飞行器产生的风攻角显著,以参考高度对 -5 km 为例,风切变对飞行器(马赫数为 3、5、8)产生风攻角在 69 km 处最大可达 8.5°、5.1°和 3.2°。

4) 本文将风切变分析方法可应用于临近空间风场研究,充分考虑风的时间、空间变化,研究临近空间风场对飞行器的影响。另外,该研究可以应用到其他地区上空临近空间的风场分析。本项工作可为飞行器在临近空间飞行的姿态控制系统设计、制导精度分析和载荷分析计算等多方面工作提供了一定的参考。

致谢 感谢 NASA Goddard Space Flight Center 的 GMAO (Global Modeling and Assimilation Office) 工作组提供 MERRA 再分析资料。

### 参考文献 (References)

- [1] 肖存英,胡雄,杨钧烽,等. 临近空间 38°N 大气密度特性及建模技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(9): 1757-1765.
- XIAO C Y, HU X, YANG J F, et al. Characteristics of atmospheric density at 38°N in near space and its modeling technique[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(9): 1757-1765 (in Chinese).
- [2] 刘强,武哲,祝明,等. 平流层气球热动力学仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(12): 1578-1583.
- LIU Q, WU Z, ZHU M, et al. Thermal-dynamic simulation of stratospheric balloon[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(12): 1578-1583 (in Chinese).
- [3] 阎啸,唐博,张天虹,等. 临近空间飞行器信息系统一体化载荷平台[J]. 航空学报, 2016, 37(S1): 127-132.
- YAN X, TANG B, ZHANG T H, et al. Payload platform of near space vehicle information system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(S1): 127-132 (in Chinese).
- [4] 陈闽慷,杜涛,胡雄,等. 北半球高空大气参数波动对临近空间飞行热环境的影响[J]. 科学通报, 2017, 62(13): 1402-1409.
- CHEN M K, DU T, HU X, et al. Effect of atmosphere parameter oscillation at high altitude in the northern hemisphere for near space hypersonic flight aerothermodynamic prediction[J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(13): 1402-1409 (in Chinese).
- [5] 孙磊,廉璞,常晓飞,等. 临近空间大气环境建模及其对飞行器影响[J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38(5): 107-111.
- SUN L, LIAN P, CHANG X F, et al. Near space atmosphere modeling and its effect on the aircraft command control & simulation[J]. Command Control & Simulation, 2016, 38(5): 107-111 (in Chinese).
- [6] MARTYUSHEY S G, SHEREMET M A. Conjugate natural convection combined with surface thermal radiation in an air filled cavity with internal heat source[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2014, 76(2): 51-67.
- [7] 童靖宇,向树红. 临近空间环境及环境试验[J]. 装备环境工程, 2012, 9(3): 1-4.
- TONG J Y, XIANG S H. Near space environment and environment tests[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(3): 1-4 (in Chinese).
- [8] 陈凤贵,陈光明,刘克华. 临近空间环境及其影响分析[J]. 装备环境工程, 2013, 10(4): 71-75.
- CHEN F G, CHEN G M, LIU K H. Analysis of near space environment and its effect[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(4): 71-75 (in Chinese).
- [9] 蔡明辉,张振龙,封国强,等. 临近空间中子环境及其对电子设备的影响研究[J]. 装备环境工程, 2007, 4(5): 23-29.
- CAI M H, ZHANG Z L, FENG G Q, et al. Study of near space neutron environment and its effects to electronic device[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4(5): 23-29 (in Chinese).
- [10] SMITH A K. Global dynamics of the MLT[J]. Surveys in Geophysics, 2012, 33(6): 1177-1230.
- [11] 杨钧烽,肖存英,胡雄,等. 中国廊坊(39.4°N, 116.7°E)中间层和低热层潮汐的季节变化[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(4): 1501-1509.
- YANG J F, XIAO C Y, HU X, et al. Seasonal variations of wind tides in mesosphere and lower thermosphere over Langfang, China (39.4°N, 116.7°E)[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(4): 1501-1509 (in Chinese).
- [12] 郭文杰,胡雄,闫召爱,等. 利用瑞利激光雷达观测北京地区上平流层地形重力波活动[J]. 地球物理学报, 2015, 58(10): 3481-3486.
- GUO W J, HU X, YAN Z A, et al. Terrain-generated gravity waves in the upper stratosphere detected by Rayleigh lidar[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(10): 3481-3486 (in Chinese).
- [13] HALE N, LAMOTTE N, GARNER T. Operational experience with hypersonic flight of the space shuttle[C]// AIAA/AAAF 11th International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. Reston: AIAA, 2002: 17\_5259.
- [14] 郭建国,周军. 临近空间低动态飞行器控制研究综述[J]. 航空学报, 2014, 35(2): 320-331.
- GUO J G, ZHOU J. Review of the control of low dynamic vehicles in near space[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(2): 320-331 (in Chinese).
- [15] RIENECKER M M, SUAREZ M J, GELARO R, et al. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications[J]. Journal of Climate, 2011, 24(14): 3624-3648.
- [16] 赵人濂,陈振官,付维贤. 风切变与运载火箭设计[J]. 宇航学报, 1998, 19(2): 105-108.
- ZHAO R L, CHEN Z G, FU W X. Wind shear and rocket design[J]. Journal of Astronautics, 1998, 19(2): 105-108 (in Chinese).
- [17] 李锋,叶川,李广佳,等. 临近空间太阳能飞行器横航向稳定性[J]. 航空学报, 2016, 37(4): 1148-1158.
- LI F, YE C, LI G J, et al. Lateral-directional stability of near-space solar-powered aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(4): 1148-1158 (in Chinese).
- [18] 刘海东,包为民,李惠峰,等. 高超声速飞行器全局有限时间姿态控制方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(9): 1864-1873.
- LIU H D, BAO W M, LI H F, et al. Attitude control method within finite time globally for hypersonic vehicles[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(9): 1864-1873 (in Chinese).

#### 作者简介:

杨钧烽 男,博士,助理研究员。主要研究方向:临近空间环境。

肖存英 女,博士,研究员。主要研究方向:临近空间环境。

# Wind shear characteristics in near space and their impacts on air vehicle

YANG Junfeng<sup>1</sup>, XIAO Cunying<sup>1,\*</sup>, HU Xiong<sup>1</sup>, CHENG Xuan<sup>1,2</sup>

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Based on the near-space wind field data from MERRA reanalysis data, the seasonal variation of atmospheric wind field at 20 – 78 km is investigated. The characteristics of wind shear over Jiuquan (39.1°N, 98.5°E) are analyzed by the method of mathematical statistics. Moreover, the effect of wind shear on the near-space aircraft is studied. The results show that the wind in near space is eastward in January and October, westward in July, and eastward (westward) below (above) 50 km in April. The maximum wind speed occurs in January with 99% probability and the shear induced by the maximum wind has a certain height range. The synthetical wind vector is also given by the maximum wind and minimum wind. In addition, the wind attack angle of the near-space aircraft caused by the wind shear is significant. The wind attack angles for air vehicle with Mach numbers 3, 5 and 8 are biggest at 69 km, which are 8.5°, 5.1° and 3.2° respectively.

**Keywords:** near space; wind shear; synthetical wind vector; air vehicle; wind attack angle

北京航空航天大学学报

**Received:** 2018-04-02; **Accepted:** 2018-08-10; **Published online:** 2018-09-12 15:17

**URL:** [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180911.1038.002.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180911.1038.002.html)

**Foundation items:** National Key R & D Program of China (2016YFB0501503); Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDA17010301); the National High Resolution Earth Observation Foundation for Young Scientists of China (GFZX04061502); 13th Five-year Informatization Plan of Chinese Academy of Sciences (XXH13505-04-03)

\* **Corresponding author.** E-mail: xiaocy@nssc.ac.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0266

# 一种平均矩独立重要性指标及其拒绝抽样方法



程蕾, 张磊刚\*, 雷豹, 梁祖典, 刘鹏

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

**摘 要:** 在矩独立重要性分析过程中, 重要性指标往往用于衡量结构系统输出不确定性向输入变量不确定性的逆向分配问题。假设输入参数的方差可以减缩一定比例因子, 那么矩独立重要性指标可以定义为该缩减因子的函数。同时, 假设输入参数的方差缩减因子为一随机变量, 那么可以取矩独立重要性指标函数的均值定义一个新的平均矩独立重要性指标。由于使用 Sobol 方法计算平均矩独立重要性指标的模型需要循环抽样, 计算量很高, 故引入拒绝抽样(RS)方法, 通过重复利用矩独立重要性分析中的一组输入输出样本, 就可以额外计算得到矩独立指标函数和平均矩独立重要性指标, 这大大节约了计算成本。本文所提指标函数及平均指标的有效性和 RS 方法的准确性、高效性通过数值和工程算例得以验证。

**关键词:** 重要性分析; 矩独立重要性指标函数; 平均矩独立重要性指标; Sobol 方法; 拒绝抽样(RS)

**中图分类号:** TB114.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5965(2019)01-0066-08

结构安全分析包含 2 个主要问题: 可靠性分析<sup>[1]</sup>和重要性分析<sup>[2]</sup>。其中, 可靠性分析意在估算结构系统的可靠度, 而重要性分析则旨在考量输入变量对结构系统输出响应的影响程度。

重要性分析主要研究输出不确定性向输入不确定性的逆向分配问题, 一般包含 2 种, 即局部重要性分析和全局重要性分析。其中, 局部重要性分析定义为结构系统输出响应函数在输入参数名义值点处的偏导数, 而全局重要性分析则衡量输入参数在其整个取值区间内对结构系统输出不确定性的平均影响程度。一旦得知输入变量的不确定性排序, 就可以在工程优化设计中忽略低重要性参数, 关注高重要性参数, 从而提供有益的指导信息<sup>[3]</sup>。相对于局部灵敏度, 全局灵敏度能够反映设计变量的随机性, 而局部灵敏度则不能, 因此, 全局重要性分析的应用相对更广泛<sup>[4]</sup>。当

前, 多种全局重要性分析方法已经发展开来, 包括非参数方法<sup>[5-6]</sup>、扫描法<sup>[7]</sup>、微分法<sup>[8]</sup>、基于方差的重要性分析<sup>[9-10]</sup>、矩独立重要性分析<sup>[11-12]</sup>和随机森林<sup>[13]</sup>等, 其中应用最为广泛的为基于方差的重要性分析和矩独立重要性分析。

本文重点关注设计变量对结构系统失效概率的重要性分析。Cui 等<sup>[14]</sup>提出了基于失效概率的矩独立重要性指标, 王文选<sup>[15]</sup>和 Zhou<sup>[16]</sup>等提出了求解矩独立重要性指标的点估计法和稀疏网格法, Li 和 Lu<sup>[17]</sup>在 Cui 等<sup>[14]</sup>基础上作出了改进, 并证明其指标可以转化为 Sobol 基于方差的重要性指标, Wei 等<sup>[18]</sup>则将单层 Monte Carlo 方法用于 Sobol 指标求解中。本文在 Li 和 Lu<sup>[17]</sup>所提指标的基础上作出扩展, 分析输入参数的方差变化对结构系统失效概率的影响程度, 即开展一种新的重要性分析方法, 将输入变量方差缩减的百分比

收稿日期: 2018-05-08; 录用日期: 2018-07-27; 网络出版时间: 2018-09-10 16:36

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180907.1135.004.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180907.1135.004.html)

基金项目: 军委装备发展部“十三五”装备预研领域基金(6140244010216HT15001)

\*通信作者。E-mail: leigang\_zhang@163.com

**引用格式:** 程蕾, 张磊刚, 雷豹, 等. 一种平均矩独立重要性指标及其拒绝抽样方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 66-73. CHENG L, ZHANG L G, LEI B, et al. An average moment-independent importance index and its rejection sampling method [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 66-73 (in Chinese).

作为一个随机输入变量,得到一个重要性指标函数,其平均值作为平均矩独立重要性指标。尽管 Sobol 方法可以高效地计算 Li 和 Lu<sup>[17]</sup> 提出的指标,然而在计算平均矩独立重要性指标时需要不断重复抽样,计算成本在工程中依然无法接受。本文引入拒绝抽样 (Rejection Sampling, RS) 方法来求解所提矩独立重要性指标函数和平均矩独立重要性指标,该方法可通过使用 Sobol 方法中产生的一组样本获取更多的信息,不需要重复抽样,因此大大节约了计算成本,提高了计算效率。本文所提指标的有效性以及所提方法的高效性和准确性均可通过数值、工程算例加以验证。

## 1 平均矩独立重要性指标

### 1.1 矩独立重要性指标

假设结构系统模型为  $Y = g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ , 其中  $g(\cdot)$  为响应函数,  $Y$  为模型输出,  $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$  为一组相互独立的随机变量, 其联合概率密度函数为  $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^n f_i(x_i)$ ,  $\mathbf{x}$  和  $x_i$  分别为输入变量样本的向量和单个变量。令  $P_f$  为结构系统的失效概率, 即无条件失效概率, 而  $P_{f|x_i}$  为固定变量  $X_i$  时结构系统的失效概率, 即条件失效概率, 那么可定义输入  $X_i$  基于失效概率的矩独立重要性指标如下<sup>[14]</sup>:

$$\eta_i = \frac{1}{2} E_{x_i} [ |P_f - P_{f|x_i}| ] = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} |P_f - P_{f|x_i}| f_{x_i}(x_i) dx_i \quad (1)$$

式中:  $X_i$  为一个输入变量  $X_i$  或一组输入变量  $(X_{i_1}, X_{i_2}, \dots, X_{i_g}), 1 \leq i_1 \leq i_2 \leq \dots \leq i_g \leq n; E[\cdot]$  为期望函数。

$\eta_i$  反映了输入变量  $X_i$  在其整个取值区间内的不确定性对失效概率的影响程度。由于式(1)中定义的指标不便求解, Li 和 Lu<sup>[17]</sup> 提出了一种新的重要性指标  $\delta_i^p$ , 即在原有指标的基础上将绝对值形式转化为方差形式, 其定义如下:

$$\delta_i^p = E_{x_i} [ P_f - P_{f|x_i} ]^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (P_f - P_{f|x_i})^2 f_{x_i}(x_i) dx_i \quad (2)$$

此外, Li 和 Lu<sup>[17]</sup> 还证明式(2)中的指标可转化为相应的基于方差的重要性指标, 即

$$\delta_i^p = E_{x_i} \{ [ E(I_F) - E(I_F | \mathbf{X}_i) ]^2 \} = V[ E(I_F | \mathbf{X}_i) ] \quad (3)$$

式中:  $I_F = \begin{cases} 1 & g(\mathbf{x}) \leq 0 \\ 0 & g(\mathbf{x}) > 0 \end{cases}$  为失效域指示函数;  $V[\cdot]$  为方差函数。

明显可以看出, 式(2)中定义的重要性指标为矩独立重要性指标, 但若将  $I_F$  看作模型输入, 它可以等效为 Sobol 基于方差的指标。因此,  $\delta_i^p$  可以用求解 Sobol 指标的方法进行求解, 也为矩独立重要性指标的求解提供了一种新的可选择方法。

Wei 等<sup>[18]</sup> 提出了一种可以高效求解条件方差的方法, 那么矩独立重要性指标  $\delta_i^p$  可以改为

$$E^2(E(I_F | x_i)) = E(E^2(I_F | x_i)) - P_f^2 = D_i - P_f^2 \quad (4)$$

式中:  $D_i = E(E^2(I_F | x_i))$ , 且  $P_f^2$  和  $D_i$  的数值计算方法分别为

$$\begin{cases} \hat{P}_f^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I_F(\mathbf{x}^j) I_F(\bar{\mathbf{x}}^j) \\ \hat{D}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I_F(\mathbf{x}^j) I_F(\bar{x}_1^j, \bar{x}_2^j, \dots, x_i^j, \dots, \bar{x}_n^j) \end{cases} \quad (5)$$

那么,  $\delta_i^p$  可以用式(6)计算得到:

$$\delta_i^p = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I_F(\mathbf{x}^j) I_F(\bar{x}_1^j, \bar{x}_2^j, \dots, x_i^j, \dots, \bar{x}_n^j) - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I_F(\mathbf{x}^j) I_F(\bar{\mathbf{x}}^j) \quad (6)$$

式中:  $x_i^j$  和  $\bar{x}_i^j$  分别为输入变量  $x_i$  的不同样本序列。因此, 仅使用  $2N$  个输入样本就可以计算得到式(3)中的重要性指标, 模型计算量为  $(n + 2)N$ 。

### 1.2 平均矩独立重要性测度

假定  $X_i^o$  为参数  $X_i$  在原始分布下的随机变量,  $X_i'$  为参数  $X_i$  在开展进一步研究后的新分布下的随机变量, 它们对应的重要性指标分别为  $\delta_i^{p^o}$  和  $\delta_i^{p'}$ 。那么, 本文可以定义新分布下参数方差与原始分布下参数方差的比值为  $\lambda_i = \text{var}(X_i') / \text{var}(X_i^o)$ 。由于开展进一步研究的目的在于减小参数  $X_i$  的方差, 那么有  $\lambda_i \in [0, 1]$ 。然而, 由于研究深入使得参数原始分布的方差减小程度未知, 可以假定  $\lambda_i$  为在  $[0, 1]$  区间服从均匀分布的随机变量, 也就给出了  $\lambda_i$  取值的最大熵分布。

假定参数  $X_i$  的方差在原方差基础上缩减的倍数为  $\Lambda_i$ , 那么缩减后的方差为原始分布方差的  $1 - \Lambda_i$ , 可以定义如下矩独立重要性指标:

$$\zeta_i = \delta_i^{p^o} - E[\delta_i^{p'} | \Lambda_i = \lambda_i] \quad (7)$$

式中:  $\lambda_i \in [0, 1]$ ;  $A_i = \lambda_i$  表示参数  $X_i$  的方差在原始方差基础上缩减  $\lambda_i$  倍;  $\delta_i^{p_0}$  为参数  $X_i$  的初始矩独立重要性指标;  $\delta_i^{p_r}$  为参数  $X_i$  的方差由  $V[X_i^0]$  缩减为  $\lambda_i V[X_i^0]$  (即  $V[X_i^r]$ ) 时对应的矩独立重要性指标。

假设任一参数  $X_i$  的方差可以被缩减为 0, 即  $\lambda_i = 0$ , 也就意味着参数  $X_i$  变为一常数, 即  $\delta_i^{p_r} = 0$ 。因此, 当  $\lambda_i = 0$  时,  $\zeta_i = \delta_i^{p_0}$ 。类似地, 若  $\lambda_i = 1$ , 也就意味着参数的方差没有被缩减, 那么  $\delta_i^{p_r} = \delta_i^{p_0}$ 。因此, 当  $\lambda_i = 1$  时,  $\zeta_i = 0$ 。

由于矩独立重要性指标可以转化为基于方差的重要性指标进行求解, 那么  $\zeta_i$  可以被等效转化为如下基于方差重要性指标函数的形式:

$$\zeta_i = V(E(I_F^0 | x_i^0)) - E[V(E(I_F^r | x_i^r)) | A_i = \lambda_i] \quad (8)$$

那么可以定义  $\zeta_i$  在  $\lambda_i$  取值范围内的平均值为参数  $X_i$  的平均矩独立重要性指标  $\tau_i$ , 其定义为  $\tau_i = E_{A_i}[\zeta_i(\lambda_i)]$  (9)

平均矩独立重要性指标  $\tau_i$  可以量化地反映当对模型中参数  $X_i$  作进一步研究时,  $\delta_i^{p_r}$  可被减小的平均程度。

需要指出的是, 给定某参数  $X_i$  的初始分布和一些  $\lambda_i$  值, 可能存在不止一种分布满足随机变量新分布下方差为原始分布下方差的  $\lambda_i$  倍。Allaire 和 Willcox<sup>[19]</sup> 提出了一种针对初始均匀分布和正态分布如何得到合理新分布的方法。

## 2 拒绝抽样方法

RS 方法可以从某给定分布产生理想分布样本, 该技术对于伪随机样本<sup>[20-21]</sup>和随机样本已经得到较好应用, 本文将该方法用于失效概率函数的求解中。

根据文献[20], 假设理想一维分布参数  $\theta^*$  下随机变量  $p$  的概率密度函数(PDF)为  $f_{p|\theta^*}(p)$ , 而分布参数  $\theta$  下随机变量  $X$  的 PDF 为  $f_{X|\theta}(x)$ , 而  $f_{X|\theta}(x)$  符合下面条件: 对任意  $X$  的一实现值  $x$ , 存在常数  $r$ , 满足  $r f_{X|\theta}(x) \geq f_{p|\theta^*}(x)$  对于所有  $x$  均成立。那么, RS 方法就可以用来产生  $J$  个服从  $f_{p|\theta^*}(p)$  分布的样本。下面分别对随机分布和低偏差序列的普通一维样本使用 RS 方法进行介绍。

**步骤 1** 1) 随机分布: 根据  $f_{X|\theta}(x)$  产生一系列随机样本  $x_i (i = 1, 2, \dots, M)$ 。

2) 低偏差序列: 产生低偏差序列的点  $(\xi_i, \nu_i) \in [0, 1]^2, i = 1, 2, \dots, M$ 。将  $\xi_i$  映射到  $x_i$ , 使用累积分布函数(CDF)的反变换  $x_i = F_{x_i}^{-1}(\xi_i)$  来

得到输入变量  $x_i$  的样本(其中  $F_{x_i}$  为  $x_i$  的 CDF)。

**步骤 2** 1) 随机分布: 产生一列在  $[0, 1]$  上均匀分布的样本  $u_i (i = 1, 2, \dots, M)$ 。

2) 低偏差序列:  $u_i = \nu_i$ 。

**步骤 3** 当  $i$  从 1 到  $M$  取值时, 若  $f_{p|\theta^*}(x) / f_{X|\theta}(x) \geq r u_i$ , 则  $p_j = x_i, j = j + 1$ ; 否则拒绝  $x_i$ 。

一般情况下, 取  $r = \max(f_{p|\theta^*}(x) u_i / f_{X|\theta}(x))$ 。

RS 方法可以用来求解式(8)中转化后的基于方差的重要性指标, 从而得到式(9)中的平均矩独立重要性指标, 步骤如下:

**步骤 1** 产生 2 列随机输入变量矩阵  $X_{N \times n}$  和  $\tilde{X}_{N \times n}$ , 并使用式(6)求解  $\delta_i^{p_0}$ 。

**步骤 2** 在区间  $[0, 1]$  上产生  $A_i = \lambda_i$  的均匀分布样本, 对给定  $\lambda_i$ , 列出所有更新后的分布如下:

1) 对于均匀分布  $U(a, b)$ , 在区间  $[a + \lambda_i^{1/2} \cdot (b - a), b]$  上产生  $b'$  的均匀分布样本, 并使  $a' = b' - \lambda_i^{1/2} (b - a)$ 。

2) 对于正态分布  $N(\mu, \sigma^2)$ , 令  $\mu' = \mu, \sigma' = \lambda_i^{1/2} \sigma$ 。

**步骤 3** 对于  $A_i = \lambda_i$  对应的可能的更新后的分布, 使用分布 1) 或者分布 2) 选择初始样本的子样, 并使用步骤 1 求解  $\delta_i^{p_r}$ 。

**步骤 4** 重复步骤 3 直到  $A_i = \lambda_i$  对应的所有更新后的分布分析完成, 然后使用式(7)对  $\zeta_i$  进行求解。

**步骤 5** 重复步骤 4 直到  $A_i$  对应的所有值分析完成, 然后使用式(9)对  $\tau_i$  进行求解。

由上述求解步骤可以看出, 根据输入变量  $\{x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(N)}\}$  的一组初始分布参数  $\theta$ , 采样得到 2 组  $N$  维输入样本及相应的输出样本, 利用式(6)对矩独立重要性指标  $\delta_i^{p_0}$  进行求解, 计算成本为  $N(2 + n)$ 。利用 RS 方法, 可以从初始的输入样本  $\{x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(N)}\}$  中根据更新后的分布  $f_{X|\theta^*}(x)$  筛选出符合条件的样本  $x^{(k)*}$ , 并得到相应的输出样本  $y^{(k)*}$ , 然后计算矩独立重要性指标  $\zeta_i$ , 从而得到平均矩独立重要性指标  $\tau_i$ 。

## 3 算例

### 3.1 数值算例——Ishigami 函数

Ishigami 函数被广泛用于可靠性分析中, 首先被 Ishigami 和 Homma 引入, 然后被用于测试重要性和不确定性分析技术中<sup>[2, 22]</sup>, 可表示为

$$Y = \sin X_1 + 5 \sin^2 X_2 + 0.1 X_3^4 \sin X_1 \quad (10)$$

式中:  $X_1, X_2, X_3$  3 个输入变量互相独立且服从均

匀分布  $X_i \sim U(-\pi, \pi) (i=1, 2, 3)$ 。使用 1000 个随机序列得到它们的矩独立重要性指标  $\delta_i^p$  分别为 0.0479、0.0258 和 0.0107。

要实现参数优化,根据重要性指标  $\delta_i^p$  的排序可以看出,首先要重点关注参数  $X_1$ 。为了说明矩独立重要性指标函数的优点,现分别采用 Sobol 和 RS 方法对各输入参数在  $\lambda_i = 0, 0.05, 0.10, \dots, 1$  时开展分析,  $\lambda_i = 1$  时对应的即为  $\delta_i^p$ , 如图 1(a) 和图 2(a) 所示。由图中可以看出,当输入参数的方差缩减时,对失效概率的影响呈现高度的非线性。而  $\delta_i^p$  指标的结果很可能误导工程分析人员,使其在决定如何合理分配资源以降低失效概率时做出不合理决策。举例来说,当参数  $X_1$  方差减小 10% 时,失效概率实际上增大了;当参数  $X_1$  方差减小 50% 以上时,失效概率才开始减小。分析参数  $X_2$  和  $X_3$  可以得到类似的结论。

根据矩独立重要性指标函数可以计算得到平均矩独立重要性指标,如图 1(b) 和图 2(b) 所示。

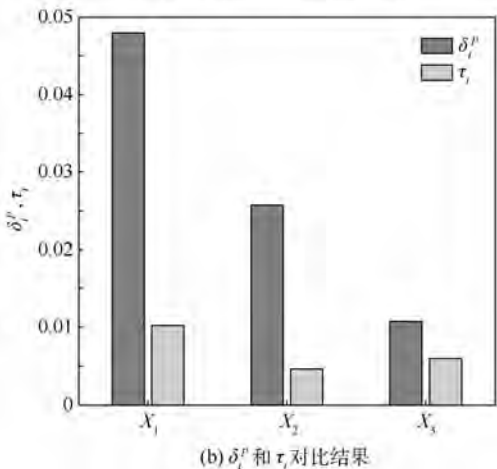
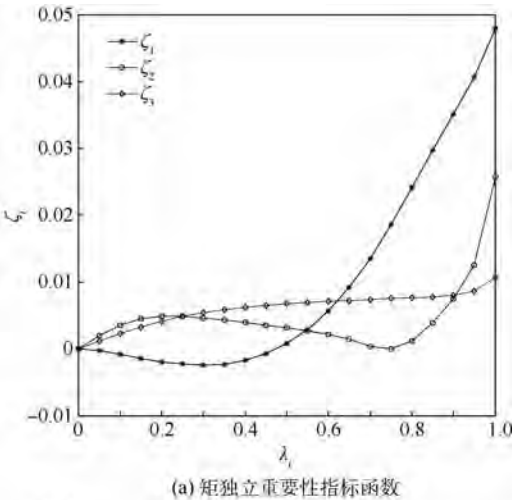


图 1 Sobol 方法求解的 Ishigami 测试函数重要性指标结果

Fig. 1 Importance index results solved by Sobol's method for Ishigami test function

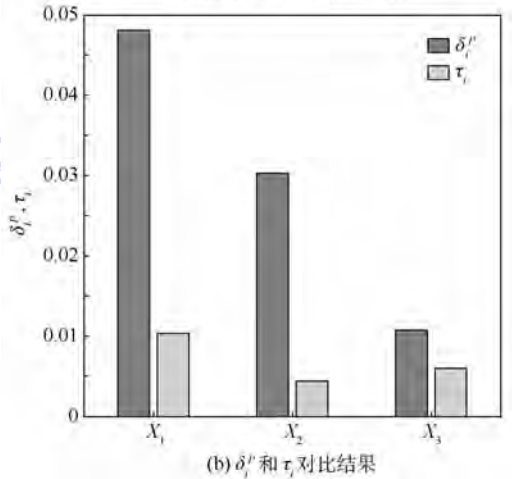
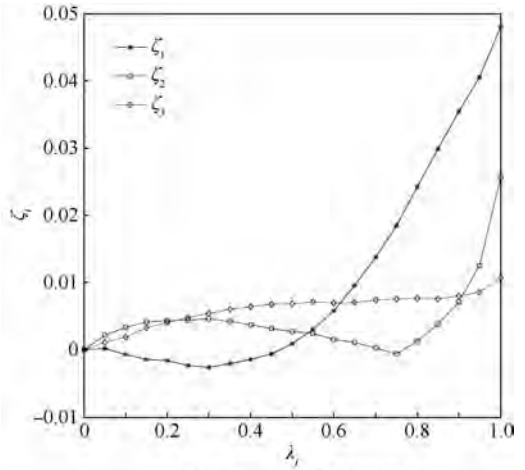


图 2 RS 方法求解的 Ishigami 测试函数重要性指标结果  
Fig. 2 Importance index results solved by RS method for Ishigami test function

不难看出,若假设所有参数的不确定性均可以被消除,矩独立重要性指标函数度量的是哪个参数的方差的可以被进一步减缩,这也是平均矩独立重要性指标与当前矩独立重要性指标的区别。

若使用 Sobol 方法,那么矩独立灵敏度指标和图 1 结果的调用功能函数的次数分别为  $10^3$  和  $21 \times 10^3$ , 而 RS 方法则大大节约了模型计算量。利用求解  $\delta_i^p$  时产生的输入输出样本,RS 就可以在保证精度的前提下提供矩独立重要性指标函数及平均矩独立重要性指标等额外信息,图 2 中结果证明了 RS 方法的有效性和准确性。

### 3.2 工程算例——屋架结构

屋架上弦杆和其他压杆均采用钢筋混凝土杆,下弦杆和其他拉杆则采用钢杆,见图 3<sup>[17]</sup>。假定屋架结构承受均布载荷  $q$ , 将其转化成节点载荷后可得  $P = ql/4$ ,  $l$  为杆长。用结构力学分析可得  $C$  点沿垂直地面方位移为  $\Delta_c = \frac{ql^2}{2} \cdot$

$\left( \frac{3.81}{A_c E_c} + \frac{1.13}{A_s E_s} \right)$ , 其中:  $A_c$  和  $A_s$  分别为混凝土和钢

杆的横截面积,  $E_c$  和  $E_s$  分别为混凝土和钢杆的弹性模量。出于安全和适用的考虑, 以顶端  $C$  点挠度  $\Delta_c \leq 0.03$  m 为约束条件, 即结构系统的功能函数为  $g_f = 0.03 - \Delta_c$ 。假设所有输入服从相互独立的正态分布, 其分布参数见表 1。

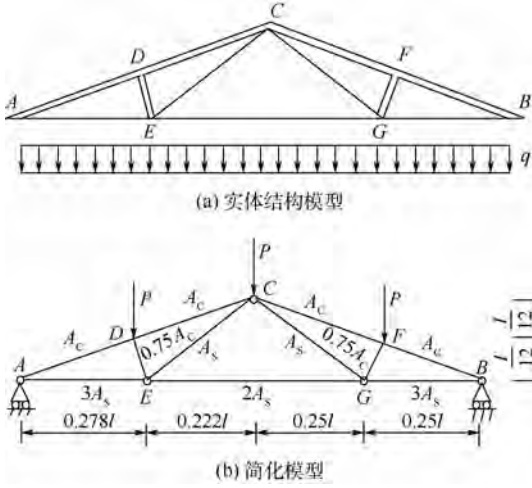


图 3 屋架结构模型的示意图<sup>[17]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of a roof truss structure model<sup>[17]</sup>

表 1 屋架结构模型中输入变量的分布参数

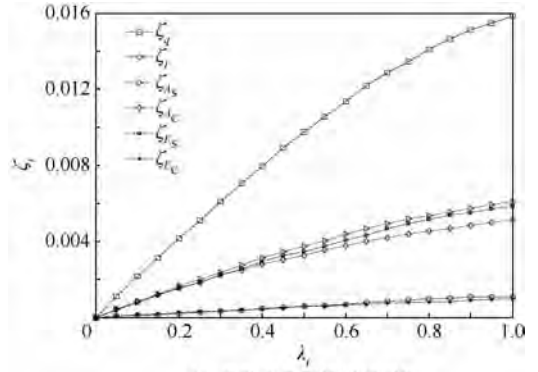
Table 1 Distribution parameters of input variables of roof truss structure model

分布参数	均值	变异系数
$q$	20 000 N/m	0.07
$l$	12 m	0.01
$A_s$	$9.82 \times 10^{-4}$ m <sup>2</sup>	0.06
$A_c$	0.04 m <sup>2</sup>	0.12
$E_s$	$1 \times 10^{11}$ N/m <sup>2</sup>	0.06
$E_c$	$2 \times 10^{10}$ N/m <sup>2</sup>	0.06

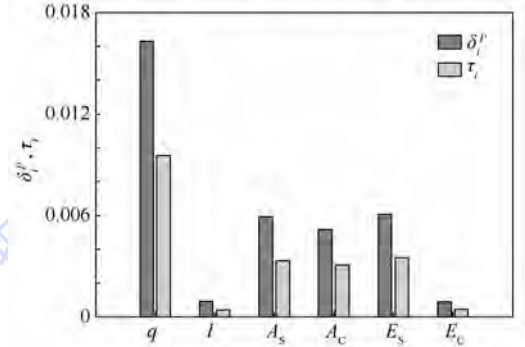
使用 Sobol 方法和 RS 方法分别计算的矩独立重要性指标函数和平均矩独立重要性指标分别如图 4 和图 5 所示, 其调用功能函数的次数分别为  $5 \times 10^3$  和  $21 \times 5 \times 10^3$ 。矩独立重要性指标函数曲线说明通过每个输入参数是否被进一步研究取决于其本身的方差可减少程度。本算例中可以看出, 通过减小任一输入参数的方差, 由于矩独立重要性指标函数的曲线单调递增, 均可以达到降低结构系统失效概率的目的。此外, 明显可以看出, RS 方法和 Sobol 方法所得结果的一致性。

### 3.3 工程算例——十杆桁架结构

考虑图 6 (a) 中的平面十杆桁架结构模型<sup>[23]</sup>, 水平杆和竖直杆的长度和弹性模量均为  $L$  和  $E$ , 每根杆的横截面积为  $A_i$  ( $i=1, 2, \dots, 10$ ), 载荷作用在节点 2 和节点 3 处。设  $L, E, A_i$  ( $i=1, 2, \dots, 10$ ) 和  $P_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 为 15 个相互独立服从正态分布的随机变量, 分布参数见表 2。以节



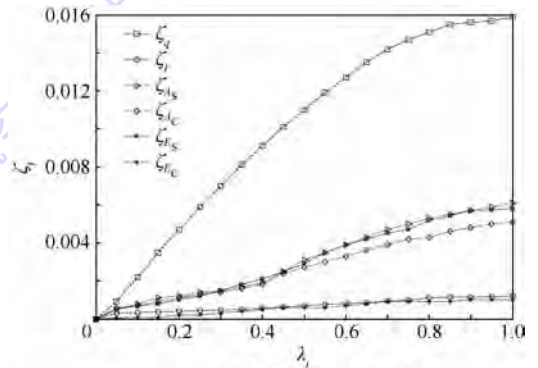
(a) 矩独立重要性指标函数



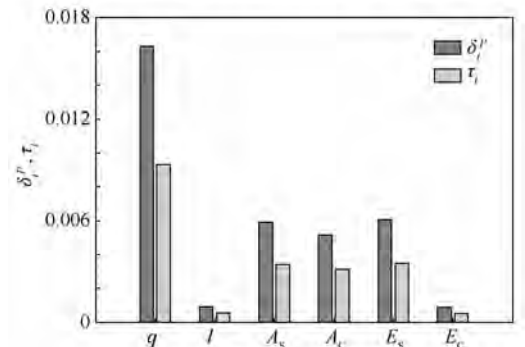
(b)  $\delta_i^p$  和  $\tau_i$  对比结果

图 4 Sobol 方法求解的屋架结构模型重要性指标结果

Fig. 4 Importance index results solved by Sobol's method for roof truss structure model



(a) 矩独立重要性指标函数



(b)  $\delta_i^p$  和  $\tau_i$  对比结果

图 5 RS 方法求解的屋架结构模型重要性指标结果

Fig. 5 Importance index results solved by RS method for roof truss structure model

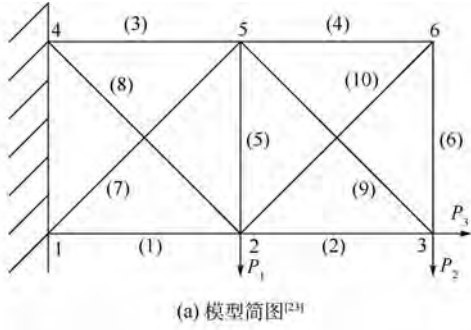


图 6 平面十杆桁架结构模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of a planar ten-bar truss structure model

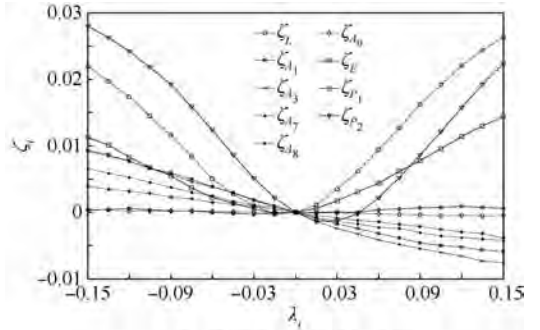
表 2 十杆桁架结构模型中输入变量的分布参数

Table 2 Distribution parameters of input variables of ten-bar truss structure model

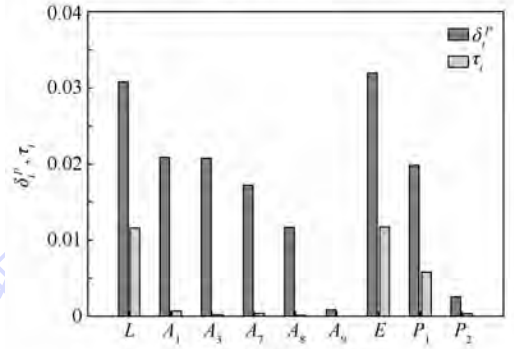
分布参数	均值	变异系数
$L$	1 m	0.05
$E$	100 GPa	0.05
$P_1$	80 kN	0.05
$P_2$	10 kN	0.05
$P_3$	10 kN	0.05
$A_i$	0.001 m <sup>2</sup>	0.15

点 3 的纵向位移不超过 0.004 m 为约束条件,那么结构系统的功能函数为  $g_f = 0.004 - \Delta_y$ , 其中  $\Delta_y$  为隐式功能函数,即  $\Delta_y = \Delta(A_i, L, P_1, P_2, P_3, E) (i = 1, 2, \dots, 10)$ 。

本算例中假设输入参数的方差不可减缩,然而输入参数的均值可以在一定范围内移动。这里假设  $\lambda_i = (\mu_i - \mu_i^0) / \mu_i^0, \lambda_i \in [-0.15, 0.15]$ , 那么使用 Sobol 方法和 RS 方法计算得到的矩独立指标函数和平均矩独立重要性指标分别见图 7 和图 8,其调用功能函数的次数分别为  $10^4$  和  $21 \times 10^4$ 。从图中可以看出,当  $\lambda_i = 0$  时,参数的均值没有移动,且  $\delta_i^{P^*} = \delta_i^{P^0}$ ,那么  $\zeta_i = 0$ 。同时,输入参数  $L, E$  和  $P_1$  的矩独立重要性指标函数的非线性程度最高,也就说明工程人员可以针对这几个参数的均值移动作进一步研究和探索。根据矩独



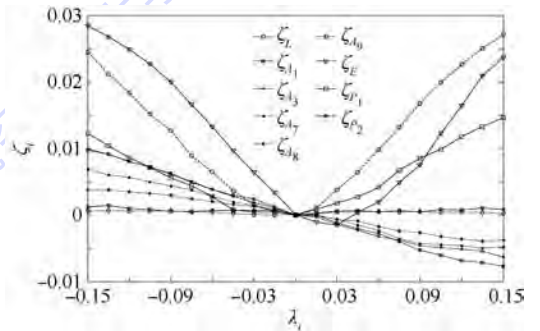
(a) 矩独立重要性指标函数



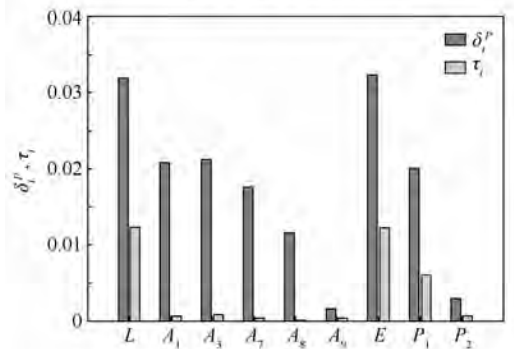
(b)  $\delta_i^{P^*}$  和  $\tau_i$  对比结果

图 7 Sobol 方法求解的十杆桁架结构模型重要性指标结果

Fig. 7 Importance index results solved by Sobol's method for ten-bar truss structure model



(a) 矩独立重要性指标函数



(b)  $\delta_i^{P^*}$  和  $\tau_i$  对比结果

图 8 RS 方法求解的十杆桁架结构模型重要性指标结果

Fig. 8 Importance index results solved by RS method for ten-bar truss structure model

立重要性指标函数,就可以对平均矩独立重要性指标进行求解。本算例中的结果再次证明了RS方法的高效性和准确性。

## 4 结 论

矩独立重要性分析被广泛应用于工程结构分析中,然而当前存在的指标是建立在假设输入参数的不确定性不能被减小或消除的基础上。实际上,输入参数的方差/均值(或其他分布参数)的被减缩量是未知的,因此得到如下结论:

1) 输入变量分布参数发生变化时,各个变量对应的全局矩独立重要性指标也发生变化,而本文提出的平均矩独立重要性指标可以衡量输入变量分布参数变化时对输出响应的平均影响。

2) RS方法可以使用原始全局重要性分析中的样本,额外获取输入变量分布参数发生变化时的矩独立重要性指标,从而计算得到平均矩独立灵敏度指标。这样在不增加额外计算成本的情况下获取更多的信息,为研究人员进一步进行工程设计和优化提供了丰富的指导信息。

## 参考文献 (References)

- [1] 吕震宙,宋述芳,李洪双,等. 结构机构可靠性及可靠性灵敏度分析[M]. 北京:科学出版社,2009:2-7.  
LU Z Z, SONG S F, LI H S, et al. Reliability and reliability analysis for structure and mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2009: 2-7 (in Chinese).
- [2] SALTELLI A, TARANTOLA S, CAMPLONGO F, et al. Sensitivity analysis in practice: A guide to assessing scientific models [M]. New York: Wiley, 2004: 3-10.
- [3] WANG W, ZHOU C, GAO H, et al. Application of non-probabilistic sensitivity analysis in the optimization of aeronautical hydraulic pipelines [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 57(6): 2177-2191.
- [4] BORGONOVO E. Measuring uncertainty importance: Investigation and comparison of alternative approaches [J]. Risk Analysis, 2006, 26(5): 1349-1361.
- [5] HELTON J C, DAVIS F J. Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2003, 81: 23-69.
- [6] SALTELLI A, MARIVOET J. Non-parametric statistics in sensitivity analysis for model output: A comparison of selected techniques [J]. Reliability Engineering & System Safety, 1990, 28: 229-253.
- [7] MORRIS M. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments [J]. Technometrics, 1991, 33(2): 161-174.
- [8] LAMBONIA M, IOOSS B, POPELIN A L et al. Derivative-based global sensitivity measures: General links with Sobol' indices and numerical tests [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2013, 87: 45-54.
- [9] SOBOL I M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2001, 55(1): 221-280.
- [10] CASTILLO E, MINGUEZ R, CASTILLO C. Sensitivity analysis in optimization and reliability problems [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2008, 93(12): 1788-1800.
- [11] BORGONOVO E. A new uncertainty importance measure [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2007, 92(6): 771-784.
- [12] CHUN M H, HAN S J, TAK N I. An uncertainty importance measure using a distance metric for the change in a cumulative distribution function [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2000, 70(3): 313-321.
- [13] ARCHER K J, KIMES R V. Empirical characterization of random forest variable importance measures [J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2008, 52(4): 2249-2260.
- [14] CUI L J, LU Z Z, ZHAO X P. Moment-independent importance measure of basic random variable and its probability density evolution solution [J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53: 1138-1145.
- [15] 王文选, 高行山, 周长聪. 基于点估计的矩独立重要性测度分析方法 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(8): 16-24.  
WANG W X, GAO H S, ZHOU C C. The moment-independent importance measure analysis method based to point-estimate [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(8): 16-24 (in Chinese).
- [16] ZHOU C, LU Z, LI W. Sparse grid integration based solutions for moment-independent importance measures [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2015, 39: 46-55.
- [17] LI L Y, LU Z Z. Moment-independent importance measure of input variable and its state-dependent parameter solution [J]. Structural Safety, 2012, 38: 40-47.
- [18] WEI P F, LU Z Z, HAO W R, et al. Efficient sampling methods for global reliability sensitivity analysis [J]. Computer Physics Communications, 2012, 183: 1728-1743.
- [19] ALLAIRE D L, WILLCOX K E. A variance-based sensitivity function for factor prioritization [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2012, 107: 107-114.
- [20] DEGROOT M, SCHERVISH M. Probability and statistics [M]. 3rd ed. Boston: Addison-Wesley, 2002: 35-40.
- [21] WANG X. Improving the rejection sampling method in quasi-Monte Carlo methods [J]. Journal of Computational & Applied Mathematics, 2000, 114: 231-246.
- [22] STORLIE C, SWILER L, HELTON J, et al. Implementation and evaluation of nonparametric regression procedures for sensitivity analysis of computationally demanding models [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94: 1735-1763.
- [23] LU Z Z, LIU C L, YUE Z F. Probabilistic safe analysis of the working life of a powder-metallurgy turbine disk [J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 395: 153-159.

设计。

作者简介:

程蕾 女,博士,工程师。主要研究方向:结构、机构可靠性

张磊刚 男,硕士,工程师。主要研究方向:结构可靠性设计。

## An average moment-independent importance index and its rejection sampling method

CHENG Lei, ZHANG Leigang\*, LEI Bao, LIANG Zudian, LIU Peng

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** In the process of moment-independent importance analysis, importance index are always used to quantify the inverse allocation of structural system output uncertainty to input uncertainty. An assumption is given that the variance of a given factor can be reduced by future research, which leads to the development the moment-independent index function. The moment-independent importance index function provides an index for a given factor as a function of the amount of variance of that factor can be reduced. Meanwhile, by assuming the reduction amount of a particular factor variance as a random variable, the average moment-independent importance index is defined by taking average of the moment-independent importance index function. Estimating the average moment-independent importance index involves a large amount of computation using Sobol's method, and thus rejection sampling (RS) method is introduced here with the generated samples used in Sobol's method. Consequently, RS can use the samples generated during Sobol's method to accurately estimate the moment-independent importance index function and the average moment-independent importance index without any further model evaluation, which greatly reduces the computational cost. Numerical and engineering examples are demonstrated to show the effectiveness of the proposed measures and the accuracy and availability of the RS method.

**Keywords:** importance analysis; moment-independent importance index function; average moment-independent importance index; Sobol's method; rejection sampling (RS)

**Received:** 2018-05-08; **Accepted:** 2018-07-27; **Published online:** 2018-09-10 16:36

**URL:** [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180907.1135.004.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180907.1135.004.html)

**Foundation item:** Equipment Development Department the "13th Five-year" Equipment Research Field Foundation of China Central Military Commission (6140244010216HT15001)

\* **Corresponding author.** E-mail: leigang\_zhang@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0197

# 面向气热耦合的涡轮叶片计算域模型建模方法



王添<sup>1</sup>, 席平<sup>1,\*</sup>, 胡毕富<sup>1</sup>, 李吉星<sup>1</sup>, 石晓飞<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083;

2. 海鹰航空通用装备有限责任公司 无人机总体技术研究室, 北京 100074)

**摘 要:** 针对冷却结构复杂的涡轮叶片在气热耦合数值模拟中计算域模型建模效率低、模型质量不稳定以及对数值模拟适应性差等问题, 分析面向制造的涡轮叶片模型及建模方法, 结合气热耦合数值模拟对涡轮叶片数值模拟的实际需求, 提出一种面向气热耦合的涡轮叶片计算域建模方法。通过外型冷却特征自动定位生成算法, 创建涡轮叶片冷气域部分; 通过自适应管道求交算法、边界自动匹配算法, 创建能够适应不同叶型的涡轮叶片燃气域部分; 此外, 在创建流体域的过程中提取气热耦合数值模拟所需的关键几何特征及非几何信息, 并与冷气域、燃气域、叶片实体集成, 完成气热耦合计算域模型的生成。基于以上研究开发涡轮叶片气热耦合计算域模型快速建模系统, 验证所提方法的有效性。

**关键词:** 计算机辅助设计; 涡轮叶片; 气热耦合; 数值模拟; 几何建模

**中图分类号:** TP391.7; V232.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5965(2019)01-0074-09

推重比是航空发动机重要性能参数, 提高涡轮前燃气温度是提高推重比有效措施<sup>[1]</sup>。由于涡轮前燃气温度已远高于叶片常用材料的耐受温度, 为保证叶片安全工作及寿命要求, 在结构设计中普遍采用复合冷却技术对叶片进行冷却, 这使得涡轮叶片结构复杂<sup>[2]</sup>。准确预测涡轮叶片的温度场是提高冷却效率、延长叶片工作寿命的关键<sup>[3-4]</sup>, 通过实验测量获取传热数据, 测量难度大、实验成本高、周期长, 传统的热分析方法已不能满足对结构复杂叶片温度场预测的要求<sup>[5]</sup>, 采用以数值模拟为主的“预测设计”可有效地拓宽实验研究范围, 减少实验次数, 降低实验成本<sup>[6]</sup>。气热耦合数值模拟方法可以实现对涡轮叶片工作状态的模拟, 是工程设计和科学研究中普遍采用的辅助方法<sup>[7-8]</sup>。

涡轮叶片气热耦合计算域模型是气热耦合分

析的基础, 其建模速度与精度决定着数值模拟计算周期与计算结果准确性<sup>[9-10]</sup>。为获取计算域模型, 需要对涡轮叶片数值模拟进行大量的人工处理。涡轮叶片数值模拟包含大量的自由曲面和复杂的冷却结构, 处理过程需创建几何辅助元素, 此过程需频繁、重复的人工交互, 建模效率低、模型质量不能保证<sup>[11]</sup>。

基于特征和解析的叶片建模技术<sup>[12]</sup>和复杂冷却结构造型方法<sup>[13-14]</sup>, 使得参数化的叶片三维模型在叶片冷却结构优化<sup>[15]</sup>以及采用气热耦合的热分析方法中得到了应用<sup>[16]</sup>, 在一定程度上解决了涡轮叶片建模效率的问题, 但其仅限于叶片实体建模, 对于不同的数值模拟方法其计算域模型仍需繁琐的人工调整与建模。针对传热设计的数据提取方法<sup>[17]</sup>和面向数值模拟的叶片建模方法<sup>[18]</sup>从数值模拟角度对建模过程进行改进, 但对

收稿日期: 2018-04-10; 录用日期: 2018-05-18; 网络出版时间: 2018-06-19 15:31

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180615.1555.004.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180615.1555.004.html)

\* 通信作者: E-mail: xiping@buaa.edu.cn

**引用格式:** 王添, 席平, 胡毕富, 等. 面向气热耦合的涡轮叶片计算域模型建模方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 74-82. WANG T, XI P, HU B F, et al. A conjugated heat transfer oriented modeling method of turbine blade computational domain model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 74-82 (in Chinese).

气热耦合计算域模型的建模未作详细描述。以气热耦合计算域模型为基础的网格自动划分技术<sup>[19]</sup>以及运用气热耦合方法进行涡轮叶片冷却结构设计与优化的方法<sup>[20]</sup>,主要面向的冷却结构简单的叶片或简化后叶片,应用到具有复杂冷却结构的叶片仍有一定的局限性。

因此,本文对面向制造的涡轮叶片模型几何特点及其建模方法进行了分析,结合工程设计及科学研究中气热耦合数值模拟对叶片建模的具体需求,分析了 2 种不同应用方向模型的区别与联系,提出面向气热耦合的涡轮叶片计算域模型建模方案;采用外型冷却特征快速定位生成算法实现叶片内型到冷气域的快速建模;采用自适应管道求交算法、边界自动匹配算法实现由叶片实体到外流燃气域快速生成;此外,在建模过程中提取气热耦合数值模拟所需的关键几何特征及非几何信息,完成气热耦合计算域模型的生成。该方法能满足具有复杂冷却结构在气热耦合模拟中计算域几何模型的快速创建,建模效率高、质量稳定,通过开发快速建模系统及实例验证,验证所提方法的有效性和可行性。

## 1 涡轮叶片实体模型与气热耦合计算域模型

涡轮叶片气热耦合计算域模型是在涡轮叶片实体模型的基础上构建的,与实体模型既有区别又有联系,因此在阐述计算域建模方法时有必要

对涡轮叶片实体模型进行界定。

### 1.1 面向制造的涡轮叶片实体模型

面向制造的涡轮叶片实体模型的构建主要在于叶片外型曲面和冷却结构等几何形状的准确表达,从而用于加工制造。涡轮冷却叶片可分为典型特征  $F_m = \{f_i(Q_{f_i}) \mid i = 1, 2, \dots, 13\}$ , 式中:  $f_1 \sim f_{13}$  依次为:叶身外型、缘板、榫头外型、榫头内型、伸根、叶身内型、隔肋、转接段、扰流肋、扰流柱、尾缝、冲击孔、气膜孔;  $Q_{f_i}$  为实现构建  $f_i$  的参数域。任意一个涡轮冷却叶片的基本特征集合为  $F'_m$ , 则  $F'_m \subseteq F_m$ 。

根据以上分解方法,一般地,叶片内型实体可表示为  $M_i = (f_6, f_7, f_8, f_9, f_{10}, f_{11}, f_5, f_4, e_i)$ , 式中:  $e_i$  表示特征与实体操作关系,  $e_i$  可表示为  $\{e_i^{(j)} \mid j = 1, 2, \dots, 7\}$ , 减操作时  $e_i$  取 0, 加操作时  $e_i$  取 1, 如图 1 所示; 叶片外型实体可表示为  $M_o = (f_1, f_2, f_3, e_o)$ , 式中: 特征与实体操作关系  $e_o = \{e_o^{(j)} \mid j = 1, 2\}$ , 如图 2 所示; 叶片实体可表示为  $M_b = (M_o, M_i, f_{12}, f_{13}, e_b)$ , 特征与实体操作关系  $e_b = \{e_b^{(j)} \mid j = 1, 2, 3\}$ , 如图 3 所示。

上述建模方法,对涡轮叶片的功能结构分解为典型特征,以方便设计与参数修改,包含几何的约束关系和特征树完整,记录了叶片的建模过程(其中特征与实体操作  $e$  元记录了建模历史,特征参数域  $Q_f$  可以驱动特征的设计与修改),但由于建模意图不明确,面向后续数值模拟的适应性不强。

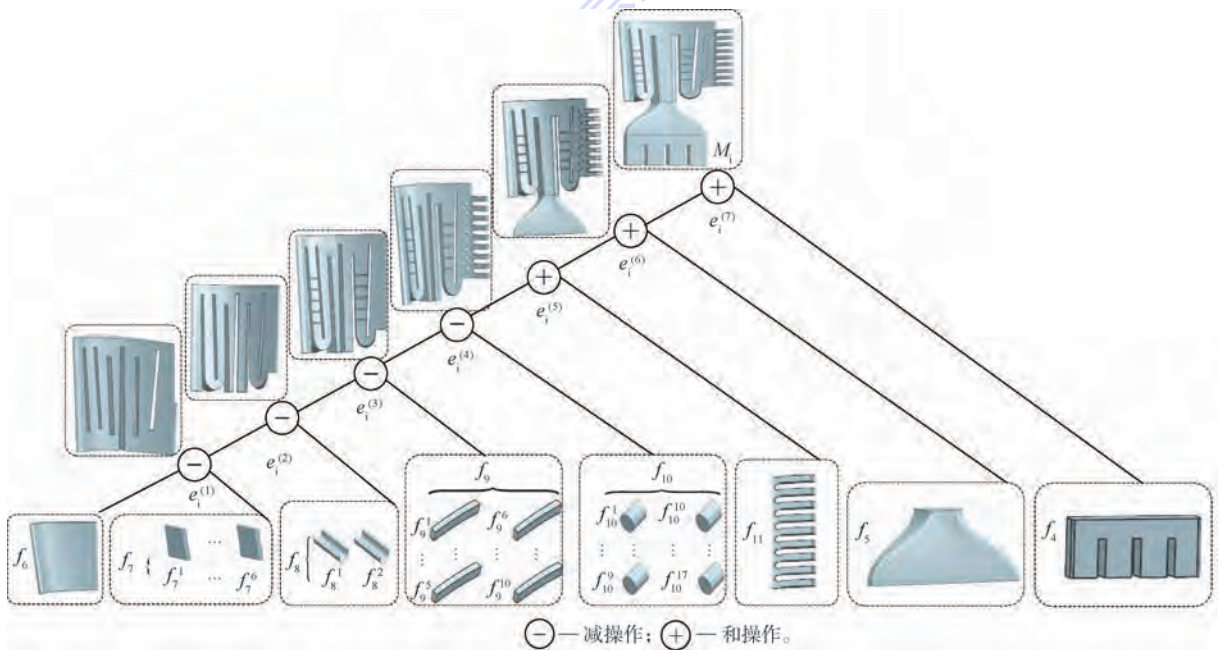


图 1 叶片内型实体建模与特征关系树

Fig. 1 Blade interior solid modeling and feature relationship tree

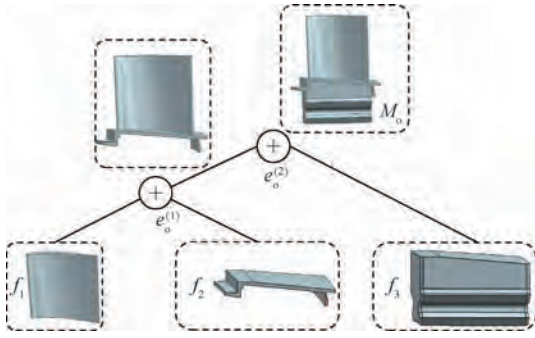


图2 叶片外型实体建模与特征关系树  
Fig.2 Blade exterior solid modeling and feature relationship tree

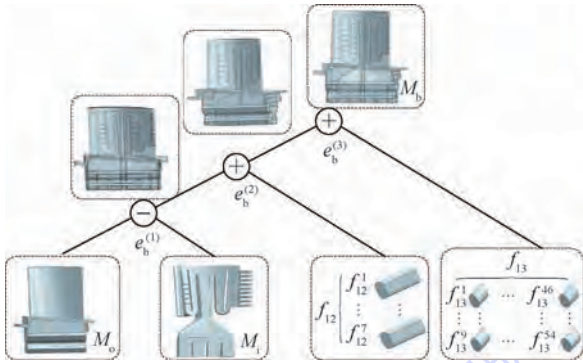


图3 叶片实体建模与特征关系树  
Fig.3 Blade solid modeling and feature relationship tree

1.2 面向气热耦合的涡轮叶片计算域模型

气热耦合数值模拟中涡轮叶片计算域模型主要包括了流体计算域与固体计算域,根据流场特性同时兼顾模型分区及网格划分策略,可将流体计算域分为燃气域和冷气域。具体地,根据已有叶片实体模型  $M_b$  和叶片流道信息所创建的流道实体  $M_p$ ,采用人工交互的方式进行计算域模型构建,通过  $M_p$  对  $M_b$  进行布尔差,形成流体计算域  $M_f$ ,对  $M_f$  进行裁剪、分割和组合等方法将流体域分为燃气域  $M_g$  和冷气域  $M_c$ ,如图4所示。

实体模型  $M_b$  和  $M_p$  到实体模型  $M_f$  的映射,完成计算域的生成,这一过程没有包含建模历史,只知道建模结果,且得到均为非参的实体模型;流体域  $M_f$  分割为冷气域  $M_c$  和燃气域  $M_g$ ,包含有大量的工程设计经验以及频繁的人工交互,建模过程无规律可循,不支持叶片模型的快速修改和系列化设计。而数值分析过程是根据计算结果对叶片模型进行修改再分析的反复迭代过程,构建和调整缺乏建模历史的非参实体模型,重复工作多、调整过程繁琐且模型质量无法保证。

此外,上述建模方法,仅考虑计算域几何模型的构建,没有从气热耦合数值模拟全过程进行分析,考虑后续分析对于建模的要求。事实上,后处理阶段,为获取叶片关键位置的温度分布、压力分布以及冷却结构的冷气流量、速度以及压力等参数,需提取计算域模型中几何元素,然后进行计算结果的观察与分析,而在分析软件中进行复杂几何特征的定位与生成,难度大、工作量大且精度不能保证。

根据以上分析,可以得出气热耦合数值模拟过程对于计算域建模的要求如下:

- 1) 涡轮叶片内流冷气域快速构建的通用方法。
- 2) 外流燃气域的生成要与叶片模型相适应,并可以进行灵活调整。
- 3) 关键几何特征的定位与生成等分析信息的提取。

因此,可构建面向气热耦合的涡轮叶片计算域模型,固体计算域为叶片实体,可表示为  $M_s = (M_b, A_b)$ ,其中  $A_b$  表示从  $M_b$  中提取的分析信息;冷气域是冷却气体通过叶片内部冷却通道所形成的流体区域,可表示为:  $M_c = (f_6, f_7, f_8, f_9, f_{10}, f_{11}, f_5, f_4, f_{12}^1, f_{13}^1, e_c, A_c)$ ,式中:特征与实体操作关系

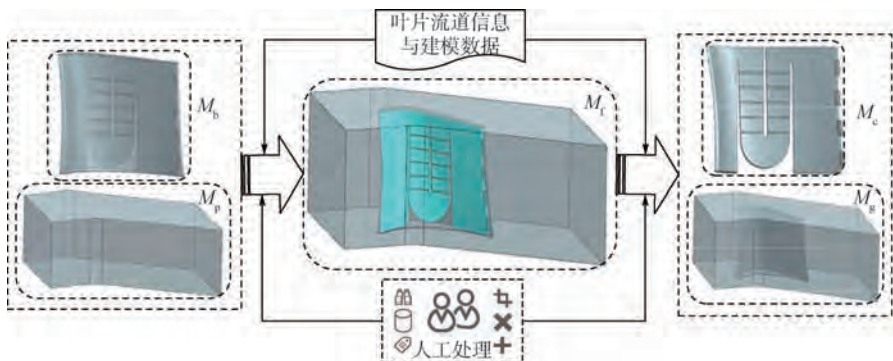


图4 传统气热耦合数值模拟计算域模型建模方法

Fig.4 Traditional modeling method of conjugated heat transfer numerical simulation computational domain model

$e_c = \{e_c^{(j)} | j=1, 2, \dots, 10\}$ ,  $A_c$  为从  $M_c$  中提取的分析信息。与叶片内型实体  $M_i$  相比,增加了叶片外型实体  $M_o$  中冲击孔  $f_{12}$  的“反相”实体  $f'_{12}$  和气膜孔  $f_{13}$  的“反相”实体  $f'_{13}$  等外型冷却特征(创建外型后创建的,与内型冷却特征相对),此外,还需对尾缝  $f_{11}$  进行裁剪处理,得到  $f'_{11}$ 。燃气域  $M_g = (M_p, M_b, M_c, e_g, A_g)$ , 式中:  $e_g = \{e_g^{(j)} | j=1, 2\}$ ,  $e_g^{(1)} = 0, e_g^{(2)} = 0$ , 表示燃气域由叶栅流道流域  $M_p$  与叶片实体  $M_b$ 、冷气域  $M_c$  的布尔差形成,  $A_g$  表示从  $M_g$  中提取的分析信息; 涡轮叶片计算域  $M_d = (M_b, M_g, M_c, A_d)$ , 式中:  $A_d$  为气热耦合数值模拟所需的分析信息,  $A_d = \{A_g, A_b, A_c\}$ 。

因此,可以设计面向气热耦合的涡轮叶片计算域建模方案(见图 5),根据内型截面线与建模参数,生成叶身内型与冷却结构,再自动定位外型冷却特征,实现冷气域的快速建模,满足了要求 1);根据外型截面线与叶片建模参数,创建叶身外型,进而创建自适应叶片周期性边界以及叶片包裹体,再根据叶片周期性边界、壁面边界以及进出口方向与长度,对包裹体进行自适应裁剪,实现燃气域快速建模,满足了要求 2);在冷气域建模与燃气域建模过程中,根据相关建模参数,进行关键几何特征的提取与非几何信息的保存,满足了要求 3)。

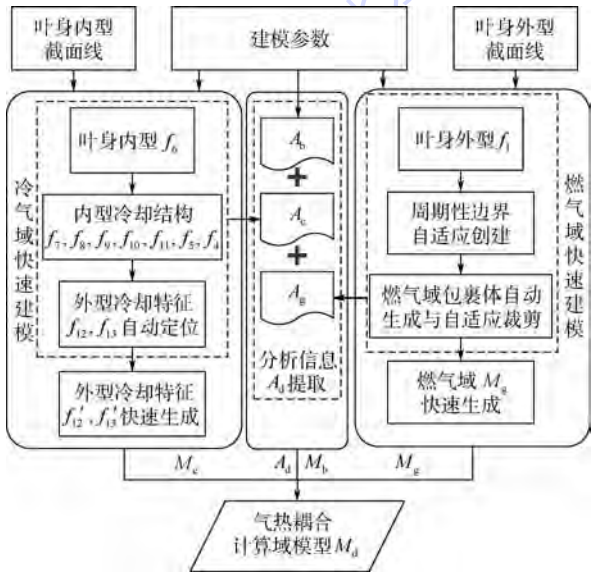


图 5 面向气热耦合的涡轮叶片计算域建模方案

Fig. 5 Conjugated heat transfer oriented modeling scheme of turbine blade computational domain

## 2 面向气热耦合的涡轮叶片冷气域建模及分析数据提取方法

### 2.1 涡轮叶片冷气域建模方法

涡轮叶片冷气域模型  $M_c$  (见图 6), 构建流程

如图 7 所示,设冷气域模型为:  $M_c = (f_6, f_7, f_8, f_9, f_{10}, f'_{11}, f_5, f_4, f'_{12}, f'_{13}, e_c, A_c)$ , 叶片实体模型为:  $M_b = (M_o, M_i, f_{12}, f_{13}, e_b)$ , 叶片外型实体  $M_o = (f_1, f_2, f_3, e_o)$ 。

若冷却域模型构建有效,需同时满足以下条件:

- 1) 模型参数化条件。  $M_o = M_b \cup M_c$ , 且  $e_b, e_o$  和  $e_c$  均不为空集。
- 2) 参数完备性条件。  $f'_{11} f'_{12} f'_{13}$  与  $f_{11} f_{12} f_{13}$  参数域一致。
- 3) 分析信息完整条件。  $A_c$  完整提取。

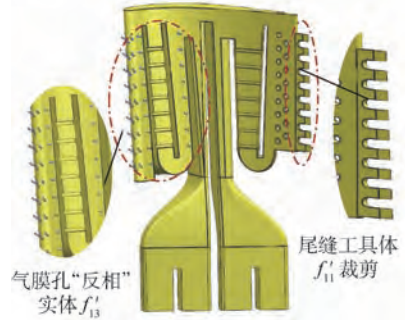


图 6 冷气域几何模型

Fig. 6 Geometric model of cooling air fluid domain

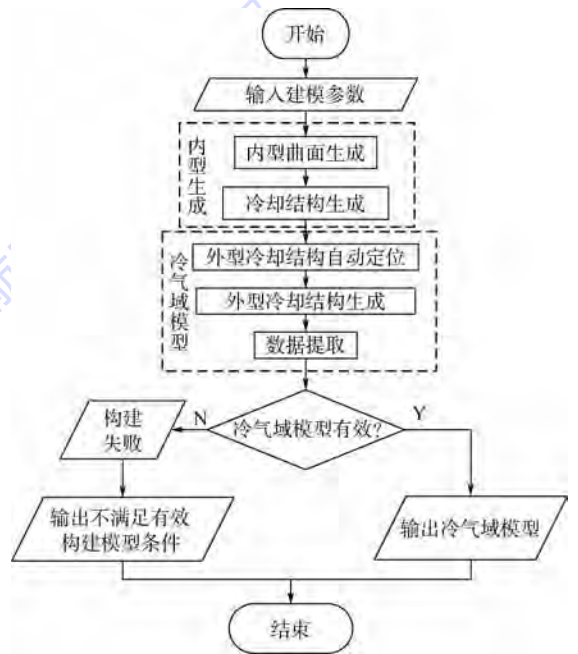


图 7 冷气域模型构建流程

Fig. 7 Flowchart of cooling air fluid domain modeling

### 2.2 冷气域模型及关键算法

由冷气域模型  $M_c$  定义,可知冷却域模型  $M_c$  构建的主要包括叶片内型的构建  $M_i$  以及外型冷却特征在内型上的生成,并在冷气域几何建模过程中提取相关分析数据并集成到  $A_c$  中。其难点主要在于外型特征自动定位与关键特征面的提取,以下就外型冷却特征及相关算法进行详细

描述。

### 2.2.1 外型冷却特征

外型冷却特征主要指具有一定冷却功能且创建在叶片外型上或在内型建模之后的特征,主要包括气膜孔 $f_{i3}$ 和冲击孔 $f_{i2}$ 等。本节以数量多、定位条件复杂的气膜孔为例,详细阐述外型冷却特征的自动定位及生成方法。

#### 1) 气膜孔设计参数与建模参数

为实现气膜孔“反相”特征 $f'_{i3}$ 的定位与生成,首先需明确气膜孔 $f_{i3}$ 的设计,如图8所示,气膜孔的定位依靠在叶身外型 $S_o(u, v)$ 上的定位点 $C(u_o, v_o)$ 确定, $u$ 和 $v$ 分别为参数域内的标量,在参数域内参数曲面内的点坐标为 $p(u, v)$ ,然后通过参数曲面 $S_o(u, v)$ 上一条参数曲线 $\rho(t) = [u(t), v(t)]$ (其中 $0 \leq t \leq 1$ ,且 $u_o = u(0), v_o = v(0)$ )以及相邻气膜孔中心线间距 $d$ 定位某排其他气膜孔中心点,再根据气膜孔的直径 $\varphi$ 、深度 $l$ 、喷射角度 $\theta$ 进行气膜孔建模,设计参数的参数域可表示为: $Q_{i,j} = \{\varphi_j, C_{i,j}(u, v), \theta_j, \gamma_j, M, N, l_{i,j}, d_i | 0 \leq i \leq M; 0 \leq j \leq N; -180^\circ < \theta_j \leq 180^\circ; 0^\circ < \gamma_j \leq 90^\circ; l_{i,j}, d_i \geq 0\}$ ,下标 $i$ 为气膜孔分组号;下标 $j$ 为第 $i$ 组气膜孔序号; $M$ 为气膜孔分组数量; $C(u, v)$ 为气膜孔定位参数; $\gamma$ 为气膜孔投影方向角度; $l$ 为单个气膜孔深度; $N$ 为某组气膜孔个数; $S_i$ 为叶片内型实体。

实际进行工程设计和几何建模过程中,关注的是如何进行直观、显式的设计,需要对设计参数中采用隐式参数曲线曲面进行定位的定位参数 $C(u, v)$ 以及角度 $\theta, \gamma$ 进行转化(见图9), $C$ 为图8中虚线圈中示意气膜孔定位中心点, $u_c$ 为以 $C$ 原点平行于 $x$ 轴方向坐标轴方向, $v_c$ 为以 $C$ 原点平行于 $y$ 轴方向坐标轴方向, $d_c$ 为以 $C$ 原点平行于

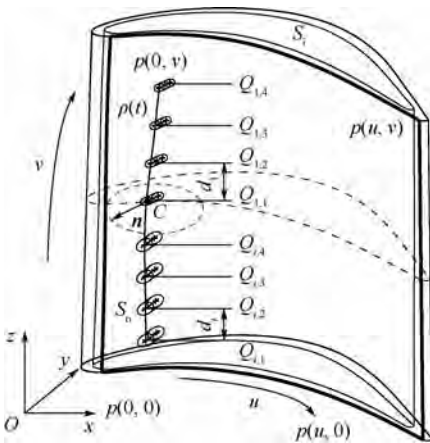


图8 气膜孔设计及相关参数示意

Fig.8 Schematic diagram of film hole design and related parameters

$z$ 轴方向坐标轴方向, $n$ 为气膜孔中心定位点 $C$ 在叶身曲面上法向量,因此,其建模参数的参数域可以表示为 $Q'_{i,j} = \{P_j(x_j, y_j, z_j), \varphi_j, \alpha_j, \beta_j, i, j, d_i | 0 \leq i \leq m; 0 \leq j \leq n; -90^\circ \leq \alpha_j \leq 90^\circ; -90^\circ \leq \beta_j \leq 90^\circ; d_i, \varphi_j \geq 0\}$ ,其中: $P(x, y, z)$ 为气膜孔定位点坐标; $\varphi$ 为气膜孔直径; $\alpha$ 为气膜孔中心在 $yOz$ 平面投影与 $x$ 轴正向夹角; $\beta$ 为气膜孔中心在 $xOz$ 平面投影与 $x$ 轴正向夹角。二者的角度具有如下转换关系(见图9):

$$\begin{cases} \gamma = \arctan(\tan \alpha / \tan \beta) \\ \theta = \arcsin(1 / \sqrt{1 + \tan^2 \alpha + \tan^2 \beta}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \alpha = \arctan(\cot \theta \cos \gamma) \\ \beta = \arctan(\cot \theta \sin \gamma) \end{cases} \quad (2)$$

通过上述转换关系,可得到气膜孔 $f_{i3}$ 设计参数域 $Q_{f_{i3}}$ 与建模参数域 $Q'_{f_{i3}}$ 映射关系。

#### 2) 气膜孔“反相”实体定位原理

气膜孔“反相”实体 $f'_{i3}$ 的定位原理:根据 $Q_{f_{i3}}, Q'_{f_{i3}}$ 及转换关系,通过定位中心点 $C(u, v)$ 求得外型曲面 $S_o$ 上的坐标 $P_i(x, y, z)$ ,通过 $\alpha, \beta, \gamma$ 计算中心线方向矢量 $\overrightarrow{PP'}$ ,进行位置定位和方向定位;已知气膜孔的直径 $\varphi_j$ 、气膜孔深度 $l$ ,快速生成气膜孔“反相”工具体,在通过叶片外型曲面 $S_o$ 和内型曲面 $S_i$ 对工具体裁剪,实现 $f'_{i3}$ 在内型实体 $M_i$ 上的定位与生成。其参数域可表示: $Q''_{i,j} = \{\varphi_j, \overrightarrow{PP'}, P_j(x, y, z), i, j | 0 \leq i \leq m; 0 \leq j \leq n; \varphi_j \geq 0\}$ 。

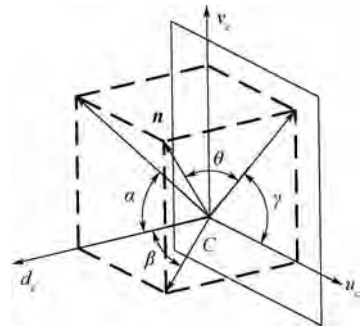


图9 气膜孔设计角度与建模角度转换关系

Fig.9 Conversion relationship between film hole design angle and modeling angle

### 2.2.2 气膜孔快速定位算法与分析数据提取方法

分析数据提取主要指:建模参数计算与转换为设计参数,体现设计意图,以辅助后续数值模拟以及设计参数修改;关键几何特征提取,以辅助观察和测量计算结果。最后将分析数据进行集成,可表示为 $A_{inf} = \{Q''_{i,j}, S_q, S_w, S_{ef}\}$ ( $S_q, S_w$ 和 $S_{ef}$ 分别为气膜孔、尾缝和关键几何特征)。以下详细阐述气膜孔快速定位算法与分析数据提取方法:

**步骤 1 气膜孔设计参数计算。**遍历参数化建模系统中的叶片实体所有气膜孔,并获取并存储建模参数  $Q_{i,j}$ ,以气膜孔定位点坐标  $P_j(x_j, y_j, z_j)$  为起点,以角度  $\alpha_j$  与  $\beta_j$  复合角度为方向,创建直线,直线分别与叶片外型、内型曲面的交点为  $P_j$  和  $P'_j$ ,得到线段  $\overline{P_j P'_j}$ ,计算  $\overline{P_j P'_j}$  长度,即为提取气膜孔深度  $l_{i,j} \in Q_{i,j}$ 。

**步骤 2 气膜孔中心线自动创建。**分别以  $P_j$  和  $P'_j$  为圆心,  $\varphi_j \sin \theta$  为直径,在气膜孔中心截交面上创建圆,并于该平面外型和内型曲线交于  $M_1, M_2, N_1, N_2$ ,以这 4 个点为起点,中心线法向  $n$  为方向,以  $\varphi_j \sin \theta$  为长度创建线段并于中心线相交于  $M'_1, M'_2, N'_1, N'_2$ ,计算 4 点两两之间的长度并比较得到最长线段,即为  $|\overline{C_j C'_j}|$ ,分别对称延长  $P_j$  和  $P'_j$ ,得到端点分别为  $C_j$  和  $C'_j$ ,如图 10 所示。

**步骤 3 气膜孔“反相”实体定位与生成。**以  $C_j$  为圆心,  $\varphi_j$  为直径,在中心线法平面上创建圆,以中心线  $\overline{C_j C'_j}$  为方向、 $C_j$  为起点、 $|\overline{C_j C'_j}|$  为长度进行拉伸,再采用  $S_w, S_n$  对工具体进行裁剪,得到气膜孔“反相”实体  $f_{13}$ 。

**步骤 4 冷气域快速生成与分析数据提取。**将步骤 3 得到的实体与叶身内型求和得到  $M'_c$ ,并用  $S_o$  裁剪  $Y$  尾缝工具体,得到内流冷气域  $M_c, S_o$  与  $M_c$  求交,得到冷气出口面  $S_q, S_w$  (气膜孔、尾缝等),并保存到  $A_{inf}$ 。

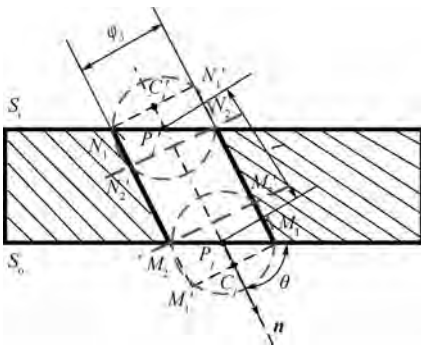


图 10 气膜孔“反相”实体生成方法  
Fig. 10 Method for generating inverted entities for film holes

### 3 气热耦合燃气域建模方法

燃气域模型的创建需要适应不同叶片叶型,就必须结合叶片共有的几何特征与外流燃气域的特点。叶片中弧线不仅是气动外型设计的重要参数,也是叶片内型的重要设计参考,能够反映叶片在流道中的弯扭变化,符合周期性边界选择的条件。其主要难点在于周期性边界自动匹配以及叶片包裹体自适应裁剪的问题。

### 3.1 自适应管道求交算法

首先,以往的管道求交创建中弧线的方法<sup>[13]</sup>,主要根据经验数据得到管道半径,而周期性边界的生成需要适应不同的叶型,管道半径数据不能自动匹配叶型,故采用改进的自适应管道求交算法能够解决这个问题;其次,由于管道求交以及叶片截面线局部加密和精简等原因会生成图 11 所示的多种曲线,需要采用自动识别算法从图 11 的曲线中识别出中弧线,再生成中弧面。以下为自适应管道求交算法:

**步骤 1 盆背曲线自动匹配与数据点采样。**遍历叶片外型截面线,根据高度以及曲线类型,自动匹配每层叶背曲线  $L_k$  和叶盆曲线  $L'_k$  ( $k$  为截面线层数),根据等弧长参数化方法,对  $L_k$  与  $L'_k$  进行离散化,分别得到该层点集  $P = \{P_i(x, y, z) | i = 0, 1, 2, \dots, m-2, m-1\}$  和  $S = \{S_j(x, y, z) | j = 0, 1, 2, \dots, n-2, n-1\}$ ,  $m$  和  $n$  为离散点个数。

**步骤 2 管道求交半径试算。**分别计算两点集中的点相互之间的距离,记为  $D = \{D_{ij} = |\overline{P_i S_j}| | P_i \in P, S_j \in S\}$ ,子集  $D_i = \{|\overline{P_i S_j}| | P_i \in P, S_j \in S, j = 0, 1, \dots, n-1\}$ ,试算得到的叶型最大壁厚  $C'_{max} = \max \{ \min (D_i) | i = 0, 1, \dots, m-1 \}$ ,如图 12 所示,管道求交中的管道的直径为  $d_k = 0.75 C'_{max}$ ,由此得到每层截面线的管道半径。

**步骤 3 中弧线自动生成。**以  $L_k$  与  $L'_k$  起点为圆心,在曲线起点法平面内创建直径为  $d_k$  的圆,以  $L_k$  与  $L'_k$  为引导线,进行扫掠后两管道求交得到  $C_p, C'_p$ ,投影到该层截面线平面上,得到中弧线  $C_k$ ,如图 13 所示。

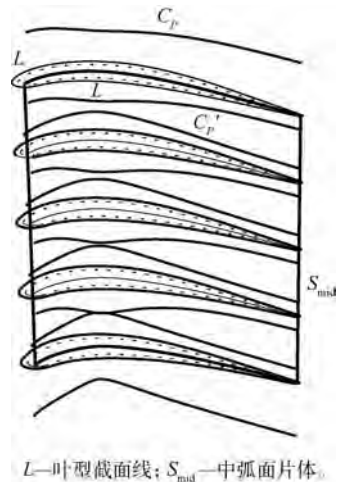


图 11 叶片中各类曲线示意图  
Fig. 11 Schematic diagram of various types of curves in blade

### 3.2 边界自动匹配算法

改进管道求交算法后得的叶片模型,再通过

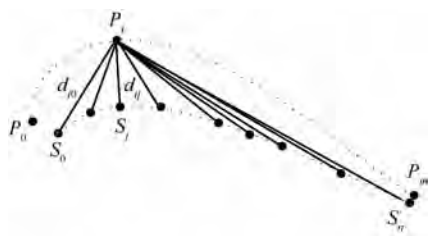


图 12 管道半径试算示意图

Fig. 12 Schematic diagram of pipeline radius trial

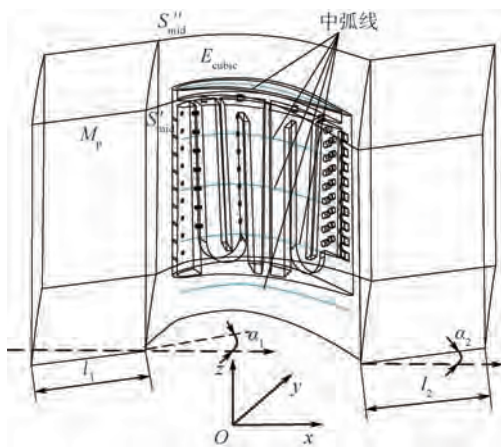


图 14 燃气域几何模型

Fig. 14 Geometric model of gas fluid domain

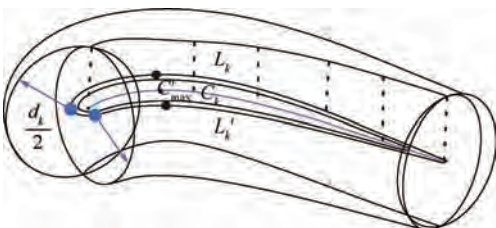


图 13 管道求交中弧线自动生成

Fig. 13 Automatic generation of pipeline intersection mean camber line

周期性边界自动匹配方法与外流燃气域自适应裁剪算法进行处理,可以自适应生成燃气域  $M_g$ , 具体方法如下:

**步骤 1** 叶片曲线自动匹配。根据高度以及曲线类型,过滤图 11 中的管道求交曲线  $C_p$ 、 $C'_p$ , 并将余下的外型截面线、内型截面线以及中弧线按照高度进行分组,查询每组截面线最小包围盒,比较最小包围,包围盒由里向内依次可分为外型截面线、内型截面线和中弧线。

**步骤 2** 中弧面生成。根据分组好的中弧线,按照高度顺序依次进行放样,得到中弧面,延伸中弧面,根据涡轮上叶片个数,得到中弧面旋转角度,按周向旋转中弧面  $S'_{mid}$ 、 $S''_{mid}$ 。

**步骤 3** 周期性边界自动匹配。同时计算叶片盆、背侧周期性边界以及叶片的最小包围盒  $B_p$ 、 $B_s$  和  $B_{blade}$ , 创建叶片包裹体  $E_{cubic}$ , 包裹体最小包围盒  $B_c$  ( $B_{blade} \subset B_c$ ), 且在盆背侧包围盒  $B_p$ 、 $B_s$  形成的区域之内,以保证旋转中弧面  $S'_{mid}$  和  $S''_{mid}$  能够裁剪包裹体  $E_{cubic}$ 。

**步骤 4** 外流域自适应裁剪。根据壁面边界继续对  $E_{cubic}$  进行裁剪;根据进出口燃气角度  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  以及长度  $l_1$ 、 $l_2$ , 拉伸包裹进出口面,生成叶片流道实体  $M_p$ , 减去叶片实体  $M_b$  和冷气域  $M_c$ , 得到外流燃气域部分  $M_g$ , 如图 14 所示。

通过自适应管道求交算法,使得叶片中弧线能够适应不同叶片的变化,周期性边界自动匹配方法与外流燃气域自适应裁剪算法既解决了外流燃气域与叶片模型相适应的问题也满足了其建模

的灵活性的要求。

### 4 建模方法实现

根据以上研究基础,笔者课题组在 Siemens UG NX 7.5 平台上,使用 UG Open API 工具开发了面向气热耦合的涡轮叶片计算域模型快速建模程序,界面及输出结果如图 15 所示,可以看到,根据当前叶片模型可以快速创建用于气热耦合分析的计算域模型,提取气膜孔出气面 6 排共计 54 个,提取尾缝出气窗口 9 个,按照后处理的要求输出分析信息,全过程叶片实体建模(设计参数在合理范围随机指定情况下)人工交互时间低于 3 h,气热耦合计算域模型及分析参数输出时

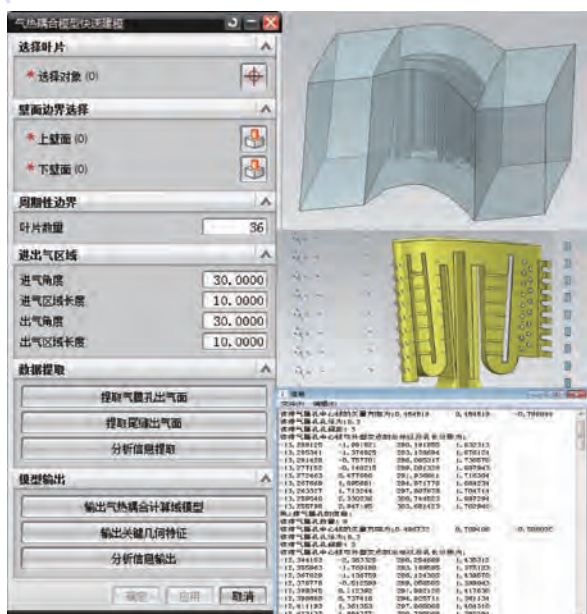


图 15 面向气热耦合的涡轮叶片计算域模型快速建模  
Fig. 15 Conjugated heat transfer oriented rapid modeling of turbine blade computational domain models

间小于5 min,验证了本文提出的算法的稳定性与建模方法的有效性。最后,将程序嵌入到“涡轮气冷叶片快速建模系统”中,已在某设计所得到初步应用。

## 5 结 论

本文对面向制造的涡轮叶片模型及其建模方法进行了分析,结合工程应用中气热耦合计算过程中对建模的具体需求,分析了2种不同应用方向的模型的区别与联系,提出了面向气热耦合的涡轮叶片快速建模方法和相关算法,具体如下:

1) 根据叶片内型和外型冷却特征,构建了外型冷却特征快速定位算法,实现了涡轮叶片内流冷气域通用生成方法。

2) 实现了外流燃气域根据不同叶型的叶片可以进行自动匹配与自适应裁剪的快速建模方法。

3) 通过在建模过程进行分析数据提取的方法,解决了后处理阶段几何特征定位困难、缺少分析信息的问题。

此外,本文提出的方法实现了涡轮叶片气热耦合模型计算域的快速生成、修改、几何特征提取与分析数据提取,提高了设计质量和设计效率,并为涡轮叶片数值模拟分析及优化设计过程奠定了基础。后续研究可着眼于面向分析的涡轮叶片建模,逐步实现涡轮叶片设计分析一体化。

## 参考文献 (References)

- [1] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册, 第10册: 涡轮[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001: 11.  
Aero-engine Design Handbook Editorial Board. Aero engine design handbook, Volume10: Turbine[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001: 11 (in Chinese).
- [2] DOWNS J P, LANDIS K K. Turbine cooling systems design: Past, present and future[C] // ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air. New York: ASME, 2009: 819-828.
- [3] 朱莉娅, 徐国强. 涡轮冷却技术对航空发动机性能的影响[J]. 推进技术, 2014, 35(6): 793-798.  
ZHU L Y, XU G Q. Effect of turbine cooling technology on aeroengine performance[J]. Propulsion Technology, 2014, 35(6): 793-798 (in Chinese).
- [4] 曹玉璋. 航空发动机传热学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005: 57.  
CAO Y Z. Aeroengine heat transfer[M]. Beijing: Beihang University Press, 2005: 57 (in Chinese).
- [5] 吴大观. 航空发动机研制工作论文集[M]. 北京: 航空工业出版社, 2009: 69.  
WU D G. Aerospace development work paper collection[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2009: 69 (in Chinese).
- [6] 王潘, 隋岩峰, 程农. 涡扇发动机整机仿真平台设计及实现方法[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(5): 986-990.  
WANG P, SUI Y F, CHENG N. Design and implementation of turbofan engine simulation platform[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(5): 986-990 (in Chinese).
- [7] DEES J E, BOGARD D G, LEDEZMA G A, et al. Overall and adiabatic effectiveness values on a scaled up, simulated gas turbine vane[J]. Journal of Turbomachinery-Transactions of the ASME, 2013, 135(5): 595-605.
- [8] 迟重然, 温风波, 王松涛, 等. 涡轮动叶冷却结构设计方法Ⅲ: 气热耦合计算[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(9): 1485-1488.  
CHI Z R, WEN F B, WANG S T, et al. Turbine blade cooling structure design method Ⅲ: Conjugated heat transfer numerical simulation[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(9): 1485-1488 (in Chinese).
- [9] KUSTERER K, HAGEDORN T, BOHN D, et al. Improvement of a film-cooled blade by application of the conjugate calculation technique[J]. Journal of Turbomachinery, 2006, 128(3): 572-578.
- [10] 叶莹. 气冷涡轮流热耦合模拟及冷却结构优化设计[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.  
YE Y. Conjugated heat transfer numerical simulation of air-cooled turbine flow and optimal design of cooling structure[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017 (in Chinese).
- [11] 王松涛, 迟重然, 温风波, 等. 涡轮动叶冷却结构设计方法 I: 参数化设计[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(4): 581-584.  
WANG S T, CHI Z R, WEN F B, et al. Turbine blade cooling structure design method I: Parametric design[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(4): 581-584 (in Chinese).
- [12] 虞跨海, 李立州, 岳珠峰. 基于解析及特征造型的涡轮冷却叶片参数化设计[J]. 推进技术, 2007, 28(6): 637-640.  
YU K H, LI L Z, YUE Z F. Parametric design of turbine cooling blades based on analytic and characteristic modeling[J]. Propulsion Technology, 2007, 28(6): 637-640 (in Chinese).
- [13] 宋玉旺, 席平. 基于特征造型技术的涡轮叶片参数化设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(4): 321-324.  
SONG Y W, XI P. Parametric design of turbine blade based on feature modeling[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(4): 321-324 (in Chinese).
- [14] 李吉星, 席平. 涡轮叶片导管快速建模[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(6): 1149-1155.  
LI J X, XI P. Rapid modeling of impingement pipe in turbine blade[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(6): 1149-1155 (in Chinese).
- [15] NOWAK G, WRÓBLEWSKI W. Optimization of blade cooling system with use of conjugate heat transfer approach[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2011, 50(9): 1770-1781.
- [16] 罗磊, 卢少鹏, 迟重然, 等. 气热耦合条件下涡轮动叶叶型与冷却结构优化[J]. 推进技术, 2014, 35(5): 603-609.  
LUO L, LU S P, CHI Z R, et al. Conjugate heat transfer optimization for blade profiles and cooling structure in turbine rotor

- [J]. *Advance Technology*, 2014, 35 (5): 603-609 (in Chinese).
- [17] 付光辉, 席平, 张宝源, 等. 涡轮气冷叶片传热分析数据提取技术研究[J]. *图学学报*, 2015, 36(3): 384-391.  
FU G H, XI P, ZHANG B Y, et al. Data extraction technology for heat transfer analysis of air-cooled turbine blades[J]. *Journal of Graphics*, 2015, 36(3): 384-391 (in Chinese).
- [18] 席平, 王添. 面向分析的产品建模技术概述[J]. *航空制造技术*, 2017, 540(21): 16-20.  
XI P, WANG T. An analysis-oriented product modeling technology[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 540(21): 16-20 (in Chinese).
- [19] 龚勋. 涡轮冷却叶片结构网格参数化方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.  
GONG X. Research on parameterization method of turbine cooling blade structure grid[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016 (in Chinese).
- [20] CHI Z R, LIU H Q, ZANG S S. Geometrical optimization of non-uniform impingement cooling structure with variable-diameter jet holes[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2017, 108: 549-560.

作者简介:

王添 男, 博士研究生。主要研究方向: 数字化设计与分析一体化、复杂曲线曲面造型。

席平 女, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: CAD/CAM、飞行器数字化技术。

## A conjugated heat transfer oriented modeling method of turbine blade computational domain model

WANG Tian<sup>1</sup>, XI Ping<sup>1,\*</sup>, HU Bifu<sup>1</sup>, LI Jixing<sup>1</sup>, SHI Xiaofei<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100083, China;

2. Department of UAV General Technology, HiWing General Aviation Equipment Co., Ltd., Beijing 100074, China)

**Abstract:** To solve the problems of low modeling efficiency, unstable model quality and poor adaptability to numerical simulation in conjugated heat transfer numerical simulation of turbine blades with complex cooling structure, the turbine blade model for manufacturing and its modeling method were analyzed. Combined with demands for numerical simulation, a conjugated heat transfer modeling method for the turbine blades' computational domain was proposed. Firstly, an automatic positioning algorithm based on the external cooling feature was used to create the turbine blade's cooling air fluid domain. Through the adaptive pipeline intersection algorithm and the boundary automatic matching algorithm, the gas fluid domain that can adapt to different blade section line types was generated. During the modeling process, the key geometric features and non-geometric information required for the numerical simulation were extracted, and then were integrated with the cooling air fluid domain, the gas fluid domain and blade entity. The conjugated heat transfer computational domain model was completed. Based on the above research, a rapid modeling system was developed for modeling conjugated heat transfer computational domain model, which verified the effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** computer aided design; turbine blade; conjugated heat transfer; numerical simulation; geometric modeling

http://bhxb.buaa.edu.cn      jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0223

# 开关磁阻电机矩角特性模型非线性拟合方法

叶威<sup>1,2</sup>, 马齐爽<sup>2,\*</sup>, 徐萍<sup>2</sup>, 张珀铭<sup>2</sup>

1. 空间物理重点实验室, 北京 100076; 2. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)



**摘 要:** 开关磁阻电机难以采用传统电机分析方法进行建模, 通过分析开关磁阻电机电磁转矩生成原理, 确定了不同电机饱和状态下电磁转矩与相电感导数之间的关系。用分段函数非线性拟合的方式对电感导数曲线进行建模, 再进一步得到开关磁阻电机可逆矩角特性的解析模型, 并基于电机的结构参数和约束条件逐一确定和优化了模型的各个参数。利用可逆矩角特性模型, 可以方便地计算电机磁化曲线和瞬时磁链, 给电机设计及驱动控制带来很大的方便。通过2个样机的实测数据和有限元结果对该模型解析计算结果的准确性进行了验证。

**关键词:** 开关磁阻电机; 建模; 非线性; 矩角特性; 曲线拟合

**中图分类号:** TM352

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5965(2019)01-0083-10

开关磁阻电机 (Switched Reluctance Motor, SRM) 在磁饱和工作条件下, 磁场分布不规则, 局部磁路会出现严重饱和, 使得其很难精确建模。为分析这些饱和效应以及漏磁现象对电机的影响, 目前广泛使用有限元分析方法<sup>[1-2]</sup>。与实际测量结果的比较表明, 有限元方法可以准确地预测开关磁阻电机的矩角特性, 具有较高的计算精度, 但计算量较大, 且对于电机的动态性能分析和控制不够灵活。机电能量转换原理表明, 电机输出转矩可以通过磁链-电流-角度 ( $\Psi-i-\theta$ ) 关系曲线计算得到, 因此大多数现有的开关磁阻电机模型都是基于不同转子位置角下的磁化曲线 ( $\Psi-i$ ) 得到的<sup>[3]</sup>。已有的文献提出一系列的开关磁阻电机数学分析<sup>[4-7]</sup>和仿真模型<sup>[8-11]</sup>, 这些模型结合磁饱和和效应来优化开关磁阻电机的控制参数, 以降低转矩脉动, 但是由这些模型推导出的转矩方程都相当复杂, 要求控制器必须具有相当高的运行速度和计算能力, 增加了控制器的运算负担和能耗。在文献[12-13]中将非线性磁链特性  $\Psi(i,$

$\theta)$  或自感特性  $L(i, \theta)$ , 以及矩角特性  $T(i, \theta)$  数据以表格形式储存起来, 简化计算, 但查表法需要预先对电机进行测量或者有限元计算, 且当实际电流或转子位置角与表格中数值不能完全对应时, 必须通过插值求取, 查表法具有外推能力差和曲线逼近能力弱的局限性。文献[14-15]则基于电机几何尺寸和定转子材料磁特性等少量信息建立了一种简单非线性磁链模型, 该模型实现了实时控制, 可应用于控制参数的优化、转矩脉动分析等控制系统的分析和设计中, 但是由于模型过于简化, 降低了控制精度。

本文通过分析开关磁阻电机的几何形状和铁磁特性, 对电机的矩角特性进行了建模分析, 并进一步优化了模型中各个参数, 该模型将电机瞬时电磁转矩表示为相电流和转子位置角的解析表达式, 同样相电流也可表示为转矩和转子位置角的函数。为得到特定的输出转矩, 通过此模型可以在线计算相应相电流的参考值, 因此在转矩的实时控制中, 由这2个表达式很容易快速计算出不

收稿日期: 2018-04-23; 录用日期: 2018-07-27; 网络出版时间: 2018-09-17 16:59

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180914.1458.001.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180914.1458.001.html)

\* 通信作者. E-mail: qsama304@buaa.edu.cn

**引用格式:** 叶威, 马齐爽, 徐萍, 等. 开关磁阻电机矩角特性模型非线性拟合方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 83-92. YE W, MA Q S, XU P, et al. Nonlinear fitting method for torque-angle characteristic model of switched reluctance motor[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 83-92 (in Chinese).

