基于结构件实例库的飞机机体结构快速建模

冯昊成 罗明强 刘 虎 武 哲

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为充分利用和借鉴已有的飞机结构件设计方案实例信息,研究了面向对象的参数化结构件实例描述方法,提出了飞机结构件实例库的总体框架并开发了系统的原型. 研究了基于实例库的飞机机体结构设计措施及建模方法,提出了翼面结构和机身结构的参数化描述和模型构建方法,并在一个开放式的飞机总体设计环境中完成了基于实例库的飞机结构快速设计功能. 最后通过应用示例说明了该系统和方法的有效性.

关 键 词: 飞机设计; 结构设计; 实例库; 参数化造型

中图分类号: V 221

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)05-0579-06

Rapid aircraft structure modeling based on structure case base

Feng Haocheng Luo Mingqiang Liu Hu Wu Zhe

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to utilize and study more effectively from existing examples of aircraft structure information, the parametric object-oriented description method of structure instance was studied. The architecture framework of aircraft structure case base was proposed and the prototype system was established. The design method of aircraft structure based on structure case base was studied. The parametric modeling method of fuselage structure and wing structure was represented. The functionality of rapid aircraft structure design based on structure case base was achieved in an open conceptual aircraft design system. An instance is given to illustrate the effectiveness of the system and methods.

Key words: aircraft design; structural design; case base; parametric modeling

飞机设计是一项涉及多学科的复杂工程,相对于严谨缜密的理论科学而言,飞机设计更是多学科知识的综合运用与权衡,更需要有大量的经验和积累数据作为指导[1]. 飞机结构设计与强度分析是飞机设计的主要工作之一,在飞机研制中占有非常重要的地位. 根据结构设计的原始条件与基本设计要求,应用已有的结构设计经验与知识,提出合理的设计方案以及进行具体的部件和零构件设计[2]是飞机结构设计的主要内容. 因而如何实现结构设计方案和设计知识的积累与复用对飞机设计而言是一项重要的课题,实例库的组织和建立便是其中一种有效的途径. 在这方面国外已经进行了相关的知识库、实例库与结构设计系统的研究与开发[3-7],相比之下我国尚缺乏相应的结构件实例库系统.

现代飞机设计中,结构布置与建模往往作为专业问题在初步或详细设计阶段予以考虑,其模型的构建是一项技术含量极高而又复杂繁琐的工作,由于建模方法的多样性和不规范性,在外形变化之后,结构模型的调整将变得异常困难,从很大程度上影响了飞机的设计效率. 因此,有必要在总体设计前期引入机体结构设计与建模的考虑,建立一套规范化的结构模型快速设计手段,从而为强度、重量、气动弹性等各项分析提供更为准确的原始数据,也为后续的结构详细设计和强度分析奠定基础. 随着信息与计算机技术的发展,计算机

收稿日期: 2011-03-03; **网络出版时间**: 2012-05-22 16:23

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120522.1623.025.html

作者简介: 冯昊成(1986 -),男,北京人,博士生,feng_slamdunk@163.com.

辅助飞机概念设计系统得到了大量的研究与应用[8-12],但多数飞机概念设计系统并未将机体结构的设计纳入考虑范畴,很难满足现代飞机在方案阶段结构快速设计的需求.

从以上需求出发,本文研究了面向对象的参数化飞机结构件实例描述方法,提出了飞机结构件实例库的总体框架和实现方式,建立了系统原型.提出了飞机方案设计阶段机体结构的参数化建模方法,利用北京航空航天大学自主研发的开放式飞机总体设计系统 OpenCADS(Open Conceptual Aircraft Design System)[13]实现了基于结构件实例库的飞机机体结构参数化设计.

1 结构件实例参数化描述方法

建立结构件实例的参数化描述是构建飞机结构件实例库的前提与基础,以下从实例参数化描述应满足的要求和根据此要求所提出的描述方法两方面进行论述.

1.1 实例描述方法应满足的要求

飞机结构件是构成飞机机体骨架和气动外形,能承受和传递载荷的受力构件,包括框、梁、壁板等多种类型[14].在具有对飞机结构件这一研究对象唯一、完整、确定的参数化描述后,后续的各类结构设计分析工作才能够顺利有效地进行和完成.

参数化的飞机结构件实例描述方法应满足以下要求:

1)结构件实例的参数化描述应包括结构件的完整几何和非几何属性数据.结构件的几何属性包括定位参数(如外型曲面、构件定位曲面等)和截面形状参数(如厚度、宽度等);构件的非几何属性主要包括结构件的功能和性能属性,为结构的实例化设计提供基本数据与参考.

2)结构件实例是飞机结构设计中某一类典型结构零件或组合件的抽象,所以结构件实例的几何与非几何信息都需要进行相应的简化,且必须具有良好的设计与参考普适性.

3)考虑到在总体设计的各阶段利用结构件实例数据的需要,实例的描述数据必须清晰地进行分类分层.

4)由于数据来源的局限性,数据结构必须具有扩展性.

1.2 面向对象的结构件实例参数化描述

为了更准确清晰地描述结构件实例的参数以及检索的便捷,需要对面向对象的实例参数进行分层分类.文献[15]