同相电流下的矩角特性,且没有了查表法的局限性。同时此模型使得电机磁化曲线和瞬时磁链的计算成为可能,给电机设计以及电机的驱动控制带来很大的方便。最后为了检验模型精度,以2个样机为例,将新模型的转矩计算结果与有限元仿真和实测结果进行了比较。

## 1 可逆矩角特性的数学模型的建立

### 1.1 转矩模型的建立

磁场未饱和时,开关磁阻电机相电感值  $L$  只依赖于  $\theta$ ,可记为  $L_0(\theta)$ ,此时电机电磁转矩公式为

$$T_0(\theta, i) = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L_0(\theta)}{\partial \theta} \quad (1)$$

记电感  $L_0(\theta)$  对角度  $\theta$  的导数为  $L_{0p}(\theta)$ ,则磁场不饱和时的电磁转矩  $T_0$  可以改写为

$$T_0(\theta, i) = \frac{1}{2} i^2 L_{0p}(\theta) \quad (2)$$

为了降低功率变换器的视在容量,通常要求开关磁阻电机工作在高度饱和的状态,其深度饱和的磁通密度  $B$  通常能达到  $1.5 \sim 1.65 \text{ T}^{[16]}$ ,而且其饱和程度是变化的,所以饱和状态下由式(2)得到的转矩将显著偏大。

文献[17]指出在饱和状态下,开关磁阻电机的输出转矩将不再与电流值的二次方成正比,而是随着电流值线性变化。为了确保式(2)在饱和区域的有效性,新的转矩模型参数必须满足以下要求:

1) 在电流很小时,新的转矩公式需与式(2)等效,即转矩与电流平方成正比。

2) 当电流逐渐增大,电机变得饱和时,新转矩方程将从电流的二次函数逐渐变为线性函数。

特别地,当  $i \rightarrow \infty$ ,即转矩方程从电流的二次函数退化为线性函数,记为

$$T(\theta, i \rightarrow \infty) = \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{0p} i}{f^{1/n}} \quad (3)$$

式中: $n$  为正数; $f=f(\theta)$  为转子位置角  $\theta$  的函数( $f>0$ ),作为曲线拟合时的函数修正。

综上所述,提出以下新的转矩模型,可以保证线性关系与二次关系的合理过渡:

$$T(\theta, i) = \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{0p} i^2}{(1 + f i^n)^{1/n}} \quad (4)$$

在式(4)中,电流值  $i = 1/f^{1/n}$  为转矩和电流的线性关系与二次关系的分界点,参数  $n$  影响从二次关系变为线性关系的速率, $n$  越大变化速度

越快, $n$  的值与开关磁阻电机的材料、结构以及输出性能有关。显然,电流  $i$  的值远小于  $1/f^{1/n}$  时,式(4)与式(2)等效,新的转矩模型满足所期望的要求,但对具体参数的确定需要做详细讨论。

注意到转矩方程式(4)是可逆的,当转矩已知时,电流也能由转矩导出:

$$i(\theta, T) = \frac{2T}{L_{0p}} \left[ \frac{f}{2} + \sqrt{\frac{f^2}{4} + \left( \frac{L_{0p}}{2T} \right)^n} \right]^{1/n} \quad (5)$$

式(5)可用于转矩控制时,相电流参考值的计算。

### 1.2 电感模型的建立

图1为电感  $L_0(\theta)$  及其导数  $L_{0p}(\theta)$  的理想和实际曲线示意图。理想情况下,电机转子极对着定子槽( $\theta_u \leq \theta < \theta_{bo}$ )时,气隙等效电感值保持为最小值,即  $L_u = L_{\min}$ ,电感对角度的导数为零,  $L_{0p}(\theta_u) = 0$ 。从定、转子极开始重叠到完全重叠( $\theta_{bo} \leq \theta \leq \theta_{eo}$ )这一区间,电感值线性增加,电感对角度的导数为恒定的常数  $L_{0pm}$ 。从定、转子极完全重叠到两者轴线重合( $\theta_{eo} < \theta \leq \theta_{al}$ ),电感值保持其最大值不变  $L_{al}$ ,电感对角度的导数为零,  $L_{0p}(\theta_{al}) = 0$ 。实际上,考虑到漏磁通和饱和效应的影响,电感及其导数的实际曲线如图中实线所示,特别应该指出的是,在位置  $\theta = \theta_{bo}$  和  $\theta = \theta_{eo}$  处,气隙的饱和效应最显著。图1中所示的  $\theta_1$  位置,对于大多数开关磁阻电机,都是在转子极旋转到与定子极重合20%的位置角附近。

参数  $L_{0pm}$  的值直接决定了  $L_{0p}$  以及转矩的峰值,是十分敏感的参数,当对齐位置和非对齐位置的电感值  $L_{al}$  和  $L_u$  都已知时,  $L_{0pm}$  可以由式(6)计算:

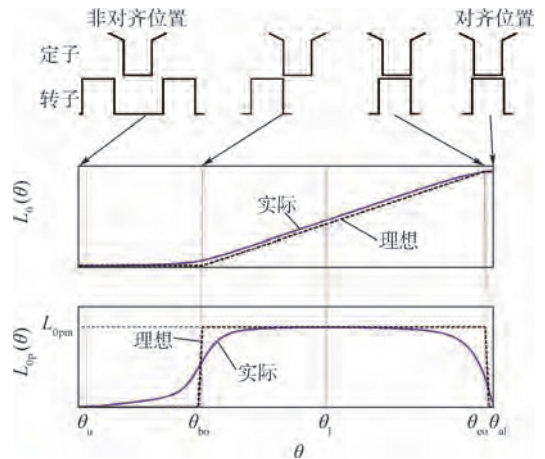


图1 电感  $L_0(\theta)$  及其导数  $L_{0p}(\theta)$  的理想和实际曲线示意图

Fig. 1 Schematic of ideal and real curves of inductance  $L_0(\theta)$  and its derivative  $L_{0p}(\theta)$

$$L_{0pm} = \frac{L_{al} - L_u}{\frac{\pi}{Z_r} \int_0^1 L_{0pN}(x) dx} \quad (6)$$

式中:  $x = (\theta - \theta_u) / (\theta_{al} - \theta_u)$  为转子位置角的归一化表示;  $L_{0pN}(x)$  为  $L_{0p}(x)$  的归一化表示;  $Z_r$  为转子极数。

在忽略漏磁和铁磁阻的情况下,文献[6]指出,  $L_{0pm}$  的大小只与电机的几何尺寸有关,可由式(7)估算:

$$L_{0pm} \approx L_{0p}(\theta_1) = \frac{\mu_0 N^2 l_{st} r_1}{2\delta} \quad (7)$$

式中:  $\mu_0$  为真空磁导率;  $r_1$  为转子外半径;  $l_{st}$  为铁芯轴向长度;  $\delta$  为气隙宽度;  $N$  为相绕组匝数。电机几何外形如图 2 所示,  $R_1$  和  $R_2$  分别为电机定子内、外径;  $\beta_s$  和  $\beta_r$  分别为定、转子极弧;  $r_2$  为电机轴径;  $h_r$  为转子极高。

由于  $L_{0p}(\theta)$  是  $\theta$  的周期函数,文献[18]采用傅里叶级数方式建立了  $L_{0p}(\theta)$  等的通用模型,但这种方法需要确定足够高次的傅里叶系数,才能确保良好的精度,如果电机转矩特性未知,各个系数将很难确定。文献[5]对于不同电机转子位置,利用分段函数组的方式表示不饱和相电感  $L_0$  (或其导数  $L_{0p}$ ),但每个分段都只在各自适用区间内有效。图 3 给出了  $L_{0p}$  归一化后的函数  $L_{0pN}$  的分段函数表示,  $x_{bo}$  是转子极与定子极开始重叠时的归一化转子位置角,  $x_{bo} = (\theta_{bo} - \theta_u) / (\theta_{al} - \theta_u)$ 。  $g_{rise}(x)$ 、 $g_{top}(x)$  和  $g_{fall}(x)$  是各个区间的分段函数,  $g_{rise}(x)$  主要决定了  $L_{0pN}$  在区间  $0 \leq x < x_{bo}$  上的形状,  $g_{top}(x)$  主要决定了  $L_{0pN}$  在区间  $x_{bo} < x \leq 1$  上形状,而  $g_{fall}(x)$  是为了确保  $L_{0pN}$  在对齐位置  $\theta = \theta_{al}$  附近的快速衰减为 0。

为了突出各个区域分段函数的主要贡献,采

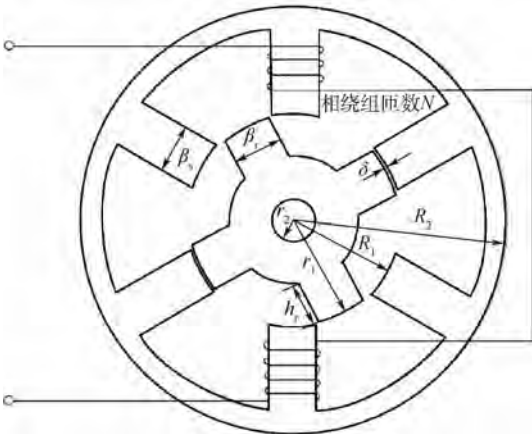


图 2 开关磁阻电机几何尺寸

Fig. 2 Physical dimensioning of switched reluctance motor

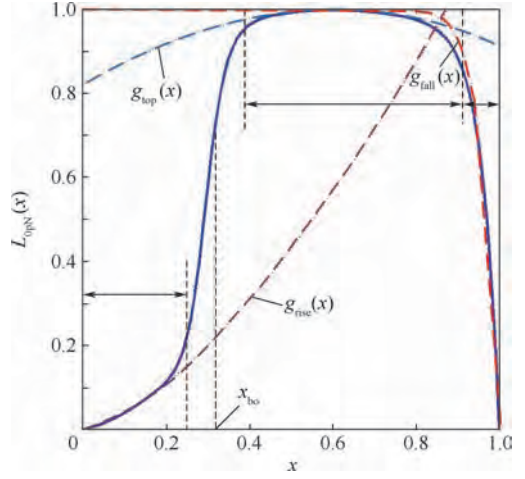


图 3  $L_{0pN}$  由分段函数  $g_{rise}(x)$ 、 $g_{top}(x)$  和  $g_{fall}(x)$  拟合

Fig. 3  $L_{0pN}$  is fitted by piecewise function

$g_{rise}(x)$ ,  $g_{top}(x)$  and  $g_{fall}(x)$

用拟合的方式,将 3 个分段函数放入一个解析表达式中,得到全区域  $\theta_u \leq \theta \leq \theta_{al}$  的函数  $L_{0p}(\theta)$  解析表达式,拟合方式如下:

$$L_{0p}(x) = L_{0pm} \cdot L_{0pN}(x) \quad (8)$$

式中:  $L_{0pm}$  为  $L_{0p}(x)$  的幅值。  $L_{0pN}(x)$  拟合表达式为

$$L_{0pN}(x) = \frac{\left(\frac{x}{x_{bo}}\right)^m g_{top}(x) + g_{rise}(x)}{1 + \left(\frac{x}{x_{bo}}\right)^m} g_{fall}(x) \quad (9)$$

其中:  $m$  为充分大的正数。

确定式(9)中的 3 个函数  $g_{rise}(x)$ 、 $g_{top}(x)$ 、 $g_{fall}(x)$  及  $m$  将是确定  $L_{0p}(x)$  的研究重点。这里可以初步确定  $g_{rise}(x)$ 、 $g_{top}(x)$  和  $g_{fall}(x)$  的几个特点:

1) 在  $x = x_1$  位置时( $x_1$  是  $\theta_1$  的归一化),  $L_{0p}$  取最大值,则可以确定  $g_{top}(x = x_1) = 1$ 。

2) 相较于区间  $x_{bo} < x \leq 1$ ,在区间  $0 \leq x < x_{bo}$  上转矩值及其变化率都很小,所以精确确定函数  $g_{rise}(x)$  表达式显得并不是十分重要,一般可以将  $g_{rise}(x)$  简单定义为  $x$  的线性函数。

3)  $g_{fall}(x)$  是为了确保  $L_{0p}(x)$  在对齐位置  $\theta = \theta_{al}$  附近的快速衰减为 0,所以在定、转子极互相偏离较远时,函数  $g_{fall}(x)$  的值应等于 1,而当定、转子极接近对齐位置即  $x \rightarrow 1$  时,函数  $g_{fall}(x)$  的值应从 1 迅速衰减为 0。

## 2 函数 $L_{0pN}(\theta)$ 参数的确定

在转矩模型式(4)中,函数  $L_{0p}$ 、 $f$  及参数  $n$  都是未知的,第 1 节中总结了它们需要满足的要求

和一些参数确定的选择方向。在  $L_{0pm}$  已经由电机几何尺寸计算得到的前提下,  $L_{0p}$  仅决定于  $L_{0pN}$ , 本节将进一步通过电机几何尺寸确定函数  $L_{0pN}$  的各个分段函数和系数的选择。

### 2.1 $m$ 值的选择

在式(9)中, 正数  $m$  值决定了  $L_{0p}$  在  $x = x_{bo}$  附近变化的光滑程度,  $m$  值越大, 过渡区间越窄。当  $m \rightarrow \infty$  时, 函数  $g_{rise}(x)$  与  $g_{top}(x)$  在  $x = x_{bo}$  将垂直跳跃过渡, 过渡区域变为一条竖直线, 因此定义条件函数  $l(x)$ ,  $m$  应充分大到满足下列条件:

$$l(x) = \frac{\left(\frac{x}{x_{bo}}\right)^m}{1 + \left(\frac{x}{x_{bo}}\right)^m} \approx \begin{cases} 0 & 0 \leq x < x_{bo} \\ 1 & x_{bo} < x \leq 1 \end{cases} \quad (10)$$

图4给出了不同的  $m$  值所对应的过渡区间,  $m$  值应充分大, 但并不是越大越好, 需要根据  $x_{bo}$  的位置合理选择。

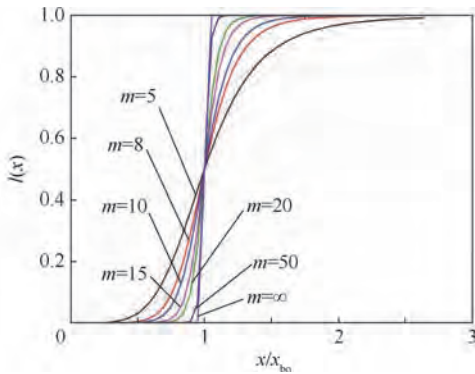


图4 不同的  $m$  值所对应的过渡区间

Fig.4 Transition intervals for different  $m$  values

### 2.2 $g_{rise}(x)$ 的选择

相对于区间  $x_{bo} < x \leq 1$ , 在区间  $0 \leq x < x_{bo}$  上转矩有显著的减小, 所以精确的确定函数  $g_{rise}$  显得并不是十分重要, 一般可以将  $g_{rise}(x)$  简单定义为  $x$  的线性函数。但式(11)的表示比线性函数能更好地反映图3中实际曲线曲率:

$$g_{rise}(x) = \mu_{rise} \left(\frac{x}{x_{bo}}\right)^\alpha \quad (11)$$

式中: 常数  $\mu_{rise}$  取决于电机的几何外形; 指数  $\alpha$  略大于1。由于这一区间的转矩很小,  $\mu_{rise}$  比较典型的取值区间是  $0.1 \sim 0.25$ ,  $\alpha$  可以合理地取值为1.5, 图5所示为不同  $\alpha$  与  $\mu_{rise}$  下的  $g_{rise}(x)$  曲线。

### 2.3 $g_{top}(x)$ 的选择

若在  $x = x_1$  位置时,  $L_{0p}$  取最大值, 则函数  $g_{top}(x = x_1)$  值应等于1, 为了描述整个  $x_{bo} < x \leq 1$  区域上的形状, 由图3中所示的趋势, 可以提出下面的表达式:

$$g_{top}(x) = 1 - \mu_{top}(x - x_1)^\beta \quad (12)$$

式中: 对于大多数开关磁阻电机,  $x_1$  一般指转子极旋转到覆盖定子极20%部分的位置角, 即  $x_1 = x_{bo} + 0.2(1 - x_{bo})$ 。图6所示为不同  $\mu_{top}$  下的  $g_{top}(x)$  曲线,  $\beta$  取值为2。

常数  $\mu_{top}$  决定了  $L_{0p}$  在  $x \neq x_1$  位置的下降速度, 对于样机1 ( $x_{bo} = 0.31, x_1 = 0.45$ ) 仿真结果表明, 当电机电流为常值时, 因相电感的影响导致电机的转矩有约15%的幅度变化, 从图6中可以看出,  $\mu_{top}$  比较好的取值是  $\mu_{top} = 0.5$ 。

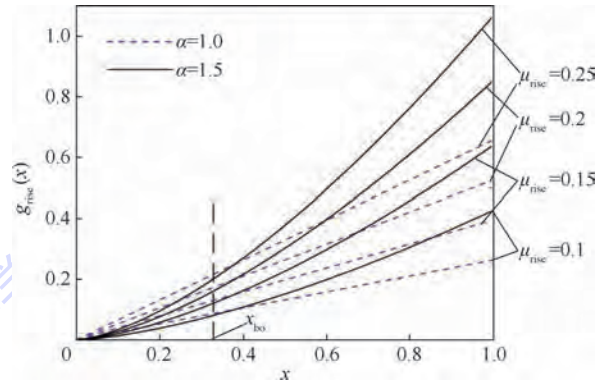


图5 不同  $\alpha$  与  $\mu_{rise}$  下的  $g_{rise}(x)$  曲线

Fig.5 Curves of  $g_{rise}(x)$  for different  $\alpha$  and  $\mu_{rise}$

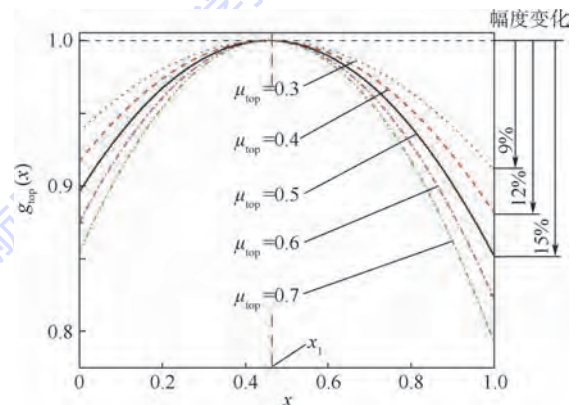


图6 不同  $\mu_{top}$  下的  $g_{top}(x)$  曲线

Fig.6 Curves of  $g_{top}(x)$  for different  $\mu_{top}$

### 2.4 $g_{fall}(x)$ 的选择

在定、转子极未对齐时, 函数  $g_{fall}$  的值等于1, 而当定转子极接近对齐位置即  $x \rightarrow 1$  时, 函数  $g_{fall}$  的值应迅速衰减为0, 所以一种可能的表达式为

$$g_{fall}^{(1)}(x) = 1 - \mu_{fall} x^k \quad (13)$$

式中: 系数  $\mu_{fall}$  通常取1即可。

由于大多数电机定、转子极宽度接近(一般转子极要宽一些), 只要正整数  $k$  值取的充分大, 式(13)能够满足这些电机的特性。然而, 对于那些定、转子极宽度显著不同的电机, 在  $x = x_{eo}$  和  $x \rightarrow 1$  处  $g_{fall}$  衰减幅度将显著不同, 为了将这种性质加入, 式(14)将更合理:

$$g_{\text{fall}}^{(2)}(x) = \frac{\left(\frac{1-x}{1-x_{e0}}\right)^k}{1 + \left(\frac{1-x}{1-x_{e0}}\right)^k} \quad (14)$$

式中:  $x_{e0}$  为定、转子极钢开始完全重叠时的归一化位置角。当  $k \rightarrow \infty$  时,由式(13)和式(14)将得到  $g_{\text{fall}}(0 < x < x_{e0}) = 1, g_{\text{fall}}(x_{e0} < x < 1) = 0$ 。

图7所示为不同  $k$  下的  $g_{\text{fall}}^{(1)}(x)$  和  $g_{\text{fall}}^{(2)}(x)$  的曲线。

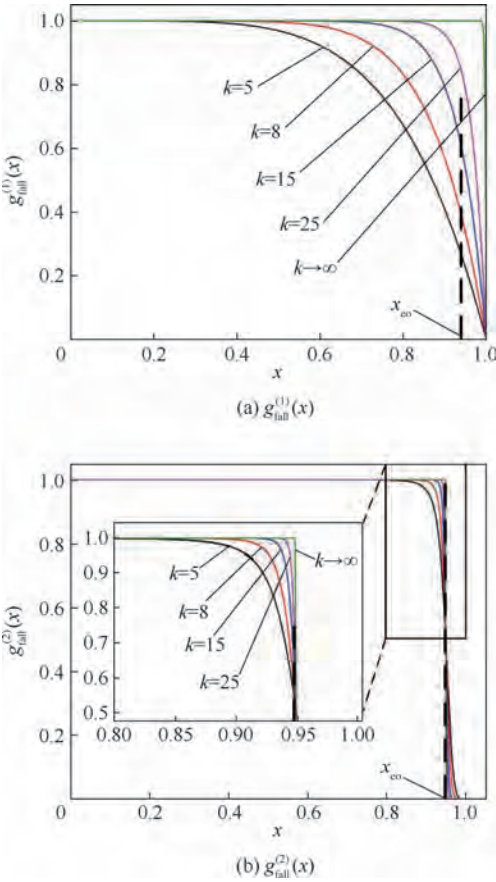


图7 不同  $k$  下的  $g_{\text{fall}}^{(1)}(x)$  和  $g_{\text{fall}}^{(2)}(x)$  的曲线

Fig. 7 Curves of  $g_{\text{fall}}^{(1)}(x)$  and  $g_{\text{fall}}^{(2)}(x)$  for different  $k$

### 3 模型参数 $n$ 与函数 $f(\theta)$ 的确定

本节将研究参数  $n$  所受到的约束条件,并确定修正函数  $f(\theta)$ 。

#### 3.1 参数 $n$ 的确定

显然对于任何开关磁阻电机,无论转角  $\theta$  和电流  $i$  取何值,磁链都应该是电流的单调递增函数,即

$$\frac{\partial \Psi}{\partial i} > 0 \quad \forall (i, \theta_u < \theta < \theta_{a1}) \quad (15)$$

磁链与转矩满足:

$$\Psi(\theta, i) = \int_{\theta_u}^{\theta} \frac{\partial T(\theta, i)}{\partial i} d\theta + L_u i \quad (16)$$

由式(4)、式(15)和式(16)可得

$$\int_{\theta_u}^{\theta} L_{0p} \frac{1 - 0.5(n-1)fi^n}{(1+fi^n)^{2+1/n}} d\theta + L_u > 0 \quad (17)$$

为了简化分析,在这里假定式(17)被积函数中的  $f$  是不变的常数,则可得

$$(L(\theta) - L_u) \frac{1 - 0.5(n-1)fi^n}{(1+fi^n)^{2+1/n}} > -L_u \quad (18)$$

显然,当  $n \leq 1$  时,不等式(18)恒成立,当  $n > 1$  时,不等式左边对电流求导,使得不等式左边取极值的电流值为

$$i = \left[ \frac{n^2 + 3n + 2}{(n^2 - 1)f} \right]^{1/n} \quad (19)$$

将式(19)代入式(18),并取  $L(\theta)$  在对齐位置的最大值  $L(\theta = \theta_{a1}) = L_{a1}$ ,将得到一个满足式(17)的必要条件:

$$\frac{L_{a1}}{L_u} < 1 + \frac{2}{n} \left( 2 + \frac{3n+3}{n^2-1} \right)^{2+1/n} \quad (20)$$

在式(20)中,相绕组等效自感最大值与最小值之比  $L_{a1}/L_u$  受到参数  $n$  值的约束,两者关系曲线如图8所示。

图8中,当  $n=3$  时,  $L_{a1}/L_u = 13.4$ ,对大多数实际电机,受到材料和结构的限制,  $L_{a1}/L_u$  比值都不会超过这个值,特别是考虑到严格计算还要超出20%以上,因此对大多数的开关磁阻电机,参数  $n$  值选择  $n=3$  将是最佳。

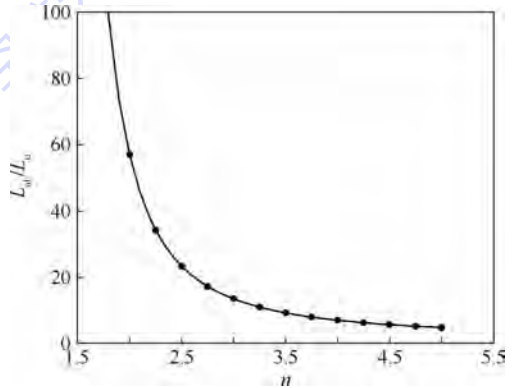


图8  $L_{a1}/L_u$  值与  $n$  的关系曲线

Fig. 8 Curve of relationship between value of  $L_{a1}/L_u$  and  $n$

#### 3.2 函数 $f(\theta)$ 的确定

综合考虑电机的特点,  $f(\theta)$  需要满足2条特性:

1) 在定转子极不重叠区间(即  $\theta_u \leq \theta \leq \theta_{b0}$ ),电机磁场未饱和,特别是在非对齐位置角  $\theta = \theta_u$  附近,电磁转矩的非线性方程式(4)将退化为线性方程式(3),从而可知当  $\theta \rightarrow \theta_u$  时,  $f(\theta) \rightarrow 0$ 。

2) 在位置  $x = x_{b0}$  和  $x = x_{e0}$  处气隙的饱和效应

最为显著<sup>[19]</sup>,这意味着 $f(x)$ 在这2个位置取极大值。

根据这2条特性,在区间 $x_{bo} \leq x \leq x_{eo}$ , $f(x)$ 可以表示为

$$f(x) = \frac{c_1}{1 + c(x - x_{bo})^2} + \frac{c_2}{1 + c(x - x_{eo})^2} \quad (21)$$

式中:预设了3个常数 $c, c_1, c_2$ ,为了确定这3个数,首先必须假设 $c$ 足够大,使得 $f(x = x_{bo}) \approx c_1$ 且 $f(x = x_{eo}) \approx c_2$ 。

### 1) 常数 $c_2$

在 $x = x_{eo}$ 时,气隙磁链和电流偏离线性关系,磁路临界饱和, $\partial T/\partial i$ 将达到最大值,即

$$\frac{\partial^2 T}{\partial i^2} = 0 \quad (22)$$

由式(4)和式(22)可得

$$f(x) \cdot i^n \Big|_{x=x_{eo}} = \frac{2}{n-1} \quad (23)$$

在磁路临界饱和时,相电流值记为 $I_s$ ,磁通密度记为 $B_s$ ,总的气隙长度为 $2\delta$ ,则由磁路平衡方程 $\int Bdl = \mu_0 Ni$ 可得

$$I_s = \frac{2\delta B_s}{\mu_0 N} \quad (24)$$

在式(21)中有 $f(x = x_{eo}) \approx c_2$ ,所以联立式(21)、式(23)和式(24)可得

$$c_2 \approx \frac{2}{n-1} \left( \frac{\mu_0 N}{2\delta B_s} \right)^n \quad (25)$$

式中:典型的临界饱和磁通密度 $B_s$ 范围是1.2~1.5 T。

### 2) 常数 $c_1$

在电机深度饱和时,即 $x = x_1, i \rightarrow \infty$ 时,电磁转矩可由式(3)计算,但深度饱和时的电磁转矩满足:

$$T_{em} = B_{sat} r_1 l_{st} Ni \quad (26)$$

式中: $B_{sat}$ 为电机深度饱和时的磁通密度,典型范围是1.5~1.65 T。电机深度饱和时,电流记为 $I_{sat}$ ,同理, $I_{sat}$ 与 $B_{sat}$ 也满足式(24)。由式(3)和式(26)可得

$$f(x) \Big|_{x=x_1} = \left( \frac{\mu_0 N}{4\delta B_{sat}} \right)^n \quad (27)$$

实际上,对于大多数开关磁阻电机, $x_1 = x_{bo} + 0.2(1 - x_{bo})$ ,为简化分析,可以认为

$$f(x) \Big|_{x=x_{bo}} = \lambda^n f(x) \Big|_{x=x_1} \quad (28)$$

式中: $\lambda$ 为常数,表示等式两边为简单的比例关系,经过大量的实验和仿真验证,其典型的取值范围为 $1 \leq \lambda \leq 1.3$ 。

在式(21)中有 $f(x = x_{bo}) \approx c_1$ ,所以由

式(21)、式(27)和式(28)可得

$$c_1 \approx \left( \frac{\lambda \mu_0 N}{4\delta B_{sat}} \right)^n \quad (29)$$

### 3) 常数 $c$

对于一般的开关磁阻电机, $x_1 \approx (x_{bo} + x_{eo})/2$ ,所以将 $x_1$ 代入式(21)可得

$$c = 4 \frac{(c_1 + c_2)/f(x_1) - 1}{(x_{eo} - x_{bo})^2} \quad (30)$$

将式(25)、式(27)和式(29)代入式(30)可得

$$c = 4 \frac{\lambda^n + \frac{2}{n-1} \left( \frac{2B_{sat}}{B_s} \right)^n - 1}{(x_{eo} - x_{bo})^2} \quad (31)$$

从本节可知 $B_{sat}$ 和 $B_s$ 的值很接近,除非特别必要的地方,可在式(31)及后面的分析中,取 $B_{sat} = B_s$ ,简化分析过程。于是,由式(24)、式(25)、式(27)和式(29)可有以下推论:

$$f(x_1) I_s^n = \frac{1}{2^n} \quad (32)$$

$$c_1 I_s^n = \lambda^n f(x_1) I_s^n = \left( \frac{\lambda}{2} \right)^n \quad (33)$$

$$c_2 I_s^n = 2^n f(x_1) I_s^n = 1 \quad (34)$$

为了在区域 $0 \leq x < x_{eo}$ 内,式(21)也能有很好的精度,可以将其做如下处理:

$$f_1(x) = l(x)f(x) = \frac{\left( \frac{x}{x_{bo}} \right)^m}{1 + \left( \frac{x}{x_{bo}} \right)^m} f(x) \quad (35)$$

由推论式(32)~式(34)可知,将 $f(x)$ 归一化处理只需要将 $f(x)$ 与 $I_s^n$ 相乘即可。故在式(21)和式(35)中,将各参数取值为 $n = 3, \lambda = 1.2, m = 13$ ,则归一化的 $f(x)$ 与 $f_1(x)$ 的曲线如图9所示,显然,图中的 $f_1(x)$ 满足 $f$ 的2条特性。

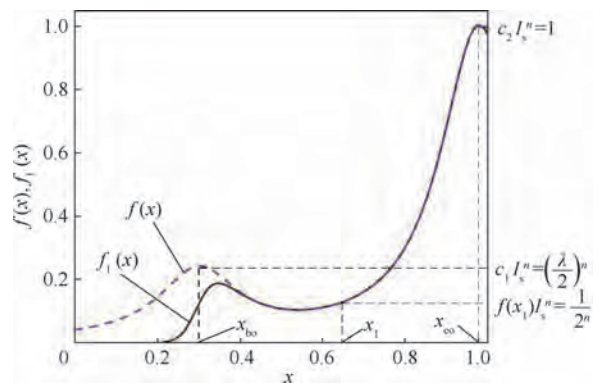


图9 归一化的 $f(x)$ 与 $f_1(x)$ 的曲线

( $n = 3, \lambda = 1.2, m = 13$ )

Fig. 9 Normalized curves of  $f(x)$  and  $f_1(x)$

( $n = 3, \lambda = 1.2, m = 13$ )

## 4 可逆矩角特性模型的有限元计算与实验验证

将表 1 中所列的 2 个开关磁阻样机在有限元软件中各自建立计算模型,得到电机转矩的有限元计算结果,如图 10 所示,图 10(a)为样机 SRM1 和 SRM2 的有限元三维模型,图 10(b)为 SRM1 不同转子位置的瞬态场的计算结果。

为验证解析模型的准确性,将样机 SRM1 的有限元模型与模型解析结果进行比较。图 11 给出了有限元模型结果,其中各曲线所对应的相电流值从 0 A 开始每次增加 1 A,最大相电流值为 8 A。

表 1 两个开关磁阻样机的主要参数

Table 1 Main parameters of two SRM prototypes

参数	SRM1	SRM2
定转子极数	6-4	6-4
定子外径/mm	150	100
定子内径/mm	95	50
定子轭高/mm	13.75	12.2
定子极弧系数	0.4333	0.4333
转子外径/mm	94.4	49.4
转子内径/mm	40	10
转子极弧系数	0.3	0.3
转子轭高/mm	13.6	10
轴向长度/mm	40	40
相绕组匝数	19	50
硅钢片材料	D25_50	D25_50
电机容量	7.5 kW, 270 V, 3 000 r/min	200 W, 60 V, 3 000 r/min

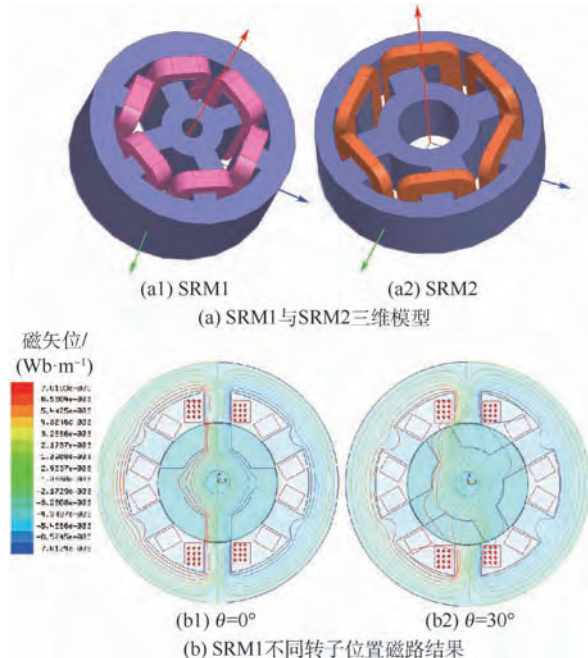
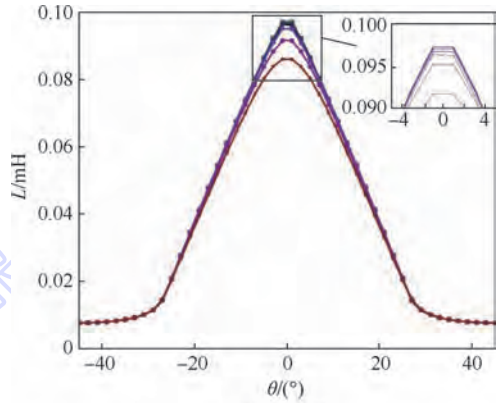


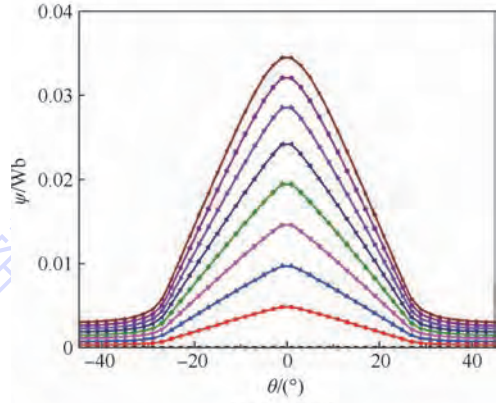
图 10 两个样机的有限元模型及 SRM1 的磁路仿真结果

为 8 A。由于解析表达式(4)中的参数在各自允许的范围内是可以合理调整的,图 12(a)、(b)和(c)分别为在不同的解析模型参数下的结果对比,各解析模型(a、b和c)的参数取值列于表 2 中。

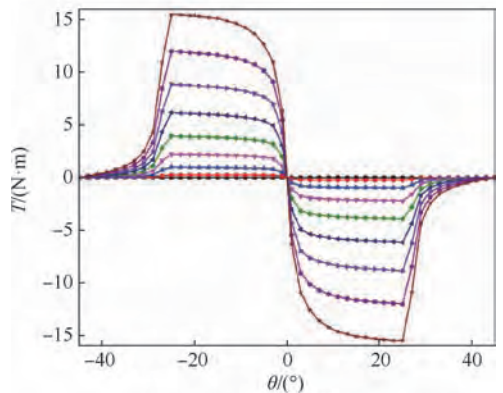
在图 12 中,电机输出正转矩和负转矩区间的曲线形状是成中心对称的,由 3 个解析模型的对比结果可知,对于确定尺寸的开关磁阻电机,表征其转子位置角的模型参数  $x_{b0}$ 、 $x_1$  和  $x_{e0}$  只与电机的几何形状相关,所以在解析模型中是固定值。



(a) 电感曲线



(b) 磁链曲线



(c) 转矩曲线

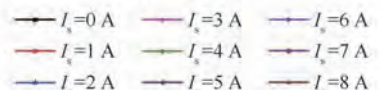


图 11 SRM1 有限元模型结果

图 11 Finite element model results of SRM1

Fig. 10 Finite element models of two prototypes and magnetic simulation result of SRM1

而电机的材料决定了相绕组电感导数 $L_{op}(x)$ 的

曲线形状,进而决定了转矩曲线的形状,所以在图中的3个解析模型中,参数 $\mu_{rise}$ 、 $\mu_{top}$ 、 $\mu_{fall}$ 和 $\alpha$ 、 $\beta$ 的值也都相同。最后, $m$ 值影响了 $0 < x < x_1$ 区间内的模型曲线形状,而 $k$ 值影响了 $x_1 < x < 1$ 区间内特别是靠近对齐位置 $x_{eo}$ 的曲线形状。

作为结果比对,表3计算了不同相电流下,图12(a)、(b)和(c)中解析模型结果与有限元计算结果的绝对误差 $T_{error}$ 及平均相对误差 $T_R$ ,其计算式如下:

$$T_{error} = \sqrt{\sum_{j=1}^{N_s} (T_{FEM}(j) - T_{Model}(j))^2} \quad (36)$$

$$T_R = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{j=1}^{N_s} \left( \frac{T_{Model}(j) - T_{FEM}(j)}{T_{FEM}(j)} \right)^2} \times 100\% \quad (37)$$

式中: $T_{FEM}$ 为有限元计算的输出转矩; $T_{Model}$ 为解析模型计算的输出转矩; $j$ 为采样点编号; $N_s$ 为总采样点。

从表3可以看到,从平均相对误差指标上看,模型c好于模型b好于模型a。从绝对误差指标上看,模型a在相电流较小时比较准确,模型b在相电流较大时比较准确,而模型c,除在相电流值8A时绝对误差稍偏大外,无论是绝对误差还是平均相对误差指标上均优于前两者。所以对于样机1,模型c是最优选择。

解析模型结果,有限元的计算结果和实验测量结果的对比如图13所示,从图中可以看出矩角特性曲线的解析计算结果与有限元结果基本一致,与实验测量结果误差不超过3%,误差最大值在转子对齐位置处。与实验测量结果误差原因一部分是在电机的对齐位置,输出转矩值随位置角的变化非常剧烈,这一点从曲线图下降趋势可以看出,所以在此位置转子的微小扰动对测量结果的影响是很明显的。

对于样机SRM2,解析模型各参数的取值列于表4中,其有限元计算结果和解析模型结果的对比如图14所示,从图中可以看出矩角特性曲线的解析计算结果与有限元计算结果完全一致。

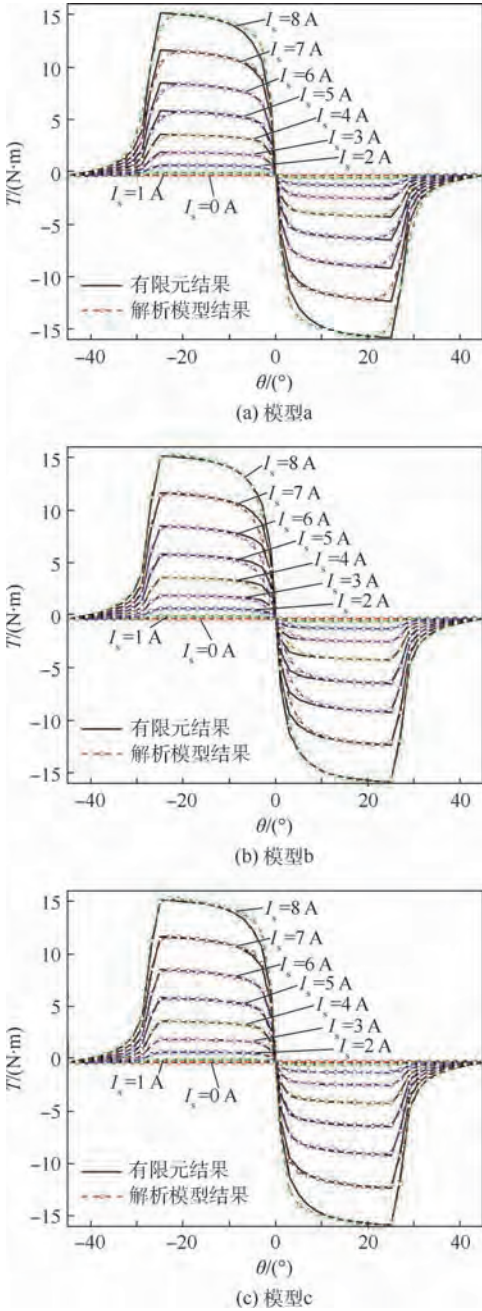


图12 样机SRM1有限元模型与不同模型参数的解析模型结果对比

Fig. 12 Result comparison between finite element model and analytical model with different model parameters for prototype SRM1

表2 各解析模型的参数取值

Table 2 Parameter values of each analytical model

模型	$m$	$n$	$x_{bo}$	$\mu_{rise}$	$\alpha$	$x_1$	$\mu_{top}$	$\beta$	$x_{eo}$	$\mu_{fall}$	$k$
a	13	3	0.39	0.23	2	0.4	0.5	2	0.98	0.95	35
b	25	3	0.39	0.23	2	0.4	0.5	2	0.98	0.95	20
c	25	3	0.39	0.23	2	0.4	0.5	2	0.98	0.95	35

综上所述,本文提出的可逆矩角特性解析模型具有普适性,能够适用于多种不同规格的开关磁阻电机的建模,解析模型与有限元计算结果

表 3 样机 SRM1 解析模型和有限元模型的  $T_{error}$  和  $T_R$

Table 3  $T_{error}$  and  $T_R$  of analytical model and finite element model for prototype SRM1

模型	误差	$I_s = 2\text{ A}$	$I_s = 4\text{ A}$	$I_s = 6\text{ A}$	$I_s = 8\text{ A}$
a	$T_{error}/(\text{N} \cdot \text{m})$	0.24	0.97	2.07	4.26
	$T_R/\%$	2.92	2.92	2.90	2.95
b	$T_{error}/(\text{N} \cdot \text{m})$	0.38	1.56	3.16	2.81
	$T_R/\%$	2.90	2.90	2.86	2.66
c	$T_{error}/(\text{N} \cdot \text{m})$	0.10	0.42	0.73	2.97
	$T_R/\%$	2.55	2.55	2.54	2.60

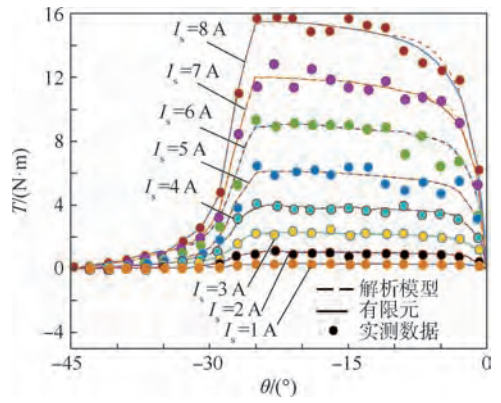


图 13 样机 SRM1 解析模型、有限元模型和实验测量结果对比

Fig. 13 Result comparison among analytical model, finite element model and experimental measurement

表 4 样机 SRM2 解析模型各参数值

Table 4 Parameter values of analytical model for prototype SRM2

参数	$m$	$n$	$x_{bo}$	$\mu_{rise}$	$\alpha$	$x_1$	$\mu_{top}$	$\beta$	$x_{eo}$	$\mu_{fall}$	$k$
数值	40	3	0.4	0.23	2	0.41	0.5	2	0.99	0.95	20

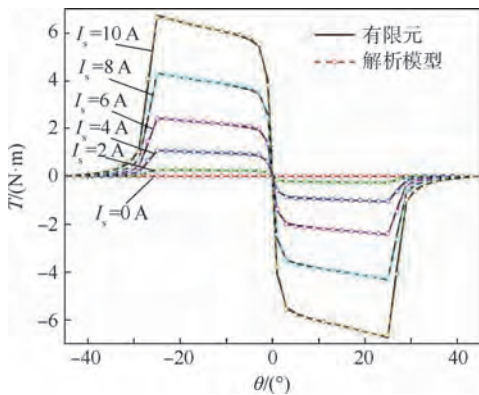


图 14 样机 SRM2 有限元模型与解析模型结果对比

Fig. 14 Result comparison between finite element model and analytical model for prototype SRM2

和实际测量结果都基本一致,计算速度快准确度高。

## 5 结论

本文提出的 SRM 矩角特性可逆非线性模型:

1) 用分段函数拟合,避免了单一函数在拟合电机相电感时精度不问题,在模型精确度和复杂度之间达到平衡。

2) 在电机线性区和非线性区均有较高精度,与有限元仿真结果相比误差小于 2.6%,与样机实测数据相比误差在 3% 以内。

3) 模型参数中  $n$  的值,受到电机中相绕组等效自感最大值与最小值之比的约束,一般取 3 比较合适。

4) 模型参数中的  $x_{bo}$ 、 $x_1$  和  $x_{eo}$  由电机的几何形状决定,  $\mu_{rise}$ 、 $\mu_{top}$ 、 $\mu_{fall}$  和  $\alpha$ 、 $\beta$  由电磁特性确定。不确定的参数只有  $m$  和  $k$  模型参数的优化较为容易实现。

## 参考文献 (References)

[ 1 ] ARUMUGAM R, LOWTHER D A, KRISHNAN R, et al. Magnetic field analysis of a switched reluctance motor using a two-dimensional finite element method [ J ]. IEEE Transactions on Magnetics, 1985, 21 ( 5 ): 1883-1885.

[ 2 ] LIN H, LOW T S, CHEN S X. Investigation on magnetic saturation in switched reluctance motor using 2D hybrid finite element method [ J ]. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32 ( 5 ): 4317-4319.

[ 3 ] TORREY D A, LANG J H. Modeling a nonlinear variable-reluctance motor drive [ J ]. IEE Proceedings B: Electric Power Applications, 1990, 137 ( 5 ): 314-326.

[ 4 ] 邓智泉, 杨刚, 张媛, 等. 一种新型的无轴承开关磁阻电机数学模型 [ J ]. 中国电机工程学报, 2005, 25 ( 9 ): 139-146. DENG Z Q, YANG G, ZHANG Y, et al. An innovative mathematical model for a bearingless switched reluctance motor [ J ]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2005, 25 ( 9 ): 139-146 ( in Chinese ).

[ 5 ] RADUN A V. Design considerations for the switched reluctance motor [ J ]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, 31 ( 5 ): 1079-1087.

[ 6 ] VUJICIC V, VUKOSAVIC S N. A simple nonlinear model of the switched reluctance motor [ J ]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2000, 15 ( 4 ): 395-400.

[ 7 ] LOOP B P, SUDHOFF S D. Switched reluctance machine model using inverse inductance characterization [ J ]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39 ( 3 ): 743-751.

- [ 8 ] RADIMOV N, BEN-HAIL N, RABINOVICI R. Simple model of switched-reluctance machine based only on aligned and unaligned position data [ J ]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(3):1562-1572.
- [ 9 ] SALMASI F R, FAHIMI B. Modeling switched-reluctance machines by decomposition of double magnetic saliencies [ J ]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(3):1556-1561.
- [ 10 ] XUE X D, CHENG K W E, HO S L. Optimization and evaluation of torque sharing functions for torque ripple minimization in switched reluctance motor drives [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(9):2076-2090.
- [ 11 ] VUJICIC V P. Modeling of a switched reluctance machine based on the invertible torque function [ J ]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(9):2186-2194.
- [ 12 ] KJAER P C, GRIBBLE J J, MILLER T J E. High-grade control of switched reluctance machines [ J ]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33(6):1585-1593.
- [ 13 ] MIKAIL R, SOZER Y, HUSAIN I, et al. Torque ripple minimization of switched reluctance machines through current profiling [ J ]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(3):1258-1267.
- [ 14 ] KHALIL A, HUSAIN I. A Fourier series generalized geometry-based analytical model of switched reluctance machines [ J ]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(3):673-684.
- [ 15 ] HOSSAIN S A, HUSAIN I. A geometry based simplified analytical model of switched reluctance machines for real-time controller implementation [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(6):1384-1389.
- [ 16 ] VUJICIC V P. Minimization of torque ripple and copper losses in switched reluctance drive [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(1):388-399.
- [ 17 ] MILLER T J E. Electronic control of switched reluctance machines [ M ]. Oxford: Newnes Press, 2001.
- [ 18 ] KHALIL A, HUSAIN I. A Fourier series generalized geometry-based analytical model of switched reluctance machines [ J ]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(3):673-684.
- [ 19 ] MILLER T I J, GLINKA M, MCGILP M, et al. Ultra-fast model of the switched reluctance motor [ C ] // IEEE Industry Applications Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1998:319-326.

#### 作者简介:

叶威 男, 博士研究生。主要研究方向: 磁阻电机建模及控制。

马齐爽 男, 博士, 教授。主要研究方向: 电气系统检测、电气系统控制及可靠性、磁阻电机。

## Nonlinear fitting method for torque-angle characteristic model of switched reluctance motor

YE Wei<sup>1,2</sup>, MA Qishuang<sup>2,\*</sup>, XU Ping<sup>2</sup>, ZHANG Poming<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Space Physics, Beijing 100076, China; 2. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The modeling method of the switched reluctance motor is different from the traditional motor. By analyzing the principle of electromagnetic torque generation, the relationship between electromagnetic torque and phase inductance derivatives under different motor saturation conditions is determined. The inductance derivative curve is modeled by piecewise function nonlinear fitting. And then, the analytical model for the reversible torque-angle characteristics of switched reluctance motor is obtained. The parameters of the model are determined and optimized by the structural parameters and constraint condition of the motor. The reversible torque-angle model makes the calculation of the magnetization curve and the instantaneous flux linkage possible. It brings great convenience for the design of the motor and the drive control of the motor. The accuracy of the analytical results is verified by the measured data and the finite element method with two prototypes.

**Keywords:** switched reluctance motor; modeling; nonlinear; torque-angle characteristics; curve fitting

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0253



# 成分数据的空间自回归模型

黄婷婷<sup>1,2</sup>, 王惠文<sup>1,3,\*</sup>, SAPORTA Gilbert<sup>4</sup>

(1. 北京航空航天大学 经济与管理学院, 北京 100083; 2. 城市运行应急保障模拟技术北京市重点实验室, 北京 100083;  
3. 北京航空航天大学 大数据科学与脑机智能高精尖创新中心, 北京 100083;  
4. 法国国立工艺学院 计算机和通信研究中心, 巴黎 75003)

**摘 要:** 针对已有成分数据线性回归模型对研究对象相互独立的严格要求, 提出了含有成分数据和普通数据的空间自回归模型, 在此基础上提出了成分数据空间自回归模型的估计方法。新模型结合了空间自回归模型处理因变量之间相互依赖的优势, 可同时处理成分数据和普通数据。通过利用等距对数比(ilr)变换将成分数据解约束, 得到了新模型的参数估计量。蒙特卡罗模拟实验验证了所提估计方法的有效性。

**关键词:** 成分数据; 等距对数比(ilr)变换; 极大似然估计; 空间依赖; 空间自回归模型

**中图分类号:** F222

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5965(2019)01-0093-06

数据搜集技术的快速发展不仅带来了海量的数据, 也带来了类型越来越复杂的数据, 如函数数据<sup>[1-3]</sup>、成分数据<sup>[4]</sup>和符号数据<sup>[5-6]</sup>等。在这些类型复杂的数据中, 成分数据由于关注部分在总体中的占比信息, 受到愈来愈广泛的关注。如 Fry等<sup>[7]</sup>利用住户开支统计调查结果研究预算分配模型, Pawlowsky-Glahn和Egozcue<sup>[8]</sup>利用成分数据比较东欧和西欧国家在食物消费结构上的习惯差异, Pawlowsky-Glahn<sup>[9]</sup>等利用成分数据回归模型分析了巴西宗教信仰构成的变化。

成分数据分析主要研究活动对象结构变化产生的规律及其对其他对象产生的影响。关于成分数据的理论研究, 标志性的成果是1986年Aichison撰写的《成分数据统计分析》<sup>[10]</sup>, 该书详细阐述了成分数据统计分析方法建立的数学基础。在成分数据分析中, 线性回归模型是一种常用的分析技术。现有的成分数据线性回归模型可以分为两大类: 第1类因变量是普通数据<sup>[11-12]</sup>, 第2类因

变量是成分数据<sup>[13-15]</sup>。Hron等<sup>[12]</sup>利用第1类成分数据线性回归模型研究了GDP组成与预期寿命的关系; 而Wang等<sup>[14]</sup>利用第2类模型研究了地区总产值与就业和投资的关系。本文在因变量是普通数据的成分数据回归模型基础上进行研究。在成分数据回归模型中, 通常以样本之间独立同分布作为前提。而在实际应用中, 独立同分布的假设往往是不成立的。如何对现有的成分数据线性回归模型进行改进, 使之适应实际应用的需求, 是一个值得深入研究的问题。

在空间计量经济学<sup>[16]</sup>中, 空间自回归模型通过引入空间依赖项, 打破了因变量相互独立的假设, 使得许多与空间地理位置或社交网络有关的现象得到解释。利用空间自回归模型, 可以对区域经济发展的问题<sup>[17-18]</sup>、溢出性问题<sup>[19-20]</sup>等进行分析。现有的空间自回归模型在普通数据的基础上已经发展得相对完善, 已有的对空间自回归模型进行估计的方法包括Ord<sup>[21]</sup>和Lee<sup>[22]</sup>提出的极

收稿日期: 2018-05-03; 录用日期: 2018-07-28; 网络出版时间: 2018-08-23 10:38

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180821.1326.003.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180821.1326.003.html)

基金项目: 国家自然科学基金(71420107025)

\*通信作者. E-mail: wanghw@vip.sina.com

**引用格式:** 黄婷婷, 王惠文, SAPORTA Gilbert. 成分数据的空间自回归模型[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 93-98.  
HUANG T T, WANG H W, SAPORTA Gilbert. Spatial autoregressive model for compositional data[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 93-98 (in Chinese).

大似然估计法、Kelejian、Prucha<sup>[23]</sup>和Lee<sup>[24]</sup>提出的广义矩估计法、Lesage和Pace<sup>[25]</sup>从贝叶斯的角度提出的马尔可夫链蒙特卡罗方法(Markov chain Monte Carlo method)。

因此,针对经典成分数据线性回归模型假设样本间相互独立的严格要求,研究因变量之间具有空间依赖的成分数据回归模型,通过在普通数据的空间自回归模型中,引入成分数据的协变量,提出了同时含有成分数据和普通数据的空间自回归模型。并依据成分数据的特点,给出了混合2种数据的空间自回归模型的估计方法。提出的新模型比已有的成分数据线性回归模型具有更强的灵活性,可以处理更加复杂的空间依赖问题。

## 1 基础理论

本节主要介绍成分数据的代数空间——单形空间(simplex)中的基本运算,以及与成分数据联系紧密的几种变换,利用这些变换可以将具有约束的成分数据转化成易于处理的普通数据。

### 1.1 单形空间

对于含有 $d$ 个成分的成分数据,对应的单形空间 $S^d$ (上标 $d$ 表示成分数据有 $d$ 个成分,因此实际是 $d-1$ 维的)定义为

$$S^d = \{ \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_d)^T, x_i > 0, i = 1, 2, \dots, d; \sum_{i=1}^d x_i = k \} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}$ 为一个 $d$ 维的成分数据; $x_i > 0$ 表示成分数据的每一个成分都是非负的; $\sum_{i=1}^d x_i = k$ 为成分数据必须满足的约束条件,即各成分累加和是个定值。不失一般性,在本文中令 $k=1$ 。在 $S^d$ 中,基本的运算包括加法运算、数乘运算、内积运算。

现有单形空间 $S^d$ 中的任意2个成分数据 $\mathbf{x}, \mathbf{y}$ 以及实数 $\alpha$ ,记 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_d)^T \in S^d, \mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_d)^T \in S^d, \alpha \in \mathbf{R}$ ,则 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{y}$ 的加法 $\oplus$ 及 $\alpha$ 和 $\mathbf{x}$ 数乘运算 $\odot$ 可分别定义为

$$\mathbf{x} \oplus \mathbf{y} = C(x_1 y_1, x_2 y_2, \dots, x_d y_d) \quad (2)$$

$$\alpha \odot \mathbf{x} = C(x_1^\alpha, x_2^\alpha, \dots, x_d^\alpha) \quad (3)$$

式中: $C(\cdot)$ 表示闭合运算,定义为

$$C(x_1, x_2, \dots, x_d) = \left( \frac{x_1}{\sum_{i=1}^d x_i}, \frac{x_2}{\sum_{i=1}^d x_i}, \dots, \frac{x_d}{\sum_{i=1}^d x_i} \right)^T \quad (4)$$

不难看出,闭合运算保证了运算结果仍在 $S^d$ 中。基于运算 $\oplus$ 和 $\odot$ ,可以导出 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{y}$ 的减法运算, $\mathbf{x} - \mathbf{y} = \mathbf{x} \oplus (-1 \odot \mathbf{y}) = C\left(\frac{x_1}{y_1}, \frac{x_2}{y_2}, \dots, \frac{x_d}{y_d}\right)^T$  (5)

$\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{y}$ 的内积运算 $\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle_a$ 定义为

$$\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle_a = \sum_{i=1}^d \ln \frac{x_i}{g_m(\mathbf{x})} \ln \frac{y_i}{g_m(\mathbf{y})} \quad (6)$$

式中: $g_m(\mathbf{x}) = \left( \prod_{i=1}^d x_i \right)^{1/d}$ 为 $\mathbf{x}$ 各个成分的几何

平均值;同理可定义 $g_m(\mathbf{y}) = \left( \prod_{i=1}^d y_i \right)^{1/d}$ ;内积符号 $\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle_a$ 的下标 $a$ 表示该运算在单形空间 $S^d$ 中。内积运算还可以导出单形空间中任意一个成分数据 $\mathbf{x}$ 的范数 $\|\mathbf{x}\|_a$ 及任意2个成分数据 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{y}$ 之间的距离 $d_a(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ ,其定义分别为

$$\|\mathbf{x}\|_a = \sqrt{\langle \mathbf{x}, \mathbf{x} \rangle_a} = \sqrt{\sum_{i=1}^d \left( \ln \frac{x_i}{g_m(\mathbf{x})} \right)^2} \quad (7)$$

$$d_a(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|_a =$$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^d \left( \ln \frac{x_i}{g_m(\mathbf{x})} - \ln \frac{y_i}{g_m(\mathbf{y})} \right)^2} \quad (8)$$

可以证明,含有内积运算的单形空间是一个希尔伯特空间。

### 1.2 等距对数比变换

需注意,因约束 $\sum_{i=1}^d x_i = 1$ 的存在,成分数据

$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_d)^T$ 的 $d$ 个成分之间不相互独立,直接将多元统计方法应用到成分数据上会产生矛盾的结果。已有的对成分数据进行变换的方法主要为对数比变换,具体类型包括加法对数比(alr)变换,中心对数比(clr)变换和等距对数比(ilr)变换。由于alr变换不是等距变换,而clr变换得到的变量是线性相关的,不便于直接用于回归建模,因此此处仅介绍ilr变换。

ilr变换是Egozcue等<sup>[26]</sup>提出的。该变换将 $d$ 维的单形空间 $S^d$ 映射到 $d-1$ 维的欧几里得空间 $\mathbf{R}^{d-1}$ 上,得到的实数向量消除了原成分数据中不同成分之间的共线性,可以直接用于建模。该变换利用标准正交基的正交性和单位长度性质,将成分数据变换成易于处理的标准正交基的系数。设标准正交基为 $\{\mathbf{e}_k\}_{k=1}^{d-1}, \mathbf{e}_k = (e_{k1}, e_{k2}, \dots, e_{kd})^T$ ,则任意一个成分数据 $\mathbf{x}$ 都可以表示为 $\mathbf{x} = \langle \mathbf{x}, \mathbf{e}_1 \rangle_a \odot \mathbf{e}_1 \oplus \langle \mathbf{x}, \mathbf{e}_2 \rangle_a \odot \mathbf{e}_2 \oplus \dots \oplus \langle \mathbf{x}, \mathbf{e}_{d-1} \rangle_a \odot \mathbf{e}_{d-1}$ ,相应地, $\mathbf{x}$ 的ilr变换坐标 $\text{ilr}(\mathbf{x})$ 为

$$\text{ilr}(\mathbf{x}) = (\langle \mathbf{x}, \mathbf{e}_1 \rangle_a, \langle \mathbf{x}, \mathbf{e}_2 \rangle_a, \dots, \langle \mathbf{x}, \mathbf{e}_{d-1} \rangle_a)^T \quad (9)$$

Egozcue等<sup>[26]</sup>证明,ilr变换是保内积的变换,即对于含有 $d$ 个成分的成分数据 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{y}$ ,有

$$\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle_a = \langle \text{ilr}(\mathbf{x}), \text{ilr}(\mathbf{y}) \rangle \quad (10)$$

下面给出具体的ilr变换过程。

已知观测到样本量  $n$  的  $d$  维成分数据  $\{C_i\}_{i=1}^n$ , 其中  $C_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})^T$ , 则  $C_i$  进行 ilr 变换后的坐标为

$$\xi_i = \text{ilr}(C_i) = \text{clr}(C_i) \Psi^T = \ln(C_i) \Psi^T \quad (11)$$

式中:

$$\text{clr}(C_i) =$$

$$\left( \ln \frac{C_{i1}}{g_m(C_i)}, \ln \frac{C_{i2}}{g_m(C_i)}, \dots, \ln \frac{C_{id}}{g_m(C_i)} \right)$$

$\Psi$  为  $(d-1) \times d$  维的矩阵, 具体表达式为

$$\Psi = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \cdots & \varphi_{1d} \\ \vdots & & \vdots \\ \varphi_{(d-1)1} & \cdots & \varphi_{(d-1)d} \end{bmatrix}$$

$$\varphi_{ij} = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{(d-i)(d-i+1)}} & j \leq d-1 \\ -\sqrt{\frac{d-i}{d-i+1}} & j = d-i+1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

由于 ilr 变换是保内积的变换, 因此在第 3 节的估计方法中, 将使用变换后的坐标  $\{\xi_i\}_{i=1}^n$  代替原来的成分数据  $\{C_i\}_{i=1}^n$  进行参数估计。

## 2 模型的提出

借鉴 Qu 和 Lee<sup>[27]</sup> 对空间自回归模型的背景假设, 考虑空间关系发生在一个非均匀分布的格子  $L, L \subset \mathbf{R}^p, p \geq 1$  上, 格子上的点相互可分, 即任意 2 点的距离大于 0。从格子  $L$  上观测到了  $n$  个对象, 每个对象的观测数据为  $\{y_i, x_{i1}, \dots, x_{id}, x_{id+1}, \dots, x_{ip}\}_{i=1}^n$ 。其中  $x_{ij} (j=1, 2, \dots, d)$  共同组成  $d$  个成分的成分数据  $C_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})^T$ , 且每个  $C_i$  是随机成分数据  $C$  的独立同分布观测;  $x_{ij} (j=d+1, d+2, \dots, p)$  为普通数据, 它们是随机变量  $X_j (j=d+1, d+2, \dots, p)$  的独立同分布观测, 标记  $X_i = (x_{id+1}, x_{id+2}, \dots, x_{ip})^T$ 。记  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T, C = (C_1, C_2, \dots, C_n)^T, X = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$ , 则因变量  $Y$  符合以下回归模型:

$$Y = \alpha\tau_n + \rho WY + \langle C, B \rangle_a + X\Gamma + E \quad (12)$$

式中:  $\alpha\tau_n$  为截距项,  $\tau_n$  为所有元素均为 1 的维度为  $n$  的向量;  $\rho$  为未知的空间自相关参数, 取值在区间  $(-1, 1)$  内;  $W = \{w_{ij}\}_{n \times n}$  为外生的空间矩阵,  $w_{ij}$  为对象  $i$  与  $j$  之间的权重;  $B$  为待估的成分数据系数, 具有  $p$  个成分;  $\Gamma$  为普通数据的待估系数;  $E$  为独立于  $X$  的误差项, 服从均值为 0, 方差为  $\sigma^2 I_n$  多元正态分布,  $I_n$  为  $n \times n$  的单位矩阵。

需强调的是, 式(12)中  $C$  和回归系数  $B$  都为成分数据,  $\langle C, B \rangle_a$  为一个实数。在 Aitchison 内积空间中,  $\langle C, B \rangle_a$  代表  $X$  对  $Y$  解释性最强的投影方向。

当  $\rho = 0$  时, 式(12)退化为普通的成分数据线性模型。在这个意义上, 式(12)比经典的成分数据线性模型具有更强的灵活性, 可以处理更加复杂的数据关系。

## 3 估计方法

为估计模型式(12)中的参数  $\alpha, \rho, B, \Gamma$ , 首先需将相互不独立的成分数据转化为相互独立的普通数据, 1.2 节中已作详细介绍; 其次, 要解决因变量  $y_i$  之间不相互独立的问题, 此处采用极大似然估计法 ilr 变换后的模型进行估计。

同样利用 1.2 节中的 ilr 变换, 可得到成分数据系数  $B$  的变换坐标  $b = \text{ilr}(B)$ 。

由于  $B$  是需估计的参数, 因此变换后的坐标  $b$  是未知的。记  $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)^T$ , 则模型式(12)可写为

$$Y = \alpha\tau_n + \rho WY + \xi b + X\Gamma + E \quad (13)$$

为描述简便, 记:  $\delta = (b, \Gamma)^T, Z = (\xi, X)$ , 则式(13)可表示为

$$Y = \alpha\tau_n + \rho WY + Z\delta + E \quad (14)$$

由于模型式(12)中误差项服从多元正态分布, 因变量  $Y$  的似然函数为

$$l(\rho, \delta, \sigma^2) = -\frac{n}{2} \ln(\pi\sigma^2) + \ln |I_n - \rho W| - \frac{e^T e}{2\sigma^2} \quad (15)$$

式中:  $e = Y - \alpha\tau_n - \rho WY - Z\delta$ 。因式(15)有 3 个未知参数  $\rho, \delta$  和  $\sigma^2$ , 直接对这 3 个变量求导存在一定的计算困难。现假若已得到  $\rho$  的估计值  $\hat{\rho}$ , 那么利用极大似然估计法, 可以相应得到  $\delta$  和  $\sigma^2$  的估计量, 它们分别为

$$\hat{\delta} = (Z^T Z)^{-1} Z^T (I_n - W) Y \quad (16)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} (Y - \alpha\tau_n - \rho WY - Z\delta)^T \cdot$$

$$(Y - \alpha\tau_n - \rho WY - Z\delta) \quad (17)$$

考虑将似然函数式(15)中的变量  $\delta$  和  $\sigma^2$  分别用估计量  $\hat{\delta}$  和  $\hat{\sigma}^2$  代替, 那么似然函数中的 3 个变量就变成一个变量。式(15)替换后的表达式为

$$l(\rho) = c - \frac{n}{2} \ln(\hat{\sigma}^2) + \ln |I_n - \rho W| \quad (18)$$

式中:  $c$  为一个常数。利用牛顿法等数值解法, 可以得到的  $\rho$  的估计值  $\hat{\rho}$ 。相应地, 通过式(16)和式(17)可以分别得到  $\delta$  和  $\sigma^2$  的估计量。

由于得到  $\hat{\delta}$  以后, 可以得到  $b$  的估计量  $\hat{b}$ ; 再通过 ilr 变换的逆变换  $\text{ilr}^{-1}$ , 就可得到  $B$  的估计量  $\hat{B}$  为

$$\hat{\mathbf{B}} = \text{ilr}^{-1}(\hat{\mathbf{b}}) = C(\exp(\hat{\mathbf{b}}\Psi)) \quad (19)$$

至此,所有参数都可以估计出来。

### 4 数值模拟

为评估所提出估计方法的统计性质,下面设计了几组数值模拟实验检验估计量的表现。所有的计算过程都是在 R 软件中实现,用到的包有“spdep”和“compositions”。

关于空间自回归模型的空间网络结构,采取最常见的“车”相邻(rook matrix)。假设  $n$  个样本点随机地散落在一个  $R$  行  $T$  列的格子棋盘上,每个样本点占据棋盘上的一个方格,那么在棋盘上共享一条边的 2 个样本点就是相邻的。在这样的情况下,处在棋盘中间的任意样本点都有 4 个邻居,处在棋盘边上的样本点有 3 个邻居,而处在棋盘角上的样本点只有 1 个邻居。分别设置  $R = 10, 20, 30, T = 30, 25, 30$ , 相应地样本量  $n = R \times T = 300, 500, 900$ 。为了查看空间依赖的强弱是否对估计量有影响,同样设计了 3 组不同的  $\rho$  值,  $\rho = 0, 0.5, 0.8$ 。

关于混合数据的空间自回归模型,由于截距项不是主要关注的参数,此处设  $\alpha = 0$ ,其他参数设置如下:  $\mathbf{Y} = \rho\mathbf{W}\mathbf{Y} + \langle \mathbf{B}, \mathbf{C} \rangle_{\mathbf{a}} + \Gamma\mathbf{X} + 0.8\mathbf{E}$ ;  $\mathbf{C} \sim N_s(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$ ;  $\mathbf{X} \sim N(1, 0.8)$ ;  $\mathbf{E} \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{I}_n)$ ;  $\boldsymbol{\mu} = (0.49, 0.61)^T$ ;  $\boldsymbol{\Sigma} = \begin{bmatrix} 2 & -1.5 \\ -1.5 & 2 \end{bmatrix}$ ;  $\Gamma = 1$ ;  $\mathbf{B} = (b_1, b_2, b_3)^T = (2, 1, 1.5)^T$ 。其中:  $\mathbf{C} \sim N_s(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$  表示  $\mathbf{C}$  进行 ilr 变换后的坐标服从均值为  $\boldsymbol{\mu}$ , 协方差为  $\boldsymbol{\Sigma}$  的多元正态分布。此处  $\text{ilr}^{-1}(\boldsymbol{\mu}) = (1, 2, 3)^T$ 。

在每一种情形下,重复实验次数  $k = 100$ 。对于参数  $\rho$  和  $\Gamma$ ,用样本均值偏离真值的大小和样本标准差衡量估计量的表现。对于成分数据系数,用成分数据均值  $\bar{\mathbf{B}}$  与真值的偏差以及成分数据的总方差  $\text{totvar}(\mathbf{X})$  衡量估计结果的优劣。其中,样本均值的计算公式为

$$\bar{\mathbf{B}} = C(\bar{b}_1, \bar{b}_2, \dots, \bar{b}_d) \quad \bar{b}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \ln(b_{ij}) \quad (20)$$

样本的总方差的计算公式为

$$\text{totvar}(\mathbf{X}) = \frac{1}{2d} \sum_{j,k=1}^d \hat{v}_{jk} \quad (21)$$

$$\text{其中: } \hat{v}_{jk} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \ln \frac{b_{ij}}{b_{ik}} - \ln \frac{\bar{b}_j}{\bar{b}_k} \right)^2$$

估计结果如图 1 ~ 图 3 所示。可以得到如下结论:

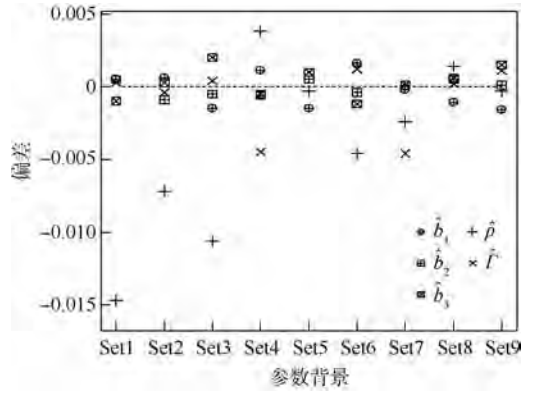
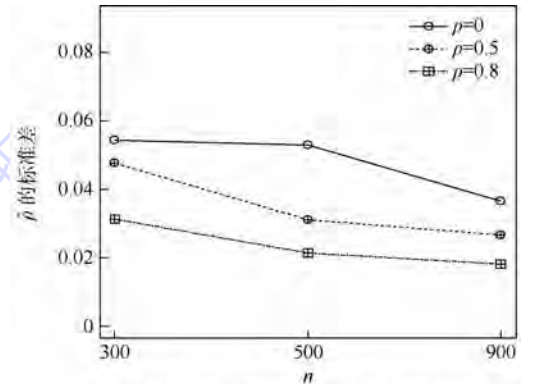
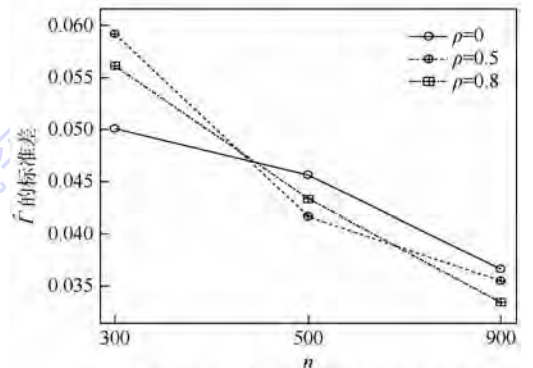


图 1  $\hat{\rho}, \hat{\Gamma}, \hat{b}_1, \hat{b}_2$  和  $\hat{b}_3$  的样本偏差

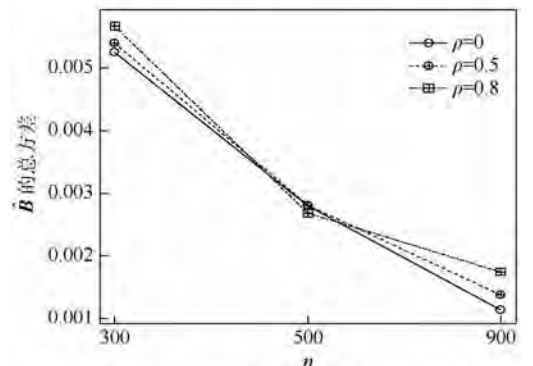
Fig.1 Sample deviation of  $\hat{\rho}, \hat{\Gamma}, \hat{b}_1, \hat{b}_2$  and  $\hat{b}_3$



(a)  $\rho$  取不同值时,  $\hat{\rho}$  的标准差随样本量的变化情况



(b)  $\rho$  取不同值时,  $\hat{\Gamma}$  的标准差随样本量的变化情况



(c)  $\rho$  取不同值时,  $\hat{\mathbf{B}}$  的总方差随样本量的变化情况

图 2  $\hat{\rho}, \hat{\Gamma}$  的标准差及  $\hat{\mathbf{B}}$  的总方差

Fig.2 Standard deviation of  $\hat{\rho}, \hat{\Gamma}$  and total variance of  $\hat{\mathbf{B}}$

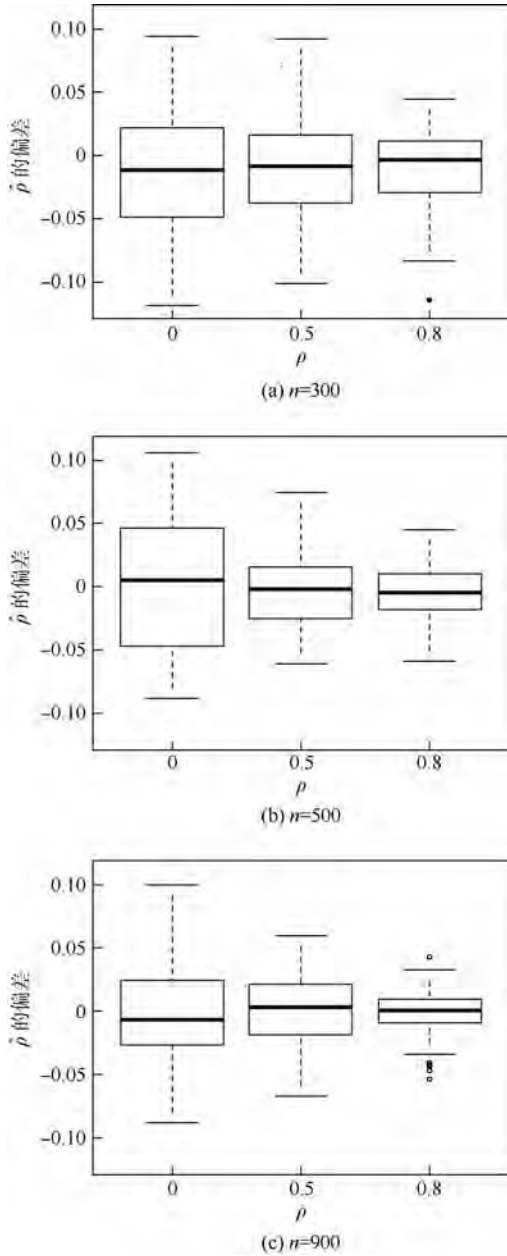


图 3  $n$  和  $\rho$  取不同值时,  $\hat{\rho}$  偏差箱线图

Fig. 3 Boxplots of deviation of  $\hat{\rho}$  when  $n$  and  $\rho$  change

1)  $\hat{\rho}$ 、 $\hat{\Gamma}$ 、 $\hat{b}_1$ 、 $\hat{b}_2$ 、 $\hat{b}_3$  的样本均值在所有的参数设置背景下偏离实际值均较小。图 1 中给出了不同参数设置背景 (Set1 ~ Set9 对应的  $(\rho, n)$  的取值分别为  $(300, 0)$ 、 $(300, 0.5)$ 、 $(300, 0.8)$ 、 $(500, 0)$ 、 $(500, 0.5)$ 、 $(500, 0.8)$ 、 $(900, 0)$ 、 $(900, 0.5)$  和  $(900, 0.8)$  共 9 种情况) 下不同参数估计值偏差的散点图, 可以发现, 偏差的绝对值不超过 0.015, 成分数据系数 3 个成分  $\hat{b}_1$ 、 $\hat{b}_2$ 、 $\hat{b}_3$  的偏差相对于  $\hat{\rho}$  和  $\hat{\Gamma}$  均较小。

2)  $\hat{\rho}$  和  $\hat{\Gamma}$  样本标准差及  $\hat{B}$  的总方差随着样本量的增大而减小。从图 2 中可以看出, 不论  $\rho$  取何值, 随着  $n$  的增加, 估计量的标准差或总方差折

线都是减小的趋势。

3) 当样本量大小相同时,  $\hat{\rho}$  的样本标准差随着  $\rho$  值的增大而减小。从图 3 中可以看出, 当  $n$  值固定时, 随着  $\rho$  从 0 增加到 0.8, 箱子越来越窄。

## 5 结 论

针对普通成分数据线性回归模型要求样本间相互独立的局限性, 在空间自回归模型的基础上, 提出了混合成分数据与普通数据的空间自回归模型, 所提出的模型及估计方法具有如下优点:

1) 新提出的模型不仅能够同时处理成分数据和普通数据, 还能表达数据中因变量之间相互依赖的问题。特别地, 新模型可以处理地理空间中的依赖性。

2) 新模型所提出的估计量具有相合性。随着样本量的增大, 可以发现估计值的标准差在逐渐减小。除此之外, 新提出的估计方法操作简单, 可以在 R 软件上直接实现。

在实际应用中, 新模型可处理社交网络、地理空间等含有网络结构的依赖问题。而针对其他情况造成成分数据线性模型样本之间不相互独立的问题, 则需要分情况进行深入分析。

## 参考文献 (References)

[ 1 ] RAMSAY J O, SILVERMAN B W. Functional data analysis [ M ]. Berlin: Springer, 1997.

[ 2 ] RAMSAY J O, SILVERMAN B W. Applied functional data analysis: Methods and case studies [ M ]. Berlin: Springer, 2002.

[ 3 ] VIEU P, FERRATY F. Nonparametric functional data analysis [ M ]. Berlin: Springer, 2006.

[ 4 ] PAWLOWSKY-GLAHN V, BUCCIANTI A. Compositional data analysis: Theory and applications [ M ]. Chichester: Wiley-Blackwell, 2011.

[ 5 ] BILLARD L, DIDAY E. Symbolic regression analysis [ M ] // JAJUGA K, SOKOLOWSKI A, BOCK H. Classification, clustering, and data analysis. Berlin: Springer, 2002: 281-288.

[ 6 ] BILLARD L, DIDAY E. Regression analysis for interval-valued data [ M ]. Berlin: Springer, 2000: 369-374.

[ 7 ] FRY J M, FRY T R L, MCLAREN K R. Compositional data analysis and zeros in micro data [ J ]. Applied Economics, 2000, 32(8): 953-959.

[ 8 ] PAWLOWSKY-GLAHN V, EGOZCUE J J. Exploring compositional data with the CoDa-dendrogram [ J ]. Austrian Journal of Statistics, 2011, 40(1&2): 103-113.

[ 9 ] PAWLOWSKY-GLAHN V, EGOZCUE J J, TOLOSANA-DELGADO R. Modelling and analysis of compositional data [ J ]. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd., 2015: 152-154.

[ 10 ] AITCHISON J. The statistical analysis of compositional data

- [M]. Berlin: Springer, 1986.
- [11] AITCHISON J. The statistical analysis of compositional data [J]. *Journal of the Royal Statistical Society Series B*, 1982, 44 (2): 139-177.
- [12] HRON K, FILZMOSER P, THOMPSON K. Linear regression with compositional explanatory variables [J]. *Journal of Applied Statistics*, 2012, 39 (5): 1115-1128.
- [13] AITCHISON J, SHEN S M. Logistic-normal distributions: Some properties and uses [J]. *Biometrika*, 1980, 67 (2): 261-272.
- [14] WANG H, SHANGGUAN L, WU J, et al. Multiple linear regression modeling for compositional data [J]. *Neurocomputing*, 2013, 122: 490-500.
- [15] TOLOSANA-DELGADO R, EYNATTEN H V. Simplifying compositional multiple regression: Application to grain size controls on sediment geochemistry [J]. *Computers & Geosciences*, 2010, 36 (5): 577-589.
- [16] ANSELIN L. *Spatial econometrics: Methods and models* [M]. Berlin: Springer, 1988.
- [17] 林光平, 龙志和, 吴梅. 中国地区经济  $\sigma$ -收敛的空间计量实证分析 [J]. *数量经济技术经济研究*, 2006, 23 (4): 14-21.  
LIN G P, LONG Z H, WU M. A spatial investigation of  $\sigma$ -convergence in China [J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2006, 23 (4): 14-21 (in Chinese).
- [18] 郭金龙, 王宏伟. 中国区域间资本流动与区域经济差距研究 [J]. *管理世界*, 2003 (7): 45-58.  
GUO J L, WANG H W. Study on the regional capital flows and regional economic differences in China [J]. *Management World*, 2003 (7): 45-58 (in Chinese).
- [19] TOPA G. Social interactions, local spillovers and unemployment [J]. *Review of Economic Studies*, 2010, 68 (2): 261-295.
- [20] BAICKER K. The spillover effects of state spending [J]. *Journal of Public Economics*, 2005, 89 (2-3): 529-544.
- [21] ORD H. Estimation methods for models of spatial interaction [J]. *Publications of the American Statistical Association*, 1975, 70 (349): 120-126.
- [22] LEE L F. Asymptotic distributions of quasi-maximum likelihood estimators for spatial autoregressive models [J]. *Econometrica*, 2004, 72 (6): 1899-1925.
- [23] KELEJIAN H, PRUCHA I R. A generalized moments estimator for the autoregressive parameter in a spatial model [J]. *International Economic Review*, 1999, 40 (2): 509-533.
- [24] LEE L F. GMM and 2SLS estimation of mixed regressions, spatial autoregressive models [J]. *Journal of Econometrics*, 2007, 137 (2): 489-514.
- [25] LESAGE J P, PACE R K. *Introduction to spatial econometrics* [M]. New York: CRC Press, 2009: 513-514.
- [26] EGOZCUE J J, PAWLOWSKYGLAHN V, MATEUFIGUERAS G, et al. Isometric logratio transformations for compositional data analysis [J]. *Mathematical Geology*, 2003, 35 (3): 279-300.
- [27] QU X, LEE L F. Estimating a spatial autoregressive model with an endogenous spatial weight matrix [J]. *Journal of Econometrics*, 2015, 184 (2): 209-232.

#### 作者简介:

黄婷婷 女, 博士研究生。主要研究方向: 复杂数据的回归模型建模方法。

王惠文 女, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 经济管理中复杂数据统计分析的理论、方法与应用。

## Spatial autoregressive model for compositional data

HUANG Tingting<sup>1,2</sup>, WANG Huiwen<sup>1,3,\*</sup>, SAPORTA Gilbert<sup>4</sup>

(1. School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100083, China;

2. Beijing Key Laboratory of Emergency Support Simulation Technologies for City Operations, Beijing 100083, China; 3. Beijing Advanced Innovation Center for Big Data and Brain Computing, Beihang University, Beijing 100083, China; 4. Centre d'études et de Recherche en Informatique et Communications, Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris 75003, France)

**Abstract:** The existing compositional linear models assume that samples are independent, which is often violated in practice. To solve this problem, we put forward a spatial autoregressive model for compositional data, which contains both compositional covariates and scalar predictors. Furthermore, a new estimation method is proposed. The new model has advantages of coping with mixed compositional and numerical data and expressing dependence between the responses. And the parameter estimators are obtained through isometric logratio (ilr) transformation, which transforms dependent compositional data into independent real vector. A Monte-Carlo simulation experiment verifies the effectiveness of the proposed estimation method.

**Keywords:** compositional data; isometric logratio (ilr) transformation; maximum likelihood estimation; spatial dependence; spatial autoregressive model

**Received:** 2018-05-03; **Accepted:** 2018-07-28; **Published online:** 2018-08-23 10:38

**URL:** [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180821.1326.003.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180821.1326.003.html)

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (71420107025)

\* **Corresponding author.** E-mail: wanghw@vip.sina.com

http://bhxb.buaa.edu.cn      jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0255



# 水平井多裂纹同步扩展的偏折分析

陈旻炜<sup>1</sup>, 李敏<sup>1</sup>, 陈伟民<sup>2,\*</sup>

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083;

2. 中国科学院力学研究所 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190)

**摘 要:** 水平井压裂技术是近几年油气工业发展起来的新技术,用于提高油气井的产量。然而在裂纹扩展的过程中,裂尖决定了裂纹的起裂与扩展方向,这会直接影响储层的压裂效果,所以人们对于这项技术还需要更进一步的认知。根据裂尖的应力场特性建立了裂尖权函数,能较准确地描述裂尖的应力状态,判断裂纹的扩展方向。在利用网格重剖分方法并结合最大主应力准则对水平井多裂纹扩展进行分析的基础上,通过裂尖权函数方法分析了水压裂纹在应力差、裂纹数目和裂纹间距等条件下产生偏折的原因。最终结果表明,裂纹在开裂时裂尖处  $x$  与  $y$  方向的等效应力变化不明显,裂纹的偏折主要与裂尖  $xy$  方向的等效应力有关。

**关键词:** 水平井压裂; 权函数; 有限元方法; 裂纹扩展; 裂纹偏转

**中图分类号:** O346.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5965(2019)01-0099-10

裂纹是存在于物体中的一对自由面,它对结构或者材料都有相当大的破坏作用。特别是裂纹的裂尖位置,这里的应力值比其他地方的高出好几个数量级。因此,当今对于裂纹的主流研究是考虑如何防止材料及构配件产生裂缝,或者对开裂的构件采取止裂措施以保证结构的安全性。然而最近几年随着越来越多的页岩气、页岩油和地热能等地下资源获得了广泛的关注<sup>[1]</sup>,人们开始寻求一种合适可控的方法能在地下岩层中制造出更多的裂缝来提取资源。在油气工程中,为了提高非常规油气井的产能所经常使用的技术是水力压裂技术。它通过在预先布置好的井管内注入压裂液,使压裂液进一步压裂周围岩层形成裂纹网络从而提升低渗基体的渗透性达到增产的目的。学者经过多年的研究发现水平井钻孔结合水力压裂技术能有效地在页岩油气层中形成致密的裂纹网络,改善页岩地层的低渗透特性,为油气的提取

提供更多的“通道”。但是在形成裂纹网的过程中,裂纹之间的相互影响会干扰裂纹网的构成<sup>[2]</sup>,这也会影响到最后油气资源的开采效率。裂纹的相互作用会受到裂纹偏折、交汇、岩层分散性、裂纹之间的摩擦力、水平井的钻孔间距以及原始地层应力等因素的影响<sup>[3]</sup>。

许多学者针对水平井裂纹之间的相互作用也展开了诸多研究。Gale等<sup>[4-5]</sup>在页岩地层中加入了大量的材料间断元素,例如岩层的交界面以及闭合的天然裂纹等,探讨了这些间断对水压裂纹扩展的影响。Lee等<sup>[6]</sup>通过研究水压裂纹在预制弱间断层的偏折现象,认为间断层会对地层中裂纹网的形成产生重要的作用。曾青冬和姚军<sup>[7]</sup>建立了多裂纹同步扩展的数学模型,利用扩展有限元方法研究了应力阴影对裂纹扩展形态的影响。郭印同<sup>[8]</sup>和衡帅<sup>[9]</sup>等利用自建的一套页岩水力压裂物理模拟与压裂缝表征方法分析了水压

收稿日期: 2018-05-04; 录用日期: 2018-07-27; 网络出版时间: 2018-08-22 08:57

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180820.1137.007.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180820.1137.007.html)

基金项目: 国家自然科学基金(11232012,11372320)

\* 通信作者: E-mail: wmchen@imech.ac.cn

**引用格式:** 陈旻炜, 李敏, 陈伟民. 水平井多裂纹同步扩展的偏折分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 99-108.

CHEN M W, LI M, CHEN W M. Deflection of multi-crack synchronous propagation in horizontal well[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 99-108 (in Chinese).

裂纹在含天然层理面的页岩中的开裂状况,揭示了层理在页岩网状压裂缝形成过程中的重要作用。陈勉<sup>[10]</sup>从断裂力学角度出发,通过三维空间中水力裂缝激活和转向控制方程,分析了控制裂缝转向扩展形态的关键因素和力学特征并进行实例计算。Chuprakov 和 Zhubayev<sup>[11]</sup>采用变分原理的方法,通过解析模型得到闭合裂纹的张开滑移区域的大小对水压裂纹在交汇及穿透期间重新起裂的影响。

上述研究都是针对于裂纹之间或者裂纹与间断面之间相互作用而展开的,即探究应力对裂纹扩展的影响。然而,多数学者的着重点都在试图建立一个与实际情况很接近的分析模型,然后通过最终的计算结果来描述各种因素对裂纹萌生情况的影响。他们很少提及裂纹在扩展过程中裂纹受应力影响所发生偏折的具体原因。经研究表明<sup>[12]</sup>,在薄层和低渗地层中,纵向开裂水平井比竖直井的产量要高,因此本文只针对水平井钻孔技术部分进行分析,先根据裂尖附近应力场特征建立一个全新的裂尖权函数,在验证完裂尖权函数的正确性后,试图结合网格重划分方法与最大主应力方法分析影响水平井多裂纹扩展路径的多种因素,例如,应力差、裂纹数目和裂纹间距等,再探讨多裂纹在相互干扰情况下发生转向的原因。

## 1 裂尖权函数

### 1.1 权函数的建立

由于裂尖位置是一个奇异点,在有限元分析中,裂尖位置处的应力应变值是无法直接得到的,它需要通过裂尖邻近单元的高斯点插值得到。因此直接对这个点进行应力状态分析的误差是很大的。为了在有限元分析中能更加准确地捕捉裂尖处的应力状态,需要在裂尖附近的单元中收集更多的信息。因此,本文想通过建立一个权函数来连接裂尖与其附近单元高斯点处的信息,间接获得裂尖处的受力情况。

裂尖附近的单元以及高斯点的分布如图1所示,高斯点距离裂尖的长度为 $D$ ,高斯点和裂尖连线与 $x'$ 轴所夹角为 $\theta$ 。裂尖处以 $r$ 为半径所绘制的区域圆是收集附近单元信息的范围, $r$ 的取值可以参考扩展有限元对裂尖的处理<sup>[13]</sup>。这里的 $r$ 取为3倍的裂尖附近单元平均边长。在裂尖处建立一个 $x'O'y'$ 的局部坐标系,它是权函数建立的基础,沿着裂纹面的方向为 $x'$ 方向,垂直于裂纹面的方向为 $y'$ 方向。只要能找到一个充分描述裂尖附近应力特征的权函数 $w$ ,则裂尖处的应力就可

以等效为

$$\sigma = \frac{\sum_i w_i \sigma_i}{\sum_i w_i} \quad (1)$$

式中: $\sigma$ 为裂尖处的等效应力; $w_i$ 与 $\sigma_i$ 分别为第 $i$ 个高斯点处的权函数值与应力值。

裂尖开裂的方向角 $\theta$ 为

$$\theta = \begin{cases} \varphi - \frac{\pi}{2} & \left| \varphi - \frac{\pi}{2} \right| \leq \frac{\pi}{2} \\ \varphi + \frac{\pi}{2} & \left| \varphi - \frac{\pi}{2} \right| > \frac{\pi}{2} \end{cases}$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_{\text{Pris}} - \sigma_y}\right) \quad (2)$$

式中: $\sigma_{\text{Pris}}$ 、 $\sigma_y$ 和 $\tau_{xy}$ 分别为裂尖处的等效主应力、等效 $y$ 方向应力和等效 $xy$ 方向应力。而裂尖的开裂条件可由最大主应力准则来确定,即 $\sigma > \sigma_1$ 时,裂纹起裂。其中 $\sigma_1$ 为等效主应力。

从图1可知,构造得到的权函数 $w$ 不仅与高斯点到裂尖的距离 $D$ 有关,还与角度 $\theta$ 有关。为了保证周围高斯点处应力值提取的正确性,需要首先用有限元高斯点处应力值与该点处的解析解<sup>[14]</sup>进行对比,舍弃两者之间差异比较大的部分。由于本文研究的是平面问题,因此只需要考虑I型与II型的应力状态即可。高斯点应力值与解析解的对比结果如图2和图3所示。

为了便于分析,图3中误差大于100%的部分均被删除。从图中可以发现,在裂尖大约 $\pm 60^\circ$ 、 $\pm 120^\circ$ 和 $180^\circ$ 方向上的应力误差偏大,而其他方向上的误差均不超过5%。因此应该将这些应力误差偏大方向上的权函数值设置为零,以保证最终计算结果的精度。至于与距离有关的项,由于裂尖的影响,离裂尖越近的应力值越大,并且由裂

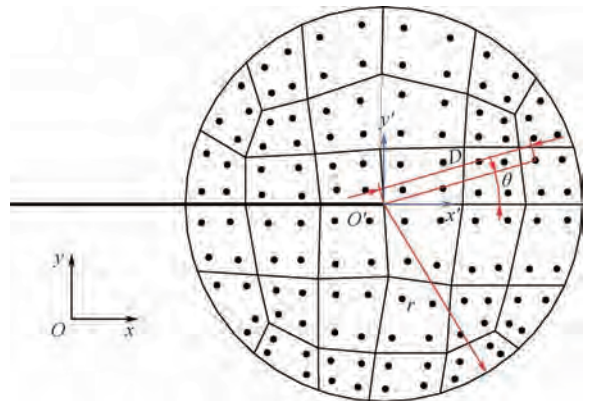


图1 裂尖附近单元及高斯点分布图

Fig. 1 Distribution diagram of element and Gauss point near crack tip

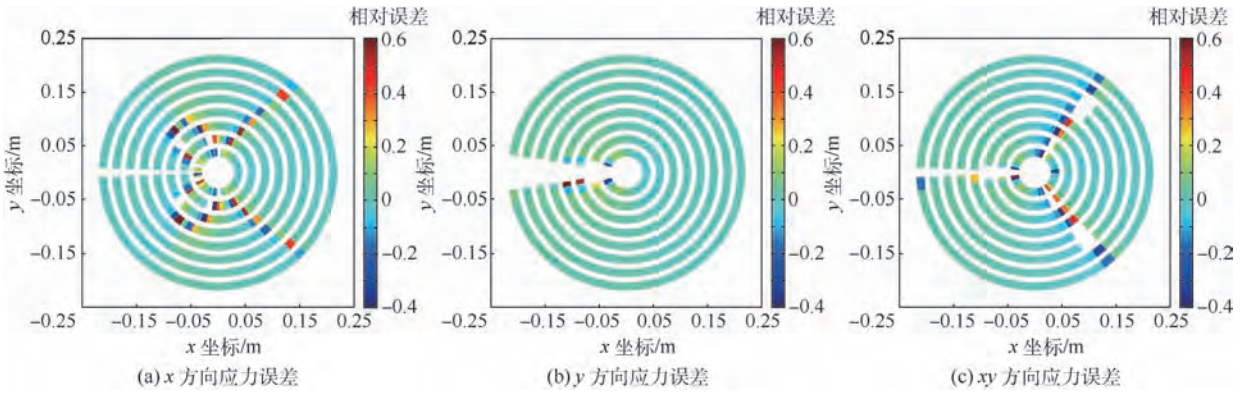


图 2 I 型裂尖附近的应力误差云图

Fig. 2 Error contour of stresses near model-I crack tip

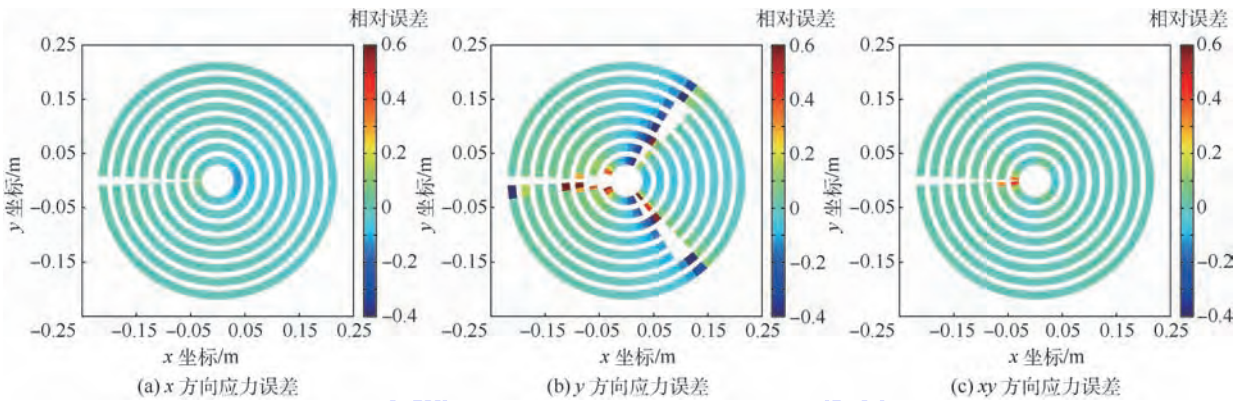


图 3 II 型裂尖附近的应力误差云图

Fig. 3 Error contour of stresses near model-II crack tip

尖近场解析解可知,裂尖近场应力随着距离的增加而呈现  $1/\sqrt{r}$  的趋势<sup>[14]</sup>。这说明距离裂尖远场处的应力对裂尖处应力的影响小。根据权函数的上述特征并参考 Ventura 等<sup>[15]</sup>对于扩展有限元裂尖的处理,角度与距离的函数构造如式(3)所示,相应的曲线图如图 4 所示。最终通过距离  $D$  的函数与角度  $\theta$  的函数的乘积来构造权函数  $w$ ,以考虑距离与角度的共同影响。

$$\begin{cases} w = f(D)f(\theta) \\ f(D) = \left(1 - \frac{d}{r}\right)^n \\ f(\theta) = 0.5 \cos\left(6\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right)\right) + 0.5 \end{cases} \quad (3)$$

经验算后,本文中的  $n$  取值为 3,具体的确定过程可见附录 A。

### 1.2 权函数的验证

权函数建立之后,需要对其的正确性进行验证。本文选取了 2 个裂纹扩展的算例,通过裂纹扩展路径的偏差大小来验证该方法。参考路径采用最大周向拉应力方法(MCS)<sup>[16]</sup>和另一种权函

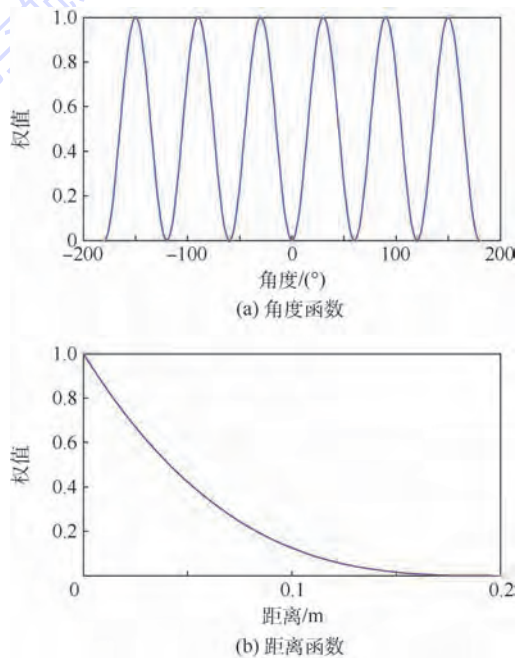


图 4 角度与距离函数曲线

Fig. 4 Curves of angle and distance function

数方法(文献[17]方法)的计算结果。为了量化偏差值,需要引入一个计算公式:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n s_i / a_{\text{init}} \quad (4)$$

式中:  $a_{\text{init}}$  为裂纹的初始长度;  $s_i$  为从曲线  $l_2$  上第  $i$  个点到曲线  $l_1$  的距离, 如图 5 所示。

式(4)表示的是拟合曲线与目标曲线之间参考点的距离之和。这里需要注意的是在同一组曲线比较中, 所选取的点数必须是一样的。最理想的拟合结果是计算公式的结果为 0。

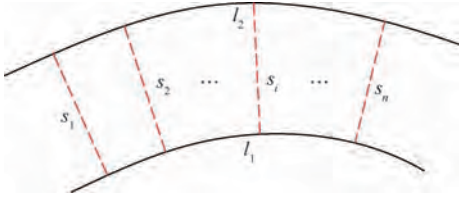


图 5 裂纹路径误差示意图

Fig. 5 Schematic of crack path error

### 1.2.1 算例 1

含有 2 个中心对称圆孔的矩形平板, 底部固定, 顶端承受拉伸位移, 使平板只能在竖直方向上移动。2 条长度均为 1 mm 的预制裂纹在孔洞离边界的较远一侧, 并且呈中心对称分布, 模型示意图如图 6 所示。模型的材料参数如下: 弹性模量  $E = 200 \text{ GPa}$ , 泊松比  $\nu = 0.3$ , 材料的临界应力强度因子  $K_c = 1500 \text{ N/mm}^{3/2}$ 。

最终的对比结果如图 7 所示, 3 条开裂路径都非常接近, 利用本文权函数计算得到的开裂路径介于 MCS 方法与文献[17]方法的中间, 且几乎与 MCS 方法的结果重合。路径之间的偏差通过式(4)可以得到, 本文方法与 MCS 方法的偏差在 1.75, 而文献[17]方法与 MCS 方法的偏差达到了 3.64。

试件的长度和高度。简支梁在靠近左支座处有一条初始裂纹, 梁顶端的三分点处均承受了集中力  $F$  的作用。

计算结果如图 9 所示, 图中箭头所指的是局部放大图。3 条裂纹扩展路径很接近, 其中下半部分的偏差略大于上半部分的偏差。本文方法和文献[17]方法与 MCS 的偏差分别为 1.41 和 1.59。

综上所述, 通过 2 个算例的结果可以看出, 本文所采用的权函数方法具有分析裂尖应力场的能力, 是一种可靠的方法, 能较准确地描述裂尖的应力状态。由于该方法是基于开口型裂纹开发的, 因此对于闭口型裂纹或者压缩接触裂纹需要另外考虑。然而, 在水力压裂分析中, 主裂纹的开裂方式主要是张拉破裂, 并且对于地应力差异较小的情况下, 地层沿天然裂缝发生剪切的破裂的可能性也较小<sup>[9]</sup>。所以在随后的水平井钻井技术分析中, 不考虑天然裂缝的起裂与大应力差情况时, 可采用同样权函数来分析裂纹发生偏折的原因。

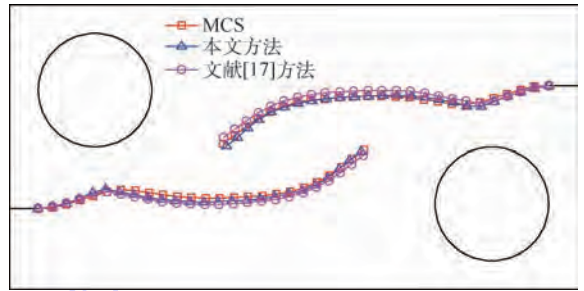


图 7 不同方法的开裂路径对比(算例 1)

Fig. 7 Comparison of crack path among different methods (Example 1)

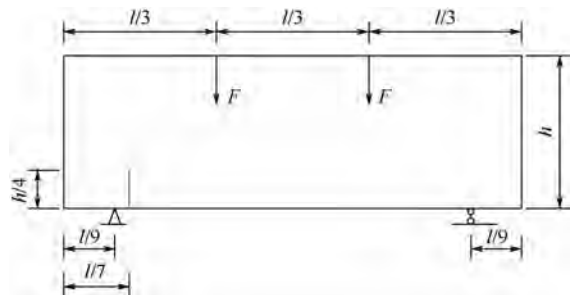


图 8 四点弯曲梁试件模型

Fig. 8 Model of 4-point bending beam specimen

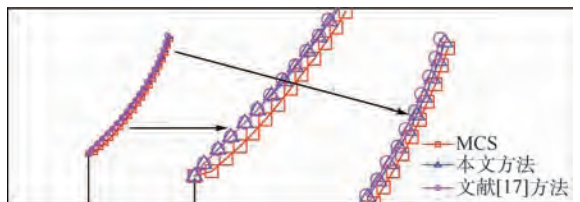


图 9 不同方法的开裂路径对比(算例 2)

Fig. 9 Comparison of crack path among different methods (Example 2)

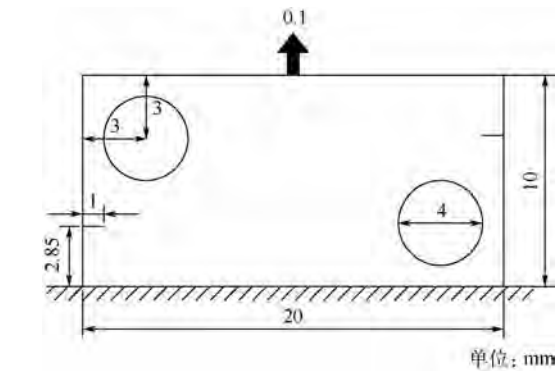


图 6 带孔板边缘多裂纹扩展的模型示意图

Fig. 6 Schematic of model of multiple edge cracks propagation of hole plate

### 1.2.2 算例 2

该算例采用的是四点弯曲梁试件开裂模型, 具体参数如图 8 所示,  $L$  和  $h$  分别为四点弯曲梁

## 2 水平井多裂纹有限元模型的建立

### 2.1 模型描述

水平井多裂纹扩展的有限元模型如图 10 所示,模型水平长度为 100 m, 竖直高度为 50 m, 最大水平主应力为  $\sigma_v$ , 最小水平主应力为  $\sigma_h$ , 射孔的长度为  $l$ , 射孔间距为  $d$ , 射孔内的水压为  $p$ , 正三角形  $\triangle$  表示只约束竖直方向位移, 水平三角形  $\triangleright$  表示只约束水平方向位移, 模型中  $(m)$  为射孔的编号, 编号顺序从右向左逐渐增大。考虑到边界效应, 取模型尺寸为射孔最大深度的 20 倍<sup>[18]</sup>, 另外因为模型具有对称性, 所以分析时可以考虑只取一半。由于模拟裂纹扩展形态的方法为网格重剖分方法, 为了增加模型的计算效率, 只需要将射孔附近的网格细化即可, 具体网格划分见图 11。

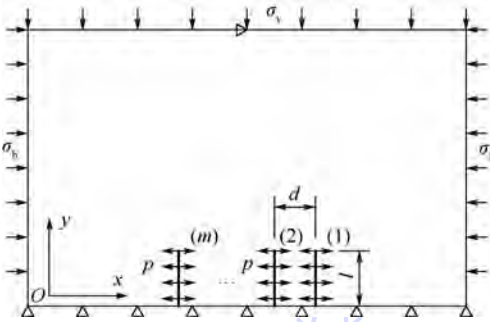


图 10 有限元模型示意图

Fig. 10 Schematic of finite element model

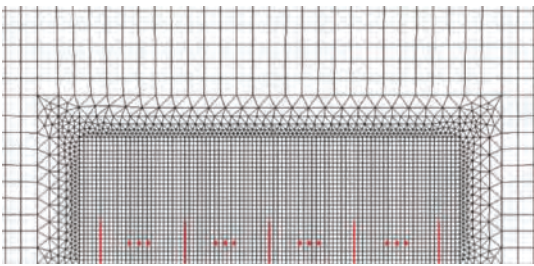


图 11 有限元网格模型

Fig. 11 Mesh of finite element model

### 2.2 模型假设

为了问题研究的方便, 本文忽略套管和水泥环的影响; 视地层为线弹性均质各向同性、无限大平面; 裂纹开裂是一个准静态的过程; 重力作用在较短的计算段内产生的压力比起裂时的井筒压力小得多, 可以忽略不计<sup>[19]</sup>; 不考虑流体渗入地层中所引起的附加应力, 压裂液均匀分布在裂纹中; 一般情况下, 射孔都会被模拟成圆柱状, 但是在实际中, 射孔的形状与标准的圆柱是有差异的<sup>[20]</sup>。因此本文在计算时, 忽略了射孔的形状。

裂纹内的液体压力被看作是常压力, 但研究

表明井口处的压力在裂纹开裂后会出现小幅度的下降<sup>[21]</sup>。这说明裂纹内的液体压力并不是恒定不变的。为了让模拟过程接近工程实际, 本文在处理液体压力时, 采用如下方法: 在开裂前, 裂纹内的液体压力是随着时间逐渐增加的; 当液体压力提升到裂纹开裂后, 液体的压力值会突然减小, 再在随后的加压过程中逐步增大。每一条裂纹之间的液体压力是独立变化的, 它们之间的压力加载不会相互影响。

## 3 水平井多裂纹扩展结果

水平井多裂纹扩展模型的具体计算参数为: 最小水平主应力  $\sigma_h = 15$  MPa, 最大水平主应力  $\sigma_v = 15 \sim 25$  MPa, 岩层的弹性模量  $E = 14$  GPa, 泊松比  $\nu = 0.37$ , 裂纹内水压  $p$  的最大值为 25 MPa, 岩层的等效断裂韧度  $K_{IC} = 3$  N/mm<sup>3/2</sup>。为了便于问题的分析, 本文把水压裂纹的间距  $d$  与初始长度  $l$  的比值  $d/l$  作为一个变量来讨论, 称之为间长比 (RSL)。接下来通过网格重剖分与权函数方法计算多裂纹扩展, 研究裂纹数目、RSL 以及应力差等参数对裂纹扩展过程中路径的影响, 然后再由权函数方法分析扩展路径发生变化的原因。

### 3.1 间长比的变化

此节考虑在同样的裂纹射孔条件下, 裂纹扩展过程中裂纹间长比对裂纹开裂的影响。这里将先从两条裂纹开始分析, 只考虑  $\sigma_h = \sigma_v$  的情况, 通过增加裂纹数目来分析多条裂纹扩展时的开裂规律。

设定裂纹间长比的变化范围为 1.0 ~ 3.0, 通过权函数方法计算得到的扩展路径如图 12 所示。从图 12 中可以看出, 当裂纹的间长比变大时, 裂纹开裂的偏转角反而越小, 并且裂纹的扩展长度随着 RSL 的增加而逐渐增长。这是因为当裂纹之间的间距增大时, 裂纹之间的相互作用会越来越小, 从而减弱了裂纹的偏折角度和阻碍裂纹扩展的作用力。

从裂纹扩展路径图中可以看出, 由于裂纹起裂后的方向大致确定了裂纹后续的扩展方向, 因此在分析裂纹偏折原因时可以结合裂尖权函数, 把整个过程简化成只研究裂纹起裂那一刻的偏折原因。

裂纹发生偏折的具体原因通过图 13 曲线给出。图中的横坐标代表的是裂纹数目, 纵坐标则代表无因次化应力的大小, 它等于裂纹开裂时裂尖的等效应力值与单条裂纹开裂时裂尖等效应力的比值。这里只分析最外侧的 1 号裂纹, 其他裂

纹的分析类似。应力方向是基于裂尖局部坐标确定的,从图 13 中可知,多条裂纹在开裂时,裂尖的  $xy$  方向等效应力是单裂纹情况下的十倍至几十倍,而其他方向的应力与单裂纹情况相比基本没发生变化,通过方向角公式(2)可以分析出裂纹是向右侧偏折的。裂纹间长比越小,裂纹的偏折就越明显,这个原因可以由图 14 中曲线进行解释。其中间长比为 0 的点表示是只有一条裂纹的情形。随着间长比变大, $xy$  方向的应力会明显减小,只有原来的一半。但是主应力与  $y$  方向应力的差异并不明显,裂纹起裂偏折的角度也就越趋

近于单裂纹的开裂状态,所以裂纹偏折角度是变小的。之所以 1 号裂纹裂尖处的  $xy$  方向等效应力会发生改变,是因为 1 号裂纹的左侧增加裂纹之后,水压力与最小水平主应力的大小不一样而造成裂尖位置受力会发生突变。由于增加裂纹数目对裂纹偏折角度的影响不如改变间长比的大,因此将不同间长比条件下角度和水压的变化情况如图 15 所示。从图 15 中可以很清楚地发现,裂纹间长比对偏折角度和水压有较大的影响,这是因为增加间长比会减弱裂纹之间的相互作用。

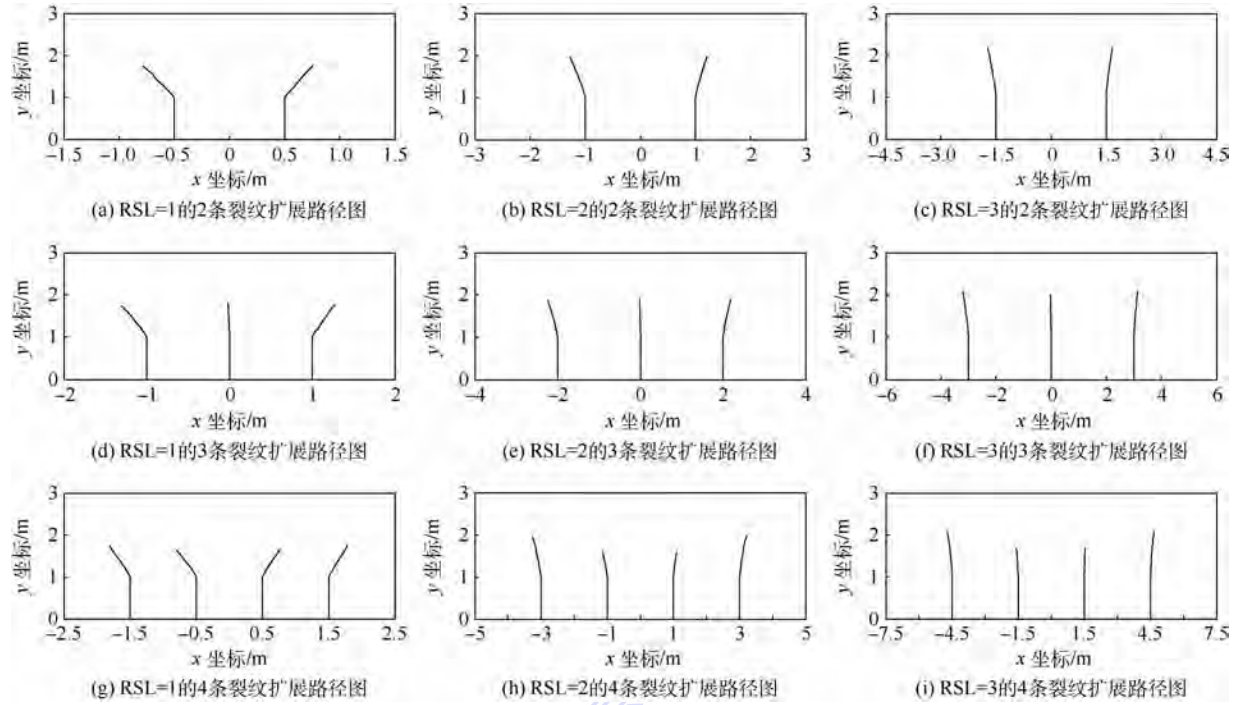


图 12 不同间长比条件下裂纹扩展路径

Fig. 12 Crack propagation path under different RSL

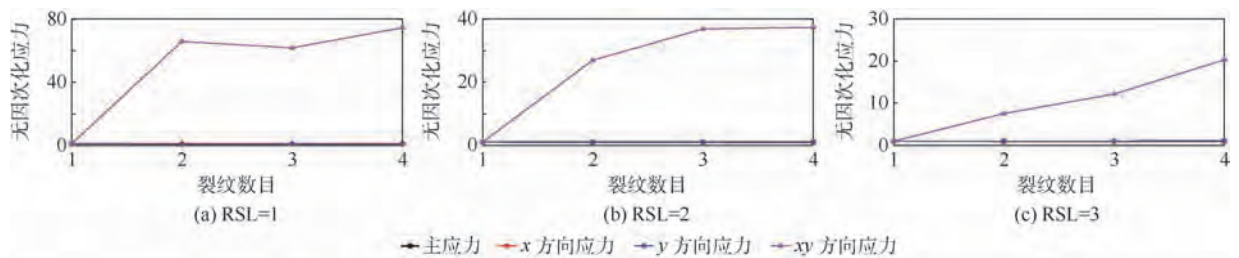


图 13 不同间长比条件下裂尖等效应力随裂纹数目的变化情况

Fig. 13 Variation of equivalent stress at crack tip with crack number under different RSL

### 3.2 应力差的变化

本节固定  $RSL = 1$ , 改变应力差  $\sigma_v - \sigma_h$  的值, 研究不同应力差条件下裂纹的开裂状态。由加权等效应力方法所计算出来的裂纹扩展路径如图 16 所示, 当应力差由 0 变化到 20 MPa 的过程中, 裂纹扩展的扩展角度有明显减小, 但是应力差

的变化对裂纹扩展的长度影响并不大, 而且相同应力差条件下, 增加裂纹数目对裂纹扩展偏折角度的影响也不大。因此应力差值增加会减小裂纹开裂时的扩展角度。角度变小原因可以通过图 17 中进行分析, 图中没有考虑  $x$  方向的应力是因为  $x$  方向应力与式(2)并不直接相关。

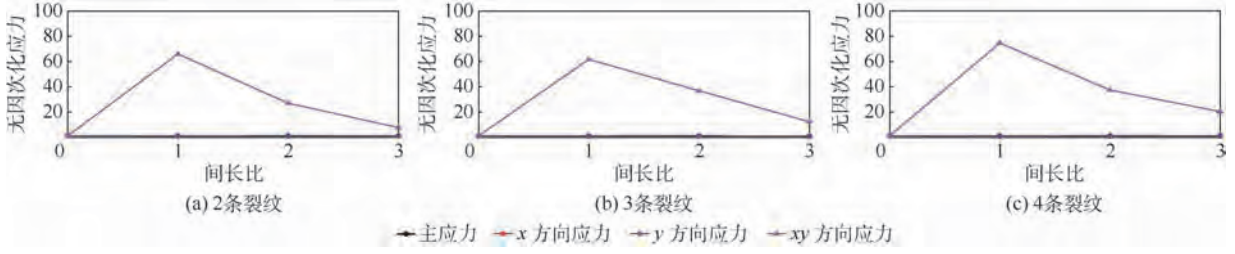


图 14 不同裂纹数目条件下裂尖等效应力随间长比的变化情况

Fig. 14 Variation of equivalent stress at crack tip with RSL under different crack numbers

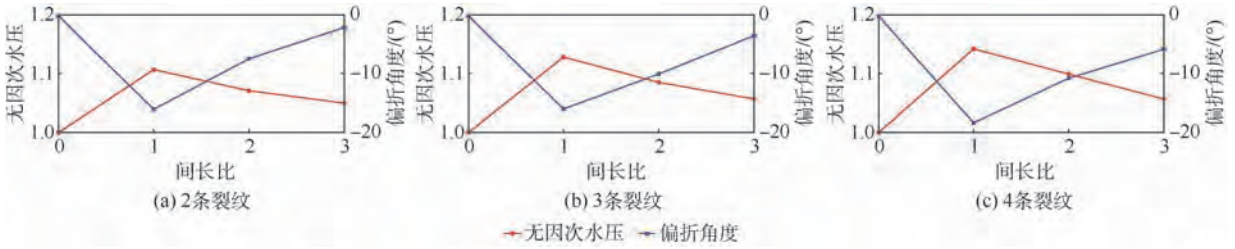


图 15 不同裂纹数目条件下裂纹偏折角度与水压随间长比的变化情况

Fig. 15 Variation of deflection angle and hydraulic pressure with RSL under different crack numbers

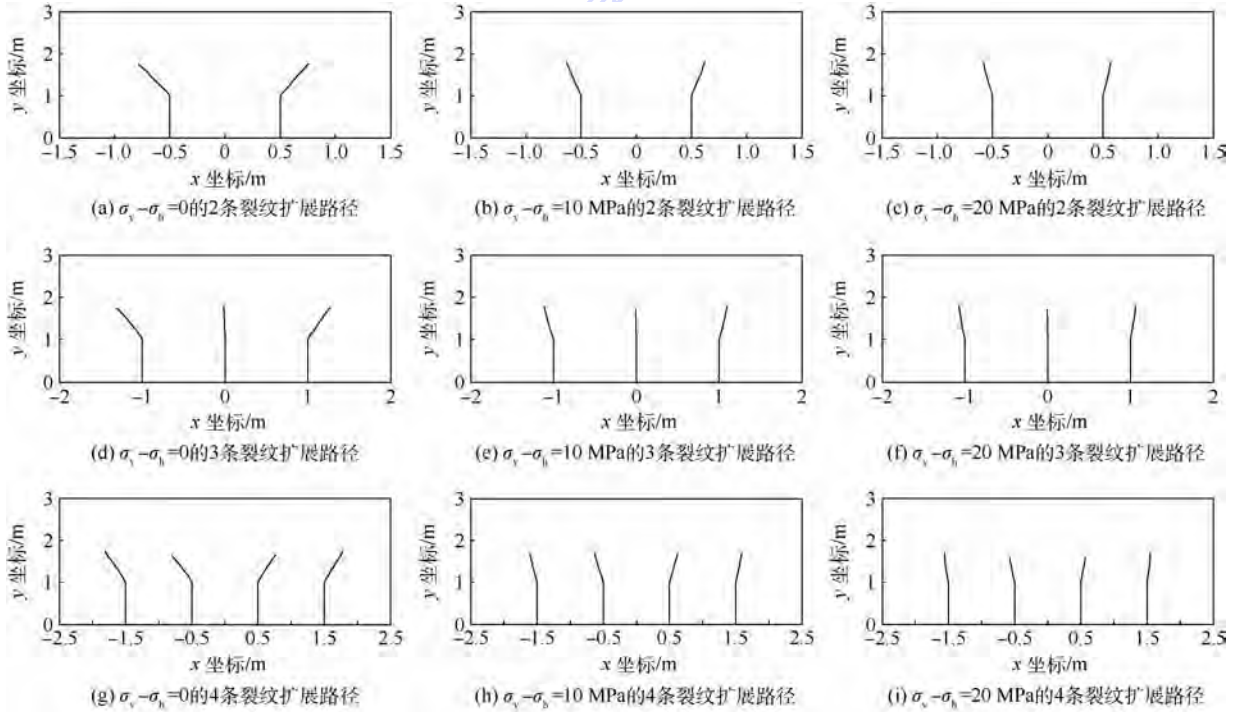


图 16 不同应力差条件下的裂纹扩展路径

Fig. 16 Crack propagation path under different stress contrast

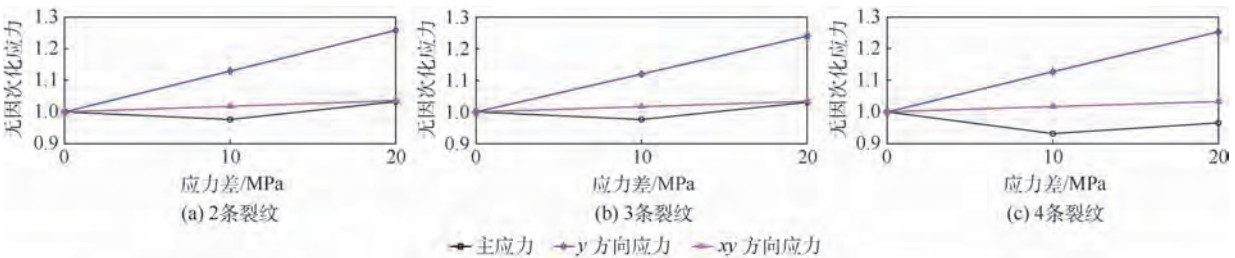


图 17 不同裂纹数目条件下裂尖等效应力随应力差的变化情况

Fig. 17 Variation of equivalent stress at crack tip with stress contrast under different crack numbers

当应力差变大时,变化最明显的是 $y$ 方向应力,而其他方向应力变化很小,因此根据角度公式可知方向角也是相应变小的。对应角度变化曲线如图18

所示,角度随着应力差增加而减小,水压略有增加但是幅度并不明显,其中角度数据是以应力差为0 MPa时2条裂纹的开裂数据为基准进行无因次化的。

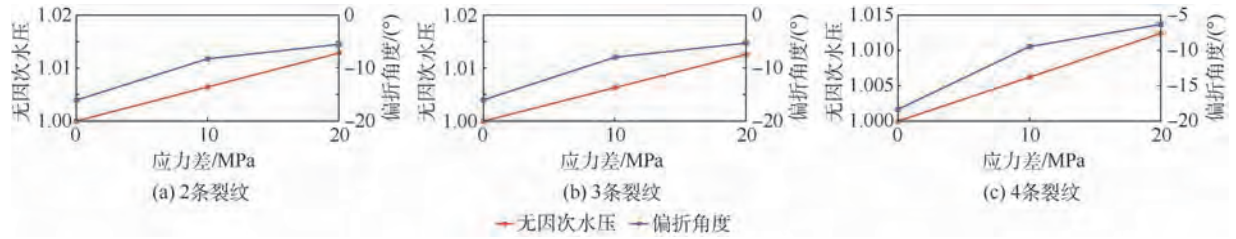


图18 不同裂纹数目条件下裂尖偏折角度与水压随应力差的变化情况

Fig. 18 Variation of deflection angle and hydraulic pressure at crack tip with stress contrast under different crack numbers

## 4 结论

本文根据裂尖应力场的特征建立了裂尖权函数,其可以准确地描述裂尖受力状态,并有效地对裂纹开裂原因进行分析。在以水平井压裂技术为背景的前提下,利用裂尖权函数分析了多裂纹同步扩展过程中裂纹发生偏折的原因,得到:

1) 相比一条裂纹而言,裂纹数目增加后,裂纹的开裂方向会向外产生偏折,这是因为裂纹尖端的 $xy$ 方向的等效应力突然增大,而其他方向的等效应力基本不发生变化而导致的。

2) 当裂纹的间长比逐渐增加时,裂尖的 $xy$ 方向等效应力会明显减小,而主应力与 $y$ 方向的等效应力差值并没变化,因此裂纹的偏折角度会相应地变小。

3) 在应力差变大的过程中,相比同裂纹数目应力差为0的条件下, $xy$ 方向的等效应力与主应力并没有什么太大变化,但是 $y$ 方向的等效应力明显地增加,因此偏折角度逐渐减小。

### 参考文献 (References)

[1] BAŽANT Z P, SALVIATO M, CHAU V T, et al. Why fracking works[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2014, 81(10): 101010.

[2] WANG X L, LIU C, WANG H, et al. Comparison of consecutive and alternate hydraulic fracturing in horizontal wells using XFEM-based cohesive zone method[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2016, 143: 14-25.

[3] ZENG X, WEI Y. Crack deflection in brittle media with heterogeneous interfaces and its application in shale fracking[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2017, 101: 235-249.

[4] GALE J F W, LAUBACH S E, OLSON J E, et al. Natural fractures in shale: A review and new observations[J]. *AAPG Bulletin*, 2014, 98(11): 2165-2216.

[5] GALE J F W, REED R M, HOLDER J. Natural fractures in the

Barnett shale and their importance for hydraulic fracture treatments[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 603-622.

[6] LEE H P, OLSON J E, HOLDER J, et al. The interaction of propagating opening mode fractures with preexisting discontinuities in shale[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2015, 120(1): 169-181.

[7] 曾青冬, 姚军. 水平井多裂缝同步扩展数值模拟[J]. *石油学报*, 2015, 36(12): 1571-1579.

ZENG Q D, YAO J. Numerical simulation of multiple fractures simultaneous propagation in horizontal well[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(12): 1571-1579 (in Chinese).

[8] 郭印同, 杨春和, 贾长贵, 等. 页岩水力压裂物理模拟与裂缝表征方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(1): 52-59.

GUO Y T, YANG C H, JIA C G, et al. Research on hydraulic fracturing physical simulation of shale and fracture characterization methods[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(1): 52-59 (in Chinese).

[9] 衡帅, 杨春和, 郭印同, 等. 层理对页岩水力裂缝扩展的影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(2): 228-237.

HENG S, YANG C H, GUO Y T, et al. Influence of bedding planes on hydraulic fracture propagation in shale formations[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(2): 228-237 (in Chinese).

[10] 陈勉. 页岩气储层水力裂缝转向扩展机制[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(5): 88-94.

CHEN M. Re-orientation and propagation of hydraulic fractures in shale gas reservoir[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences)*, 2013, 37(5): 88-94 (in Chinese).

[11] CHUPRAKOV D A, ZHUBAYEV A S. A variational approach to analyze a natural fault with hydraulic fracture based on the strain energy density criterion[J]. *Theoretical & Applied Fracture Mechanics*, 2010, 53(3): 221-232.

[12] HUANG J, GRIFFITHS D V, WONG S W. Initiation pressure, location and orientation of hydraulic fracture[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2012, 49(1): 59-67.

[13] DOLBOW J, BELYTSCHKO T. A finite element method for crack growth without remeshing[J]. *International Journal for*

Numerical Methods in Engineering,1999,46(1):131-150.

[14] 范天佑. 断裂理论基础[M]. 北京:科学出版社,2003:74-75.  
FAN T Y. Foundation of fracture theory[M]. Beijing: Science Press,2003:74-75(in Chinese).

[15] VENTURA G, GRACIE R, BELYTSCHKO T. Fast integration and weight function blending in the extended finite element method[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering,2010,77(1):1-29.

[16] CASTONGUAY S T, MEAR M E, DEAN R H, et al. Predictions of the growth of multiple interacting hydraulic fractures in three dimensions[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Richardson:Society of Petroleum Engineers,2013:1-12.

[17] 师访. 岩石破裂过程的扩展有限元法研究[D]. 北京:中国矿业大学,2015.  
SHI F. Study on the cracking process of rock using the extended finite element method[D]. Beijing:China University of Mining and Technology,2015(in Chinese).

[18] 李根生,刘丽,黄中伟,等. 水力射孔对地层破裂压力的影响研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2006,30(5):42-45.  
LI G S, LIU L, HUANG Z W, et al. Study of effect of hydraulic perforating on formation fracturing pressure[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Sciences),2006,30(5):42-45(in Chinese).

[19] 彪仿俊,刘合,张劲,等. 螺旋射孔条件下地层破裂压力的数值模拟研究[J]. 中国科学技术大学学报,2011,41(3):219-226.  
BIAO F J, LIU H, ZHANG J, et al. A numerical study of fracture initiation pressure under helical perforation conditions[J]. Journal of University of Science and Technology of China,2011,41(3):219-226(in Chinese).

[20] BRINER A, CHAVEZ J C, NADEZHIN S, et al. Impact of perforation tunnel orientation and length in horizontal wellbores on fracture initiation pressure in maximum tensile stress criterion model for tight gas fields in the sultanate of oman[C]//SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference. Richardson:Society of Petroleum Engineers,2015:63-75.

[21] 彪仿俊,刘合,张士诚,等. 水力压裂水平裂缝影响参数的数值模拟研究[J]. 工程力学,2011,28(10):228-235.  
BIAO F J, LIU H, ZHANG S C, et al. A numerical study of parameter influences on horizontal hydraulic fracture[J]. Engineering Mechanics,2011,28(10):228-235(in Chinese).

陈伟民 女,博士,研究员,博士生导师。主要研究方向:流固耦合、结构动力学。

## 附录 A 式(3)中系数 $n$ 的确定

式(3)中  $n$  的确定是由本文的算例 1 和算例 2 总结得到的,通过改变系数  $n$  的取值来观察权函数所计算出来的扩展路径与利用 MCS 所得到的路径之间的差异,然后以 MCS 结果为基准,由式(4)计算出的  $\varepsilon$  进行定量比较,从而确定出最终的  $n$  值。

算例 1 中的模型和数据如图 6 所示,最终的计算结果如图 A1 所示。从图 A1 中可以看出,当  $n=3$  时的扩展路径与 MCS 的差异最小。

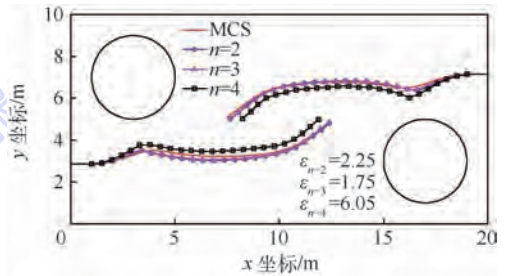


图 A1 不同系数  $n$  下带孔板边缘的裂纹扩展对比

Fig. A1 Comparison of edge crack propagation of hole plate under different coefficient  $n$

算例 2 中的模型和数据如图 8 所示,最终计算结果和误差对比如图 A2 所示。

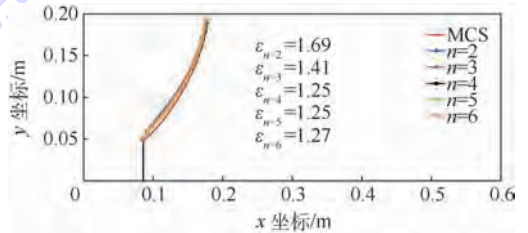


图 A2 不同系数  $n$  下四点弯曲梁试件模型的裂纹扩展对比

Fig. A2 Crack propagation comparison of 4-point bending beam specimen under different coefficient  $n$

从图 A2 中可以看出虽然当  $n=4$  和  $n=5$  时的误差最小并且  $n=3$  与他们之间的差距达到了 12%,但是结合算例一模型进行考虑时可知  $n=4$  在处理该问题时它与  $n=3$  之间的差距过大,效果并不好。综合以上因素,最优化系数应该取为  $n=3$ 。

### 作者简介:

陈旻炜 男,博士研究生。主要研究方向:断裂力学、水力压裂、裂纹扩展。

李敏 男,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:压电驱动器气动弹性应用、结构非线性气动弹性分析与控制、固体力学计算分析。

# Deflection of multi-crack synchronous propagation in horizontal well

CHEN Minwei<sup>1</sup>, LI Min<sup>1</sup>, CHEN Weimin<sup>2,\*</sup>

(1. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Horizontal well fracturing, a popular new technology developed in oil and gas industry, is utilized to enhance the production of wells. However, crack tips determine the crack initiation and propagation direction in the process of fracture growth and have a significant effect on the fracturing results. In this sense, in-depth understanding is required for this technology. In this paper, weight function at the crack tip is built according to the characteristics of stress field at the tip. The function can accurately describe the stress state at the crack tip and determine the growth direction. Based on the analysis of multi-crack propagation in the horizontal well, which is simulated by mesh regeneration method together with maximum principal stress principle, weight function at the crack tip is used to explain the reason of crack deflection under the conditions of stress contrast, crack number and distance among cracks. The final results indicate that the equivalent stresses in  $x$  and  $y$  direction at the crack tip have no distinct change and the deflections are mainly related to the equivalent stresses in  $xy$  direction.

**Keywords:** horizontal well fracturing; weight function; finite element method; crack propagation; crack deflection

**Received:** 2018-05-04; **Accepted:** 2018-07-27; **Published online:** 2018-08-22 08:57

**URL:** [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180820.1137.007.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180820.1137.007.html)

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (11232012,11372320)

\* **Corresponding author.** E-mail: [wmchen@imech.ac.cn](mailto:wmchen@imech.ac.cn)

http://bhxb.buaa.edu.cn      jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2017.0545

# 高超声速飞行器平稳滑翔弹道扰动运动伴随分析



赫泰龙<sup>1</sup>, 陈万春<sup>1,\*</sup>, 刘芳<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083; 2. 北京航天长征飞行器研究所, 北京 100076)

**摘 要:** 针对高超声速飞行器平稳滑翔弹道扰动运动问题, 研究了伴随仿真方法及其应用。首先, 利用伴随系统的数学定义式, 从新的角度给出了伴随仿真方法的统一解释, 包括误差预算性质和伴随一次仿真结果一般意义; 对于随机线性系统, 导出协方差分析的伴随。然后, 在滑翔动力学建模和平稳滑翔弹道定义基础上, 得到了平稳滑翔弹道定义的一致性; 建立初始状态和气动力存在干扰的动力学模型, 并在小扰动假设下得到标准平稳滑翔弹道附近的线性化微分方程。最后, 通过伴随仿真算例, 分析了确定性常值小扰动和随机扰动对平稳滑翔弹道的终端状态的影响, 同时对比非线性仿真和蒙特卡罗仿真, 结果吻合; 伴随仿真方法的计算效率优势明显。

**关键词:** 伴随法; 平稳滑翔弹道; 仿真分析; 线性系统; 蒙特卡罗法

**中图分类号:** V412.4<sup>+4</sup>; TJ765.1

**文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-5965(2019)01-0109-14

高超声速飞行器, 相比于传统弹道式飞行器, 具有远距离快速打击、覆盖范围广、全过程机动能力强、弹道难以被预报等优点, 被认为是突破目前防空反导系统的有效手段, 在军事上有广阔的应用前景。高超声速飞行器无动力滑翔段弹道设计是当前研究热点方向之一, 平衡滑翔是再入的一种重要飞行模式, 最早由德国科学家 Sanger 和 Bredt<sup>[1]</sup> 提出, 平衡滑翔弹道高度变化平缓、热流密度和动压峰值小, 被广泛应用于再入弹道的分析与设计<sup>[1-2]</sup>。胡锦涛和陈万春<sup>[3]</sup> 在传统平衡滑翔概念的基础上, 通过分析给定攻角曲线和倾侧角曲线再入弹道族的特点, 以纵向加速度导数的平方的积分来衡量弹道的平滑程度, 提出了平稳滑翔弹道概念, 并对平稳滑翔弹道的解析解和弹道动态特性进行了分析, 获得了快速生成平稳滑翔弹道的方法<sup>[4]</sup>。平稳滑翔弹道是本文主要研究对象。

对于高超声速滑翔弹道扰动运动的分析, 通常采用非线性仿真方法<sup>[3-4]</sup>, 针对不同的干扰因

素和不同参数(剩余飞行时间等), 需要分别进行多次仿真; 而对于随机扰动, 则需要大量的蒙特卡罗仿真, 计算效率低, 但是方法简单, 适用条件广。在小扰动假设下, 对平稳滑翔动态方程线性化, 利用伴随仿真方法分析, 可以大大减少计算量。

伴随仿真方法是一种计算机仿真分析与设计工具, 主要用于分析线性时变系统<sup>[5-6]</sup>。伴随仿真方法的理论基础是线性系统与其伴随系统之间的本质关系(内积等式)<sup>[7]</sup>, 一般的线性时变系统可以采用 2 种方法来描述: 状态空间法和脉冲响应矩阵。所以, 关于伴随仿真方法的解释也可以分为基于状态空间描述(状态转移矩阵)<sup>[8-9]</sup> 和基于脉冲响应矩阵<sup>[5-6]</sup>。伴随系统一次仿真可以得到原线性系统各不同干扰输入对某一输出的影响, 通常称为误差预算或灵敏度分析, 在电路网络分析中有广泛应用。伴随仿真另一个重要性质是一次仿真可以得到原线性系统在各干扰输入不同的加入时间下某一特定时间(如仿真终端时刻)的输出, 该性质广泛应用于导弹制导回路的分析

收稿日期: 2017-08-31; 录用日期: 2018-03-30; 网络出版时间: 2018-04-18 14:33

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180418.1057.003.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180418.1057.003.html)

\* 通信作者: E-mail: wanchun\_chen@buaa.edu.cn

**引用格式:** 赫泰龙, 陈万春, 刘芳. 高超声速飞行器平稳滑翔弹道扰动运动伴随分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 109-122. HE T L, CHEN W C, LIU F. Adjoint analysis of steady glide trajectory with disturbance motion for hypersonic vehicle[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 109-122 (in Chinese).

与设计<sup>[6]</sup>。伴随仿真方法还可以用于分析输入为随机过程(如白噪声信号)的线性系统的均方响应,本质上可以理解为线性系统协方差分析<sup>[5-6]</sup>的伴随仿真方法。Zarchan<sup>[10]</sup>基于伴随仿真方法,提出了用于分析非线性导弹制导系统的统计线性化伴随仿真方法(SLAM)。Weiss和Bucco<sup>[11]</sup>用伴随仿真方法对战术导弹的交班进行了分析,并对如何在非标准输入信号的制导系统应用伴随仿真方法进行了研究<sup>[12]</sup>。Bucco<sup>[13]</sup>还系统地介绍了伴随仿真方法在航空航天领域的应用。Sarachik和Kreindler<sup>[14]</sup>、Brogan<sup>[15]</sup>、Zarchan<sup>[6]</sup>、Weiss和Bucco<sup>[16]</sup>分别研究了离散系统、连续-离散(混成)系统的伴随仿真方法。林晓辉、崔乃刚和刘曦<sup>[17]</sup>对伴随理论有关定理用于随机运动体仿真技术作了研究。邹晖、陈万春和邢晓岚<sup>[18]</sup>基于MATRIXx开发出了能够自动生成原系统的伴随系统的工具软件。伴随仿真方法在摄动制导方法的分析与设计中也有重要应用<sup>[19-20]</sup>。

本文利用伴随仿真方法,研究状态初值和气动力等存在扰动因素(包括确定性常值小扰动和随机扰动)时,对平稳滑翔弹道终端高度、速度和射程的影响。首先,从伴随系统基本定义出发,给出了伴随仿真方法统一的解释。在滑翔动力学建模和平稳滑翔弹道定义基础上,研究了平稳滑翔弹道的基本性质。考虑扰动因素,建立带有误差干扰的非线性动力学模型,并根据小偏差弹道摄动理论,在标准平稳滑翔弹道附近线性化,得到关于扰动运动的线性化微分方程。然后,采用伴随仿真方法,同时对比非线性仿真和蒙特卡罗法,分析了各扰动因素对平稳滑翔弹道的影响;针对平稳滑翔弹道存在初始高度、初始弹道倾角、初始速度及升力、阻力等多个扰动因素,伴随仿真方法只需要一次仿真就可以得到各扰动在不同剩余飞行时间加入时对终端高度、终端速度或终端射程的影响,而非线性仿真需要分别对每个扰动进行仿真、对加入扰动时剩余飞行时间进行循环,而且对于随机扰动则需要进行大量蒙特卡罗打靶,所以伴随仿真方法的计算量要远小于非线性仿真或蒙特卡罗仿真。研究结果有利于加深对高超声速飞行器平稳滑翔弹道特性的认识,并能为基于平稳滑翔弹道的制导方法设计分析及仿真评估提供参考。

## 1 伴随仿真方法

为了阐述伴随仿真方法的原理,本节从线性时变系统的伴随系统的定义出发,利用线性系统

与其伴随系统之间的本质关系(定义式),给出伴随仿真方法的统一解释。

线性系统的伴随,与线性代数中线性变换、泛函分析中有界线性算子的伴随本质上有相同的定义。设 $G: \mathcal{U} \mapsto \mathcal{Y}$ 为线性系统, $\mathcal{U}$ 和 $\mathcal{Y}$ 为希尔伯特空间,则 $G$ 的伴随系统为线性系统 $G^*: \mathcal{Y} \mapsto \mathcal{U}$ ,且满足:

$$\langle Gu, v \rangle_{\mathcal{Y}} = \langle u, G^*v \rangle_{\mathcal{U}} \quad \forall u \in \mathcal{U}, \forall v \in \mathcal{Y} \quad (1)$$

式中: $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 为空间 $\mathcal{U}$ 或 $\mathcal{Y}$ 上的内积。

### 1.1 伴随系统状态空间表示

考虑如下状态空间描述的线性时变系统:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \\ y(t) = C(t)x(t) \\ x(t_0) = x_0 \in \mathbf{R}^n \quad t \in [t_0, t_f] \end{cases} \quad (2)$$

式中: $u(t) \in \mathbf{R}^m$ 为控制输入; $x(t) \in \mathbf{R}^n$ 为状态向量; $y(t) \in \mathbf{R}^p$ 为输出; $A(t)$ 、 $B(t)$ 和 $C(t)$ 为关于时间 $t$ 连续的函数矩阵。

系统式(2)的解可以表示为

$$x(t) = \Phi(t, t_0)x(t_0) + \int_{t_0}^t \Phi(t, \tau)B(\tau)u(\tau) d\tau \quad (3)$$

式中: $\Phi(t, \tau)$ 为状态转移矩阵。

假设 $u \in \mathcal{U}$ 、 $y \in \mathcal{Y}$ ,信号空间 $\mathcal{U}$ 和 $\mathcal{Y}$ 都是有限时域勒贝格-2空间;为了考虑初值,将系统式(2)写成如下抽象形式:

$$G: \mathbf{R}^n \oplus \mathcal{U} \mapsto \mathbf{R}^n \oplus \mathcal{Y}; \begin{bmatrix} x_0 \\ u \end{bmatrix} \mapsto \begin{bmatrix} x_f \\ y \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\oplus$ 为直和。

定义内积为

$$\left\langle \begin{bmatrix} f_0 \\ f \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} e_0 \\ e \end{bmatrix} \right\rangle = e_0^T f_0 + \int_{t_0}^{t_f} e^T(t)f(t) dt \quad (5)$$

容易验证, $\mathbf{R}^n \oplus \mathcal{U}$ 和 $\mathbf{R}^n \oplus \mathcal{Y}$ 均是希尔伯特空间。利用线性系统伴随的定义式(1),可以推导出线性系统式(2)的伴随系统。

$$G^*: \mathbf{R}^n \oplus \mathcal{Y} \mapsto \mathbf{R}^n \oplus \mathcal{U}; \begin{bmatrix} p_f \\ r \end{bmatrix} \mapsto \begin{bmatrix} p_0 \\ q \end{bmatrix} \quad (6)$$

存在如下状态空间实现<sup>[21]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{p}(t) = -A^T(t)p(t) - C^T(t)r(t) \\ q(t) = B^T(t)p(t) \\ p(t_f) = p_f \end{cases} \quad (7)$$

为了验证系统式(7)是式(2)的伴随的状态空间实现,进行如下推导运算:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(p^T(t)x(t)) &= \dot{p}^T(t)x(t) + p^T(t)\dot{x}(t) = \\ &(-p^T(t)A(t) - r^T(t)C(t))x(t) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{p}^T(t)(\mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t)) = \\ -\mathbf{r}^T(t)\mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{p}^T(t)\mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t) = \\ -\mathbf{r}^T(t)\mathbf{y}(t) + \mathbf{u}^T(t)\mathbf{q}(t) \end{aligned}$$

对上式从  $t_0$  到  $t_f$  积分可得到

$$\mathbf{p}^T(t_f)\mathbf{x}(t_f) - \mathbf{p}^T(t_0)\mathbf{x}(t_0) = \int_{t_0}^{t_f} (-\mathbf{r}^T(t)\mathbf{y}(t) + \mathbf{u}^T(t)\mathbf{q}(t)) dt \quad (8)$$

式(8)对任意  $\mathbf{x}(t_0) \in \mathbf{R}^n, \mathbf{u} \in \mathcal{U}, \mathbf{p}(t_f) \in \mathbf{R}^n, \mathbf{r} \in \mathcal{Y}$  都成立。对式(8)左右两边进行简单移项,并结合内积定义式(5),可以看出式(8)正是伴随系统定义中式(1)的状态空间变量表示,这说明系统式(7)和式(2)互为各自伴随的状态空间实现。式(8)通常称为 Bliss 公式<sup>[19]</sup>或伴随定理<sup>[17]</sup>。

注意到,伴随系统式(7)的时间进程是反向的(从  $t_f$  到  $t_0$ ),为了仿真方便,作如下变量替换:

$$\begin{cases} \mathbf{z}(t) = \mathbf{p}(t_f + t_0 - t) \\ \mathbf{v}(t) = \mathbf{r}(t_f + t_0 - t) \\ \mathbf{w}(t) = \mathbf{q}(t_f + t_0 - t) \end{cases} \quad (9) \quad \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\delta(t) dt = f(0) \quad (13)$$

为了书写方便,不失一般性,后文将假设  $t_0 = 0$ 。

利用式(7)进行简单求导运算和变量代换,可得到

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}^T(t_f - t)\mathbf{z}(t) + \mathbf{C}^T(t_f - t)\mathbf{v}(t) \\ \dot{\mathbf{w}}(t) = \mathbf{B}^T(t_f - t)\mathbf{z}(t) \\ \mathbf{z}(t_0) = \mathbf{z}_0 \end{cases} \quad (10)$$

式(10)的解为

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{\Psi}(t, 0)\mathbf{z}(0) + \int_0^t \mathbf{\Psi}(t, \tau)\mathbf{C}^T(t_f - \tau) \cdot \mathbf{v}(\tau) d\tau \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{\Psi}(t, \tau) = \mathbf{\Phi}^T(t_f - \tau, t_f - t)$  为系统式(10)的状态转移矩阵。如无特别说明,线性系统式(2)的伴随系统是指式(10),相应地,伴随系统定义式(8)则写为

$$\mathbf{z}^T(0)\mathbf{x}(t_f) - \mathbf{z}^T(t_f)\mathbf{x}(0) = \int_0^{t_f} (-\mathbf{v}^T(t_f - t)\mathbf{y}(t) + \mathbf{u}^T(t)\mathbf{w}(t_f - t)) dt \quad (12)$$

## 1.2 伴随仿真统一解释

利用伴随的定义式(12),能够以更简单、统一的方式来解释伴随系统式(10)的仿真结果与原系统式(2)之间的关系。

注意到,式(12)只显含原系统和伴随系统的初始状态、终端状态、控制输入和输出,且由伴随定义可知式(12)对任意的初始状态  $\mathbf{x}(0), \mathbf{z}(0)$ , 输入  $\mathbf{u}(t), \mathbf{v}(t)$  都成立。利用式(12)来解释伴随仿真方法的基本思路是:对原系统和伴随系统选

取适当或特殊的状态初值和输入,讨论原系统和伴随系统仿真结果(终端状态、输出)之间的关系。对于具体待研究的线性系统,状态初值和输入都给定,则只需要对伴随系统选取适当或特殊的状态初值和输入。

为了使讨论更明确,将借助于单位阶跃函数  $H(t)$  和狄拉克函数  $\delta(t)$ 。  $H(t)$  和  $\delta(t)$  是线性系统分析中最常用的输入信号,相应的输出分别称为阶跃响应和脉冲响应;系统输入为其他典型信号(如正弦函数、斜坡函数、抛物线函数和指数函数等)都可通过增加状态变量或初值,等价变换成只含  $H(t)$  或  $\delta(t)$  作为输入信号的系统。  $H(t)$  作为常值输入时等价于导数为 0、初值为 1 的状态变量,这样系统将转化为零输入;又通过关系  $\dot{H}(t) = \delta(t)$ , 输入为  $H(t)$  的系统可以转化为输入为  $\delta(t)$  的系统。  $\delta(t)$  函数的基本性质为

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\delta(t) dt = f(0) \quad (13)$$

式中:  $f(t)$  为任意函数。

伴随仿真的基本解释可以概括为如下 2 条性质。记  $\mathbf{x} = (x_k) \in \mathbf{R}^n, \mathbf{z} = (z_k) \in \mathbf{R}^n, \mathbf{u} = (u_k) \in \mathbf{R}^m, \mathbf{v} = (v_k) \in \mathbf{R}^p, \mathbf{y} = (y_k) \in \mathbf{R}^p, \mathbf{w} = (w_k) \in \mathbf{R}^m$ 。

**性质 1(误差预算)** 假设原系统式(2)为多输入-单输出(MISO),给定任意控制输入  $\mathbf{u}(t)$  和状态初值  $\mathbf{x}(0)$ ,则可以选取伴随系统式(10)的输入  $\mathbf{v}(t) = \delta(t)$ ,初值  $\mathbf{z}(0) = 0$ ;代入式(12),可得到

$$\mathbf{y}(t_f) = \mathbf{z}^T(t_f)\mathbf{x}(0) + \int_0^{t_f} \mathbf{u}^T(t)\mathbf{w}(t_f - t) dt \quad (14)$$

还可以选取伴随系统  $\mathbf{v}(t) = 0, \mathbf{z}(0) = \mathbf{C}^T(t_f)$ ,注意到原系统式(2)为 MISO,所以  $\mathbf{z}(0)$  和  $\mathbf{C}^T(t_f)$  是同维数的,利用原系统输出方程  $\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t)$  和式(12),同样可以得到式(14)。

特别地,如果原系统式(2)的  $\mathbf{u}(t) = 0$ ,式(14)可写为

$$\mathbf{y}(t_f) = \mathbf{z}^T(t_f)\mathbf{x}(0) = \sum_{i=1}^n z_i(t_f)x_i(0) \quad (15)$$

如果原系统式(2)中  $\mathbf{u}(t)$  的每个分量都是  $\delta(t)$ ,即  $u_k(t) = \delta(t), k = 1, 2, \dots, m$ ,则式(14)可记为

$$\mathbf{y}(t_f) = \sum_{i=1}^n z_i(t_f)x_i(0) + \sum_{i=1}^m w_i(t_f) \quad (16)$$

式(14)表明原系统式(2)在终端时刻的输出  $\mathbf{y}(t_f)$ ,可以利用伴随系统式(10)的仿真结果得到;而且伴随一次仿真可以得到原系统输入和状态初值各分量对终端输出  $\mathbf{y}(t_f)$  的贡献大小,这一

点可以从式(15)、式(16)更清楚地看到。性质1也给出伴随仿真初值和输入的具体选取方法,特别地,对于原系统输入为典型信号的<sup>[12]</sup>,可先等价转化为零输入、阶跃输入或脉冲输入的线性系统<sup>[6]</sup>,然后对此系统进行伴随仿真,更方便操作和理解。

**性质2**(伴随一次仿真的通用解释) 为了简化叙述,不失一般性,这里假设原系统式(2)为单输入-单输出(SISO),且状态初值  $\mathbf{x}(0) = 0$ , 控制输入  $u(t) = \delta(t - (t_f - t_{go}))$ ,  $t_{go} \in [0, t_f]$ ; 选取伴随系统式(10)的  $v(t) = \delta(t)$ ,  $\mathbf{z}(0) = 0$  或  $v(t) = 0$ ,  $\mathbf{z}(0) = \mathbf{C}^T(t_f)$ , 代入式(12)可得到

$$y(t_f) = w(t_{go}) \quad (17)$$

式(17)对所有  $t_{go} \in [0, t_f]$  成立,这说明原系统在仿真时刻为  $t_f - t_{go}$ ,或者说在剩余仿真时间为  $t_{go}$  时,加入脉冲输入,得到终端输出  $y(t_f)$ ,等于伴随仿真在  $t_{go}$  时刻输出;为了得到原系统在不同剩余仿真时间时脉冲输入响应,原系统需要按照  $t_{go}$  循环,进行多次仿真,而伴随仿真,因为初值和输入选择给定,只需要一次连续仿真就可以得到所有  $t_{go}$  时刻的输出。

原系统为 MISO 时,结论类似,还可以得到各输入导致终端输出的误差预算。假设原系统  $\mathbf{x}(0) = 0$ , 可以通过增加阶跃输入或脉冲输入转化得到<sup>[6]</sup>。

### 1.3 协方差分析的伴随

1.2 节给出了确定性输入线性系统的伴随仿真的解释,对于随机输入的线性系统也存在相应的伴随仿真方法。考虑输入为白噪声信号的线性系统式(2),假设输入  $\mathbf{u}(t)$  的功率谱密度为  $\mathbf{U}(t)$ , 即  $E(\mathbf{u}(t)\mathbf{u}^T(\tau)) = \mathbf{U}(t)\delta(t - \tau)$ ;  $\mathbf{x}_0$  为随机变量,且  $E(\mathbf{x}_0) = 0$ ,  $E(\mathbf{x}_0\mathbf{x}_0^T) = \mathbf{X}_0$ ;  $\mathbf{x}_0$  与  $\mathbf{u}(t)$  互相独立或不相关。为了简化叙述,不失一般性,假设所有随机变量的期望(均值)为 0,此时,随机变量的标准差等于均方根;本文将研究线性系统在白噪声信号输入下的均方或者均方根响应。在这些条件下,线性系统式(2)对应的协方差传播微分方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{X}(t)\mathbf{A}^T(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{U}(t)\mathbf{B}^T(t) \\ \mathbf{Y}(t) = \mathbf{C}(t)\mathbf{X}(t)\mathbf{C}^T(t) \\ \mathbf{X}(0) = \mathbf{X}_0 \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $\mathbf{X}(t) = E(\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^T(t))$ ;  $\mathbf{Y}(t) = E(\mathbf{y}(t)\mathbf{y}^T(t))$ 。利用该方程进行仿真分析通常称为协方差分析。协方差矩阵  $\mathbf{X}(t)$ 、 $\mathbf{Y}(t)$  对角线元素表示各分量的方差(均方),非对角线元素表示各分量

之间的协方差。式(18)是一个矩阵微分方程,如果将  $\mathbf{X}(t)$  作为状态,  $\mathbf{U}(t)$  作为输入,  $\mathbf{Y}(t)$  作为输出,仍是线性时变系统,这可从如下等价系统得到:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\text{vec}(\mathbf{X}(t)) = (\mathbf{I} \otimes \mathbf{A}(t) + \mathbf{A}(t) \otimes \mathbf{I})\text{vec}(\mathbf{X}(t)) + (\mathbf{B}(t) \otimes \mathbf{B}(t))\text{vec}(\mathbf{U}(t)) \\ \text{vec}(\mathbf{Y}(t)) = (\mathbf{C}(t) \otimes \mathbf{C}(t))\text{vec}(\mathbf{X}(t)) \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $\text{vec}(\cdot)$  表示矩阵拉直运算,即将矩阵按照列的顺序,一列接一列地组成一个长向量;  $\otimes$  指克罗内克积。显然,系统式(19)就是常见的状态空间描述形式。线性矩阵微分方程式(18)的解为  $\mathbf{X}(t) = \Phi(t, 0)\mathbf{X}(0)\Phi^T(t, 0) +$

$$\int_0^t \Phi(t, \tau)\mathbf{B}(\tau)\mathbf{U}(\tau)\mathbf{B}^T(\tau)\Phi^T(t, \tau)d\tau \quad (20)$$

类似式(2)与式(10)的关系,利用式(19),可以直接得到系统式(18)的伴随系统的一个矩阵微分方程实现为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{Z}}(t) = \mathbf{A}^T(t_f - t)\mathbf{Z}(t) + \mathbf{Z}(t)\mathbf{A}(t_f - t) + \mathbf{C}^T(t_f - t)\mathbf{V}(t)\mathbf{C}(t_f - t) \\ \mathbf{W}(t) = \mathbf{B}^T(t_f - t)\mathbf{Z}(t)\mathbf{B}(t_f - t) \\ \mathbf{Z}(0) = \mathbf{Z}_0 \end{cases} \quad (21)$$

系统式(21)微分方程的解为

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}(t) &= \Psi(t, 0)\mathbf{Z}(0)\Psi^T(t, 0) + \\ &\int_0^t \Psi(t, \tau)\mathbf{C}^T(t_f - \tau)\mathbf{V}(\tau)\mathbf{C}(t_f - \tau)\Psi^T(t, \tau)d\tau \end{aligned} \quad (22)$$

容易证明,系统式(18)与式(21)之间存在类似于式(12)的如下关系:

$$\begin{aligned} \text{tr}(\mathbf{Z}^T(0)\mathbf{X}(t_f)) - \text{tr}(\mathbf{Z}^T(t_f)\mathbf{X}(0)) &= \\ \int_0^{t_f} (\text{tr}(-\mathbf{V}^T(t_f - t)\mathbf{Y}(t)) + \text{tr}(\mathbf{U}^T(t)\mathbf{W}(t_f - t)))dt \end{aligned} \quad (23)$$

式中:  $\text{tr}(\cdot)$  表示方阵的迹。

系统式(21)可以称为协方差分析式(18)的伴随,利用式(23)能够得到类似于确定性线性系统的性质1、性质2的伴随解释,只不过输入输出换成功率谱密度和协方差矩阵,不但可以分析均方响应(对角线元素),还可以分析各输入分量之间相关性(非对角线元素)对输出的影响。作为例子,考虑 MISO 线性系统式(2)的协方差传播微分方程式(18),给定初值  $\mathbf{X}(0)$ , 输入  $\mathbf{U}(t)$ ; 选取伴随系统式(21)的输入  $\mathbf{V}(t) = \delta(t)$ , 初值  $\mathbf{Z}(0) = 0$ , 或者  $\mathbf{V}(t) = 0$ ,  $\mathbf{Z}(0) = \mathbf{C}^T(t_f)\mathbf{C}(t_f)$ , 代

入式(23)可得

$$Y(t_f) = \text{tr}(\mathbf{Z}^T(t_f)\mathbf{X}(0)) + \int_0^{t_f} \text{tr}(\mathbf{U}^T(t)\mathbf{W}(t_f-t))dt = \text{tr}(\mathbf{Z}^T(t_f)\mathbf{X}(0)) + \int_0^{t_f} \text{tr}(\mathbf{U}^T(t_f-t)\mathbf{W}(t))dt \quad (24)$$

同时考虑相应的确定性伴随系统式(10),即如果选取伴随系统式(21)中  $\mathbf{Z}(0) = 0, V(t) = \delta(t)$ ,同样选取伴随系统式(10)中  $\mathbf{z}(0) = 0, \nu(t) = \delta(t)$ ;如果选取伴随系统式(21)中  $\mathbf{Z}(0) = \mathbf{C}^T(t_f)\mathbf{C}(t_f), V(t) = 0$ ,同样选取伴随系统式(10)中  $\mathbf{z}(0) = \mathbf{C}^T(t_f), \nu(t) = 0$ 。那么,结合式(11)、式(22),同时利用迹的循环性质,式(24)可写为

$$Y(t_f) = \mathbf{z}^T(t_f)\mathbf{X}(0)\mathbf{z}(t_f) + \int_0^{t_f} \mathbf{w}^T(t)\mathbf{U}(t_f-t)\mathbf{w}(t)dt \quad (25)$$

如果初值  $\mathbf{x}(0)$  各分量之间不相关,即  $\mathbf{X}(0)$  的非对角线元素为 0;  $\mathbf{U}(t) = \mathbf{I}$ ,即  $\mathbf{u}(t)$  为单位功率谱密度白噪声过程,则有

$$Y(t_f) = \sum_{i=1}^n Z_{ii}(t_f)X_{ii}(0) + \sum_{i=1}^m \int_0^{t_f} W_{ii}(t)dt = \sum_{i=1}^n z_i^2(t_f)\sigma_{x_i}^2(0) + \sum_{i=1}^m \int_0^{t_f} w_i^2(t)dt \quad (26)$$

式中:  $Z_{ii}, X_{ii}, W_{ii}$  分别为  $\mathbf{Z}, \mathbf{X}, \mathbf{W}$  的对角线分量;  $\sigma_{x_i}(0)$  为初值  $\mathbf{x}(0)$  各分量的标准差。这里假设系统式(2)为单输出,所以  $Y(t_f) = \sigma_y^2(t_f), \sigma_y(t_f)$  为  $y(t_f)$  的均方根。式(25)、式(26)给出了原线性系统式(2)在白噪声信号输入下,终端时刻输出的均方响应可以由协方差分析的伴随仿真式(21)得到,而且一次伴随仿真可以得到各输入和初值分量(的标准差)对输出的贡献大小。同时也解释了随机输入的线性系统输出的均方根响应经典构造方法,即对确定性线性系统的伴随输出先平方,再积分,最后开方<sup>[6]</sup>。

至此,利用伴随系统的数学定义式,对确定性线性系统和随机线性系统的伴随仿真给出了统一的解释;单从仿真结果来考虑,这里给出的解释本质上不需要借助于状态转移矩阵或脉冲响应矩阵,形式上也更简单。

## 2 滑翔动力学模型

考虑地球模型为静止均质圆球,高超声速飞行器纵平面内再入滑翔的受力分析如图 1 所示。图中:  $O_e x_i y_i$  为地心坐标系;  $O_b x_g y_g$  为地理坐标系;  $O_b x_b$  为弹体坐标系  $x$  轴;  $h$  为高度;  $\gamma$  为弹道倾角;  $s$  为射程;  $\alpha$  为攻角;  $\nu$  为速度;  $L$  为升力;  $D$

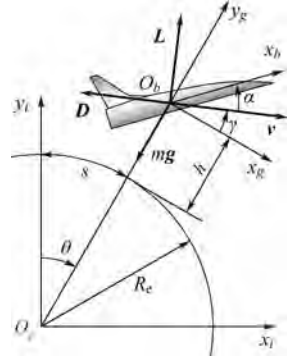


图 1 变量符号及受力分析示意图  
Fig. 1 Schematic of variable symbol and force analysis

为阻力;  $g$  为重力加速度;  $m$  为质量;  $R_e$  为地球半径。

滑翔动力学微分方程可表示为

$$\begin{cases} \dot{h} = \nu \sin \gamma \\ \dot{\gamma} = \frac{L}{m\nu} - \frac{g \cos \gamma}{\nu} + \frac{\nu \cos \gamma}{h + R_e} \\ \dot{\nu} = -\frac{D}{m} - g \sin \gamma \\ \dot{s} = \frac{R_e \nu \cos \gamma}{h + R_e} \end{cases} \quad (27)$$

式中:

$$\begin{cases} L = \frac{1}{2} \rho \nu^2 S C_L \\ D = \frac{1}{2} \rho \nu^2 S C_D \\ \rho = \rho_0 e^{-\beta h} \\ g = g_0 \frac{R_e^2}{(R_e + h)^2} \end{cases} \quad (28)$$

其中:  $\rho$  为大气密度,通常采用指数大气模型;  $\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ;  $\beta = 1.389 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ ;  $g_0$  为海平面重力加速度,取  $g_0 = 9.80665 \text{ m/s}^2$ ;  $S$  为气动参考面积;  $C_L$  为升力系数;  $C_D$  为阻力系数。本文在仿真计算时采用通用航空飞行器 CAV-H<sup>[22]</sup> 的相关模型数据,该飞行器质量  $m = 907 \text{ kg}$ ,气动参考面积  $S = 0.4839 \text{ m}^2$ ,升力系数和阻力系数关于攻角的拟合公式<sup>[3]</sup>为

$$C_L = 0.04675\alpha + 0.10568$$

$$C_D = 0.000508\alpha^2 + 0.004228\alpha + 0.0161$$

式中:攻角单位为( $^\circ$ )。

## 3 平稳滑翔弹道

针对常值攻角控制输入,分析平稳滑翔弹道的性质。按照定义<sup>[3]</sup>,给定滑翔初始速度  $v_0$ ,以

初始弹道倾角  $\gamma_0$  和高度  $h_0$  为优化变量, 以式(29)为性能指标, 同时满足微分方程约束式(27), 优化得到的弹道称为平稳滑翔弹道。

$$\min J = \int_0^{t_c} a_n^2 dt \quad (29)$$

式中:  $a_n = v\dot{\gamma}$  为纵向加速度;  $t_c$  为时间常数。

考虑时间常数  $t_c$  对优化结果的影响, 表 1 列出了选取不同时间常数  $t_c$  优化得到的初始弹道倾角和初始高度。本算例优化条件是: 初始速度  $v_0 = 7000 \text{ m/s}$ , 常值攻角输入  $\alpha = 15^\circ$ , 采用序列二次规划(SQP)方法进行优化。从表 1 可以看出, 不同的时间常数  $t_c$  得到的优化结果之间相差非常小, 从后面分析还将会看到, 这些微小差异对整个平稳滑翔弹道的影响也是可以忽略的。基于此, 后文仿真计算中, 将时间常数固定为  $t_c = 1000 \text{ s}$  来获得平稳滑翔弹道。

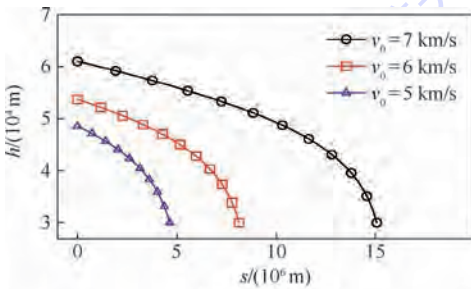
根据定义, 在每一个初始速度都可以通过优化得到对应的平稳滑翔弹道。图 2 给出了不同初始速度下优化得到的平稳滑翔弹道对比曲线。

可以明显看出, 平稳滑翔弹道各状态量变化平稳; 从图 2(e)、(f) 还可以得到平稳滑翔弹道另一重要特征, 即不同初始速度下优化得到的平稳滑翔弹道高度-速度曲线、弹道倾角-速度曲线几乎重合, 或者说初始速度小的平稳滑翔弹道是初始速度大的一部分, 以较小的初始速度优化得到平稳滑翔弹道初值是在初始速度大的弹道上, 这表明平稳滑翔弹道上任一点状态  $(h, \gamma, v)$  作为初值都满足平稳滑翔弹道的定义, 或者说平稳滑翔弹道上的任一段仍然是平稳滑翔弹道, 这可以称为平稳滑翔弹道定义的一致性。

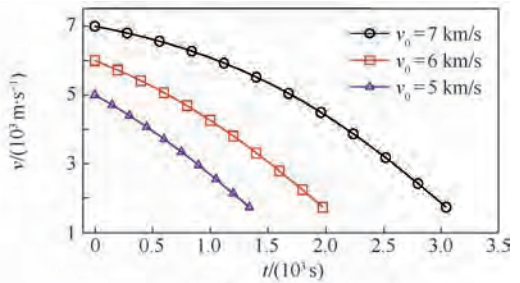
表 1 不同时间常数  $t_c$  的优化结果

Table 1 Optimization results with different time constants  $t_c$

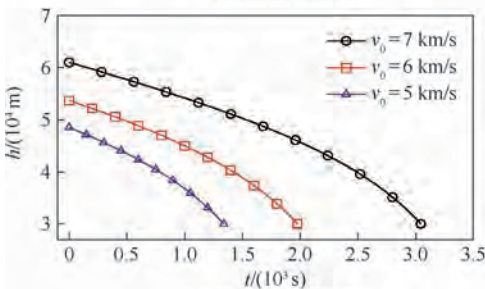
$t_c/s$	$h_0/m$	$\gamma_0/(^\circ)$
500	61032.14	0.052308
1000	61032.02	0.052312
1500	61032.00	0.052312
2000	61032.10	0.052309



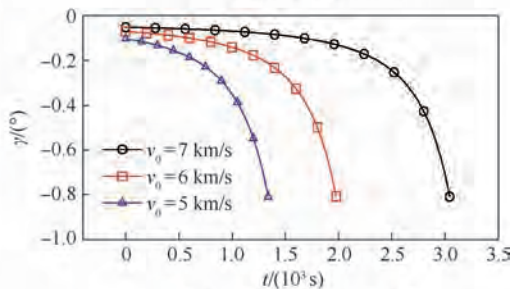
(a) 高度-射程曲线



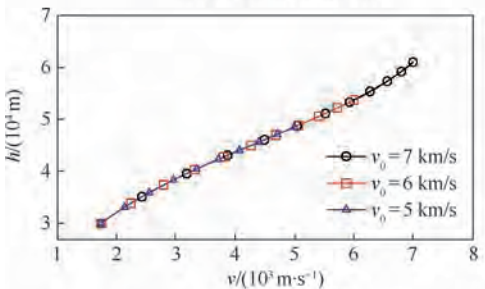
(b) 速度随时间变化曲线



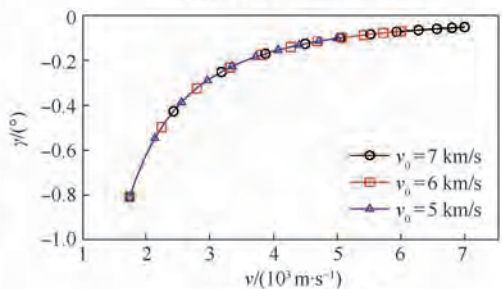
(c) 高度随时间变化曲线



(d) 弹道倾角随时间变化曲线



(e) 高度-速度曲线



(f) 弹道倾角-速度曲线

图 2 不同初始速度下的平稳滑翔弹道对比

Fig. 2 Comparison of steady glide trajectories with different initial velocities

## 4 扰动运动及线性化

从第 3 节分析可以得出,如果飞行器再入滑翔的起始高度、弹道倾角和速度满足一定关系(在某条平稳滑翔弹道上),那么飞行器将会一直沿着平稳滑翔弹道飞行。然而实际再入时滑翔初始高度、弹道倾角和速度很可能与期望的平稳滑翔初始状态存在偏差,并且飞行过程中也会存在大气密度、风等多种干扰因素,为了研究这些扰动因素对平稳滑翔弹道的影响,建立如下带有误差干扰模型的动力学方程:

$$\begin{cases} \dot{h} = v \sin \gamma \\ \dot{\gamma} = \frac{L(1 + \varepsilon_L)}{mv} - \frac{g \cos \gamma}{v} + \frac{v \cos \gamma}{h + R_e} \\ \dot{v} = -\frac{D(1 + \varepsilon_D)}{m} - g \sin \gamma \\ \dot{s} = \frac{R_e v \cos \gamma}{h + R_e} \end{cases} \quad (30)$$

式中: $\varepsilon_L$ 、 $\varepsilon_D$  分别为比例形式的升力、阻力干扰输入。同时考虑相对于平稳滑翔弹道存在初始高度扰动  $\delta h_0$ 、初始弹道倾角扰动  $\delta \gamma_0$  和初始速度扰动  $\delta v_0$  的情况。

分析干扰对标准平稳滑翔弹道的影响,最直观的方法就是在实际干扰条件下对方程式(30)求解,再与标准平稳滑翔弹道作差,但是该方法的缺点是计算量大,需要数值求解非线性微分方程,并不是直接分析干扰与弹道偏差的关系,不方便应用于制导<sup>[20]</sup>。另一种方法是基于小扰动假设的摄动法,将带有误差干扰模型的动力学方程式(30)在标准平稳滑翔弹道附近线性化,得到如下状态空间线性系统:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (31)$$

式中:

$$\mathbf{x}(t) = [\delta h \quad \delta \gamma \quad \delta v \quad \delta s]^T$$

$$\mathbf{x}(0) = [\delta h_0 \quad \delta \gamma_0 \quad \delta v_0 \quad 0]^T$$

$$\mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ b_{21} & 0 \\ 0 & b_{32} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{u}(t) = [\varepsilon_L \quad \varepsilon_D]^T$$

$$\mathbf{C}(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中:

$$a_{12} = v_s \cos \gamma_s$$

$$a_{13} = \sin \gamma_s$$

$$a_{21} = \frac{1}{mv_s} \cdot \frac{\partial L}{\partial h} - \frac{\cos \gamma_s}{v_s} \cdot \frac{\partial g}{\partial h} - \frac{v_s \cos \gamma_s}{(h_s + R_e)^2}$$

$$a_{22} = \frac{g \sin \gamma_s}{v_s} - \frac{v_s \sin \gamma_s}{h_s + R_e}$$

$$a_{23} = \frac{1}{mv_s} \cdot \frac{\partial L}{\partial v} - \frac{L}{mv_s^2} + \frac{g \cos \gamma_s}{v_s^2} + \frac{\cos \gamma_s}{h_s + R_e}$$

$$a_{31} = -\frac{1}{m} \cdot \frac{\partial D}{\partial h} - \sin \gamma_s \frac{\partial g}{\partial h}$$

$$a_{32} = -g \cos \gamma_s$$

$$a_{33} = -\frac{1}{m} \cdot \frac{\partial D}{\partial v}$$

$$a_{41} = -\frac{R_e v_s \cos \gamma_s}{(h_s + R_e)^2}$$

$$a_{42} = -\frac{R_e v_s \sin \gamma_s}{h_s + R_e}$$

$$a_{43} = \frac{R_e \cos \gamma_s}{h_s + R_e}$$

$$b_{21} = \frac{L}{mv_s}$$

$$b_{32} = -\frac{D}{m}$$

式中:下标为 s 的量(包括  $L$ 、 $D$ 、 $g$  和所有偏导数)指标准平稳滑翔弹道上的数据。所以,系数矩阵中所有分量元素都是时间  $t$  的已知函数。线性系统式(31)近似描述了真实弹道偏差的动态特性,即

$$\delta h \approx h - h_s$$

$$\delta \gamma \approx \gamma - \gamma_s$$

$$\delta v \approx v - v_s$$

$$\delta s \approx s - s_s$$

利用第 3 节获得的初始速度  $v_0 = 7000 \text{ m/s}$  的平稳滑翔弹道,飞行时间为  $t_f = 3044 \text{ s}$ (此时滑翔高度大约为  $30 \text{ km}$ )。以此为标准平稳滑翔弹道,加入常值扰动,然后利用式(30)进行非线性仿真,利用式(31)进行线性系统仿真,得到各状态量的偏差结果如图 3 所示。本算例中小扰动分别为

$$\begin{cases} \delta h_0 = 1000 \text{ m} \\ \delta \gamma_0 = 0.1^\circ \\ \delta v_0 = 25 \text{ m/s} \\ \varepsilon_L = 0.015 \\ \varepsilon_D = 0.01 \end{cases} \quad (32)$$

由图3中可直观看出,加入扰动后,滑翔弹道呈现出明显的围绕平稳滑翔弹道振荡的特性;而且线性化系统仿真得到的弹道偏差结果与真实弹道偏差很接近,这说明得到的线性化系统可以很好地近似非线性系统在平稳滑翔弹道附近的动态特性。这为利用线性系统伴随仿真方法分析平稳滑翔弹道奠定了基础。

### 5 伴随仿真算例分析

利用线性化方程式(31)可以对平稳滑翔弹道进行伴随仿真分析,下面分别对确定性常值小扰动和随机扰动输入进行仿真算例研究。

#### 5.1 确定性常值小扰动

仍然分析第3节中得到的  $v_0 = 7000 \text{ m/s}$  的平稳滑翔弹道,研究确定性常值小扰动式(32)对终端高度  $h_f = h(t_f)$  的影响,  $t_f = 3044 \text{ s}$ , 此时滑翔高度大约为  $30 \text{ km}$ 。根据式(10)构造系统式(31)的伴随系统,由于考虑高度偏差,取式(31)的输出为  $y(t) = \delta h$ , 相应的输出矩阵为  $C(t) = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$ ; 选取伴随系统式(10)的控制  $v(t) = 0$ , 状态初值  $z(0) = C^T(t_f)$ , 仿真结果如图4所示。

图4给出了各干扰因素分别导致的终端高度偏差,即  $\delta h_f|_{\delta h_0}$ 、 $\delta h_f|_{\delta \gamma_0}$ 、 $\delta h_f|_{\delta v_0}$ 、 $\delta h_f|_{\varepsilon_L}$ 、 $\delta h_f|_{\varepsilon_D}$ , 这得益于伴随仿真的误差预算性质(式(14)~式(16)),  $\delta h_f|_T$  表示合扰动结果; 图中横轴  $t_{go}$  表示剩余飞行时间, 曲线上对应点可以解释为在剩余飞行时间是  $t_{go}$  时, 加入相应扰动得到终端  $t_f$  时刻的高度偏差。为了与实际终端高度偏差对比, 利用式(30)对各扰动因素单独(其他扰动设置为0)进行非线性仿真, 得到实际终端高度  $h_f$  与标准平稳滑翔弹道终端高度  $h_{st}$  之差, 结果如图5所示。可以看出, 非线性仿真与伴随仿真结果很接近, 这也再次表明线性化系统式(31)能够很好地反映平稳滑翔弹道在小扰动输入下的动态特性。图5中伴随仿真所有数据是通过一次连续仿真得到, 不同扰动因素的影响可以由性质1解释, 不同剩余飞行时间  $t_{go}$  的结果可以由性质2得到; 而非线性仿真需要针对各不同干扰输入分别进行, 在每一个干扰输入下, 又需要对  $t_{go}$  循环多次(本算例取循环间隔为  $10 \text{ s}$ , 大约需要300次)仿真得

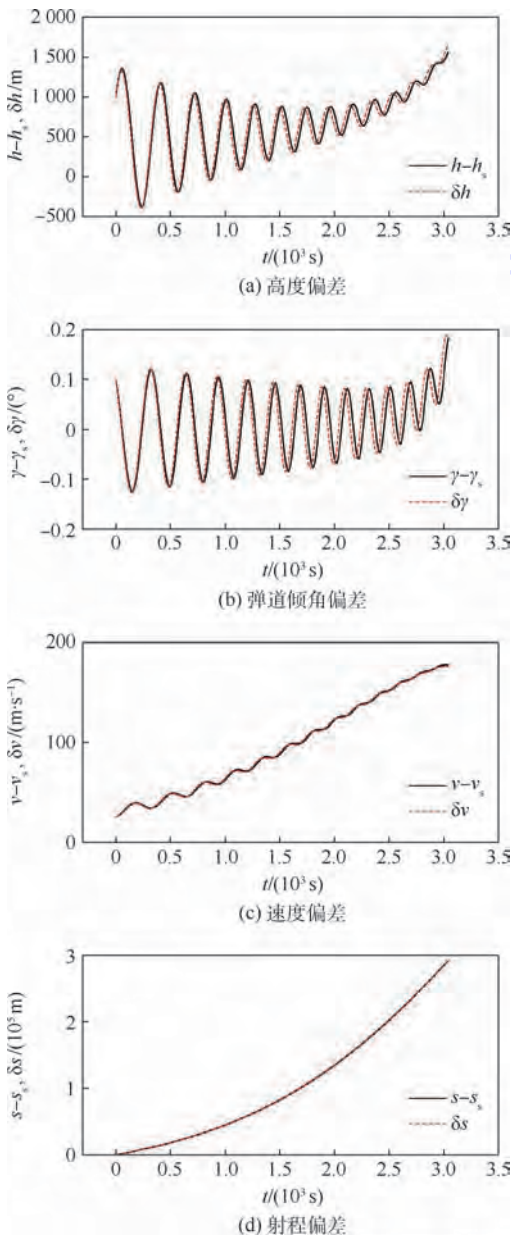


图3 平稳滑翔弹道小扰动偏差

Fig.3 Trajectory deviation from steady glide in case of small disturbance

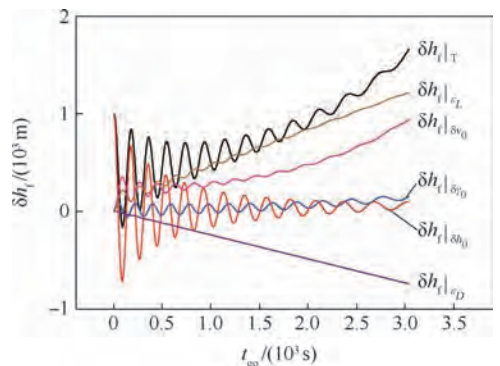


图4 伴随一次仿真输出各扰动带来的终端高度偏差

Fig.4 One adjoint simulation yields terminal height deviation for each disturbance

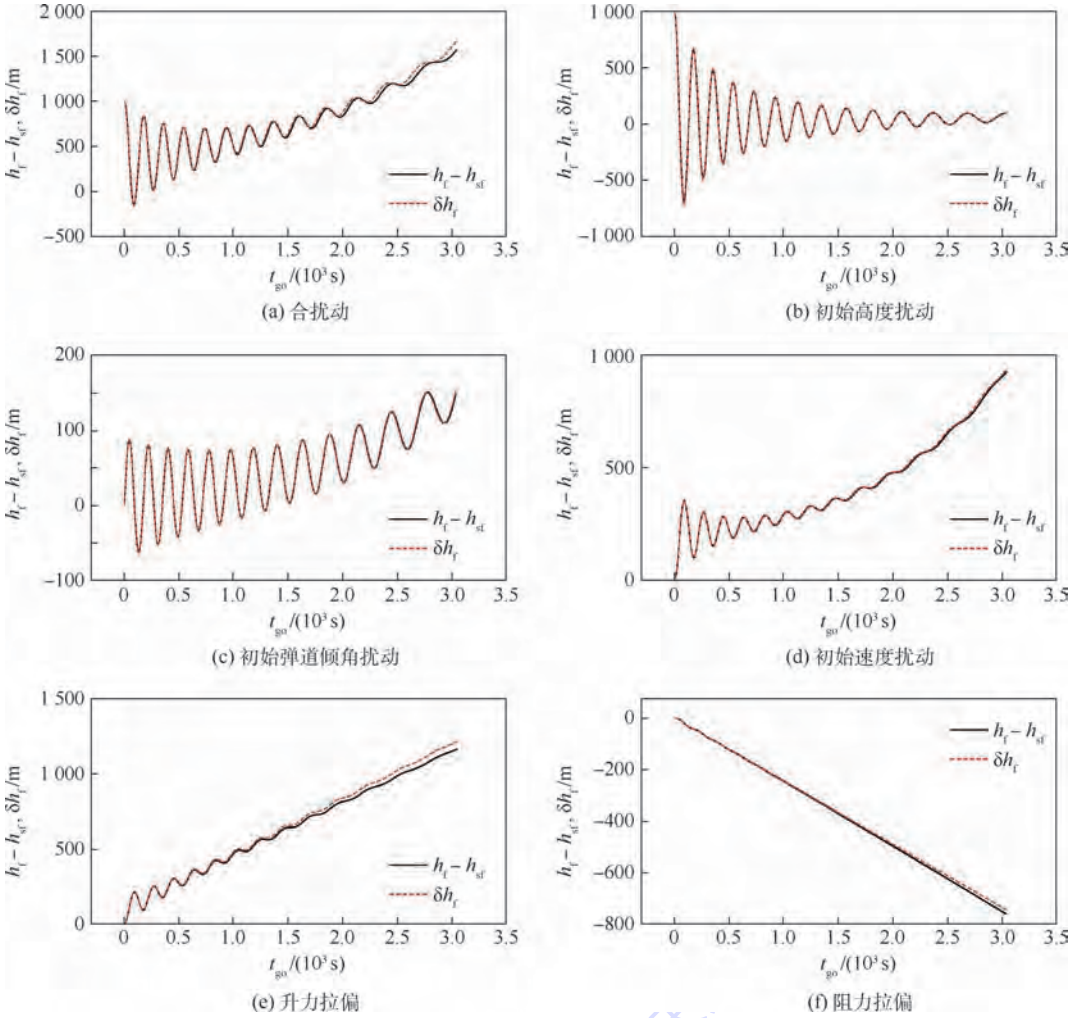


图 5 各扰动因素对终端高度偏差的影响(非线性仿真和伴随仿真)

Fig. 5 Influence of each disturbance on terminal height deviation (nonlinear and adjoint simulation)

到,即开始时按照无扰动平稳滑翔弹道仿真,当飞行时间为  $t_f - t_{go}$ ,或者说剩余飞行时间为  $t_{go}$  时加入相应的小扰动,仿真得到  $t_f$  时刻的结果。显然,伴随仿真运算量要远小于非线性仿真。考虑到平稳滑翔弹道定义的一致性,  $t_{go}$  可以对应到不同初始速度  $v_0$  优化得到的平稳滑翔弹道,这样伴随仿真的结果可以解释为不同初始速度的平稳滑翔弹道在加入同样的小扰动式(32)时,导致终端(标准平稳滑翔弹道高度大约为 30 km 时)高度的偏差;相应的数据可以用于平稳滑翔弹道制导方法的设计与分析。

从图 4 和图 5 还可以得到,在加入常值小扰动式(32)的条件下,初始速度、升力、阻力等小扰动 ( $\delta v_0, \varepsilon_L, \varepsilon_D$ ) 对终端高度偏差的影响随  $t_{go}$  增加而增大,而初始高度和初始弹道倾角等扰动 ( $\delta h_0, \delta \gamma_0$ ) 对终端高度偏差的影响随  $t_{go}$  增加振荡衰减;合扰动结果在  $t_{go}$  较小时主要由  $\delta h_0$  决定,在  $t_{go}$  较大时,主要取决于  $\delta v_0, \varepsilon_L, \varepsilon_D$  等,  $\delta \gamma_0$  影响很小。当需要另计算一组新的小扰动:

$$\begin{cases} \widehat{\delta h_0} = k_h \cdot \delta h_0 \\ \widehat{\delta \gamma_0} = k_\gamma \cdot \delta \gamma_0 \\ \widehat{\delta v_0} = k_v \cdot \delta v_0 \\ \widehat{\varepsilon_L} = k_L \cdot \varepsilon_L \\ \widehat{\varepsilon_D} = k_D \cdot \varepsilon_D \end{cases}$$

导致的终端高度偏差时,不需要重新仿真,利用式(14)~式(16)或线性叠加原理,对已经得到的仿真结果进行简单的线性组合即可。

$$\widehat{\delta h_f}|_T = k_h \cdot \delta h_f|_{\delta h_0} + k_\gamma \cdot \delta h_f|_{\delta \gamma_0} + k_v \cdot \delta h_f|_{\delta v_0} + k_L \cdot \delta h_f|_{\varepsilon_L} + k_D \cdot \delta h_f|_{\varepsilon_D}$$

式中:  $k_h, k_\gamma, k_v, k_L, k_D$  为各新扰动与原扰动比例系数;  $\widehat{\delta h_f}|_T$  为新的合扰动下终端高度偏差。

类似地,还可以分析确定性常值小扰动式(32)对终端速度、终端射程等影响,只是系统式(31)相应的输出矩阵分别取  $C(t) = [0 \ 0 \ 1$

0]和  $C(t) = [0 \ 0 \ 0 \ 1]$ 。仿真结果如图6所示。可以看出,在小扰动式(32)的条件下,影响平稳滑翔终端速度、射程的主要因素为  $\delta v_0$ 、 $\varepsilon_L$ 、 $\varepsilon_D$ ,而且小扰动会带来较大的射程偏差(百公里级)。

为了更清晰地表达各扰动对终端状态的影响,表2~表4分别列出了在不同剩余飞行时间加入单位各扰动导致的终端高度偏差、终端速度偏差和终端射程偏差。其中单位初始高度扰动设为1 km,单位初始弹道倾角扰动设为  $1^\circ$ ,单位初始速度扰动设为 1 m/s,单位升力或阻力扰动设为 1%。对比表中数据可以得到,终端状态的偏差关

于初始弹道倾角扰动最敏感,即相比于其他扰动,较小初始弹道倾角扰动会带来较大的终端状态偏差。

### 5.2 随机扰动

考虑随机扰动因素对平稳滑翔弹道的影响,为了研究方便,假设初始高度、初始弹道倾角和初始速度为服从正态分布的随机变量,期望或均值分别等于标准平稳滑翔弹道的初值,方差分别为  $\sigma_{h_0}^2$ 、 $\sigma_{\gamma_0}^2$ 、 $\sigma_{v_0}^2$ ,或者说初始状态偏差  $\delta h_0$ 、 $\delta \gamma_0$  和  $\delta v_0$  为随机变量,期望都是 0,方差分别为  $\sigma_{h_0}^2$ 、 $\sigma_{\gamma_0}^2$ 、 $\sigma_{v_0}^2$ ;气动干扰  $\varepsilon_L$ 、 $\varepsilon_D$  假设为白噪声过程,功率谱密度分别记为  $\sigma_{\varepsilon_L}^2$ 、 $\sigma_{\varepsilon_D}^2$ ,  $\sigma_{\varepsilon_L}$  和  $\sigma_{\varepsilon_D}$  为功率谱密度的平方根,通常称为线性谱密度或振幅谱密度。同时假设这些随机变量相互独立。分析在随机干扰条件下,平稳滑翔弹道终端高度、速度、射程的统计特征(标准差),或者对应于线性化系统式(31)的均方根响应。本算例中取:

$$\begin{cases} \sigma_{h_0} = 300 \text{ m} \\ \sigma_{\gamma_0} = 0.1^\circ \\ \sigma_{v_0} = 8 \text{ m/s} \\ \sigma_{\varepsilon_L} = 0.1/\sqrt{\text{Hz}} \\ \sigma_{\varepsilon_D} = 0.12/\sqrt{\text{Hz}} \end{cases} \quad (33)$$

利用式(21)构造线性化系统式(31)对应的协方差分析式(18)的伴随系统,其中系统式(18)的初值  $X(0)$  非对角线元素为 0,对角线依次为  $\sigma_{h_0}^2$ 、 $\sigma_{\gamma_0}^2$ 、 $\sigma_{v_0}^2$  和 0,输入  $U(t)$  对角线元素为  $\sigma_{\varepsilon_L}^2$ 、 $\sigma_{\varepsilon_D}^2$ ;选取伴随系统式(21)的输入  $V(t) = 0$ ,初值  $Z_0 = C^T(t_f)C(t_f)$ 。分别以终端高度、速度、射程为输出,进行伴随仿真,结果如图7所示,图中纵轴代表相应变量的标准差或均方根。可以看出,在扰动水平为式(33)情况下,终端高度的散布主要取决于升力随机扰动,在  $t_{go}$  较小时,初始高度随机扰动占主导,在  $t_{go}$  较大时,初始速度随机扰动也有较大影响;终端速度和终端射程的散布则主要取决于初始速度随机扰动。

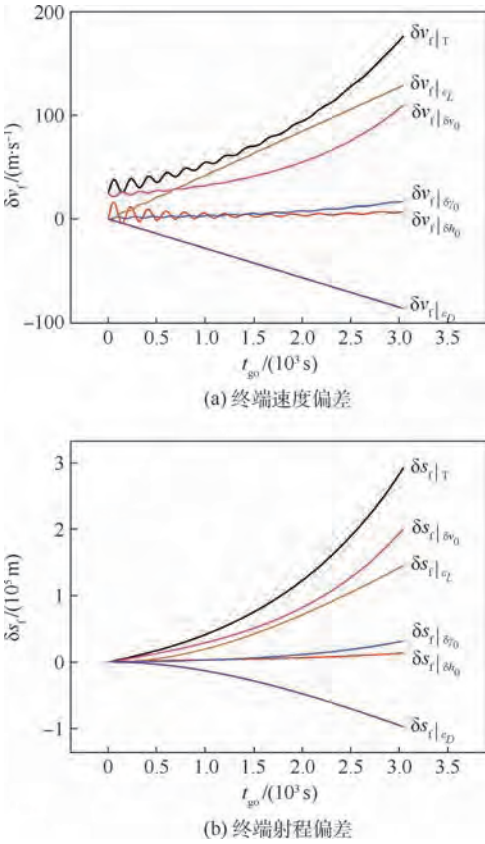


图6 伴随一次仿真输出各扰动带来的终端速度偏差和终端射程偏差

Fig.6 One adjoint simulation yields terminal range deviation and terminal velocity deviation for each disturbance

表2 单位各扰动导致的终端高度偏差

Table 2 Terminal height deviation with respect to each disturbance

$t_{go}/s$	$\frac{\delta h_f  _{\delta h_0}}{\delta h_0} / (\text{m} \cdot \text{km}^{-1})$	$\frac{\delta h_f  _{\delta \gamma_0}}{\delta \gamma_0} / (\text{m} \cdot (^\circ)^{-1})$	$\frac{\delta h_f  _{\delta v_0}}{\delta v_0} / (\text{m} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-1})$	$\frac{\delta h_f  _{\varepsilon_L}}{\delta \varepsilon_L} / (\text{m} \cdot (\%)^{-1})$	$\frac{\delta h_f  _{\varepsilon_D}}{\delta \varepsilon_D} / (\text{m} \cdot (\%)^{-1})$
500	133.1	-405.5	8.8	184.6	-121.8
1000	-104.9	623.9	11.8	322.6	-242.3
1500	-21.3	65.6	14.5	440.5	-365.8
2000	9.9	318.6	19.2	561.3	-488.4
2500	-3.8	1109.2	26.5	685.2	-610.8
3000	91.2	1286.2	36.5	801.8	-733.7

为便于对比,给出了在合随机扰动条件下终端高度和射程的非线性蒙特卡罗仿真结果,如图 8 所示。特别地,以终端速度为例,针对每一个单独的随机扰动因素,按照  $t_{go}$  间隔 50 s 循环

(大约 60 次),每一个  $t_{go}$  下进行 1 000 次非线性蒙特卡罗仿真,得到终端速度的散布情况(标准差),结果如图 9 所示。

从图 8 和图 9 可以看出,伴随仿真结果与多次

表 3 单位各扰动导致的终端速度偏差

Table 3 Terminal velocity deviation with respect to each disturbance

$t_{go}/s$	$\frac{\delta v_f  _{\delta h_0}}{\delta h_0} / (m \cdot s^{-1} \cdot km^{-1})$	$\frac{\delta v_f  _{\delta \gamma_0}}{\delta \gamma_0} / (m \cdot s^{-1} \cdot (^{\circ})^{-1})$	$\frac{\delta v_f  _{\delta v_0}}{\delta v_0} / (m \cdot s^{-1} \cdot (m \cdot s^{-1})^{-1})$	$\frac{\delta v_f  _{\delta \varepsilon_L}}{\delta \varepsilon_L} / (m \cdot s^{-1} \cdot (\%)^{-1})$	$\frac{\delta v_f  _{\delta \varepsilon_D}}{\delta \varepsilon_D} / (m \cdot s^{-1} \cdot (\%)^{-1})$
500	-1.0	20.2	1.1	14.1	-14.0
1 000	5.7	33.9	1.3	27.9	-28.2
1 500	2.5	53.7	1.7	42.3	-42.4
2 000	3.3	78.4	2.2	56.5	-56.6
2 500	5.7	115.4	3.0	70.6	-70.8
3 000	6.5	165.9	4.3	84.8	-85.0

表 4 单位各扰动导致的终端射程偏差

Table 4 Terminal range deviation with respect to each disturbance

$t_{go}/s$	$\frac{\delta s_f  _{\delta h_0}}{\delta h_0} / (km \cdot km^{-1})$	$\frac{\delta s_f  _{\delta \gamma_0}}{\delta \gamma_0} / (km \cdot (^{\circ})^{-1})$	$\frac{\delta s_f  _{\delta v_0}}{\delta v_0} / (km \cdot (m \cdot s^{-1})^{-1})$	$\frac{\delta s_f  _{\delta \varepsilon_L}}{\delta \varepsilon_L} / (km \cdot (\%)^{-1})$	$\frac{\delta s_f  _{\delta \varepsilon_D}}{\delta \varepsilon_D} / (km \cdot (\%)^{-1})$
500	2.1	9.1	0.5	3.3	-3.4
1 000	3.3	28.1	1.2	13.0	-13.3
1 500	4.6	60.9	2.0	28.1	-28.5
2 000	6.4	111.8	3.3	47.5	-47.9
2 500	9.1	188.7	5.1	69.9	-70.5
3 000	13.0	303.8	7.7	94.6	-95.3

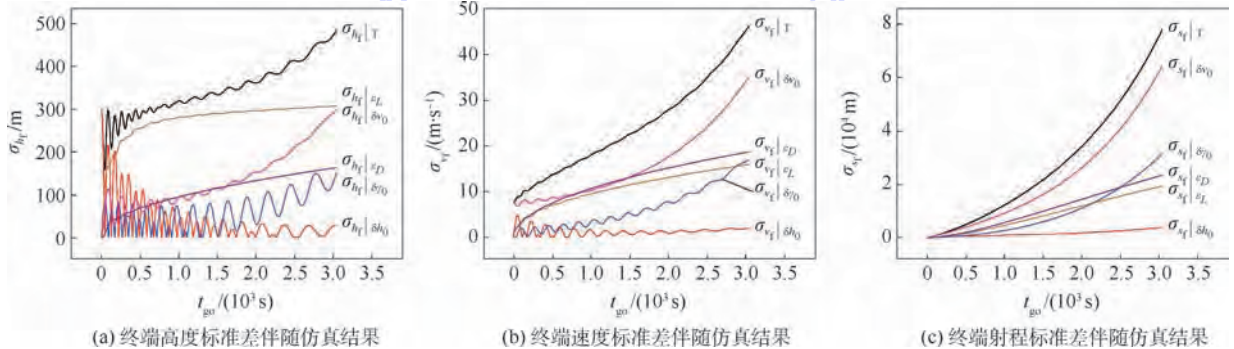


图 7 各随机扰动输入下终端高度标准差、终端速度标准差、终端射程标准差伴随仿真结果

Fig. 7 Adjoint simulation results of standard deviation of terminal height, velocity and range for each random disturbance

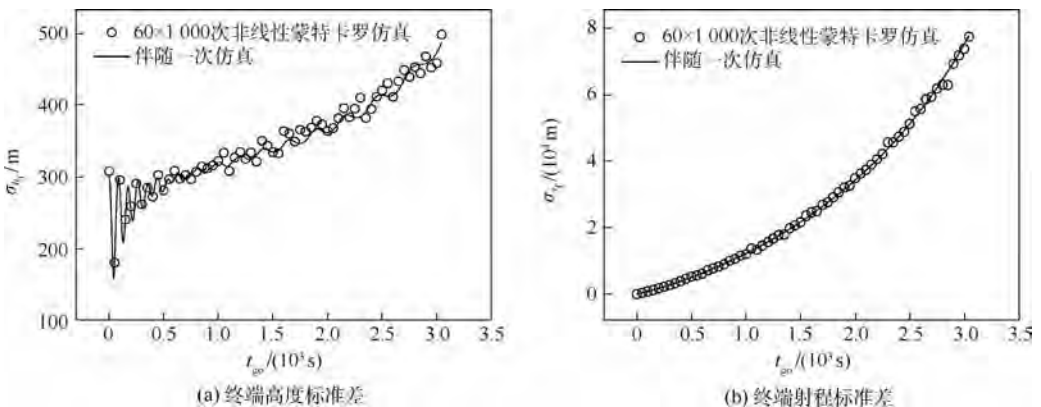


图 8 合随机扰动下终端高度标准差和终端射程标准差

Fig. 8 Total standard deviation of terminal height and range with all random disturbances

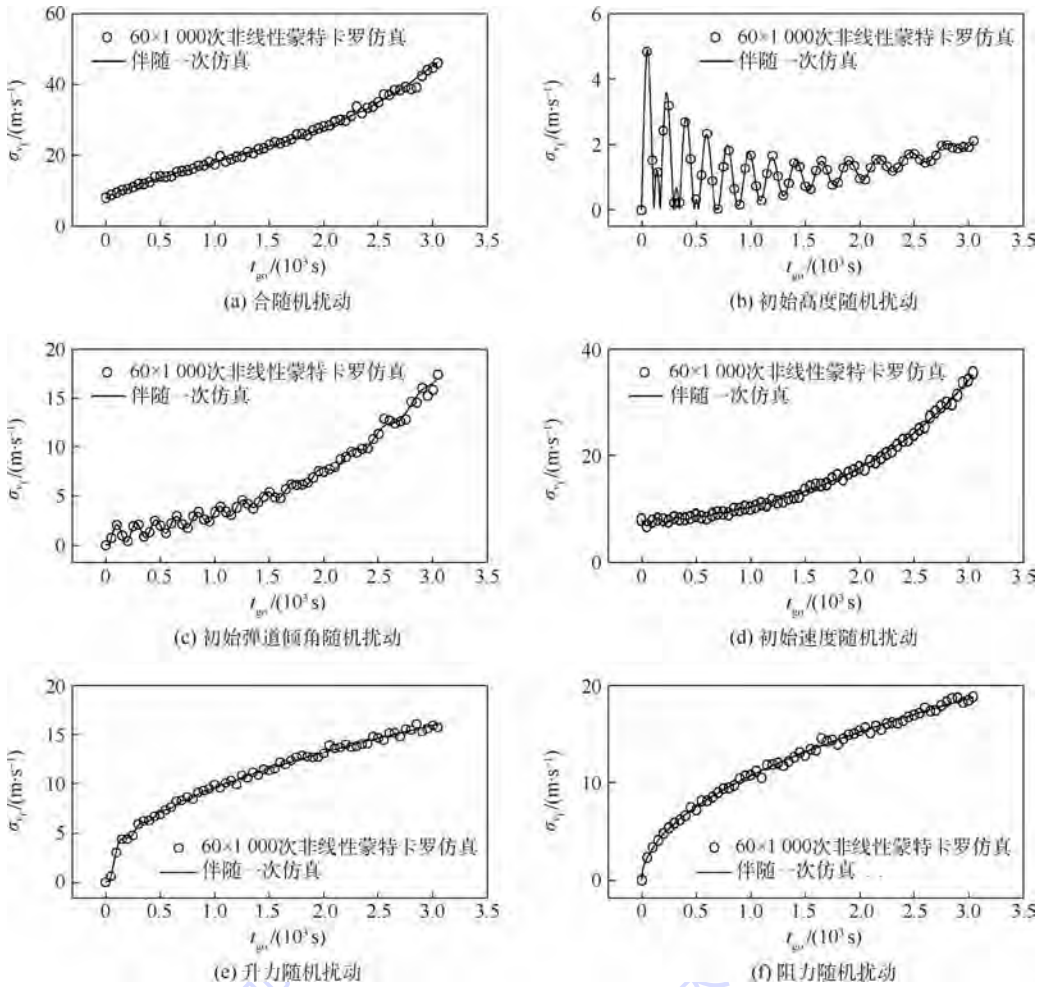


图9 各随机扰动单独作用时终端速度标准差(非线性蒙特卡罗仿真和伴随仿真对比)

Fig.9 Standard deviation of terminal velocity for each random disturbance (comparison between nonlinear Monte Carlo simulations and adjoint simulation)

非线性蒙特卡罗仿真十分吻合,但是蒙特卡罗仿真计算量(非线性仿真次数大约是  $6 \times 60 \times 1000 = 360000$ )要远大于伴随一次仿真。

## 6 结论

本文探讨了伴随仿真方法,并对高超声速飞行器平稳滑翔弹道进行了伴随仿真分析,主要结论有:

1) 利用伴随系统的数学定义式,从新的角度给出了伴随仿真方法的统一解释,包括误差预算性质和伴随一次仿真结果一般意义。

2) 随机线性系统伴随仿真方法,本质上等同于线性系统协方差分析的伴随;利用矩阵向量化运算,协方差分析的伴随与确定性线性系统的伴随数学形式相同。

3) 对于给定常值攻角,平稳滑翔弹道定义具有一致性,即平稳滑翔弹道上的任一点作为初值仍然满足平稳滑翔弹道的定义。

4) 在小扰动假设下,伴随仿真分析了滑翔初始高度、弹道倾角、速度及过程中的升力、阻力,在有确定性常值小扰动和随机扰动时,对平稳滑翔弹道的终端高度、速度、射程的影响。结果表明,终端状态的偏差关于初始弹道倾角扰动最敏感;并且对比非线性仿真和蒙特卡罗仿真,结果吻合,但是伴随仿真方法的计算效率优势明显。

## 参考文献 (References)

- [1] SÄNGER E, BREDT J. A rocket drive for long range bombers; Translation No. CGD-32 [R]. Technical Information Branch, Navy Dept., 1944.
- [2] HARPOLD J C, GRAVES C A. Shuttle entry guidance[J]. The Journal of the Astronautical Science, 1979, 37(3): 239-268.
- [3] 胡锦涛, 陈万春. 高超声速飞行器平稳滑翔弹道设计方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(8): 1464-1475.  
HU J C, CHEN W C. Steady glide trajectory planning method for hypersonic reentry vehicle[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(8): 1464-1475 (in Chinese).

- [ 4 ] 胡锦涛,张晶,陈万春.高超声速飞行器平稳滑翔弹道解析解及其应用[J].北京航空航天大学学报,2016,42(5):961-968.  
HU J C,ZHANG J,CHEN W C. Analytical solutions of steady glide trajectory for hypersonic vehicle and planning application [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2016,42(5):961-968 (in Chinese).
- [ 5 ] LANING J H,BATTIN R H. Random processes in automatic control[M]. New York:McGraw-Hill,1956:225-253.
- [ 6 ] ZARCHAN P. Tactical and strategic missile guidance[M]. 6th ed. Reston:AIAA,2012:35-105.
- [ 7 ] ZADEH L A,DESOER C A. Linear system theory: The state space approach[M]. New York:McGraw-Hill,1963:337-367.
- [ 8 ] WEISS M. Adjoint method for missile performance analysis on state-space models[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics,2005,28(2):236-248.
- [ 9 ] HE T L,CHEN W C. A new interpretation of adjoint method in linear time-varying system analysis [C] // IEEE International Conference on CIS and RAM. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017:58-63.
- [ 10 ] ZARCHAN P. Complete statistical analysis of nonlinear missile guidance systems-SLAM[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics,1979,2(1):71-78.
- [ 11 ] WEISS M, BUCCO D. Handover analysis for tactical guided weapons using the adjoint method: AIAA-2005-6157 [R]. Reston:AIAA,2005.
- [ 12 ] BUCCO D,WEISS M. Adjoint analysis of guidance systems with nonstandard inputs[J]. Journal of Guidance Control & Dynamics,2015,38(9):1800-1809.
- [ 13 ] BUCCO D. Aerospace applications of adjoint theory:ADA526349 [R]. Edinburgh:Defence Science and Technology Group,2010.
- [ 14 ] SARACHIK P,KREINDLER E. Concerning adjoints of discrete-time systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1965,10(3):350-352.
- [ 15 ] BROGAN W. Performance analysis of continuous, sampled, and multirate-sampled systems with random inputs [J]. IEEE Transactions on Automatic Control,1967,12(5):599-601.
- [ 16 ] WEISS M, BUCCO D. Adjoint method for hybrid guidance loop state-space models [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics,2015,38(4):614-622.
- [ 17 ] 林晓辉,崔乃刚,刘瞰.伴随理论及其在仿真中应用的研究 [J]. 航天控制,1996(3):61-65.  
LIN X H,CUI N G,LIU T. Research on adjoint system theory and its application in simulation technology [J]. Aerospace Control,1996(3):61-65 (in Chinese).
- [ 18 ] 邹晖,陈万春,邢晓岚.导弹制导精度 MATRIXx 伴随分析系统 [J]. 飞行力学,2001,19(4):73-77.  
ZOU H,CHEN W C,XING X L. MATRIXx adjoint system for miss distance analysis [J]. Flight Dynamics,2001,19(4):73-77 (in Chinese).
- [ 19 ] TSIEN H S. Engineering cybernetics [M]. New York:McGraw-Hill,1954:178-197.
- [ 20 ] 陈克俊,刘鲁华,孟鹤鹤.远程火箭飞行动力学与制导 [M]. 北京:国防工业出版社,2014:262-263.  
CHEN K J,LIU L H,MENG Y H. Launch vehicle flight dynamics and guidance [M]. Beijing: National Defence Industry Press,2014:262-263 (in Chinese).
- [ 21 ] GREEN M,LIMEBEER D J N. Linear robust control [M]. Upper Saddle River:Prentice-Hall,1995:85-86.
- [ 22 ] PHILLIPS T H. A common aero vehicle (CAV) model, description, and employment guide [R]. Arlington, VA: Schafer Corporation for AFRL and AFSPC,2003.

#### 作者简介:

赫泰龙 男,博士研究生。主要研究方向:飞行力学、弹道优化、拦截仿真。

陈万春 男,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:飞行力学、导弹制导与控制。

刘芳 女,博士。主要研究方向:飞行力学、拦截仿真。

# Adjoint analysis of steady glide trajectory with disturbance motion for hypersonic vehicle

HE Tailong<sup>1</sup>, CHEN Wanchun<sup>1,\*</sup>, LIU Fang<sup>2</sup>

(1. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100083, China;

2. Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of steady glide trajectory for hypersonic vehicle with disturbance motion, the adjoint method and its application were studied. Based on the mathematical definition of adjoint system, interpretations of adjoint method were achieved in a new and general way, which include performance projections in error budget form and the general meaning of single adjoint computer run. For stochastic linear system, the adjoint of covariance analysis was derived. Then, based on the definition of glide dynamics model and the definition of steady glide trajectory, the consistency of the definition of steady glide trajectory was explored by simulation analysis. The dynamics model was built for glide with disturbances on initial states and aerodynamic forces. Under the assumption of small perturbations, the linearized differential equation was obtained as a perturbation to the nominal steady glide trajectory. Finally, adjoint simulation examples were taken to analyze the influence of the deterministic and stochastic disturbances on final states of the nominal steady glide trajectory, and the results agree closely with those by nonlinear simulations and Monte Carlo simulations, but the adjoint simulation offers a substantial increase in computing efficiency.

**Keywords:** adjoint method; steady glide trajectory; simulation analysis; linear system; Monte Carlo method

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0144

# 不同热解温度下酚醛树脂复合材料渗透率测试

王丽燕<sup>1,\*</sup>, 崔占中<sup>1</sup>, 陈伟华<sup>1</sup>, 王开石<sup>2</sup>, 周启超<sup>1</sup>, 王振峰<sup>1</sup>

(1. 中国运载火箭技术研究院 空间物理重点实验室, 北京 100076;

2. 中国运载火箭技术研究院 航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

**摘 要:** 为了获得不同热解温度下酚醛树脂复合材料渗透率, 设计搭建了复合材料

气体渗透过程实验测量装置, 提出了一种测量复合材料渗透率的方法, 基于达西定律获得了复合材料渗透率。以不同热解温度下酚醛树脂复合材料为研究对象, 进行了气体渗透过程实验测量, 获得了材料上下表面气体压力变化曲线, 同时得到了渗透过材料的气体流量, 进而通过达西定律得出材料的渗透率。结果表明, 该实验装置能够实现复杂孔隙复合材料的渗透率的测量。整体上, 热解温度越高, 渗透率越大。热解温度为 400℃, 渗透率量级在  $10^{-13}$ ; 600℃ 和 800℃ 时, 渗透率量级在  $10^{-11}$ 。材料渗透率  $K$  和热解温度  $T$  满足  $K = 9.7 \times 10^{-14}T - 4 \times 10^{-11}$ 。该实验结果为该类材料的渗透和热质扩散性能分析提供了基础物性数据。

**关键词:** 酚醛树脂复合材料; 热解温度; 实验测量; 达西定律; 渗透率

**中图分类号:** TK124

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5965(2019)01-0123-07

轻质烧蚀复合材料在长时间/中低热流的加热环境下, 首先将在表面发生热解, 热解后将形成多孔疏松结构的“碳化层”, 随着受热时间的增加, “碳化层”厚度逐渐增加, 同时距离材料表面更深的位置仍在发生持续热解<sup>[1-2]</sup>, 在此条件下, 材料热解层与外表面除了存在温差外, 还存在一定的气体压力差<sup>[3]</sup>, 使得分散于材料孔隙的热解气体在压差驱动下产生沿厚度方向的渗透, 引起材料内沿厚度方向的热量传递<sup>[4-5]</sup>, 从而影响材料的隔热性能, 并对热解气体引射进入边界层产生影响。因此研究材料的气体渗透特性, 获取不同热解温度下材料的渗透率对准确地进行防隔热设计具有重要意义。

渗透率是在一定流动驱动力推动下, 流体通过多孔材料的难易程度, 表征多孔介质对流体的可渗性。它是与孔隙率、固体颗粒大小、分布、颗粒形状和排列方式有关的参数。目前, 渗透率主

要通过理论分析、数值模拟<sup>[6-7]</sup>和实验测量<sup>[8-9]</sup>3种途径获得。其中理论分析和数值模拟针对渗透率方向和大小起决定性作用的多孔介质固有属性, 建立恰当的数学模型, 预测材料的渗透率值<sup>[10]</sup>。但这2种途径都只能预测满足特定假设条件的材料的渗透率, 不能完全真实地描述流体在复杂多孔材料内的流动情况, 因而许多复杂材料的渗透率需要实验测量。渗透率实验测量方法按注射方式可分为恒压、恒定流速; 按维数又可分为一维单向测定、二维面内径向测定及三维测定等方法。这些测定方法一般依据达西定律<sup>[11]</sup>, 采用宏观的实验方法进行分析。近年来, 众多学者对多孔材料的气体渗透特性<sup>[12]</sup>、气体渗透对传热的影响<sup>[13-15]</sup>及材料的渗透率测量<sup>[16-19]</sup>进行了广泛的研究, 但对酚醛树脂复合材料的渗透率研究还比较缺乏。目前相对完整的复合材料的渗透率数据库还没有建立, 在实际使用中一般通过现场

收稿日期: 2018-03-21; 录用日期: 2018-07-13; 网络出版时间: 2018-08-03 18:35

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180803.1442.001.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180803.1442.001.html)

基金项目: 国家安全重大基础研究项目(613285); 中央军委科学技术委员会基础加强类项目(0327004)

\* 通信作者. E-mail: wang\_liyan12@163.com

**引用格式:** 王丽燕, 崔占中, 陈伟华, 等. 不同热解温度下酚醛树脂复合材料渗透率测试[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 123-129. WANG L Y, CUI Z Z, CHEN W H, et al. Test on permeability of phenolic composites under different pyrolysis temperatures [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 123-129 (in Chinese).

实验的方法测定所用材料的渗透率。

本文以不同热解温度下酚醛树脂复合材料为研究对象,利用自行设计的实验装置对其气体渗透过程进行瞬态实验测量。基于达西定律推导出渗透率的计算表达式,得到了渗透率随热解温度的变化,为进一步研究热解气体在多孔疏松碳层内流动换热提供依据。

## 1 实验

### 1.1 实验原理

#### 1.1.1 孔隙率

孔隙率是指多孔介质中孔隙的总体积  $V_f$  与多孔介质的总体积  $V$  之比,即

$$\varphi = \frac{V_f}{V} \times 100\% \quad (1)$$

当多孔介质中被流体充满时,  $V_f$  也就等于流体所占据的空间体积。孔隙率与多孔介质固体颗粒的形状、结构和排列有关,是多孔介质研究和应用中非常重要的一个参数。

本研究对不同热解温度下得到的材料进行孔隙率的测试,测试通用依据国家标准 GB/T 25995—2010<sup>[20]</sup>,计算公式如下:

$$\varphi = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $m_1$  为试样的干燥质量;  $m_2$  为饱和试样在水中的质量;  $m_3$  为饱和试样在空气中的质量。

#### 1.1.2 渗透率

渗透率是由达西定律所定义的一个重要参数。根据理论计算分析,试验件孔尺度的雷诺数  $Re_p < 1$ ,可用达西定律获得渗透率。

达西定律指出压力梯度与流速成线性关系为

$$\frac{dp}{dx} = - \frac{\mu}{K} v \quad (3)$$

式中:  $dp/dx$  为流体在  $x$  方向上的压力梯度,  $p$  为进气口压力;  $\mu$  为渗透气体的动力黏性系数,本文取实验温度  $15^\circ\text{C}$  下氮气的  $\mu = 1.726 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $K$  为多孔介质的渗透率,一般通过实验测定;  $v$  为气体流速。

据图 1 所示的几何关系,试验件渗透流量表达式为

$$Q_v = - \frac{K \Delta p}{\mu H} A \quad (4)$$

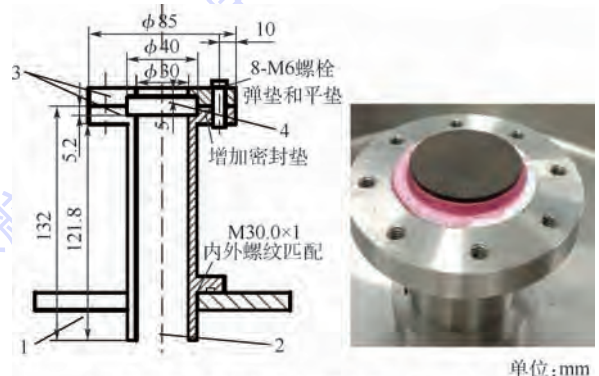
式中:  $A$  为有效渗透面积,  $A = A_f \varphi$ ,  $A_f$  为试验件面积;  $H$  为试验件厚度;  $Q_v$  为氮气流量;  $\Delta p$  为进出口压差。

则渗透率  $K$  可表示为

$$K = - \frac{Q_v H \mu}{A_f \varphi \Delta p} \quad (5)$$

### 1.2 实验过程

为获取不同热解温度下酚醛树脂复合材料的渗透率,搭建了如图 2 所示的实验系统。实验平台包括氮气气瓶、减压阀、流量传感器、压力传感器、采集装置、实验装置。管路总长 2 m,材料为钢丝软管,内径为 16 mm。实验模型为直径 40 mm 多孔介质平板模型,板厚 10 mm。用铣床对试验件侧面进行加工,减小侧面粗糙度堵塞表面的微孔。实验模型下方设置密封腔,密封腔通过管路与进气罐连通。在气路合适位置布置球阀控制流量,以保证进入密封舱的气体满足试验状态要求,见图 1。氮气从高压气瓶流出,经过减压阀降压稳压,流过北京星仪传感器技术有限公司制造的 CYYZ11 经济型压力变送器, MF4000 系列气体质量流量计,进入试验件,经试验件孔隙进入大气中。此过程中,压力变送器和流量计输出信号通过 KEYSIGHT 34972A 实时数据采集装置输入到计算机终端。实验中酚醛树脂复合材料共 3 个热解温度 ( $400^\circ\text{C}$ 、 $600^\circ\text{C}$  和  $800^\circ\text{C}$ ),在马弗炉中保温 1 h,如图 3 所示。



1—底座; 2—气流进口; 3—密封腔; 4—试验件。

图 1 实验装置装配图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment assembly

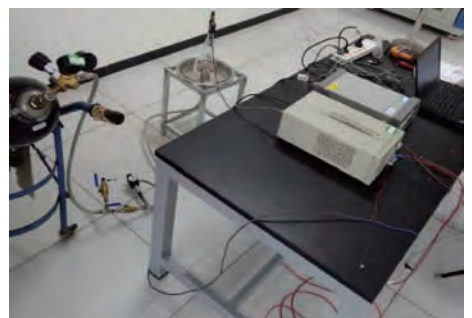


图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental system



(a) 热解温度为400℃ (b) 热解温度为600℃ (c) 热解温度为800℃

图 3 不同热解温度下酚醛树脂复合材料

Fig. 3 Phenolic composites under different pyrolysis temperatures

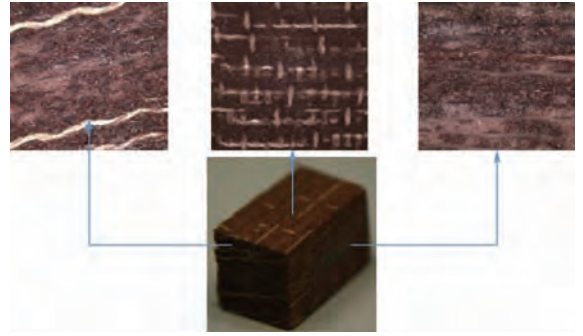


图 4 原始材料的宏观结构分析

Fig. 4 Macrostructure analysis of original material

### 1.3 误差分析

影响渗透率实验测量精度的主要因素包括: 渗流气体压力测量误差、渗流气体流量测量误差和试验件厚度测量误差,表 1 中给出了相关测量仪表及其精度参数。

实验中涉及到的直接测量的物理量有试验件厚度  $H$ , 进气口压力  $p$ , 氮气流量  $Q_v$ 。根据渗透率的计算式(5), 实验装置的误差计算公式<sup>[21]</sup>如下:

$$\frac{\delta K}{K} = \sqrt{\left(\frac{\delta H}{H}\right)^2 + \left(\frac{\delta p}{p}\right)^2 + \left(\frac{\delta Q_v}{Q_v}\right)^2} \quad (6)$$

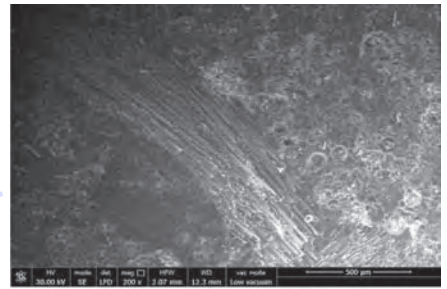
式中:  $\delta K$  为渗透率绝对误差;  $\delta H$ 、 $\delta p$  和  $\delta Q_v$  分别为试验件厚度、进气口压力和氮气流量测量的绝对误差。

表 1 仪表精度及相关参数

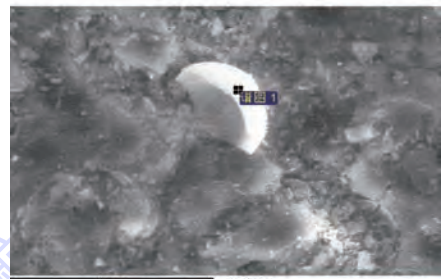
Table 1 Instrument precision and related parameters

精度及参数	游标卡尺	压力变送器	流量计
量程范围	0 ~ 200 mm	0 ~ 1.6 MPa	0 ~ 40 L/min
精度	± 0.02 mm	± 0.1% FS	± (1.5 + 0.2FS) %
最大绝对误差	0.02 mm	1 600 Pa	3.8 L/min

注: FS 表示满刻度或量程, 全称 full scale。



(a) 原始材料的微观结构



(b) 空心微球EDS能谱图

图 5 原始材料的微观结构分析及空心微球 EDS 能谱图

Fig. 5 Microstructure analysis of original material and EDS spectrum of empty microspheres

## 2 结果与讨论

### 2.1 酚醛树脂复合材料结构及成分分析

在对酚醛树脂复合材料诸多性能进行测试之前, 先分析原始材料的成分和基本结构。图 4 为材料宏观结构的显微图片, 从图中 3 个面可以看出, 该材料为二维纤维编织结构, 且铺层方向与使用方向呈一定角度, 约 13°。

图 5 为酚醛树脂复合材料的扫描电子显微镜 (SEM) 照片和 EDS 能谱图。由图 5 可进一步确认了该材料的编织结构。更重要的是, 高倍数的扫描电镜下, 发现基体材料中包含着大量的空心微球。对空心微球进行相应的 EDS 能谱图分析发现空心微球中含有大量的 Si 元素以及一定量的 Na 和 Ca 元素, 结合目前在轻质复合材料中使用广泛的几种空心微球, 可以判断该空心微球为空心玻璃微球。

### 2.2 酚醛树脂复合材料性能分析

材料在热解温度分别为 400、600 及 800℃, 在马弗炉中保温时间 1 h, 得到材料热解后的宏观图像如图 6 所示。从图 6(b) 中可以看出, 热解温度为 400℃ 时, 试样表面呈现黑色, 说明材料已经发生了热解反应, 从而产生了黑色的炭。就纤维而言, 并没有观察到明显变化; 且整体收缩较小。值得一提的是, 材料经 400℃ 热解后, 材料表面出现不均匀的玻璃状物质; 当温度升高到 600℃, 材料发生了明显的收缩, 且由于纤维骨架的限制, 宏观上出现了明显的裂纹。当温度继续上升到 800℃, 材料收缩更加严重, 导致更大的裂纹出现, 材料热解也更加严重, 基体上出现了很小的孔。

利用 SEM 结合 EDS 能谱分析材料的微观成分和结构, 图 7 为 400℃ 热解后材料的微观组织

结构和能谱分析图。从图7可以看出,材料的基体主要包含C、O、Si等元素,EDS能谱分析对轻元素不敏感。因此,在该温度下热解的产物仍然包含着大量的酚醛树脂固化物和部分热解物,属于部分热解状态。而该温度下的玻璃微球已经出现了熔化的迹象,但是熔化量很小。最后对纤维的形态做出了分析。首先对于有机纤维来说,已经不能够通过SEM发现它们的痕迹。结合有机纤维的物理性质,该纤维在280℃就已经开始

熔化,且在450℃开始分解;而其他纤维则没有明显变化。

图8为600℃热解后材料的微观组织结构和能谱分析图,从图中可以看出,材料中基体仅剩余C元素,微量O元素,即在该温度下,酚醛树脂部分热解成为热解炭。此时玻璃微球发生了明显的熔化,有机纤维基本消失。其他2种无机纤维并没有明显变化。图9为800℃热解后材料的微观

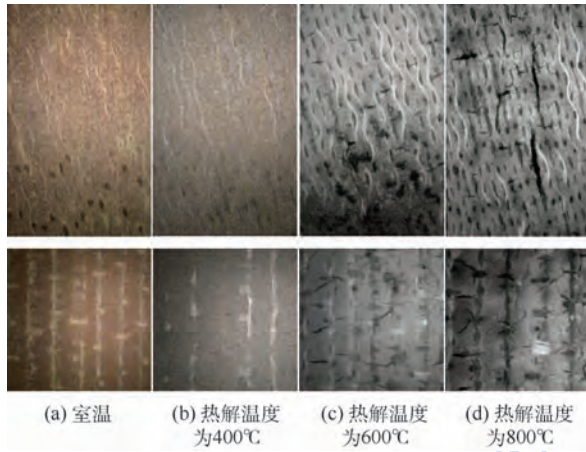


图6 不同热解温度下材料的宏观图片  
Fig.6 Macro picture of materials under different pyrolysis temperatures

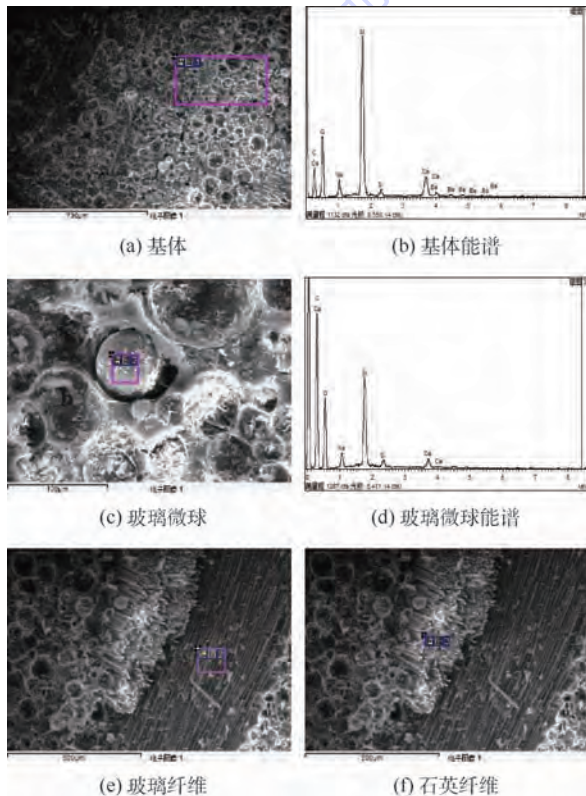


图7 400℃热解后材料的微观结构和EDS能谱  
Fig.7 Microstructure and EDS spectrum of material at 400℃ pyrolysis temperature

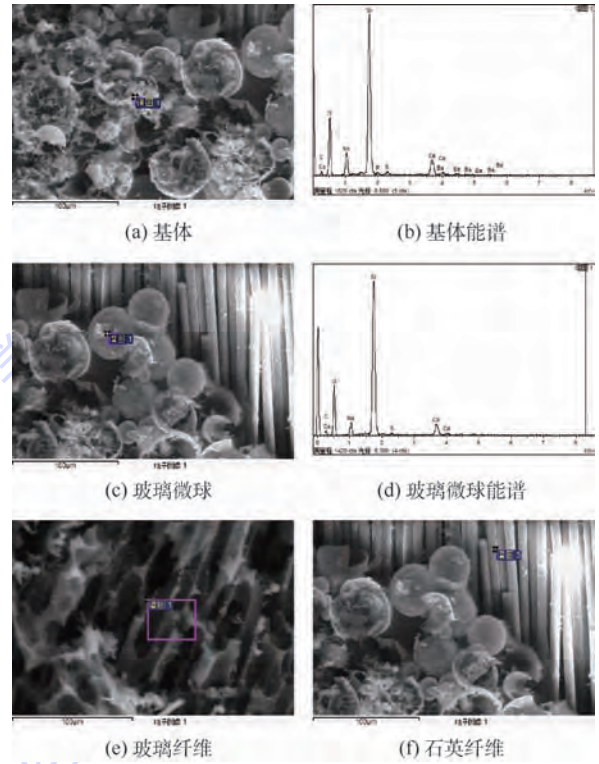


图8 600℃热解后材料的微观结构和EDS能谱  
Fig.8 Microstructure and EDS spectrum of material at 600℃ pyrolysis temperature

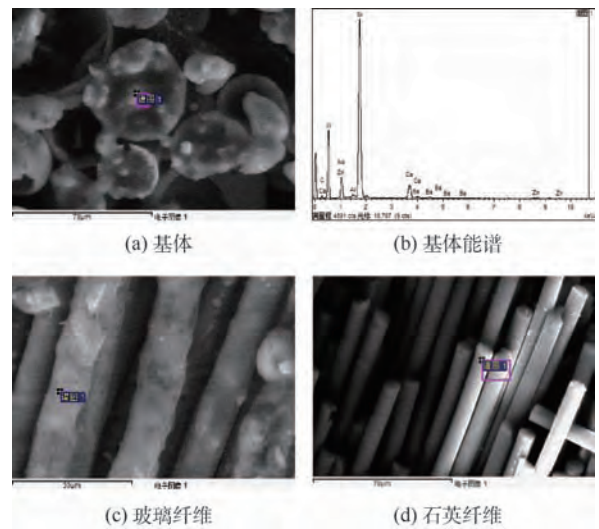


图9 800℃热解后材料的微观结构和EDS能谱  
Fig.9 Microstructure and EDS spectrum of material at 800℃ pyrolysis temperature

组织结构和能谱分析图,从图中可以看出,此时玻璃微球熔化程度进一步显著,此时玻璃纤维也有了熔化的痕迹。

由上述分析可知,酚醛树脂复合材料随着热解温度的升高,基体和纤维开始发生反应。热解温度在 400℃ 以下时材料主要发生热解反应。树脂基体热解产生热解气体,生成微孔,SEM 下,不能清晰地看到酚醛树脂热解后遗留下来的孔结构,表明其孔径极小,在纳米范围内。热解温度在 400 ~ 600℃ 时,树脂固化物裂解及碳化反应剧烈,部分纤维熔融,树脂基体自身收缩、开裂,并使纤维与基体分离,产生不规则裂纹,在显微镜下即可看到部分收缩开裂形成的贯穿性裂纹,其孔径在微米范围内。热解温度在 600 ~ 800℃ 时,酚醛树脂复合材料碳化程度继续增高,碳的消耗转而以氧化为主。在高温下,空心玻璃微球开始熔化变形,进而影响孔隙的形成。由此可知,酚醛树脂复合材料孔隙复杂,不同热解温度下渗透特性各异,无法通过理论分析或者数值模拟对其渗透特性进行分析,因而需对不同热解温度下酚醛树脂复合材料进行实验测量,获得其孔隙率渗透率。

### 2.3 渗透率测试结果分析

测试得到不同热解温度下酚醛树脂复合材料的开孔孔隙率,见表 2。由表 2 知,材料开孔孔隙率与热解温度成正相关。热解温度为 400℃ 时,开孔孔隙率为 8.99%,随着热解温度升高到 800℃,材料开孔孔隙率达到 29.4%。开孔孔隙率的增加一方面由于高温下热解程度增加,导致大量气体的释放造成的;另一方面则是由于高温下材料的纤维收缩融化,导致纤维与基体分离,产生不规则裂缝。

通过实验测得不同压差下,氮气流过试验件的质量流量,并对其进行了相应计算分析,得到相应试验件气体流速与压力梯度关系图,通过不同拟合关系式,观察  $R^2$ ,选取最合适的拟合公式,得到渗透率  $K$ ,其中试验件 1 和 2 指热解前完全相同,同时在马弗炉中热解获得的不同的试验件。

图 10 为不同热解温度下试验件压差随气体流速的变化。由图 10 可知,压差随气体流速的增大而增加,用线性拟合  $R^2 \geq 0.98$ ,热解温度为 400℃,

压差与气体流速关系为  $\Delta p = 165\ 748v + 172\ 224$ ,热解温度为 600℃,压差与气体流速关系为  $\Delta p = 14\ 743v + 5\ 611$ ,热解温度为 800℃,压差与气体流速关系为  $\Delta p = 5\ 221v + 2\ 328$ 。也就是说,压差与气体流速成线性关系,因而不同热解温度下酚醛树脂复合材料渗流模型满足达西定律,进而可得出不同热解温度对应下的渗透率。

图 11 给出了材料渗透率随热解温度的变化。由图 11 可知,不同热解温度下渗透率不同。用线性拟合  $R^2 = 0.99$ ,渗透率和热解温度满足  $K = 9.7 \times 10^{-14}T - 4 \times 10^{-11}$ 。整体上,热解温度越高,渗透率越大。因为热解温度越大,热解程度越高,材料中热解小孔和裂解缝隙越多,流体越容易通过。渗透率表征在一定流动驱动力推动下,流体通过多孔材料的难易程度。渗透率越大,一定驱动力下流体通过多孔材料越容易。热解温度为 400℃,渗透率量级在  $10^{-13}$ 。热解温度为 600℃ 和 800℃,渗透率量级在  $10^{-11}$ 。因为,热解温度在 400℃ 以下时,材料以树脂固化物的热解为主,

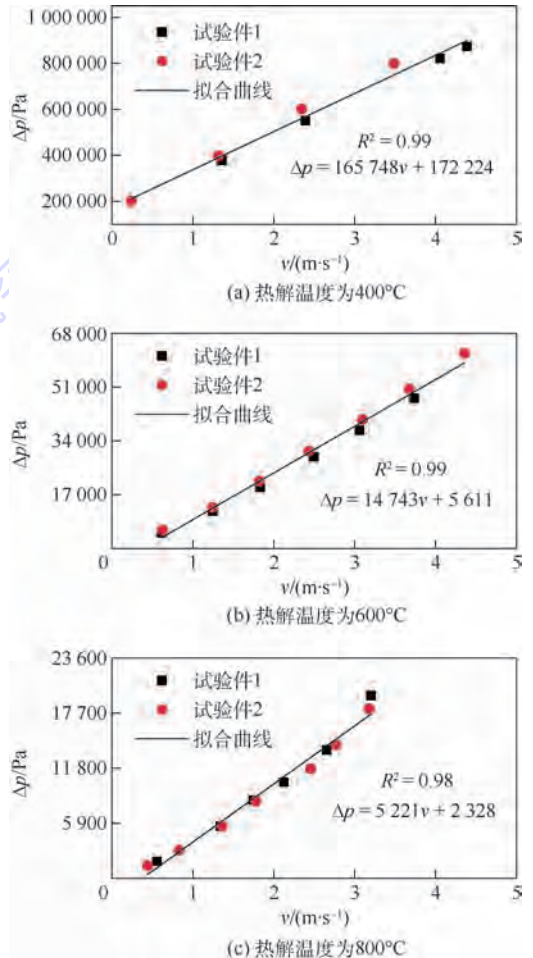


图 10 不同热解温度下压差随气体流速的变化  
Fig. 10 Variation of differential pressure with gas velocity under different pyrolysis temperatures

表 2 不同热解温度下材料的开孔孔隙率

Table 2 Porosity of materials under different pyrolysis temperatures

热解温度/℃	400	600	800
开孔孔隙率/%	8.99	19.22	29.4

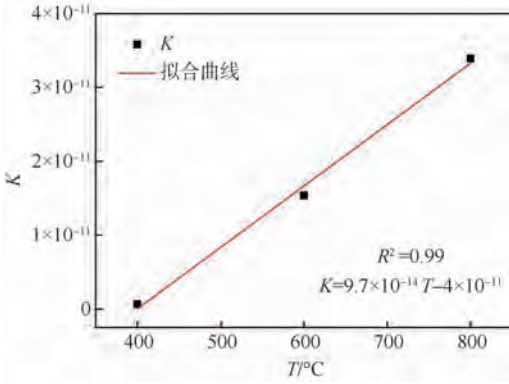


图11 材料渗透率随热解温度的变化

Fig. 11 Variation of permeability of materials with pyrolysis temperature

生成的孔主要为纳米微孔,而热解温度在 400 ~ 600℃时,材料以树脂固化物的剧烈裂解为主,且纤维收缩融化,导致纤维与基体分离,产生不规则裂缝,生成的孔以微米孔为主。在 600 ~ 800℃时,基体中残炭的氧化进一步加剧,进而产生更大的裂纹和开孔孔隙。在气体渗流过程中,流体流过宏观裂纹对渗流作用的贡献程度远大于微纳米孔。

### 3 结论

1) 400℃下热解的产物仍包含着大量的酚醛树脂固化物,属部分热解状态。600℃下酚醛树脂部分热解成为热解炭,无机纤维并没有明显变化。800℃下玻璃微球熔化程度进一步显著,此时玻璃纤维也有了熔化的痕迹。

2) 实验测量得到材料开孔孔隙率与热解温度成正相关。整体上,热解温度越高,渗透率越大。热解温度为 400℃,渗透率量级在  $10^{-13}$ 。热解温度为 600℃和 800℃,渗透率量级在  $10^{-11}$ 。渗透率和热解温度满足  $K = 9.7 \times 10^{-14} T - 4 \times 10^{-11}$ 。

### 参考文献 (References)

[1] JOSEPH H K, DAVID W K H, MORGAN C B, et al. A review of numerical and experimental characterization of thermal protection materials-Part I. Numerical modeling: AIAA-2006-4936 [R]. Reston: AIAA, 2006.

[2] DAVID W K H, JOSEPH H K, MORGAN C B, et al. A review of numerical and experimental characterization of thermal protection materials-Part III. Experimental testing: AIAA-2007-5773 [R]. Reston: AIAA, 2007.

[3] 王晶, 夏新林, 李东辉, 等. 微纳孔隙材料渗透率的瞬态实验研究[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(9): 2023-2026.

WANG J, XIA X L, LI D H, et al. Transient experiment on the permeability of micro-nano porous materials[J]. Journal of Engi-

neering Thermophysics, 2016, 37(9): 2023-2026 (in Chinese).

[4] 谢涛, 何雅玲, 吴明, 等. 气凝胶纳米多孔隔热材料传热计算模型的研究[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(2): 299-304.

XIE T, HE Y L, WU M, et al. Study on theoretical model for the effective thermal conductivity of silica aerogel composite insulating materials [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(2): 299-304 (in Chinese).

[5] 杨琼梁, 史晓鸣, 许斌, 等. 烧蚀防热层与结构耦合热传导分析的交替算法[J]. 宇航学报, 2011, 32(8): 1854-1858.

YANG Q L, SHI X M, XU B, et al. Alternative algorithm for heat transfer analysis of ablative protection layer coupled with structure [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(8): 1854-1858 (in Chinese).

[6] BENZI R, SUCCI S, VERGASSOLA M. The lattice Boltzmann equation theory and applications [J]. Physics Reports, 1992, 222(3): 145-197.

[7] ADLER P M, BERKOWITZ B. Effective medium analysis of random lattices [J]. Transport Porous Media, 2000, 40(2): 145-151.

[8] WANG T J, WU C H, LEE L J. In-plane permeability measurement and analysis in liquid composite molding [J]. Polymer Composites, 1994, 15(4): 278-288.

[9] CHEN Z Q, CHENG P, ZHAO T S. An experimental study of two phase flow and boiling heat transfer in bi-dispersed porous channels [J]. International Communication Heat and Mass Transfer, 2000, 27(3): 293-302.

[10] 李嘉禄, 吴晓青, 冯驰. RTM 中纤维渗透率预测的研究进展 [J]. 复合材料学报, 2006, 23(6): 1-8.

LI J L, WU X Q, FENG C. Research progress on the permeability prediction of fiber in RTM [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(6): 1-8 (in Chinese).

[11] 李月峰, 张东. 膨胀石墨/LiCl-NaCl 复合相变材料导热系数各向异性[J]. 功能材料, 2013, 44(16): 2409-2415.

LI Y F, ZHANG D. The anisotropic thermal conductivity LiCl-NaCl/expanded graphite composite phase change materials [J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(16): 2409-2415 (in Chinese).

[12] 黄飞, 程晓丽, 俞继军. 多孔隔热材料内压的时间响应 [J]. 宇航学报, 2010, 31(1): 233-238.

HUANG F, CHENG X L, YU J J. The study of pressure respond to time on multiaperture insulating material [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(1): 233-238 (in Chinese).

[13] 郑成航, 程乐鸣, 李涛, 等. 多孔介质内低热值气体燃烧及传热数值模拟 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(8): 1567-1572.

ZHENG C H, CHENG L M, LI T, et al. Numerical simulation of low calorific gas combustion and heat transfer in porous media [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(8): 1567-1572 (in Chinese).

[14] JIANG P X, LI M, LU T J, et al. Experimental research on convection heat transfer in sintered porous plate channels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(10-11): 2085-2096.

[15] 江龙, 金哲权, 王丽伟, 等. 不同吸附量条件下氯化铈混合吸附剂-氮的导热系数与渗透率研究 [J]. 制冷学报, 2013, 34

- (3):35-39.
- JIANG L, JIN Z Q, WANG L W, et al. Study on the thermal conductivity and permeability of composite  $\text{SrCl}_2\text{-NH}_3$  working pair under the condition of different values for adsorption quantity[J]. *Journal of Refrigeration*, 2013, 34(3):35-39 (in Chinese).
- [16] GASCOIN N. High temperature and pressure reactive flows through porous media[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2011, 37(1):24-35.
- [17] KIM H M, LETTY Y, PARK D, et al. Field evaluation of permeability of concrete linings and rock masses around underground lined rock caverns by a novel in-situ measurement system[J]. *Engineering Geology*, 2012, 137:97-106.
- [18] BYON C, KIM S J. The effect of the particle size distribution and packing structure on the permeability of sintered porous wicks[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 61:499-504.
- [19] 田波, 金哲权, 魏东升, 等. 固化石墨的渗透率测试[J]. *化工学报*, 2010, 61(S2):35-38.
- TIAN B, JIN Z Q, WEI D S, et al. Testing on permeability of compacted graphite[J]. *CIESC Journal*, 2010, 61(S2):35-38 (in Chinese).
- [20] 中国国家标准化管理委员会. 精细陶瓷密度和显气孔率试验方法: GB/T 25995—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011:4-5.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Test methods for density and apparent porosity of fine ceramics: GB/T 25995—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011:4-5 (in Chinese).
- [21] 严兆大. 热能与动力工程测试技术[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2005:45-47.
- YAN Z D. Thermal energy and power engineering testing technology[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2005:45-47 (in Chinese).

## 作者简介:

王丽燕 女, 博士研究生。主要研究方向: 高超声速飞行器防隔热、热密封及热环境。

## Test on permeability of phenolic composites under different pyrolysis temperatures

WANG Liyan<sup>1,\*</sup>, CUI Zhanzhong<sup>1</sup>, CHEN Weihua<sup>1</sup>, WANG Kaishi<sup>2</sup>, ZHOU Qichao<sup>1</sup>, WANG Zhenfeng<sup>1</sup>

(1. Science and Technology on Space Physics Laboratory, China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China;

2. Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology, China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** To acquire the permeability of phenolic composites under different pyrolysis temperatures, the experimental device which was used for the measurement in gas permeation process in phenolic composites was developed, and a method for measuring permeability of phenolic composites was presented. The formula for calculating permeability was derived based on Darcy's law. Phenolic composites under different pyrolysis temperatures were chosen as the research object. Through experiment measurement, the gas pressure between down and upper materials and the gas flow penetrating the materials were obtained. The permeability of the materials was obtained according to Darcy's law. The results show that the permeability of complex pore composites can be measured by this experimental device. Overall, the higher the pyrolysis temperature is, the greater the permeability is. The permeability level is in  $10^{-13}$  at 400°C pyrolysis temperature, and in  $10^{-11}$  at 600°C and 800°C pyrolysis temperature. Furthermore, permeability of phenolic composites  $K$  and pyrolysis temperature  $T$  meet the formula  $K = 9.7 \times 10^{-14} T - 4 \times 10^{-11}$ . The experimental results can provide basic property data for the theoretical analysis on permeability and heat and mass diffusion performance.

**Keywords:** phenolic composites; pyrolysis temperature; experimental measurement; Darcy's law; permeability

**Received:** 2018-03-21; **Accepted:** 2018-07-13; **Published online:** 2018-08-03 18:35

**URL:** [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180803.1442.001.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180803.1442.001.html)

**Foundation items:** the National Security Key Basic Research Program of China (613285); the Basic Research Project of Science and Technology Commission of the Central Military Commission (0327004)

\* **Corresponding author.** E-mail: wang\_liyan12@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0174

# 一种面向工业互联网的云存储方法

孟祥曦<sup>1</sup>, 张凌<sup>2,\*</sup>, 郭皓明<sup>3</sup>, 郭黎敏<sup>3</sup>, 夏乾臣<sup>1</sup>, 吕江花<sup>1</sup>, 马世龙<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学 计算机学院, 北京 100083; 2. 中国地震应急搜救中心, 北京 100049;

3. 中国科学院软件研究所, 北京 100190)



**摘 要:** 工业互联网是工业信息化进程中最受关注的热点, 海量异构数据管理是其中的重点之一。传统的关系数据库(RDB)对海量多源异构数据的读写和检索都存在性能瓶颈, 而近年来兴起的云数据管理方法主要是针对“键-值”(K-V)模式, 无法依靠主键以外的数据属性对数据进行快速查找。提出了一种面向工业互联网的云存储方法——StoreCDB, 在异构采样数据统一表达数据模型基础上, 实现非结构化存储管理, 同时, 利用两级索引实现海量数据的快速检索。通过实验, 在分布式集群实验平台上, 采用海量高铁列车运行模拟数据, 验证了 StoreCDB 具有良好的异构数据存储和检索性能, 为工业互联网提供了一种新的数据管理方法。

**关键词:** 工业互联网; 异构数据; 海量数据管理; 分布式文件系统; 分级索引

**中图分类号:** V219; TP333

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5965(2019)01-0130-11

信息化是工业发展的重要阶段, 信息化的出现不但大大增强了工业生产活动中数据与信息处理能力。同时, 还深刻地影响了生产的管理与组织模式。随着工业信息化发展不断深入, 信息系统与数据资源逐渐成为重要的生产要素, 在管理、组织、决策等活动中发挥越来越重要的作用。在工业信息化发展的初期, 信息化的目的在于解决生产、生活活动中的确定性(例如: 质量控制、过程管理、数据采集和状态监控等)。因此, 信息系统构建的数据模型具有确定性的结构定义与语义表达。在这一阶段, 以关系数据库为代表的数据库管理系统发挥重要作用。

随着信息技术与制造业的不断融合, 工业互联网<sup>[1-4]</sup>成为最受关注的发展热点之一。工业互联网将感知设备、计算机网络和云平台等现有的物联网技术融入进工业生产的各个环节, 用以解

决工业生产流程参数获取问题, 从而实现对工业生产的数字化、精细化与智能化管理<sup>[5-8]</sup>。

与传统的工业信息化系统相比, 工业互联网进一步强调解决非确定性问题的能力(例如: 对象状态评估、风险预测、价值判断等)。工业互联网应用场景具有以下特点:

1) 云端服务化。互联网的成熟改变了工业软件的传统架构。云端服务成为工业软件的主要架构模式。在这一模式中, 工业软件脱离原有的局域环境部署的方式, 将终端的功能弱化, 形成较为单一数据采集与结果呈现工具。在云端, 实现终端数据的处理、存储、查询与分析等功能。通过网络实现云端-终端之间的数据交换。由于业务承载量的膨胀, 云端需要具有高效的数据读写机制。一方面保证平台并发性能。另一方面, 避免云端的数据处理负担, 简化数据的各种格式清洗

收稿日期: 2018-04-02; 录用日期: 2018-09-03; 网络出版时间: 2018-09-26 13:38

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180921.0959.001.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180921.0959.001.html)

基金项目: 国家自然科学基金(61300007, 61305054); 软件开发环境国家重点实验室自主探索基金(SKLSDE-2012ZX-28, SKLSDE-2014ZX-06)

\* 通信作者. E-mail: zhangling903@163.com

**引用格式:** 孟祥曦, 张凌, 郭皓明, 等. 一种面向工业互联网的云存储方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 130-140.  
MENG X X, ZHANG L, GUO H M, et al. A new approach of cloud storage for industrial Internet[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 130-140 (in Chinese).

与预处理等操作。

2) 数据泛化。结合大数据,工业互联网的发展改变了生产活动的商业与服务模式。这一趋势导致传统的数据生产-消费关系发生颠覆性的变化。云平台结合大数据手段,在对象全寿命周期的基础上,从多个维度开展知识挖掘围绕对象行为导向、价值判断、决策支撑等开展分析与支撑。这就需数据管理系统能够支撑上层复杂挖掘分析的多值查询、布尔查询等复杂操作。

从数据的角度出发,工业互联网中数据具有一定的实时性。同时,与传统的信息系统中数据相比,其具有以下特点:

1) 数据价值具有时效性。在云平台日常数据增量过程中,为了支撑对象分析、知识提取以及事件回溯等需要实现全寿命周期的数据存储管理。另一方面,在大多数应用场景中,数据自身的信息承载价值随着时间变化。整体而言,在数据产生的初期,其信息承载价值较高,随着时间的变化,这一价值逐渐降低。从数据存储管理的角度出发,应围绕时间-价值的关系建立数据组织机制,保证数据整体有效存储管理,避免大量价值不均数据无差别管理导致的效率降低。

2) 数据不是强事务性。在云平台形成生态圈中,所产生的大量数据用于记录对象的操作行为、客观事物的监测记录、对象状态变更等。这一类数据以时间序列的方式增量,在数据生产-消费过程中,不存在复杂、频繁的变更。同时,也不具备回滚等强事务性处理的需求。因此,在数据存储管理过程中,数据库系统的内部存储管理模型较为简单,无需复杂的锁等控制机制。

在工业互联网环境中,信息系统的架构、组织与应用模式发生巨大变化。这一变化导致云平台在非结构化数据统一存储管理、高性能检索查询等方面提出较高要求。同时,与传统的应用系统相比,数据在价值分布、一致性、事务性等方面管理需求不同。这些因素叠加导致传统的数据库系统面临一定的局限性。工业互联网需要解决以下几个核心问题:

1) 在工业互联网环境中,对于各种不同的工业传感器采集的数据,如何实现异构数据的统一存储管理?

2) 在问题1)的场景中,如何围绕非结构化数据建立有效的读写控制机制,保证存储空间利用效率?

3) 在问题1)和2)的场景中,如何围绕数据建立有效的索引机制,满足海量数据中多值查询、

布尔查询等复杂查询操作的效率?

针对上述问题,本文提出了一种面向工业互联网的云存储方法——StoreCDB。StoreCDB采用并行架构,在多点协同的基础上实现多源、异构的JSON(JavaScript Object Notation)数据统一存储管理。在这一架构中,首先根据业务建立统一表达模型,来自不同数据源的异构JSON数据与该模型进行结构映射,形成统一表达映射索引,利用索引实现异构数据的统一检索。该索引具有查询执行效率受数据集规模影响较小的特点,且支持多维与布尔查询。原始数据记录以SN(Share-Nothing)的原则分布存储在底层节点的分页中,避免大量格式清洗以及后处理的负载,满足工业互联网的要求。

本文首先对数据管理方面的相关工作进行了调研;其次阐述了StoreCDB的系统架构,并分别介绍了StoreCDB的数据存储模型和数据写入操作方法及如何利用这一架构实现海量、异构数据的多值查询与布尔查询;最后讨论了系统的实现与实验结果。

## 1 相关工作

在海量异构数据存储与查询处理方面,目前主要有2种方法:典型的数据集中式管理方法和采用云数据管理及其相关技术的大数据管理。

### 1.1 数据集中式管理方法

在集中式数据管理系统中,由数据中心对数据进行统一的存储管理。感知层接收采样数据,首先将其按照一定的规则转换成为标准格式并上传至数据中心,然后再利用数据中心强大的存储与计算能力直接完成查询处理。

典型的数据集中式管理方法有关系数据库、并行数据库和数据库集群。并行数据库通过将多个关系数据库组织成数据库集群来支持海量结构化数据的处理,但这种方法在处理关键字查询时的性能要远低于“键-值”(K-V)数据库,无法快速地检索到所需要的数据。而且由于采用了严格的分布式事务处理机制<sup>[9]</sup>,在采样数据频繁上传和更新的情况下,数据处理的效率十分低下<sup>[10]</sup>。所以传统的并行数据库技术主要针对通用的数据类型,尚不能有效地支持海量异构数据的并行存储与查询处理。

另一方面,由于关系数据库系统的出发点是追求高度的数据一致性和容错性,根据CAP(Consistency, Availability, tolerance to network Partitions)

理论<sup>[11-13]</sup>,在分布式系统中,一致性、可用性和分区容错性三者不可兼得,因而并行关系数据库无法获得较强的扩展性和良好的系统可用性。

## 1.2 云数据管理及其相关技术

云计算是最近几年新兴的一个技术领域,其核心特点是通过一种协同机制,动态管理几万台、几十万台甚至上百万台计算机资源所具有的总处理能力,并按需分配给全球用户,使它们可以在此之上构建稳定而快速的存储以及其他IT服务<sup>[14]</sup>,因此云计算为海量数据处理提供了一种可能。大数据存储的形式包括分布式的文件系统、分布式的K-V对存储以及分布式数据库存储。当前的研究也集中在这3个方面,并依据应用的需求进行相关的优化。

在分布式文件系统研究方面,传统的分布式文件系统——NFS应用最为广泛<sup>[15]</sup>。为了应对搜索引擎数据,谷歌公布了其能够用于存储网页数据的分布式文件系统技术——GFS<sup>[16]</sup>。开源社区据此开发了适合部署在廉价机器上的Hadoop分布式文件系统——HDFS<sup>[17]</sup>。微软开发的Cosmos<sup>[18]</sup>支撑着其搜索、广告等业务。Facebook推出了专门针对海量小文件的文件系统Haystack<sup>[19]</sup>,以降低对磁盘寻道速度的要求。K-V对存储也是一大类重要的存储系统。亚马逊提出的Dynamo以K-V为模式,是一个真正意义上的去中心化的完全分布式存储系统,具有高可靠性、高可用性且具有良好的容错机制<sup>[20]</sup>。由于模型的简单性,K-V对存储在应用模型不是很复杂的情况下能够获得更好的性能。Bigtable是谷歌开发的基于GFS和Chubby的非关系数据库,是一个稀疏的、分布式的、持久化存储的多维度排序映射表<sup>[21]</sup>。为克服其缺乏一致性支持的缺点,谷歌将其改进为Megastore系统<sup>[22]</sup>,但是改进后的系统性能不是很高。随后谷歌进一步开发了Spanner系统,能够进一步加强一致性,将数据分布到了全球的规模,性能有了一定提高<sup>[23]</sup>。Spanner是第1个可以实现全球规模扩展并且支持外部一致事务的数据库。

然而,目前的绝大多数云数据存储系统及Map/Reduce主要面向关键词处理及静态的海量数据,在面向数据的多维逻辑、数值逻辑时,受到诸多的局限与制约,并不适用于复杂的大规模异构数据的存储与分析处理。例如MongoDB虽然广泛应用于云计算数据存储管理中,但是其索引采用B+树机制,面对多维度数据查询时,索引规模快速扩张,进而影响海量数据查询效率。

通过上述分析可以看出,工业互联网数据的存储技术目前还相当的不成熟。为了解决上述问题,本文针对工业互联网数据存储管理的核心问题进行研究,提出了面向工业互联网数据管理的存储管理方法及系统框架。

## 2 StoreCDB 系统架构

本节将描述StoreCDB的系统架构与工作机理,StoreCDB的系统结构如图1所示。

如图1所示,StoreCDB是以并行架构为基础组成的数据存储管理系统,由一个Master节点和一组Worker节点构成。Master节点主要负责统一表达建模与异构数据映射、数据分发以及全局分页存储映射管理;Worker节点实现原始数据记录在本地存储、索引维护以及查询执行等。整个架构由资源协同层、网络连接层和节点存储层构成的。

资源协同层利用抽象表达模型对采样数据进行统一的表达。通过模型实现数据的结构语义映射与互操作,并对多源异构大数据存储与管理过程进行统一表达,其中数据模型和映射关系的定义将在数据模型中详细介绍。在这一基础上,根据统一表达模型定义的主键取值实现定向分发,同时维护全局的分页存储映射信息。

网络连接层在Master与Worker节点之间建立网络连接。同时,在这一网络连接内部建立通道资源,为不同任务分配通信资源并维护会话状态。

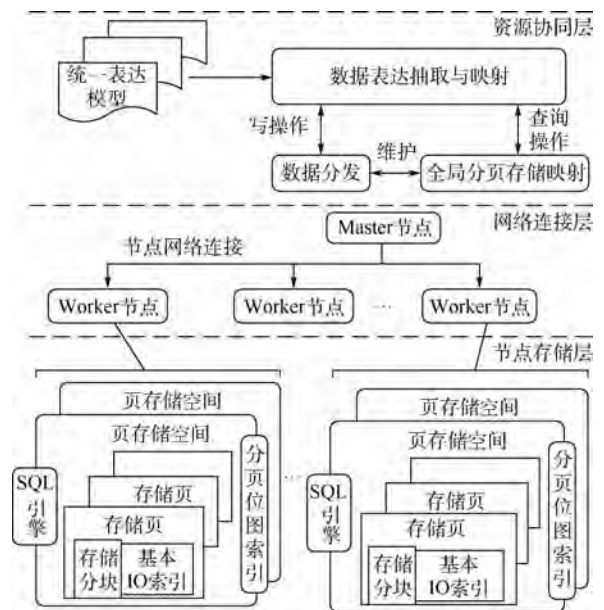


图1 StoreCDB的系统结构

Fig. 1 System structure of StoreCDB

节点存储层由 Worker 节点构成。Worker 节点在分页的基础上,实现原始数据的本地存储。同时,在统一表达模型的基础上对原始 JSON 数据记录的结构进行映射并提取属性取值,维护本地索引。通过本地的 SQL(Structured Query Language)引擎提供检索支持。

StoreCDB 在上述存储管理的基础上,发挥并行架构优势,面向工业互联网中的上层应用提供高性能 K-V、多值以及布尔查询操作支撑。

### 3 StoreCDB 数据存储模型

本节将讨论数据存储模型,并重点从数据模型和存储结构 2 个方面对 StoreCDB 的存储模型进行描述。

#### 3.1 StoreCDB 数据模型

在 StoreCDB 中,异构采样数据需要进行统一的数据模型表示。下面将从原始采样数据以及属性映射关系对 StoreCDB 的数据模型进行描述。

**定义 1** 数据记录 sensorData 是由数据标签和数据内容构成,可表示为

$$\text{sensorData} = (\text{sName}, \text{sTagName}, \text{sData}, \text{sTime})$$

其中:sName 表示传感器名称;sTagName 表示传感器采样数据的类型标签;sData 表示该标签的采样值;sTime 表示采样时间。

表 1 给出了在高速列车监控系统中各种传感器采样值的示例。

**定义 2** 采样数据序列 srcData 是由同一监控对象的所有传感器的采样值按照时间序列组织而成的,可表示为

$$\text{srcData} = ((\text{sensorData}_{ij})_{i=1}^n, \text{sTime}_{j=1}^m)$$

其中:sTime<sub>j</sub> 表示第 j 个采样时间;sensorData<sub>ij</sub> 表示第 j 个采样时间下第 i 个传感器采样值。

以表 1 为例,与其对应的采样数据序列为 srcData = (((s08, 运行速度, 215, t<sub>1</sub>), (s401, 转向架轴温, 83, t<sub>1</sub>)), t<sub>1</sub>), (((s10, 行驶速度, 216, t<sub>2</sub>), (s401, 转向架轴温, 85, t<sub>2</sub>)), t<sub>2</sub>)。

在原始采样数据中,由于数据的多源异构性,同一种传感器类型的表述可能千差万别。例如在表 1 中,传感器类型同样是行驶速度,但 s08 的描

表 1 传感器采样值的示例

Table 1 Examples of sensor sample values

传感器名称	传感器类型标签	数据记录
s08	运行速度	(s08, 运行速度, 215, t <sub>1</sub> )
s10	行驶速度	(s10, 行驶速度, 216, t <sub>2</sub> )
s401	转向架轴温	(s401, 转向架轴温, 83, t <sub>1</sub> )
s401	转向架轴温	(s401, 转向架轴温, 85, t <sub>2</sub> )

述是运行速度,而 s10 的描述是行驶速度。为了统一管理,在 StoreCDB 中有一个属性映射表,即  $f: \text{sTagName} \rightarrow \text{tagName}$

其中:sTagName 表示原始采样数据中传感器类型标签;tagName 是 StoreCDB 中与 sTagName 对应的统一表示的属性名称。一个 tagName 可以对应多个 sTagName,通过属性映射表,StoreCDB 可以为不同标准的采样数据类型提供统一的表示。

在 StoreCDB 中,为了对异构数据进行统一表示,在主节点接收采样数据之前,需要将采样数据序列转换为统一的数据格式。为了更好地描述数据转换格式,本文先给出了如下定义:

**定义 3** 给定采样时刻 sTime 的采样数据 srcData<sub>sTime</sub> = ((sensorData<sub>i</sub>)<sub>i=1</sub><sup>n</sup>, sTime), 其对应的原始数据 data 由数据内容和采样时间构成,可表示为

$$\text{data} = (\text{content}, \text{sTime})$$

**定义 4** 给定原始数据的数据内容 content, 其中的采样属性集合 propertySet 可表示为

$$\text{propertySet} = (\text{tagName}_i, \text{pos}_i)_{i=1}^m$$

其中:tagName<sub>i</sub> 表示从 content 中提取的第 i 个传感器类型;pos<sub>i</sub> 表示该类型在 content 中的位置。

通过上述定义,在 StoreCDB 中可以将采样数据转换成为统一的数据格式,如定义 5 所示。

**定义 5** 统一数据格式 D 由三元组构成,可表示为

$$D = (\text{data}, \text{propertySet}, \text{timeStamp})$$

其中:timeStamp 表示数据接收时间。

以表 1 为例,假设 t<sub>s1</sub>时刻接收到 t<sub>1</sub>时刻的采样数据,统一数据格式 D<sub>1</sub> = (((((运行速度, 215), (转向架轴温, 83)), t<sub>1</sub>), ((速度, 1), (轴温, 2)), t<sub>s1</sub>), 其中 data 项直接保存了原始采样数据内容,propertySet 中的“速度”则是 data 中的“运行速度”在 StoreCDB 中的属性映射,同样“轴温”是“转向架轴温”的属性映射,t<sub>s1</sub>则是数据接收时间。

#### 3.2 StoreCDB 数据存储结构

在 StoreCDB 中,存储管理层采用主从结构进行分布式管理,由一个主节点(Master)和多个从节点(Worker)构成,其中主节点在统一表达模型的基础上负责增量数据分发、全局存储分页映射维护、高性能数据查询任务调度,从节点存储实际的采样数据、维护本地索引、执行查询任务。StoreCDB 的存储管理结构如图 2 所示。

如 3.1 节所述,多源异构采样数据转换成统

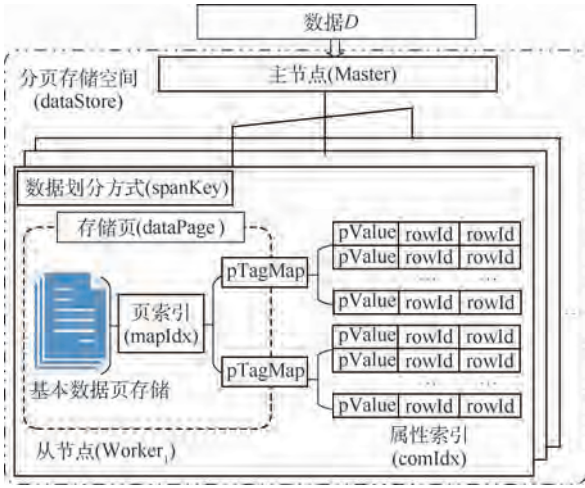


图2 StoreCDB的存储管理结构

Fig. 2 Storage management structure of StoreCDB

一的数据格式之后封装为数据  $D$ ，主节点接收到数据  $D$  之后，首先根据  $D$  中的定义为主键的属性取值，映射到对应的分页存储空间，再根据数据划分方式找到对应的存储页，最后主节点将数据  $D$  发送给相应的从节点。

从节点接收到数据之后，首先将数据添加到对应的存储页，然后更新相应的页索引，再依据属性集  $propertySet$  中的属性值更新属性索引。

页索引记录了数据与存储位置之间的映射关系，实现了快速检索数据的一级索引，定义如下：

**定义6** 页索引  $mapIdx$  可表示为

$$mapIdx = (rowId_i, idx_i)_{i=1}^n$$

其中： $rowId_i$  表示第  $i$  个数据的行号； $idx_i$  表示第  $i$  个数据对应的存储位置指针。

属性索引记录了属性集  $propertySet$  中各属性值与页索引  $mapIdx$  之间的映射关系，实现了快速检索数据的二级索引，定义见定义7。

**定义7** 属性索引  $comIdx$  可表示为

$$comIdx = (pTagMap_i)_{i=1}^n$$

其中： $pTagMap_i$  为第  $i$  个属性的值域分布的映射向量集合，形式如下：

$$pTagMap = (tagName, (valueArray_i)_{i=1}^m)$$

其中： $tagName$  表示属性的标识； $valueArray_i$  表示该属性第  $i$  个属性值的索引映射集合，可表示为  $valueArray = (pValue, (rowId_i)_{i=1}^l)$

其中： $pValue$  表示一个属性值。 $rowId_i$  为第  $i$  个包含该属性值的数据行号，与页索引中的行号对应。

依据不同的划分方式，采样数据存放在一系列存储页中，记为  $dataPage$ 。每个存储页对应一个从节点，而一个从节点可以包含多个存储页，定

义如下：

**定义8** 存储页  $dataPage$  表示为

$$dataPage = (spanKey, (D_i)_{i=1}^n, mapIdx, comIdx)$$

其中： $spanKey$  表示数据划分方式，可以按照接收时间划分、某属性的取值范围划分、传感器类型划分等，在本文中默认采用按接收时间划分； $(D_i)_{i=1}^n$  为存储的数据； $mapIdx$  表示页索引，记录数据与存储位置的映射关系； $comIdx$  表示属性索引，记录属性集与页索引之间的关系。

为了支持多源异构数据，StoreCDB 依据不同的应用场景分为若干个不同的源数据集，并为每一类源数据集定义了一个存储仓库，记为  $dataStore$ ，如定义9所示。

**定义9** 分页存储空间  $dataStore$  可表示为

$$dataStore = (storeID, (dataPage_i)_{i=1}^n)$$

其中： $storeID$  表示分页的编号； $dataPage_i$  表示划分的第  $i$  个存储页。

### 3.3 StoreCDB 中的索引结构

StoreCDB 的 Worker 节点采用两级索引结构：页索引和属性索引。其结构如图3所示。

页索引采用行号 ( $rowId$ ) 和存储位置指针 ( $idx$ ) 的方式记录了每一条原始数据在分页中的存储位置，即通过数据所在行号便可直接定位到物理存储位置。在页索引中，行号并不是基于顺序查找，而是通过散列完成，索引中的行号即为该散列的主键，而其指针指向数据存储的物理位置，即对应的从节点及其上的存储页。页索引具体结构如图4所示。

属性索引用于记录一条数据记录在不同属性上取值与该数据记录页索引的映射关系。属性索引将属性集  $propertySet$  中的各属性分别进行单维投影，按照属性分类，将属性值与对应的页索引关联起来，实现多值与布尔查询。属性索引具体结构如图5所示。

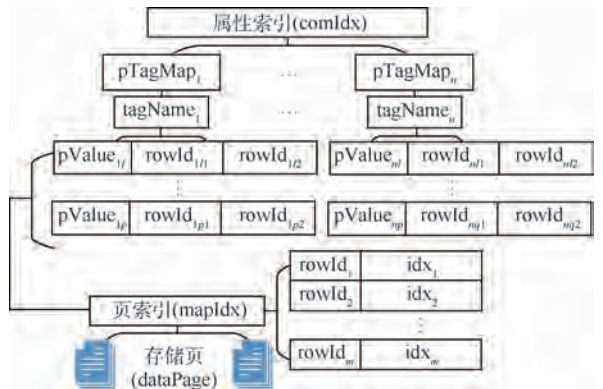


图3 StoreCDB的索引结构

Fig. 3 Index structure of StoreCDB

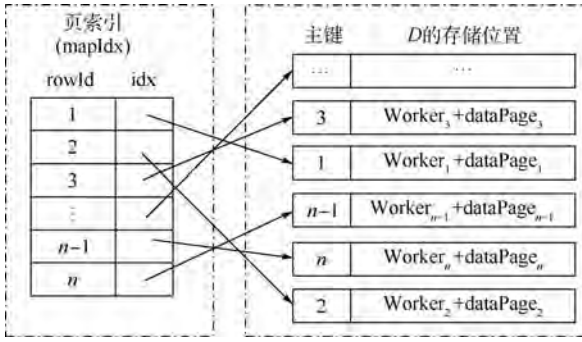


图 4 StoreCDB 的页索引结构

Fig. 4 mapIdx structure of StoreCDB

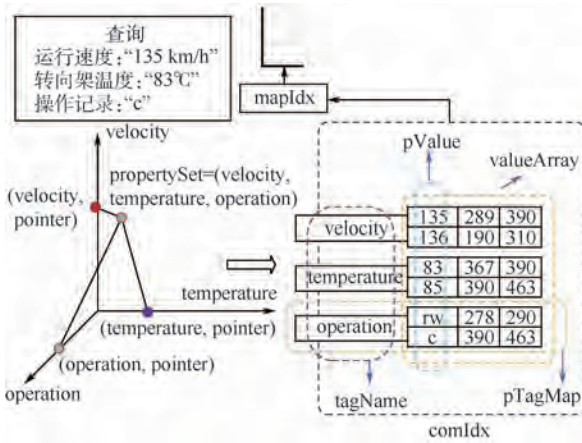


图 5 StoreCDB 的属性索引结构

Fig. 5 comIdx structure of StoreCDB

本文结合实例来讨论属性索引的结构,在图 5 中,对应于 StoreCDB 中的属性映射表,属性集  $propertySet = (\text{“velocity”}, \text{“temperature”}, \text{“operation”})$ ,属性索引对其中各属性进行单维投影,投影结果如表 2 所示,其中数据行号对应于页索引中的行号,通过页索引 mapIdx 和行号 rowId 即可获得数据的存储位置,从而实现快速检索。

当要查找满足“运行速度 135 km/h,转向架温度 83℃ 并且操作记录为 c”的数据时,首先根据属性值 ( $velocity = 135 \text{ km/h}$ ,  $temperature = 83^\circ\text{C}$  和  $operation = c$ ) 找出对应的行号,如表 3 所示。由于行

表 2 属性索引的单维投影范例

Table 2 Example of a one-dimensional projection of comIdx

属性	tagName	属性值 pValue	数据行号	rowId
velocity		135 km/h	289	390
		136 km/h	190	310
temperature		83℃	367	390
		85℃	390	463
operation		rw	278	290
		c	390	463

表 3 属性索引的查询实例

Table 3 Query instance of comIdx

属性	tagName	属性值 pValue	数据行号	rowId
velocity		135 km/h	289	390
temperature		83℃	367	390
operation		c	390	463

号 390 是所有属性值共同的取值,可以得出“运行速度 135 km/h,转向架温度 83℃ 并且操作记录为 c”的数据存放在 390 行,从页索引中找出 390 行的存储位置,便可以获得查询结果。

## 4 StoreCDB 中数据写入操作

### 4.1 数据写入操作过程

在 StoreCDB 中,主节点在接收到数据写入请求后,需要根据写入数据  $D$  的主键 (primeKey) 确定分发的 dataPage 和对应的从节点。从节点接受到数据  $D$  之后,写入对应的分页中。然后根据返回的 rowId 和  $D$  的 propertySet 维护本地页索引和属性索引。算法 1 给出了数据写入操作过程。

#### 算法 1 数据写入算法。

输入:数据  $D$ 、页索引 mapIdx、属性索引 comIdx。

输出:写入完成标记  $R$ 。

- 1 /\* 主节点接到写入数据请求 \*/
- 2 primeKey ← getPrimeKey ( $D$ );
- 3 propertySet ← getPropertySet ( $D$ );
- 4 dataPage ← hashPage (primeKey);
- 5 Worker ← hashNode (dataPage);
- 6 /\* 数据  $D$  被分发到从节点 \*/
- 7 将数据  $D$  写入对应的 dataPage;
- 8 mapIdx ← updateMapIdx ( $D$ , mapIdx);
- 9 comIdx ← updateComIdx ( $D$ , dataPage, comIdx);
- 10  $R$  ← createR (dataPage, primeKey, propertySet);
- 11 return ( $R$ )

算法中,  $getPrimeKey(D)$  函数返回数据  $D$  中的主键 primeKey;  $getPropertySet(D)$  函数返回数据  $D$  中的属性集合;  $hashPage(\text{primeKey})$  函数返回与 primeKey 对应的 dataPage;  $hashNode(\text{dataPage})$  函数返回与 dataPage 对应的从节点;  $updateMapIdx(D, \text{mapIdx})$  函数返回写入数据  $D$  之后更新的页索引 mapIdx;  $updateComIdx(D, \text{dataPage}, \text{comIdx})$  返回更新后的属性索引 comIdx;  $createR(\text{dataPage}, \text{primeKey}, \text{propertySet})$  函数返回的是数据写入成功返回值  $R$ 。

## 4.2 页索引更新操作

在 Worker 节点本地数据写入过程中,完成原始数据记录在分页存储后,需要更新页索引中行号顺序增加并记录映射地址。通过这一页索引可以行号从分页中提取原始数据记录。算法 2 给出了页索引的更新过程。

**算法 2** 页索引的更新算法。

输入:数据  $D$ 、页索引  $\text{mapIdx}$ 。

输出:更新结果  $\text{mapIdx}$ 。

```

1  rowId ← getRowId( $D$ );
2  idx ← hash(rowId);
3  dataPage ← getDataPage(idx);
4  锁定数据页 dataPage 的写操作;
5  将  $D$  写入 dataPage 的尾部;
6  mapIdx ← updateIdx(rowId, idx);
7  解锁数据页 dataPage 的写操作;
8  return(mapIdx)

```

算法 2 中,  $\text{getRowId}(D)$  函数返回数据  $D$  中的数据行号;  $\text{hash}(\text{rowId})$  函数返回  $\text{rowId}$  对应的哈希地址,即数据  $D$  应该存储的从节点及其上的存储页;  $\text{getDataPage}(\text{idx})$  函数获取  $\text{idx}$  指向的从节点中的存储页  $\text{dataPage}$ ; 然后锁定  $\text{dataPage}$  的写操作; 将  $D$  存入指定位置后,通过函数  $\text{updateIdx}(\text{rowId}, \text{idx})$  更新  $\text{mapIdx}$ , 然后解锁  $\text{dataPage}$  的写操作。

## 4.3 属性索引更新操作

从节点接收到数据后,首先获取数据  $D$  的属性集合、行号,并从  $\text{dataPage}$  中取出属性索引  $\text{comIdx}$ , 若  $\text{comIdx}$  不存在则创建新的属性索引,否则对于每个属性的每个属性值,更新其对应的索引映射集合  $\text{valueArray}$ , 并将其写入  $\text{comIdx}$  进行更新。算法 3 给出了属性索引的更新过程。

**算法 3** 属性索引的更新算法。

输入:数据  $D$ 、数据所需存储页  $\text{dataPage}$ 、属性索引  $\text{comIdx}$ 。

输出:更新结果  $R$ 。

```

1  propertySet ← getPropertySet( $D$ );
2  rowId ← getrowId(dataPage);
3  comIdx ← getComIdx(dataPage);
4  if comIdx 不存在 then
5  创建属性索引 comIdx;
6  for each tagName ∈ propertySet do
7  for each pValue ∈ tagName do
8  valueArray ← addArray(pValue, rowId);
9  将 valueArray 存入 tagName 对应的 pTag-

```

```

10 comIdx ← upcomIdx(pTagMap);

```

```

11 return(comIdx)

```

算法 3 中,  $\text{getPropertySet}(D)$  函数返回数据  $D$  中的属性集合;  $\text{getrowId}(\text{dataPage})$  函数获取存储页中的行号;  $\text{getComIdx}(\text{dataPage})$  函数从  $\text{dataPage}$  中获取属性索引  $\text{comIdx}$ ;  $\text{addArray}(\text{pValue}, \text{rowId})$  函数更新索引映射集合  $\text{valueArray}$ ;  $\text{upcomIdx}(\text{pTagMap})$  函数更新  $\text{comIdx}$ 。

## 5 StoreCDB 中数据查询操作

在上述索引技术的基础上, StoreCDB 系统通过查询引擎实现全局范围内的数据查询。这一过程由 2 个步骤完成:

1) 查询分解。主节点接收到查询后,将其分解为二叉任务树,其中叶节点为单值查询任务,中间节点为操作连接符,连接 2 个单值查询任务。

2) 查询处理。主节点将二叉任务树分发至相应的从节点进行查询,从节点对操作连接符两边的单值查询进行交叉过滤,形成局部查询结果,全部任务完成后形成最终的查询结果返回主节点。

**定义 10** 查询  $\text{query}$  可以表示为

$$\text{query} = (f(\text{tagName}_i, \text{pValue}_i), \text{op}_i)_{i=1}^n$$

其中:  $\text{tagName}_i$  表示第  $i$  个属性;  $\text{pValue}_i$  表示第  $i$  个属性值;  $f(\text{tagName}_i, \text{pValue}_i)$  表示该属性与属性值之间的关系;  $\text{op}_i$  表示操作连接符,取值为 AND, OR, NOT,  $\emptyset$ ,  $\emptyset$  表示没有操作连接符。

以表 3 中的查询为例,“运行速度 135 km/h, 转向架温度 83°C 并且操作记录为 c”的查询可以表示为  $\text{query} = (\text{velocity} = 135 \text{ km/h}) \wedge (\text{temperature} = 83^\circ\text{C}) \wedge (\text{operation} = \text{c})$ 。当主节点接收到查询任务  $\text{query}$  后,将其分解为多个单值查询任务,并通过操作连接符将其转换为一棵二叉任务树,二叉任务树结构如图 6 所示。

主节点将二叉任务树分发给相应的从节点后,等待所有从节点完成查询任务后,汇集全部查询结果。从节点接收到二叉任务树后,通过遍历二叉任务树对本地存储页进行匹配和筛选,首先从当前二叉任务树的最左叶节点开始,提取该左

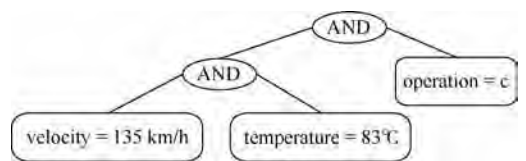


图 6 二叉任务树的实例

Fig. 6 Instance of task binary tree

叶节点与右节点对应的属性取值映射索引 pTag-Map,经过筛选得到局部结果集合。将该结果作为当前子树的查询结果与上一级的右叶节点继续筛选,直到完成全部叶节点的属性取值映射索引的筛选。算法4给出了从节点的查询处理过程。

**算法4** 从节点查询处理算法。

输入:二叉任务树 qtree、页索引 mapIdx、属性索引 comIdx。

输出:查询结构  $R$ 。

```

1 while true do
2 lNode ← getLNode(qtree);
3 if lNode = op then /* 左节点是操作符 */
4 rNode ← getRNode(qtree);
5 /* 获取左右节点的属性及取值和操作符 */
6  $f_L$  ← getQuery(rNode);
7 ( $f_L$ , op) ← getFOp(rNode);
8 query ← ( $f_L$ , op,  $f_R$ );
9 else then
10 op ← getFOp(lNode);
11 /* 获取父节点的操作符 */
12 rNode ← getRNode(qtree);
13  $f_L$  ← getQuery(lNode);
14  $f_R$  ← getQuery(rNode);
15 query ← ( $f_L$ , op,  $f_R$ );
16 /* 通过页索引和属性索引执行查询 */
17  $R$  ← exeQuery(query, mapIdx, comIdx);
18 /* 裁剪 qtree 的左右子节点,将结果存放在当前 op 中 */
19 qtree ← remove(lNode, rNode, R);
20 if qtree 全部裁剪 then
21 return (R)

```

在算法4中, getLNode(qtree) (getRNode(qtree)) 函数返回 qtree 的左节点(右节点); getQuery(node) 函数获取节点的属性及取值;  $f_L$  与  $f_R$  分别表示当前查询中左侧节点和右侧节点的属性与取值; getFOp(rNode) 函数获取父节点的操作符; exeQuery(query, mapIdx, comIdx) 利用页索引 mapIdx 和属性索引 comIdx 执行查询 query; remove(lNode, rNode, R) 裁剪当前任务树的左右子节点,并将结果集存放在当前 op 节点中。

## 6 系统实现及性能分析

本节在模拟数据集的基础上,采用 StoreCDB 实验系统,旨在对 StoreCDB 的查询效率以及可扩展性进行了一系列实验验证。其中 StoreCDB 实

验系统是在分布式集群上进行部署,形成一个协同工作的 StoreCDB 系统。

本实验中,主节点的处理器为 Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2620,主频 2.0 GHz,内存大小为 2 GB;从节点的处理器为 Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2620,主频 2.0 GHz,内存大小为 3 GB。

实验所用的数据为基于实车采集数据的模拟数据集,其由数据格式为不同的 CRH3 和 CRH5 动车组轴温采样模拟数据 (Src1) 和 CRH3 和 CRH5 动车组运行状态数据 (Src2) 组成。表4列出了实验中的主要参数。

在实验中,本文将 StoreCDB 与 MySQL Cluster 和 HBase 数据库进行对比测试。重点针对 StoreCDB 的查询响应时间及加速比进行了分析。

为了全面评估 StoreCDB 对 K-V 查询以及数据关系库 (RDB) 查询的支持,实验的测试用例采用了如下2种查询:

### 1) K-V 查询

Select \* From table Where date = "2017-05-01"。其中:table 表示不同的数据源,分别为 Src1 或 Src2;date 表示关键字,查找所有与"2017-05-01"相关的数据。

### 2) RDB 查询

Select \* From table Where velocity = 135 AND temperature = 83 AND (operation = 'c' OR operation = 'rw')。

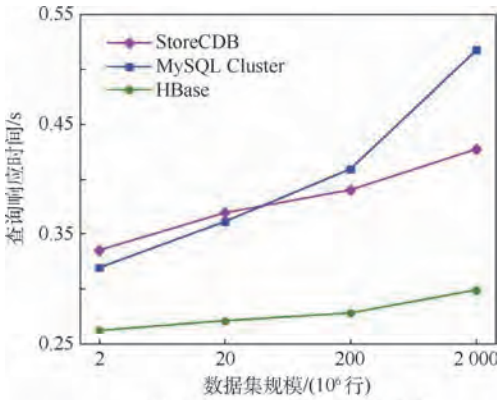
图7给出了 StoreCDB、MySQL Cluster 和 HBase 处理 K-V 和 RDB 查询的响应时间。图7(a)展示了 K-V 查询时间与数据集规模的关系,图7(b)是 RDB 查询时间与数据集规模的关系。随着数据集的增加,K-V 查询和 RDB 查询的时间都逐渐增加。StoreCDB 在海量数据情况下,K-V 查询效率高于 MySQL Cluster,低于 HBase。由于 HBase 不支持多条件查询,故图7(b)中仅有 MySQL Cluster 和 StoreCDB 的实验结果。

随着数据集的增加,3种数据库的 K-V 查询时间都逐渐增加,HBase 在进行列查询时,响应时间始终小于 StoreCDB 和 MySQL Cluster。在数据集规模较小的情况下,StoreCDB 与 MySQL Cluster

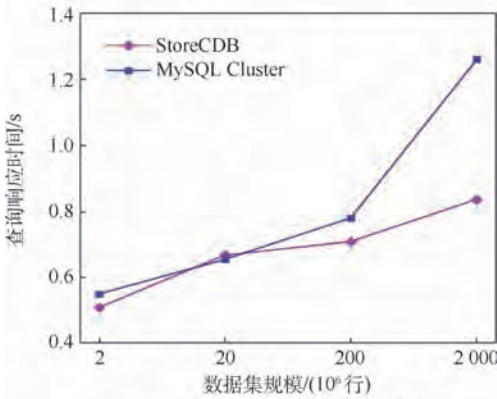
表4 实验参数

Table 4 Parameters of experiment

参数	数值
数据源的记录数目 $N_{src}/行$	$2 \times 10^{10}$
采样数据的平均时间间隔 frequency/s	5
主节点服务器的数目 $N_{masterNodes}$	1
从节点服务器的数目 $N_{workerNodes}$	1 ~ 32



(a) K-V效率与数据集规模的关系



(b) RDB效率与数据集规模的关系

图7 查询效率实验

Fig.7 Query efficiency experiment

响应时间基本相同,随着数据集规模增大,StoreCDB 响应时间增速逐渐小于 MySQL Cluster。

在进行 RDB 查询时,MySQL Cluster 和 StoreCDB 响应时间均高于 K-V 查询,这是因为 K-V 查询只涉及页索引,而 RDB 查询同时需要页索引和属性索引的检索。尽管如此,两种查询的效率相差并不大,且变化趋势也较一致。可以看出,在数据量快速增长的情况下,StoreCDB 依然能快速响应查询,性能保持良好。

图8给出了 StoreCDB 的可扩展性,为 RDB 的查询响应时间与从节点个数的关系。

从图8可以看出,随着从节点个数的增加,StoreCDB 查询的性能明显提升,RDB 查询与 K-V 查询性能提升效果变化趋势相似。StoreCDB 具有良好的可伸缩性,并且保证在从节点增加的情况下有明显的性能提升。

为了进一步分析 StoreCDB 中从节点规模对查询的影响。本文在表5中分别给出 StoreCDB 在处理  $2 \times 10^{10}$  行和  $7 \times 10^6$  行数据源中 RDB 查询的加速比实验结果。加速比 Speedup 定义为

$$\text{Speedup} = \frac{\xi_{\text{Single}}}{\xi_{\text{StoreCDB}}} \quad (1)$$

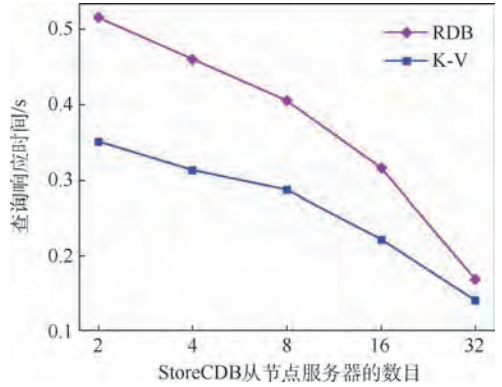


图8 可扩展性实验

Fig.8 Expandability experiment

表5 StoreCDB 在 RDB 查询中的加速比  
Table 5 The acceleration ratio of StoreCDB in RDB queries

$N_{\text{workerNodes}}$	加速比	
	$N_{\text{src}} = 2 \times 10^{10}$ 行	$N_{\text{src}} = 7 \times 10^6$ 行
2	1.62	1.33
4	1.79	1.49
8	2.06	1.63
16	2.64	2.10
32	4.95	3.32

式中: $\xi_{\text{Single}}$  和  $\xi_{\text{StoreCDB}}$  分别为单数据库节点和 StoreCDB 的查询响应时间。

从表5可以看出,StoreCDB 在处理查询任务时,相比于单点数据库,加速比随着从节点数量的增加而上升,并且数据集规模越大,加速性能越明显。

为了评估存储空间的利用效率,本实验采用32节点的 StoreCDB 和 HBase 在不同数据集规模时的空间利用率进行对比测试。

HBase 是通过文件合并 (compaction) 的方式对小文件和文件删改带来的空间碎片进行整理以提高存储空间利用效率。StoreCDB 则采用虚拟行的方式,使得同一行数据可以存储在不连续的位置来减少空间浪费。

详细对比情况如图9所示,图9给出了空间利用率的对比实验结果。

从图9可以看出,随着存储数据集规模的增加,StoreCDB 的空间利用率逐渐降低,这是因为虚拟行中的索引规模随着数据集规模的增长造成的空间利用率下降。在数据集规模较小的情况下,HBase 的空间利用率略高于 StoreCDB。随着数据集规模的增加,StoreCDB 空间利用率降低程度略优于 HBase。这是由于 HBase 的合并策略在提高读写性能时会减少参与合并的文件数量,从而导致空间利用率下降。

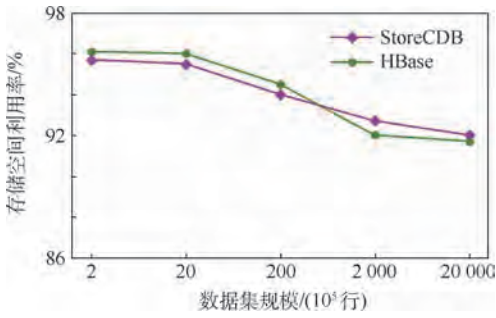


图 9 存储空间利用率实验

Fig.9 Storage space utilization experiment

综合上述分析,StoreCDB 可以有效地支持 K-V 查询和 RDB 查询,提供了良好的工业互联网海量异构数据接入与查询处理能力,为工业互联网的海量异构数据管理提供了一种可行的解决方案。

## 7 结 论

本文从工业互联网数据管理角度出发,对工业互联网在非结构化数据统一存储管理,高性能检索查询等方面所面临的挑战进行了分析,提出了面向工业互联网数据管理的云存储方法——StoreCDB。

1) 提出了一种能够应对海量多源异构数据统一管理的数据模型,实现了多源异构数据的统一表达,解决了不同服务系统的数据统一存储问题。

2) 提出了一种能够支持“键-值”查询和普通 SQL 查询的索引方法,通过页索引和属性索引的两级索引结构,突破了目前云数据管理技术主要针对“键-值”查询以及并行数据库技术主要针对 SQL 查询的局限。

3) 提出了基于两级索引结构的全局查询处理方法。

4) 采用 StoreCDB 实验系统,对该方法的查询效率及可扩展性进行了一系列实验验证。实验结果表明,StoreCDB 具有良好的异构数据存储和检索性能。

## 参考文献 (References)

- [1] LI D, WU H, LI S C. Internet of things in industries: A survey [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(4): 2233-2243.
- [2] 李晓娟. 物联网中海量数据管理技术研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2015.
- LI X J. Huge amounts of data management technology for internet of things [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015 (in Chinese).
- [3] 孙鹏. 动车组维修物联网及其关键技术研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2013.
- SUN P. Study on EMU maintenance in the internet of things and its key technologies [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2013 (in Chinese).
- [4] SANCHEZ L, MUÑOZ L, GALACHE J A, et al. Smartsantander: IoT experimentation over a smart city testbed [J]. Computer Networks, 2014, 61: 217-238.
- [5] 宁焕生, 徐群玉. 全球物联网发展及中国物联网建设若干思考[J]. 电子学报, 2010, 38(11): 2590-2599.
- NING H S, XU Q Y. Research on global internet of things' developments and its construction in China [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(11): 2590-2599 (in Chinese).
- [6] ATZORI L, IERA A, MORABITO G. The internet of things: A survey [J]. Computer Networks, 2010, 54(15): 2787-2805.
- [7] 康世龙, 杜中一, 雷咏梅, 等. 工业物联网研究概述 [J]. 物联网技术, 2013, 3(6): 88-90.
- KANG S L, DU Z Y, LEI Y M, et al. Over view of industrial internet of things [J]. Internet of Things Technologies, 2013, 3(6): 88-90 (in Chinese).
- [8] GUBBI J, BUYYA R, MARUSIC S, et al. Internet of things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions [J]. Future Generation Computer Systems, 2013, 29(7): 1645-1660.
- [9] ÖZSU M T, VALDURIEZ P. Principles of distributed database systems [M]. 3rd ed. New York: Springer Science & Business Media, 2011: 16.
- [10] STONEBRAKER M. SQL databases v. NoSQL databases [J]. Communications of the ACM, 2010, 53(4): 10-11.
- [11] GILBERT S, LYNCH N. Brewer's conjecture and the feasibility of consistent, available, partition-tolerant web services [J]. ACM SIGACT News, 2002, 33(2): 51-59.
- [12] HUANG H, WU Q H, YU D. Robust distributed control of robot formations with parameter uncertainty [J]. Journal of Control Theory and Applications, 2011, 9(4): 51-58.
- [13] XU H G, HAN J H, PAN S P, et al. The research on data consistency of distributed storage system based on two-hop DHT [C] // Proceedings of IEEE ICITIS 2011. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011: 131-132.
- [14] PETER M, GRANCE T. The NIST definition of cloud computing: SP 800-145 [R]. Gaithersbury: NIST, 2011.
- [15] SHEPLER S, CALLAGHAN B, ROBINSON D, et al. Network file system (NFS) version 4 protocol [R]. Reston: The Internet Society, 2003.
- [16] GHEMAWAT S, HOWARD G, LEUNG S T. The Google file system [J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2003, 37(5): 29-43.
- [17] BORTHAKUR D. HDFS architecture guide [EB/OL]. (2013-10-10) [2018-03-20]. [http://hadoop.apache.org/docs/r1.0.4/hdfs\\_design.html](http://hadoop.apache.org/docs/r1.0.4/hdfs_design.html).
- [18] CHAIKEN R, JENKINS B, LARSON P A, et al. SCOPE: Easy and efficient parallel processing of massive data sets [J]. PV-LDB, 2008, 1(2): 1265-1276.
- [19] BEAVER D, KUMAR S, LI H C, et al. Finding a needle in haystack: Facebook's photo storage [C] // Proceedings of OSDI

2010. Berkeley, CA: USENIX Association, 2010:47-60.
- [20] DECANDIA G, HASTORUN D, JAMPANI M, et al. Dynamo: Amazon's highly available key-value store[C]//Proceedings of SOSP 2007. New York: ACM, 2007:205-220.
- [21] CHANG F, DEAN J, GHEMAWAT S, et al. Bigtable: A distributed storage system for structured data[J]. ACM Transactions on Computer Systems, 2008, 26(2):1-26.
- [22] BAKER J. Megastore: Providing scalable, highly available storage for interactive services[C]//Biennial Conference on Innovative Data Systems Research, 2011:223-234.
- [23] CORBETT J C, DEAN J, EPSTEIN M, et al. Spanner: Google's globally-distributed database[C]//Usenix Conference on Oper-

ating Systems Design and Implementation, 2012:251-264.

#### 作者简介:

孟祥曦 男, 博士研究生。主要研究方向: 数据管理系统、模型管理、软件工程。

张凌 男, 高级工程师。主要研究方向: 大数据管理与应用、自动化测试、大数据分析。

郭皓明 男, 博士, 高级工程师。主要研究方向: 软件测试、形式化方法与软件工程, 大数据管理与应用。

## A new approach of cloud storage for industrial Internet

MENG Xiangxi<sup>1</sup>, ZHANG Ling<sup>2,\*</sup>, GUO Haoming<sup>3</sup>, GUO Limin<sup>3</sup>,  
XIA Qianchen<sup>1</sup>, LYU Jianghua<sup>1</sup>, MA Shilong<sup>1</sup>

(1. School of Computer Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China;

2. National Earthquake Response Support Service, Beijing 100049, China;

3. Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** With the development of industrial informatization, industrial Internet has attracted many attentions, and massive heterogeneous data management is one of the most important issues. However, traditional relational database (RDB) limits the performance of access and retrieval of massive and heterogeneous data, while cloud data management mainly focuses on key-value (K-V) queries, which cannot quickly search data by using any data property other than the prime key. In this paper, a cloud storage framework—StoreCDB is proposed for data management in the industrial Internet. In StoreCDB, the heterogeneous data are represented by a uniform data model firstly and then stored in a distributed file and parallel architecture as unstructured data. In addition, a double-level index is proposed to support both key-value queries and RDB queries. This paper adopts a distributed cluster experimental platform and massive high-speed train operation simulation data to verify the framework. The experimental results show that StoreCDB has satisfactory heterogeneous data access and retrieval performance and provides a good solution for industrial Internet data management.

**Keywords:** industrial Internet; heterogeneous data; massive data management; distributed file system; hierarchical index

**Received:** 2018-04-02; **Accepted:** 2018-09-03; **Published online:** 2018-09-26 13:38

**URL:** [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180921.0959.001.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180921.0959.001.html)

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (61300007, 61305054); Foundation of the Key Lab of Software Development Environment (SKLSDE-2012ZX-28, SKLSDE-2014ZX-06)

\* **Corresponding author.** E-mail: zhangling903@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0208

# 低黏度环氧树脂硼胺-酸酐复合固化体系研究

邢志鹏, 乔英杰\*, 张晓红, 王晓东

(哈尔滨工程大学 材料科学与化学工程学院, 哈尔滨 150001)



**摘 要:** 为探究低黏度环氧树脂复合固化反应机理,研究了低黏度环氧树脂硼胺-酸酐复合固化体系的流变性能和固化反应过程,分析了硼胺-酸酐复合比例对复合固化体系流变特性和固化反应过程的影响;利用流变学参数确定了复合固化体系的固化起始时间、凝胶时间点及基于阿伦尼乌斯方程的固化反应活化能。研究表明,随着硼胺-酸酐复合固化体系中酸酐复合比例的增加,体系固化反应获得促进,其固化起始时间和凝胶点均降低,同时基于阿伦尼乌斯方程的固化反应活化能降低;采用非等温差示扫描量热(DSC)对硼胺-酸酐复合固化体系过程进行分析,结果表明硼胺-酸酐复合固化体系存在相对独立的双放热峰,随着酸酐复合比例的增加,低温放热峰的峰值增大,高温放热峰的峰值减小,且双峰的峰值温度向高温方向移动。根据2种固化剂的固化反应机理分析,环氧树脂硼胺-酸酐复合固化体系中硼胺固化剂和酸酐固化剂既存在相互协同效应又存在相互竞争作用。

**关键词:** 环氧树脂; 硼胺固化剂; 酸酐固化剂; 流变特性; 固化反应

**中图分类号:** TQ323.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5965(2019)01-0141-08

环氧树脂以其优良的耐化学介质性能、介电性能、机械性能和良好的黏结性能等,广泛应用于航空航天、海洋工程、电子电气和化学建材等领域<sup>[1-2]</sup>。环氧树脂一般只有在一定条件下与固化剂反应生成不溶、不熔的三维体型网状结构,方能体现出优异的性能。因此,不同固化剂种类也将会直接影响环氧树脂的固化反应过程和产品的最终性能。

硼胺络合物是一种优良的热致型潜伏固化剂,在常温下因硼原子和氮原子的络合作用而呈现固化惰性,二者之间的络合作用保持稳定状态,固化活性被抑制。一旦因温度或其他外界条件打破稳定状态,络合作用将被解除,呈现出较高的固化反应活性<sup>[3]</sup>。这种固化剂不仅具有优良的潜伏性,还能提高环氧树脂固化物的热稳定性,是一种

具有高性能化的固化剂。但硼胺固化剂在高温下会降低树脂的损耗因子  $\tan \delta$  值,导致材料的刚性和强度下降<sup>[4]</sup>。甲基四氢苯酐属于环氧树脂酸酐类固化剂,其不仅具有低黏度、低挥发性,化学结构中的刚性六元环状结构还可使其固化物具有良好的力学性能和较高的玻璃化转变温度<sup>[5-7]</sup>。

本文在环氧树脂硼胺固化剂体系的基础上添加酸酐固化剂组成硼胺-酸酐复合固化体系。固化剂复合可以在一定程度上实现2种固化剂的优势互补,进而优化环氧树脂复合固化体系和固化物性能,采用复合固化剂固化环氧树脂的文献并不少见<sup>[8-9]</sup>,然而采用硼胺-酸酐复合固化体系的却鲜有报道。本文通过研究硼胺-酸酐复合固化体系的流变特性和固化反应热力学过程,揭示硼胺-酸酐复合固化体系的固化特性和反应机理。

收稿日期: 2018-04-11; 录用日期: 2018-05-11; 网络出版时间: 2018-07-05 17:25

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180705.0936.001.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180705.0936.001.html)

基金项目: 国家自然科学基金(51479037)

\* 通信作者: E-mail: qiaoyingjie99@163.com

**引用格式:** 邢志鹏, 乔英杰, 张晓红, 等. 低黏度环氧树脂硼胺-酸酐复合固化体系研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 141-148. XING Z P, QIAO Y J, ZHANG X H, et al. Low-viscosity epoxy resin boramine-anhydride composite curing system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 141-148 (in Chinese).

## 1 实验

### 1.1 原材料

环氧树脂:本文采用笔者课题组自主研制的改性双酚 A 型低黏度环氧树脂 (ESX),该树脂具有较好的流动性,黏度为  $1\ 280\ \text{mPa}\cdot\text{s}$  ( $25^\circ\text{C}$ ),环氧当量为  $167\ \text{g}/\text{eq}$ ; 硼胺固化剂 (594),室温下为液态,黏度为  $360\ \text{mPa}\cdot\text{s}$  ( $25^\circ\text{C}$ ),蓝星化工新材料股份有限公司; 液态酸酐类固化剂甲基四氢苯酐 (MeTHPA),室温下为液态,黏度为  $60\ \text{mPa}\cdot\text{s}$  ( $25^\circ\text{C}$ ),蓝星化工新材料股份有限公司。

### 1.2 试样配方设计

按照表 1 配方制备试样,具体方法为:先将固化剂 594 与环氧树脂 ESX 在室温下混合,搅拌均匀后再向其中加入甲基四氢苯酐,搅拌  $10\ \text{min}$  后静置即可。

表 1 复合固化体系试样配方

Table 1 Sample formulation of composite curing system

原料	原料质量份数			
	PJ-1	PJ-2	PJ-3	PJ-4
环氧树脂 (ESX)	100	100	100	100
硼胺固化剂 (594)	10	10	10	10
甲基四氢苯酐 (MeTHPA)	5	10	15	20

### 1.3 性能测试

#### 1.3.1 流变特性

采用 AR-2000EX 型美国 TA 旋转流变仪,对复合固化体系进行流变性能测试,选择小角度振荡模式中的时间扫描,选择恒定形变 (CSD)、恒定频率  $\omega = 10\ \text{rad}/\text{s}$  及恒定应变  $\gamma = 1\%$  ( $0.1\%$ )。其中夹具为直径  $25\ \text{mm}$  的平行板,间隙设置为  $1\ \text{mm}$ ,测试温度设置为  $120^\circ\text{C}$ ,温度达到  $120^\circ\text{C}$  时测试自动开始。

#### 1.3.2 差示扫描量热测试

采用梅特勒公司生产的 823e 型差示扫描量热 (DSC) 分析仪,采用非等温 DSC 对试样进行动态扫描,升温速率分别为  $5$ 、 $10$ 、 $15$  和  $20^\circ\text{C}/\text{min}$ ,温度范围为  $50 \sim 300^\circ\text{C}$ ,测试全程用高纯度氮气气氛保护,氮气速率为  $50\ \text{mL}/\text{min}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 流变特性

环氧树脂与固化剂组成的固化体系在加热条件下由最初可溶、可熔状态逐步向不溶、不熔状态转变,该过程称为凝胶过程。在凝胶过程中,体系的黏度激增,平均分子量增大,模量逐渐增加。进

一步固化,环氧树脂将转变为具有不溶、不熔的三维体型网状结构的固体状态。此时,环氧树脂固化物具有了一定的力学性能和耐热性<sup>[10-11]</sup>。

采用旋转流变仪研究环氧树脂固化体系可表征出体系的流变学参数,如储能模量 ( $G'$ )、损耗模量 ( $G''$ ) 及损耗因子 ( $\tan \delta$ ),其损耗因子  $\tan \delta$  为黏弹性材料在交变力场作用下应变与应力周期相位差角的正切,也等于该材料的损耗模量与储能模量之比<sup>[12]</sup>,即  $\tan \delta = G''/G'$ 。 $\tan \delta$  值大小代表材料的黏弹性, $\tan \delta$  值越大说明材料的黏性越大, $\tan \delta$  值越小说明材料的弹性越大。因此,在一定的范围内, $\tan \delta$  值可表征材料的状态。Rusli 等<sup>[13]</sup>采用旋转流变仪对环氧树脂固化特性进行了研究,通过对固化体系流变参数的分析,确定了体系在反应温度下的凝胶点 ( $t_g$ )。 $t_g$  是固化过程中的一个临界参数,因为在凝胶之后,聚合物将无法流动,真正进入体系模量迅速增长阶段,而凝胶点即可作为不同固化体系的标志点。

图 1 为旋转流变仪设置恒定应变  $\gamma = 0.1\%$ ,测试温度设置为  $120^\circ\text{C}$  时,试样 PJ-1 的流变性能参数随扫描时间变化关系曲线。由图中可观察到,复合固化体系初始的  $G'$  和  $G''$  均很低,数值仅在  $0.1 \sim 1\ \text{Pa}$  之间,此时固化体系为初始黏度较低的混合液体状态,尚未发生交联反应,模量随扫描时间呈现不规则变化,这是由于固化体系在低黏度低模量时仪器的灵敏度所致。当扫描时间到达  $t_s$  时刻时,体系模量随之显著增加,其中  $G'$  由无规则状态向有规则增加的激增点  $t = t_s$  时刻即为固化反应的起始点,说明此时体系开始发生固化反应,分子链逐渐增长,分子量不断增加。当扫描时间到达  $t = t_g$  时,体系的  $G'$  和  $G''$  相交于一点,该点即为该固化体系的凝胶点,此时体系模量达到  $10^5\ \text{Pa}$  且已无流动性,该点后体系继续发生交联

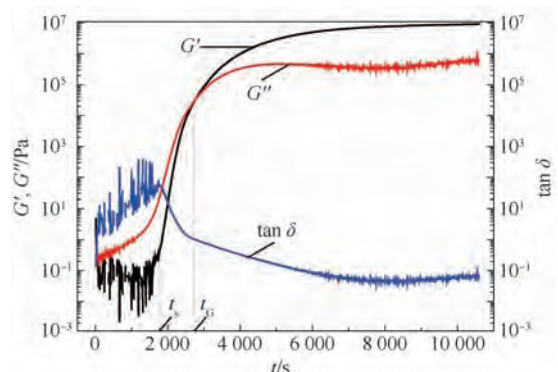


图 1 复合固化体系流变性能参数随时间变化曲线 (PJ-1)  
Fig. 1 Time variation curves of rheological parameters of composite curing system (PJ-1)

作用并进一步形成三维网络结构。 $t_c$  时刻过后,随着扫描时间进一步增加, $G'$ 和 $G''$ 值逐渐达到峰值并不再有显著增长,说明此时固化体系已经固化并具有一定的固化反应程度。损耗因子 $\tan \delta$ 在固化反应开始( $t = t_s$ )后,因固化体系弹性聚合物网格的形成而降低,这表明体系开始出现黏弹性固体状态的特征,当反应进行至约 $t = 8\ 000\ \text{s}$ 时, $\tan \delta$ 开始缓慢升高,这意味着体系玻璃化的开始。

图 2 为旋转流变仪设置恒定应变 $\gamma = 1\%$ ,测试温度设置为 $120\text{℃}$ 时,不同复合固化体系试样流变性能参数随扫描时间的变化规律。从图中可知,复合固化体系中 $t_{s1} > t_{s2} > t_{s3}$ 、 $t_{G1} > t_{G2} > t_{G3}$ ,结

合前文对固化体系流变特性的分析,固化起始时间 $t_s$ 和凝胶点 $t_c$ 分别为 $G'$ (或 $\tan \delta$ )刚出现系统性变化的时间和储能模量( $G'$ )与损耗模量( $G''$ )相交的时间,因此,由图中可获得 3 个体系固化起始时间点和凝胶点,见表 2。

由表 2 可知,复合固化体系的凝胶点 $t_c$ 均随复合固化体系中 MeTHPA 质量份数的增加而缩短,这是因为在复合固化体系中 MeTHPA 起到促进固化反应进行的作用。表 2 中 $\Delta t$ 值即凝胶点与固化起始时间之间的差值,表征固化体系从进行固化反应开始至固化体系无流动性时所经历的时间。由表可知, $\Delta t$ 值也随体系中 MeTHPA 质量份数增加而减少。根据表 2 中所获得不同体系的凝胶点,通过在特定温度下的凝胶点的变化规律,可根据阿伦尼乌斯方程<sup>[14-16]</sup>计算出体系的活化能:

$$t_{\text{gel}} = A e^{E_a/(RT)} \quad (1)$$

式中: $t_{\text{gel}}$ 为凝胶时间; $A$ 为指前因子; $E_a$ 为反应活化能; $R$ 为通用气体常数; $T$ 为等温测试温度。该方程式是基于一个假设,即凝胶点的改变不依赖于温度,相同结构在不同温度下的演变被认为是分部进行的。通过 $t_{\text{gel}} \sim 1/T$ 的对数曲线即可得到体系活化能 $E_a$ ,反应活化能是指分子从常态转变为容易发生化学反应的活跃状态所需的能量,活化能的大小可以反映化学反应的难易程度。根据阿伦尼乌斯方程计算出不同复合固化体系反应活化能 $E_a$ 值分别为 38.63、36.89 和 33.67 kJ/mol,即随着复合固化体系中 MeTHPA 含量的增加,固化反应活化能降低,促进了复合固化体系的固化反应的进行。

表 2 复合固化体系的 $t_s$ 、 $t_c$ 和 $\Delta t$ 数值

Table 2 Value of  $t_s$ ,  $t_c$  and  $\Delta t$  of composite curing system

试样	$t_s$	$t_c$	$\Delta t$
PJ-1	2 196	3 490	1 294
PJ-2	1 755	2 900	1 145
PJ-4	1 660	2 530	870

注: $\Delta t = t_s - t_c$ 。

## 2.2 固化反应过程

DSC 法是研究环氧树脂固化行为为有效的方法之一,该部分采用 DSC 法对复合固化体系进行非等温动态扫描,研究不同复合固化剂配比对固化体系固化反应热,分析复合固化体系固化反应过程。不同复合固化剂配比的固化体系在升温速率 $\beta = 10\text{℃}/\text{min}$ 下进行非等温 DSC 动态扫描,固化放热曲线见图 3, $\Phi$ 为热流量。

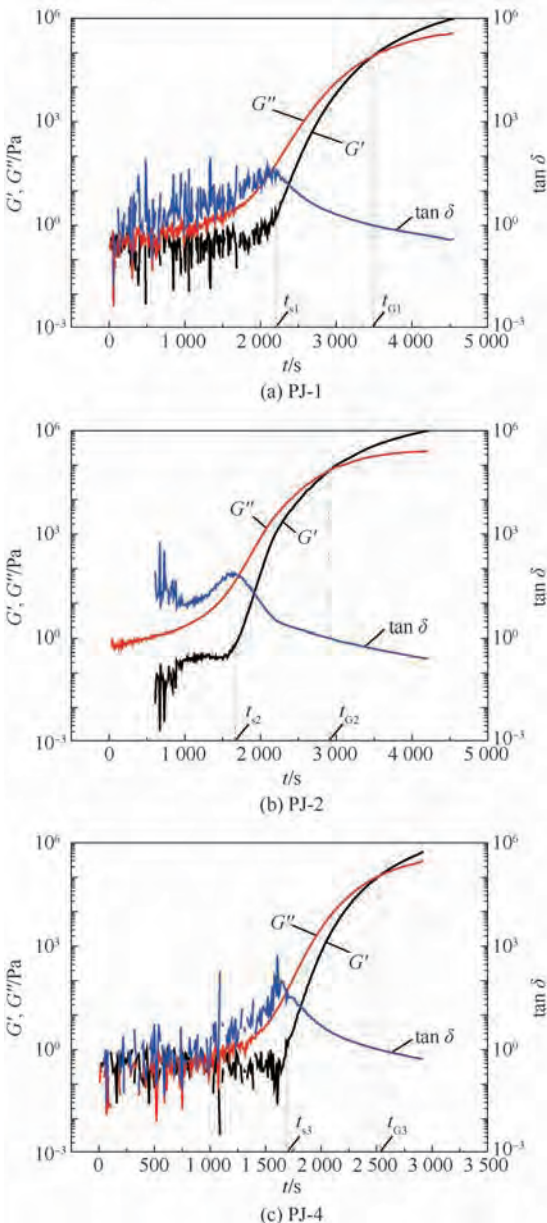


图 2 不同复合固化体系流变性能参数随时间变化曲线  
Fig. 2 Time variation curves of rheological parameters of different composite curing systems

由图3可知,复合固化体系每个配比下均出现独立双放热峰(PEAK-1和PEAK-2)。根据MeTHPA和594固化剂的特点可知,图3中的低温峰PEAK-1代表环氧树脂与MeTHPA的放热峰,高温峰PEAK-2代表594的放热峰。这是因为594属于叔胺固化剂,在复合固化体系中,可作为MeTHPA的固化促进剂,降低其与环氧基的反应温度,增加反应速率。随着MeTHPA质量份数的增加,PEAK-1的放热量增加,PEAK-2的放热量减小,这是因为在复合固化体系中,MeTHPA先与环氧树脂中的环氧基发生反应,随着固化剂MeTHPA量的增加,体系中优先与环氧基反应的MeTHPA增多,由于环氧树脂的固化反应为放热反应,因此,PEAK-1的放热量升高。同理,随着MeTHPA量的增加,反应消耗的环氧基也相应增加,与594发生固化反应的剩余环氧基相应减少,PEAK-2放热峰的放热量减小。复合固化体系非等温DSC曲线放热峰PEAK-1和PEAK-2峰值温度见表3。

由表3数据可知,随着MeTHPA质量份数的增加,PEAK-1和PEAK-2的放热峰的峰值温度有向高温方向移动的趋势。这是因为随着复合固化剂中MeTHPA配比的增加,594在复合固化剂中配比相应降低,在体系中含量的占比减少,对MeTHPA的促进作用和本身与环氧基的固化作用均减弱,从而导致PEAK-1和PEAK-2的峰值温

度向高温方向移动。

对该复合固化体系PJ-3进行非等温DSC测试,采用5、10、15和20℃/min的升温速率进行扫描,确定每条放热曲线的峰始温度( $T_i$ )、峰值温度( $T_p$ )和峰尾温度( $T_f$ ),分析复合固化体系的非等温DSC固化过程。复合固化体系的非等温DSC曲线见图4。

为更清晰地确定双峰的 $T_i$ 、 $T_p$ 和 $T_f$ ,先采用Origin软件将非等温DSC的基线拉平,见图5。然后采用高斯(Gaussian)分峰法<sup>[17-18]</sup>对复合固化体系的双放热峰进行分峰,分峰后的DSC曲线见图6。

图6为经高斯(Gaussian)分峰法分峰后的PJ-3复合固化体系的两放热峰PEAK'-1和PEAK'-2的非等温DSC曲线,从图5和图6中可知,随着升温速率的增大,双峰的峰形没有太大的变化,但峰值温度差异较大,两放热峰的峰值温度均随着升温速率的增加向高温方向移动,这是由温度滞后效应导致的。

采用Kissinger法<sup>[19]</sup>对环氧树脂非等温固化动力学研究过程中,利用切线法计算出复合固化体系2个放热峰在不同升温速率下的 $T_i$ 、 $T_p$ 和 $T_f$ ,双峰的峰值温度见表4。以 $\beta$ 为横坐标, $T$ 为

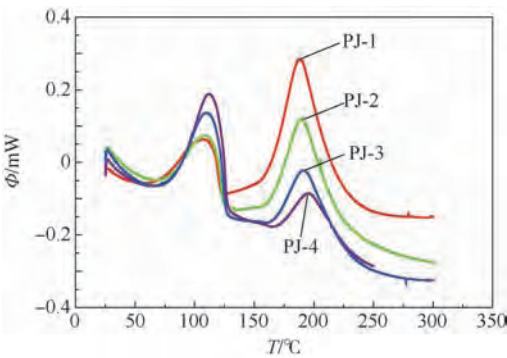


图3 不同复合固化体系非等温DSC曲线

Fig.3 Non-isothermal DSC curves of different composite curing systems

表3 复合固化体系非等温DSC曲线放热峰峰值温度  
Table 3 Peak temperature of non-isothermal DSC curve exothermic peak of composite curing system

试样	PEAK-1 峰值温度	PEAK-2 峰值温度
PJ-1	106.28	188.49
PJ-2	108.69	189.64
PJ-3	110.47	191.24
PJ-4	112.15	195.29

注:测量条件为 $\beta = 10^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

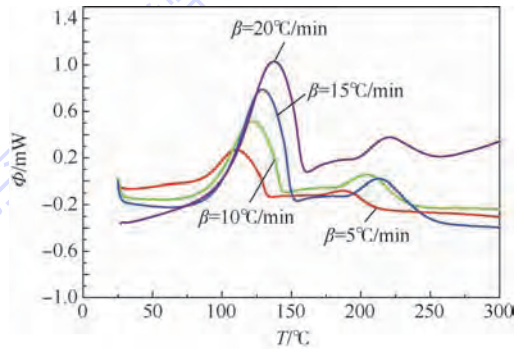


图4 PJ-3复合固化体系的非等温DSC曲线

Fig.4 Non-isothermal DSC curves of PJ-3 composite curing system

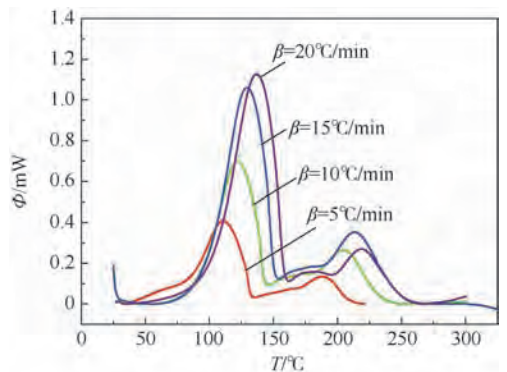


图5 调整基线后的复合固化体系的非等温DSC曲线

Fig.5 Non-isothermal DSC curve of composite curing system after baseline adjustment

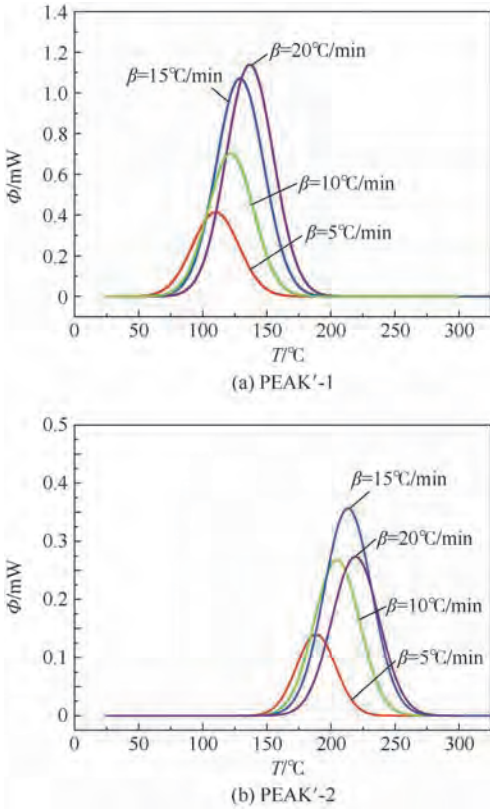


图 6 分峰后 PJ-3 复合固化体系的非等温 DSC 曲线

Fig. 6 Non-isothermal DSC curve of PJ-3 composite curing system after peak splitting

表 4 不同升温速率下双峰的峰值温度

Table 4 Peak temperature of double peaks at different heating rates

$\beta / (^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1})$	PEAK'-1			PEAK'-2		
	$T_i / ^\circ\text{C}$	$T_p / ^\circ\text{C}$	$T_f / ^\circ\text{C}$	$T_i / ^\circ\text{C}$	$T_p / ^\circ\text{C}$	$T_f / ^\circ\text{C}$
5	76.24	110.13	152.48	157.82	187.95	220.43
10	80.52	120.61	164.27	164.27	205.36	246.27
15	85.37	129.37	174.52	170.49	212.84	260.45
20	90.66	136.40	183.40	176.81	219.90	265.71

纵坐标作出  $T-\beta$  关系图, 经过线性拟合得到特征温度与升温速率的关系, 见图 7。

由图 7 可知, PJ-3 复合固化体系低温峰 PEAK'-1 的  $T_i$ 、 $T_p$  和  $T_f$  在不同升温速率下呈现良好的线性关系。而高温峰 PEAK'-2 仅  $T_i$  线性关系良好,  $T_p$  和  $T_f$  的线性关系较差。这可能是由于固化体系中 MeTHPA 与 594 在与环氧基发生固化反应时, 对彼此固化反应产生一定的影响, 2.3 节将进一步对复合固化体系反应机理进行分析。

### 2.3 复合固化体系反应机理

MeTHPA 属于酸酐类固化剂, 其化学结构见图 8。当 MeTHPA 单独作为环氧树脂固化剂且体系中存在叔胺类促进剂时, 叔胺可使 MeTHPA 中

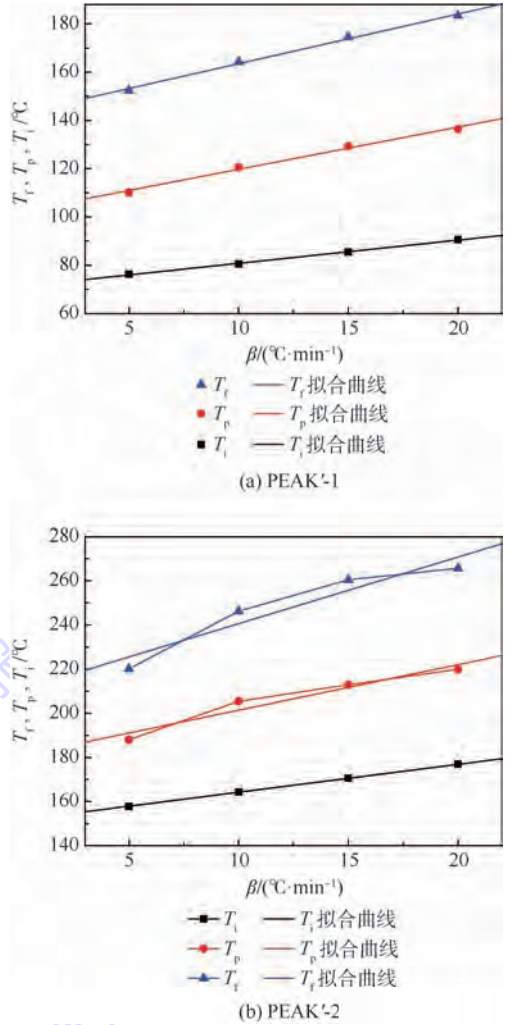


图 7 PJ-3 复合固化体系 PEAK'-1、PEAK'-2 的外推温度曲线

Fig. 7 Extrapolation temperature curves of PJ-3 composite curing system of PEAK'-1 and PEAK'-2

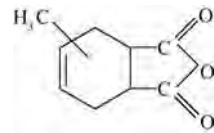


图 8 甲基四氢苯酐的化学结构示意图

Fig. 8 Schematic of chemical structure of MeTHPA

的酐基开环形成一个离子对, 环氧基插入此离子对时, 羧基负离子打开环氧基, 生成酯键, 同时产生一个新的阴离子。这个阴离子又可与酐基形成一个新的离子对, 或是使环氧基开环, 进一步发生醚化反应, 使反应继续进行下去<sup>[20-22]</sup>。反应机理见图 9。

594 固化剂为硼胺类潜伏性固化剂, 其结构就属于叔胺固化剂, 化学结构见图 10。594 硼胺固化剂是一种非对称性的硼酸酯, 硼杂八元环紧接在硼原子上, 使得固化剂具有较好的热稳定性和坚韧性。叔胺基团中的氮原子由于硼原子的电

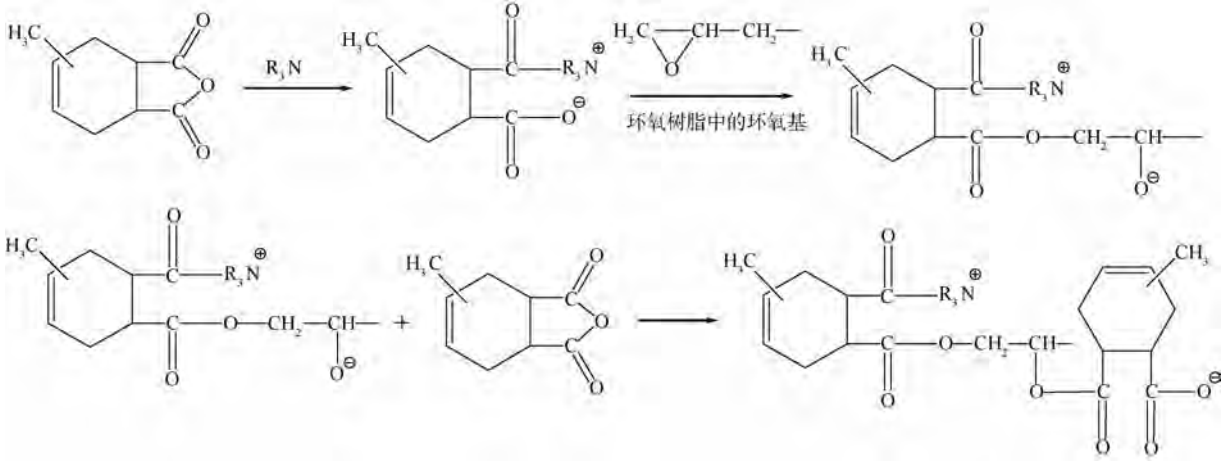


图9 甲基四氢苯酐与环氧树脂的固化反应机理

Fig. 9 Curing reaction mechanism of MeTHPA and epoxy resin

子吸引,其活性远小于较一般的叔胺固化剂<sup>[22]</sup>,其电子吸引示意图见图11。

594 固化剂与环氧树脂的固化反应,属于阳离子开环聚合反应<sup>[23]</sup>。首先由硼胺络合物与环氧树脂体系中羟基化合物反应生成含氢质子的配位络合物,然后由该配位络合物作为催化剂引发体系中的环氧基发生阳离子开环反应,形成聚醚交联网络结构<sup>[24]</sup>。

基于2种复合固化剂单独与环氧树脂发生固化反应的机理,在复合固化体系中,对于 MeTHPA 来说 594 属于叔胺,以促进剂的身份促使 MeTHPA 中酐基的开环形成离子对,推动与环氧基固化反应的进行。若 594 硼胺固化剂在体系中发挥 MeTHPA 的促进剂的作用,少量即可。而本文所选取的 MeTHPA 质量份数不足以完成体系中全部环氧基团的固化反应(仅为完全固化环氧树脂时的 20% 左右),因此体系中未被 MeTHPA 消耗的环氧基则由 594 硼胺固化剂通过阳离子开环聚合反应进行下去。

因此,在酸酐-硼胺复合固化体系反应过程中,594 硼胺固化剂先作为促进剂完成 MeTHPA 与环氧树脂的固化交联反应。随着 MeTHPA 质量份数的增加,MeTHPA 在 594 的促进下与环氧基发生固化反应的量也增多,因而产生的反应热增加,PEAK-1 放热峰随 MeTHPA 质量份数的增加而升高。同时,体系中的环氧基的量是一定的,MeTHPA 消耗环氧基增多的同时,594 所能消耗的剩余环氧基相应减少,因此 594 与环氧基反应产生的反应热降低,相应的 PEAK-2 放热峰随 MeTHPA 质量份数的增加而降低。在 Kissinger 法研究环氧树脂非等温固化动力学过程中, $T_i$ 、 $T_p$  和  $T_f$  在采用外推法拟合过程中,不同升温速率下的特征温度可获得良好的线性拟合曲线,而因 2 种固化剂在体系中的相互作用机制导致 PEAK'-2 的  $T_p$  和  $T_f$  在外推法拟合过程中呈较差的线性关系。

### 3 结论

1) 随着环氧树脂/594/MeTHPA 复合固化体系 MeTHPA 复合比例的增加,环氧树脂固化体系的固化起始时间  $t_s$  和凝胶点  $t_G$  均降低,同时基于阿伦尼乌斯方程的固化体系反应活化能  $E_a$  降低。

2) 环氧树脂/594/MeTHPA 复合固化体系的放热过程存在双放热峰,代表环氧树脂与 MeTHPA 的放热峰(低温峰 PEAK-1),代表 594 的放热峰(高温峰 PEAK-2)。复合固化体系中 594 固化剂除与环氧树脂发生固化反应外,还为 MeTHPA 与环氧基的固化反应起促进作用,随着 MeTHPA 复合比例的增加,PEAK-1 放热峰峰值增大,PEAK-2 放热峰峰值减小,且双峰的峰值温度向高温方向移动。

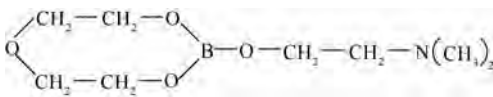


图10 594 固化剂的化学结构示意图

Fig. 10 Schematic of chemical structure of 594 curing agent

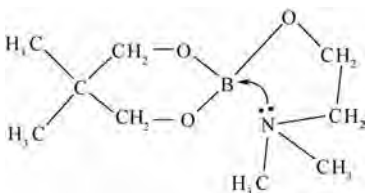


图11 594 固化剂硼氮原子电子吸引示意图

Fig. 11 Schematic of electron attraction of boron and nitrogen atoms of 594 curing agent

3) 固化剂 594 和 MeTHPA 在复合固化体系中既存在相互协同效应又存在相互竞争作用。

### 参考文献 (References)

- [1] 陈平,刘胜平,王德中. 环氧树脂及其应用[M]. 北京:化学工业出版社,2011:36-38.  
CHEN P, LIU S P, WANG D Z. Epoxy resin and its application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 36-38 (in Chinese).
- [2] 贺曼罗. 环氧树脂胶粘剂[M]. 北京:中国石化出版社,2004:2-4.  
HE M L. Epoxy resin adhesive[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2004: 2-4 (in Chinese).
- [3] 高玉斌. 硼胺络合物潜伏型固化剂的合成及环氧树脂体系性能研究[D]. 广州:华南理工大学, 2014:7-12.  
GAO Y B. Study on synthesis of boron amine complex latent curing agent and epoxy resin system[D]. Guangzhou: Institutes of Technology of South China, 2014: 7-12 (in Chinese).
- [4] 胡玉明,吴良义. 固化剂[M]. 北京:化学工业出版社,2004:364-370.  
HU Y M, WU L Y. Curing agent[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 364-370 (in Chinese).
- [5] 陈平,张岩. 硼胺络合物/环氧树脂体系的固化反应机理及其动力学[J]. 复合材料学报,1999,16(4):52-57.  
CHEN P, ZHANG Y. Curing reaction mechanism of boron amine complex/epoxy resin system and its dynamics[J]. Journal of Composite Materials, 1999, 16(4): 52-57 (in Chinese).
- [6] 段国晨,赵景丽,赵伟超. 环氧树脂/酸酐固化剂体系的热性能研究[J]. 中国胶粘剂, 2017,26(2):9-12.  
DUAN G C, ZHAO J L, ZHAO W C. Research on the thermal properties of epoxy resin/anhydride curing agent system[J]. China Adhesives, 2017, 26(2): 9-12 (in Chinese).
- [7] 明璐,宁荣昌,杨卫朋,等. 高性能环氧树脂浇铸体研究[J]. 热固性树脂, 2012(5):27-30.  
MING L, NING R C, YANG W P, et al. Study on high performance epoxy resin casting[J]. Thermosetting Resin, 2012(5): 27-30 (in Chinese).
- [8] 孙鹤. 具有二阶段固化特征形状记忆环氧固化动力学及性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014:26-27.  
SUN H. Study on curing kinetics and properties of shape memory epoxy resin with two stages curing characteristic[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014: 26-27 (in Chinese).
- [9] 赵仁翔,张德震,陆士平,等. 三官能团环氧树脂/复合固化剂体系的固化研究[J]. 热固性树脂, 2013,28(4):16-20.  
ZHAO R X, ZHANG D Z, LU S P, et al. Study on curing of three functional epoxy resin/composite curing agent system[J]. Thermosetting Resin, 2013, 28(4): 16-20 (in Chinese).
- [10] 郑昌梅. 功能型环氧固化剂的合成与应用[D]. 长春:长春理工大学, 2015:16-23.  
ZHENG C M. Synthesis and application of functional epoxy curing agent[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2015: 16-23 (in Chinese).
- [11] 赵渠森,谢富源. 先进复合材料手册[M]. 北京:机械工业出版社,2003:1318-1320.  
ZHAO Q S, XIE F Y. Handbook for advanced composite materials[M]. Beijing: China Machine Press, 2003: 1318-1320 (in Chinese).
- [12] 孙曼灵. 环氧树脂的应用原理与技术[M]. 北京:机械工业出版社,2002:115-139.  
SUN M L. Application principle and technology of epoxy resin [M]. Beijing: China Machine Press, 2002: 115-139 (in Chinese).
- [13] RUSLI A, COOK W D, SCHILLER T L. Blends of epoxy resins and polyphenylene oxide as processing aids and toughening agents 2: Curing kinetics, rheology, structure and properties [J]. Polymer International, 2014, 63(8): 1414-1426.
- [14] HICKEY C M D, BICKERTON S. Cure kinetics and rheology characterisation and modelling of ambient temperature curing epoxy resins for resin infusion/VARTM and wet layup applications [J]. Journal of Materials Science, 2013, 48(2): 690-701.
- [15] 尹昌平,肖加余,曾竟成,等. E-44 环氧树脂体系流变特性研究[J]. 宇航材料工艺,2008,38(5):67-70.  
YI C P, XIAO J Y, ZENG J C, et al. Study on rheological properties of E-44 epoxy resin system[J]. Aerospace Materials & Technology, 2008, 38(5): 67-70 (in Chinese).
- [16] GARSCHKE C, PARLEVLIET P P, WEIMER C, et al. Cure kinetics and viscosity modelling of a high-performance epoxy resin film [J]. Polymer Testing, 2013, 32(1): 150-157.
- [17] 倪秋如,倪礼忠,夏宏伟,等. TBPB-TBPO 引发不饱和聚酯树脂固化的动力学[J]. 功能高分子学报,2014,27(3):348-352.  
NI Q R, NI L Z, XIA H W, et al. Curing kinetics of unsaturated polyester resin initiated by TBPB-TBPO [J]. Journal of Functional Polymers, 2014, 27(3): 348-352 (in Chinese).
- [18] TRICK K A, SALIBA T E, SANDHU S S. Akinetic model of pyrolysis of phenolic resin in a carbon phenolic composite [J]. Carbon, 1997, 35(3): 393-401.
- [19] 樊孟金,周宇,尚呈元,等. 一种 80℃ 固化环氧树脂体系的非等温固化动力学[J]. 宇航材料工艺,2017(3):23-28.  
FAN M J, ZHOU Y, SHANG C Y, et al. Non-isothermal curing kinetics of an 80℃ curing epoxy resin system [J]. Aerospace Materials & Technology, 2017(3): 23-28 (in Chinese).
- [20] 孙曼灵,郑水蓉,马玉春. 环氧树脂固化促进剂(II)——环氧/酸酐体系的固化促进剂[C]//第十六次全国环氧树脂应用技术学术交流会暨学会西北地区分会第五次学术交流会暨西安粘接技术协会学术交流会论文集,2012:25-28.  
SUN M L, ZHENG S R, MA Y C. Epoxy resin curing accelerator (II) — Curing accelerator of epoxy/anhydride system [C] // Proceedings of the Sixteenth National Academic Conference on the Application of Epoxy Resin Technology and the Fifth Academic Exchange Meeting of the Central Society of China, 2012: 25-28 (in Chinese).
- [21] 苏祖君,曾金芳,王华强. 酸酐固化环氧树脂用促进剂评述[J]. 热固性树脂,2004,19(5):35-38.  
SU Z J, ZENG J F, WANG H Q. The review of accelerators for curing epoxy resin with acid anhydride [J]. Thermosetting Resin, 2004, 19(5): 35-38 (in Chinese).
- [22] LIU Q Y, CHEN J B, LIU S M, et al. Dynamic cure kinetics of

- epoxy resins using an amine-containing borate as a latent hardener[J]. *Polymer International*, 2012, 61(6): 959-965.
- [23] 陈平, 何东晓, 王辉. 硼胺络合物固化环氧树脂的研究[J]. 热固性树脂, 1993(2): 16-19.
- CHEN P, HE D X, WANG H. Study on the curing of epoxy resin by boramide complex[J]. *Thermosetting Resin*, 1993(2): 16-19 (in Chinese).
- [24] 陈平, 毛桂洁. 硼胺络合物/环氧脂体系固化反应机理及其动力学研究[J]. 绝缘材料通讯, 1997(2): 27-29.

CHEN P, MAO G J. Study on curing reaction mechanism and kinetics of boron amine complex / epoxy resin system [J]. *Ju-yuan Cailiao Tongxun*, 1997(2): 27-29 (in Chinese).

#### 作者简介:

邢志鹏 男, 博士。主要研究方向: 树脂基复合材料。

乔英杰 男, 博士, 教授。主要研究方向: 树脂基复合材料、陶瓷基复合材料、敏感材料与器件。

## Low-viscosity epoxy resin boramine-anhydride composite curing system

XING Zhipeng, QIAO Yingjie\*, ZHANG Xiaohong, WANG Xiaodong

(College of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In order to explore the mechanism of composite curing reaction of low viscosity epoxy resin, boramine-anhydride The rheological properties and curing reaction process of low-viscosity epoxy resin with boramine-anhydride composite curing system were studied, and the influence of boramine-anhydride compound ratio on the rheological properties and curing reaction process of the composite curing system was analyzed. Based on Arrhenius equation, the curing time, gel time and activation energy of curing reaction of the composite curing system were determined by rheological parameters. The results show that the curing reaction is promoted with the increase of the anhydride ratio in the curing system, while the starting point of curing and the gel time point decrease, and the activation energy based on Arrhenius equation is reduced. The curing reaction process of boramine-anhydride composite curing system was analyzed by non-isothermal differential scanning calorimeter (DSC). The results indicate that relatively independent double exothermic peaks appear in the boramine-anhydride composite curing system. With the increase of anhydride ratio, the peak value of the low-temperature exothermic peak increases, the peak value of the high-temperature exothermic peak decreases, and the peak temperatures of double exothermic peaks move to the side of high temperature. According to the curing reaction mechanism of the two kinds of curing agents, two effects of mutual synergy and mutual competition between the curing agents of boramide and anhydride exist in boramine-anhydride composite curing system of epoxy resin.

**Keywords:** epoxy resin; boramine curing agent; anhydride curing agent; rheological property; curing reaction

Received: 2018-04-11; Accepted: 2018-05-11; Published online: 2018-07-05 17:25

URL: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180705.0936.001.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180705.0936.001.html)

Foundation item: National National Science Foundation of China (51479037)

\* Corresponding author. E-mail: [qiaoyingjie99@163.com](mailto:qiaoyingjie99@163.com)

http://bhxb.buaa.edu.cn      jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0216

# 基于 Adaboost 的填充式防护结构超高速 撞击损伤预测



丁文哲<sup>1</sup>, 李新洪<sup>2,\*</sup>, 杨虹<sup>1</sup>

(1. 航天工程大学 研究生院, 北京 101416; 2. 航天工程大学 宇航科学与技术系, 北京 101416)

**摘 要:** 填充式防护结构的显式弹道极限方程在对弹丸进行超高速撞击损伤预测时, 由于填充材料、填充方式的不同, 会导致预测结果与实测数据存在一定偏差。对此, 采用机器学习方式将该问题转化为二分类问题, 以碰撞过程中的弹丸撞击参数、防护结构参数作为分类特征, 构建了基于 Adaboost 的填充式防护结构超高速撞击损伤预测模型。该模型以分类回归树(CART)作为弱分类器, 通过对一系列弱分类器的加权组合生成强分类器, 并通过对训练样本的循环使用, 实现了小样本集下的撞击损伤预测。实验结果表明, 建立的 Adaboost 预测模型对填充式防护结构的超高速撞击损伤具有良好的预测效果, 总体预测率与安全预测率相比于 NASA 的弹道极限方程均提高了 14.3%, 具有更强的通用性。通过不同训练样本规模下的交叉检验, 证明了该模型具有良好的鲁棒性与准确性。

**关键词:** 填充式防护结构; 损伤研究; Adaboost 算法; 总体预测率; 安全预测率

**中图分类号:** V423.4<sup>+</sup>3

**文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-5965(2019)01-0149-10

航天器在空间中运行时会受到来自微流星体或空间碎片的撞击, 若不能成功抵御则会导致严重事故的发生。因此, 为了提高航天器在轨运行时的防护能力, Whipple<sup>[1]</sup> 在 20 世纪 40 年代提出了在航天器舱壁外层增设一层防护屏的结构, 称为 Whipple 防护结构。在随后几十年中, Whipple 防护结构逐渐发展为填充式防护结构, 即在 Whipple 防护结构的前墙与舱壁之间加入先进填充材料作为中间层, 来对空间碎片进行破碎和缓冲, 以降低碎片云撞击舱壁的速度, 达到对航天器更好的防护效果。

在空间碎片对航天器进行超高速碰撞的过程中, 撞击是否能击穿航天器的防护结构, 从而损伤航天器, 是航天器超高速撞击防护研究的关键。

在此问题的研究上, 国外主要依靠建立航天器防护结构的弹道极限方程来对碎片的撞击效果

进行预测。其主要思想是: 通过理论分析建立出极限方程的一般形式, 再通过实验数据拟合的方法确定方程中的待定参数。经过几十年的发展, Cour-Palais<sup>[2]</sup>、Robinson<sup>[3]</sup>、Christiansen<sup>[4]</sup> 等针对不同防护结构建立了多种弹道极限模型, 为航天器超高速撞击损伤的研究打下了良好的基础。此外, Ryan 和 Thaler<sup>[5]</sup> 在 2013 年采用人工神经网络直接利用大量实验数据进行学习, 建立了 Whipple 防护结构的弹道极限方程, 相比于显式弹道极限方程具有更好的预测效果。

随着中国载人航天工程的推进, 多家机构也纷纷展开了对航天器防护结构的研究。柳森等<sup>[6]</sup> 首次利用实验研究了 Whipple 防护结构的防护性能随弹丸直径、速度、防护屏厚度的关系。管公顺<sup>[7]</sup> 系统地研究了铝双层板防护结构的防护性能, 并得到了弹速小于 5.5 km/s 时铝双层板防护结构的弹

收稿日期: 2018-04-18; 录用日期: 2018-05-25; 网络出版时间: 2018-06-26 14:23

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180625.1140.001.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180625.1140.001.html)

\* 通信作者: E-mail: 13366159269@189.cn

**引用格式:** 丁文哲, 李新洪, 杨虹. 基于 Adaboost 的填充式防护结构超高速撞击损伤预测[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 149-158. DING W Z, LI X H, YANG H. Hypervelocity impact damage prediction of stuffed Whipple shield based on Adaboost[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 149-158 (in Chinese).

道极限曲线。张晓天等<sup>[8]</sup>利用支持向量机(SVM)建立了单层板结构的航天器弹道极限方程。

近年来,随着对单、双层板防护结构研究的成熟,国内逐渐将研究重点转向填充式防护结构的超高速撞击损伤研究。贾光辉等<sup>[9]</sup>利用穷举法对三指标<sup>[10]</sup>耦合下的NASA填充式防护结构的弹道极限方程进行了双参数修正,使其更适合国内的填充式防护结构;同时其利用差异演化算法直接对文献[11]中建立的弹道极限方程进行多目标优化,在得到较优预测效果的同时,相比于穷举法节省了大量的时间<sup>[12]</sup>。此外,哈尔滨工业大学的哈跃<sup>[13]</sup>、张宝玺<sup>[14]</sup>、祖士明<sup>[15]</sup>通过大量超高速撞击实验研究了不同填充式防护结构在超高速撞击条件下的防护效果。

填充式防护结构由于填充方式不同,限制了通用型弹道极限方程的预测准确率,同时由于实验数据量过少而难以像文献[5]一样采用神经网络方式进行建模。鉴于此,本文采用集成学习方法,通过建立 Adaboost 预测模型,实现小数据情况下对填充式防护结构的超高速撞击损伤预测。相比于显式弹道极限方程,该方法具有更强的通用性。

## 1 NASA 填充式防护结构弹道极限方程

在进行超高速撞击实验时,由于弹丸在低、中、高不同撞击速度区内会产生不同的物理和化学特性,因此在建立弹道极限方程时需要根据弹丸的撞击速度将方程分为3段。针对填充式防护结构(见图1),NASA工程师 Christiansen等<sup>[4]</sup>在1995年通过将防护结构参数与弹丸撞击参数作为弹丸临界直径的自变量,提出了一种适用性较强的通用弹道极限方程;并在2001年通过对弹丸撞击速度区间拐点以及低速区内的系数参数等进行修正,提出了适用性更强的通用型弹道极限方程<sup>[16]</sup>。方程结构如下:

$$d_c = \begin{cases} K_L [t_w (\sigma/40)^{0.5} + C_L m_b] \cdot \frac{1}{(\cos \theta)^{4/3} \rho_p^{0.5} v^{2/3}} & v \leq 2.6 / (\cos \theta)^{0.5} \\ K_{Hi} (t_w \rho_w)^{1/3} \rho_p^{-1/3} (\cos \theta)^{-0.25} W_i^{2/3} (\sigma/40)^{1/6} \cdot \{ [v - 2.6 / (\cos \theta)^{0.5}] / [6.5 / (\cos \theta)^{3/4} - 2.6 / (\cos \theta)^{0.5}] \} + K_{Li} \rho_p^{-1/2} [t_w (\sigma/40)^{0.5} + C_L m_b] (\cos \theta)^{-1} \{ [6.5 / (\cos \theta)^{3/4} - v] / [6.5 / (\cos \theta)^{3/4} - 2.6 / (\cos \theta)^{0.5}] \} & 2.6 / (\cos \theta)^{0.5} < v < 6.5 / (\cos \theta)^{3/4} \\ K_H (t_w \rho_w)^{1/3} W_i^{2/3} (\sigma/40)^{1/6} \cdot \frac{1}{\rho_p^{1/3} v^{1/3} (\cos \theta)^{1/2}} & v \geq 6.5 / (\cos \theta)^{3/4} \end{cases} \quad (1)$$

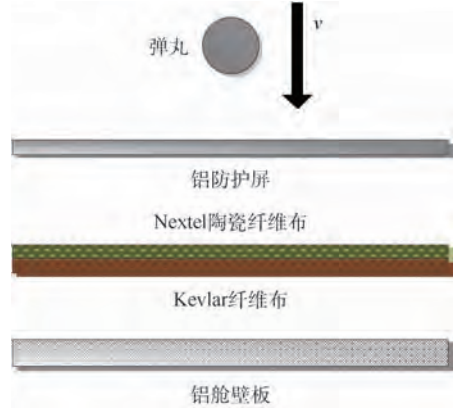


图1 Nextel/Kevlar 填充式防护结构

Fig. 1 Stuffed Whipple shield of Nextel/Kevlar

式中: $d_c$ 、 $\theta$ 、 $v$ 、 $\rho_p$ 为弹丸撞击参数; $d_c$ 为临界弹丸直径,cm; $\theta$ 为弹丸撞击角,(°); $v$ 为弹丸撞击速度,km/s; $\rho_p$ 为弹丸密度, $g/cm^3$ ; $t_w$ 、 $\sigma$ 、 $\rho_w$ 、 $m_b$ 、 $W_i$ 为防护结构参数; $t_w$ 为航天器舱壁厚度,cm; $\sigma$ 为航天器舱壁的屈服应力,ksi(1 ksi = 6.895 MPa); $\rho_w$ 为航天器舱壁密度, $g/cm^3$ ; $m_b$ 为防护层前屏与填充织物的总面密度, $g/cm^2$ ; $W_i$ 为防护层前屏与航天器舱壁间的距离,cm; $K_L$ 、 $K_{Hi}$ 、 $C_L$ 、 $K_{Hi}$ 、 $K_{Li}$ 为拟合系数,分别取  $K_L = 2.35 g^{0.5} \cdot km^{2/3} \cdot cm^{-3/2} \cdot s^{-2/3}$ ,  $K_{Hi} = 0.6 km^{1/3} / s^{1/3}$ ,  $C_L = 0.37 cm^3 / g$ ,  $K_{Hi} = 0.321$ ,  $K_{Li} = 1.243 g^{0.5} / cm^{3/2}$ 。

## 2 NASA 弹道极限方程的预测效果分析

对于填充式防护结构来说,当选用不同的填充材料作为防护结构的中间层时,由于填充材料的不同物理、化学特性会导致弹丸在超高速撞击时产生差异性破碎、熔化、气化现象,因此采用不同种填充材料需要对NASA弹道极限方程的适用效果进行分析。

不同于国外在进行填充式防护结构设计时所选用Nextel陶瓷纤维布与Kevlar纤维布的混合材料作为填充层,国内的相关研究主要是利用玄武岩纤维布作为Nextel陶瓷纤维布的替代材料进行研究。下面以文献[14]中的35组实验数据为例,对NASA弹道极限方程的损伤预测效果进行分析。

表1给出了实验后的撞击结果以及通过NASA填充式防护结构弹道极限方程(见式(1))计算出的击穿临界弹丸直径。其中后墙出现穿孔、裂纹、剥落时,认为此次实验为防护失效。图2更加直观地给出了实验数据的分布情况。其中纵坐标表示实验中实际弹丸直径与通过NASA弹道极限方程预测的临界弹丸直径之比,实心点

表 1 超高速撞击实验预测结果

Table 1 Prediction results of hypervelocity impact experiment

编号	实际弹丸直径/cm	弹丸撞击速度/( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	穿透结果	临界弹丸直径/cm	预测结果
1	0.635	3.42	yes	0.529 1	√
2	0.635	3.99	no	0.623 1	×
3	0.635	4.153	no	0.65	√
4	0.635	4.21	no	0.659 3	√
5	0.635	3.87	yes	0.603 3	√
6	0.635	3.75	yes	0.585 5	√
7	0.635	3.82	no	0.597	×
8	0.635	1.24	yes	0.65	×
9	0.635	1.04	no	0.730 8	√
10	0.794	4.54	yes	0.715 1	√
11	0.794	2.1	yes	0.457 5	√
12	0.794	1.53	yes	0.565	√
13	0.794	0.764 5	no	0.897 2	√
14	0.794	1.308 5	yes	0.627 1	√
15	0.794	1.81	yes	0.504 7	√
16	0.794	0.801	no	0.869 2	√
17	0.794	0.595	no	1.059 7	√
18	0.635	4.06	yes	0.636 2	×
19	0.635	4.237	yes	0.665 3	×
20	0.635	4.425	no	0.696 1	√
21	0.635	4.345	yes	0.683	×
22	0.635	1.404	yes	0.597 9	√
23	0.635	1.16	yes	0.679	×
24	0.635	1.12	no	0.695 1	√
25	0.635	2.97	yes	0.457 2	√
26	0.635	0.871	no	0.822	√
27	0.635	0.801	no	0.869 2	√
28	0.635	1.062	no	0.720 2	√
29	0.635	1.31	yes	0.626 2	√
30	0.635	3.97	yes	0.621 4	√
31	0.635	2.2	yes	0.443 2	√
32	0.635	3.87	no	0.605	×
33	0.635	3.92	yes	0.613 2	√
34	0.635	4.394 1	yes	0.691	×
35	0.635	4.46	yes	0.701 9	×

表示该次实验后墙失效,空心点表示该次实验成功防护。当实心点位于 1 线上方,空心点位于 1 线下方时,认为该次预测结果准确,否则预测失效。

从表 1 中可以看出,在 35 组超高速撞击实验中,通过 NASA 填充式防护结构弹道极限方程成功预测了 25 组,方程的总体预测率  $P_{\text{total}} = 71.4\%$ 。其中方程对 21 组失效数据成功预测了 14 组,对 14 组未失效数据成功预测了 11 组,因此方程的安全预测率  $P_{\text{safe}} = 80.0\%$ 。同时将这 35 组实验按式(1)中的区间分为低速段撞击实验

及中速段撞击实验,其中方程对 17 组低速段撞击实验成功预测了 15 组,方程的总体预测率  $P_{\text{total}} = 88.2\%$ ,安全预测率  $P_{\text{safe}} = 88.2\%$ 。对 18 组中速段撞击实验成功预测了 10 组,方程的总体预测率  $P_{\text{total}} = 55.6\%$ ,安全预测率  $P_{\text{safe}} = 72.2\%$ 。由此可见,NASA 的填充式防护结构弹道极限方程对采用不同填充物的填充式防护结构具有一定的预测效果,其中对于超高速撞击的低速段具有较好的预测效果,而对于超高速撞击的中速段预测效果较差。

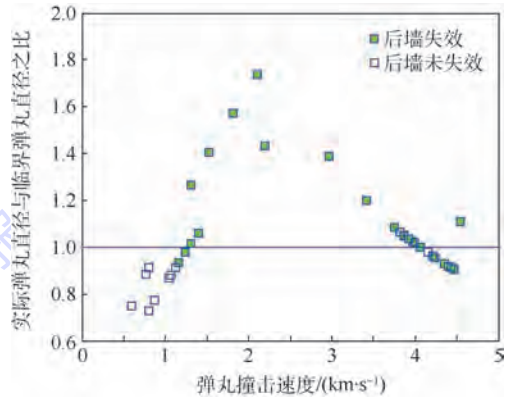


图 2 NASA 弹道极限方程的预测效果

Fig. 2 Prediction effect of NASA's ballistic limit equation

### 3 基于 Adaboost 的超高速撞击损伤预测模型

通过对 NASA 填充式弹道极限方程预测效果的检验可以发现,方程对于中速段撞击实验的预测效果只能达到 55.6%,可知式(1)中单纯通过低速段与高速段弹道极限方程插值得到的中速段方程并不能满足填充式防护结构在选择不同填充材料时对于中速段撞击的预测需求,因此本节利用 Adaboost 预测模型对填充式防护结构超高速撞击的损伤效果进行了预测研究。

#### 3.1 Adaboost 预测模型的适用性分析

空间碎片或微流星体对于航天器防护结构的超高速撞击结果可以分为 2 类,即撞击后舱壁是否失效。因此,填充式防护结构对于超高速撞击损伤的预测问题实际上是一个二分类问题,解决该问题只需要找出超高速撞击过程中所涉及到的分类特征,再采用恰当的分类方法即可实现对撞击结果的预测。

从第 2 节的分析中可以发现,NASA 填充式弹道极限方程对于低速段撞击实验的预测成功率达到了 88.2%,说明方程在低速段对于不同填充物结构的 Whipple 防护结构具有较强的预测效

果,因此在接下来的建模过程中以式(1)中的弹丸撞击参数、防护结构参数作为模型的特征属性。

对于分类问题来说,常用的方法有  $k$  近邻(KNN)、SVM、集成学习 Adaboost 等。每种分类方法都有各自的优势与弊端,其中 Adaboost 相较于其他方法具有以下特点:

1) Adaboost 提供了一种计算框架,可以结合不同方法构建弱分类器,当所选择的弱分类器模型复杂程度不高时,不易发生过拟合现象。

2) Adaboost 特别适合解决分类问题,尤其是当数据特征不多的情况下,也可以很好地对数据集进行分类,并且过程中不需要手动调整参数。

3) Adaboost 在训练时可以重复使用训练样本,因此在数据集中数据量较少的情况下,也可以实现较好的分类效果。

4) Adaboost 的弱分类器构造比较简单,相比于 SVM,在解决类似此类非线性问题时,不需要花很大精力寻找合适的核函数。

综合以上分析,本文采用 Adaboost 对填充式防护结构超高速撞击的损伤情况进行预测。

### 3.2 Adaboost 预测模型的搭建与测试

Adaboost 是 boosting 算法的改进,其通过弱分类器进行样本分类时,会将分错的样本进行加权从而提升错误样本所占的权重,再将被加权后的新样本重新投入训练,直到达到预设的错误率或最大迭代次数,因而 Adaboost 具有自适应性。总体上,Adaboost 分为 3 步:①初始化样本集所具有的权重。②通过自适应性训练弱分类器。③将训练得到的弱分类器集合为强分类器。整个建模过程如图 3 所示。图中,最左侧框内代表训练样本,框中直方图不同的长度代表样本所占的权重大小,每经过一次迭代样本所占的权重都会相应变化,经过  $T$  次迭代后将经过训练的  $T$  个弱分类器加权叠加成一个强分类器,从而对数据进行分类预测。

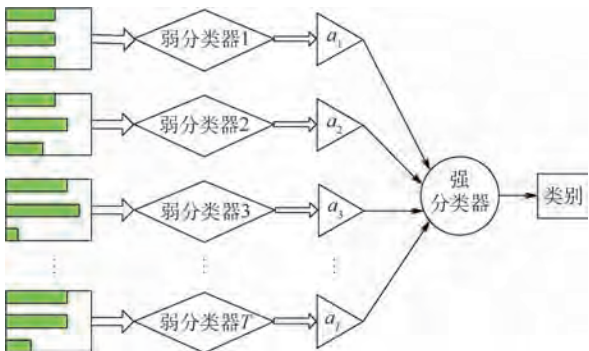


图3 Adaboost 示意图

Fig. 3 Schematic of Adaboost

Real Adaboost 是 Adaboost 框架中的一般形式,相较于最基本的 Discrete Adaboost 来说,其弱分类器的输出不仅仅局限于  $\{-1, 1\}$ ,而是扩大到实数域,这个实数则作为 Adaboost 判别的置信度,使模型具有更小的训练误差。下面建立具有连续置信度输出的 Real Adaboost 预测模型。

1) 定义

① 输入样本空间:  $S = \{(\mathbf{x}_1, y_1), (\mathbf{x}_2, y_2), \dots, (\mathbf{x}_n, y_n)\}$ ,  $\mathbf{x}_i$  代表第  $i$  次超高速撞击实验中弹丸撞击及防护结构参数;  $y_i \in \{-1, 1\}$  代表第  $i$  次超高速撞击实验中后墙是否失效;  $i = 1, 2, \dots, n$ 。

② 初始化样本权重:  $\omega_i^1 = 1/n, i = 1, 2, \dots, n$ 。

③ 弱分类器空间:  $H$ 。

2) 迭代训练

循环迭代  $T$  次, For  $t = 1$  to  $T$ 。

① 利用附有权值分布  $\omega_i^t$  的训练样本  $S$  对弱分类器进行训练(其中弱分类器可以选用不同模型,如分类树、SVM、KNN 等)。

a) 划分  $S: S = S_1 \cup S_2 \cup \dots \cup S_m$ , 当  $i \neq j$  时,  $S_i \cap S_j = \emptyset$ ,  $m$  为分段数。

b) 统计  $S_j$  中后墙失效与未失效的累计样本权重:  $W_+^j = \sum_{i: (\mathbf{x}_i \in S_j) \cap (y_i = 1)} \omega_i^t, W_-^j = \sum_{i: (\mathbf{x}_i \in S_j) \cap (y_i = -1)} \omega_i^t$ 。

c) 设置弱分类器输出: 对  $\forall \mathbf{x} \in S_j, h_t(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \ln((W_+^j + \delta)/(W_-^j + \delta)), j = 1, 2, \dots, n, \delta$  为平滑因子。

d) 计算归一化因子  $Z_t = 2 \sum_{j=1}^n \sqrt{W_+^j W_-^j}$ , 并选取  $h_t(\mathbf{x})$  使  $Z_t$  最小, 即  $h_t(\mathbf{x}) = \arg \min_{h \in H} Z_t$ 。

② 更新训练样本权重:

$$\omega_i^{t+1} = \frac{\omega_i^t}{Z_t} e^{-y_i h_t(\mathbf{x}_i)} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

3) 强分类器

集成训练后的弱分类器,得到最终的强分类器:

$$H_s(\mathbf{x}) = \text{sgn} \left( \sum_{t=1}^T h_t(\mathbf{x}) \right) \quad (3)$$

4) 模型的训练错误率估计

$$\frac{1}{n} |\{i: H_s(\mathbf{x}_i) \neq y_i\}| \leq \sum_{t=1}^T \left( \sum_{j=1}^n \sqrt{W_+^j W_-^j} \right) \quad (4)$$

除 Real Adaboost 外,本文还采用了 Gentle Adaboost、Modest Adaboost(Adaboost variants) 共同对填充式防护结构的超高速撞击损伤进行预测,以更全面地分析 Adaboost 预测模型对该问题的

处理效果。其中, Gentle Adaboost 与 Real Adaboost 类似,只是概率输出与 Real Adaboost 有所差别; Modest Adaboost 则增加了弱分类器输出时训练样本的反向或倒数加权项。

1) Gentle Adaboost

输入: 样本空间  $S = \{(\mathbf{x}_1, y_1), (\mathbf{x}_2, y_2), \dots, (\mathbf{x}_n, y_n)\}$ , 循环迭代次数  $T$ 。

输出: 强分类器  $H_s: H_s(\mathbf{x}) \rightarrow \{-1, 1\}$ 。

1. 初始化样本权重:  $\omega_i^t = 1/n, i = 1, 2, \dots, n$ 。
2. for  $t = 1$  to  $T$  do
3. 将  $\omega_i^t$  作为样本权值, 利用  $\mathbf{x}_i, y_i$  作加权最小二乘回归训练弱分类器  $h_t(\mathbf{x})$ 。
4. 更新强分类器  $H_s(\mathbf{x}) \leftarrow H_s(\mathbf{x}) + h_t(\mathbf{x})$ 。
5. 更新权值  $\omega_i^{t+1} = \omega_i^t e^{-\gamma h_t(\mathbf{x}_i)}$ , 归一化权重

使  $\sum_{i=1}^n \omega_i^{t+1} = 1$ 。

end

2) Modest Adaboost

输入: 样本空间  $S = \{(\mathbf{x}_1, y_1), (\mathbf{x}_2, y_1), \dots, (\mathbf{x}_n, y_n)\}$ , 循环迭代次数  $T$ 。

输出: 强分类器  $H_s: H_s(\mathbf{x}) \rightarrow \{-1, 1\}$ 。

1. 初始化样本权重:  $\omega_i^1 = 1/n, i = 1, 2, \dots, n$ 。
2. for  $t = 1$  to  $T$  and while  $h_t(\mathbf{x}) \neq 0$  do
3. 将  $\omega_i^t$  作为样本权值, 利用  $\mathbf{x}_i, y_i$  作加权最小二乘回归训练弱分类器  $h_t(\mathbf{x})$ 。
4. 计算反向权重  $\bar{\omega}_i^t = 1 - \omega_i^t$ , 归一化权重

使  $\sum_{i=1}^n \bar{\omega}_i^t = 1$ 。

5. 计算:

$$P_t^{+1}(\mathbf{x}) = P_{\omega_t}(y = 1 \cap h_t(\mathbf{x}))$$

$$\bar{P}_t^{+1}(\mathbf{x}) = P_{\omega_t}(y = 1 \cap h_t(\mathbf{x}))$$

$$P_t^{-1}(\mathbf{x}) = P_{\omega_t}(y = -1 \cap h_t(\mathbf{x}))$$

$$\bar{P}_t^{-1}(\mathbf{x}) = P_{\omega_t}(y = -1 \cap h_t(\mathbf{x}))$$

6. 建立弱分类器:

$$h_t(\mathbf{x}) = [P_t^{+1}(1 - \bar{P}_t^{+1}) - P_t^{-1}(1 - \bar{P}_t^{-1})](\mathbf{x})$$

7. 更新强分类器:  $H_s(\mathbf{x}) \leftarrow H_s(\mathbf{x}) + h_t(\mathbf{x})$ 。

8. 更新权值  $\omega_i^{t+1} = \omega_i^t e^{-\gamma h_t(\mathbf{x}_i)}$ , 归一化权重

使  $\sum_{i=1}^n \omega_i^{t+1} = 1$ 。

end

为检验算法正确性,以 UCI 数据库中的 Ionosphere 数据集<sup>[17]</sup>为例进行测试,其是一个典型的二分类数据集,包含 34 维特征 351 组数据。

测试过程中,以分类回归树 (CART)<sup>[18]</sup>作为弱分类器,测试方式为 5 折交叉检验 (即数据集与训练集比为 4 : 1,取 5 次测试错误率的均值来

反映算法效果),测试结果如图 4 所示。

由图 4 可知,当使用 100 个 CART 分类器时, Real Adaboost、Gentle Adaboost、Modest Adaboost 在 Ionosphere 数据集上的平均测试误差分别为 6.35%、6.34%、6.10%,低于文献[19]中 6 种分类算法错误率均值的 11.58%,且训练误差均为 0,证明了本文算法的正确性。

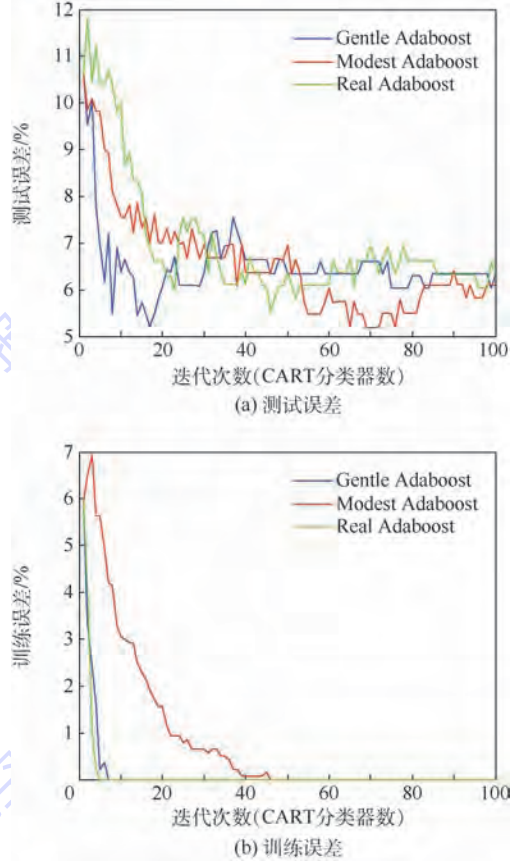


图 4 Adaboost 测试误差和训练误差

Fig. 4 Test error and training error of Adaboost

## 4 基于 Adaboost 的超高速撞击损伤预测效果分析

如 3.1 节所述,预测填充式防护结构的超高速撞击损伤实际上是一个二分类问题。本节以临界弹丸直径、弹丸撞击角、弹丸撞击速度、弹丸密度作为弹丸撞击参数,航天器舱壁厚度、航天器舱壁屈服应力、航天器舱壁密度、防护层前屏与填充织物总面密度、防护层前屏与航天器舱壁间距离作为防护结构参数。以样本数据中的这 2 类特征和样本数据的超高速撞击损伤结果作为 Adaboost 预测模型的输入,通过训练从而建立基于 Adaboost 的隐式超高速撞击损伤预测模型,从而对测试样本进行预测,并通过与测试样本的实际撞击结果进行对比,分析本文预测模型的预测效果。

流程如图5所示。

为进行验证实验,除文献[14]中的35组数据外,另外收集了72组填充式防护结构的超高速撞击实验数据,如表2所示。

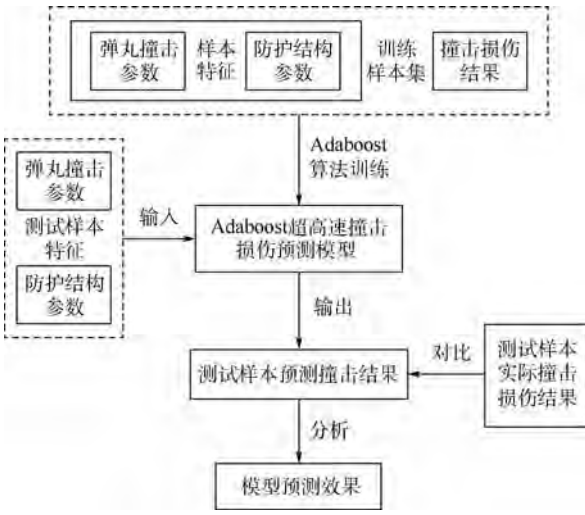


图5 基于 Adaboost 的超高速撞击损伤的预测流程

Fig.5 Hypervelocity impact damage prediction process based on Adaboost

表2 填充式防护结构的超高速撞击实验数据源

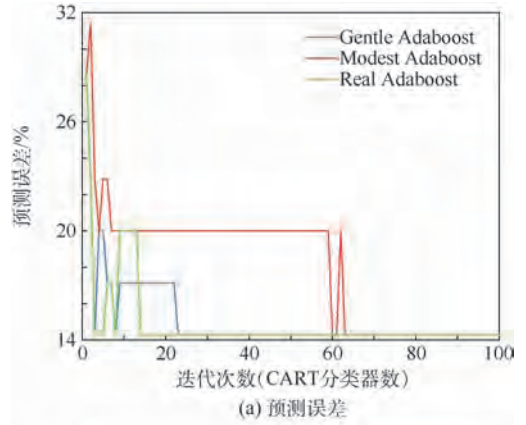
Table 2 Hypervelocity impact experimental data source of stuffed Whipple shield

数据来源	总实验次数	低速段次数	中速段次数	后墙失效次数	防护成功次数
文献[20]	5	2	3	0	5
文献[13]	17	1	16	9	8
文献[21]	27	19	8	16	11
文献[15]	23	12	11	16	7

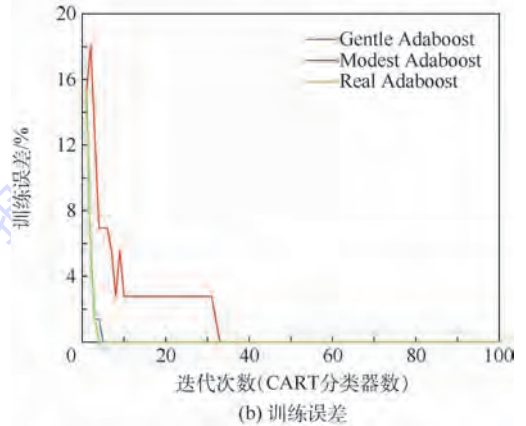
### 4.1 预测效果检验

为检验基于 Adaboost 的填充式防护结构超高速撞击损伤预测效果,将表2中的72组超高速撞击实验数据作为训练样本,将表1中的35组超高速撞击实验数据作为测试样本进行预测效果的检验。测试过程中,采用 CART 作为弱分类器,结果如图6所示。

从图6(a)中的预测结果来看,利用 Adaboost 预测模型对填充式防护结构进行超高速撞击损伤的预测准确率可以达到85.71%(等同于预测误差为14.29%)。其中,Real Adaboost 模型的收敛速度最快,在14次迭代后(即利用14个 CART 分类器)预测准确率即可达到稳定;Gentle Adaboost 较 Real Adaboost 预测稳定性稍差,在23次迭代后达到稳定;而 Modest Adaboost 则在第63次迭代时才能达到85.71%的预测准确率,预测效果



(a) 预测误差



(b) 训练误差

图6 Adaboost 预测模型预测误差和训练误差

Fig.6 Prediction error and training error of Adaboost prediction model

稍差。同时从图6(b)中可以看出,3种 Adaboost 预测模型在进行 CART 分类器的训练时,均可以使样本的训练误差快速降为0,表明本文模型具有较强的分类效果和学习能力,其中,Real Adaboost 和 Gentle Adaboost 的训练效果尤为明显,分别第4、第5次迭代时训练误差就已经收敛为0。

选取第100次迭代时的预测数据(已收敛)与 NASA 弹道极限方程的预测效果进行比较,比较结果如表3所示。

从表3中可以看出,当迭代次数(CART 分类器数量)达到100时,3种 Adaboost 预测模型对该35组数据的预测效果基本相同,总体预测率  $P_{total}$  与安全预测率  $P_{safe}$  相比于 NASA 的弹道极限方程均提高了14.3%。在低速段,Adaboost 预测模型可以对填充式防护结构的超高速撞击实现100%预测;在中速段,模型的总体预测率  $P_{total}$  相比于 NASA 的弹道极限方程提高了16.6%,安全预测率  $P_{safe}$  提高了16.7%。因此,可以看出 Adaboost 预测模型对于填充式防护结构的超高速撞击具有较好的预测效果。

表 3 填充式防护结构的超高速撞击实验预测对比

Table 3 Predictive comparison of hypervelocity impact experiment of stuffed Whipple shield

模型	总体(35组)		低速段(17组)		中速段(18组)	
	$P_{total}$	$P_{safe}$	$P_{total}$	$P_{safe}$	$P_{total}$	$P_{safe}$
NASA 弹道极限方程	71.4	80.0	88.2	88.2	55.6	72.2
Real Adaboost	85.7	94.3	100	100	72.2	88.9
Modest Adaboost	85.7	94.3	100	100	72.2	88.9
Gentle Adaboost	85.7	94.3	100	100	72.2	88.9

4.2 鲁棒性检验

为了对 Adaboost 预测模型的鲁棒性进行检验,采用 K 折交叉验证的方式对模型的预测效果进行检验。

首先以 10 折交叉检验为例对模型的预测效果进行说明。将表 1、表 2 中的 107 组数据随机分成 10 份,轮流将其中 9 份作为训练集、1 份作为预测集对模型进行效果检验,以 10 次预测结果的均值作为模型预测效果的估值,检验结果如图 7 所示。

从图 7(a)中的预测效果来看,Gentle Adaboost 的预测效果最好,在 83 次迭代后预测准确率稳定为 88.76%;Real Adaboost 收敛性更强,在 31 次迭代后预测准确率稳定在 87.85%;而 Mod-

est Adaboost 收敛性较差,在第 85 次迭代时达到最优准确率 88.17%。同时从图 7(b)可以看出,3 种 Adaboost 预测模型均可以使样本的训练误差快速降为 0,其中 Real Adaboost 和 Gentle Adaboost 的训练效果尤为明显,分别在第 5、第 7 次迭代时训练误差就已经收敛为 0。

为了避免在交叉检验过程中数据样本的随机选取会对模型的预测效果产生影响,进行 10 次 10 折交叉检验,迭代次数选为 100,结果如表 4 所示。

表 4 中给出了 Adaboost 预测模型的 10 次 10 折交叉检验结果,其中 3 种框架的训练误差均收敛为 0,因此该项未在表中给出。从预测结果来看,3 种框架的 Adaboost 预测模型在 10 次 10 折交叉检验中的平均预测准确率均保持在 88% 左右。其中 Gentle Adaboost 预测效果最好,预测准确率达到 88.71%;Real Adaboost 次之,预测准确率为 88.21%;Modest Adaboost 最弱,预测准确率为 87.66%。由此可以看出,当使用相同规模的不同训练样本时,Adaboost 预测模型的平均预测准确率保持在 88% 左右,模型的预测效果良好。

对模型分别进行 5 次 5 折交叉检验和 5 次 3 折交叉检验,以检验不同规模的训练样本对 Adaboost 预测模型预测准确率的影响,结果如表 5 所示。

表 5 给出了使用不同规模训练样本的交叉检验结果,结合表 4、表 5 中的平均预测准确率可

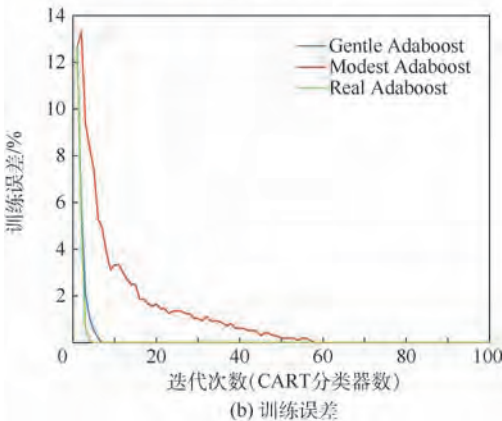
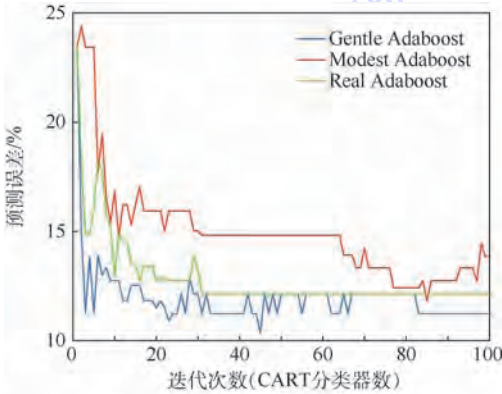


图 7 10 折交叉检验预测误差和训练误差

Fig. 7 Prediction error and training error of 10-fold cross check

表 4 十次 10 折交叉检验结果

Table 4 Ten 10-fold cross check results

检验标准	Real Adaboost	Gentle Adaboost	Modest Adaboost
预测误差/%	12.15	11.83	13.85
	9.53	8.53	11.32
	13.32	14.09	14.61
	9.35	10.26	9.43
	12.30	12.49	11.49
	11.72	10.29	11.12
	13.22	13.22	13.22
	11.27	8.73	11.27
	12.40	12.08	13.51
	12.61	11.38	13.61
平均预测准确率/%	88.21	88.71	87.66

可以看出,随着训练样本比例的减少,3种框架下的 Adaboost 预测模型对于填充式防护结构的超高速撞击损伤预测准确率虽有下降,但基本保持不变。其中 Real Adaboost 与 Gentle Adaboost 的预测准确率下降较多,最大降幅分别为 1.83% 和 1.7%; Modest Adaboost 的预测准确率下降最少为 0.59%。可以看出,在小训练集的情况下,Modest Adaboost 的预测效果更好。同时从表 5 中可以看出,在降低训练样本比例后,Adaboost 预测模型的平均预测准确率仍能保持在 87% 左右,表明训练样本的规模对模型的预测效果影响较小。

将表 1、表 2 中的 107 组数据代入 NASA 填充式防护结构的弹道极限方程(见式(1))进行计算,得到实验数据的预测结果如图 8 所示。

从图 8 中可以看出,方程对于 107 组实验数据成功预测了 82 组,总体预测为 76.64%,较 Adaboost 预测模型的预测准确率低了约 11%。

综合以上检验结果可以看出,在选用不同规模的随机样本时,Adaboost 预测模型仍可以对填充式防护结构的超高速撞击损伤保持稳定的预测效果,且平均预测准确率保持在 87% 左右,高于 NASA 的填充式防护结构弹道极限方程,证明了

表 5 不同规模训练样本的预测准确率

Table 5 Prediction accuracy of training samples with different scales

检验标准	Real Adaboost		Gentle Adaboost		Modest Adaboost	
	5折	3折	5折	3折	5折	3折
预测误差/%	12.61	15.81	13.17	15.78	12.61	14.88
	13.14	10.68	12.09	9.57	12.09	12.01
	12.98	15.44	12.98	15.44	10.96	15.44
	14.40	13.07	13.84	12.00	16.15	12.00
平均预测准确率/%	12.39	13.12	11.44	12.17	11.56	10.32
	86.90	86.38	87.30	87.01	87.33	87.07

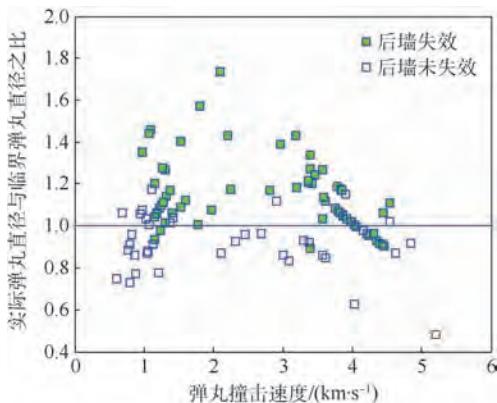


图 8 NASA 弹道极限方程在总体数据中的预测效果

Fig. 8 Prediction effect of NASA ballistic limit equation on all data

Adaboost 预测模型具有良好的鲁棒性与准确性。

## 5 结 论

采用恰当的防护结构以抵御空间中微流星体或空间碎片对航天器的撞击,是国内外航天工程的一项重要研究内容。继单层板、Whipple 防护结构之后,填充式防护结构已成为近年来研究的重点。对此,本文建立了基于 Adaboost 的填充式防护结构超高速撞击损伤预测模型,得到如下结论:

1) 在 Adaboost 框架下以分类回归树 CART 作为弱分类器,通过多次迭代可以实现对填充式防护结构的超高速撞击损伤预测。且实验算例表明,在对不同填充物、不同填充方式下的填充式防护进行超高速撞击损伤预测时,Adaboost 预测模型较 NASA 的填充式弹道极限方程具有更强的通用性,总体预测率与安全预测率均提高了 14.3%。

2) 在小数据集的情况下,采用不同规模的训练样本进行学习后,Adaboost 预测模型对填充式防护结构的超高速撞击损伤的预测效果仍保持稳定,证明了 Adaboost 预测模型具有良好的鲁棒性。且交叉检验结果表明,Adaboost 预测模型的平均预测准确率较 NASA 的填充式弹道极限方程高 11%。

3) 实验算例表明,Adaboost 预测模型在低速段内可以对不同种填充式防护结构的超高速撞击损伤进行准确预测。而在中速段内,其预测准确率虽较 NASA 填充式弹道极限方程有较大提升,但效果仍不理想。因此,下一步应将不同填充物的面密度、填充组数、填充组间距等特征加入防护结构参数,以得到更准确的预测效果。

**致谢** 感谢哈尔滨工业大学哈跃、张宝玺、祖士明、傅翔、贾古寨等为本文撰写提供的实验数据。

## 参考文献 (References)

- [1] WHIPPLE F L. Meteorites and space travel[J]. The Astronomical Journal, 1947, 52: 131.
- [2] COUR-PALAIS B G, PIEKUTOWSKI A J. The multi-shock hypervelocity impact shield [M] // SCHMIDT S C, DICK R D, FORBES J W, et al. Shock compression of condensed matter—1991. Amsterdam: Elsevier, 1992: 979-982.
- [3] ROBINSON J H, HAYASHIDA K B. Double-plate penetration equations: NASA TM-2000-209907 [R]. Washington, D. C.: NASA, 2000.
- [4] CHRISTIANSEN E L, CREWS J L, WILLIAMSEN J E, et al.

- Enhanced meteoroid and orbital debris shielding[J]. International Journal of Impact Engineering, 1995, 17(1):217-228.
- [5] RYAN S, THALER S. Artificial neural networks for characterizing Whipple shield performance[J]. Procedia Engineering, 2013, 58(56):31-38.
- [6] 柳森,李毅,黄洁,等.用于验证数值仿真的 Whipple 屏超高速撞击试验结果[J].宇航学报,2005,26(4):505-508.  
LIU S, LI Y, HUANG J, et al. Hypervelocity impact test results of Whipple shield for the validation of numerical simulation[J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(4):505-508 (in Chinese).
- [7] 管公顺.航天器空间碎片防护结构超高速撞击特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.  
GUAN G S. Hypervelocity impact characteristics investigation on the spacecraft space debris shield configuration[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006 (in Chinese).
- [8] 张晓天,湛颖,贾光辉.航天器单层板结构弹道极限的支持向量机预测模型[J].宇航学报,2014,35(3):298-305.  
ZHANG X T, SHEN Y, JIA G H. Support vector machine model for spacecraft single wall ballistic limit prediction[J]. Journal of Astronautics, 2014, 35(3):298-305 (in Chinese).
- [9] 贾光辉,欧阳智江,蒋辉,等.填充式防护结构弹道极限方程的多指标寻优[J].北京航空航天大学学报,2013,39(12):1573-1583.  
JIA G H, OUYANG Z J, JIANG H, et al. Multiple indicators optimization for stuffed Whipple shield ballistic limit equation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(12):1573-1583 (in Chinese).
- [10] 贾光辉,欧阳智江,蒋辉.撞击极限方程预测指标剖析与实例[J].航空学报,2013,34(10):2364-2371.  
JIA G H, OUYANG Z J, JIANG H. Analysis and instances of ballistic limit equations' predictive indicators[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(10):2364-2371 (in Chinese).
- [11] 姚光乐,贾光辉.填充式防护结构弹道极限方程形式建模[J].空间碎片研究,2017,17(1):29-33.  
YAO G L, JIA G H. Formal modeling of ballistic limit equations for stuffed Whipple shield[J]. Space Debris Research, 2017, 17(1):29-33 (in Chinese).
- [12] 贾光辉,姚光乐,张帅.填充式防护结构弹道极限方程的差演化优化[J].北京航空航天大学学报,2018,44(7):1489-1495.  
JIA G H, YAO G L, ZHANG S. Differential evolution optimization for stuffed Whipple shield ballistic limit equations[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(7):1489-1495 (in Chinese).
- [13] 哈跃.玄武岩纤维材料及其填充防护结构超高速撞击特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.  
HA Y. Research on hypervelocity impact properties of woven of basalt fiber material and its stuffed shielding structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009 (in Chinese).
- [14] 张宝玺.超高速撞击玄武岩及 Kevlar 纤维布填充防护结构优化设计[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.  
ZHANG B X. Optimum design of the protection structure of basalt and Kevlar fiber cloth filled with hypervelocity impact[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011 (in Chinese).
- [15] 祖士明.玄武岩及 Kevlar 纤维填充式防护结构超高速撞击性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.  
ZU S M. The optimal structural design of stuffed shields with basalt and Kevlar fiber clothes on hypervelocity impact[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013 (in Chinese).
- [16] CHRISTIANSEN E L, KERR J H. Ballistic limit equations for spacecraft shielding[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 26(1-10):93-104.
- [17] <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Ionosphere/>[DB]. 1989-01-01.
- [18] 苏锦,杨明,王春香,等.一种基于分类回归树的无人车汇流决策方法[J].自动化学报,2018,44(1):35-43.  
SU T, YANG M, WANG C X, et al. Classification and regression tree based traffic merging for method self-driving vehicles[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(1):35-43 (in Chinese).
- [19] 李海生.基于证据理论的分类方法研究[D].广州:华南理工大学,2013.  
LI H S. Research of classification method based on evidence theory[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013 (in Chinese).
- [20] 傅翔.玄武岩纤维布/铝丝网组合材料的空间碎片防护结构研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.  
FU X. Hypervelocity impact characteristics investigation on the spacecraft space debris shield configuration of the basalt fiber woven/Al-mesh combination protective structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011 (in Chinese).
- [21] 贾古寨.玄武岩布防护机理及其填充防护结构撞击极限分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.  
JIA G Z. Analysis on protection mechanism of basalt fabric and the limit of its stuffed shielding structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014 (in Chinese).

#### 作者简介:

丁文哲 男,博士研究生。主要研究方向:航天器应用。

李新洪 男,教授,博士生导师。主要研究方向:航天器应用。

杨虹 女,博士研究生。主要研究方向:航天任务分析与设计。

# Hypervelocity impact damage prediction of stuffed Whipple shield based on Adaboost

DING Wenzhe<sup>1</sup>, LI Xinhong<sup>2,\*</sup>, YANG Hong<sup>1</sup>

(1. Graduate School, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

2. Department of Aerospace Science and Technology, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

**Abstract:** The explicit ballistic limit equation of stuffed Whipple shield may cause some deviations between the prediction results and the measured data when the projectile is subjected to hypervelocity impact damage prediction because of different filling materials and filling methods. In this regard, the machine learning method is used to transform the problem into a binary problem. The projectile impact parameters and protective structure parameters in the collision process are used as the classification features to construct a hypervelocity impact damage prediction model of stuffed Whipple shield based on Adaboost. The model uses the classification and regression tree (CART) as a weak classifier to generate a strong classifier by weighted combination of a series of weak classifiers. Through the cyclic use of training samples, the impact damage prediction under a small sample set is achieved. The experimental results show that the established Adaboost prediction model has good prediction effect on the hypervelocity impact damage of stuffed Whipple shield. Both the totality prediction rate and the safety prediction rate of Adaboost prediction model increase by 14.3% compared with NASA's ballistic limit equation, and the established model has more versatility. Cross check under different training sample sizes proves that the model has good robustness and accuracy.

**Keywords:** stuffed Whipple shield; damage research; Adaboost algorithm; totality prediction rate; safety prediction rate

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0239

# 遥感图像飞机目标高效搜检深度学习优化算法



郭琳, 秦世引\*

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 为了实现大幅面遥感图像中飞机目标的高效检测与准确定位,通过深度神经网络(DNN)的级联组合,提出了一种新颖的搜寻与检测相集成的飞机目标高效检测算法。首先,运用高性能的端到端 DNN 网络,进行停机坪与跑道区域的像素级高效精准分割,从而大幅度缩小飞机目标的搜索范围,以降低虚警发生概率,完成飞机目标候选检测区域的快速搜寻。然后,针对分割所得停机坪与跑道区域,借助手工数据集对 YOLO 网络模型进行迁移式强化训练,一方面可以弥补训练集在样本类型与数据规模上的不足,另一方面借助 YOLO 网络的强时效性优势对飞机目标的位置进行回归求解,可以显著提高飞机目标的检测效率。停机坪与跑道区域分割 DNN 网络在分割精度与时效性上具有显著优势,而迁移式强化训练 YOLO 网络不仅具有很高的检测效率,在检测精度上也能保持良好的性能。通过一系列综合实验与对比分析,验证了提出的搜寻与检测相集成的 DNN 级联组合式飞机目标高效检测算法的性能优势。

**关键词:** 深度学习; 深度神经网络; 停机坪与跑道分割; 飞机目标检测; 大幅面遥感图像

中图分类号: TP753

文献标识码: A

文章编号: 1001-5965(2019)01-0159-15

在现代战争和防御侦察中,由于飞机目标机动性强,威胁性大,附加值高,常被视为一类具有高战略价值的时敏目标。借助遥感图像对地面停靠的飞机目标实施高效精准的检测与定位对情报获取及战略部署具有重要意义。随着遥感技术的不断发展,遥感图像在空间分辨率、光谱分辨率、时间分辨率上呈现出快速增长的趋势。如何利用海量的图像数据,实现大幅面遥感图像飞机目标的高效检测与精准定位,成为一项亟待解决的难点课题。其挑战性主要体现在以下 4 点:①遥感图像成像幅面大,覆盖范围广。与之相比,飞机目标所占像素比例小,信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)低,对整幅遥感图像进行人工判读难以在短时间内发现飞机目标。②不同类型的飞机目标的外型各异,大小不同,涂装颜色也各有区别,经典

的浅层目标特征在检测过程中容易造成误检、漏检情况的发生。③飞机目标的检测容易受到不同天时、天候条件下光照、阴影、云层遮挡等环境因素的影响,需要算法具备良好的稳定性以应对不同检测场景的需要<sup>[1]</sup>。④由于战场形势瞬息万变,大幅面遥感图像的飞机目标检测算法除了需要具备很高的精确性,还必须满足实时性的应用需求。

飞机目标通常停靠在停机坪和跑道区域内,对停机坪和跑道区域实施候选检测区域的分割与提取可以显著缩小飞机目标的搜寻范围,进而在分割出的停机坪与跑道区域内针对飞机目标实施精确地检测定位,这是实现大幅面遥感图像飞机目标高效检测的有效途径。在本文中,利用高性能的端到端深度神经网络(Deep Neural Networks,

收稿日期: 2018-04-27; 录用日期: 2018-09-03; 网络出版时间: 2018-09-10 17:23

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180907.1016.002.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180907.1016.002.html)

基金项目: 国家自然科学基金(U1435220,61731001)

\*通信作者. E-mail: qsy@buaa.edu.cn

引用格式: 郭琳, 秦世引. 遥感图像飞机目标高效搜检深度学习优化算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 159-173.

GUO L, QIN S Y. Deep learning and optimization algorithm for high efficient searching and detection of aircraft targets in remote sensing images[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 159-173 (in Chinese).

DNN)结构,对大幅面遥感图像中的停机坪与跑道区域等飞机目标候选检测区域实施高效精准分割,显著提高了飞机目标的检测效率。在分割出的跑道与停机坪区域内,借助手采集的飞机目标样本集,对YOLO(You Only Look Once)网络模型进行迁移式强化训练,一方面弥补了手工数据集数据规模上的不足,另一方面借助YOLO网络的强时效性的优势,实现了飞机目标的高效检测与定位。在候选检测区域的分割提取与飞机目标的高效检测2个环节中,都充分考虑了大幅面遥感图像飞机目标检测精确性与实时性的实际应用需求,借助2种高性能DNN网络的级联组合,提出了新颖的搜寻与检测相集成的飞机目标高效检测算法。

为了验证本文所提出的级联式飞机目标高效检测算法的有效性,在实际获取的大幅面遥感图像上,将本文提出的检测算法与R-CNN(Regions with Convolutional Neural Networks)<sup>[2]</sup>、Faster R-CNN<sup>[3]</sup>进行飞机目标检测实验结果的对比分析和性能评估。结果表明,本文提出的搜寻与检测相集成的级联组合式飞机目标高效检测算法不仅在检测速度上具有明显优势,同时在检测精度上也能达到满意水平,可为大幅面遥感图像中飞机目标的高效检测提供良好的技术支持。

## 1 相关工作与技术动态

遥感图像幅面大,包含的地物类型多,为了提高检测效率,降低虚警干扰,需要对停机坪与跑道区域实施高效精准分割。

赵雪梅等<sup>[4]</sup>提出了基于隐马尔可夫高斯随机场模型的模糊聚类高分辨率遥感影像分割算法,分别利用隐马尔可夫模型和高斯模型构建标号场和特征场的邻域关系,同时强化空间和光谱信息对影像分割的影响,在特征域上,不但考虑了同一彩色的邻域关系,也考虑了不同彩色间的邻域关系,完善了光谱的邻域信息,实现了高分辨率遥感影像地物目标的精准分割。陈荣元等<sup>[5]</sup>提出了一种结合Gibbs随机场的特征加权遥感影像分割方法,利用加权最小距离分类法对影像进行初始分割,并利用Gibbs随机场描述像素的空间相关性,综合Gibbs随机场描述的标记场和加权最小距离分类法描述的特征场来获取影像的最终分割结果。Budak等<sup>[6]</sup>提出了一种新颖的由粗检测到精细的停机坪与跑道区域分割方案,先基于直线段检测(Line Segment Detector, LSD)算法提取长直线区域作为停机坪与跑道分割的候选区域,再对候选检测区域进行局部不变特征提取与

分类,最终达到停机坪与跑道区域检测与分割的目的。Wang和Pan<sup>[7]</sup>提出了一种基于显著性区域搜索的停机坪与跑道分割算法,先通过显著图提取停机坪与跑道的候选区域,再提取候选区域的视觉词包(Bag of Visual Words, BoVW)特征,通过支持向量机(SVM)对BoVW特征进行分类,最终实现停机坪与跑道区域的定位和分割。

然而,经典的停机坪与跑道区域分割算法具有一定的局限性:①基于直线形状特征的停机坪与跑道区域分割算法在非直线区域性能欠佳,而基于显著性提取的分割算法无法准确描述停机坪与跑道区域的轮廓信息,从而导致分割精度较低;②利用长直线特征进行候选分割区域搜寻,其搜寻结果与直线长度的阈值设置密切相关,在应对不同检测场景时泛化性能较弱,容易造成误分割情况的发生。

伴随着深度学习理论的迅猛发展,特别是AlexNet获得了ImageNet2012挑战赛冠军以后<sup>[8]</sup>,DNN网络在数字手写体识别、人脸识别以及无人驾驶等诸多领域取得了巨大的成功。借助卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNN),可以为图像中的每个像素分配具有语义信息的类别标签,从而实现像素级的图像分割。然而,经典的CNN网络对于输入图像的大小有限制,而原始图像的裁剪和缩放会引起目标信息的畸变与缺失,造成分割精度的下降。为了解决这一问题,Long等<sup>[9]</sup>提出了全卷积神经网络(Fully Convolutional Neural Network, FCN)的概念。在FCN网络中,全连接层被 $1 \times 1$ 大小的卷积层所替代,从而使得FCN网络具备处理任意大小图像的能力。FCN网络对浅层特征与深层特征进行融合,获得了性能更优的特征表达,并借助融合特征图的上采样,获得最终的分割结果。然而,简单的上采样操作会破坏原始图像像素之间的空间位置关系,导致分割精度欠佳。为了解决这一问题,Badrinarayanan等<sup>[10]</sup>提出了新颖的SegNet网络模型结构。SegNet的创新之处在于其独特的编码-解码结构。在编码阶段,SegNet借助VGG-16网络中的13个卷积层完成特征提取,而在解码阶段,则采用对称的网络模型进行空间信息和语义信息的恢复。相比FCN网络简单的上采样算法,SegNet多层转置卷积操作更有利于精确恢复原始图像像素点之间的空间位置关系,因而能够实现更加精确的图像分割。Ronneberger等<sup>[11]</sup>提出了结构更为复杂的U-Net网络模型。U-Net结合了编码-解码的结构设计以及多特征图

融合的优势,相比 Dan 等<sup>[12]</sup>提出的模型,在性能上有了大幅提高。此外,条件随机场(Conditional Random Fields, CRF)可以显著提高图像分割精度,这在 Chen 等<sup>[13]</sup>的研究中也得到了充分的借鉴和应用。Zhao 等<sup>[14]</sup>在 CVPR2017 发表的 PSP-Net、Chen 等<sup>[15]</sup>发表的 DeepLab 及 He 等<sup>[16]</sup>在 IC-CV2017 上发表的 Mask R-CNN 使图像语义分割的精度得到了进一步提升。

飞机目标作为一种高价值的时敏目标,在不同天时、天候的复杂场景下对其实施高效精准检测一直都是国内外学者研究的热点。经典的飞机目标检测算法在特征选择上,主要包括外型特征、轮廓特征、显著性特征和局部不变特征等。伴随着深度学习的迅猛发展,传统的手工特征被深度学习提取的机器特征快速超越和取代。Girshick 等<sup>[2]</sup>在 CVPR2014 上首次将深度学习引入到目标检测中,提出了 R-CNN 算法。在 R-CNN 算法的实现过程中,首先借助选择性搜索算法获取大量的目标线索,然后利用 AlexNet 网络模型对目标线索区域进行特征提取,最后借助 SVM 分类器对特征进行分类,从而实现目标检测的目的。相比经典的可变性部件模型(Deformable Part Model, DPM)目标检测算法,R-CNN 算法在平均精度均值(Mean Average Precision, MAP)上提高了 30% 以上。然而,由于选择性搜索算法需要消耗大量的计算资源,并且每个目标线索进行特征提取时都要进行重复的卷积操作,导致 R-CNN 算法的检测速度较慢。Girshick<sup>[17]</sup>在 ICCV2015 上发表的 Fast R-CNN 算法及 Ren 等<sup>[3]</sup>发表的 Faster R-CNN 算法陆续解决了这些问题。在 Fast R-CNN 算法中, Ren 等<sup>[18]</sup>借鉴了 SPPNet 空间金字塔池化的思路,通过在卷积层后加入感兴趣池化层对

不同大小的目标线索的特征图进行归一化处理,一方面克服了 R-CNN 算法输入图像必须为固定大小的局限,避免了图像剪裁和变形造成的目标畸变;另一方面所有的目标线索可以共享卷积层的权重参数,大幅降低了计算资源开销。而在 Faster R-CNN 算法中,选择性搜索算法被区域线索神经网络(Region Proposal Neural Networks, RPN)所替代,不仅目标线索检测的精确率和召回率得到了明显改进,而且线索生成效率也获得了显著提高。为了进一步加快目标检测的效率,Redmon 等<sup>[19]</sup>在 CVPR2016 上提出了新颖的 YOLO 算法。YOLO 算法的创新之处在于其采用了端到端的网络结构设计,利用回归算法对目标类别以及目标边界框位置进行拟合,相比 Faster R-CNN 算法先产生目标线索,再对目标线索进行分类筛选的检测策略,在检测速度上有了大幅提升。

本文在分析前沿研究动态的基础上,通过 DNN 网络的深度学习与级联组合将搜寻分割与检测定位有机结合起来,设计构建了高性能的飞机目标检测算法。

## 2 快速搜寻与高效检测的组合方案

### 2.1 大幅面遥感图像中飞机目标的分布特点

为了调查遥感图像中飞机目标的分布规律,从 Google Earth 上搜集了 100 幅遥感图像,并对停机坪与跑道以及其他区域的飞机样本数目进行统计。不同区域停放的飞机目标样本在图 1 中进行了展示。在图 1 中,上下两行图像展示了两组不同区域停靠的飞机目标样本示意图。在每行图像中,停机坪、跑道以及其他区域的飞机目标样本,均为该行首列展示的原始遥感图像局部放大所得。



图 1 不同区域停靠的飞机目标样本示意图

Fig. 1 Schematic of aircraft target sample docked in various areas

对不同区域飞机目标样本的数量进行统计,结果如表1所示。从结果中可以看出,停机坪与跑道区域内停靠的飞机目标为1 046架,占总数的97.85%,而停靠在其他区域的飞机目标为23架,占总数的2.15%。因此,对停机坪与跑道区域进行高效精准分割,可以在尽可能不遗漏飞机的条件下,大幅减少搜索范围,同时避免无关检测区域产生的干扰,显著提高飞机目标检测的效率和精度。

表1 不同区域停靠的飞机目标样本数量统计

Table 1 Quantity statistics of aircraft target sample docked in various areas

区域	飞机目标样本数量/架	比例/%
停机坪	1035	96.82
跑道	11	1.03
其他区域	23	2.15

### 2.2 基于DNN网络的停机坪快速检测与分割

大幅面遥感图像中的停机坪与跑道区域的分割和提取不仅需要满足高精度的要求,精确判定候选检测区域范围,避免误分割和漏分割情况的发生,还需要具有很高的分割效率,满足飞机目标检测实时性的需求。借助深度学习理论,本文设计了新颖的端到端DNN网络以实现大幅面遥感图像停机坪与跑道区域的高性能分割,网络的离线监督训练如图2所示。图中: $g(\cdot)$ 为DNN网络模型的非线性激活函数; $W_i$ 和 $b_i$ 分别为第*i*层神经元的权重系数和偏移量。

在DNN网络的离线监督训练过程中,借助开源标注工具LableMe<sup>[20]</sup>,对遥感图像样本集中的停机坪与跑道区域进行人工标注。当离线监督训练完成后,DNN网络模型便固定下来。在实际使用过程中,将原始遥感图像输入到训练好的DNN网络模型中,即可生成对应大小的停机坪与跑道区域的分割结果。

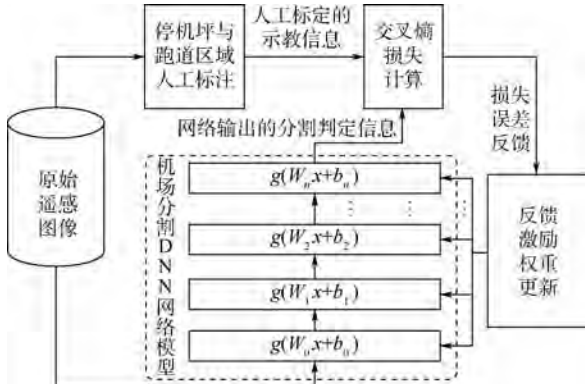


图2 停机坪与跑道区域分割DNN网络模型的离线监督训练

Fig. 2 Off-line supervised training of DNN model for apron and runway area segmentation

### 2.3 遥感图像飞机目标高效检测方案

为了满足高效检测的任务需要,基于YOLO算法,本文设计了面向大幅面遥感图像飞机目标的检测方案。该方案借助分治法的思想,采用了先拆分后拼合的策略。首先,对停机坪与跑道区域分割图像进行大小调整,并按照448像素×448像素对其进行标准块切分;然后,利用手工采集的飞机目标样本集对预训练的YOLO网络模型进行迁移式强化训练;再次,借助迁移式强化训练YOLO网络模型对标准块遥感图像进行飞机目标的检测和定位;最后,将包含飞机目标检测结果的标准块图像按原始空间排布顺序重新拼合,得到完整的大幅面遥感图像飞机目标检测结果。

### 2.4 搜寻与检测相集成的级联组合方案

借助本文提出的停机坪与跑道区域分割DNN网络以及YOLO网络的性能优势,对区域搜寻与目标检测2个环节进行级联组合,给出搜寻与检测的级联组合方案,如图3所示。

从图3中可以看出,本文提出的搜寻与检测相集成的级联组合方案在候选检测区域搜寻与飞机目标检测中分别设计了不同的DNN网络以实现各自部分的功能。其优势为:①具备良好的时效性;②由于采用了端到端的设计思路,在整个飞机目标的检测过程中无需人为干预,只需提供原始的大幅面遥感图像,即可获得停机坪与跑道区域分割图像及飞机目标的检测结果,为大幅面遥感图像飞机目标的高效检测提供了便利。

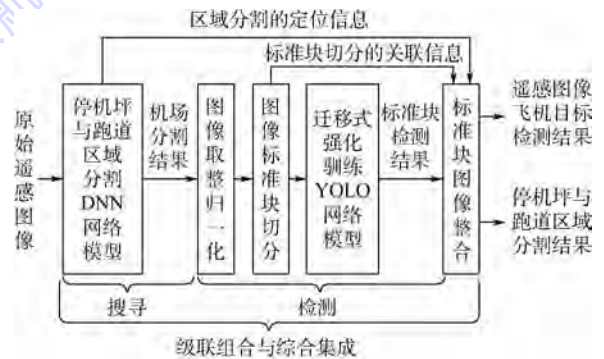


图3 搜寻与检测的级联组合

Fig. 3 Cascade combination of searching and detection

## 3 停机坪与跑道区域的分割和提取

### 3.1 停机坪与跑道区域检测和分割的DNN模型

借助深度学习方法,本文设计了大幅面遥感图像停机坪与跑道区域分割深度神经网络(Large-Scale Remote Sensing Image Apron and runway Segmentation Neural Networks, LS-RSIASNN),

网络模型结构及参数设置如图 4(a)所示。

从图 4 中可以看出,LS-RSIASNN 网络的深度为 76 层,相比其他 DNN 网络具有更深的网络结构,因而有利于抽象特征的挖掘,提高图像分割

的精度。LS-RSIASNN 网络模型中一共包括 20 个卷积网络单元(Convolutional Network, ConvNet),其中前 19 个用于特征提取与图像恢复,最后 1 个用于分割标签的生成。而在每个 ConvNet 中包含一个卷积层、一个最大整合层及一个激活层。所有卷积层的卷积核大小为  $3 \times 3$ ,卷积步长为 1,最大整合层的步长为 2。激活函数选用修正的线性单元(Rectified Linear Unit, ReLU),其解析表达式为

$$y_{\text{ReLU}} = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ x & x > 0 \end{cases} \quad (1)$$

ReLU 激活函数与 Sigmoid 和 Tanh 激活函数相比,由于其局部定义域  $x \leq 0$  的取值限制,使之不易落入梯度死区,而扩展了活化范围。在每个激活层前设置的批归一化层能够进一步避免梯度消失和梯度爆炸情况的发生,增强 DNN 网络训练过程的稳定性。

LS-RSIASNN 网络采用了端到端的模型结构设计,当离线训练过程完成以后,输入原始的遥感图像即可生成对应大小的分割结果,因而具备了很高的效率。与此同时,LS-RSIASNN 网络借鉴了 U-Net 与 FCN 网络的设计思路,借助不同深度网络特征图的相互融合,产生性能更优的特征表达,进而实现高精度的图像分割,该方法在 He<sup>[21]</sup>、Huang<sup>[22]</sup> 及 Su<sup>[23]</sup> 等的工作中也得到了成功的应用。与 U-Net 不同的是,一方面 LS-RSIASNN 网络具有更深的网络结构,以产生更加抽象的目标特征;另一方面除了跨层的目标特征融合,LS-RSIASNN 网络对相邻 ConvNet 输出的目标特征也进行了融合,以获取更加精确的目标分割结果。

### 3.2 样本数据标注和 DNN 模型的离线监督训练

在 LS-RSIASNN 网络的离线监督训练中,借助开源工具 LabelMe 对 200 幅遥感图像中的停机坪与跑道区域进行人工标注。图 5 展示了停机坪与跑道区域的人工标注过程及生成的停机坪与跑道区域正样本。其中,图 5(a)展示了 3 个不同机场拍摄的原始遥感图像;图 5(b)显示的是利用 LabelMe 对停机坪与跑道区域进行人工标注;图 5(c)为人工标注后对应生成的停机坪与跑道区域正样本,浅色部分代表停机坪与跑道正样本区域,黑色部分代表背景区域。

由于手工样本集数据量较为有限,将 160 幅图像划分为训练集对 DNN 网络实施离线监督训练,而其余 40 幅图像则作为测试集对训练完成后的 DNN 网络进行测试与评估。在离线监督训练

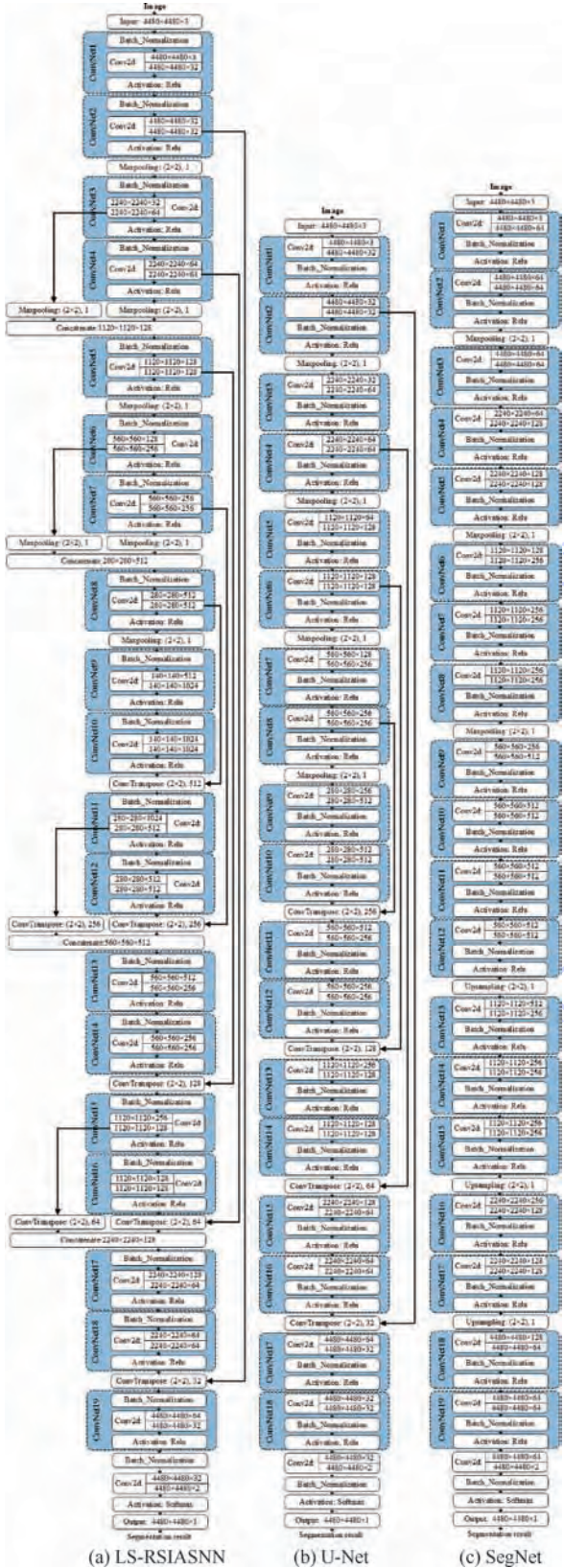


图 4 停机坪与跑道区域分割 DNN 网络模型示意图

Fig. 4 Schematic of DNN models for apron and runway area segmentation



图5 停机坪与跑道区域人工标注及样本

Fig. 5 Manual labelling samples of apron and runway areas

过程中,借助交叉熵作为损失函数,利用自适应矩估计(Adaptive moment estimation, Adam)算法<sup>[24]</sup>对网络模型进行参数更新,交叉熵的解析表达式为

$$L = - \sum_{i=1}^m [y^{(i)} \text{lb}(h(x^{(i)})) + (1 - y^{(i)}) \text{lb}(1 - h(x^{(i)}))] \quad (2)$$

式中: $m$ 为像素点的个数; $y^{(i)}$ 为第*i*个像素的类别标签; $h(\cdot)$ 为Sigmoid函数。

经过500轮迭代训练后DNN网络趋于收敛,其离线监督训练过程的性能进化曲线如图6所示。可以看出,在离线监督训练过程中,LS-RSIASNN网络的交叉熵损失低于对比的其他DNN网络。进一步,借助测试集中的遥感图像对离线监督训练后的DNN网络进行停机坪与跑道区域分割实验,以对各种DNN网络的图像分割性能进行评估。

### 3.3 DNN网络学习进化的停机坪与跑道区域分割和提取

为了对DNN网络的图像分割性能进行评估,将测试集遥感图像送入网络中,获得停机坪与跑道区域的分割结果如图7所示。图7(a)的4幅原始遥感图像拍摄于4个不同的机场,图7(b)浅色部分为人工标注的停机坪与跑道正样本,图7(c)~(g)为不同DNN网络生成的停机坪与跑道区域分割结果。

从图7可以看到,本文提出的LS-RSIASNN网络在分割精度上明显优于对比的其他DNN网络模型。借助式(3),对分割结果的交并比(Intersection-over-Union, IoU)进行计算。

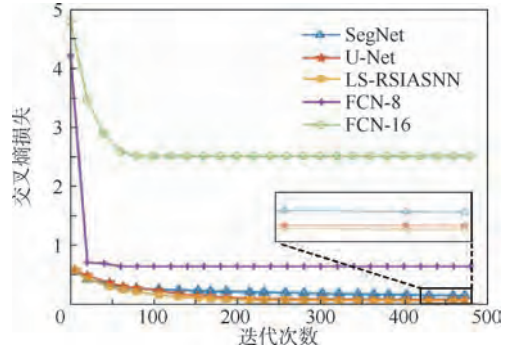


图6 停机坪与跑道区域分割DNN网络模型性能进化曲线

Fig. 6 Performance evolution curves of DNN models for apron and runway area segmentation



图7 不同DNN网络模型停机坪与跑道区域分割结果对比

Fig. 7 Comparison of apron and runway area segmentation results among various DNN models

$$IoU = \frac{\text{area}(\text{RoI}_T \cap \text{RoI}_C)}{\text{area}(\text{RoI}_T \cup \text{RoI}_C)} \quad (3)$$

式中:area(·)为面积大小;RoI<sub>T</sub>为不同 DNN 网络生成的停机坪与跑道区域分割结果;RoI<sub>C</sub>为手工标注的正样本区域。IoU 得分的分布区间为 [0,1],越接近 1 说明分割结果越好。

不同 DNN 网络停机坪与跑道区域分割 IoU 得分对比如表 2 所示。表 2 的结果在图 8 中进行了更为直观的展示。

FCN-8、FCN-16 网络借助上采样操作进行图像恢复,破坏了像素点之间的空间位置关系,导致分割结果欠佳。而 LS-RSIASNN 网络则采用了更加精确的多层反卷积操作进行图像细节恢复,借助不同深度图像特征的相互融合,获得了更为精确的分割结果。此外,还对 LS-RSIASNN 网络的分割效率进行了评估。在实验中,将 4 480 像素 × 4 480 像素大小的遥感图像输入到不同的 DNN 网络中,统计从原始遥感图像输入到分割结果输出之间的时间开销,实验结果如图 9 所示。实验中,借助一颗 Nvidia Tesla M60 GPU 进行运算加速,从实验结果中可以看到,单帧图像分割的时间开销具有一定的波动性,这与图像场景的复杂程度有关。而从平均时间开销来看,由于 LS-RSIASNN 网络具有更加复杂的结构,因此相比结构较为简单的 DNN 网络需要消耗更长的计算时间,但不同 DNN 网络的时间开销总体维持在较低水平,平均时间开销不超过 1 s。

表 2 不同 DNN 网络模型停机坪与跑道区域分割 IoU 得分

Table 2 IoU for apron and runway area segmentation with various DNN models

DNN 网络	FCN-16	FCN-8	SegNet	U-Net	LS-RSIASNN
IoU 得分	0.173 0	0.384 0	0.649 5	0.724 3	0.745 4

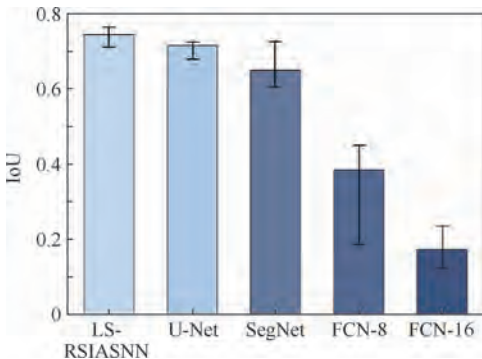


图 8 不同 DNN 网络模型停机坪与跑道区域分割 IoU 对比

Fig. 8 Comparison of IoU for apron and runway area segmentation with various DNN models

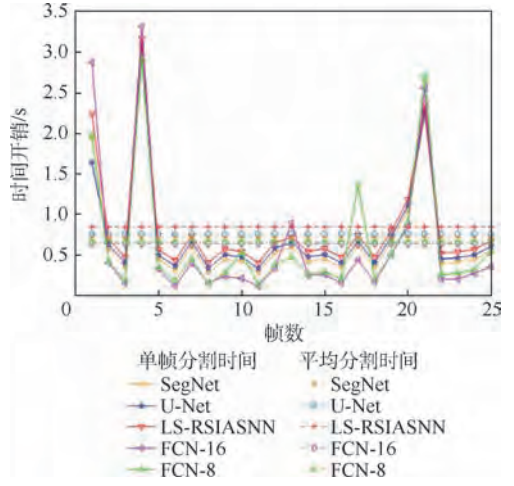


图 9 停机坪与跑道区域分割时间开销对比  
Fig. 9 Comparison of time cost for apron and runway segmentation

## 4 基于 YOLO 网络的飞机目标快速检测

借助高性能的 DNN 网络模型,对飞机目标可能出现的停机坪与跑道区域实施了精准的分割和提取,大幅缩小了目标搜索的区域范围。为了进一步对停机坪与跑道区域内的飞机目标进行高效检测,本节借助 YOLO 网络模型的迁移式强化训练,设计了飞机目标的高效检测算法。在分割的停机坪与跑道区域内,通过与 R-CNN 及 Faster R-CNN 算法的飞机目标检测结果进行对比分析,验证了本文算法的有效性。

### 4.1 YOLO 网络原理及优势分析

YOLO 网络将目标检测中的边界定位与类型判别转化为回归问题进行求解,在检测速度与召回率上优于经典的目标检测算法。同时作为一种端到端的 DNN 网络,YOLO 网络不仅易于训练,也能大幅节省特征存储、调用等中间环节带来的计算资源消耗,有利于实现目标的实时检测。

#### 4.1.1 YOLO 网络检测算法的原理

YOLO 网络由 24 个卷积层、4 个最大整合层及 2 个全连接层组合而成,网络结构模型如图 10 所示。

在 YOLO 网络中,输入图像的大小为 448 像素 × 448 像素,经过网络模型计算,输出 7 × 7 × 30 维的特征向量,它们分别对应着原图中 7 × 7 = 49 个单元格区域。30 维的特征向量中包含 2 个 5 维的边界框特征及一个 20 维的目标类别特征。5 维的边界框特征中包括边界框的置信度 C、归一化的边界框中心坐标 (x, y) 及边界框的长 w 和宽 h。置信度 C = Pr(Object) · IoU<sub>Predict</sub><sup>Truth</sup>, Pr(Object) 为预报边界框内存在目标的概率, IoU<sub>Predict</sub><sup>Truth</sup> 为预报边界框与真实边界框之间的交并比系数。以



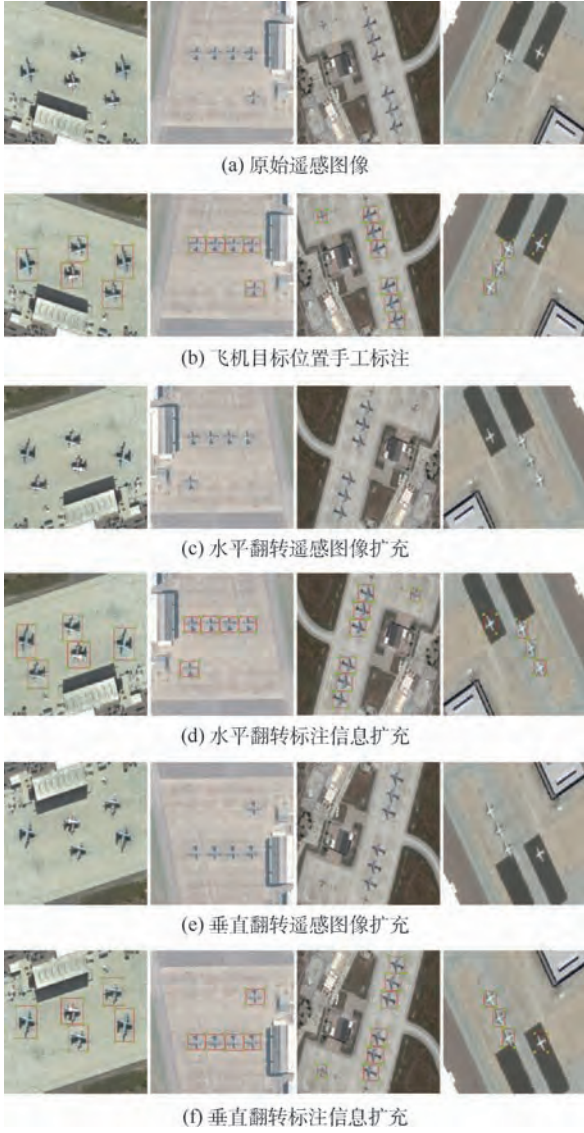


图 11 飞机目标样本的数据扩充

Fig. 11 Sample data augmentation for aircraft targets

进一步,为了弥补手工样本集数量规模的不足,对有限的样本集进行水平和垂直翻转,使样本数量扩充至原来的 3 倍。通过对 100 幅遥感图像中的 353 架飞机目标进行手工标注,最终获取了 1059 个扩充样本及其对应的飞机目标位置信息,用于对预训练的 YOLO 网络进行迁移式强化训练。

#### 4.3.2 性能迁移的合理性分析

手工采集的数据集不论在数据规模还是目标种类的多样性上都无法与 ImageNet2012 及 Pascal VOC 2007 相比。然而,大规模数据集的离线监督训练对于 DNN 网络模型的性能提升至关重要。在深度学习中,如果预训练模型的数据集与任务数据集在样本类型及目标特征上具有较强的相关性,则可借助迁移学习方法将预训练好的模型应用在新任务中,从而克服训练样本不足的缺点。

在 Pascal VOC 2007 数据集中共包含 9 963 幅 20 类共 24 640 个目标的类型及位置信息,其中包括 477 幅共 625 个飞机目标样本。一方面,Pascal VOC 2007 数据集中的飞机目标特征与手工建立的数据集中的飞机目标特征具有较强的相关性;另一方面,大规模数据集中不同类型目标的浅层特征,如边缘、纹理与手工数据集之间具有互通性。因此,本文中并没有从头训练 YOLO 网络,而是在 ImageNet2012 及 Pascal VOC 2007 数据集预训练的 YOLO 网络模型的基础上,利用手工标注的数据集进行迁移式强化训练,从而充分利用大规模数据集的优势,实现飞机目标的高效检测。

#### 4.3.3 扩充样本监督下的强化训练

为了对预训练的 YOLO 网络进行迁移训练,将手工标注的飞机目标样本与 Pascal VOC 2007 原有的飞机目标样本的类别属性设置为一致,将预训练的模型权重参数载入到图 10 所示的 YOLO 网络模型中,进而借助手工标注的飞机目标样本集对预训练的网络模型进行迁移训练与权重微调,其离线监督迁移强化训练过程的性能进化曲线如图 12 所示。

图 12(a)中曲线代表预报边界框的置信度误差  $E_{\text{conf}}$ ,用于衡量预报边界框内是否存在目标及预报边界框与真实边界框之间的重合度,其测算表达式为

$$E_{\text{conf}} = \sum_{i=1}^{S^2} \sum_{j=1}^B 1_{ij}^{\text{obj}} (C_i - \hat{C}_i)^2 + \lambda_1 \sum_{i=1}^{S^2} \sum_{j=1}^B 1_{ij}^{\text{noobj}} (C_i - \hat{C}_i)^2 \quad (5)$$

式中: $S^2$  为图像分割的单元格数; $B$  为预测的边界框数;在 YOLO 网络参数设置中  $S = 7, B = 2$ ;  $1_{ij}^{\text{obj}}$  表示第  $i$  个单元格的第  $j$  个边界框对当前预报负责,即目标的中心落在了第  $i$  个单元格内并且第  $i$  个单元格的第  $j$  个预报边界框与目标的真实边界框的重合度最高; $1_{ij}^{\text{noobj}}$  表示目标的中心没有落入第  $i$  个单元格内; $C_i = \text{Pr}(\text{Object}) \cdot \text{IoU}_{\text{Predict}}^{\text{Truth}}$  为预报的置信度结果; $\hat{C}_i$  为对应的真值;由于大部分预报的边界框内没有目标,为了避免不均衡的实验数据对结果产生影响,设置常数参数  $\lambda_1 = 0.5$ 。

图 12(b)中曲线代表识别误差  $E_{\text{class}}$ ,用于衡量中心落在第  $i$  个单元格内的目标是否属于正确的类别,识别误差表达式为

$$E_{\text{class}} = \sum_{i=1}^{S^2} 1_i^{\text{obj}} \sum_{c \in \text{classes}} (p_i(c) - \hat{p}_i(c))^2 \quad (6)$$

式中: $1_i^{\text{obj}}$  表示目标的中心点落入了第  $i$  个单元格

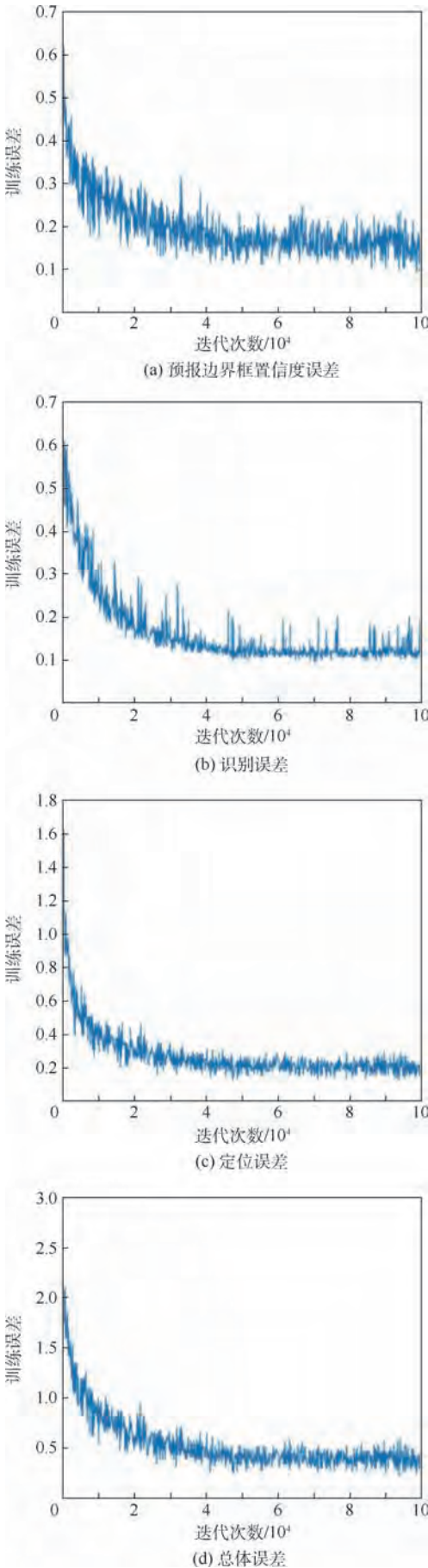


图 12 YOLO 网络性能进化曲线

Fig. 12 Performance evolution curves of YOLO networks

内;  $p_i(c)$  为第  $i$  个单元格预报的目标类别为  $c$  的概率;  $\hat{p}_i(c)$  为对应的真值。

图 12(c) 中曲线代表定位误差  $E_{\text{coord}}$ , 用于衡量预报边界框的定位精度, 定位误差的测算表达式为

$$E_{\text{coord}} = \lambda_2 \sum_{i=1}^{S^2} \sum_{j=1}^B 1_{ij}^{\text{obj}} [(\mathcal{X}_i - \hat{\mathcal{X}}_i)^2 + (\mathcal{Y}_i - \hat{\mathcal{Y}}_i)^2] + \lambda_2 \sum_{i=1}^{S^2} \sum_{j=1}^B 1_{ij}^{\text{obj}} [(\sqrt{w_i} - \sqrt{\hat{w}_i})^2 + (\sqrt{h_i} - \sqrt{\hat{h}_i})^2] \quad (7)$$

式中:  $w_i, h_i, \mathcal{X}_i, \mathcal{Y}_i$  为归一化的预报边界框长宽及中心坐标;  $\hat{w}_i, \hat{h}_i, \hat{\mathcal{X}}_i, \hat{\mathcal{Y}}_i$  为对应的真值; 为了强化定位精度的重要性, 设置常数参数  $\lambda_2 = 5$ 。

图 12(d) 中的总体误差为以上 3 类误差的总和, 表达式为

$$E_{\text{total}} = E_{\text{conf}} + E_{\text{class}} + E_{\text{coord}} \quad (8)$$

在迁移式强化训练过程中利用 Adam 算法对网络模型参数进行更新。经过 10 万次训练, 基于扩充样本迁移式强化训练的 YOLO 网络模型趋于收敛。

#### 4.4 YOLO 网络飞机目标检测时效性能评估

在大幅面遥感图像停机坪与跑道其余分割的基础上, 对候选检测区域图像进行强化处理, 只保留停机坪与跑道区域的像素值, 而将背景区域的像素值置 0。根据式(9)对强化图像进行尺度取整归一化处理, 并利用三线性插值对图像进行分辨率提升。

$$\begin{cases} w_{\text{new}} = \left\lceil \frac{w_{\text{ori}}}{448} \right\rceil \times 448 \\ h_{\text{new}} = \left\lceil \frac{h_{\text{ori}}}{448} \right\rceil \times 448 \end{cases} \quad (9)$$

式中: 符号  $\lceil \cdot \rceil$  代表向上取整;  $w_{\text{ori}}, h_{\text{ori}}$  与  $w_{\text{new}}, h_{\text{new}}$  分别为遥感图像原始及调整后的宽度与高度。

整幅遥感图像被切分为 448 像素  $\times$  448 像素的标准块子区域, 进而借助迁移式强化训练 YOLO 网络模型对每一个标准块子区域进行飞机目标检测。将包含飞机目标检测结果的标准块图像进行重新拼合, 最终得到遥感图像飞机目标的检测与定位结果。

通过与 R-CNN、Faster R-CNN 算法进行检测时间开销对比, 验证迁移式强化训练 YOLO 网络的时效性, 实验结果如图 13 所示。对实验结果进行统计, 得到 3 种对比算法的平均检测时间开销如表 3 所示。

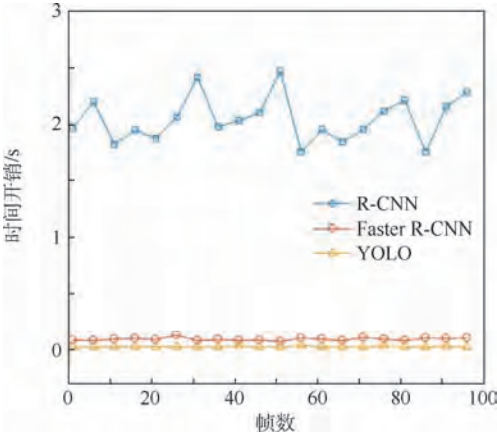


图 13 飞机目标检测的时间开销对比

Fig. 13 Comparison of time cost for aircraft target detection

从表 3 中可以看出,相比 R-CNN 以及 Faster R-CNN 算法,YOLO 网络在检测速度上具有明显优势,能够为大幅面遥感图像飞机目标的实时检测提供有力支持。图 14 展示了基于不同算法的飞机目标检测结果,其中每行的 4 幅图像均拍摄于 4 个不同的机场。

表 3 飞机目标平均检测时间开销对比

Table 3 Comparison of average time cost for aircraft target detection

算法	平均检测时间开销/s
R-CNN	2.025 7
Faster R-CNN	0.094 6
YOLO	0.027 7

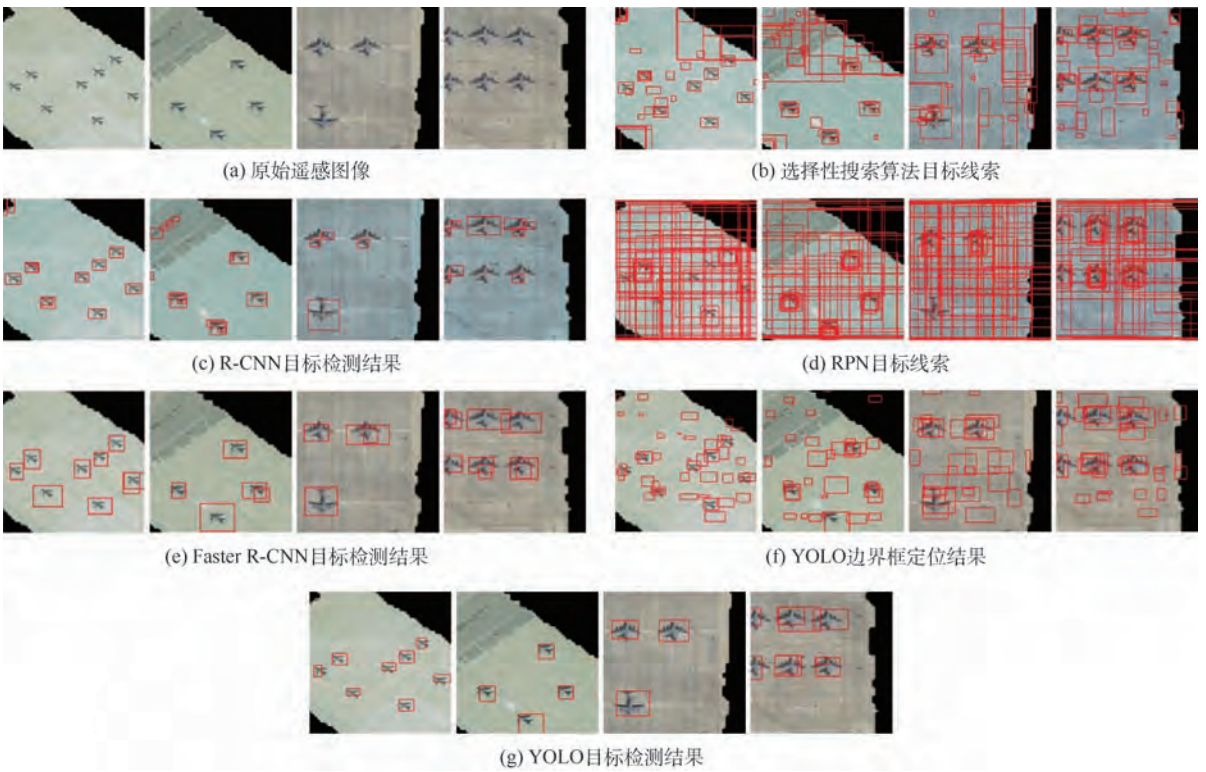


图 14 飞机目标检测结果对比

Fig. 14 Comparison of aircraft target detection results

## 5 基于搜检级联的飞机目标高效检测

候选检测区域的高效分割及目标的快速定位是大幅面遥感图像飞机目标实时检测的 2 个必要环节。本节对搜索与检测的级联组合式检测方案的必要性与可行性进行了分析,借助 DNN 网络性能优势的互补与强化,最终形成级联组合式飞机目标高效检测算法。

### 5.1 搜索与检测的综合集成

在大幅面遥感图像中,飞机目标所占像素比例小,信噪比低,为了实现飞机目标的高效检测,必须对停机坪与跑道等候选检测区域进行分割和

提取,缩小飞机目标的搜索范围,从而提高检测效率。同时,候选检测区域的分割和提取也能够避免背景目标引发的虚警,提高飞机目标检测精度。因此,搜寻与检测的级联组合对于大幅面遥感图像飞机目标的实时检测是必要的。

借助深度学习及高性能的端到端 DNN 网络模型,可以实现停机坪与跑道区域的精准分割,相比经典的图像分割算法,DNN 网络在分割精度与速度上具有显著优势。进而,对停机坪和跑道区域分割图像进行取整归一化处理与标准块切分,借助迁移式强化训练 YOLO 网络模型对每一个标准块图像进行飞机目标检测,再将包含飞机目标

检测结果的标准块图像按照原先的空间顺序进行拼合,最终得到遥感图像飞机目标的检测结果。搜寻与检测的级联组合能够满足大幅面遥感图像飞机目标检测实时性与精确性的应用需求,因此该方案是可行的。

## 5.2 级联组式飞机目标高效检测算法

根据第3、4节所述内容,给出级联式飞机目标高效检测算法。

输入:原始遥感图像  $I_{ori}$ 。

输出:飞机目标检测结果  $I_{result}$ 。

初始化:原始遥感图像的长宽  $w, h$ 。

**步骤1** 利用标注工具 LabelMe 制作机场分割数据集  $\mathcal{R}_1$ 。

**步骤2** 利用数据集  $\mathcal{R}_1$  离线训练机场分割 DNN 网络模型  $Model_1$ 。

**步骤3** 将原始遥感图像  $I_{ori}$  输入到  $Model_1$  中得到机场分割图像  $I_{airport}$ 。

**步骤4** 调整  $I_{airport}$  长宽至  $w_{new} = \left\lfloor \frac{w_{ori}}{448} \right\rfloor \times 448$ ,

$$h_{new} = \left\lfloor \frac{h_{ori}}{448} \right\rfloor \times 448。$$

**步骤5** 切分  $I_{airport}$  为  $448$  像素  $\times$   $448$  像素的

子图  $I_{set} = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$ ,  $n = \left\lfloor \frac{w_{ori}}{448} \right\rfloor \times \left\lfloor \frac{h_{ori}}{448} \right\rfloor$ 。

**步骤6** 利用标注工具 Labellmg 制作飞机目标检测数据集  $\mathcal{R}_2$ 。

**步骤7** 在 Pascal VOC 2007 的 YOLO 网络模型基础上,利用  $\mathcal{R}_2$  进行迁移式强化训练得到面向飞机目标检测的 YOLO 网络模型  $Model_2$ 。

**步骤8** 将  $I_{set}$  的每一帧输入到  $Model_2$  中得到飞机目标检测结果  $I'_{set} = \{I'_1, I'_2, \dots, I'_n\}$ 。

**步骤9** 将  $I'_{set}$  重新合并为整幅遥感图像,得到最终的飞机目标检测结果  $I_{result}$ 。

在级联式飞机目标高效检测算法中,候选检测区域的高效搜寻与飞机目标的精准定位分别采用了不同的 DNN 网络予以实现。在网络模型的离线监督训练上,停机坪与跑道区域分割 DNN 网络选择了完整训练的方式,而在飞机目标检测中,则借助 YOLO 网络的迁移式强化训练弥补了手工数据集数据规模上的不足。由于 YOLO 网络模型图像处理尺寸的限制,在算法中采用了先切分再拼合的检测策略,而小范围的图像调整对于大幅面遥感图像中目标的形变影响较为微弱,同时也可以借助大数据集数据规模与样本类型多样性的优势进一步提高飞机目标检测的结果。

## 6 综合实验与性能分析

本节利用实际的大幅面遥感图像对级联式飞机目标高效检测算法进行综合实验验证。在实验中,借助精确率、漏检率及时效性,与 R-CNN、Faster R-CNN 的目标检测算法进行对比分析,验证本文算法的有效性。

### 6.1 数据库与实验平台

实验采集了 40 幅可见光遥感图像作为测试集,图像大小均为  $4480$  像素  $\times$   $4480$  像素。数据集涵盖了轰炸机、预警机、运输机、战斗机等多种机型、多种尺寸大小的飞机目标。实验硬件平台由一颗 Nvidia Tesla M60 GPU 提供运算加速。实验软件平台为 Python 2.7.13,深度学习框架为基于 TensorFlow 1.02 的 Keras 2.0.9。

### 6.2 实验框架设计与参数设置

为了对本文算法的精度和效率进行综合分析,与性能评估,设计综合实验框架如下:首先,利用 R-CNN、Faster R-CNN 及 YOLO 算法在原始遥感图像及停机坪与跑道区域分割图像中分别进行飞机目标检测实验,对比相同算法在停机坪与跑道区域分割前、后飞机目标检测的精确率、漏检率及时间开销 3 个性能指标的差异,验证基于 DNN 网络的停机坪和跑道飞机目标候选检测区域分割对于检测性能提升的有效性。然后,对 R-CNN、Faster R-CNN 及 YOLO 算法的检测结果进行横向对比,验证 YOLO 算法在检测时效性方面的优势。在所有实验中,输入的原始遥感图像大小为  $4480$  像素  $\times$   $4480$  像素。整幅图像被切分为 100 个标准块子区域分别进行检测,然后按照原先的顺序进行拼合,最终给出飞机目标检测的最终结果。

### 6.3 实验结果与性能评估

在综合实验中,借助 LS-RSIASNN 网络对停机坪和跑道区域进行分割提取,不同算法进行飞机目标检测的实验结果如图 15 所示。从飞机目标检测结果的对比中可以得知,停机坪与跑道区域的精确分割可以大幅减少背景区域带来的虚警干扰。从图 15(c)、(e)、(g) 三幅图像可知,R-CNN、Faster R-CNN 及 YOLO 算法在停机坪与跑道区域之外都检测到了大量的虚警目标。与之相比,图 15(d)、(f)、(h) 三幅图像只对停机坪与跑道区域内的飞机目标进行检测,因而大幅减低了虚警发生的概率。

为了对检测结果进行定量分析,对 R-CNN、Faster R-CNN 及 YOLO 算法的精确率、漏检率及

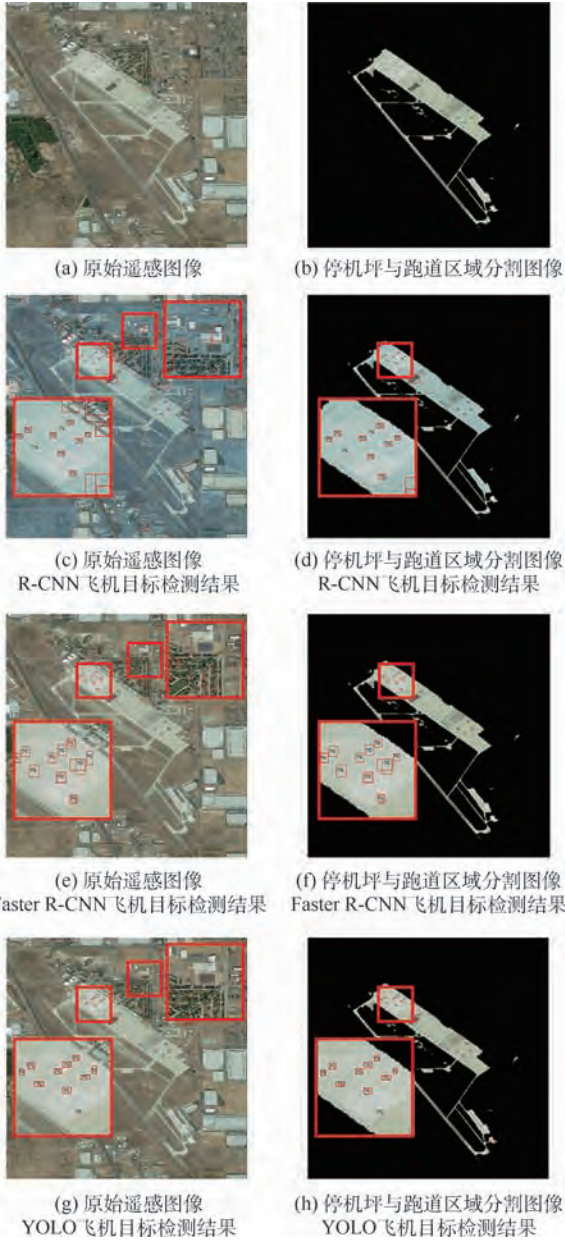


图 15 综合实验结果对比

Fig. 15 Comparison of comprehensive experimental results

时间开销进行了对比,其中精确率  $P$ 、漏检率  $M$  表达式为

$$P = \frac{N_{\text{real}}}{N_{\text{real}} + N_{\text{false}}} \quad (10)$$

$$M = \frac{N_{\text{miss}}}{N_{\text{total}}} \quad (11)$$

式中:  $N_{\text{real}}$  为预测正确的飞机目标数量;  $N_{\text{false}}$  为虚警目标数量;  $N_{\text{miss}}$  为未检测到的飞机目标数量;  $N_{\text{total}}$  为飞机目标的总数。精确率  $P$  反映了所有检测目标中真实飞机目标正确检测数所占的比例,而漏检率  $M$  反映了真实飞机目标的漏检数量占真实飞机目标总数的比例,实验结果如表 4 所示。

从表 4 中可以看到,停机坪和跑道区域的精确提取减少了无关区域虚警目标的干扰,3种飞

表 4 飞机目标检测性能对比

Table 4 Performance comparison of aircraft target detection

算法	图像类型	精确率/ %	漏检率/ %	时间开销/ s
R-CNN	原始遥感图像	56.25	18.72	385.51
	停机坪与跑道区域分割图像	78.32	15.35	87.49
Faster R-CNN	原始遥感图像	68.87	6.31	39.46
	停机坪与跑道区域分割图像	94.69	5.19	28.29
YOLO	原始遥感图像	62.56	10.83	6.65
	停机坪与跑道区域分割图像	90.28	9.26	4.76

机目标检测算法的精确率均得到了明显提升。在漏检率上, Faster R-CNN 相比 YOLO 和 R-CNN 算法具有一定优势,其主要原因在于: Faster R-CNN 算法中,在特征图的每个像素点上会生成 9 种不同大小和宽高比的预测框对可能出现的飞机目标线索区域进行判定。与之相比, YOLO 算法在每个单元格区域内只生成 2 个候选的预测框,而 R-CNN 算法利用选择性搜索判断目标可能出现的潜在区域,因此 Faster R-CNN 算法的 RPN 网络在飞机目标线索的数量上具有一定优势,可以减少飞机目标漏检情况的发生。然而,过多的目标线索也会增加检测时间的开销。通过 3 种算法的对比可以看到, YOLO 算法的检测效率相比 Faster R-CNN 及 R-CNN 算法有明显优势,同时在精确率和漏检率上也能保持在满意的水平。搜寻与检测相集成的级联组合式飞机目标检测方案的有效性得到了充分验证。

为了增强 YOLO 算法在漏检率上的性能表现,一方面可以缩小单元格区域的面积,提高算法对小尺度飞机目标的检测效果,另一方面也可以增加每个单元格区域候选预测框的数量,从而减少飞机目标漏检情况的发生。

#### 6.4 述评与注解

候选检测区域的精准分割及高效的目标检测算法是实现大幅面遥感图像飞机目标实时检测的必要环节。借助 DNN 网络对复杂外型的停机坪和跑道区域实施精准分割, GPU 单元提供的运算加速,使得 DNN 网络在分割速度上能够保持明显优势。YOLO 算法将目标定位和目标类型判别合并为一个回归问题进行求解,相比 R-CNN 及 Faster R-CNN 算法具有更强的时效性,同时在检测精度上也能保持在满意的水平。因此,本文提出的搜寻与检测相集成的级联式飞机目标高效检测

算法在大幅面遥感图像的飞机目标检测中具有较强的综合优势。

## 7 结论

本文提出了一种新颖的搜寻与检测相集成的级联式飞机目标高效检测算法,以实现大幅面遥感图像中飞机目标的高效精准检测与定位。算法将候选检测区域的高精度分割及面向候选区域的目标高效检测级联为统一的整体,通过高性能的DNN网络的相互协作,实现优势互补与增强。级联组合式目标检测算法在检测的时效性上具有较为明显的优势,同时在检测精度上也能达到较高水平,能够为大幅面遥感图像飞机目标的高效检测与定位提供有效帮助。在后续的工作中,计划将基于深度学习的视觉注意力机制引入到算法中,从而实现更大幅面遥感图像停机坪与跑道区域的快速定位与分割,使算法的实用性得到进一步的提高。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] HAN Z X, ZHANG H, ZHANG J F, et al. Fast aircraft detection based on region locating network in large-scale remote sensing images [ C ] // 24th IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017: 2294-2298.
- [ 2 ] GIRSHICK R, DONAHUE J, DARRELL T, et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation [ C ] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2014: 580-587.
- [ 3 ] REN S, HE K, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks [ J ]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39 ( 6 ): 1137-1149.
- [ 4 ] 赵雪梅, 李玉, 赵泉华. 基于隐马尔可夫高斯随机场模型的模糊聚类高分辨率遥感影像分割算法 [ J ]. 电子学报, 2016, 44 ( 3 ): 679-686.  
ZHAO X M, LI Y, ZHAO Q H. Hidden Markov Gaussian random field based fuzzy clustering algorithm for high-resolution remote sensing image segmentation [ J ]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44 ( 3 ): 679-686 ( in Chinese ).
- [ 5 ] 陈荣元, 徐雪松, 李广琼, 等. 自适应特征加权的 Gibbs 随机场影像分割方法 [ J ]. 电子学报, 2016, 44 ( 10 ): 2351-2356.  
CHEN R Y, XU X S, LI G Q, et al. Image segmentation by combining adaptively weighted features with Gibbs random field [ J ]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44 ( 10 ): 2351-2356 ( in Chinese ).
- [ 6 ] BUDAK U, HALICI U, SENGUR A, et al. Efficient airport detection using line segment detector and Fisher vector representation [ J ]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2016, 13 ( 8 ): 1079-1083.
- [ 7 ] WANG Y, PAN L. Automatic airport recognition based on saliency detection and semantic information [ J ]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2016, 5 ( 7 ): 115-118.
- [ 8 ] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks [ C ] // International Conference on Neural Information Processing Systems, 2012: 1097-1105.
- [ 9 ] LONG J, SHELHAMER E, DARRELL T. Fully convolutional networks for semantic segmentation [ J ]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39 ( 4 ): 640-651.
- [ 10 ] BADRINARAYANAN V, KENDALL A, CIPOLLA R. SegNet: A deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation [ J ]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39 ( 12 ): 2481-2495.
- [ 11 ] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation [ C ] // International Conference on Medical Image Computing and Computer-assisted Intervention. Berlin: Springer, 2015: 234-241.
- [ 12 ] DAN C C, GIUSTI A, GAMBARDELLA L M, et al. Deep neural networks segment neuronal membranes in electron microscopy images [ J ]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2012, 25: 2852-2860.
- [ 13 ] CHEN L, PAPANDREOU G, KOKKINOS I, et al. Semantic image segmentation with deep convolutional nets and fully connected CRFs [ J ]. Computer Science, 2014 ( 4 ): 357-361.
- [ 14 ] ZHAO H, SHI J, QI X, et al. Pyramid scene parsing network [ C ] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017: 6230-6239.
- [ 15 ] CHEN L C, PAPANDREOU G, KOKKINOS I, et al. DeepLab: Semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected CRFs [ J ]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2018, 40 ( 4 ): 834-848.
- [ 16 ] HE K, GKIOXARI G, DOLLAR P, et al. Mask R-CNN [ C ] // IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017: 2980-2988.
- [ 17 ] GIRSHICK R. Fast R-CNN [ C ] // IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2015: 1440-1448.
- [ 18 ] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition [ J ]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37 ( 9 ): 1904-1916.
- [ 19 ] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: Unified, real-time object detection [ C ] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2016: 779-788.
- [ 20 ] TORRALBA A, RUSSELL B C, YUEN J. LabelMe: Online image annotation and applications [ J ]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98 ( 8 ): 1467-1484.
- [ 21 ] HE K, 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, NJ: IEEE Press, 2016: 770-778.

- [22] HUANG G, LIU Z, WEINBERGER K Q, et al. Densely connected convolutional networks[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017: 3-8.
- [23] SU W, WANG Z. Widening residual skiped network for semantic segmentation[J]. IET Image Processing, 2017, 11(10): 880-887.
- [24] KINGMA D P, BA J. Adam: A method for stochastic optimization[EB/OL]. (2014-12-22). <https://arxiv.org/abs/1412.6980>.

6980.

**作者简介:**

郭琳 男,博士研究生。主要研究方向:深度学习、图像语义分割、目标的检测与识别等。

秦世引 男,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:图像处理、模式识别、智能优化控制等。

## Deep learning and optimization algorithm for high efficient searching and detection of aircraft targets in remote sensing images

GUO Lin, QIN Shiyin\*

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to achieve high-performance detection and accurate positioning of aircraft targets in large-scale remote sensing images, in this paper, a kind of efficient aircraft target detection algorithm based on synthetic integration of searching and detection is presented. First, through the end-to-end deep neural networks (DNN), the efficient and accurate pixel-level segmentation of apron and runway area is achieved so that the searching range of aircraft targets is greatly narrowed and the probability of false alarm is also reduced effectively and the goal of high speed searching of aircraft targets candidate detection areas is achieved accordingly. In view of the segmented areas of apron and runway, the strategy of transfer reinforcement learning is employed to pre-trained YOLO networks with supervised signals of positive datasets by manual labelling. In this way, pre-trained networks can make up the deficiency of capacity of manual data sets, and the advantage of real-time property of YOLO networks can also be utilized to deal with the classification and locations of aircraft targets so as to achieve a satisfied solution of regression problems and promote the efficiency of detection significantly. It is obvious that the apron and runway segmentation with DNN networks can play important role in getting performance superiority of high precision and efficiency. Meanwhile, YOLO networks based on transfer reinforcement learning not only possess the characteristics of high efficiency, but also maintain the precision of detection at a high level. A series of comprehensive experiments and comparative analyses verify the effectiveness and good performance of the proposed searching and detection algorithm of aircraft targets with DNN cascade combination and synthetic integration.

**Keywords:** deep learning; deep neural networks; apron and runway segmentation; aircraft target detection; large-scale remote sensing image

Received: 2018-04-27; Accepted: 2018-09-03; Published online: 2018-09-10 17:23

URL: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180907.1016.002.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180907.1016.002.html)

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (U1435220, 61731001)

\* Corresponding author. E-mail: [qsy@buaa.edu.cn](mailto:qsy@buaa.edu.cn)

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0219

# 基于多轴同步控制的微尺度双向加载实验系统

熊晶洲, 万敏, 孟宝\*, 赵越超, 吴向东

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)



**摘 要:** 针对目前微细成形中材料屈服、强化行为实验研究的不足, 提出通过建立多轴同步控制的微尺度双向加载实验系统, 实现超薄板在复杂加载路径下的性能表征测试。双向加载实验系统基于四轴独立驱动的硬件组成和上、下位机分布式控制策略, 采用数字散斑测量 (DIC) 计算实验过程的应变。通过建立交流永磁同步电机 (PMSM) 控制模型, 辨识了速度闭环控制参数。在非线性 PID 控制方法实现单轴位置闭环控制的基础上, 基于虚拟主轴法实现了不同位移/载荷比例条件下的四轴同步运动。双向加载实验结果表明: 同步控制精度满足位移小于等于 0.02 mm、载荷小于等于 0.05 kN 的要求, 可用于超薄板微尺度屈服和强化行为的实验研究。

**关键词:** 微细成形; 屈服强化行为; 微尺度双向加载系统; 虚拟主轴法; 同步控制

**中图分类号:** TG381

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5965(2019)01-0174-09

随着环境污染、能源短缺等问题的日益突出, 微型产品的市场需求显著增加。作为一种先进的微纳制造技术, 微细成形具有成本低、效率高、制件性能好等优点, 是解决轻质耐高温材料和特殊薄壁微结构制造的最有效途径, 在微电子、汽车、航空和医疗等领域得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。微细成形虽然继承了传统塑性加工技术的优点, 但当材料的尺度缩小到一定程度时, 因尺度效应、摩擦阻力增大、难以精确定位等诸多问题, 限制了其工业化应用<sup>[4-6]</sup>。微尺度下材料屈服、强化行为是精确描述微细成形过程的基础, 也是研究的热点前沿问题。在微细成形过程中, 试样几何尺寸、材料晶粒大小和织构分布等会对材料的屈服、强化行为产生不可忽略的影响<sup>[7]</sup>, 从而导致宏观尺度下的本构模型难以准确预测微观尺度下的材料变形行为和缺陷<sup>[8]</sup>。因此, 如何建立微尺度下材料屈服准则、强化模型和成形极限的理论体系, 是提高微细成形工艺预测精度和微型产品质量的前

提和基础。

目前, 在预测微细成形材料变形行为时仍采用宏观下广泛使用的 Mises、Hill 系列等屈服准则<sup>[9-10]</sup>, 没有考虑屈服准则在微尺度下的适用性。十字形试件双向拉伸实验可以方便地通过控制两轴的载荷或位移比例, 使试样中心区得到不同的应力、应变状态<sup>[11]</sup>, 进而得到不同加载路径下双向拉伸区的任意屈服点, 成为研究板料屈服行为有效的实验方法<sup>[12]</sup>。

然而, 目前用于研究薄板微尺度屈服、强化行为的实验系统鲜有报道, 使得宏观下的屈服准则在微观尺度下的有效性一直缺乏实验验证。针对微尺度下材料屈服、强化行为实验研究的不足, 本文建立了超薄板微尺度双向加载的实验方法, 结合数字散斑测量 (DIC) 技术和同步控制技术, 实现了微尺度下应变测量和双向加载同步控制, 为金属超薄板的屈服行为研究提供实验基础。

收稿日期: 2018-04-20; 录用日期: 2018-07-13; 网络出版时间: 2018-07-26 15:29

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180725.1602.004.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180725.1602.004.html)

基金项目: 国家自然科学基金 (51605018)

\* 通信作者. E-mail: mengbao@buaa.edu.cn

**引用格式:** 熊晶洲, 万敏, 孟宝, 等. 基于多轴同步控制的微尺度双向加载实验系统[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 174-182. XIONG J Z, WAN M, MENG B, et al. Micro-scaled biaxial loading test system based on multi-axis synchronous control[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 174-182 (in Chinese).

# 1 双向加载实验原理

薄板常用的单向拉伸实验、平面应变拉伸实验和圆板胀形实验,其平面内主应力比例分别为 1:0、2:1 和 1:1。采用不同的实验方法仅能得到屈服轨迹上单拉点、平面应变点和等双拉点等特征点的变形情况,难以拟合出整个屈服轨迹,如图 1 所示,  $\sigma_1$  为面内第一主应力,  $\sigma_2$  为面内第二主应力。为研究具有各向异性的金属超薄板屈服、强化行为,获得更多复杂应力状态来准确拟合其屈服轨迹,本文建立了微尺度双向加载实验方法,在一种实验系统上通过改变位移/载荷的比例或非比例加载路径获取复杂加载路径下的屈服点,用于微尺度下屈服强化行为的研究。

与常规尺寸的十字形试样相比,适用于超薄板/箔材双向加载实验的试样厚度一般在 0.02 ~ 0.5 mm 之间,中心区变形难以通过接触测量获得,同时因承受载荷小,试样中心点易发生偏移。因此,试样中心区应变准确测量和四轴精确同步运动是实现双向加载实验的关键。

实验过程采用 DIC 技术实现二维变形场的实时测量,相比接触式测量方法,受外界影响小,隔震要求低。为实现四轴同步运动,本文设计的微尺度双向加载实验原理如图 2 所示。根据同步模式,实验分为位移控制和载荷控制 2 类。位移控制是在加载过程中十字形试样的  $x$  与  $y$  方向的位移保持比例或非比例同步,载荷控制是两方向的力传感器载荷值保持比例或非比例同步。

考虑微尺度下实验结果的可靠性,实验过程中,图 2 中试样中心点  $Q$  在  $x$  与  $y$  方向的偏移位置保持在  $\pm 0.02$  mm 范围之内,同时双向加载实验同步精度需满足表 1 中的指标要求。为满足不

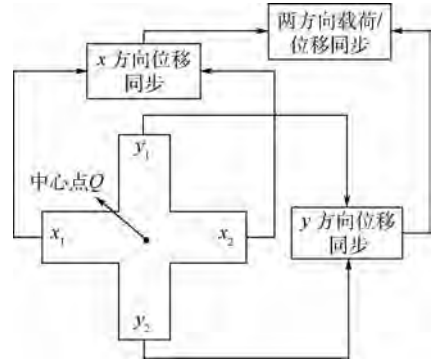


图 2 双向加载实验原理

Fig. 2 Principle of biaxial loading test

表 1 双向加载实验系统技术指标

Table 1 Technical indicators of biaxial loading test system

指标	位移分辨率/ $\mu\text{m}$	力传感器 准确度等级	位移同步 精度/ $\text{mm}$	载荷同步 精度/ $\text{kN}$
数值	5	0.02 ~ 0.03	0.02	0.05

同厚度薄板测量需求,系统采用了 1.25、5 和 25 kN 三种不同量程的力传感器,根据不同厚度的板材可快速更换。

# 2 双向加载实验系统

双向加载实验系统由硬件平台和控制系统 2 部分组成。根据实验原理,选用合适的硬件以满足四轴运动同步控制和中心区应变测量的需要。在硬件平台基础上开发配套的具备可视化、检测、监控等功能的软件系统。

## 2.1 硬件系统

按照实验原理设计的双向加载实验系统硬件平台如图 3 所示,主体部分是 4 个可独立运动的加载轴。硬件平台主要包括机架、防震平台、伺服电机、直线导轨、力传感器、光栅尺、机械夹具和 CCD 相机等。

为满足四轴同步的控制需求,在硬件平台基础上搭建全闭环控制系统,具体实施方式如图 4 所示。针对加载轴运动位置的高精度要求,采用

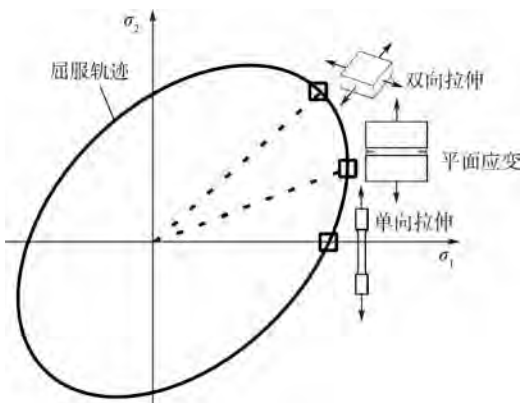


图 1 屈服轨迹的传统实验获取方法

Fig. 1 Traditional test acquisition method of yield principle

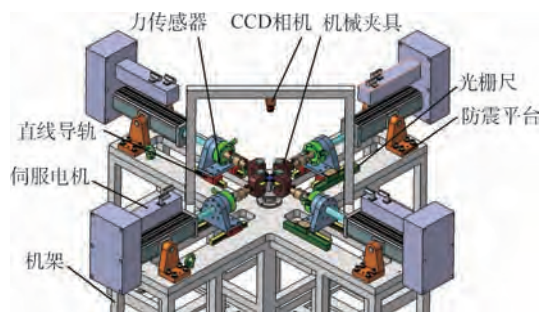


图 3 双向加载试验机硬件组成

Fig. 3 Hardware structure of biaxial loading test machine

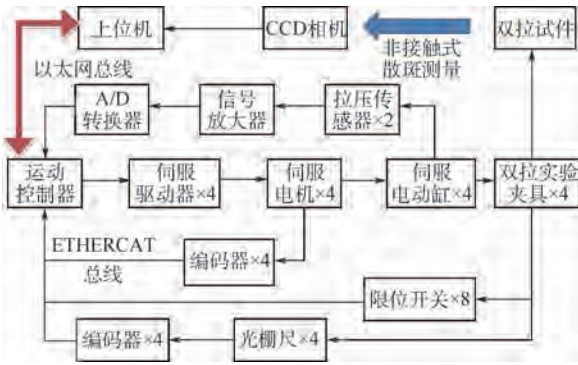


图4 微尺度双向加载实验系统控制原理

Fig. 4 Control principle of micro-scaled biaxial loading test system

以光栅尺为反馈的全闭环控制方式。控制系统硬件部分主要包括西门子 SIMOTION D425 运动控制器、SINAMICS S120 组件、交流永磁同步电机 (PMSM)、通信电缆以及带以太网通信的上位机等。其中上、下位机之间采用工业以太网 Profinet 通信,实现远程监控和数据传输等功能。

### 2.2 软件系统

软件系统决定了双向加载实验系统的实验精度、功能、实用性。为实现同步控制、测量和监控等实验功能,控制系统软件采用了“上位机 + 运动控制器”分布式的控制形式,充分利用了下位机在运算控制逻辑方面与上位机数据在处理显示方面的优势,其具体组成模块如图5所示。

图5中,上位机主要用来完成与下位机之间的通信,在显示和存储实验过程中位移、载荷等测量数据的同时保存该时刻采集的 DIC 照片。下位机软件主要是将上位机发送的控制指令转化成运动控制器的运动指令,并具备实时监控、故障处理等功能。下位机与上位机建立通信连接后,循环采集传感器数据发送到上位机界面,还可通

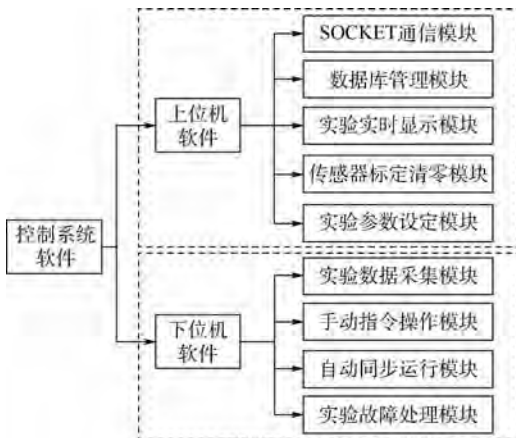


图5 控制软件结构

Fig. 5 Structure of control software

过选择手动或自动程序,分别进行夹具位置的调整 and 自动控制的双向加载实验。双向加载实验控制流程如图6所示。设图2中的  $x$  方向为主动方向,  $x_1$  和  $x_2$  为主动轴,与  $x$  方向正交的  $y$  方向是从动方向,  $y_1$  和  $y_2$  为从动轴。四轴在虚主轴耦合下同步运动,当出现中心区偏移、同步误差过大、外界中止、试样拉断等情况时,结束实验。

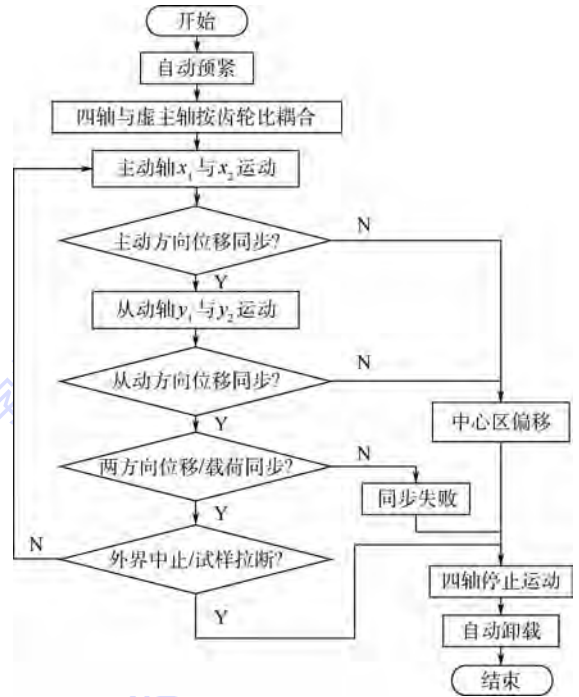


图6 双向加载实验控制流程

Fig. 6 Control process of biaxial loading test

### 2.3 微尺度应变测量方法

数字图像相关法测量全场应变技术具有非接触性、全场实时测量、精度高、便于自动化集成等优点<sup>[13]</sup>,广泛用于材料力学、塑性力学等变形测量和力学性能测试。因此,适用于微成形的双向加载实验系统采用了二维数字散斑方法测量全场应变,实验前调整 CCD 相机位姿使采集到的照片 2 条中心线分别平行于十字形试样的  $x$  和  $y$  方向,便于后续的应力、应变计算。实验结束后,对比分析实验前与实验过程某时刻的散斑图像,通过数字散斑相关方法计算出该时刻的位移和变形。

定义相关系数<sup>[14]</sup>:

$$C = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}] [g(x_i, y_j) - \bar{g}] \right\}^2}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [g(x_i, y_j) - \bar{g}]^2} \quad (1)$$

式中:  $\bar{f}$ 、 $\bar{g}$  分别为变形前、后子区的平均灰度值;  $f(x_i, y_j)$  为变形前子区域内灰度值;  $g(x_i, y_j)$  为变

形后子区域内灰度值。式(1)选择子区域像素范围是  $m \times m$ 。通过算法搜索<sup>[15]</sup>得到变形前、后子区相关系数最大的位移值:

$$r_u, r_v = \arg \max_{u, v} C(f(x, y), g(x + u_{x, y}, y + v_{x, y})) \quad (2)$$

以此作为变形前后的位移  $(u, v)$ , 依据变形位移计算 Cauchy 应变分量:

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \\ \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \\ \epsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{cases} \quad (3)$$

为验证数字图像相关法的应变测量精度,对 0.2 mm、1 000℃ 热处理的不锈钢板进行单向拉伸实验,同时采用 DIC 和引伸计测量应变。2 种方式测量的应力-应变曲线如图 7 所示。可见, DIC 计算结果与引伸计测量结果误差在 2% 以内,满足微尺度应变测量的要求。

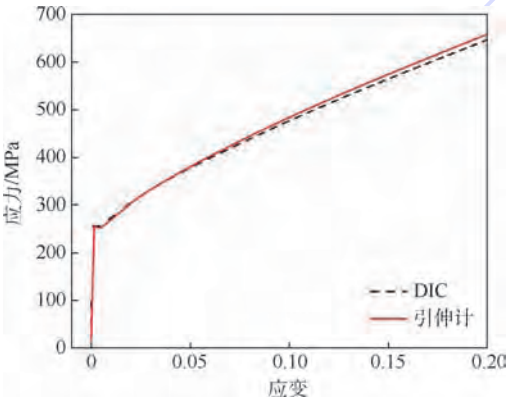


图 7 DIC 与引伸计测量结果对比

Fig. 7 Comparison between DIC and extensometer measurement results

### 3 控制系统设计

在双向加载实验的硬件系统与软件系统分析的基础上,设计相应的控制策略,以实现 4 个独立加载轴的平稳加载与同步运动。本文采用三相交流 PMSM 作为驱动单元,结合西门子运动控制器实现多轴控制。PMSM 具备优异的动态性能,在航空航天、工业自动化、数控机床和机器人等领域都有广泛应用<sup>[16]</sup>。

#### 3.1 单轴闭环控制模型

本文选用的西门子 1FK7033 高动态型 PMSM,可采用空间矢量控制方法转化成等效的直流旋转电机。双向加载实验系统单轴的全闭环控制方式如图 8 所示,其中速度反馈使用图 3 中

伺服电机内部自带的 22 位增量式编码器,角度分辨率为  $1.5 \times 10^{-6}$  rad,位置反馈使用图 3 中光栅尺,位置分辨率为 0.005 mm。

对于图 8 中电流控制环节,本文采用  $i_d = 0$  的控制策略,使定子电流只有交轴分量,将 PMSM 等价为他励直流电机,PMSM 矢量控制的电流环可等效为一阶惯性环节<sup>[17]</sup>,其时间常数为  $T_c$ 。以电流闭环为基础,引入速度闭环的 PI 控制器。根据等效的直流电机运动控制方程,得到速度闭环控制的模型如图 9 所示。

图 9 中: $T_f$  为速度滤波器时间常数; $K_p$  和  $T_i$  为速度 PI 控制器的常数; $J$  为系统转动惯量; $B$  为系统转子黏滞系数。速度闭环控制参数是伺服系统抑制波动、减少超调与振荡的关键。根据三阶最佳校正原则将速度闭环整定成一阶惯性环节<sup>[17]</sup>:

$$G(s) = \frac{K_s}{1 + T_s s} \quad (4)$$

式中: $K_s$  为速度环比例增益; $T_s$  为速度环积分时间常数。

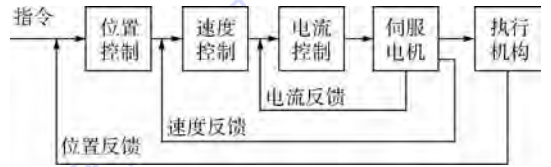


图 8 单轴闭环控制模型

Fig. 8 Single-axis closed-loop control model

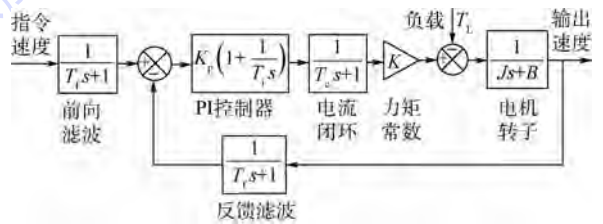


图 9 速度闭环控制模型

Fig. 9 Speed closed-loop control model

#### 3.2 速度闭环控制参数辨识

对于速度闭环被控对象,输入 10 Hz 的正弦波指令速度,预测式(4)的输出与电机在该指令下实际电机内部编码器测量的速度进行对比。调节未知参数  $K_s$  和  $T_s$ ,使得预测误差的方差达到最小,得到模型参数  $K_s = 0.99901$ ,  $T_s = 0.00011162$  s。

为进一步验证辨识的速度闭环控制模型的有效性,输入频率在 1 000 Hz 以内的随机信号,对比电机内部编码器测得的速度与式(4)预测结果,如图 10 所示。由于实验过程中四轴处在准静

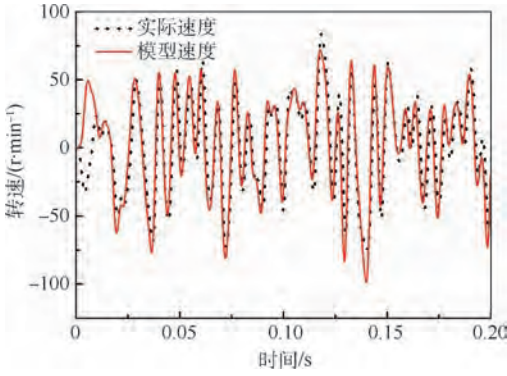


图 10 速度闭环控制模型输出结果与实际速度对比  
Fig. 10 Comparison between speed closed-loop control model output results and actual speed

态加载状态,其速度变化较慢,速度闭环控制满足要求,因此选择速度控制模式来进行位置闭环控制。

### 3.3 位置闭环控制

在速度闭环基础上,空载下的位置开环为一阶惯性环节,结果如式(5)所示。采用同样的方法对被控对象的位置开环进行辨识,得到位置环比例增益  $K_{pos} = 0.99525$ ,位置环积分时间常数  $T_{pos} = 0.038839s$ 。

$$G(s) = \frac{K_{pos}}{1 + T_{pos}s} \quad (5)$$

辨识的位置开环的时间常数  $T_{pos}$  远大于速度闭环的  $T_s$ ,表明系统机械间隙等对位置闭环控制影响较大。由于 PMSM 转矩依次经过减速器、同步带、电动缸等环节作用于机械夹具上,此外变形过程中材料由弹性转换到塑性,电机的负载转矩与外界载荷之间存在非线性关系,如图 11 所示。

为改善位置闭环的动态响应,设计位置闭环为前馈复合控制结构,如图 12 所示。结合光栅尺的位置测量值与电机内部编码器的速度测量

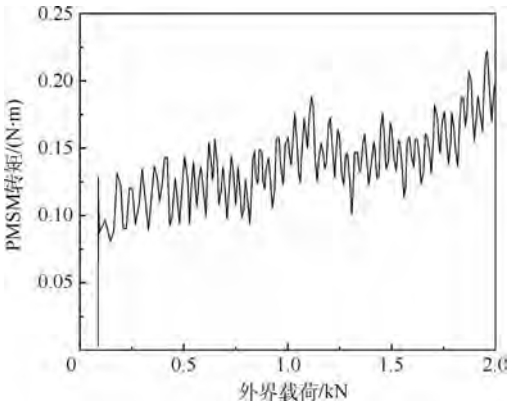


图 11 PMSM 转矩与外界载荷的非线性关系  
Fig. 11 Non-linear relationship between PMSM torque and external load

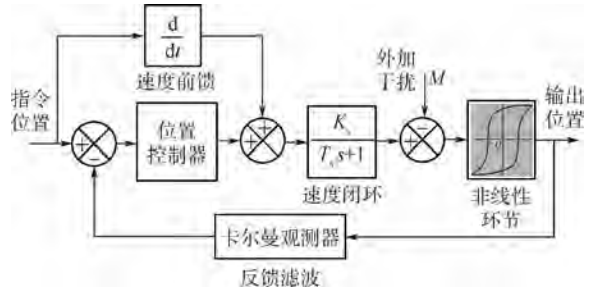


图 12 位置闭环控制模型

Fig. 12 Positional closed-loop control model

值,设计卡尔曼观测器获得每一时刻的最佳位置估计,作为位置闭环的反馈。

随着位置控制的复杂程度提高和非线性要素增多,传统的 PID 难于满足控制精度要求。对于位置控制器设计 3 种控制方式:传统 PID、模糊 PID 和非线性 PID。其中传统 PID 是全量型数字 PID,其输入是位置误差  $e$ ,经整定后位置闭环控制的 PID 参数为  $K_p = 4.1$ ,  $T_i = 1000ms$ ,  $T_d = 40ms$ 。

在传统 PID 控制方式基础上,模糊 PID 的输入是位置误差  $e$  和位置误差率  $\delta e$ ,采用对称三角形隶属度函数和相应的模糊控制规则<sup>[18]</sup>。非线性 PID 是在传统 PID 控制方式基础上串联非线性增益  $k(e)$ ,满足:

$$k(e) = \begin{cases} |\sinh(Fe)| & |e| > \Delta \\ 0 & |e| \leq \Delta \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $F$  为相关参数;  $\Delta$  为允许的误差的阈值,用以实现带死区的非线性控制。

设置位置指令为速度  $1.5mm/min$  的斜坡信号,检测 3 种控制方式下负载侧经滤波后的速度,结果如图 13 所示。

对比传统 PID,模糊 PID 能加快调节时间,抑制超调,但在材料变形由弹性切换到塑性后容易引起调节振荡。非线性 PID 在传统 PID 基础上引

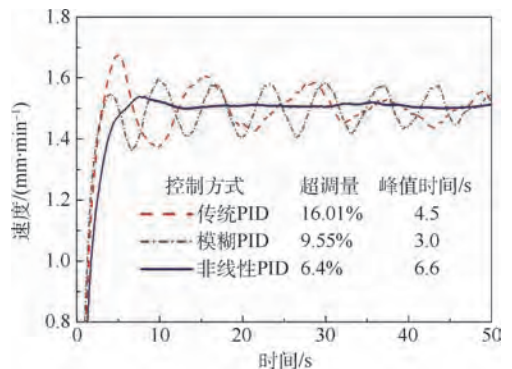


图 13 传统 PID、模糊 PID 与非线性 PID 控制结果  
Fig. 13 Traditional PID, fuzzy PID and nonlinear PID control results

入非线性增益,在误差较大时加快调节速度;在误差较小时,式中的  $k(e) = 0$ ,避免因调节过度引起振荡。因此,本文选用非线性 PID 控制器用于单轴位置闭环控制,控制精度小于等于  $0.008 \text{ mm}$ 。

### 3.4 四轴同步控制策略

在实现单轴闭环控制基础上构建四轴同步控制策略,为提高同步控制精度,引入虚拟轴作为系统控制主轴,速度为  $v$ ,实验过程中的载荷/位移比例同步系数为  $k$ 。四轴位置测量值分别为  $L_{x1}$ 、 $L_{x2}$ 、 $L_{y1}$ 、 $L_{y2}$ ,两方向上传感器载荷测量值分别为  $F_x$  和  $F_y$ 。对于位置同步模式,选择四轴独立驱动的并行控制,4个加载轴  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $y_1$  和  $y_2$  的输入误差  $e_1(t)$ 、 $e_3(t)$ 、 $e_2(t)$  和  $e_4(t)$  分别为

$$\begin{cases} e_1(t) = L_{x1} - vt \\ e_3(t) = L_{x2} - vt \\ e_2(t) = L_{y1} - kvt \\ e_4(t) = L_{y2} - kvt \end{cases} \quad (7)$$

保证位移同步的四轴运动控制满足  $e_1(t) = e_2(t) = e_3(t) = e_4(t) = 0$ ,其控制模型如图 14 所示。虚主轴的速度通过分布式电子齿轮分配给 4 个加载轴,用于图 12 中位置闭环控制的速度前馈。四轴位移同步控制可简化成 4 个加载轴位置闭环的并行控制,通过改变齿轮同步配比可方便实现  $x$  与  $y$  方向位移以任意比例同步。

在薄板双向拉伸过程中,两方向上拉伸载荷相互耦合影响,使得双向加载位移载荷关系复杂。对于载荷同步控制模式,为保证控制过程载荷与位移的控制不互相干扰,在图 14 基础上将  $y_1$ 、 $y_2$  的位置闭环分别改成载荷、位移的主从闭环控制,实现载荷控制与位移控制解耦。类比位移同步控

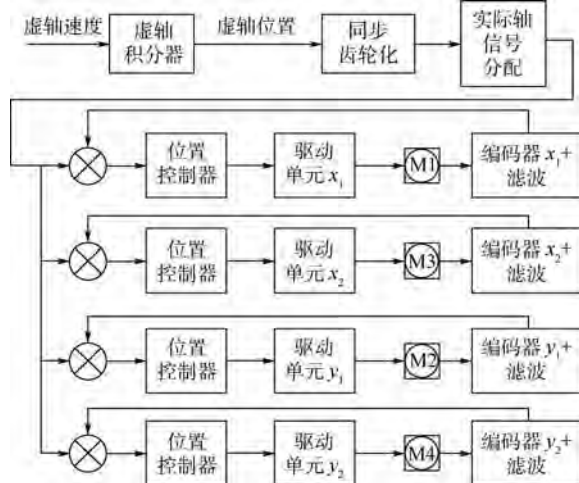


图 14 位移比例同步控制模型

Fig. 14 Displacement proportional synchronous control model

制,载荷同步的 4 个加载轴  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $y_1$  和  $y_2$  的输入误差  $e_1(t)$ 、 $e_3(t)$ 、 $e_2(t)$  和  $e_4(t)$  分别为

$$\begin{cases} e_1(t) = L_{x1} - vt \\ e_3(t) = L_{x2} - vt \\ e_2(t) = F_y - kF_x \\ e_4(t) = L_{y2} - L_{y1} \end{cases} \quad (8)$$

## 4 双向加载实验系统性能测试

本文所研发的微尺度双向加载实验系统如图 15 所示。为验证该系统的有效性,需进一步检验系统的控制和同步精度。

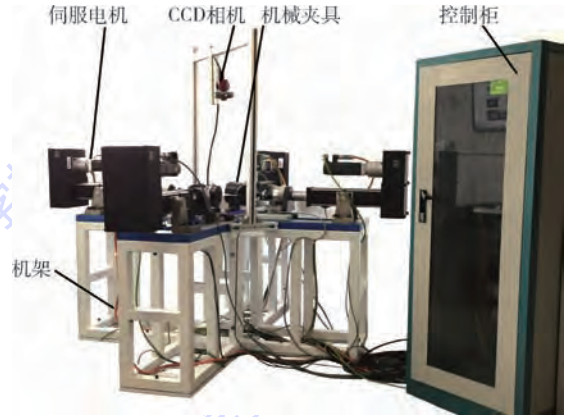


图 15 微尺度双向加载实验系统

Fig. 15 Micro-scaled biaxial loading test system

### 4.1 同步精度

为评估双向加载实验的同步精度,可利用试样中心点的轨迹进行定量分析。中心区不发生偏移满足:

$$\begin{cases} |L_{x1} - L_{x2}| \leq 0.02 \text{ mm} \\ |L_{y1} - L_{y2}| \leq 0.02 \text{ mm} \end{cases} \quad (9)$$

分析图 2 试样中心点  $Q$  在 4:4 载荷比例实验条件下的位置变化轨迹,如图 16 所示。

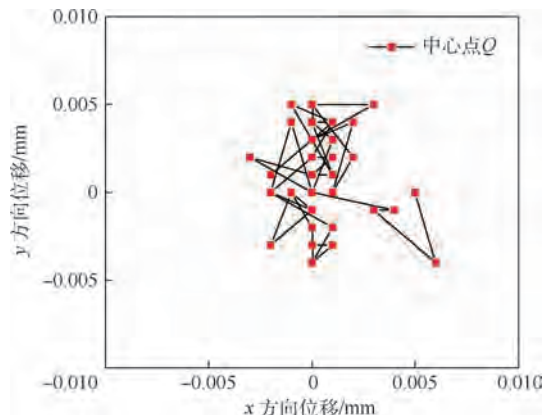


图 16 试样中心点轨迹

Fig. 16 Center point locus of sample

位移同步是在式(9)的基础上同时满足同步精度  $e_L$  :

$$e_L = \max(L_{y1}, L_{y2}, kL_{x1}, kL_{x2}) - \min(L_{y1}, L_{y2}, kL_{x1}, kL_{x2}) \leq 0.02 \text{ mm} \quad (10)$$

载荷同步是在式(9)基础上同时满足同步精度  $e_F$  :

$$e_F = |kF_x - F_y| \leq 0.05 \text{ kN} \quad (11)$$

实验获得试验机的位移比例同步精度  $e_L$ 、载荷比例同步精度  $e_F$  如图 17 所示。

实验结果表明,实验过程中中心点  $Q$  位置的  $x$ 、 $y$  两方向坐标处在  $\pm 0.01 \text{ mm}$  的范围内,且位移/载荷同步精度满足实验要求。

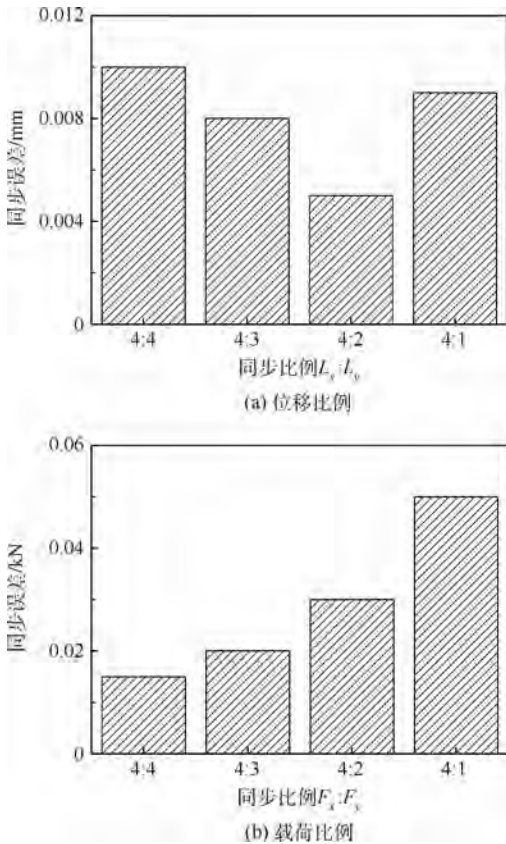


图 17 位移比例和载荷比例同步精度  
Fig. 17 Displacement and load ratio synchronization accuracy

### 4.2 系统应用

验证双向加载实验系统的同步精度后,对厚度  $0.1 \text{ mm}$  的 SUS304 不锈钢超薄板试样分别做  $0:4, 1:4, 2:4, 3:4, 4:4, 4:3, 4:2, 4:1, 4:0$  的载荷比例实验,获得不同加载路径下两方向的应力-应变曲线。利用  $0^\circ$  方向单向拉伸实验的应力-应变曲线计算的屈服点处塑性功,根据等塑性功原理求得不同加载路径下屈服点处的两方向应力  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$ 。拟合屈服点得到第一象限的屈服轨迹曲线如图 18 所示,表明开发的微尺度双

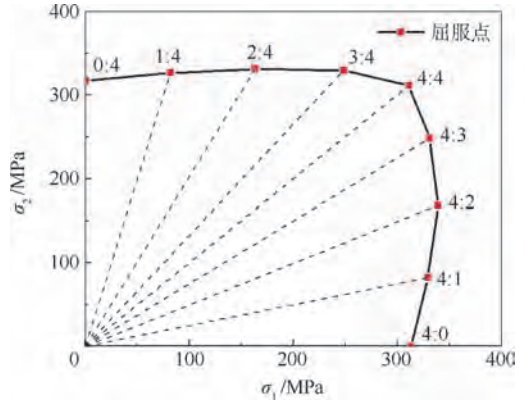


图 18 不同加载路径下屈服点拟合的屈服轨迹  
Fig. 18 Yield curves of yield point fitting under different loading paths

轴加载试验机可用于超薄板屈服行为研究。

## 5 结论

本文建立了适用于超薄板的微尺度双向加载实验方法,开发了微尺度双向加载实验系统。系统硬件平台是四轴独立驱动类型,软件结构采用上、下位机分离形式,采用非接触式散斑测量应变。

1) 针对材料变形非线性过程和电机转矩-拉伸载荷之间的非线性关系,提出非线性 PID 控制方法,有效提高了控制稳定性,位置闭环控制精度小于等于  $0.008 \text{ mm}$ 。

2) 基于虚拟主轴实现了四轴同步控制,实验过程中中心点的偏移在  $\pm 0.01 \text{ mm}$  范围内,位移同步精度小于等于  $0.02 \text{ mm}$ ,载荷同步精度小于等于  $0.05 \text{ kN}$ ,满足微尺度屈服、强化行为实验研究的要求。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] SCHROERS J, PHAM Q, DESAI A. Thermoplastic forming of bulk metallic glass—A technology for MEMS and microstructure fabrication [ J ]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2007, 16( 2 ): 240-247.
- [ 2 ] MENG B, FU M W, FU C M, et al. Ductile fracture and deformation behavior in progressive microforming [ J ]. Materials & Design, 2015, 83: 14-25.
- [ 3 ] RAZALI A R, QIN Y. A review on micro-manufacturing, micro-forming and their key issues [ J ]. Procedia Engineering, 2013, 53( 7 ): 665-672.
- [ 4 ] MANABE K, SHIMIZU K, KOYAMA T, et al. Validation of FE simulation based on surface roughness model in micro-deep drawing [ J ]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 204( 1-3 ): 89-93.
- [ 5 ] YEH F H, LI C L, LU Y H. Study of thickness and grain size effects on material behavior in micro-forming [ J ]. Journal of

- Materials Processing Technology, 2008, 201(1-3): 237-241.
- [6] FU M W, WANG J L, KORSUNSKY A M. A review of geometrical and microstructural size effects in micro-scale deformation processing of metallic alloy components[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2016(109): 94-125.
- [7] MENG B, FU M W. Size effect on deformation behavior and ductile fracture in microforming of pure copper sheets considering free surface roughening[J]. Materials & Design, 2015, 83: 400-412.
- [8] FU M W, CHAN W L. A review on the state-of-the-art microforming technologies[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(9-12): 2411-2437.
- [9] DUBOS P A, FLEURIER G, HUG E. An experimental investigation of the size effects in forming processes of high-purity thin metallic sheets[C]//Materials Science Forum, 2017: 459-464.
- [10] PENG L F, XU Z T, FU M W, et al. Forming limit of sheet metals in meso-scale plastic forming by using different failure criteria[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 120: 190-203.
- [11] HANNON A, TIERNAN P. A review of planar biaxial tensile test systems for sheet metal[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 198(1): 1-13.
- [12] BANABIC D, BARLAT F, CAZACU O, et al. Advances in anisotropy and formability[J]. International Journal of Material Forming, 2010, 3(3): 165-189.
- [13] CHEN H, YE D, CHE R. High speed deformation measurement using digital speckle correlation method[C]//27th International Congress on High-Speed Photography and Photonics. Bellingham: SPIE, 2007: 627910.
- [14] 陈华. 基于数字散斑相关方法的视觉变形测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008: 15-22.
- CHEN H. Study of vision deformation measurement technologies based on digital speckle correlation method[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008: 15-22 (in Chinese).
- [15] MA S P, JI G C. Digital speckle correlation method improved by genetic algorithm[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2003, 16(4): 366-373.
- [16] 汪海波, 周波, 方斯琛. 永磁同步电机调速系统的滑模控制[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 71-77.
- WANG H B, ZHOU B, FANG S C. PMSM sliding mode control system based on exponential reaching law[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 71-77 (in Chinese).
- [17] 陈鹏展. 交流伺服系统控制参数自整定策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010: 19-27.
- CHEN P Z. Study on the self-tuning strategy of control parameters for AC servo system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010: 19-27 (in Chinese).
- [18] 王述彦, 师宇, 冯忠绪. 基于模糊PID控制器的控制方法研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(1): 166-172.
- WANG S Y, SHI Y, FENG Z X. A method for controlling a loading system based on a fuzzy PID controller[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(1): 166-172 (in Chinese).

#### 作者简介:

熊晶洲 男, 硕士研究生。主要研究方向: 超薄板屈服行为。

万敏 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 精密成形与微结构制造技术。

孟宝 男, 博士, 副教授, 博士生导师。主要研究方向: 航空薄壁微结构成形制造技术。

吴向东 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 金属薄板表征与实验技术。

## Micro-scaled biaxial loading test system based on multi-axis synchronous control

XIONG Jingzhou, WAN Min, MENG Bao\*, ZHAO Yuechao, WU Xiangdong

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Aimed at the currently insufficient experimental condition for the research on yielding and hardening behavior in microforming of ultrathin sheets, a micro-scaled biaxial loading test system was presented, which can achieve complex loading paths. The system is characterized with four independent driving axes in hardware, coupled with separated upper computer and lower computer in software structure. The digital image correlation (DIC) method is adopted to capture deformation strain in the biaxial tension process. The control model of permanent magnet synchronous motor (PMSM) was first established, and the control parameters of speed closed loop were identified. The control accuracy of single-axis position closed-loop is significantly improved by using the nonlinear PID control method, and the four-axis synchronous control under diverse displacement/load ratios is realized on the basis of virtual axis method. The biaxial loading experiment reveals that the system satisfies the requirements of displacement synchronization error within 0.02 mm and load synchronization error within 0.05 kN. The developed system can thus be used for experimental research on yielding and hardening behavior of ultrathin sheet.

**Keywords:** microforming; yielding and hardening behavior; micro-scaled biaxial loading system; virtual axis method; synchronous control

**Received:** 2018-04-20; **Accepted:** 2018-07-13; **Published online:** 2018-07-26 15:29

**URL:** [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180725.1602.004.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180725.1602.004.html)

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (51605018)

\* **Corresponding author.** E-mail: mengbao@buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0191



# 频率分集阵列对干涉仪的角度欺骗效果

葛佳昂<sup>1</sup>, 谢军伟<sup>1,\*</sup>, 张浩为<sup>1</sup>, 冯晓宇<sup>1</sup>, 张晶<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学 防空反导学院, 西安 710051; 2. 陕西交通职业技术学院 公路与铁道工程学院, 西安 710018)

**摘 要:** 针对干涉仪的测向隐蔽性问题, 提出了一种基于频率分集阵列(FDA)对干涉仪的角度欺骗方法。干涉仪通过求取各天线接收到信号的相位差确定信号到达角, 而FDA由于各阵元具有微小频偏造成其相位差并不满足求解关系, 从而实现角度欺骗。首先, 利用模型建立法和欧拉公式法2种方法建立了FDA波束相位模型; 然后, 从建立的2种模型出发, 论证了FDA发出信号对干涉仪具有角度欺骗效果; 最后, 仿真分析了干扰距离、阵元间距、发射频率、频率增量等因素的影响。理论分析与仿真结果表明, FDA对处于远场的干涉仪目标有良好的欺骗效果。

**关键词:** 频率分集阵列(FDA); 角度欺骗; 干涉仪; 欧拉公式; 相位差

**中图分类号:** TN974

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5965(2019)01-0183-09

2006年, 伦敦大学 Antonik 等<sup>[1]</sup>在国际雷达会议上首次提出了频率分集阵列(Frequency Diversity Array, FDA)的概念, 引起了国内外学者的广泛关注。与传统相控阵雷达不同, 通过在各阵元之间引入频率增量, FDA雷达天线发射方向图具有角度-距离二维依赖性, 空间波束指向会随距离和角度变化而发生变化; 而传统相控阵雷达天线发射方向图仅与角度有关。FDA相对于相控阵增加了距离的自由度。针对FDA天线发射方向图特性, 文献[2-7]中指出了FDA天线发射方向图随距离、时间、角度的周期变化规律, 并给出了详细的理论推导。

FDA波束的距离-角度二维特性, 使其能够在保持目标跟踪的同时, 更好地规避干扰、防止自身被定位, 因而在电子对抗中具有良好的应用前景。2017年, 唐斌教授等<sup>[8]</sup>对FDA的电子对抗性能进行了总结, 指出了FDA在多径干扰抑制、有源干扰抑制等方面具有独特的优势。文献[9]分析

表明, FDA在多径干扰抑制方面优势明显。文献[10-11]证明了利用FDA波束的距离依赖特性, 能够对距离杂波抑制产生更好效果。许京伟等<sup>[12]</sup>利用FDA-MIMO发射-接收空间角频率的相对关系进行欺骗干扰鉴别, 取得了较好效果。2015—2016年, 王文钦教授等<sup>[13-15]</sup>发表了多篇关于FDA的综述性文章, 对其研究现状进行了系统总结, 并分析了FDA在射频隐身雷达中的应用前景。而解决雷达隐身问题, 就要解决角度欺骗的实现问题。由于FDA的天线发射方向图与距离相关, 天线发射方向图出现了弯曲现象, 因而产生了关于虚拟辐射源的问题, 以达到角度欺骗的目的<sup>[16-17]</sup>。利用天线发射方向图的弯曲现象, 文献[18]研究了幅度法测向的角度欺骗, 并提出了远场目标角度欺骗效果更好。

然而, 在FDA实现角度欺骗的研究中, 只研究了基于幅度法测向的角度欺骗方法, 对于相位法却没有研究。以干涉仪为代表的相位法测向作

收稿日期: 2018-04-09; 录用日期: 2018-08-24; 网络出版时间: 2018-09-10 14:25

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180906.1028.003.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180906.1028.003.html)

基金项目: 国家自然科学基金(61503408)

\*通信作者. E-mail: xjw\_xjw\_123@163.com

**引用格式:** 葛佳昂, 谢军伟, 张浩为, 等. 频率分集阵列对干涉仪的角度欺骗效果[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 183-191. GE J A, XIE J W, ZHANG H W, et al. Angle deception effect of frequency diversity array on interferometer[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 183-191 (in Chinese).

为一种无源测向方法,具有测向隐蔽性好、方位测量准确等优点,在侦察系统中应用越来越广泛。但是,对于该系统的主动对抗还在研究,目前提出了相干干扰的主动对抗方法<sup>[19-20]</sup>。

本文提出了基于 FDA 对干涉仪的角度欺骗方法。首先利用模型建立法和欧拉公式法建立了 FDA 波束相位模型,然后从干涉仪测向原理出发,通过 2 种模型分析了方法的可行性,并通过仿真分析了欺骗的效果。

## 1 FDA 波束相位模型

当采用干涉仪进行侦察时,与传统幅度方向图不同,干涉仪的基本原理的是求取天线接收到的波束的相位差达到测向的目的,因而有必要先建立 FDA 波束相位模型,并根据建立的模型求取 FDA 波束在信号空间的相位。

### 1.1 模型建立法

均匀线性 FDA 结构如图 1 所示。

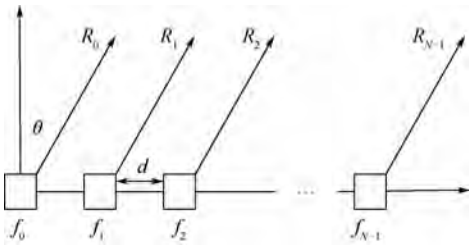


图 1 均匀线性 FDA 结构

Fig. 1 Uniform linear FDA structure

各阵元发射信号可表示为

$$s_n(t) = \exp(j2\pi f_n t) \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

式中:各阵元频率  $f_n$  为

$$f_n = f_0 + (n-1)\Delta f \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

其中: $f_0$ 、 $\Delta f$ 和  $N$  分别为初始频率、频率增量和阵元总数。

设空间中某位置  $\{R_0, \theta\}$  处有一远场点目标,则阵元数为  $n$  的发射信号到达远场点目标的信号可表示为

$$s_n(t) = \exp\left[j2\pi f_n \left(t - \frac{R_n}{c}\right)\right] \quad (3)$$

式中: $R_n = R_0 - nd\sin\theta$ ,  $d$  为阵元间距; $c$  为光速。

在  $\{R_0, \theta\}$  处产生的远场阵列因子为

$$\begin{aligned} \text{AF}(t; R_0, \theta) &= \sum_{n=0}^{N-1} s_n(t) = \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} \frac{1}{R_n} \exp\left[j2\pi f_n \left(t - \frac{R_0}{c} + \frac{nd\sin\theta}{c}\right)\right] = \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} \frac{1}{R_n} \exp\left[j2\pi f_0 \left(t - \frac{R_0}{c}\right) + j2\pi f_0 \frac{nd\sin\theta}{c} + \right. \\ &\quad \left. j2\pi n\Delta f \left(t - \frac{R_0}{c}\right) + \frac{j2\pi n^2 \Delta f d \sin\theta}{c}\right] \quad (4) \end{aligned}$$

由于满足 3 个条件:①电磁波的远场传播时间远大于相邻阵元波程差传播时间;②远场距离远大于相邻波程差;③中心频率远大于步进频率增量。即

$$\begin{cases} t \gg \frac{nd\sin\theta}{c} \\ R_0 \gg nd\sin\theta \\ f_0 \gg \Delta f \\ R_n \approx R_0 \end{cases} \quad (5)$$

因此,  $j2\pi n^2 \Delta f d \sin\theta / c$  的值远小于其他 3 项,可以忽略不计,故

$$\begin{aligned} \text{AF}(t; R_0, \theta) &= \sum_{n=0}^{N-1} \frac{1}{R_n} \exp\left[j2\pi f_0 \left(t - \frac{R_0}{c}\right) + \right. \\ &\quad \left. j2\pi f_0 \frac{nd\sin\theta}{c} + j2\pi n\Delta f \left(t - \frac{R_0}{c}\right)\right] = \\ &= \frac{\exp\left[j2\pi f_0 \left(t - \frac{R_0}{c}\right)\right]}{R_0} \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left\{n \left[ j2\pi f_0 \frac{d\sin\theta}{c} + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. j2\pi \Delta f \left(t - \frac{R_0}{c}\right)\right]\right\} \quad (6) \end{aligned}$$

令  $\alpha = 2\pi f_0 \frac{d\sin\theta}{c} + j2\pi \Delta f \left(t - \frac{R_0}{c}\right)$ , 则

$$\begin{aligned} \text{AF}(t; R_0, \theta) &= \frac{\exp\left[j2\pi f_0 \left(t - \frac{R_0}{c}\right)\right]}{R_0} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(jn\alpha) = \\ &= \frac{\exp\left[j2\pi f_0 \left(t - \frac{R_0}{c}\right)\right]}{R_0} \cdot \frac{1 - \exp(jN\alpha)}{1 - \exp(j\alpha)} = \\ &= \frac{\exp(j\phi_0)}{R_0} \cdot \frac{\sin \frac{N\alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}} \quad (7) \end{aligned}$$

则

$$\begin{aligned} \phi_0 &= 2\pi f_0 \left(t - \frac{R_0}{c}\right) + \pi(N-1) \cdot \\ &\quad \left(\frac{f_0 d \sin\theta}{c} + \Delta f t - \frac{\Delta f R_0}{c}\right) \quad (8) \end{aligned}$$

### 1.2 欧拉公式法

FDA 阵列目标探测示意图如图 2 所示。

包含  $N$  个阵元的 FDA 阵列对目标进行照射时,可等效为  $N$  个点源对目标进行独立探测的合成。设第  $i$  个点源在目标处的电场强度为

$$E_i(t) = E_{mi} \exp\left\{j \left[ \omega_i \left(t - \frac{R_i}{c}\right) + \varphi_{oi}\right]\right\} \quad (9)$$

式中: $E_{mi}$ 和  $\varphi_{oi}$ 分别为信号的幅值和初始相位; $\omega_i = 2\pi f_i$ 。则  $N$  个点源在目标处合成的电场强度为

$$E_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^N E_{mi} \exp\left\{j \left[ \omega_i \left(t - \frac{R_i}{c}\right) + \varphi_{oi}\right]\right\} =$$

$$\sum_{i=1}^N E_{mi} \exp(j\varphi_i) = \sum_{i=1}^N E_{mi} \cos \varphi_i + j \sum_{i=1}^N E_{mi} \sin \varphi_i = E_m \exp(j\varphi_s) \quad (10)$$

式中:

$$\begin{cases} E_m = \left[ \left( \sum_{i=1}^N E_{mi} \cos \varphi_i \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^N E_{mi} \sin \varphi_i \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ \varphi_s = \arctan \left( \frac{\sum_{i=1}^N E_{mi} \sin \varphi_i}{\sum_{i=1}^N E_{mi} \cos \varphi_i} \right) \\ \varphi_i = \omega_i \left( t - \frac{R_i}{c} \right) + \varphi_{0i} \end{cases} \quad (11)$$

则

$$\varphi_s = \arctan \frac{\sum_{i=1}^N E_{mi} \sin \left( \omega_i \left( t - \frac{R_i}{c} \right) + \varphi_{0i} \right)}{\sum_{i=1}^N E_{mi} \cos \left( \omega_i \left( t - \frac{R_i}{c} \right) + \varphi_{0i} \right)} \quad (12)$$

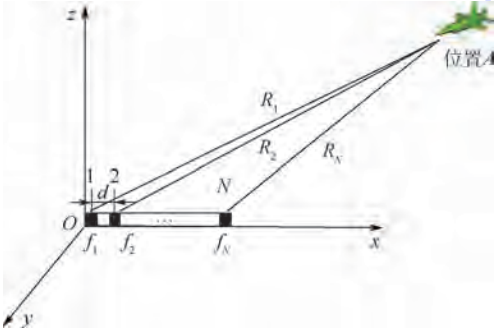


图 2 FDA 阵列目标探测示意图

Fig. 2 Schematic of FDA array target detection

## 2 对干涉仪的角度欺骗

通过 1.1 节和 1.2 节建立了 FDA 波束的相位模型,从 2 种模型出发,根据干涉仪测向原理,分析 2 种模型下对干涉仪的欺骗效果。干涉仪系统在实际测向时利用多个不同位置或指向的天线单元,根据比较不同天线接收到的辐射源信号的相位差确定信号的到达角。因此,由于 FDA 具有微小的频差,造成相位差并不符合干涉仪的测向规律,因而能够达到欺骗的目的。下面以最简单的干涉仪测向系统为例进行分析。

最简单的干涉仪测向系统是一维单基线相位干涉仪,其由 2 个信道组成,如图 3 所示。为了讨论方便,假设辐射源和天线阵在一个平面内。

若有一平面电磁波从天线视轴夹角  $\gamma$  方向到达干涉仪两接收天线,则两天线接收到的信号相

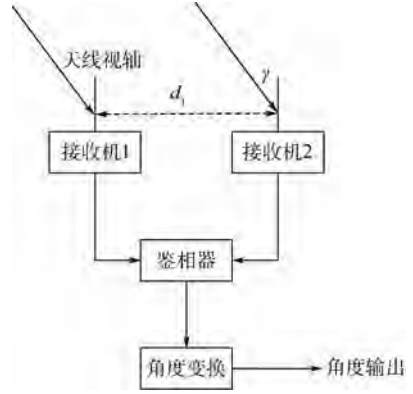


图 3 一维单基线相位干涉仪系统

Fig. 3 One-dimensional single-baseline phase interferometer system

位差  $\phi$  为

$$\phi = \frac{2\pi d_1 \sin \gamma}{\lambda} \quad (13)$$

式中:  $\lambda$  为信号波长;  $d_1$  为两天线间距。

如果 2 个信道完全一样,接收机输出的信号相位差仍然为  $\phi$ ,经过鉴相器后,再进行角度变换,求得辐射源信号的到达方位  $\gamma$ :

$$\gamma = \arcsin \left( \frac{\phi \lambda}{2\pi d_1} \right) \quad (14)$$

### 2.1 针对模型建立法模型

由式(8)可知:

$$\begin{cases} \phi_1 = 2\pi f_0 \left( t - \frac{R_0}{c} \right) + \pi(N-1) \left( \frac{f_0 d \sin \gamma}{c} + \Delta f t - \frac{\Delta f R_0}{c} \right) \\ \phi_2 = 2\pi f_0 \left( t - \frac{R_0 + d_1 \sin \gamma}{c} \right) + \pi(N-1) \cdot \left[ \frac{f_0 d \sin \gamma}{c} + \Delta f t - \frac{\Delta f (R_0 + d_1 \sin \gamma)}{c} \right] \end{cases} \quad (15)$$

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 = 2\pi f_0 \frac{d_1 \sin \gamma}{c} + \pi(N-1) \frac{\Delta f d_1 \sin \gamma}{c} \quad (16)$$

利用式(13),得

$$\sin \gamma' = \sin \gamma + \frac{(N-1)\Delta f}{2f_0} \sin \gamma \quad (17)$$

则接收机 1 求得的交点相对于阵元初始点位置即为

$$\begin{aligned} x_1 &= R_0 \sin \gamma' - R_0 \sin \gamma = \frac{(N-1)\Delta f R_0}{2f_0} \sin \gamma = \\ &= \frac{(N-1)\Delta f X_a}{2f_0} \end{aligned} \quad (18)$$

接收机 2 求得的交点相对于阵元初始点位置即为

$$x_2 = R_0 \sin \gamma' - R_0 \sin \gamma - d_1 = \frac{(N-1)\Delta f R_0}{2f_0} \sin \gamma - d_1 = \frac{(N-1)\Delta f X_a}{2f_0} - d_1 \quad (19)$$

式中:  $X_a$  为接收机 1 相对于 FDA 阵元初始点位置的  $x$  轴方向的距离。  $d$  一般取为  $\lambda/2$ , 若要使交点位置落于 FDA 阵面外, 则两接收机求得的交点均要落于阵列外, 即

$$\begin{cases} x_1 = \frac{(N-1)\Delta f X_a}{2f_0} > (N-1)d & \text{接收机 1} \\ x_2 = \frac{(N-1)\Delta f X_a}{2f_0} - d_1 > (N-1)d & \text{接收机 2} \end{cases} \quad (20)$$

即  $2f_0 d_1 < (N-1)(X_a \Delta f - c)$  (21)

### 2.2 针对欧拉公式法模型

根据式(11)可知:

$$\begin{cases} \varphi_{s1} = \arctan \left( \frac{\sum_{i=1}^N E_{mi} \sin \varphi_{i1}}{\sum_{i=1}^N E_{mi} \cos \varphi_{i1}} \right) \\ \varphi_{i1} = \omega_i \left( t - \frac{R_{i1}}{c} \right) + \varphi_{0i} \\ \varphi_{s2} = \arctan \left( \frac{\sum_{i=1}^N E_{mi} \sin \varphi_{i2}}{\sum_{i=1}^N E_{mi} \cos \varphi_{i2}} \right) \\ \varphi_{i2} = \omega_i \left( t - \frac{R_{i2}}{c} \right) + \varphi_{0i} \end{cases} \quad (22)$$

式中:

$$\begin{cases} R_{i1} = \sqrt{(X_a + id)^2 + Y_a^2 + Z_a^2} \\ R_{i2} = \sqrt{(X_a + d_1 + id)^2 + Y_a^2 + Z_a^2} \end{cases} \quad (23)$$

其中:  $Y_a, Z_a$  分别为接收机 1 到阵元初始点的  $y, z$  方向的距离。

取  $\Delta f = 1 \text{ kHz}$ , 得到仿真图形如图 4 所示。

$$\varphi_s = \varphi_{s1} - \varphi_{s2} \quad (24)$$

利用式(14), 得

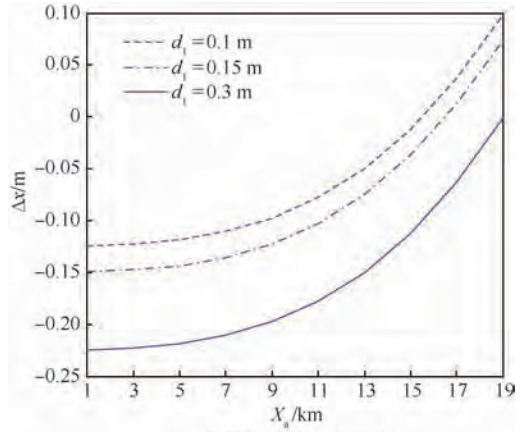
$$\gamma = \arcsin \left( \frac{\varphi_s \lambda}{2\pi d_1} \right) \quad (25)$$

则接收机求得的交点与接收机的  $x$  轴距离为  $x = X_a \tan \gamma$  (26)

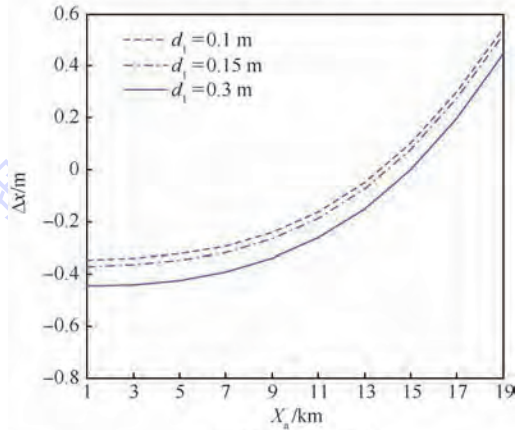
若要满足角度欺骗的要求, 则两接收机求得的交点均要落于阵列外, 即

$$\begin{cases} x - X_a > (N-1)d & \text{接收机 1} \\ x - d_1 - X_a > (N-1)d & \text{接收机 2} \end{cases} \quad (27)$$

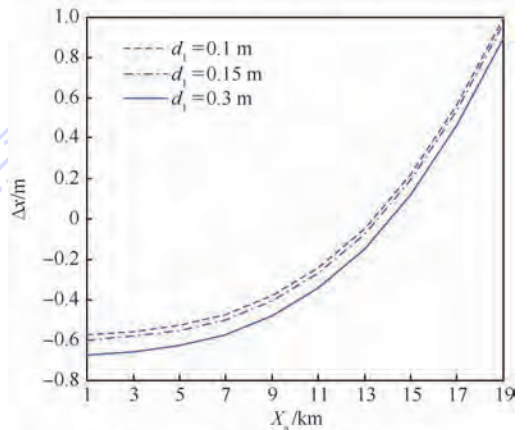
即



(a)  $\Delta f = 1 \text{ kHz}, N = 2$



(b)  $\Delta f = 1 \text{ kHz}, N = 5$



(c)  $\Delta f = 1 \text{ kHz}, N = 8$

图 4  $d_1$  对  $\Delta x$  影响示意图 ( $\Delta f = 1 \text{ kHz}, N = 2, 5, 8$ )

Fig. 4 Schematic of impact of  $d_1$  on  $\Delta x$

( $\Delta f = 1 \text{ kHz}, N = 2, 5, 8$ )

$$x - d_1 - X_a > (N-1)d \quad (28)$$

### 2.3 方法对比

2.1 节、2.2 节分别利用模型建立法与欧拉公式法 2 种方法, 论证了利用 FDA 对干扰仪进行角度欺骗的可行性, 但 2 种方法并不完全一致。

模型建立法建立在诸多简化条件下, 考虑的是相对理想的情况, 进行了很多简化, 故误差会比较大。

欧拉公式法则仅考虑了干涉仪接收到的远程波束近似平行这一项理想状态,所以相对于模型建立误差较小,与实际环境更相符。

### 3 仿真分析

由 2.3 节的分析可知,利用欧拉公式法求得的条件,相对误差较小,与实际环境更相符,故仿真采用了欧拉公式法。

#### 3.1 干涉仪天线间距、频率增量、FDA 阵元数的影响

取 FDA 初始频率  $f_0$  为 1 GHz,阵元间距  $d$  为 0.15 m、时间  $t$  为 0,干涉仪接收机 1 距离 FDA 阵

元初始点的  $y$  轴距离  $Y_a$  为 0, $z$  轴距离  $Z_a$  为 4 km。分别取干涉仪天线间距  $d_1$ 、频率增量  $\Delta f$ 、FDA 阵元数  $N$  为变量进行仿真,求取

$$\Delta x = x - d_1 - X_a - (N - 1)d \quad (29)$$

取  $\Delta f = 10$  kHz,得到仿真图形如图 5 所示。取  $\Delta f = 100$  kHz,得到仿真图形如图 6 所示。由  $\Delta x = 0$  得到满足角度欺骗的最小  $X_a$  值,即  $X_a$  临界值,如表 1 所示。

综合比较可以得出,在一定范围内,频率增量  $\Delta f$  越大,阵元数  $N$  越多,干涉仪天线间距  $d_1$  越小,均有利于实现 FDA 对干涉仪的角度欺骗,且在距离增加时,更容易实现角度欺骗,即对远场

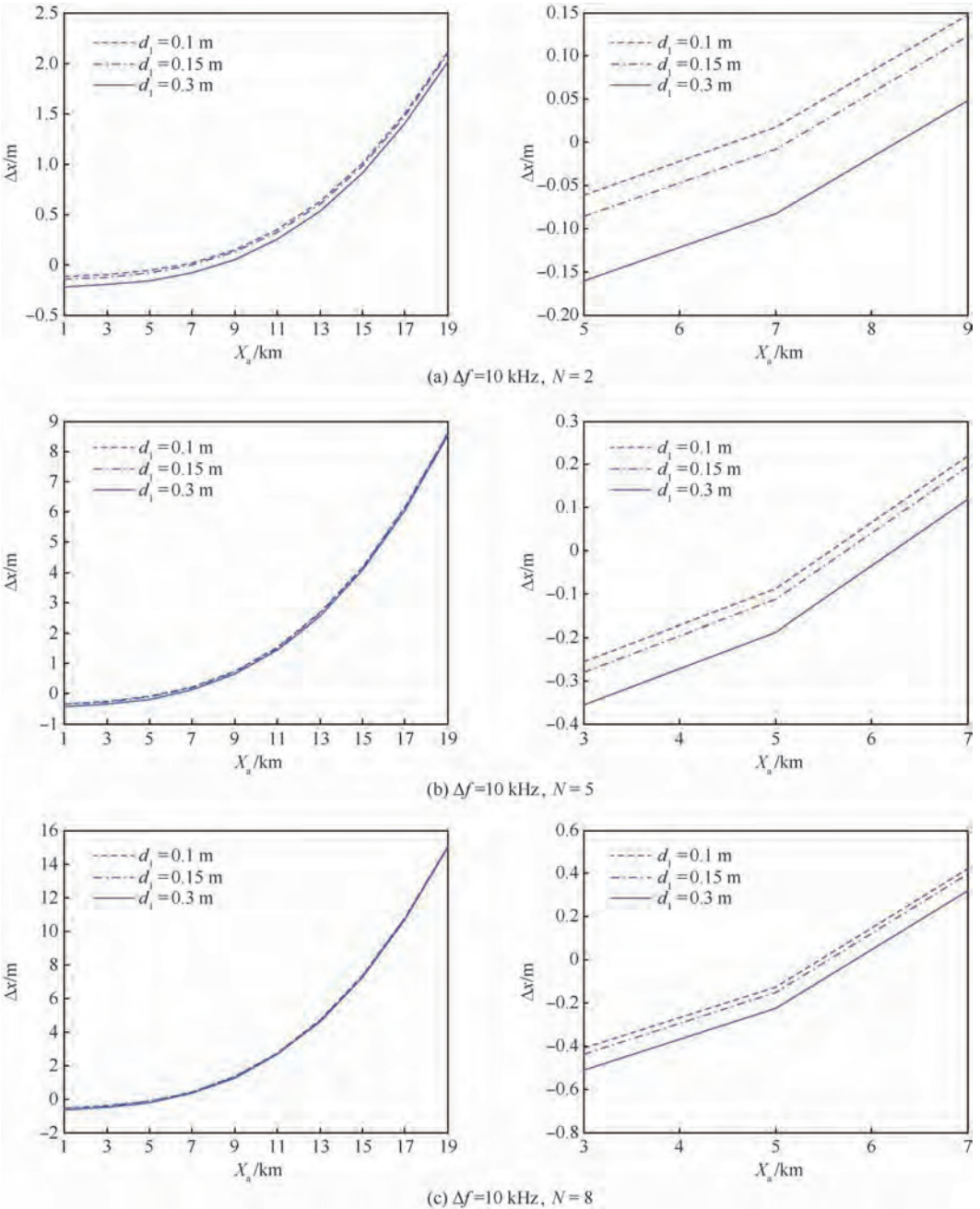


图 5  $d_1$  对  $\Delta x$  影响示意图 ( $\Delta f = 10$  kHz,  $N = 2, 5, 8$ )

Fig. 5 Schematic of impact of  $d_1$  on  $\Delta x$  ( $\Delta f = 10$  kHz,  $N = 2, 5, 8$ )

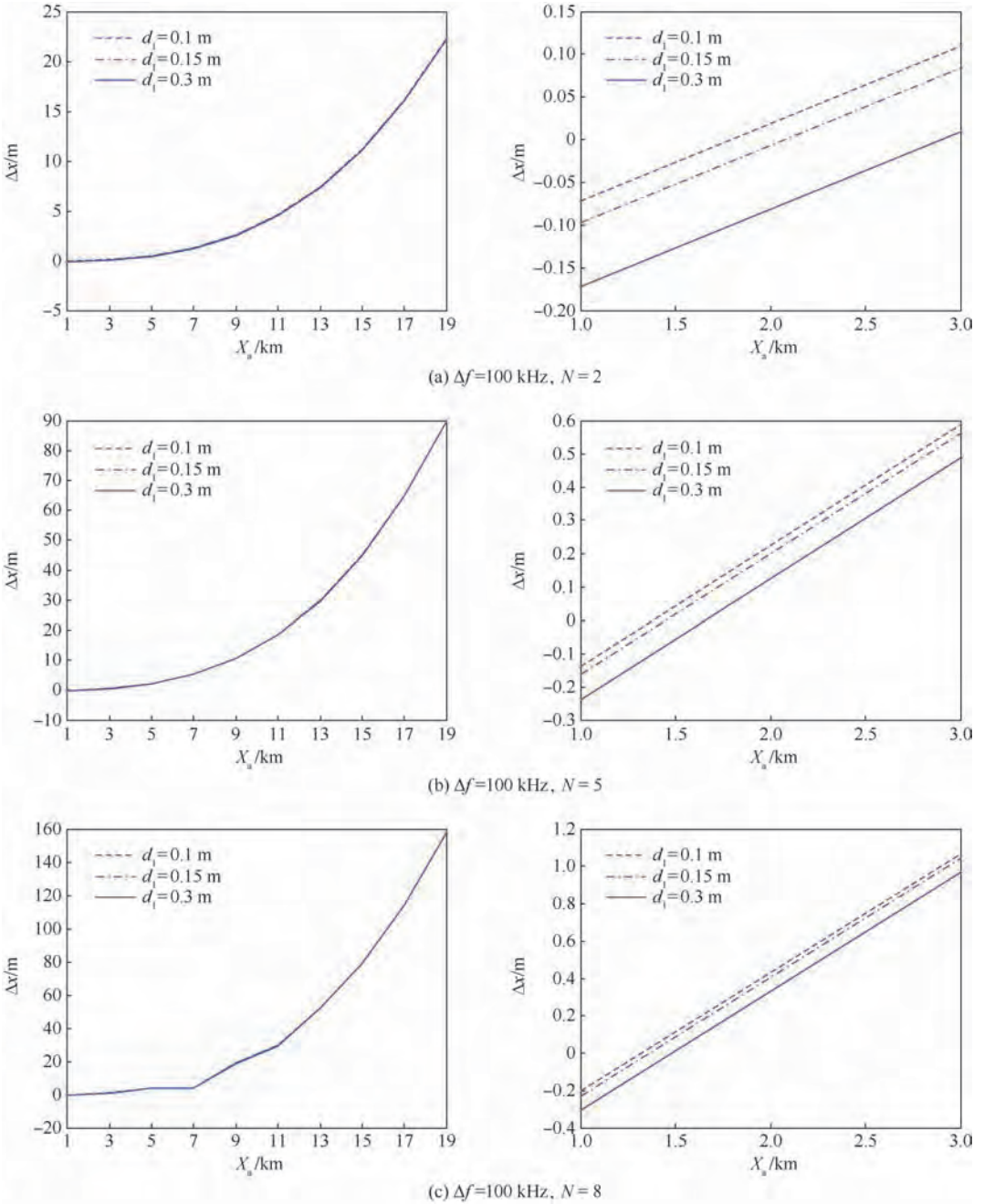


图6  $d_1$  对  $\Delta x$  影响示意图 ( $\Delta f=100$  kHz,  $N=2, 5, 8$ )

Fig. 6 Schematic of impact of  $d_1$  on  $\Delta x$  ( $\Delta f=100$  kHz,  $N=2, 5, 8$ )

目标欺骗效果好。

### 3.2 干涉仪天线1距离FDA阵元初始点的z轴距离的影响

取FDA初始频率 $f_0$ 为1 GHz,阵元间距 $d$ 为0.15 m,频率增量 $\Delta f$ 为10 kHz,阵元数 $N$ 为5,时间 $t$ 为0,干涉仪天线间距 $d_1=0.15$  m,干涉仪接收机1距离FDA阵元初始点的 $y$ 轴距离 $Y_a$ 为0,变换 $Z_a$ 的值,求取 $\Delta x$ ,仿真结果如图7所示。由 $\Delta x=0$ 得到满足角度欺骗的最小 $X_a$ 值,如表2所示。

综合比较图7和表2可以得出,在一定范围内, $Z_a$ 越小,越有利于实现FDA对干涉仪的角度

的欺骗,且在距离增加时,越容易实现角度欺骗,即对远场目标欺骗效果好。

### 3.3 FDA阵元间距的影响

取FDA初始频率 $f_0$ 为1 GHz,频率增量 $\Delta f$ 为10 kHz,阵元数 $N$ 为5,时间 $t$ 为0,干涉仪天线间距 $d_1$ 为0.15 m,干涉仪接收机1距离FDA阵元初始点的 $y$ 轴距离 $Y_a$ 为0, $z$ 轴距离 $Z_a$ 为4 km。变换 $d$ 的值,求取 $\Delta x$ ,仿真结果如图8所示。由 $\Delta x=0$ 得到满足角度欺骗的最小 $X_a$ 值,如表3所示。

综合比较图8和表3可以得出,在一定范围内,FDA阵元间距越小,越有利于实现FDA对干

表 1 不同频率增量  $\Delta f$ 、阵元数  $N$  与干涉仪天线间距  $d_1$  下的  $X_a$  临界值

Table 1 Critical value of  $X_a$  with different frequency offset  $\Delta f$ , array element numbers  $N$ , and interferometer antenna distances  $d_1$

$N$	$d_1/m$	$X_a$ 临界值/km		
		$\Delta f = 1 \text{ kHz}$	$\Delta f = 10 \text{ kHz}$	$\Delta f = 100 \text{ kHz}$
2	0.1	15.539	6.647	2.000
	0.15	16.554	7.151	2.269
	0.3	19.034	8.369	2.929
5	0.1	13.715	5.731	1.476 8
	0.15	14.052	5.901	1.609 5
	0.3	14.978	6.366 5	1.851 2
8	0.1	13.414	5.572 5	1.449 7
	0.15	13.617 5	5.678 5	1.499 5
	0.3	14.191 5	5.970 6	1.593 4

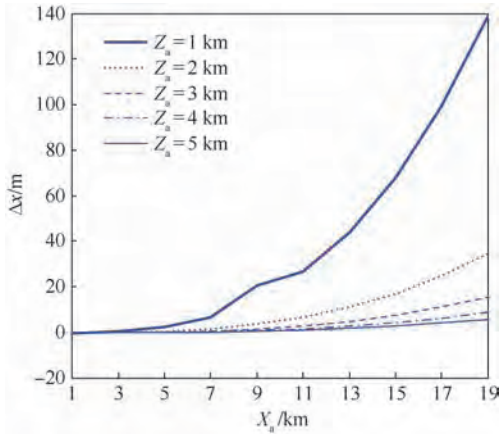


图 7  $Z_a$  对  $\Delta x$  影响示意图 ( $\Delta f = 10 \text{ kHz}, N = 5$ )

Fig. 7 Schematic of impact of  $Z_a$  on  $\Delta x$  ( $\Delta f = 10 \text{ kHz}, N = 5$ )

表 2 不同  $z$  轴距离  $Z_a$  下的  $X_a$  临界值

Table 2 Critical value of  $X_a$  with different  $z$ -axis distances  $Z_a$  km

$Z_a$	1	2	3	4	5
$X_a$	2.5307	3.896	4.893 5	5.901	6.702

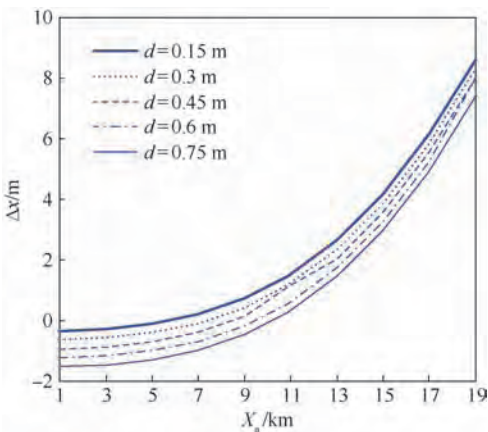


图 8  $d$  对  $\Delta x$  影响示意图 ( $\Delta f = 10 \text{ kHz}, N = 5$ )

Fig. 8 Schematic of impact of  $d$  on  $\Delta x$  ( $\Delta f = 10 \text{ kHz}, N = 5$ )

表 3 不同 FDA 阵元间距  $d$  下的  $X_a$  临界值

Table 3 Critical value of  $X_a$  with different FDA array element intervals  $d$

$d/m$	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75
$X_a/km$	5.901	7.495	8.624 4	9.857 6	10.302 7

涉仪的角度欺骗,且在距离增加时,越容易实现角度欺骗,即对远场目标欺骗效果好。

### 3.4 FDA 阵元初始频率的影响

取 FDA 阵元间距  $d$  为 0.15 m,频率增量  $\Delta f = 10 \text{ kHz}$ ,阵元数  $N$  为 5,时间  $t$  为 0,干涉仪天线间距  $d_1 = 0.15 \text{ m}$ ,干涉仪接收机 1 距离 FDA 阵元初始点的  $y$  轴距离  $Y_a$  为 0, $z$  轴距离  $Z_a$  为 4 km。变换  $f_0$  的值,求取  $\Delta x$ ,仿真结果如图 9 所示。由  $\Delta x = 0$  得到满足角度欺骗的最小  $X_a$  值,如表 4 所示。

综合比较图 9 和表 4 可以得出,在一定范围内,FDA 初始频率  $f_0$  越小,越有利于实现 FDA 对干涉仪的角度欺骗,且在距离增加时,越容易实现角度欺骗,即对远场目标欺骗效果好。

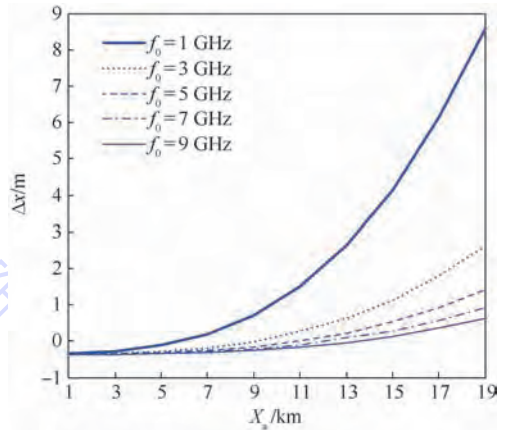


图 9  $f_0$  对  $\Delta x$  影响示意图 ( $\Delta f = 10 \text{ kHz}, N = 5$ )

Fig. 9 Schematic of impact of  $f_0$  on  $\Delta x$  ( $\Delta f = 10 \text{ kHz}, N = 5$ )

表 4 不同 FDA 初始频率  $f_0$  下的  $X_a$  临界值

Table 4 Critical value of  $X_a$  with different FDA initial frequency  $f_0$

$f_0/\text{GHz}$	1	3	5	7	9
$X_a/km$	5.901	9.102	10.980	12.385	13.515

## 4 结 论

针对干涉仪的角度欺骗问题,提出了基于 FDA 对干涉仪的角度欺骗方法。

1) 提出了研究 FDA 波束相位分布的 2 种模型,分别为模型建立法和欧拉公式法,比较论证了 2 种方法求解相位的特点。

2) 通过 2 种模型建立方法,分别论证了对干

涉仪干扰的可行性。通过数学推导,得到了满足对干涉仪实现角度欺骗的临界情况。考虑实际情况及误差分析,确定欧拉公式法建立的模型更符合实际。

3) 利用欧拉公式法建立的模型进行仿真,考虑多方面因素对角度欺骗效果的影响,得出初始频率越小,频率增量越大,阵元数越多,FDA阵元间距越小,干涉仪天线间距越小,越有利于实现FDA对干涉仪的角度欺骗,且对远场目标欺骗效果好。

综上,FDA可以实现对干涉仪的角度欺骗,且对远场目标欺骗具有较好的效果。

### 参考文献 (References)

- [1] ANTONIK P, WICKS M C, GRIFFITHS H D, et al. Multi-mission multi-mode waveform diversity [C] // Proceedings of the IEEE Conference on Radar. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006: 580-582.
- [2] ANTONIK P, WICKS M C, GRIFFITHS H D, et al. Range dependent beamforming [C] // Proceedings of the International Waveform Diversity and Design Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006: 22-27.
- [3] ANTONIK P, WICKS M C, GRIFFITHS H D, et al. Range-dependent beamforming using element level waveform diversity [C] // Proceedings of the International Waveform Diversity and Design Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006: 140-144.
- [4] ANTONIK P, WICKS M C, GRIFFITHS H D, et al. Frequency diverse array radars [C] // Proceedings of the IEEE Conference on Radar. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006: 215-217.
- [5] ANTONIK P. An investigation of a frequency diverse array [D]. London: University College London, 2009: 3-4.
- [6] WICKS M C, ANTONIK P. Frequency diverse array with independent modulation of frequency, amplitude, and phase: US7319427 [P]. 2008-01-15.
- [7] WICKS M C, ANTONIK P. Method and apparatus for a frequency diverse array: US 7511665 B2 [P]. 2009-03-31.
- [8] ABDALLA A, ABDALLA H, TANG B, et al. Overview of frequency diverse array in radar ECCM applications [C] // 2017 International Conference on Communication, Control, Computing and Electronics Engineering. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017: 1-9.
- [9] CAGRI C, SIMSEK D. Multipath characteristics of frequency diverse arrays over a ground plane [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(7): 3567-3574.
- [10] BAIZENT P. Forward-looking radar clutter suppression using frequency diverse arrays [D]. Dayton: Air Force Institute of Technology, 2006.
- [11] WU J X, WANG T, ZHANG L F, et al. Range-dependent clutter suppression for airborne sidelooking radar using MIMO technique [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 2012, 48, (4): 3647-3654.
- [12] XU J W, LIAO G S, ZHU S Q, et al. Deceptive jamming suppression with frequency diverse MIMO radar [J]. Signal Processing, 2015, 113(8): 9-17.
- [13] WANG W Q. Frequency diverse array antenna: New opportunities [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2015, 57(2): 145-152.
- [14] WANG W Q. Overview of frequency diverse array in radar and navigation applications [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2016, 10(6): 1001-1012.
- [15] 王文钦, 邵怀宗, 陈慧. 频控阵雷达: 概念、原理与应用 [J]. 电子与信息学报, 2016, 38(4): 1000-1011.
- WANG W Q, SHAO H Z, CHEN H. Frequency diverse array radar: Concept, principle and application [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(4): 1000-1011 (in Chinese).
- [16] WANG W Q, CAI J Y. A technique for jamming bi-and multi-static SAR systems [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(1): 80-82.
- [17] 张福丹. 频率分集阵列雷达波束控制及应用研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- ZHANG F D. Frequency diverse array radar beam control and application research [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012 (in Chinese).
- [18] 胡祺勇, 谢军伟, 张昭建. 频率分集阵列在角度欺骗中的应用分析 [J]. 空军工程大学学报, 2016, 10(6): 41-47.
- HU Q Y, XIE J W, ZHANG Z J. Application and analysis of frequency diverse array used in angle deception [J]. Journal of Force Engineering University, 2016, 10(6): 41-47 (in Chinese).
- [19] 刘伟, 付永庆, 许达. 二维相位干涉仪在相干干扰下的测向误差模型 [J]. 中南大学学报, 2015, 46(4): 1274-1280.
- LIU W, FU Y Q, XU D. Direction-finding error model of two-dimensional phase interferometer under coherent interference [J]. Journal of Central South University, 2015, 46(4): 1274-1280 (in Chinese).
- [20] 杨军佳, 毕大平, 张国利. 相干干扰下无源测向系统方位测量误差模型 [J]. 探测与控制学报, 2012, 34(4): 75-79.
- YANG J J, BI D P, ZHANG G L. Error model of passive direction finding system under coherent interference [J]. Journal of Detection & Control, 2012, 34(4): 75-79 (in Chinese).

### 作者简介:

葛佳昂 男, 博士研究生。主要研究方向: 雷达信号处理。

谢军伟 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 隐身与反隐身、雷达电子战。

# Angle deception effect of frequency diversity array on interferometer

GE Jiaang<sup>1</sup>, XIE Junwei<sup>1,\*</sup>, ZHANG Haowei<sup>1</sup>, FENG Xiaoyu<sup>1</sup>, ZHANG Jing<sup>2</sup>

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. College of Highway and Railway Engineering, Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an 710018, China)

**Abstract:** A method of angle deception jamming for interferometer based on frequency diversity array (FDA) is proposed to solve the problem of direction-finding concealment of interferometer. The interferometer determines the angle of arrival by obtaining the phase difference of the signals received by each antenna, and the phase difference does not satisfy the solution relation due to the frequency offset of each element of FDA, so that the angle deception is achieved. This paper proposes two algorithms (FDA model establishment and Euler formula) to establish the FDA signal phase distribution model. It is proved that FDA signal has an angle deception effect on interferometer. Based on the principle of interferometer, the influence of interference distance, interval of array element, emission frequency, frequency offset, etc. is analyzed. The theoretical analysis and simulation results show that FDA has a good deception effect on the interferometer in far field.

**Keywords:** frequency diversity array (FDA); angle deception; interferometer; Euler formula; phase difference

北京航空航天大学学报

**Received:** 2018-04-09; **Accepted:** 2018-08-24; **Published online:** 2018-09-10 14:25

**URL:** [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180906.1028.003.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180906.1028.003.html)

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (61503408)

\* **Corresponding author.** E-mail: xjw\_xjw\_123@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0194

# 二维编织 C/SiC 复合材料板疲劳损伤分析



陈天雄, 张铮\*, 王奇志, 林彗星

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 为探索复合材料损伤的基本规律, 首先, 基于损伤力学, 结合 Tsai-Hill 强度理论, 提出了表征二维编织 C/SiC 复合材料损伤各向异性的损伤演化方程; 然后, 在商业有限元软件 ANSYS 环境中进行了二次开发, 形成了考虑材料刚度随损伤折减的损伤模拟程序; 其次, 对二维编织 C/SiC 复合材料板模型进行了损伤模拟分析, 结果表明材料损伤过程中应力与损伤度对单元破坏起共同作用; 最后, 对损伤演化方程的形式提出了讨论与改进, 并通过模拟计算揭示了复合材料在损伤驱动力及材料特性作用下损伤呈现各向异性演化的特征, 说明材料各向异性损伤是其材料特性及受载形式产生的必然结果。

**关键词:** 复合材料; 二维编织; 损伤; 各向异性; 有限元

**中图分类号:** O346.5; V414.8; V414.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5965(2019)01-0192-08

近年来, C/SiC 陶瓷基复合材料逐渐发展, 越来越多地被应用于航天器、运载火箭等高速飞行器中<sup>[1-2]</sup>。C/SiC 陶瓷基复合材料使用碳纤维作为增韧补强材料, 克服了其陶瓷基体脆性大的缺点, 拥有较高的强度和硬度、良好的抗高温氧化和抗腐蚀特性, 耐热冲击性高, 因此主要作为耐烧蚀和耐高温结构材料<sup>[3]</sup>, 应用前景广阔。国外从 20 世纪末开始便对陶瓷基复合材料开展了大量实验与理论研究<sup>[4-7]</sup>, 而国内的相关研究开展稍晚, 主要为不同应力比以及高温、水氧等各种环境下的疲劳试验研究<sup>[8-10]</sup>, 但相关理论研究较少, 工程适用性不高。

本文基于损伤力学理论, 提出了 2 种形式的损伤演化方程, 考虑了应力和损伤的耦合作用, 结合商用有限元软件对该材料的板模型进行了损伤模拟和定性分析, 方法适用性良好, 对工程设计及疲劳寿命预估具有理论指导意义。

## 1 损伤演化方程

材料内部所存在的微小缺陷, 例如微裂纹、错位、空洞等, 导致材料宏观力学性能的劣化, 称之为损伤。损伤力学诞生至今, 已得到了长足发展, 张行等<sup>[11-12]</sup>将损伤力学应用于金属构件的疲劳寿命预估分析, 形成了比较完备的疲劳损伤力学理论体系。宏观力学损伤研究的基本思路是: 定义一个与损伤程度相关的不可逆的连续场变量, 即损伤场<sup>[13]</sup>, 通过力学方法构建含损伤的材料本构关系, 建立相应的损伤演化方程, 并使用材料标准试样疲劳试验得到的疲劳寿命 (*S-N*) 曲线拟合得到相应参数, 进而计算材料损伤及预估结构疲劳寿命。

损伤度通常用材料弹性模量的折减程度表示:

$$D = \frac{E - E_D}{E} \quad (1)$$

收稿日期: 2018-04-09; 录用日期: 2018-05-04; 网络出版时间: 2018-05-19 19:48

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180516.1100.001.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180516.1100.001.html)

\* 通信作者. E-mail: jordanzzhang@buaa.edu.cn

**引用格式:** 陈天雄, 张铮, 王奇志, 等. 二维编织 C/SiC 复合材料板疲劳损伤分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 192-199. CHEN T X, ZHANG Z, WANG Q Z, et al. Fatigue damage analysis of 2D braided C/SiC composite plate [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 192-199 (in Chinese).

式中:  $D$  为材料的损伤度;  $E$  和  $E_0$  分别为材料在损伤发生之前和之后的弹性模量。

对于各向同性材料,一般根据等温过程下的热力学原理,定义损伤驱动力  $Y$  为应变能密度  $W$  对损伤度偏导的负值,将受脉动循环载荷材料的损伤演化方程<sup>[14]</sup>写为

$$\frac{dD}{dN} = a \frac{Y_{\max}^{m/2}}{(1-D)^n} \quad (2)$$

式中:  $N$  为加载周次;  $Y_{\max}$  为脉动载荷下最大应力所对应的最大损伤驱动力;  $a$ 、 $m$  和  $n$  为材料损伤参量,可根据材料的疲劳寿命曲线拟合得到。

若定义等效应力  $\sigma_e$  为

$$\sigma_e = [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - 2\mu(\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x) + 2(1+\mu)(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]^{1/2} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ 、 $\tau_{yz}$ 、 $\tau_{zx}$ 、 $\tau_{xy}$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的正应力和切应力;  $\mu$  为材料泊松比。则损伤驱动力  $Y$  可进一步表示为

$$Y = \frac{W}{1-D} = \frac{\sigma_e^2}{2E(1-D)^2} \quad (4)$$

由于复合材料内部结构拥有纤维、基体、界面等不同结构组分,其损伤形式与普通金属材料不同。复合材料结构常见的损伤形式有基体开裂、基体纤维界面脱胶、纤维断裂和层间分层等<sup>[15]</sup>。这些损伤的萌生和演化对材料宏观力学性能和使用寿命起着决定性的作用,同时,由于复合材料本身的复杂性,其损伤研究尚未形成完善的体系。

二维平纹编织 C/SiC 复合材料的材料属性为正交各向异性,其经向和纬向纤维损伤的相互影响很小,某一方向纤维发生部分甚至完全失效并不会影响另一方向纤维的承载能力。因此针对二维平纹编织 C/SiC 复合材料板结构,结合 Tsai-Hill 准则,参考张行的《断裂与损伤力学》给出损伤演化方程的形式<sup>[16]</sup>,引入面内 3 个方向相互独立的各向异性损伤演化方程:

$$\frac{dD_i}{dN} = (A\eta + B) \frac{(\sigma_{eq} - \sigma_{th})^m}{(1-D_i)^n} \quad (5)$$

式中:  $D_i$  为面内 3 个方向的损伤度,下标  $i$  为  $x$ 、 $y$  或  $xy$ ;  $A$ 、 $B$ 、 $m$  和  $n$  为材料损伤参量;  $\eta$  为面内两方向应力之比;  $\sigma_{th}$  为应力门槛值;  $\sigma_{eq}$  为使用 Tsai-Hill 准则形式的等效应力,其计算式为

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{S_x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{S_y}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{S_{xy}}\right)^2 + F_{12}\sigma_x\sigma_y} \quad (6)$$

式中:  $S_x$ 、 $S_y$  分别为材料  $x$ 、 $y$  方向拉伸强度;  $S_{xy}$  为面内剪切强度;  $F_{12}$  为耦合参数。

## 2 二次开发程序及损伤仿真计算结果分析

使用大型通用有限元分析软件 ANSYS 的参数化设计语言 APDL,本文针对损伤分析问题进行了二次开发,对模型求解后,提取各个单元的应力代入损伤演化方程,计算并累加其损伤度,判断是否满足破坏条件(即损伤度达到 1),而后依据其损伤度对各个单元进行刚度折减,并重新加载进行求解。基本流程如图 1 所示。

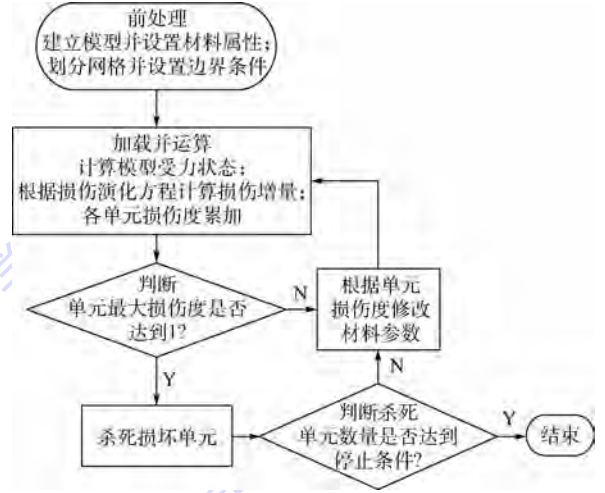


图 1 计算程序流程图

Fig. 1 Flowchart of calculation program

下面使用该二次开发程序对二维编织 C/SiC 复合材料板结构等模型进行损伤仿真分析。

### 2.1 均布循环载荷下正文各向异性薄板损伤分析

本文研究的正交各向异性薄板结构的长、宽、厚的比值为 253 : 173 : 1。假设材料制作工艺理想,基体填充密实,所用材料参数如表 1 所示<sup>[17]</sup>。

由于对称性,在 ANSYS 中建立板的四分之一模型,采用 solid185 单元,垂直于板面方向分为 5 层,共使用 31 680 个单元。板面周边 20 倍厚度范围内施加垂直于板面的位移约束(如图 2 所示),中心区域施加垂直于板面的法向均布载荷,对称边

表 1 正交各向异性薄板模型材料参数<sup>[17]</sup>

Table 1 Material parameters of orthotropic thin plate model<sup>[17]</sup>

参数	数值
弹性模量 $E_1$ 、 $E_2$ /GPa	187.06
弹性模量 $E_3$ /GPa	16.49
泊松比 $\mu_{12}$	0.175
泊松比 $\mu_{13}$ 、 $\mu_{23}$	0.492
剪切模量 $G_{12}$ /GPa	57.66
剪切模量 $G_{13}$ 、 $G_{23}$ /GPa	27.51

界施加对称约束。图中垂直于板面为  $z$  轴方向,沿板宽度方向为  $x$  轴方向,沿板长度方向(即竖直方向)为  $y$  轴方向。

板正面所受  $x$  方向正应力分布结果如图 3(a)所示, $y$  方向正应力如图 3(b)所示。可见,板模型所受  $x$ 、 $y$  方向正应力的最大值分别发生在板受载区域的长边中心和短边中心,板上下表面应力基本相等。其中  $x$  方向正应力的最大值约为  $y$  方向正应力最大值的 1.4 倍。

由于 C/SiC 复合材料的基体属于脆性材料,导致该材料在初次受载后会产生较大的损伤<sup>[18]</sup>(本文中称之为初始损伤),因此损伤度初始值不为零,其大小由初次加载产生的应力决定。另外

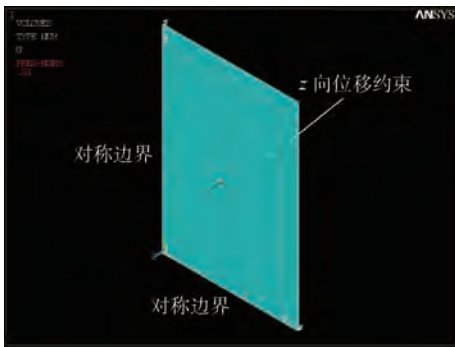
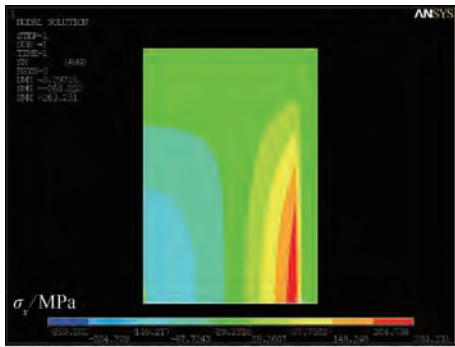
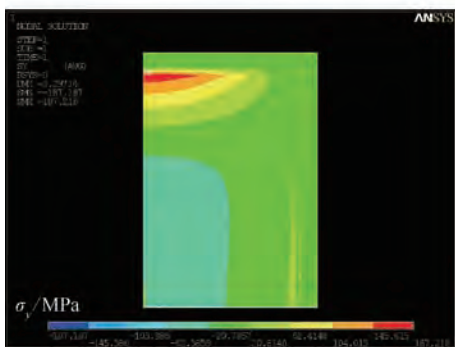


图 2 模型及约束条件

Fig. 2 Model and constraint condition



(a)  $x$  方向正应力



(b)  $y$  方向正应力

图 3 应力分布云图

Fig. 3 Stress distribution contour

使用各向异性损伤演化方程式(5),结合该材料的  $S-N$  曲线<sup>[19]</sup>进行拟合,得到损伤演化方程如下:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dD_x}{dN} &= (4.15 \times 10^{-11} \eta + 1.1725 \times 10^{-10}) \cdot \frac{(\sigma_{eq} - 0.02)^{29.28313}}{(1 - D_x)^{39.58}} \\ \frac{dD_y}{dN} &= (1.587 \times 10^{-10} \eta + 1.9 \times 10^{-14}) \cdot \frac{(\sigma_{eq} - 0.02)^{29.28313}}{(1 - D_y)^{39.58}} \\ \frac{dD_{xy}}{dN} &= (3.27 \times 10^{-26} \eta + 7.78 \times 10^{-26}) \cdot \frac{(\sigma_{eq} - 0.02)^{29.28313}}{(1 - D_{xy})^{45.3698}} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

将式(7)代入二次开发程序进行损伤累计,发现  $x$  方向损伤演化最快, $y$  方向和  $xy$  剪切损伤度基本不变。损坏首先发生于板背面(不直接受载面)长边中心位置,即  $x$  方向应力最大值发生位置,而后经过较长时间板正面才发生损坏,且后续损坏扩展速度急剧提高,并由初始位置沿板长方向扩展,总体而言正面裂纹扩展速度要快于背面,损伤演化过程如图 4 所示。

分别提取板正反面  $x$  方向最大损伤度  $D_x$  进行对比,发现加载之初,板正反面损伤演化进程基本一致,但载荷循环周次达到约  $75.7 \times 10^4$  后,损伤进程发生明显分离,板背面最大损伤度急剧上升,如图 5 所示。

进一步对板损坏单元的损伤度演化过程进行考察,板背面最先损坏的 3 个单元及正面最先

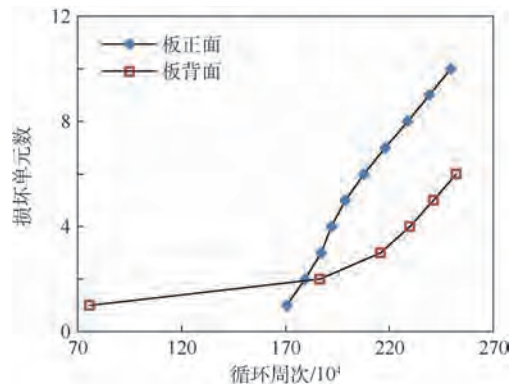


图 4 正交各向异性板正反表面损坏单元数

Fig. 4 Number of damaged units on front-side and back-side surface of orthotropic plate

损坏的几个单元的损伤度演化分别如图 6 所示。将破坏单元按正反面分开且按破坏顺序依次标记,图中标注“\* 面单元-[j]”中的“j”代表正面或反面损坏单元的损坏次序号。

另外,同样对上述单元的等效应力发展进行考察,如图 7 所示,发现在首个单元发生损坏后,临近单元损伤度增长遽然减缓,分析其原因,应是板背面首个单元发生损坏导致板局部刚度改变,损伤局部的应力重新分布,其等效应力下降,进而

使得板正面损伤度发展减缓。

综合对比图 6 和图 7 发现,背面第 1 个单元破坏前,亦即全板第 1 个单元破坏前,随着材料损伤累计,全板应力水平逐步下降,损伤累计急剧增长;背面第 1 个单元破坏后,临近区域的单元损伤演化呈现平台状,损伤累计显著减缓;同时,板正反面的临近单元等效应力显著减小。

但由于背面第 1 个单元破坏后,相应的板正面单元,与其他临近单元相比,损伤最大(参看图 7),其应力虽有所减小,但其损伤演化仍远快于包括背面相应单元在内的其它临近单元,因此成为全板第 2 个发生后继破坏的单元。

此后,特别突出的现象是,正面单元的破坏导致其同面临近单元所受等效应力水平出现跟随性阶跃增长,参看图 7(b),急剧加速了同面单元的后继破坏。这一现象往复相随,造成正面该局部出现连续性单元破坏,板整体进入加速损伤的非稳定态。

从另一角度看,单元最终的破坏也是损伤状况和应力共同作用的结果。

在正面第 1 个单元发生破坏前,正面第 2 个发生破坏的单元与背面第 2 个发生破坏的单元的

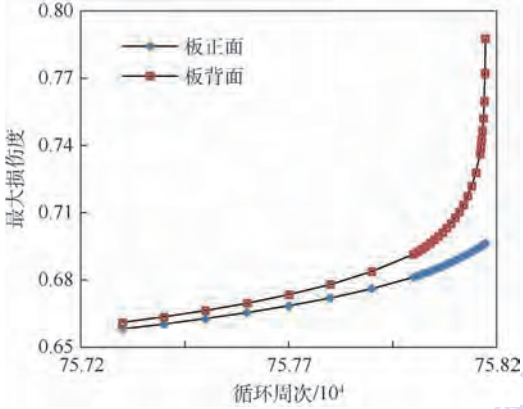


图 5 正交各向异性板正反面表面损伤进程分离

Fig.5 Front-side and back-side surface damage evolution separation of orthotropic plate

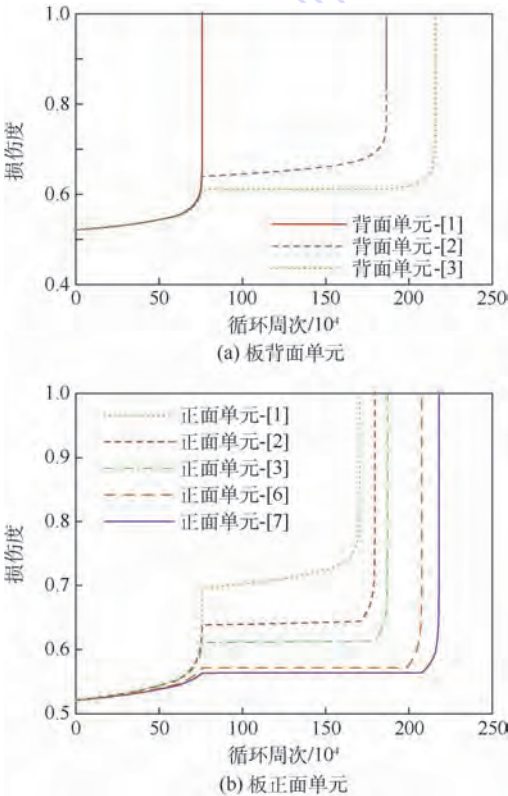


图 6 板背面单元和板正面单元损伤度

Fig.6 Damage degree of plate back-side units and plate front-side units

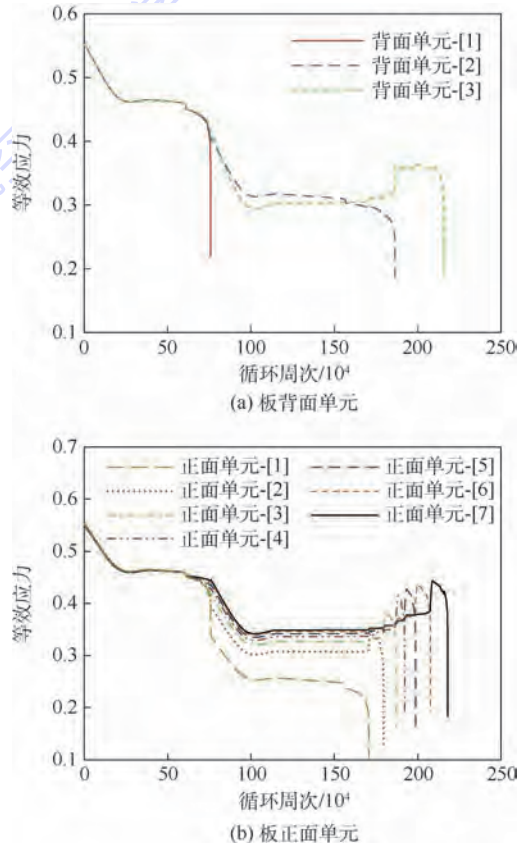


图 7 板背面单元和板正面单元等效应力

Fig.7 Equivalent stress of plate back-side units and plate front-side units

损伤度基本一致(参看图8),而背面第2个破坏单元的等效应力略大,因此其损伤度发展较快;但是,当正面第1个单元发生破坏时,导致正面第2个发生破坏的单元其等效应力跳跃增大(参看图9),因此,最后阶段正面第2个单元的损伤度发展超过了背面第2个破坏的单元,并首先发生了损坏。对比图8和图9可见,等效应力保持稳定时,损伤演化较为缓慢;一旦发生单元破坏,整体应力重新分布,造成应力水平的阶跃,同时造成单元进入加速损伤的不稳定状态。

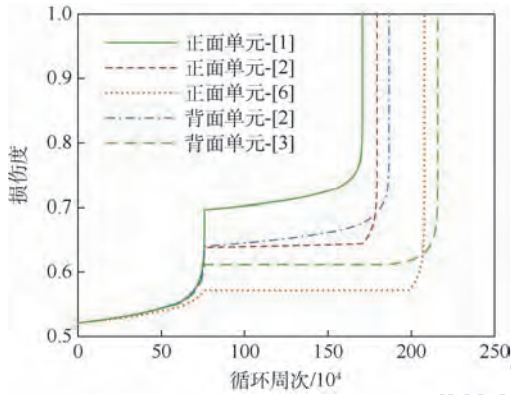


图8 板正面单元和背面单元的损伤度对比

Fig. 8 Comparison of damage degree between plate units of front-side and back-side

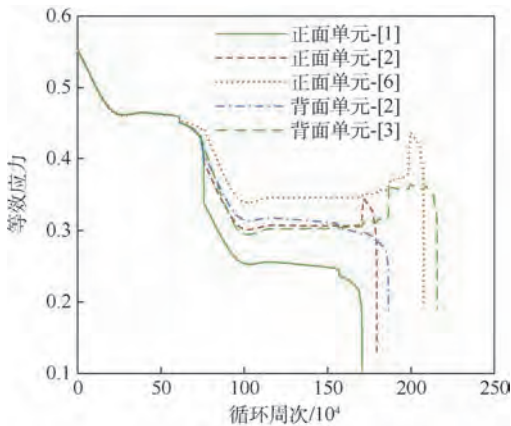


图9 板正面单元和背面单元的等效应力对比

Fig. 9 Comparison of equivalent stress between plate units of front-side and back-side

## 2.2 考虑基体沉积工艺情况的正交各向异性薄板损伤分析

实际上,平纹编织 C/SiC 复合材料往往采用化学气相渗透法(CVI)进行制作<sup>[20]</sup>,由于工艺原因,其成品往往上下表面基体沉积较为密实,材料性能相对较强,中间部分基体却比较疏松,材料性

能较弱。一般而言,材料上下表面层与中间层的厚度之比约为1:4。材料参数如表2所示。

在 ANSYS 中建立同样尺寸的具有上述中间层和表面层材料参数的三层板模型,并取四分之一模型施加同样的边界条件与载荷,其应力分布与单层材料情况十分接近, $x$ 、 $y$  方向正应力的最大值仍发生在板受载区域的长边中心或短边中心,正反面基本相等。

同样进行损伤模拟,发现  $x$  方向损伤度发展仍然最快,且损伤首先发生于板正面(受载面)受载区域长边中心,即  $x$  方向应力最大值发生位置。正面裂纹半长发展到一定长度后,板背面才开始开裂,且板中间层随后也开始迅速开裂,如图10所示。

本例中最初的损伤单元都发生在板正面;中间层由于材料性质很弱,当上下表面层单元发生破坏后,几乎失去承载能力,同时发生破坏。由于沉积工艺问题,材料的整体性产生很大不同,相比于均匀理想沉积的情况,本例中板的疲劳寿命有极大弱化,损伤演化过程也有很大不同,单元破坏数与加载周次呈现良好的线性关系,体现出材料脆性破坏的典型特征。

表2 正交各向异性薄板中间层和表面层材料参数

Table 2 Material parameters of middle layer and surface layer in anisotropic thin plate

参数	中间层	表面层
弹性模量 $E_1$ 、 $E_2$ /GPa	107.06	187.06
弹性模量 $E_3$ /GPa	9.43	16.49
泊松比 $\mu_{12}$	0.1	0.175
泊松比 $\mu_{13}$ 、 $\mu_{23}$	0.4845	0.492
剪切模量 $G_{12}$ /GPa	52.75	57.66
剪切模量 $G_{13}$ 、 $G_{23}$ /GPa	15.75	27.51

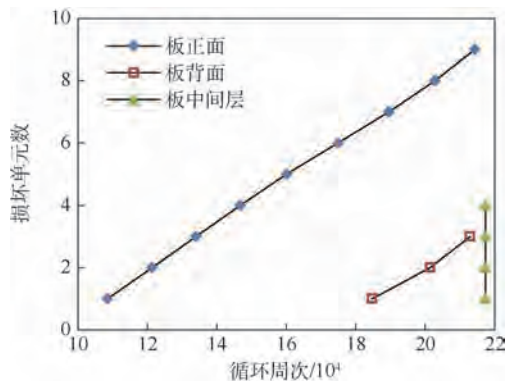


图10 正交各向异性三层板损坏单元数

Fig. 10 Number of damaged units of orthotropic three-layer plate model

### 3 损伤演化方程建立及损伤演化仿真

第 1 节中所述的等效应力变量是基于 Tsai-Hill 准则形式的无量纲量,从损伤演化方程中损伤驱动力具有的应变能性质考虑,其物理性质并不适当。另外,采用等效应力作为损伤驱动力主项,其对应的损伤度应为材料的综合损伤度,材料损伤的各向异性应表现为宏观裂纹的扩展,因此,将等效应力定义修改为如下形式:

$$\sigma'_{eq} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x^2}{S_x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y^2}{S_y}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}^2}{S_{xy}}\right)^2 + F_{12}\sigma_x^2\sigma_y^2} \quad (8)$$

将式(8)代入损伤驱动力方程,得

$$Y = \frac{1}{2E(1-D)^2}\sigma_{eq}^2 = \frac{1}{2E(1-D)^2} \left[ \left(\frac{\sigma_x^2}{S_x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y^2}{S_y}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}^2}{S_{xy}}\right)^2 + F_{12}\sigma_x^2\sigma_y^2 \right] \quad (9)$$

由此得到材料受脉动循环载荷的材料,其损伤演化方程形式仍如式(2)所示。

由材料 S-N 曲线对上述参数进行拟合,得到基于新的等效应力公式的等效损伤演化方程。

为验证上述损伤演化方程对于损伤各向异性演化描述的适用性,使用正方形板的四分之一模型,保证板 x 和 y 方向的受力状态对称,在不同的 x 和 y 方向强度条件下进行损伤模拟分析,损伤扩展云图结果如图 11 所示。

可以看到,在 x 和 y 方向受力对称的情况下, x 方向材料强度不变,当 y 方向材料强度较小时,在 y 方向应力最大处先发生单元损坏,且后续损坏沿 x 方向扩展,即由 y 方向应力主导损伤演化;当 y 方向材料强度增大时,除了发生上述损伤演化,在 x 方向应力最大处也会发生较为明显的损伤演化,并沿 y 方向后继扩展。

上述现象说明,式(9)所定义的损伤驱动力由于考虑到材料各向的强度不同,在常规损伤演化方程式(2)所描述的损伤演化中,较好地揭示由于材料各向异性,特别是材料强度各向不同,所造成的材料损伤演化的各向异性。进一步,损伤驱动力是损伤演化的主导因素,损伤驱动力的“各向异性”在很大程度上直接决定了宏观损伤演化的各向异性,本文提出的损伤驱动力较好地容纳和体现了损伤演化各向异性的内在动因,因此,损伤演化仿真结果也较为合理。

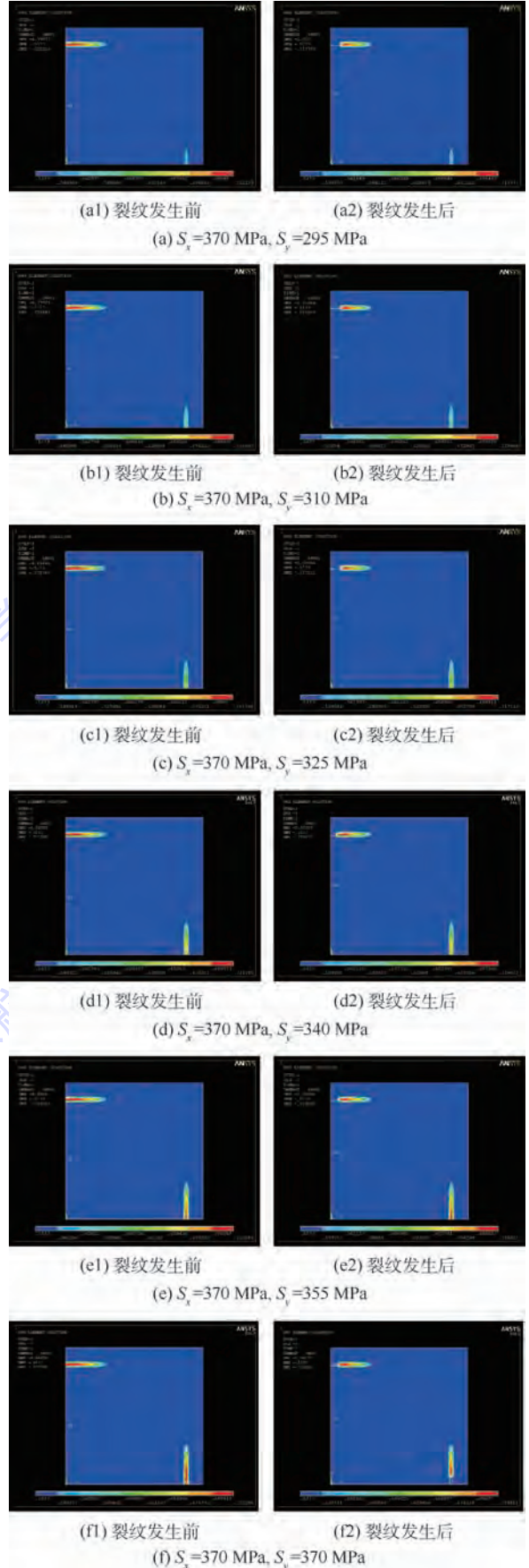


图 11 正方形板不同强度条件下损伤扩展云图  
Fig. 11 Damage extension contour of square plate under different strength conditions

## 4 结 论

1) 材料或结构的损伤,是由损伤驱动力主导的,同时受材料强度和应力状态影响。因此无论材料是各向同性还是各向异性,损伤一旦发生,损伤驱动力中的主要应力成分仍将对后继损伤演化产生决定性作用,所以损伤的发展必然是各向异性的。

2) 在复杂应力状态下,损伤演化的基本状况仍然如上所述。对于各向异性材料而言,材料的基本特征首先体现在材料模量的各向异性,同时,也反映在材料各方向强度的不同上。但就损伤演化而言,材料强度的不同对材料各向异性演化将起到更重要的作用。

3) 基于对正交各向异性复合材料的损伤分析的结果,提出了式(9)所定义的损伤驱动力,用以反映主要应力成分及材料强度对损伤演化的作用,从而揭示损伤演化在损伤驱动力的影响下所必然呈现的各向异性特征。

4) 受限于相关实验基础的欠缺,提出的如式(8)、式(9)和式(2)所构成的损伤演化描述体系尚有待通过实践进一步验证和改进。但本文基于损伤力学理论,根据材料标准试样疲劳  $S-N$  曲线确定损伤演化方程参数,进行了定性模拟分析,具有理论严谨性和一定的实验基础。通过本文损伤模拟的结果,说明损伤演化方程具有基本的理论合理性和与基本损伤演化认识的一致性。

### 参考文献 (References)

- [1] 张立同,成来飞. 连续纤维增韧陶瓷基复合材料可持续发展战略探讨[J]. 复合材料学报,2007,24(2):1-6.  
ZHANG L T, CHENG L F. Discussion on strategies of sustainable development of continuous fiber reinforced ceramic matrix composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(2):1-6 (in Chinese).
- [2] 秦淑颖,闫联生,崔红,等.  $C_f/SiC$  陶瓷基复合材料在航天领域的研究与应用[J]. 材料导报,2007,21(5A):239-240.  
QIN S Y, YAN L S, CUI H, et al. Application and development of  $C_f/SiC$  ceramic matrix composites in aerospace [J]. Materials Review, 2007, 21(5A):239-240 (in Chinese).
- [3] 徐永东,成来飞,张立同,等. 连续纤维增韧碳化硅陶瓷基复合材料研究[J]. 硅酸盐学报,2002,30(2):184-188.  
XU Y D, CHENG L F, ZHANG L T, et al. Research on continuous fiber reinforced silicon carbide composites [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2002, 30(2):184-188 (in Chinese).
- [4] LADEVÉZE P. A damage computational method for composite structures [J]. Computers & Structures, 1992, 44(1-2):79-87.
- [5] DALMAZ A, REYNAUD P, ROUBY D, et al. Mechanical behavior and damage development during cyclic fatigue at high-temperature of a 2.5D carbon SiC composite [J]. Composites Science and Technology, 1998, 58(5):693-699.
- [6] ZHU S, MIZUNO M. Monotonic tension fatigue and creep behavior of SiC-fiber-reinforced SiC-matrix composites: A review [J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(6):833-851.
- [7] LAMON J. A micromechanics-based approach to the mechanical behavior of brittle-matrix composites [J]. Composites Science and Technology, 2001, 61(15):2259-2272.
- [8] 程起有,童小燕,郑翔,等. 平纹编织 C/SiC 复合材料高温疲劳特性的试验研究[J]. 机械强度,2010,32(5):819-823.  
CHENG Q Y, TONG X Y, ZHENG X, et al. Experimental investigation on the fatigue characteristics about high temperature of plain-woven C/SiC composite [J]. Journal of Mechanical Strength, 2010, 32(5):819-823 (in Chinese).
- [9] 杜双明,乔生儒. 3D-C/SiC 复合材料的高温疲劳性能[J]. 宇航材料工艺,2008,38(5):71-74.  
DU S M, QIAO S R. Fatigue performance of 3D-C/SiC composite at high temperature [J]. Aerospace Materials & Technology, 2008, 38(5):71-74 (in Chinese).
- [10] 刘持栋,成来飞,梅辉,等. 2D C/SiC 复合材料在 1300℃ 水氧环境下的疲劳行为研究 [J]. 无机材料学报,2008,23(4):729-733.  
LIU C D, CHENG L F, MEI H, et al. Fatigue behavior of 2D C/SiC composites in water-vapor containing environment at 1300℃ [J]. Journal of Inorganic Materials, 2008, 23(4):729-733 (in Chinese).
- [11] 张行,赵军. 金属构件应用疲劳损伤力学 [M]. 北京:国防工业出版社,1998:318-360.  
ZHANG X, ZHAO J. Applied fatigue damage mechanics of metallic structural members [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998:318-360 (in Chinese).
- [12] 孟宪红,白碧宇,张行. 谱载荷下三维构建疲劳分析的损伤力学方法 [J]. 北京:北京航空航天大学学报,2011,37(8):912-917.  
MENG X H, BAI Z Y, ZHANG X. Damage mechanics method to predict the fatigue life of 3-D structural members under spectrumload [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(8):912-917 (in Chinese).
- [13] 刘新东,郝际平. 连续介质损伤力学 [M]. 北京:国防工业出版社,2011:126.  
LIU X D, HAO J P. Continuum damage mechanics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011:126 (in Chinese).
- [14] 王依兵. 金属构件高周疲劳损伤的多尺度模型 [D]. 北京:北京航空航天大学,2013:21.  
WANG Y B. A multi-scale model of high-cycle fatigue damage on metal structures [D]. Beijing: Beihang University, 2013:21 (in Chinese).
- [15] 习年生,于志成,陶春虎. 纤维增强复合材料的损伤特征及失效分析方法 [J]. 航空材料学报,2000,20(2):55-63.  
XI N S, YU Z C, TAO C H. Damage characterization and failure analysis in fiber reinforced composites [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2000, 20(2):55-63 (in Chinese).
- [16] 张行. 断裂与损伤力学 [M]. 北京:北京航空航天大学出版

- 社,2009;541-543.
- ZHANG X. Fracture and damage mechanics [M]. Beijing: Beihang University Press,2009;541-543 (in Chinese).
- [17] 曾翔龙. 二维机织 C/SiC 复合材料疲劳损伤模型研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2017:23.
- ZENG X L. A research for the model of fatigue damage on 2D woven C/SiC composite [D]. Beijing: Beihang University, 2017;23 (in Chinese).
- [18] 张立同. 纤维增韧碳化硅陶瓷复合材料——模拟、表征与设计[M]. 北京:化学工业出版社,2009;83-85.
- ZHANG L T. Fiber-reinforced silicon carbide ceramic composites—Modeling, characterization & design [M]. Beijing: Chemical Industry Press,2009;83-85 (in Chinese).
- [19] 孙龙生,姚磊江,吕国志,等. 二维平纹编织 CVI 工艺 C/SiC 复合材料的疲劳行为[J]. 西北工业大学学报,2007,25(4):478-481.
- SUN L S, YAO L J, LÜ G Z, et al. Fatigue behavior of 2D plain-woven carbon/silicon carbide composites using chemical vapor infiltration (CVI) technique [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2007, 25 (4) :478-481 (in Chinese).
- [20] 郭春园,闫联生,孟祥利,等. C/C-SiC 复合材料制备技术及应用现状[J]. 航天制造技术,2017(1):2-6.
- GUO C Y, YAN L S, MENG X L, et al. Fabrication and application of C/C-SiC composites [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2017(1) :2-6 (in Chinese).

#### 作者简介:

陈天雄 男,硕士研究生。主要研究方向:损伤力学、复合材料力学。

张铮 男,博士,副教授,硕士生导师。主要研究方向:损伤力学和复合材料结构分析。

## Fatigue damage analysis of 2D braided C/SiC composite plate

CHEN Tianxiong, ZHANG Zheng\*, WANG Qizhi, LIN Huixing

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** To explore the basic laws of composite damage, first, based on damage mechanics, combined with Tsai-Hill criterion of strength, a damage evolution equation that can characterize the damage anisotropy of 2D braided C/SiC composites was proposed. Second, a damage simulation program considered material stiffness reduction depend on the damage degree, as an add-on function, was developed and inserted in the commercial finite element software ANSYS environment. Third, the damage evolution of the 2D braided C/SiC composite plate model was simulated, and the result shows stress and damage degree have coupling effects on the element damage during the damage process. Finally, the form of damage evolution equation is discussed and improved, and the anisotropic characteristics of damage evolution under the material property and the action of damage driving force is revealed by analog computation, indicating that the material anisotropy damage is the inevitable result of its material properties and loaded form.

**Keywords:** composite; 2D braided; damage; anisotropy; finite element

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0242

# 空气域与流体域耦合作用下双层电池包散热特性

赵磊, 朱茂桃, 徐晓明\*, 胡东海, 李仁政

(江苏大学 汽车与交通工程学院, 镇江 212013)



**摘 要:** 多层垒叠电池包内空气域的存在使各层模组热流场耦合在一起, 从而影响电池模组的散热性能。以方形双层电池包为研究对象, 建立考虑电池模组与空气对流换热的液冷热模型。该模型中电池发热功率基于试验测定结果, 前处理软件采用 ANSA 确保仿真精度, 后处理软件采用 CFX, 对在不同放电倍率、冷却液进液方向和进液流量下双层电池结构中空气域对液冷热管理系统热行为的影响进行了研究, 并与不考虑空气域同工况仿真结果对比。结果表明: 空气域的存在不会对液冷双层电池包上下层模组温度分布产生影响; 但可以降低上下层模组间的温差, 其中上下层模组最高温升的差值最大可降低 49.1%, 改善了整包电池温度的一致性。

**关键词:** 双层电池包; 空气域; 流体域; 数值分析; 散热特性

**中图分类号:** U469.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5965(2019)01-0200-12

动力电池在充放电过程中, 由于产热化学反应和内部电阻的存在, 电池的温度逐渐升高<sup>[1]</sup>, 如果这些热量得不到及时的散发, 过高的温度和温差将影响动力电池的使用性能<sup>[2-3]</sup>。因此需要设计一套动力电池热管理系统对其进行监管。随着电池能量密度和整车行驶里程需求的不断提高, 动力电池系统正向开发成为主流, 电池箱体结构越来越复杂, 对动力电池热管理系统提出了更高的要求。现有的电池热管理技术方案主要有: 空气冷却<sup>[4-7]</sup>、液体冷却<sup>[8-9]</sup>和相变材料<sup>[10-11]</sup>, 液体冷却热管理方式因其较好的冷却效率和可靠性等而受到人们的广泛关注。

现有国内外研究学者对动力电池液冷热管理系统开展了丰富的研究。赵春荣等<sup>[12]</sup>建立了单层 18650 型锂离子电池模组的微通道液冷热模型, 研究了放电倍率、冷却液入口流速、电池间接接触面积以及电池与水冷管外壁接触面积对电池模

组散热性能的影响。徐晓明和赵又群<sup>[13]</sup>针对单层 2 并 12 串的电池模组, 分析了不同水冷板流经、进液流量和环境温度对其散热性能的影响, 结果表明, 与单进单出流径相比, 双进双出流径液冷系统的电池模块最高温升和内部最大温差均明显降低, 散热效率得到提高, 不论何种流径方案, 都有一个最佳进液流量, 使最高温升和内部最大温差都达到最小。Zhao 等<sup>[14]</sup>提出了一种用于单层 42110 圆柱形锂离子电池的微通道液体冷却柱结构, 采用数值模拟的方法研究了流道数量、质量流量、流量方向和入口尺寸对散热性能的影响, 结果表明, 当微通道数不小于 4, 进口质量流量为 1 103 kg/s 时, 锂离子电池的最高温升可控制在 40℃ 以下。现有动力电池液冷热管理研究多以单层成组动力电池为研究对象, 忽略电池与周围空气的对流换热, 通过液冷系统结构优化设计分析热管理系统的散热性能, 但对于动力电池组多层

收稿日期: 2018-04-27; 录用日期: 2018-07-28; 网络出版时间: 2018-08-08 09:14

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180806.0833.001.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180806.0833.001.html)

基金项目: 国家自然科学基金 (51505196, 51705208); 江苏省研究生科研与实践创新计划 (SJCX17\_0583); 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室开放基金 (KF1819)

\* 通信作者. E-mail: xuxiaoming3777@163.com

**引用格式:** 赵磊, 朱茂桃, 徐晓明, 等. 空气域与流体域耦合作用下双层电池包散热特性[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 200-211. ZHAO L, ZHU M T, XU X M, et al. Heat dissipation characteristics of double-layer battery pack under coupling of air and fluid domains [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 200-211 (in Chinese).

全叠复杂结构下的电池热管理系统散热性分析却少有人考虑。

多层全叠电池包结构中空气域的存在使各层电池模组热流场耦合在一起,改变了液冷系统的散热行为。本文以某款轿车的方形双层电池包为研究对象,基于试验结果建立电池单体的发热模型,通过改变液冷板进出口位置、进液流量和电池放电倍率,探究双层电池包内空气传热对上下层模组热行为的影响规律,为多层全叠电池包热管理系统的设计提供重要的指导意义。

## 1 锂离子电池热物性参数及试验系统

### 1.1 锂离子电池的热物性参数

表 1 为 55 Ah 锂离子电池单体的热物性参数,其中电芯的密度为  $2\ 123\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,导热系数为  $30.6\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,比热容为  $913\ \text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

表 1 55 Ah 锂离子电池单体的热物性参数

Table 1 Thermal physical parameters of 55 Ah lithium-ion battery monomer

材料	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	导热系数/ $(\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1})$	比热容/ $(\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1})$
电芯	2 123	30.6	913
正极极耳	2 719	202.4	871
负极极耳	8 978	387.6	381
隔膜	1 008	0.3344	1 978
壳体	8 193	14.7	439.3

### 1.2 发热功率测定试验系统搭建

图 1 为 55 Ah 锂离子电池单体测温点布置和绝热设计。电池单体通常由隔膜、正负极材料、极耳和壳体等部件组成,各部件热物性参数不一致,导致电池表面温度分布不均,在不考虑极柱发热的情况下,最高温分布在电池的中下部,因此,在单体电池底部对称布置 2 个测温点,正反面及侧

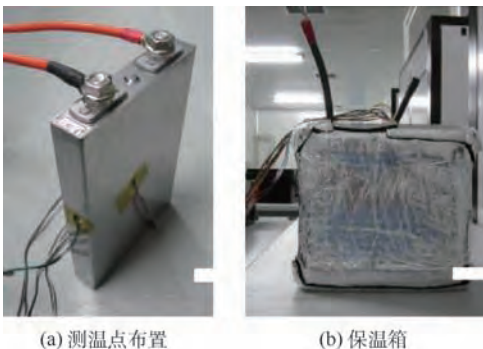


图 1 55 Ah 锂离子电池单体测温点布置和绝热设计  
Fig. 1 Arrangement of temperature measuring point and design of thermal insulation for 55 Ah lithium-ion battery monomer

面中心各布置 1 个测温点,共 5 个测温点。同时,为防止环境温度对试验数据测定造成干扰,电池单体进行绝热设计,保温箱用 3 层绝热材料包裹,以保证具有较好的绝热性能,该测温点布置方案可有效捕捉电池单体测试过程中的最高温升及不同方向的温升情况。试验中所选用的温度传感器型号为 T 型热电偶,最高测量温度值达到  $350\text{ }^\circ\text{C}$ ,基本误差限位  $\pm 0.75\%$ ,满足试验需求。

发热量计算式为

$$Q = C_p m \Delta T \quad (1)$$

式中: $Q$  为发热量, J;  $C_p$  为比热容,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $m$  为质量, kg;  $\Delta T$  为温升, K。

由式(1)可以推出发热功率计算式为

$$P = \frac{C_p m \Delta T}{t} \quad (2)$$

式中: $P$  为发热功率, W;  $t$  为时间, s。

试验过程:将恒温箱调到合适的温度,以一定的倍率充电至 3.65 V,转恒压充电,至 0.05 C 截止;再以该倍率放电至 2.50 V 截止。

### 1.3 不同充放电倍率时电池单体发热功率测定及分析

环境温度为  $20\text{ }^\circ\text{C}$  时,对电池单体进行不同倍率充放电。图 2 为  $0.5\ \text{C}$  充放电倍率时,55 Ah 锂离子

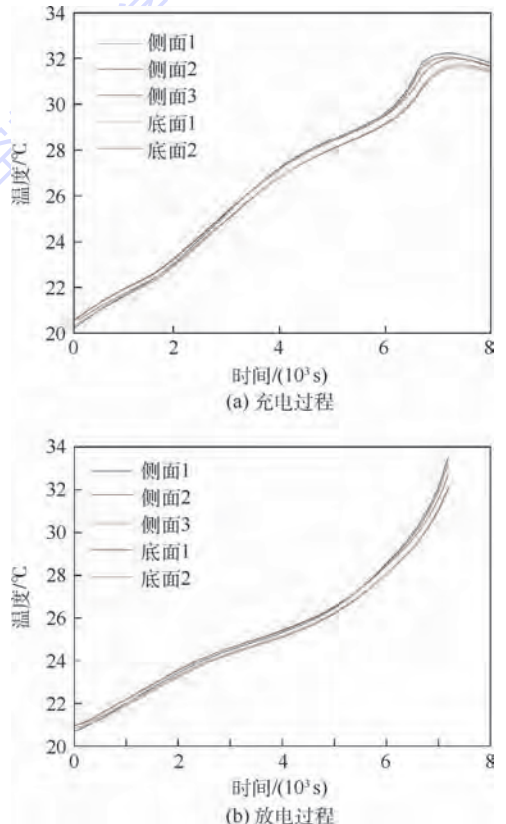


图 2  $0.5\ \text{C}$  充放电倍率时 55 Ah 锂离子电池单体平均温度曲线  
Fig. 2 Average temperature curves of 55 Ah lithium-ion battery monomer at  $0.5\ \text{C}$  charge and discharge rate

子电池单体平均温度曲线。

表2为不同充放电倍率时电池单体充放电过程温度数据,从表3可以看出,充放电过程中,0.5 C充放电倍率时平均发热功率为2.31 W;0.8 C充放电倍率时平均发热功率为5.00 W;1 C充放电倍率时平均发热功率为6.51 W;1.5 C充放电倍率时平均发热功率为12.83 W;2 C充放电倍率时平均发热功率为19.17 W,可见随着充放电倍率提高,电池单体发热功率也升高。

表2 不同充放电倍率时55 Ah锂离子电池单体温度数据

Table 2 Temperature data of 55 Ah lithium-ion battery monomer at different charge and discharge rates

充放电 倍率/C	起始温度/°C		终止温度/°C		总温升/°C	
	充电	放电	充电	放电	充电	放电
0.5	20.39	20.19	31.40	32.01	11.01	11.82
0.6	20.33	20.21	34.03	35.23	13.70	15.02
0.8	20.20	20.25	35.54	36.75	15.34	16.50
1	19.92	20.05	35.43	37.39	15.51	17.34
1.2	20.11	20.11	37.25	39.92	17.14	19.81
1.5	20.22	20.37	43.16	44.49	22.94	24.12
2	20.27	20.29	45.39	47.99	25.12	27.70
3	19.85	20.24	50.83	54.98	30.98	34.74
5	20.21	20.16	51.41	63.43	31.20	43.27

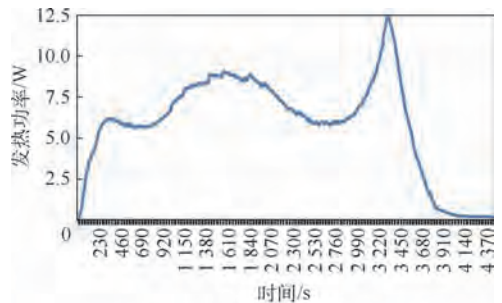
表3 不同充放电倍率时55 Ah锂离子电池单体发热功率

Table 3 Thermal power of 55 Ah lithium-ion battery monomer at different charge and discharge rates

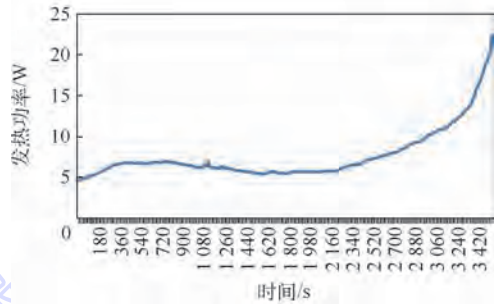
充放电 倍率/C	平均发热功率/W		
	充电	放电	充放电
0.5	2.06	2.55	2.31
0.6	2.95	3.89	3.42
0.8	4.31	5.69	5.00
1	5.42	7.60	6.51
1.2	6.62	10.25	8.44
1.5	10.06	15.60	12.83
2	14.44	23.89	19.17
3	22.26	44.93	33.60
5	23.74	93.28	58.51

#### 1.4 电池单体发热功率试验测定与仿真对比分析

环境温度为20°C时,对比1 C充放电时的试验与仿真结果,电池单体充放电过程的发热功率如图3所示,将其作为仿真时热源的依据,仿真分析得到的温度场分布如图4所示,可以看出充放电过程中电池单体的温度场分布基本接近,但放电时的温度相对较高,这可以从靠近电池极柱处的温度分布看出。从图5可以看出,仿真与试验结果比较吻合,其中充电时仿真得到的单体电池最高温度比试验测定结果高1.17°C,放电时仿真得到的最高温度比试验测定结果高1.10°C,数据误差在合理可接受范围内。



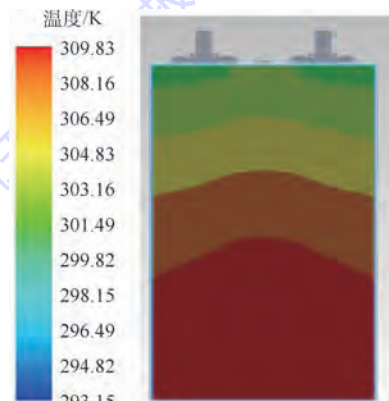
(a) 充电过程



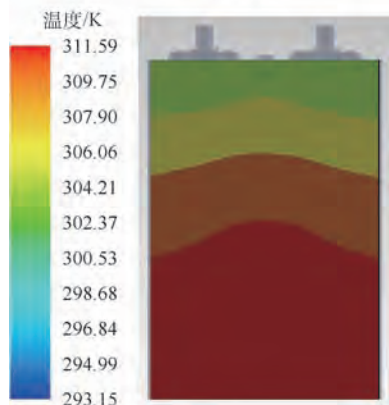
(b) 放电过程

图3 电池单体充放电过程发热功率

Fig. 3 Thermal power of battery monomer in charge and discharge process



(a) 充电过程



(b) 放电过程

图4 电池单体充放电过程温度场分布

Fig. 4 Temperature field distribution of battery monomer in charge and discharge process

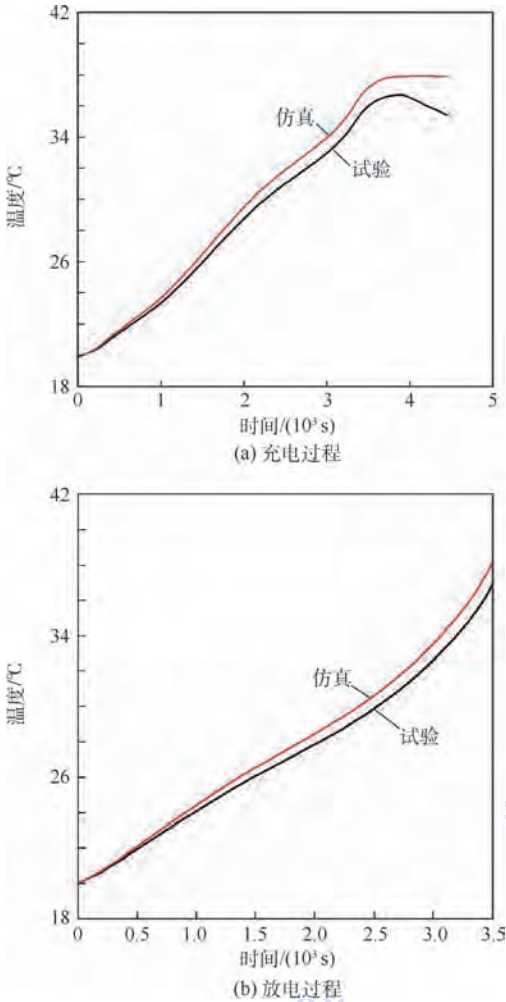


图 5 电池单体试验与仿真的温度数据比较  
Fig. 5 Comparison of temperature data of battery monomer between experiment and simulation

## 2 双层电池包物理与数学模型

### 2.1 物理模型

本文研究对象为某款轿车的方形双层电池包,共 8 个模组,单个模组内由 12 节电芯 3 并 4 串组成,外形尺寸为 0.318 m × 0.148 m × 0.093 m。常规情况下,模组内单体电池间间隙非常小,单体电池内部结构细节对于模组整体的热行为影响较小<sup>[15-16]</sup>,故将电池包物理模型简化如图 6 所示,该电池包热管理系统采用液冷,8 块液冷板布置于模组下方通过串联相连,液冷板材料为铝合金,进出口圆孔直径为 0.011 m。为优化液冷板和电池模组间传热效果,在两者之间涂有一层 1 mm 厚的导热硅胶,从而确保与电池具有一定的换热面积。

液冷系统的设计目标:环境温度和冷却液入口温度为 25℃,冷却液流速为 500 L/h,电池放电倍率为 2 C 时,电池包内单体电池最高温升不大于 25℃,最大温差 不大于 8℃。

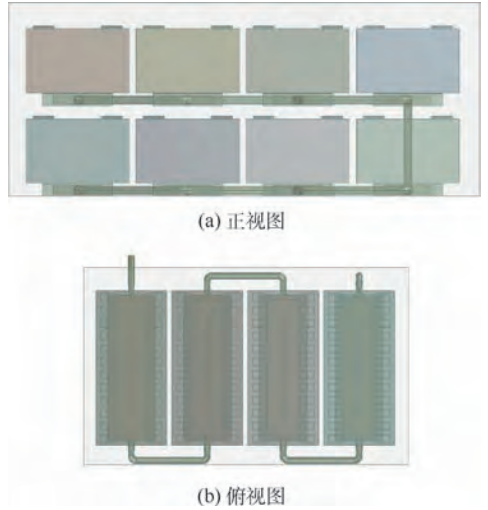


图 6 双层电池包物理模型示意图  
Fig. 6 Schematic diagram of physical model of double-layer battery pack

### 2.2 数学模型

#### 2.2.1 电池单体发热模型

根据 Bernardi<sup>[17]</sup> 提出的生热速率模型,电池单体的产热量为

$$Q = Q_{ir} + Q_{re} = I(U_{ca} - U_{an} - U) - IT \frac{d(U_{ca} - U_{an})}{dT} \quad (3)$$

式中: $Q_{ir}$ 为不可逆热; $Q_{re}$ 为可逆焓热; $T$ 为电池温度,℃; $I$ 为工作电流,A; $U$ 为工作电压,V; $U_{ca}$ 、 $U_{an}$ 分别为正负极开路电势,其温度依变关系采用文献[18-19]数据。

#### 2.2.2 电池与液冷板间的导热模型

电池包模组底面与液冷板上表面接触,通过导热方式与液冷板外壁进行热交换,其原理可用傅里叶定律来表述,其具体数学定义为

$$\Phi = -\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4)$$

式中: $\Phi$ 为热流量,W; $\lambda$ 为传热材料的导热系数,W/(m·K); $A$ 为与热流方向垂直的截面面积,m<sup>2</sup>; $\frac{\partial T}{\partial x}$ 为温度随方向的变化率;负号表示温度传递方向为温度递减的方向。

#### 2.2.3 电池与空气的对流换热模型

单层电池包液冷系统仿真通常忽略电池模组与周围空气的对流换热,而对于双层电池包,空气的流动将上下模组热流场耦合在一起,故考虑电池与空气间的对流换热,采用牛顿冷却公式表征两者间的热对流,产生的热量传递数值为

$$\Phi = hA(t_w - t_f) \quad (5)$$

$$q = h(t_w - t_f) \quad (6)$$

式中:  $q$  为热流密度,  $J/(m^2 \cdot s)$ ;  $h$  为对流换热表面的传热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $t_w$  为固体壁面的初始温度,  $^{\circ}C$ ;  $t_f$  为流体的初始温度,  $^{\circ}C$ 。

### 2.2.4 液冷板内液体流动状态模型

液冷板内冷却液的流动可认为是不可压缩流动, 冷却液的物性参数恒为常数。考虑到液体流速较高以及液冷板内结构复杂引起的分离现象, 应按  $k-\varepsilon$  湍流模型处理, 并运用 SIMPLE 压力修正法进行迭代。其控制方程组如下:

连续方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (7)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{V} \quad (8)$$

能量守恒方程:

$$\rho C_p \left( \frac{\partial E}{\partial t} + u \frac{\partial E}{\partial x} + v \frac{\partial E}{\partial y} + w \frac{\partial E}{\partial z} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} \right) \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{V}$  为速度矢量;  $p$  为压力,  $Pa$ ;  $\rho$  为冷却液密度,  $kg/m^3$ ;  $\mu$  为冷却液动力黏性系数;  $E$  为总能量;  $u$ 、 $v$  和  $w$  分别为  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向的速度。

### 2.3 初始及边界条件

电池模组的初始温度、环境温度和冷却液的入口温度均设定为  $25^{\circ}C$ , 忽略电池与外界的辐射传热。上下液冷板串联, 入口为自由进口边界条件, 压力大小为标准大气压; 出口为静压出口, 冷却液流速为  $300$ 、 $500$ 、 $700$   $L/h$ 。液冷板壁面采用无滑移边界条件, 速度为零, 且与外界热交换; 电池发热功率视具体算例给定。

### 2.4 仿真精度分析

为了确保数值计算结果的准确性, 使用 ANSA 对模型网格进行前处理, 局部区域加密, 其中, 冷却液进出口处网格情况如图 7 所示, 各部分的网格数量如下: 箱体的网格数量为  $336\ 716$ 、空气域的网格数量为  $2\ 958\ 786$ 、液冷板的网格数量为

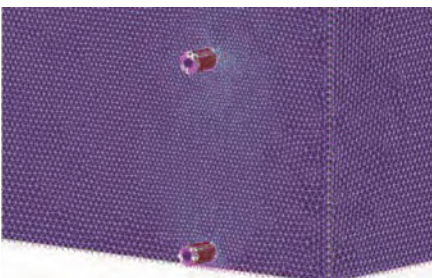


图 7 双层电池包冷却液进出口网格示意图

Fig. 7 Schematic diagram of coolant inlet and outlet grid of double-layer battery pack

$691\ 141$ 、导热硅胶的网格数量为  $97\ 419$ 、模组的网格数量为  $1\ 925\ 877$ 、水域的网格数量为  $1\ 111\ 803$ , skewness 均在  $0.9$  以下, 网格质量为  $0.87$ , 经检查网格不存在负体积, 在保证高精度的同时, 可捕捉到各个计算域的几何特征, 因此, 模型的网格划分满足仿真精度要求。

## 3 结果与讨论

为探究双层电池包内部空气域的存在对散热性能的影响, 对不同放电倍率、冷却液进液方向和进液流量下串联型液冷双层电池包空气域和流体域耦合散热行为进行了仿真分析, 其中, 不同放电倍率下电芯的发热功率由试验测定, 冷却液的流向共有 2 种: 上进下出和下进上出, 如图 8 所示。

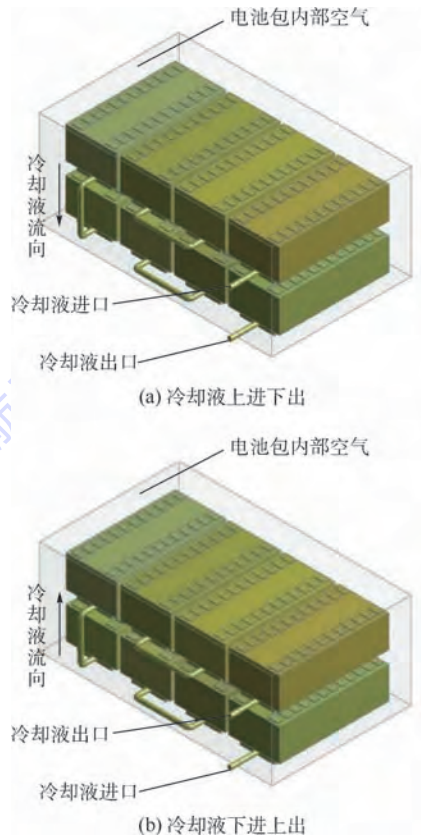


图 8 双层电池包冷却液流向示意图

Fig. 8 Schematic diagram of coolant flow direction of double-layer battery pack

### 3.1 不同放电倍率下双层电池包热流场耦合影响分析

#### 3.1.1 冷却液上进下出

图 9 和图 10 分别给出了双层电池包冷却液上进下出在不同放电倍率下带空气域和不带空气域上下层模组温度分布云图。由图 9 和图 10 可知, 双层电池包内部空气的存在对上下层模组温

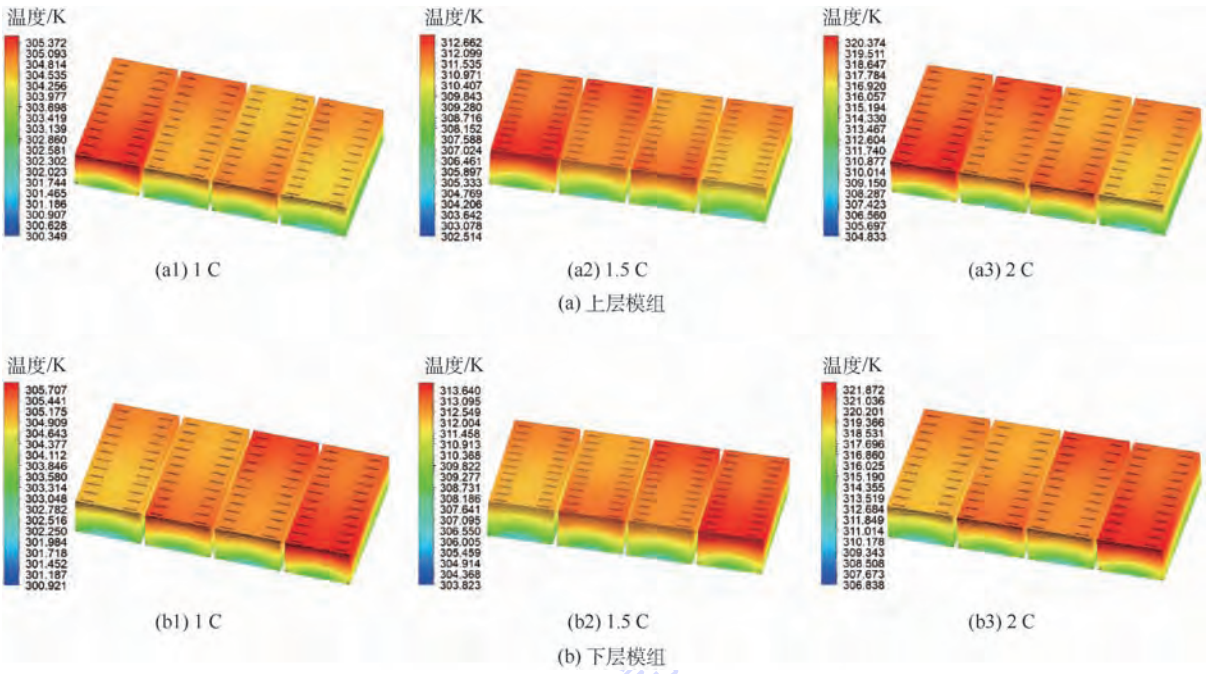


图 9 不同放电倍率下带空气域双层电池包上下模组温度分布云图(冷却液上进下出)

Fig.9 Temperature distribution contour of upper and lower modules of double-layer battery pack with air domain under different discharge rates (coolant inlet up and outlet down)

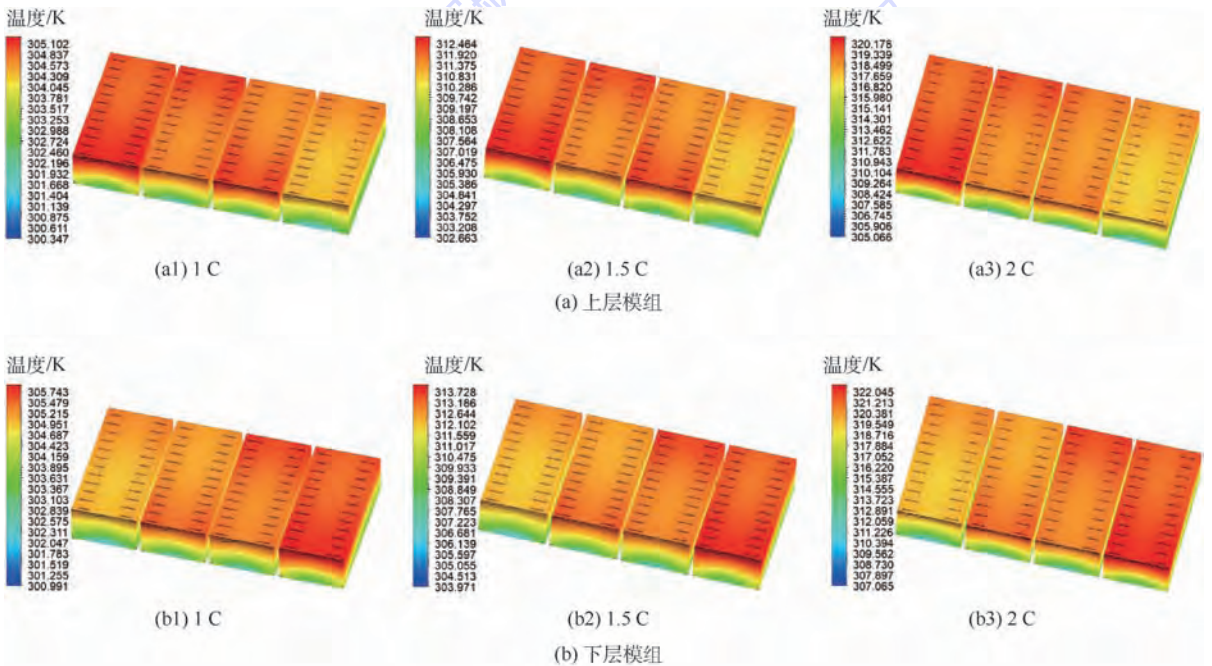


图 10 不同放电倍率下不带空气域双层电池包上下模组温度分布云图(冷却液上进下出)

Fig.10 Temperature distribution contour of upper and lower modules of double-layer battery pack without air domain under different discharge rates (coolant inlet up and outlet down)

度分布没有显著影响;液冷管道中冷却液依次流过上下层各个模组,冷却液温度逐渐升高,上层模组的最高温升小于下层模组的最高温升,对于单个模组而言,模组上部区域温度高于下部区域;相邻模组之间,前一个模组冷却液出口处模组温度高于后一个模组冷却液进口处温度,这主要归因

于冷却液在相邻液冷板管道间流动时,冷却液与管道发生热交换温度降低。

衡量电池热管理有效性的 2 个重要指标为最高温升和最大温差,从图 9 和图 10 还可以看出,双层电池包冷却液上进下出时在不同放电倍率下电池包内部空气域的存在对电池温差影响不大,

随着放电倍率的增大,单体电池间的最大温差升高,在2C高倍率放电时,电池包内单体电池最大温差较大接近15℃,超过其安全温度要求,主要原因在于液冷板内部流道仅有2条,8块液冷板串联冷却液流阻较大,在500L/h较低进液流量及2C高倍率放电倍率下,不能有效均衡单体电池温度分布,需要对双层电池包液冷系统的结构进行优化设计。

表4为不同放电倍率下冷却液上进下出双层电池包带空气域和不带空气域时上下层最高温升数据,可知空气域的存在改变了最高温升值,在2C放电倍率下不带空气域时上层模组最高温升为22.553℃,下层模组最高温升为24.415℃,带空气域时上层模组最高温升增加到22.764℃,下层模组最高温升降低为24.244℃。

表4 不同放电倍率下冷却液上进下出双层电池包上下层最高温升数据

Table 4 Maximum temperature rise data of upper and lower layers of double-layer battery pack with coolant inlet up and outlet down under different discharge rates

放电倍率/C	带空气域		不带空气域		上下层模组最高温升差降低率/%
	上层模组最高温升/℃	下层模组最高温升/℃	上层模组最高温升/℃	下层模组最高温升/℃	
1	7.397	7.723	7.117	7.758	49.1
1.5	14.865	15.831	14.655	15.916	23.4
2	22.764	24.244	22.553	24.415	20.5

当不考虑空域时双层电池包内模组热量的传递只有与液冷板间的热传导,空气域的存在增加了电池包内热传递方式,上下层模组通过与空气的对流换热耦合在一起;高温空气在电池包顶部区域积聚使上层模组的最高温升增大;冷却液上进下出的流动方式,上层模组温度高于下层模组,下层模组通过与空气的对流换热散发热量,使下层模组的最高温升降低,随着放电倍率的增大,上下层模组间温差增大空气流动性增强,下层模组的最高温升降低的幅度增强,在2C放电倍率时降低了0.171℃,上下层模组最高温升的变动使双层电池包上下层温差降低;由于空气对流换热的能力有限,电池放电倍率的增大,空气域的存在对双层电池包的散热影响反而减弱,上下层模组最高温升差(上下层模组最高温升的差值)降低率,由1C放电倍率时的49.1%降低到2C时的20.5%。

3.1.2 冷却液下进上出

图11和图12分别给出了双层电池包冷却液下进上出时在不同放电倍率下带空气域和不带空气域上下层模组温度分布云图。可知与冷却液上进下出的情况相同,空气的存在对双层电池包上下层模组的温度分布没有显著影响,液冷系统采用下进上出串联的方式,上层模组的最高温升大于下层模组的最高温升。同理,单个模组内冷却液进口处温度小于出口处温度,模组上部区域温度高于下部区域;由于冷却液在相邻液冷板管道间流动温度降低,相邻模组之间,前一个模组

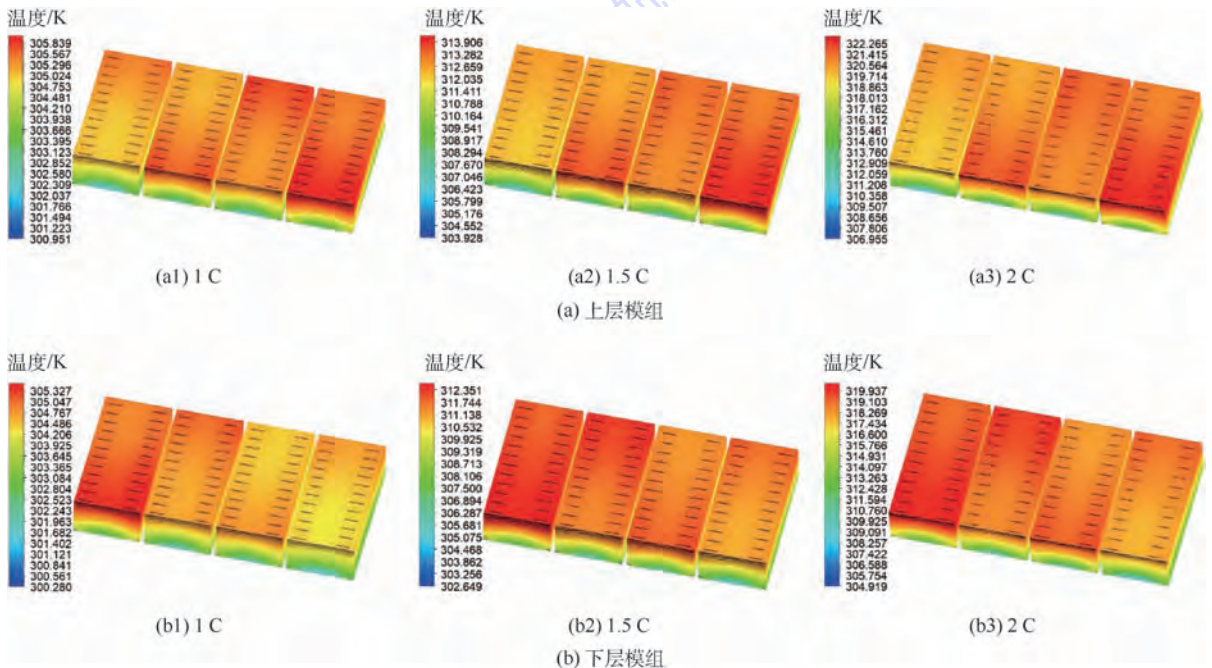


图11 不同放电倍率下带空气域双层电池包上下模组温度分布云图(冷却液下进上出)

Fig. 11 Temperature distribution contour of upper and lower modules of double-layer battery pack with air domain under different discharge rates (coolant inlet down and outlet up)

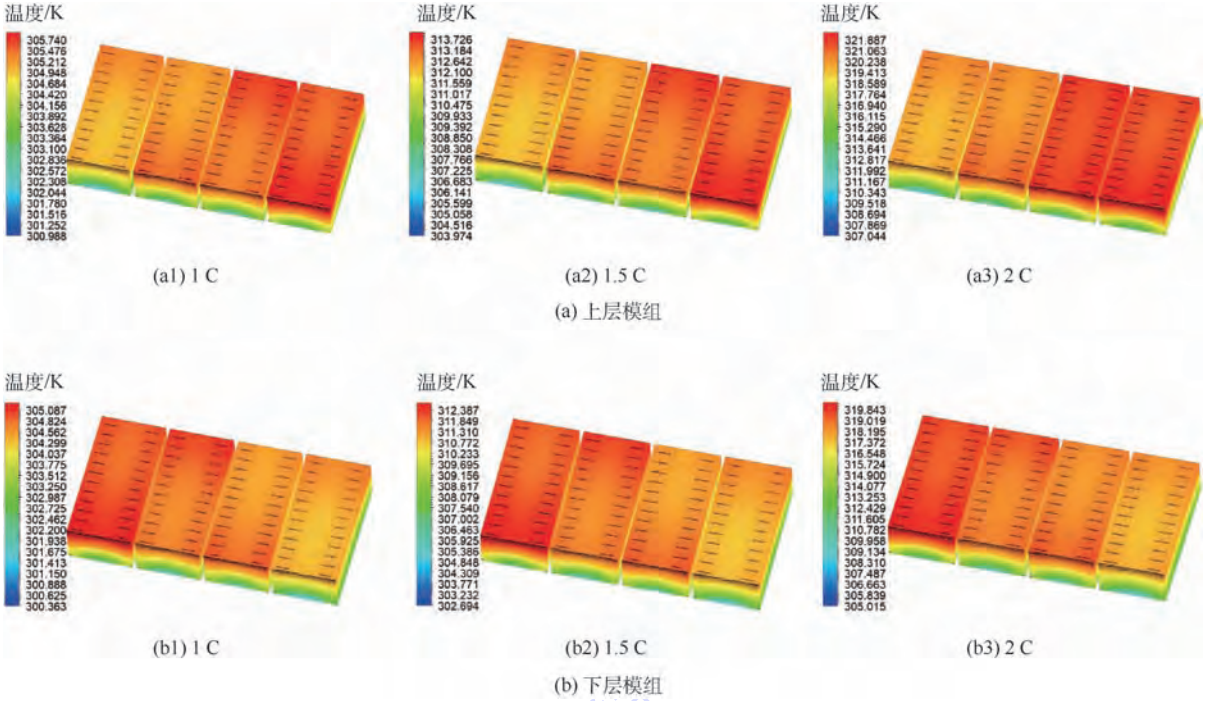


图 12 不同放电倍率下不带空气域双层电池包上下模组温度分布云图(冷却液下进上出)

Fig. 12 Temperature distribution contour of upper and lower modules of double-layer battery pack without air domain under different discharge rates (coolant inlet down and outlet up)

冷却液出口处温度高于后一个模组冷却液进口处温度,符合电池包串联液冷系统温度变化趋势。

从图 11 和图 12 还可以看出,双层电池包冷却液下进上出时在不同放电倍率下电池包内部空气域的存在对电池温差影响同样不大,在 2 C 放电倍率时,电池包内单体电池间的最大温差在 15℃左右,超过电池安全温度范围,与冷却液上进下出时单体电池最大温差较大原因类似,在较低的进液流量和高放电倍率下,液冷板流道设计的不合理以及串联液冷系统较大的流阻,导致电池单体的温度均衡性较差。

表 5 为不同放电倍率下冷却液下进上出双层电池包带空气域和不带空气域时上下层最高温升数据,在 2 C 放电倍率下不带空气域时上层模

组最高温升为 24.352℃,下层模组最高温升为 22.208℃,带空气域时上层模组最高温升增加到 24.447℃,下层模组最高温升也增加到 22.409℃,下层模组最高温升变化趋势与液冷却上进下出时相反。

高温空气在电池包顶部区域汇聚增大了上层模组的最高温升;冷却液下进上出使上层模组温度低于下层模组,上下层模组温度差使得下层模组通过空气的对流换热吸收热量温度升高,但空气自下而上流动将带走下层模组的热量使下层模组的最高温降低,温度升高的趋势大于降低的趋势使下层模组最高温升增大,而随着放电倍率的增大,上层模组温度高于下层模组温度的趋势增强空气的流动性增强不显著,下层模组最高温升增加的幅度稍有提高,在 2 C 放电倍率时增加了 0.201℃;空气域的存在使得双层电池包上下层最高温升差降低,与冷却液上进下出相比,同放电倍率下其对双层电池包上下层最高温升差的影响较小,考虑到空气对流换热的能力有限,随着电池放电倍率的增大,空气域对上下层模组温差变化进一步减弱,上下层模组最高温升差由 1 C 放电倍率时的 13.5%降低到 2 C 放电倍率时的 4.9%。

表 5 不同放电倍率下冷却液下进上出双层电池包上下层最高温升数据

Table 5 Maximum temperature rise data of upper and lower layers of double-layer battery pack with coolant inlet down and outlet up under different discharge rates

放电 倍率/C	带空气域		不带空气域		上下层模 组最高温 升差降低 率/%
	上层模组 最高温升/ ℃	下层模组 最高温升/ ℃	上层模组 最高温升/ ℃	下层模组 最高温升/ ℃	
1	7.859	7.293	7.755	7.101	13.5
1.5	16.018	14.704	15.914	14.514	6.1
2	24.447	22.409	24.352	22.208	4.9

### 3.2 不同进液流量下双层电池包热流场耦合影响分析

图 13 和图 14 分别给出了双层电池包冷却液

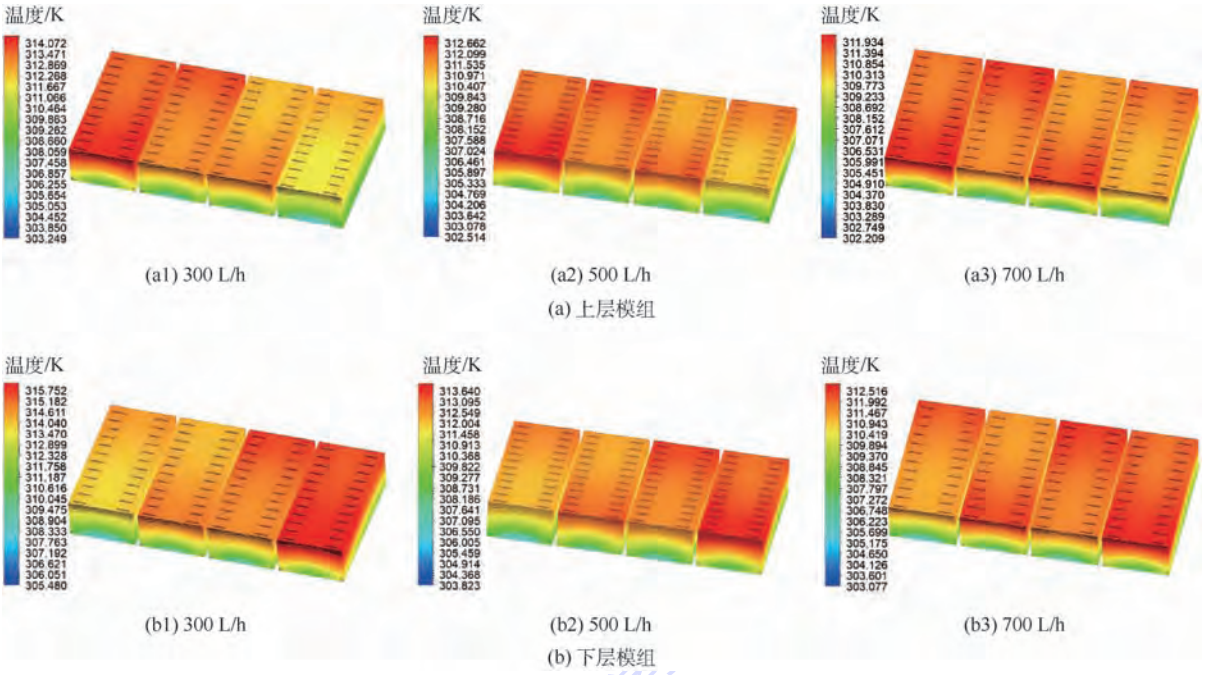


图 13 不同进液流量下带空气域双层电池包上下模组温度分布云图

Fig. 13 Temperature distribution contour of upper and lower modules of double-layer battery pack with air domain under different inlet flow rates

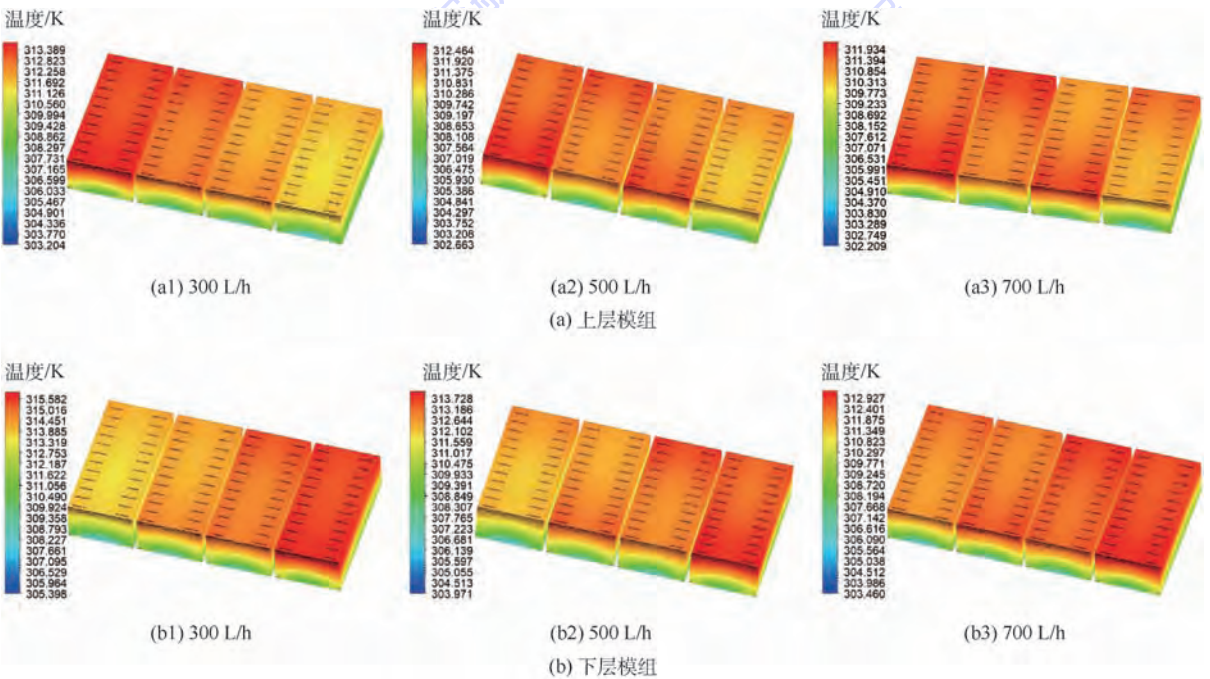


图 14 不同进液流量下不带空气域双层电池包上下模组温度分布云图

Fig. 14 Temperature distribution contour of upper and lower modules of double-layer battery pack without air domain under different inlet flow rates

上进下出时在不同进液流量下带空气域和不带空气域上下层模组温度分布云图。可知空气的存在对双层电池包上下层模组温度的整体分布也没有显著影响,与不同放电倍率下双层电池包冷却液上进下出时上下层温度分布相同,上层模组的最

高温升小于下层模组的最高温升,单个模组内冷却液进口处温度小于出口处温度,模组上部区域温度高于下部区域,归因于冷却液在相邻液冷板管道间流动时与管道热传递降低温度,相邻模组之间冷却液流经的前一个模组出水口处温度高于

后一个模组进水口出水温度。

从图 13 和图 14 中还可以看出,双层电池包在不同进液流量下电池包内部空气域的存在对电池温差影响不大,且随着进液流量的增大,电池包内单体电池的最大温差略有降低,当进液流量为 300 L/h 时,单体电池最大温差最大接近 10℃,这同样超出了电池的安全温度范围,同样,究其原因主要在于,液冷板流道设计存在不合理,串联型的液冷系统流阻较大,在 1.5 C 较高放电倍率和 300 L/h 的进液流量下,电池单体温度分布差异显著。

表 6 为不同进液流量下冷却液上进下出双层电池包带空气域和不带空气域时上下层最高温升数据,由表中可知在进液流量为 700 L/h 时带空气域和不带空气域电池包上下层模组最高温升都最低,且不带空气域时上层模组最高温升为 14.172℃,下层模组最高温升为 15.106℃,带空气域时上层模组最高温升增加到 14.382℃,下层模组最高温升降低为 15.034℃。

通过与空气的对流换热,上下层模组温度改变;高温空气在电池包顶部区域汇集增大了上层模组的最高温升,下层模组温度变化与不同放电倍率下温度变化趋势相同,冷却液上进下出使上层模组温度高于下层模组,下层模组通过空气的对流换热最高温升,随着冷却液进液流量的增大,上下层模组间温差降低空气的流动性减弱,下层模组最高温升降低的幅度减小,在 700 L/h 进液流量时只降低了 0.072℃,上下层模组的温度变化使得双层电池包上下层模组最高温升差降低;且随着冷却液进液流量的增大,空气域的存在对双层电池包的影响增强,上下层模组最高温升差降低率由进液流量 300 L/h 时的 17.5% 增加到 700 L/h 时的 30.2%。

表 6 不同进液流量下双层电池包上下层最高温升数据  
Table 6 Maximum temperature rise data of upper and lower layers of double-layer battery pack under different inlet flow rates

进液流量/ (L·h <sup>-1</sup> )	带空气域		不带空气域		上下层模组最高温升差降低率/%
	上层模组最高温升/℃	下层模组最高温升/℃	上层模组最高温升/℃	下层模组最高温升/℃	
300	16.098	17.659	15.893	17.786	17.5
500	14.865	15.831	14.655	15.916	23.4
700	14.382	15.034	14.172	15.106	30.2

## 4 结 论

本文针对某款轿车的方形双层电池包热管理

系统,建立包含空气域的双层电池包热模型,通过试验确定电池单体不同放电倍率下的发热功率,并且对电池包内结构进行简化处理。运用该模型对上下层模组在不同放电倍率、不同冷却液流向和不同进液流量大小时的热行为进行了模拟研究,并与不带空气域模型在同工况下热行为对比,探讨空气域的存在对双层电池包散热性能的影响,得出如下结论:

1) 增大放电倍率、改变进液方向以及增加进液流量时,空气域的存在不会对双层电池包液冷热管理系统上下层模组的温度分布及单体电池最大温差产生显著影响,但在较高放电倍率及较低进液流量下单体电池最大温差超过安全温度范围。

2) 当冷却液流向为上进下出时,空气域的存在使得双层电池包上层模组最高温升增大,下层模组最高温升减小,从而降低上下层模组间的温差。但随着放电倍率的增大,空气域的影响显著减弱,在 2 C 放电倍率时,上下层模组最高温升差降低了 20.5%。

3) 当冷却液流向为下进上出时,空气域的存在使得上下层模组最高温升都变大,但上层模组最高温升增大幅度小于下层模组,因此上下层模组间的温差降低,相较于冷却液流向上进下出,空气域的影响减弱,在 2 C 放电倍率时,上下层模组最高温升差只降低了 4.9%。

4) 当冷却液流向为上进下出时,增加进液流量,上下层模组温差减少,空气域的存在进一步缩小了两者之间的温差值,在 300 L/h 进液流量时,上下层模组最高温升差降低了 17.5%,当进液流量增加至 700 L/h 时,上下层模组最高温升差降低率提高至 30.2%。

仿真分析结果指出了该双层电池包串联型液冷系统在单体电池最大温差方面不能满足设计目标,需要对液冷系统结构设计进行改进,更重要的是,揭示了包内空气域的对流换热对双层电池包热管理系统散热行为的影响规律,在下一步的研究中可考虑加入电池荷电状态(SOC),研究空气域和流体域耦合作用下其对双层电池包散热的影响,为以后应用于纯电动车的多层垒叠电池包热管理的设计优化以及热行为的研究提供指导意义。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] NAKAYAMA M, FUKUDA K, ARAKI T, et al. Thermal behavior of nickel metal hydride battery during rapid charge and dis-

- charge cycles[J]. *Electrical Engineering in Japan*, 2006, 157(4):30-39.
- [2] 陈燕虹, 吴伟静, 刘宏伟, 等. 纯电动汽车电池箱的热特性[J]. *吉林大学学报*, 2014, 44(4):925-932.  
CHEN Y H, WU W J, LIU H W, et al. The thermal characteristics of a pure electric vehicle battery box[J]. *Journal of Jilin University*, 2014, 44(4):925-932(in Chinese).
- [3] 姬芬竹, 刘丽君, 杨世春, 等. 电动汽车动力电池生热模型和散热特性[J]. *北京航空航天大学学报*, 2014, 40(1):18-24.  
JI F Z, LIU L J, YANG S C, et al. Heat generation model and heat dissipation characteristics of electric vehicle battery[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 40(1):18-24(in Chinese).
- [4] PESARAN A A. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations[J]. *Journal of Power Sources*, 2002, 110(2):377-382.
- [5] LI X S, HE F, MA L. Thermal management of cylindrical batteries investigated using wind tunnel testing and computational fluid dynamics simulation[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 238(238):395-402.
- [6] SAW L H, YE Y H, TAY A A O, et al. Computational fluid dynamic and thermal analysis of lithium-ion battery pack with air cooling[J]. *Applied Energy*, 2016, 177:783-792.
- [7] WANG T, TSENG K J, ZHAO J Y. Development of efficient air-cooling strategies for lithium-ion battery module based on empirical heat source model[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 90:521-529.
- [8] PENDERGAST D R, DEMAURO E P, FLETCHER M, et al. A rechargeable lithium-ion battery module for underwater use[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(2):793-800.
- [9] YANG X H, TAN S C, LIU J. Thermal management of Li-ion battery with liquid metal[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 117:577-585.
- [10] RAO Z H, HUO Y T, LIU X J, et al. Experimental investigation of battery thermal management system for electric vehicle based on paraffin/copper foam[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2015, 88(3):241-246.
- [11] 施尚, 余建祖, 谢永奇, 等. 锂电池相变材料/风冷综合热管理系统温升特性[J]. *北京航空航天大学学报*, 2017, 43(6):1278-1286.  
SHI S, YU J Z, XIE Y Q, et al. Temperature rise characteristics of lithium battery phase change material/air-cooled integrated thermal management system[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 43(6):1278-1286(in Chinese).
- [12] 赵春荣, 曹文灵, 董缙, 等. 圆柱形锂离子电池模组微通道液冷热模型[J]. *化工学报*, 2017, 68(8):3232-3241.  
ZHAO C R, CAO W J, DONG T, et al. Liquid cooling and heating model for cylindrical lithium ion battery module[J]. *Journal of Chemical Industry*, 2017, 68(8):3232-3241(in Chinese).
- [13] 徐晓明, 赵又群. 不同工况下电动汽车冷板液冷系统散热性能试验研究[J]. *汽车工程*, 2014, 36(9):1057-1062.  
XU X M, ZHAO Y Q. Experimental study on heat dissipation performance of cold plate liquid cooling system of electric vehicle under different working conditions[J]. *Automobile Engineering* 2014, 36(9):1057-1062(in Chinese).
- [14] ZHAO J T, RAO Z H, LI Y M. Thermal performance of minichannel liquid cooled cylinder based battery thermal management for cylindrical lithium-ion power battery[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 103:157-165.
- [15] SRINIVASAN V, WANG C Y. Analysis of electrochemical and thermal behavior of Li-ion cells[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2003, 150(1):A98.
- [16] FAN L W, KHODADADI J M, PESARAN A A. A parametric study on thermal management of an air-cooled lithium-ion battery module for plug-in hybrid electric vehicles[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 238:301-312.
- [17] BERNARDI D. A general energy balance for battery systems[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1985, 132(1):5-15.
- [18] FANG W F, KWON O J, WANG C Y. Electrochemical-thermal modeling of automotive Li-ion batteries and experimental validation using a three-electrode cell[J]. *International Journal of Energy Research*, 2010, 34(2):107-115.
- [19] REYNIER Y F, YAZAMI R, FULTZ B. Thermodynamics of lithium intercalation into graphites and disordered carbons[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2004, 151(3):A422.

#### 作者简介:

赵磊 男, 硕士研究生。主要研究方向: 动力电池热管理技术。

徐晓明 男, 博士, 副教授, 硕士生导师。主要研究方向: 电动汽车热管理技术等。

## Heat dissipation characteristics of double-layer battery pack under coupling of air and fluid domains

ZHAO Lei, ZHU Maotao, XU Xiaoming<sup>\*</sup>, HU Donghai, LI Renzheng

(School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** The existence of the air domain in the multi-layer stacked battery pack makes the heat flow field of each layer module coupled together, thus affecting the heat dissipation performance of the battery module. A liquid-cooled heat transfer model for a square double-layer battery pack is established with considering the convection heat transfer between the battery module and the air. The thermal power of the battery in this model is based on the experimental results. ANSA is used as the pre-processing software to ensure the simulation accuracy, and CFX is used as the post-processing software. The effect of air domain in double-layer battery structure on the thermal behavior of liquid-cooled thermal management system is studied under different discharge rates, cooling fluid inlet directions and liquid flow rates. It is compared with the simulation result without the consideration of air domain under the same working condition. The comparison results show that the presence of the air domain does not affect the temperature distribution of upper and lower module of the liquid-cooled double-layer battery pack, but reduces the temperature difference of the upper and lower modules, and the difference of the maximum temperature rise in the upper and lower modules can be reduced by 49.1% to a largest extent, which improves the temperature consistency of the whole battery pack.

**Keywords:** double-layer battery pack; air domain; fluid domain; numerical analysis; heat dissipation characteristics

**Received:** 2018-04-27; **Accepted:** 2018-07-28; **Published online:** 2018-08-08 09:14

**URL:** [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180806.0833.001.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180806.0833.001.html)

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (51505196,51705208); Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (SJCX17\_0583); the Science Fund of State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy of Tsinghua University (KF1819)

\* **Corresponding author.** E-mail: xuxiaoming3777@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0267

# S波自旋单态底夸克偶素衰变到粲夸克对

孙佳佳, 张玉洁, 熊畅\*

(北京航空航天大学 物理科学与核能工程学院, 北京 100083)



**摘 要:** 对 S 波自旋单态底夸克偶素衰变到粲夸克对进行了研究, 同时还研究了 S 波自旋单态和自旋三重态底夸克偶素衰变到 D 介子对。利用 BaBar 实验组测量得到的自旋三重态底夸克偶素衰变到 D 介子分支比的数据, 发现自旋三重态底夸克偶素的色八重态矩阵元远小于理论预言, 理论预言要比实验上限大 20 倍以上; 得到 S 波自旋单态底夸克偶素衰变到粲夸克对的分支比的理论预言, 可以进行实验测量从而研究色八重态矩阵元; 得到 S 波自旋单态底夸克偶素衰变到 D 介子对的分支比的理论预言, 与其他理论预言差异较大。这些预言可以通过 Belle II 的实验进行验证, 从而得到更多强子化的信息。

**关键词:** 底夸克偶素; 粲夸克; D 介子; 色八重态机制; 碎裂函数

**中图分类号:** O572.24; O572.22

**文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5965(2019)01-0212-06

底夸克偶素 (bottomonium) 是由正反底夸克 (bottom) 对组成的束缚态,  $\eta_b$  作为 S 波自旋单态的底夸克偶素, 是能量最低的底夸克偶素。而对于底夸克偶素系统, 由于底夸克质量  $m_b \approx 4.7 \text{ GeV}$  远大于量子色动力学 (Quantum Chromodynamics, QCD) 特征能标, 从而强耦合系数  $\alpha_s \approx 0.2$ , 因此可以认为底夸克对的湮灭过程可以用微扰量子色动力学 (Perturbative Quantum Chromodynamics, PQCD) 来描述, 另外在底夸克偶素质心系中, 底夸克的速度平方  $v^2 \approx 0.1$ , 因此可以认为底夸克对和底夸克偶素之间的强子化过程可以用非相对论量子色动力学 (Non-Relativistic Quantum Chromodynamics, NRQCD)<sup>[1]</sup> 来描述。在 NRQCD 因子化方案中, 重夸克偶素的产生和衰变可以展开成长程部分的矩阵元和短程部分的系数, 长程部分的矩阵元可以按照重夸克偶素质心系中重夸克的速度平方  $v^2$  来标度, 而短程部分的系数可以按照  $\alpha_s$  来标度。由于底夸克偶素系统中  $\alpha_s \approx 0.2$  和  $v^2 \approx$

0.1, 所以在底夸克偶素衰变中按照  $\alpha_s$  和  $v^2$  的双重展开中微扰展开和相对论展开收敛行为都比较好, 高阶修正会很小, 理论上领头阶或者次领头阶的预言将会靠近真实的物理结果, 从而  $\eta_b$  提供了良好的检验 PQCD 和 NRQCD 的平台。

文献[2]给出了近期的  $\Upsilon$  和  $\eta_b$  衰变研究的综述。文献[3]也研究了  $\Upsilon$  和  $\eta_b$  到轻夸克偶素和粲夸克偶素的辐射衰变。文献[4]研究了直到  $v^4$  和  $\alpha_s^3$  阶的  $\Upsilon$  到轻强子的衰变。文献[5]给出  $\Upsilon$  和  $\eta_b$  衰变到  $c\bar{c}g$ 。文献[6]中也给出粲夸克对在  $\Upsilon$  衰变中的产生。文献[7]给出了粲夸克对在  $\chi_b$  介子衰变中的产生。另外 BaBar 实验组还测量得到单举过程  $\Upsilon$  衰变到 D 介子的分支比  $\text{Br}[\Upsilon \rightarrow D^{*+} + X] = (2.52 \pm 0.13 \pm 0.15)\%$ <sup>[8]</sup>。在文献[9]中估计得  $\text{Br}[\eta_b \rightarrow D^* \bar{D}] \sim 10^{-5}$ ,  $\text{Br}[\eta_b \rightarrow D^* \bar{D}^*] \sim 10^{-8}$ 。而这一过程的理论预言在文献[10]中却是  $10^{-3} < \text{Br}[\eta_b \rightarrow D^* \bar{D}^*] < 10^{-2}$ , 2 个理论预言的差异在 5 个数量级。

收稿日期: 2018-05-10; 录用日期: 2018-05-18; 网络出版时间: 2018-05-25 16:20

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180522.1747.002.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180522.1747.002.html)

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金

\* 通信作者: E-mail: 09434@buaa.edu.cn

**引用格式:** 孙佳佳, 张玉洁, 熊畅. S 波自旋单态底夸克偶素衰变到粲夸克对[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 212-217.  
SUN J J, ZHANG Y J, XIONG C. S-wave spin singlet bottomonium decay to charm quark pair[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 212-217 (in Chinese).

本文选择研究  $\eta_b \rightarrow c\bar{c}$ , 因为在理论上, 粲夸克质量远大于 QCD 特征能标, 所以这个过程不像末态为轻夸克或胶子的过程, 非微扰效应比较小。在实验上, 末态的粲夸克也可以通过含粲夸克的介子、重子来检验, 信号明确, 而且这类过程中, 底夸克偶素的色八重态部分的短程系数远大于色单态部分的短程系数, 因此可以通过实验来检验色八重态机制或者给色八重态矩阵元一个比较强的限制。

本文讨论了  $\eta_b$  到  $c\bar{c}$  的衰变, 以及  $\eta_b$  和  $\Upsilon$  衰变到  $D\bar{D}$ 。  $\eta_b$  到  $c\bar{c}$  的衰变, 是一个在  $\eta_b$  系统中能检验色八重态机制的衰变道。而对于  $\eta_b$  和  $\Upsilon$  衰变到  $D\bar{D}$ , 期望  $D\bar{D}$  衰变道能给出一个探测  $\eta_b$  的线索和检验色八重态机制。

### 1 $\eta_b$ 衰变到 $c\bar{c}$ 和色八重态机制

在 NRQCD 因子化框架下<sup>[1]</sup>,  $\eta_b$  到  $c\bar{c}$  的衰变宽度为

$$\Gamma[\eta_b \rightarrow c\bar{c} + X] = \sum_n \langle \eta_b | b\bar{b}(n) | \eta_b \rangle \hat{\Gamma}[b\bar{b}(n) \rightarrow c\bar{c} + X] \quad (1)$$

式中:  $n$  包含自旋角动量子数、轨道角动量子数、总角动量子数和颜色指标等量子数, 能描述非相对论的  $b\bar{b}$  态。在 NRQCD 中, 长程矩阵元  $\langle \eta_b | b\bar{b}(n) | \eta_b \rangle$  可以按  $v^2$  展开中,  $n$  的领头阶是  $^1S_0^8$ , 然后是  $v^4$  阶的  $^1S_0^8$ ,  $^3S_1^8$  和  $^1P_1^8$ , 其他中间态的贡献在更高阶。

按速度标度律, 对于色八重态矩阵元有

$$\begin{cases} \langle \eta_b | b\bar{b}(^1S_0^8) | \eta_b \rangle \sim v^4 \langle \eta_b | b\bar{b}(^1S_1^8) | \eta_b \rangle \\ \langle \eta_b | b\bar{b}(^3S_1^8) | \eta_b \rangle \sim v^4 \langle \eta_b | b\bar{b}(^1S_1^8) | \eta_b \rangle \\ \langle \eta_b | b\bar{b}(^1P_1^8) | \eta_b \rangle \sim v^4 \langle \eta_b | b\bar{b}(^1S_1^8) | \eta_b \rangle \end{cases} \quad (2)$$

由于色八重态  $^1S_0^8$  和  $^1P_1^8$  衰变到末态含  $c\bar{c}$  的过程中要包含一个或者更多的胶子, 从而受到  $\alpha_s$  的压低, 所以这里只考虑色八重态树图过程  $b\bar{b}(^3S_1^8) \rightarrow c\bar{c}$  的  $\alpha_s^2$  阶贡献, 色单重态圈图过程  $b\bar{b}(^1S_0^8) \rightarrow c\bar{c}$  的  $\alpha_s^2$  阶贡献和色单重态树图过程  $b\bar{b}(^1S_0^8) \rightarrow c\bar{c}g$  的  $\alpha_s^3$  阶贡献, 典型的费曼图在图 1 和图 2 中给出, 其他费曼图可以通过交换胶子位置得到。

在数值计算中, 相关参数选为  $m_b \approx 4.7 \text{ GeV}$ ,  $m_c \approx 1.5 \text{ GeV}$  ( $m_c$  为粲夸克质量),  $\alpha_s = 0.22$ , 色单重态矩阵元选取为  $\langle \eta_b | b\bar{b}(^1S_0^8) | \eta_b \rangle = 3.8 \text{ GeV}^3$ <sup>[6]</sup>,

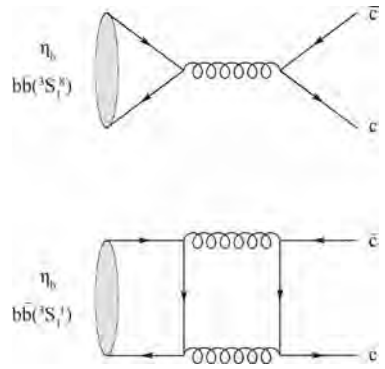


图 1  $\eta_b \rightarrow c\bar{c}$  的费曼图

Fig. 1 Feynman diagram of  $\eta_b \rightarrow c\bar{c}$

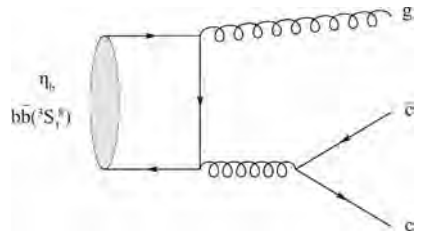


图 2  $\eta_b(^1S_0^8) \rightarrow c\bar{c}g$  的费曼图

Fig. 2 Feynman diagram of  $\eta_b(^1S_0^8) \rightarrow c\bar{c}g$

以及  $\eta_b$  总宽度选取为  $\Gamma_{\text{tot}}[\eta_b] = 13 \text{ MeV}$ <sup>[3]</sup>, 可以得到  $^3S_1^8$  的贡献为

$$\Gamma[\eta_b(^1S_0^8) \rightarrow c\bar{c}] = 66 \text{ keV} \quad (3)$$

$$\text{Br}[\eta_b(^3S_1^8) \rightarrow c\bar{c}] = 0.17 \langle \eta_b | b\bar{b}(^3S_1^8) | \eta_b \rangle / \text{GeV}^3 \quad (4)$$

在文献[10]中首先得到  $\text{Br}[\eta_b \rightarrow c\bar{c}g] = 1.5_{-0.4}^{+0.8} \%$ , 并且估计得到遍举过程的分支比  $10^{-3} < \text{Br}[\eta_b \rightarrow D^* \bar{D}^*] < 10^{-2}$ 。对于  $\text{Br}[\eta_b \rightarrow c\bar{c}g]$ , 这里如果参数取为和文献[10]中一样, 得到的结果是一致的。

色八重态矩阵元  $\langle \eta_b | b\bar{b}(^3S_1^8) | \eta_b \rangle$  可选取为文献[11]中格点 QCD 给出的矩阵元:

$$\begin{aligned} \langle \eta_b | b\bar{b}(^3S_1^8) | \eta_b \rangle &\approx 7.2 \times 10^{-3} \times \\ \langle \eta_b | b\bar{b}(^3S_1^8) | \eta_b \rangle &= 2.7 \times 10^{-2} \text{ GeV}^3 \end{aligned} \quad (5)$$

从而可以得到分支比为

$$\begin{cases} \text{Br}[\eta_b(^1S_0^8) \rightarrow c\bar{c}] = 5.1 \times 10^{-3} \\ \text{Br}[\eta_b(^1S_0^8) \rightarrow c\bar{c}g] = 24 \times 10^{-3} \\ \text{Br}[\eta_b(^3S_1^8) \rightarrow c\bar{c}] = 4.6 \times 10^{-3} \end{cases} \quad (6)$$

$\text{Br}[\eta_b \rightarrow c\bar{c}g]$  对胶子能量  $E_g$  的分布如图 3 所示, 可以发现主要集中在胶子高能量区域, 胶子能量在  $0.4 m_b$  到最大值  $0.9 m_b$  之间的几率占到 90%, 在  $0.26 m_b$  到最大值  $0.9 m_b$  之间的几率占到 96%。

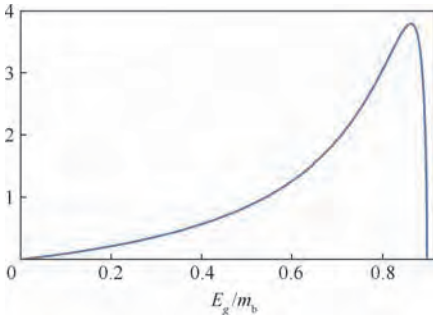


图3 归一化后相对的  $\text{Br}[\eta_b \rightarrow \bar{c}cg]$  对于  
胶子能量的分布

Fig. 3 Distribution of gluon energy of normalized  
relative  $\text{Br}[\eta_b \rightarrow \bar{c}cg]$

## 2 $\Upsilon$ 到 $D\bar{D}$ 的衰变

本文讨论了  $\Upsilon$  和  $\eta_b$  到  $D$  介子的衰变。 $c$  夸克碎裂到  $D$  介子的几率选择为<sup>[12-13]</sup>

$$\begin{cases} f(c \rightarrow D^+) = 0.226 \\ f(c \rightarrow D^{*+}) = 0.238 \end{cases} \quad (7)$$

BaBar 实验组已经测量得到  $D^{*+}$  单举产生的分支比  $\text{Br}[\Upsilon \rightarrow D^{*+} + X] = (2.52 \pm 0.13 \pm 0.15)\%$ <sup>[8]</sup>。文献[6]中讨论了  $\Upsilon$  到  $c\bar{c}$  的衰变, 可以直接得到色单态的单光子衰变部分对分支比  $\text{Br}[\Upsilon \rightarrow D^{*+} + X]$  的贡献为

$$\begin{aligned} \text{Br}[\Upsilon \rightarrow \gamma^* \rightarrow D^{*+} + X] &= 2f(c \rightarrow D^{*+}) \times \\ \text{Br}[\Upsilon \rightarrow \gamma^* \rightarrow c\bar{c} + X] &= 1.8\% \end{aligned} \quad (8)$$

大约 70% 的  $\text{Br}[\Upsilon \rightarrow D^{*+} + X]$  来源于色单态的单光子衰变部分贡献。即使将色单态三胶子衰变部分取为 0, 本文也可从实验值得到色八重态部分贡献的  $\text{Br}[\Upsilon \rightarrow D^{*+} + X]$  大约是 0.7%, 而理论预言的色八重态的贡献为

$$\begin{aligned} &2f(c \rightarrow D^{*+}) \times (53 \langle Y | \bar{b}b(\bar{3}S_1^8) | Y \rangle / \text{GeV}^3 + \\ &2.8 \langle Y | \bar{b}b(\bar{1}S_0^8) | Y \rangle / \text{GeV}^3 + \\ &0.53 \langle Y | \bar{b}b(\bar{3}P_0^8) | Y \rangle / \text{GeV}^5) \end{aligned} \quad (9)$$

忽略  $\bar{1}S_0^8$  和  $\bar{3}P_0^8$  这 2 部分的贡献, 可以得到色八重态矩阵元  $\langle Y | \bar{b}b(\bar{3}S_1^8) | Y \rangle$  的最大值是  $\langle Y | \bar{b}b(\bar{3}S_1^8) | Y \rangle < 2.8 \times 10^{-4} \text{ GeV}^3$ 。考虑到色单态矩阵元和色单态矩阵元的比值小于  $7.5 \times 10^{-4}$ , NRQCD 给出的比值  $v^4 / (2N_c) \approx 1.7 \times 10^{-3}$  要比实验数据限定的上限大 20 倍以上。

本文还要讨论  $\Upsilon$  和  $\eta_b$  到  $D\bar{D}$  遍举衰变可以估计得到。色单态单光子过程衰变到  $D\bar{D}$  末态过程  $\Upsilon \rightarrow \gamma^* \rightarrow D\bar{D}$  的分支比可以通过  $e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow D\bar{D}$  的截面来估计:

$$\begin{aligned} \text{Br}(\Upsilon \rightarrow \gamma^* \rightarrow D\bar{D}) / \text{Br}(\Upsilon \rightarrow \gamma^* \rightarrow \mu^+ \mu^-) &= \\ \sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow D\bar{D}) / \sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-) & \end{aligned} \quad (10)$$

式中: 正负电子对撞的质心系能量  $\sqrt{s}$  取为  $\Upsilon$  的质量。Belle 实验组测得正负电子湮灭中  $\sqrt{s} = 10.6 \text{ GeV}$  的产生截面<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} \sigma(e^+e^- \rightarrow D^{*+} D^{*-}) = (0.65 \pm 0.04 \pm 0.07) \text{ pb} \\ \sigma(e^+e^- \rightarrow D^+ D^{*-}) = (0.71 \pm 0.05 \pm 0.09) \text{ pb} \\ \sigma(e^+e^- \rightarrow D^+ D^-) < 0.04 \text{ pb} \end{cases} \quad (11)$$

理论上  $e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow D\bar{D}$  是以单光子过程为主。引入正负电子湮灭到  $\mu^+ \mu^-$  的截面:

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-) = 4\pi\alpha^2 / (3s) \quad (12)$$

则质心系能量是 10.6 GeV 时正负电子湮灭到  $\mu^+ \mu^-$  的截面  $\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow \mu^+ \mu^-) = 769 \text{ pb}$ 。本文还需要将质心系能量从 10.6 GeV 演化到  $m_\Upsilon = 9.46 \text{ GeV}$ , 文献[15]中给出  $e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow D\bar{D}$  过程的产生截面对质心系能量的依赖关系为

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow D^+ D^{*-}) \propto 1/s^4 \quad (13)$$

而文献[16]中给出  $e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow D\bar{D}$  过程的产生截面对质心系能量的依赖关系为

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow D^+ D^{*-}) \propto 1/s^3 \quad (14)$$

因此选取  $e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow D\bar{D}$  过程的产生截面对质心系能量的依赖关系为

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow D^+ D^{*-}) \propto 1/s^{3.5 \pm 0.5} \quad (15)$$

文献[8]中给出:

$$\text{Br}(\Upsilon \rightarrow \gamma^* \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (2.48 \pm 0.05)\% \quad (16)$$

可得

$$\begin{cases} \text{Br}(\Upsilon \rightarrow \gamma^* \rightarrow D^{*+} D^{*-}) = (3.7 \pm 0.6) \times 10^{-5} \\ \text{Br}(\Upsilon \rightarrow \gamma^* \rightarrow D^+ D^{*-}) = (4.1 \pm 0.7) \times 10^{-5} \end{cases} \quad (17)$$

还可通过碎裂函数另外估计遍举分支比, 参考文献[12-13]给出了  $c \rightarrow D$  的碎裂函数, 几率选择文献[12-13]中给出的:

$$\begin{cases} f(c \rightarrow D^+) = 0.226 \\ f(c \rightarrow D^{*+}) = 0.238 \end{cases} \quad (18)$$

碎裂函数选择单参数无横动量依赖的 Kartvelishvili 碎裂函数<sup>[12-13]</sup>:

$$\begin{aligned} F_{c \rightarrow D}(z) &= \\ f(c \rightarrow D) z^{\alpha_D} (1-z) / \int_0^1 z^{\alpha_D} (1-z) dz & \end{aligned} \quad (19)$$

式中:  $z = (E_D + p_D) / (E_c + p_c)$ ,  $E$  和  $p$  分别为能量和动量, 下标  $D$  和  $c$  分别表示  $D$  介子和  $c$  夸克。因为  $m_c \approx m_D \approx 1.5 \text{ GeV}$ , 远小于  $m_b \approx 4.7 \text{ GeV}$ , 所以可取  $z = E_D / E_c$ 。在文献[12]中给出  $\alpha_D$  为

$$\begin{cases} \alpha_{D^*} = 4 \\ \alpha_{D^{**}} = 5.6 \end{cases} \quad (20)$$

可以认为如果中间态的  $c$  夸克碎裂到末态的  $D$  介子的过程中丢失能量非常小,即丢失能量小于选取的截断  $\delta_s m_b$  时,末态不足以强子化到多体过程时,这时末态就是二体的遍举末态过程,从而可以得到  $c\bar{c} \rightarrow D^{*+} D^-$  的几率可以取为

$$P_{c\bar{c} \rightarrow D^* D}^- = \int_{1-\delta_s}^1 F_{c \rightarrow D^*}(z) dz \int_{1-\delta_s}^1 F_{\bar{c} \rightarrow D}(z) dz \quad (21)$$

$c\bar{c} \rightarrow D^{*+} D^{*-}$  的几率也可类似处理。取  $\delta_s = 0.13$ , 可得

$$\begin{cases} \text{Br}(Y \rightarrow \gamma^* \rightarrow D^* D^{*-}) = (3.4 \pm 0.7) \times 10^{-5} \\ \text{Br}(Y \rightarrow \gamma^* \rightarrow D^{*+} D^{*-}) = (5.3 \pm 0.6) \times 10^{-5} \end{cases} \quad (22)$$

这种方法得到的理论预言与通过正负电子对撞中数据给出的理论预言数量级一致,而且符合很好,相对差异小于  $1/4$ ,因此在后续分析中,类似的估计遍举衰变过程的分支比时,本文将选取  $\delta_s = 0.13$ 。

还可利用碎裂函数给出色八重态部分遍举衰变的估计。如果认为 Fock 态中软胶子的能量远小于  $\delta_s m_b$ ,类似色单态部分的做法,取上限  $\langle Y | b\bar{b}({}^3S_1^8) | Y \rangle = 2.8 \times 10^{-4} \text{ GeV}^3$  和取  $\delta_s = 0.13$ ,可以得到

$$\begin{cases} \text{Br}(Y({}^3S_1^8) \rightarrow D^* D^{*-}) = (2.9 \pm 0.4) \times 10^{-5} \\ \text{Br}(Y({}^3S_1^8) \rightarrow D^{*+} D^{*-}) = (4.2 \pm 0.5) \times 10^{-5} \end{cases} \quad (23)$$

可以和色单态部分的分支比互相比拟。

### 3 $\eta_b$ 到 $D\bar{D}$ 的衰变

本文已经得到色单态部分  $\eta_b$  衰变到粲夸克对的分支比,也利用碎裂函数讨论色单态部分的  $\eta_b \rightarrow D\bar{D}$  遍举末态分支比。同样取  $\delta_s = 0.13$ , 可得

$$\begin{cases} \text{Br}(\eta_b({}^1S_0) \rightarrow D^* D^{*-}) = (1.9 \pm 0.3) \times 10^{-5} \\ \text{Br}(\eta_b({}^1S_0) \rightarrow D^{*+} D^{*-}) = (1.4 \pm 0.2) \times 10^{-5} \end{cases} \quad (24)$$

$\text{Br}[\eta_b \rightarrow D^{*+} D^{*-}]$  远远大于文献[9]中给出的  $10^{-8}$ ,但是远远小于文献[10]中给出的  $10^{-3} < \text{Br}[\eta_b \rightarrow D^{*+} D^{*-}] < 10^{-2}$ 。而对于  $\text{Br}[\eta_b \rightarrow D^{*+} D^{*-}]$  和文献[9]中的  $\text{Br}[\eta_b \rightarrow D^{*+} D^{*-}] \sim 10^{-5}$  在同一个数量级。

由  $\text{Br}[\eta_b \rightarrow c\bar{c}g]$  对胶子能量的分布可知(见图 3),末态中胶子能量大的区域占主导地位。本

文也可类似于利用碎裂函数来估计这一过程对遍举过程分支比的贡献。当要求末态 2 个  $D$  介子能量都大于  $(1 - \delta_s) m_b$  时,可以得到这一部分对  $\eta_b \rightarrow D\bar{D}$  遍举末态分支比的贡献要小于  $10^{-6}$ ,比色单态  ${}^1S_0^1$  的圈图过程  $\eta_b({}^1S_0^1) \rightarrow c\bar{c} \rightarrow D\bar{D}$  贡献的分支比要小一个数量级,从而可以忽略。

色八重态部分  $\text{Br}[\eta_b({}^3S_1^8) \rightarrow c\bar{c}]$  也可对  $\eta_b \rightarrow D\bar{D}$  的遍举末态分支比产生贡献,如果认为色八重态的 Fock 态中软胶子的能量远小于  $\delta_s m_b$ ,那么同样的利用碎裂函数来估计遍举过程的做法方法可得

$$\begin{cases} \text{Br}(\eta_b({}^3S_1^8) \rightarrow D^* D^{*-}) = (1.3 \pm 0.2) \times 10^{-5} \\ \text{Br}(\eta_b({}^3S_1^8) \rightarrow D^{*+} D^{*-}) = (1.7 \pm 0.3) \times 10^{-5} \end{cases} \quad (25)$$

需要指出的是,碎裂函数本是用来计算单举末态,此处利用碎裂函数来计算遍举过程的分支比是非常简略的估计,一方面是因为联合碎裂过程中没有考虑粲夸克对产生时是联合产生的,另外一方面忽略了强子化的动力学机制。这里利用截断来限制末态为遍举末态只是一个尝试,碎裂函数对于遍举分支比只能给出数量级的估计,而不能代替完整的结果。

## 4 结 论

综合而言,在 NRQCD 的因子化框架下,研究了 S 波自旋单态的底夸克偶素  $\eta_b$  到  $c\bar{c}$  的分支比,另外还讨论了 S 波自旋单态的  $\eta_b$  和自旋三重态的  $Y$  衰变到  $D\bar{D}$  遍举末态的分支比,得到如下结论:

1) 利用 BaBar 实验组测量得到  $\text{Br}[Y \rightarrow D^{*+} X] = (2.52 \pm 0.13 \pm 0.15)\%$ ,将其他的色单态部分贡献取为 0,同时忽略其他色八重态  $b\bar{b}({}^1S_0^8)$  和  $b\bar{b}({}^3P_0^8)$  的贡献,可以得到色八重态矩阵元  $\langle Y | b\bar{b}({}^3S_1^8) | Y \rangle$  的最大值是  $\langle Y | b\bar{b}({}^3S_1^8) | Y \rangle < 2.8 \times 10^{-4} \text{ GeV}^3$ ,考虑到通过  $Y$  的轻子衰变给出的色单态矩阵元  $\langle Y | b\bar{b}({}^1S_1^1) | Y \rangle = 3.8 \text{ GeV}^3$ ,二者的比值小于  $7.5 \times 10^{-4}$ ,NRQCD 的速度标度律给出的比值  $v^4/(2N_c) \approx 1.7 \times 10^{-3}$  要比实验的上限大 20 倍以上。

2) 得到色单态部分通过胶子圈图贡献  $\text{Br}[\eta_b({}^1S_0^1) \rightarrow c\bar{c}] = 5.1 \times 10^{-3}$ ,而通过格点计算的矩阵元,可以得到色八重态  $\text{Br}[\eta_b({}^3S_1^8) \rightarrow c\bar{c}] = 4.6 \times 10^{-3}$ ,色八重态部分和色单态部分可以比拟,虽然  $\text{Br}[\eta_b({}^1S_0^1) \rightarrow c\bar{c}g] = 24 \times 10^{-3}$  的色单态部分贡献比较大,但是  $c\bar{c}g$  中胶子主要在高能量区域,因此此过程可以用来研究色八重态矩阵元。

3) 本文估算得色单态  $\bar{b}b(^1S_0^1)$  部分的圈图过程给出  $\eta_b \rightarrow D\bar{D}$  遍举末态分支比  $\text{Br}(\eta_b \rightarrow D^{*+}D^{*-}) = (1.4 \pm 0.2) \times 10^{-5}$ , 这一分支比远远大于在文献[9]中给出的  $\text{Br}[\eta_b \rightarrow D^{*+}D^{*-}] \approx 10^{-8}$ , 同时还远远小于在文献[10]中给出的  $10^{-3} < \text{Br}[\eta_b \rightarrow D^{*+}D^{*-}] < 10^{-2}$ . 矢量粒子加标量粒子末态  $\text{Br}(\eta_b \rightarrow D^{*+}D^-) = (1.9 \pm 0.3) \times 10^{-5}$  和在文献[9]中得到的  $\text{Br}[\eta_b \rightarrow D^{*+}D^{*-}] \sim 10^{-5}$  在同一个数量级。而色八重态部分对遍举过程  $\eta_b \rightarrow D\bar{D}$  分支比的贡献和色单态部分的贡献在同一个数量级。

相关预言可以通过 Belle II 的实验进行验证, 从而得到更多强子化的信息。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] BODWIN G T, BRAATEN E, LEPAGE G P. Rigorous QCD analysis of inclusive annihilation and production of heavy quarkonium[J]. Physical Review D, 1995, 51(3):1125-1171.
- [ 2 ] PATRIGNANI C, PEDLAR T K, ROSNER J L. Recent results in bottomonium[J]. Annual Review of Nuclear and Particle Science, 2013, 63(1):21-44.
- [ 3 ] GAO Y J, ZHANG Y J, CHAO K T. Radiative decays of charmonium into light mesons[J]. Chinese Physics Letters, 2006, 23(9):2376-2378
- [ 4 ] SANG W L, CHEN H T, CHEN Y Q. Order- $v^4$  relativistic corrections to  $\Upsilon$  inclusive decay into a charm pair[J]. Physical Review D, 2012, 86(11):114004.
- [ 5 ] FRITZSCH H, STRENG K H. Quarkonium decay into heavy quark flavors[J]. Physics Letters B, 1978, 77(3):299-303.
- [ 6 ] ZHANG Y J, CHAO K T. Upsilon decay to two-charm quark jets as a probe of the color octet mechanism[J]. Physical Review D, 2008, 78(9):094017.
- [ 7 ] BODWIN G T, BRAATEN E, KANG D, et al. Inclusive charm production in  $\chi_b$  decays [J]. Physical Review D, 2007, 76(5):054001.
- [ 8 ] PATRIGNANI C, AGASHE K, AIELLI G, et al. Review of particle physics[J]. Chinese Physics C, 2016, 40:100001.
- [ 9 ] JIA Y. Which hadronic decay modes are good for  $\eta_b$  searching: Double  $J/\psi$  or something else? [J]. Physical Review D, 2008, 78(5):054003.
- [ 10 ] MALTONI F, POLOSA A D. Observation potential for  $\eta_b$  at the Tevatron[J]. Physical Review D, 2004, 70(5):054014.
- [ 11 ] BODWIN G T, LEE J, SINCLAIR D K. Spin correlations and velocity-scaling in color-octet NRQCD matrix elements [J]. Physical Review D, 2005, 72(1):014009.
- [ 12 ] SEUSTER R, ABE K, AIHARA H. Charm hadrons from fragmentation and B decays in  $e^+e^-$  annihilation at  $\sqrt{s} = 10.6$  GeV [J]. Physical Review D, 2006, 73(3):032002.
- [ 13 ] ZENAIEV O. Charm production and QCD analysis at HERA and LHC[J]. European Physical Journal C, 2017, 77(3):151
- [ 14 ] UGLOV T, ABE K, ABE T. Measurement of the  $e^+e^- \rightarrow D^{(*)+}D^{(*)-}$  cross-sections[J]. Physical Review D, 2004, 70(7):071101.
- [ 15 ] LIU K Y, HE Z G, ZHANG Y J, et al. Understanding the  $e^+e^- \rightarrow D^{(*)+}D^{(*)-}$  processes observed by Belle [J]. Journal of Physics G, 2010, 37(4):045005.
- [ 16 ] BRODSKY S J, LEPAGE G P. Helicity selection rules and tests of gluon spin in exclusive QCD processes[J]. Physical Review D, 1981, 24(11):2848.

### 作者简介:

孙佳佳 女, 硕士研究生。主要研究方向: 物理学。

熊畅 女, 博士, 实验员。主要研究方向: 物理学。

## S-wave spin singlet bottomonium decay to charm quark pair

SUN Jiajia, ZHANG Yujie, XIONG Chang\*

(School of Physics and Nuclear Energy Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The decay of S-wave spin singlet bottomonium state to charm quark pair is studied, and the decay of S-wave spin singlet state and triplet bottomonium state to D meson pair is studied. By using the branching ratio of the decay of S-wave spin triplet bottomonium state to D meson measured by the BaBar Collaboration, it is found that the color octet matrix element of the S-wave spin triplet bottomonium state is much smaller than the theoretical prediction, and the theoretical prediction is a factor of 20 times larger than the experimental upper limit. The theoretical predictions of the branching ratio of S-wave spin singlet bottomonium state to charm quark pair can be used to probe the color octet mechanism. The theoretical predictions of the branching ratio of S-wave spin singlet bottomonium state to D meson pair are different from those of other literature. These predictions can be validated by Belle II Collaboration to obtain more information about hadronization.

**Keywords:** bottomonium; charm quark; D meson; color octet mechanism; fragmentation function

北京航空航天大学学报

**Received:** 2018-05-10; **Accepted:** 2018-05-18; **Published online:** 2018-05-25 16:20

**URL:** [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180522.1747.002.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180522.1747.002.html)

**Foundation item:** the Fundamental Research Funds for the Central Universities

\* **Corresponding author.** E-mail: 09434@buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn      jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0272

# 基于全局稀疏地图的 AGV 视觉定位技术

张浩悦, 程晓琦, 刘畅, 孙军华\*

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)



**摘 要:** 为了实现自动导引车 (AGV) 在复杂工业环境下的高精度定位, 克服环境变化给定位带来的影响, 提出了基于全局稀疏地图的视觉定位方法。首先, 设计了大容量二维编码点, 作为人工路标铺设在工业环境的地面; 然后, 基于一种四边形识别算法, 在复杂工业环境中准确分割和识别二维编码点; 最后, 利用二维编码点提供的编码信息, 鲁棒匹配图像中的特征点, 并以此为基础, 使用一种分参数块优化的三维重建策略, 实现了工业环境的大规模地图构建, 为 AGV 视觉定位提供了一种稀疏电子地图。AGV 视觉的定位通过匹配车载视觉传感器图像中的特征点和稀疏电子地图实现。停车重复定位精度小于  $0.5 \text{ mm}$ , 角度偏差小于  $0.5^\circ$ , 轨迹平均位移误差小于  $0.1\%$ 。实际应用结果表明, 该方法能在复杂工业环境中实现 AGV 视觉的定位, 定位的速度和精度方面都满足工业应用的要求, 为 AGV 的视觉定位提供了新的思路。

**关键词:** 自动导引车 (AGV); 视觉定位; 三维重建; 稀疏地图; 编码点

**中图分类号:** V249.325; TP242.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5965(2019)01-0218-09

自动导引车 (Automated Guided Vehicle, AGV) 是一种用于搬运物料的无人驾驶导航车, 目前已广泛应用于码头、仓库、车站等各种场所。定位系统是 AGV 的关键组成部分, 为 AGV 的自动导航提供实时的位姿信息。目前 AGV 存在多种定位方式, 采用不同定位方式的 AGV 的性能指标、成本及应用领域是不同的<sup>[1]</sup>。传统的定位方式有电磁定位、激光定位、GPS 定位和惯导定位等。电磁定位方式预先埋设电线, 通过感应高频交变电流的电磁场实现定位, 成本低且易于实现但精度较低, 且路径固定不易更改。采用激光定位 AGV 的定位精度高, 有更高的测量距离, 对外部光照的变化不敏感, 但技术较为复杂, 成本也比较高, 容易受到环境中透明和反光物体的影响<sup>[2]</sup>。GPS 定位能提供绝对坐标, 但在室内场景中难以使用且定位误差较大。惯导定位通过积分计算状态, 存在积累误差, 同时存在静态漂移。近年来, 利用低成本相机实现导航定位的技术受到

了越来越多的关注, 机器视觉的飞速发展工业 AGV 的自动导航提供了新的可能。视觉定位方式通过视觉传感器动态感知四周环境, 采用图像处理、立体视觉等相关技术, 实现 AGV 的定位。

为了实现 AGV 的视觉定位, 需要事先给 AGV 提供一张三维“地图”, 供 AGV 搜索匹配, 以此完成位姿的求解任务。地图是一种包含环境空间几何信息的结构, 有多种表示方法<sup>[3]</sup>。其中, 基于路标的稀疏地图是常用的一种表示法。稀疏地图将环境抽象为一些表示空间三维坐标的 3D 路标, 利用“描述子”对这些 3D 路标进行区分。视觉传感器根据这些独一无二的描述子对检测到的图像特征点和地图进行匹配, 从而实现数据关联, 实现位姿的求解。对于 3D 路标的表示, 点特征是最常用的描述方法, 如 ORB (Oriented fast and Rotated Brief) 特征<sup>[4]</sup>和 SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) 特征<sup>[5]</sup>等, 另外一些更复杂的几何特征也被用于描述 3D 路标, 如线特征、平面和

收稿日期: 2018-05-15; 录用日期: 2018-08-10; 网络出版时间: 2018-08-27 11:27

网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180823.0901.001.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20180823.0901.001.html)

\* 通信作者: E-mail: sjh@buaa.edu.cn

**引用格式:** 张浩悦, 程晓琦, 刘畅, 等. 基于全局稀疏地图的 AGV 视觉定位技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 218-226. ZHANG H Y, CHENG X Q, LIU C, et al. Visual localization technology of AGV based on global sparse map[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 218-226 (in Chinese).

灭点<sup>[6]</sup>。

全局定位算法要求在任何位置,都能根据传感器的数据,唯一地、重复地解算出AGV的位姿。这极大地简化了定位策略,然而这通常是困难的<sup>[7]</sup>。基于视觉的全局定位方式面临噪声和混淆两大问题的挑战。视觉传感器的噪声来自于光照变化、图像抖动和模糊、遮挡等多个方面,极大地影响到3D特征的检测和匹配。混淆即通过视觉无法分辨相似场景(如走廊)<sup>[8]</sup>。在AGV作业的工业环境中,环境通常是动态变化的(如白天和夜晚光照的变化,托盘的移动等),同时存在大量的相似场景(如货架等),使得采用自然特征构建地图的策略变得困难。一方面动态环境使得难以建立稳定不变的3D路标,另一方面是大量重复的场景给数据关联带来挑战。Wulf等<sup>[9]</sup>为了克服动态场景的影响,使用仓库天花板的结构和特征作为导航定位依据。但是在智能泊车的应用场景中,AGV需要在上方放置托盘运送汽车,同时AGV自身高度也极低(30 cm左右),很难看到工业环境的天花板。在环境中铺设位置已知、易于识别、不会变化的人工路标,可以辅助机器人的定位,如在激光定位中使用的反光板。然而,在工业应用中,为了能覆盖AGV行驶的所有路径,往往需要设置大量的人工路标,如何准确无误地匹配这些路标是具有挑战性的问题<sup>[10]</sup>。

本文针对以上问题,考虑AGV车身高度低,上方运载货物的限制,提出了一种新的二维编码点作为人工路标,并以此为基础实现鲁棒的特征匹配,构建了一种稀疏地图,供AGV搜索匹配,实现AGV精确的全局定位。二维编码点设计为方形棋盘格样式,通过黑白色块编码ID信息,作为二维编码点的区分标志;二维编码点作为人工路标铺设于地面,使用单反相机进行拍摄,通过一种分参数块的三维重建方法,实现厂房的大规模地图构建,生成一种稀疏电子地图。实验结果表明,使用本文方法,AGV视觉传感器能准确识别每个编码点的编码信息,并和提供的电子地图鲁棒匹配,完成定位任务,速度和精度都能满足工业应用要求。

## 1 二维编码点的设计、检测及解码

### 1.1 二维编码点的设计

工业环境中使用的人工路标要求能够易于识别,同时,如果每个编码点都有自己独一无二的编码信息,可大大简化多幅图像之间的匹配<sup>[11]</sup>。常

用的人工编码点为环状编码点,如图1(a)所示<sup>[12]</sup>。此种编码点利用环带编码信息。由于圆形的周期性,解码时需要以每一位为起点进行解码,然后进行选择;同时周期性使得编码容量较小。本文设计一种新的大容量二维编码点,如图1(b)所示。编码点设计为底色为黑色的正方形,使用时印刷在白色背景上。方形二维编码点仅有4种可能的解码方向,提高了解码效率。编码区域划分为 $7 \times 7$ 的棋盘格,每一格可为黑色或者白色,分别对应二进制编码0和1。49位二进制数字作为二维编码点的编码结果,为了方便起见,二进制编码结果会映射到从0开始编码的十进制数字。理论上可以有 $2^{49}$ 种编码方式,容量满足工业大规模应用的需求。

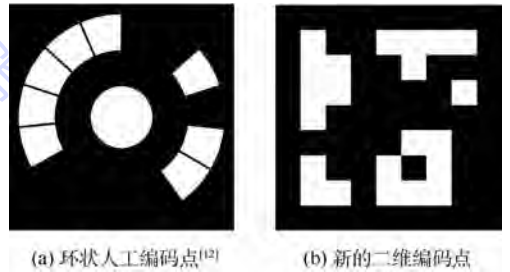


图1 编码点

Fig. 1 Coded points

### 1.2 二维编码点的检测

二维编码点检测的关键是识别编码点的黑色四边形边框。基于此提出了一种四边形区域的检测算法,以提取出二维编码点可能存在的区域。检测算法的流程如下。

#### 1.2.1 图像预处理

图像预处理包括滤除图像噪声和提取显著的图像特征。首先对原始图像(图2(a))进行平滑处理,使用高斯模板进行滤波,减小噪声带来的影响。然后使用传统的Canny算子<sup>[13]</sup>检测图像梯度显著变化的点,并对这些点进行连接和聚类,获得图像中的轮廓(图2(b))。同时对图像进行Harris角点检测<sup>[14]</sup>,获得整幅图像每个像素点的角点响应值(图2(c))。

#### 1.2.2 四边形检测

对于四边形的检测基于如下的假设:具有4个顶点的轮廓为四边形。对于每一组轮廓,判断是否为四边形的算法步骤如下:

1) 将轮廓的每个像素扩大至 $3 \times 3$ 的区域作为图像掩模。

2) 对Harris角点的响应图使用掩模,将掩模以外的区域设置为0(图2(d))。



图2 二维编码点的检测和识别

Fig. 2 Detection and recognition of two-dimensional coded points

3) 寻找全图响应值最大的点,作为一个顶点并记录;并对角点响应图该点处进行非极大值抑制(NMS)。

4) 重复步骤3),直至最大响应值小于一定的阈值。

5) 若记录的顶点数目为4,则判断该轮廓为四边形;否则舍弃该轮廓。

由此可判断该轮廓是否为四边形,如果是四边形,还记录保存了四边形的4个顶点。检测结果中会包含一些凹四边形,如图2(e)左上角,凹四边形明显不符合二维编码点的透视投影规律,因此对所有检测结果用Graham scan算法<sup>[15]</sup>进行

筛选,保留下仅为凸包的四边形(图2(f))。

### 1.3 二维编码点的解码

如图2(g)所示,解码通过二维平面点的单应变换实现。首先在理想二维编码点上建立坐标系,同时获得所有编码位置的坐标,并将其投影到实际图像中。理想二维编码点的坐标系建立在中心,从左下角开始,按顺时针顺序4个角点坐标设为 $(-1, -1), (-1, 1), (1, 1), (1, -1)$ 。设理想二维编码点角点齐次坐标为 $X_1 = (u_1, v_1, 1)^T$ ,角点图像坐标为 $X_2 = (u_2, v_2, 1)^T$ ,两者之间的变换关系为

$$X_2 = HX_1 \quad (1)$$

式中: $H = (h_1, h_2, h_3)^T$ 为 $3 \times 3$ 的单应矩阵,变换式(1)有

$$[X_2]_x \times HX_1 = 0 \quad (2)$$

其中: $[ ]_x$ 表示向量之间的叉乘。由式(2)得

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0}_{1 \times 3} & -X_1^T & v_2 X_1^T \\ X_1^T & \mathbf{0}_{1 \times 3} & -u_2 X_1^T \\ -v_2 X_1^T & u_2 X_1^T & \mathbf{0}_{1 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1^T \\ h_2^T \\ h_3^T \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (3)$$

即单应矩阵的求解转换为最小二乘问题 $AX = \mathbf{0}$ ,其中 $h_i$ 表示 $H$ 矩阵的第 $i$ 行。对 $A$ 做奇异值得解 $A = UDV^T$ 取 $V$ 最后一列,即为单应矩阵 $H$ 。

得到单应矩阵后,使用单应矩阵把每一位编码投影到图像中得到相应的坐标,根据图像中该像素点的灰度值和阈值,决定该点编码为0还是1对49个位置解码得到最终的二进制编码串,从而实现二维编码点的解码。把解码结果和编码数据库进行对照匹配,获得最终的编码ID。如果在数据库中没有该编码,则舍弃该四边形。为了使识别结果更加鲁棒,在设计二维编码点时应遵循以下原则:

1) 同一编码点一次顺时针旋转 $90^\circ$ ,可以获得4种不同的编码(没有对称的情况)。为了使二维编码点具有旋转不变性,4种编码点只使用一种,其余编码情况舍弃。同时避免对称的二维编码点设计。

2) 舍弃简单的二维编码点设计,如全黑和全白。

3) 二维编码点编码值之间汉明距离大于一定的阈值,使之易于区分。

二维编码点的最终检测结果包含4个有序角点像素坐标和编码ID,同时可以通过4个角点坐标计算出编码点的中心坐标。因此,结合编码ID,每个二维码可以提供5个特征点用于特征匹

配。每个特征点的 ID 和像素坐标使用散列表存储,匹配通过散列表的查找实现,在速度和准确率上都优于依靠特征描述子的特征匹配方法。

## 2 全局稀疏地图重建算法

基于上述的特征点匹配方法,提出一种全局稀疏地图的重建算法,流程如图 3 所示。重建算法将相机内参数加入到参数列表中,省去了相机标定的过程。

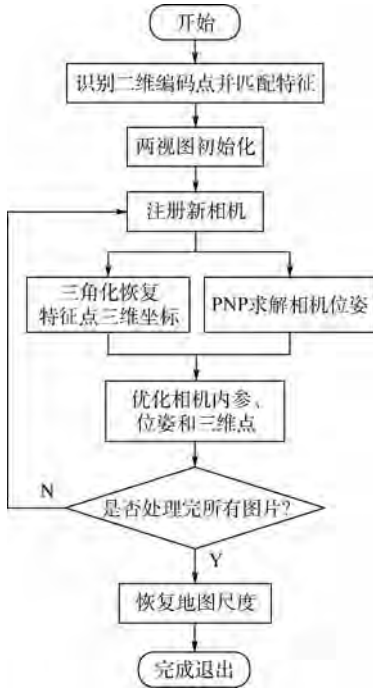


图 3 全局稀疏地图重建流程图

Fig.3 Flowchart of global sparse map reconstruction

### 2.1 基于多模型的两视图初始化

初始化是指由最初两视图建立世界坐标原点和初始三维点的过程,其结果的好坏直接影响随后重建算法的收敛性。初始化必须被谨慎处理,因此同时采用单应矩阵初始化模型和本质矩阵初始化模型<sup>[16]</sup>。用  $H$  表示初始化的平面单应矩阵,  $E$  表示初始化的本质矩阵。对于初始化结果,采用如下的评价方式:

$$S_H = \sum d(x_1, Hx_2) + \sum d(x_2, H^{-1}x_1) \quad (4)$$

$$S_E = \sum \zeta(x_2, Ex_1) + \sum \zeta(x_1^T E, x_2) \quad (5)$$

式中:  $x_1$  和  $x_2$  为图像中对应点的图像齐次坐标;  $d(\cdot)$  为图像像素点之间的欧氏距离;  $\zeta(\cdot)$  为点到极线的垂直距离。对于二者的选择,采用如下的经验式:

$$R = \frac{S_H}{S_E} \quad (6)$$

若  $R > 0.6$ , 则选择平面单应模型;反之,则选

择本质矩阵的初始化模型。由经验值可以看出,因为是在平坦地面铺设的二维编码点,所以更倾向于使用平面单应模型进行初始化。

### 2.2 分参数块优化地图参数

初始化过后,对于每一帧新到来得图片,使用三角化算法和迭代 PNP 算法<sup>[16]</sup>,进行新的三维点生成和新相机的注册。值得注意的是,为了在 AGV 行驶过程中没有盲区,每个二维码提供的特征点都需要记录在电子地图中。因此在三维重建过程中,并不判断新恢复的特征点质量的好坏,也不舍弃任何特征点,对于三维重建结果较差的点,通过优化算法进行优化更新。

三维地图重建的过程中,相机参数并没有被标定,而是被赋予了一定的初值,三维点和相机姿态的初始值也是不准确的,需要不断对相机内参、相机姿态和三维点进行优化。优化的指标通常为重投影误差,即三维点通过相机投影模型投影到图像中的坐标,和拍摄图片中对应点像素观测值的残差。用数学表达式为

$$\arg \min_{P_{in}, P_{ex}, X_w} \| (u, v) - \pi(P_{in}, P_{ex}, X_w) \|^2 \quad (7)$$

式中:  $\pi(\cdot)$  表示相机的投影模型,采用针孔成像模型;  $P_{in}$  为相机内参数,包括焦距、主点和畸变,拍摄过程中相机内参保持不变;  $P_{ex} = \{R_i, t_i\}_{i \in \phi}$  为相机的位姿参数,包括旋转和平移,  $\phi$  为所有的图片集合;  $X_w = \{x_k, y_k, z_k\}_{k \in p}$  为所有三维点的坐标,  $p$  为所有的三维点集合。对于该问题,待优化参数非常多,在优化求解式(7)的过程中非常容易发散。为了使算法收敛,需要给每个待估计的状态量赋予良好的初值。对于相机外参数  $P_{ex}$ ,使用迭代 PNP 算法的结果作为初值;对于三维点  $X_w$ ,使用三角化的结果作为初值;对于相机内参数  $P_{in}$ ,以像素为单位的焦距  $f$  由式(8)确定:

$$f = F\kappa \quad (8)$$

式中:  $F$  为相机镜头的焦距;  $\kappa$  为像素有效长度的倒数。相机拍摄画面的宽为  $w$ , 高为  $h$ , 设置主点参数为  $C_x = \frac{w}{2}, C_y = \frac{h}{2}$ 。对于径向畸变系数,使用经验值  $K_1 = 0.1, K_2 = 0.05$ 。

在优化过程中,采用相机位姿参数、机内参数和三维点坐标分块优化的方法来避免算法发散。在两视图初始化过后,首先固定相机的位姿参数进行优化,然后固定相机内参数和三维点坐标,优化相机位姿参数;当新的图片加入地图过后,首先优化相机内参数,然后固定相机内参数,优化相机位姿参数和三维点坐标。每过一段时间,对所有的参数进行一次整体优化。同时,通过固定参数

减少参数量,避免算法发散。相机内参数在图片多于一定张数过后,就不再参与优化,而是固定下来,相当于完成了相机的标定。如果相机外参数或三维点参与优化到达一定次数,则不再将其加入优化算法,而是作为最后的测量值保存下来。整个优化算法流程如下, $P_{in}$ 为固定相机内参数。

**算法 1** 优化重投影误差算法。

输入:相机内参数  $P_{in}$ ,相机外参数  $P_{ex}$ ,三维点坐标  $X_w$ 。

输出:参数优化结果。

**步骤 1** 初始化。优化目标函数  $\arg \min_{P_{in}, X_w} \|(u, v) - \pi(P_{in}, P_{ex}, X_w)\|^2$ 。优化目标函数  $\arg \min_{P_{ex}} \|(u, v) - \pi(P_{in}, P_{ex}, X_w)\|^2$ 。

**步骤 2** 注册新相机。优化目标函数  $\arg \min_{P_{in}} \|(u, v) - \pi(P_{in}, P_{ex}, X_w)\|^2$ 。优化目标函数  $\arg \min_{P_{ex}, X_w} \|(u, v) - \pi(P_{in}, P_{ex}, X_w)\|^2$ 。

**步骤 3** 若注册新相机数目超过一定阈值,  $P_{in} \leftarrow \dot{P}_{in}$ 。

**步骤 4** 若某一相机位姿参数  $P_{ex}^i$  参与优化次数超过预定次数,则从  $P_{ex}$  中剔除。

**步骤 5** 若某一三维点坐标参数  $X_w^i$  参与优化次数超过预定次数,则从  $X_w$  中剔除。

**步骤 6** 若距离上一次全局优化,新注册的相机超过一定数目,进行一次全局优化,优化目标函数为  $\arg \min_{P_{in}, P_{ex}, X_w} \|(u, v) - \pi(P_{in}, P_{ex}, X_w)\|^2$ 。

**步骤 7** 返回步骤 2,直至所有图片处理完毕。

分参数块优化的策略使得算法对于较差的初始值鲁棒性更强。通过不断剔除参数,避免了参数规模的无限制增长,使得算法更容易收敛。

**3 基于稀疏地图的定位技术**

AGV 的定位通过提取图像中的二维编码点和稀疏地图进行数据关联,求解 PNP 实现。AGV 位姿的解算结果包括航向(和世界坐标系  $x$  轴的夹角)和位置( $x, y$  坐标)2 部分。如图 4 所示,一共有世界坐标系 ( $O_w$ )、相机坐标系 ( $O_c$ ) 和 AGV 坐标系 ( $O_v$ ) 3 个坐标系。世界坐标系的  $xy$  平面建立在地平面上;使用激光跟踪仪将 AGV 坐标系建立在 AGV 正中心,并使得  $x$  轴朝前、 $z$  轴垂直向上。 $T_{cw}$  为 PNP 解算结果,  $T_{cv}$  由事先标定得到。 $T_{av}$  为将  $b$  系坐标下的点转换到  $a$  系下所使用的变换。

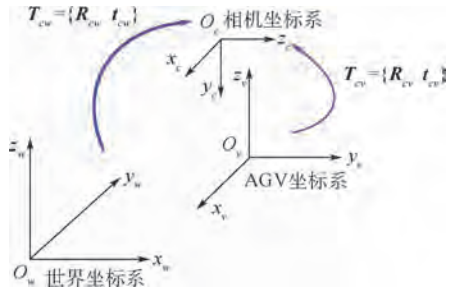


图 4 坐标系转换关系

Fig. 4 Transformation relationship of coordinate system

由坐标转换关系,推导 AGV 小车在世界坐标系下的平移和旋转为

$$R_{wv} = R_{cw}^{-1} R_{cv} \quad (9)$$

$$t_{wv} = R_{cw}^{-1} (t_{cv} - t_{cw}) \quad (10)$$

AGV 正方向为  $r_v = (1, 0, 0)^T$ , 将其转换到世界坐标系下:

$$r_w = (X_{rw}, Y_{rw}, Z_{rw})^T = R_{wv} r_v \quad (11)$$

设正航向和世界坐标系  $x$  轴的夹角为  $\theta$ , 得到航向角度为

$$\cos \theta = \frac{X_{rw}}{\sqrt{X_{rw}^2 + Y_{rw}^2}} \quad (12)$$

因为世界坐标系  $xy$  平面建立在地平面上,取  $t_{wv}$  的前二维坐标即为 AGV 的  $x$  坐标和  $y$  坐标。

**4 实验和实际应用**

**4.1 大规模地图构建实验**

在  $55\text{ m} \times 15\text{ m}$  的工业环境中以  $0.2\text{ m}$  的间距铺设二维编码点,共 20 671 个。为了减少相机噪声带来的影响,提高二维编码点角点提取的精度,使用尼康 D810 单反拍摄高分辨图片 ( $7360\text{ 像素} \times 4912\text{ 像素}$ )。相机使用焦距为  $24\text{ mm}$  镜头,视觉传感器有效像素为 3 635 万,尺寸大小为  $35.9\text{ mm} \times 24\text{ mm}$ , 计算得到相机内参初值  $f_x = f_y = 4979.512$ 。设置主点的初始参数为  $C_x = 3\ 680$ ,  $C_y = 2456.5$ 。共顺序拍摄 540 张照片(图 5)。建图采用离线的方式,整个过程需要 5 h 左右。最后以场地的短边作为参照恢复尺度,并将稀疏地图转换到以 0 号编码点为原点,  $xy$  平面建立在地面,  $x$  为场地长边,  $z$  轴朝上的坐标系。重建结果如图 6 所示。为了评定重建结果,使用地面的二维编码点边长作为参考,二维编码点使用 360 dpi (dpi 为每英寸点数)的打印机打印,边长的理论值为  $(28.00 \pm 0.07)\text{ mm}$ 。使用统计方法的评定结果见表 1。随机选取地面上的编码点,用精度为  $1\text{ mm}$  卷尺进行小、中和大 3 种尺度的测量,并和重建稀疏地图中相应的距离比较,比较结果如

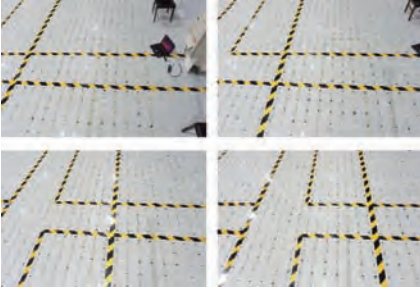


图 5 用于重构的原始图像

Fig. 5 Original image for reconstruction

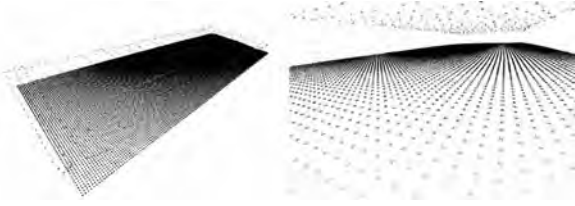


图 6 用于定位的稀疏地图

Fig. 6 Sparse map for localization

表 1 二维编码点边长重构统计结果

Table 1 Statistical results of two-dimensional code side length reconstitution mm

参数	平均值	平均误差	标准差
数值	27.98	0.05	0.08

图 7(a) ~ (c) 所示。小、中、大 3 种尺度的平均误差分别为 0.5、5.2、6.7 mm, 误差的标准差分别为 0.4、2.1、4.8 mm。

#### 4.2 AGV 定位实验

搭载视觉定位系统的 AGV 如图 8 所示, 矩形标注的部分即为视觉定位系统。AGV 使用麦克纳姆轮, 能在拥挤的工业环境中最大限度地减少转弯半径。车体高度为 293 mm, 中间部留有 720 mm × 800 mm 的空间, 用于安装视觉定位系统。由于高度较低, 相机视场较小, 因此使用 2 个相机, 其中一个相机作为另一个相机的辅助相机, 当主相机视野中没有检测到二维编码点时, 使用辅助相机进行检测。该系统选用 2 个大恒 MER-200-20GM-P 工业相机, 该型号相机帧率为 20 帧/s, 分辨率为 1 628 像素 × 1 236 像素, 使用触发器控制 2 个相机同时获取图像; 在侧面下部安装 2 个条形光源, 减少光照变化带来的影响。

为了验证该定位方法的可行性, 在真实环境中分别对 AGV 的主要状态进行定位实验。

##### 4.2.1 静态定位实验

AGV 的最常见的状态停在某个车位长时间静止。将 AGV 停在某一车位, 并记录  $x$ 、 $y$  和角度的数据, 结果如图 9 所示。由图 9 可知, 定位结果

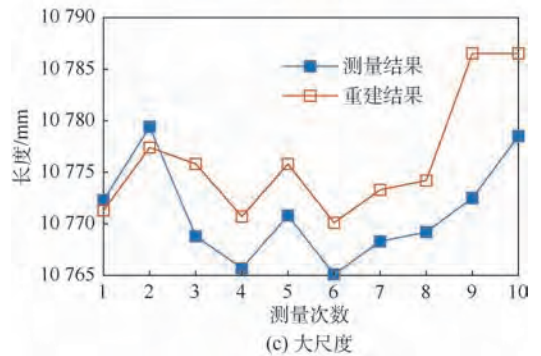
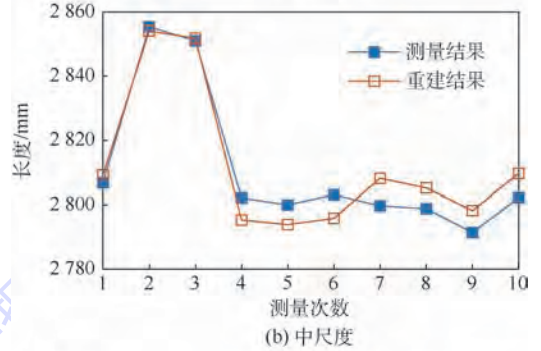
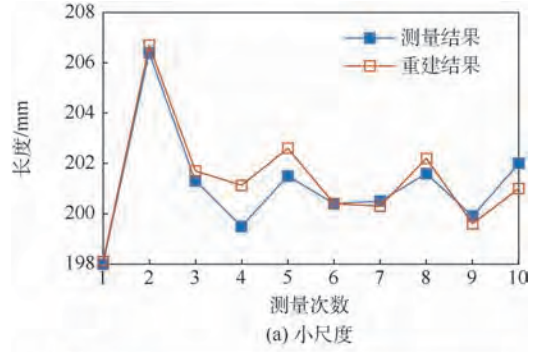


图 7 测量值和重建值结果的对比

Fig. 7 Comparison of measurement and reconstruction results



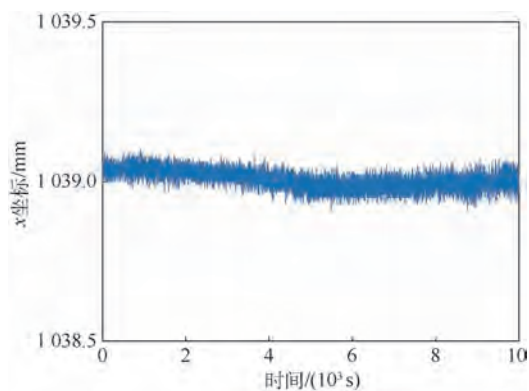
图 8 搭载视觉定位系统的 AGV

Fig. 8 AGV equipped with visual localization system

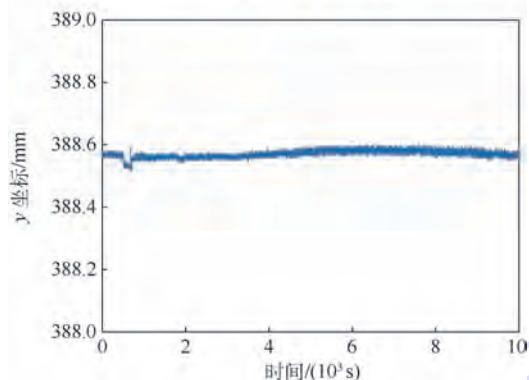
稳定且没有漂移。 $x$  坐标最大变化范围为 0.21 mm, 重复定位精度为 0.03 mm;  $y$  坐标最大变化范围为 0.19 mm, 重复定位精度为 0.01 mm; 角度最大变化范围为 0.12°, 重复定位精度为 0.01°。

##### 4.2.2 动态定位实验

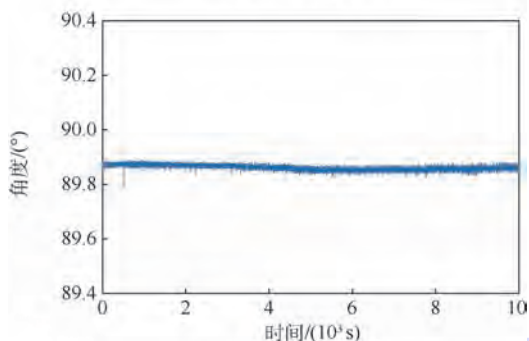
使用控制器控制 AGV 在 B201、B104 两个车位之间反复行驶。每次使 AGV 停在 B201 车位相同的起点, 设定路径如下: 从 B201 车位出发, 前



(a) x坐标变化趋势



(b) y坐标变化趋势



(c) 角度变化趋势

图9 静态定位实验

Fig. 9 Experiment of static localization

进 6.23 m 到达行车道,左转 90°前进 2.80 m,右转 90°前进 6.12 m 进入 B104 车位。使用控制器控制 AGV 在该预定路径行驶,并记录定位系统的输出。记录的 10 次往返过程中起点和终点的停车定位数据见表 2。 $x$  坐标最大变化范围为 1.0 mm,重复定位精度为 0.3 mm; $y$  坐标数据最大变化范围为 0.9 mm,重复定位精度为 0.2 mm;角度最大变化范围为 0.9°,重复定位精度为 0.3°。

为了能让 AGV 每次都准确进入狭窄的车位,需要很高的轨迹重复精度。对于整条行驶路径的重复定位精度,采用 KITTI<sup>[17]</sup> 中视觉里程计的评价方式。该方法用于评价 2 条轨迹之间的相近程度,最后结果用 2 条轨迹之间的位置误差表示,越小则说明 2 条轨迹越相近。按照原始方法,设置

评价尺度为 10 m。对于记录的定位数据进行处理,每一组数据从第 10 帧开始运动,直到终点停止,共记录 951 帧数据。记录的 4 组轨迹如图 10 所示,对记录的 4 组定位数据两两进行比较,获得最终结果见表 3。轨迹重复定位精度(即平均位移误差)为 0.082%,轨迹的重复精度很高。

表2 动态定位结果

Table 2 Result of dynamic localization

车位	测量次数	x 坐标/mm	y 坐标/mm	角度/(°)
B201	1	31814.1	13511.2	89.4
	2	31813.9	13512.1	89.5
	3	31814.0	13512.0	89.6
	4	31813.9	13511.8	90.3
	5	31814.0	13511.7	89.4
	6	31813.8	13511.9	89.9
	7	31814.1	13512.0	89.8
	8	31813.9	13511.9	89.8
	9	31813.9	13511.8	89.6
	10	31813.7	13511.8	89.6
B104	1	34600.7	1154.9	270.5
	2	34600.7	1154.9	270.3
	3	34601.6	1155.3	270.5
	4	34601.7	1155.2	270.8
	5	34601.3	1155.4	271.1
	6	34601.7	1155.2	270.3
	7	34601.5	1154.9	270.8
	8	34600.9	1154.8	270.8
	9	34600.9	1154.7	270.7
	10	34600.8	1155.1	271.2

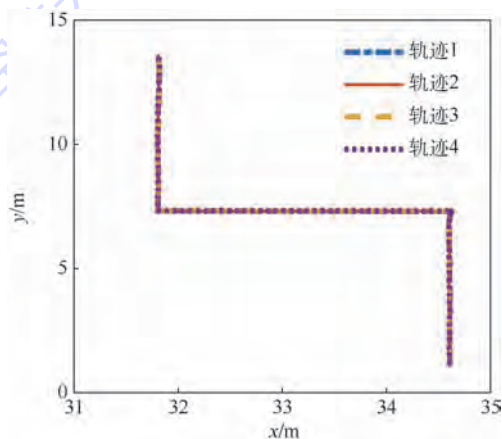


图10 行驶轨迹

Fig. 10 Travelling trajectory

表3 定位轨迹的误差

Table 3 Error of localization trajectory %

比较次数	位移误差	平均位移误差
1	0.071	0.082
2	0.084	
3	0.082	
4	0.087	
5	0.082	
6	0.084	

目前采用该方法的定位系统已在工业环境中稳定测试超过一个月。完全满足工业应用的要求。

## 5 结 论

1) 提出了一种新的大容量人工标志点,能在工业环境中大规模布置。并以此为基础,构建了一种可用于 AGV 视觉定位的稀疏地图。该稀疏地图稳定不变,且匹配策略简单鲁棒。

2) AGV 定位时不需要当前状态的先验信息,有效地解决了机器人的“绑架”问题;仅根据当前状态解算 AGV 位姿,不会出现累积误差,解决了“静态漂移”的问题,同时也保证了定位的重复性非常高。

3) 路线灵活,没有预设轨迹,AGV 在全场任何位置均可获得定位信息。

实验和实际应用表明,该方法简单实用,不受环境变化影响,AGV 运行频率达 20 Hz,停车重复定位精度小于 0.5 mm,角度偏差小于 0.5°,轨迹平均位移误差小于 0.1%,为 AGV 的视觉定位方法提供了新的思路。

**致谢** 感谢中国航天科工集团第三研究院北京星航机电装备有限公司对本研究的大力支持。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] 张建鹏,楼佩煌,钱晓明,等.多窗口实时测距的视觉导引 AGV 精确定位技术研究[J].仪器仪表学报,2016,37(6):1356-1365.  
ZHANG J P, LOU P H, QIAN X M, et al. Research on precise positioning technology by multi-window and real-time measurement for visual navigation AGV[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(6):1356-1365 (in Chinese).
- [ 2 ] KIM J, CHUNG W. Localization of a mobile robot using a laser range finder in a glass-walled environment[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6):3616-3627.
- [ 3 ] CESAR C, LUCA C, HENRY C, et al. Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 32(6):1309-1332.
- [ 4 ] RUBLEE E, RABAU D V, KONOLIG K, et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF[C] // International Conference on Computer Vision. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2012: 2564-2571.
- [ 5 ] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):91-110.
- [ 6 ] LU Y, SONG D. Visual navigation using heterogeneous landmarks and unsupervised geometric constraints[J]. IEEE Trans-

actions on Robotics, 2017, 31(3):736-749.

- [ 7 ] ROLAND S, ILLAH R N, DAVIDE S, et al. Introduction to autonomous mobile robots[M]. Cambridge: MIT Press, 2010:345-346.
- [ 8 ] 曹天扬,蔡元浩,东方明,等.结合图像内容匹配的机器人视觉导航定位与全局地图构建系统[J].光学精密工程,2017,25(8):2222-2232.  
CAO T Y, CAI Y H, DONG F M, et al. Robot vision system for keyframe global map establishment and robot localization based on graphic content mathing[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(8):2222-2232 (in Chinese).
- [ 9 ] WULF O, LECKING D, WAGNER B. Robust self-localization in industrial environments based on 3D ceiling structures[C] // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007:1530-1534.
- [ 10 ] DAVIDE R, ROBERTO O, CRISTIAN S, et al. AGV global localization using indistinguishable artificial landmarks[C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011:287-292.
- [ 11 ] 杨剑,韩建栋,秦品乐.视觉测量中可纠错的编码点识别及提取[J].光学精密工程,2012,20(10):2293-2299.  
YANG J, HAN J D, QIN P L. Correcting error on recognition of coded points for photogrammetry[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(10):2293-2299 (in Chinese).
- [ 12 ] 段康容,刘先勇.摄影测量中编码标记点检测算法研究[J].传感器与微系统,2010,29(8):74-77.  
DUAN K R, LIU X Y. Detection algorithm on circular encoded point in photogrammetry[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2010, 29(8):74-77 (in Chinese).
- [ 13 ] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, PAMI-8(6):679-698.
- [ 14 ] HARRIS C, STEPHENS M. A combined corner and edge detector[C] // Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference, 1988:147-151.
- [ 15 ] ANDERSON K R. A reevaluation of an efficient algorithm for determining the convex hull of a finite planar set[J]. Information Processing Letters, 1978, 7(1):53-55.
- [ 16 ] RICHARD H, ANDREW Z. Multiple view geometry in computer vision[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004:159-173.
- [ 17 ] ANDREAS G, PHILIP L, RAQUEL U. Are we ready for autonomous driving? The KITTI vision benchmark suite[C] // 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2012:3354-3361.

## 作者简介:

张浩悦 男,硕士研究生。主要研究方向:机器视觉、三维重建。

孙军华 男,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:机器视觉、精密视觉测量。

# Visual localization technology of AGV based on global sparse map

ZHANG Haoyue, CHENG Xiaoqi, LIU Chang, SUN Junhua\*

(School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to realize the high-precision localization of automated guided vehicle (AGV) in complex industrial environment and overcome the influence of environment change, a vision localization method based on a global sparse map was proposed. First, a large-capacity two-dimensional coded point was designed, which was set on the ground as an artificial landmark. Based on a quad recognition algorithm, the coded points were accurately segmented and identified in complex industrial environment. The feature points from different images were properly matched by using the coded information provided by coded points. Then, a block-optimization three-dimensional reconstruction algorithm was designed to build a map for a large-scale industrial environment, which provided a sparse electronic map for AGV visual localization. The visual localization of AGV was realized by matching the feature points from the visual sensor and sparse electronic maps. The repeated precision of AGV is less than 0.5 mm, the angle deviation is less than  $0.5^\circ$ , and the average displacement error of trajectory is less than 0.1%. The practical application shows that the method can realize the visual localization of AGV in complex industrial environment. The speed and precision of localization both meet the requirements of industrial application, which provides a new way for vision-based localization of AGV.

**Keywords:** automated guided vehicle (AGV); visual localization; three-dimensional reconstruction; sparse map; coded point

# 《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人,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,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,作者有权改投它刊。在此之前,请勿一稿多投,否则一切后果自负。

3.3 来稿一经刊登,即赠送单行本。

3.4 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:100083 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 405,407,409 房间

电 话:(010)82315594,82338922,82314839,82315426

E-mail: jbuua@buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn

http://www.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

(以下按姓氏笔划为序)

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45卷第1期 2019年1月

JOURNAL OF BEIJING UNIVERSITY OF  
AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS  
(JBUA)

(Monthly, Started in 1956)

Vol.45 No.1 January 2019

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 100083

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 北航文化传媒集团

发行范围 国内外发行

联系电话 (010) 82315594 82338922  
82314839

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 100083, P. R. China)

Chief Editor ZHAO Qinping

Edited and Published by Editorial Board of JBUA

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

Distributed by BUAA Culture Media Group Limited

Telephone (010) 82315594 82338922  
82314839

E-mail jbuaa@buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn

刊号 ISSN 1001-5965  
CN 11-2625/V

国内定价 50.00元/期

ISSN 1001-5965



9 771001 596199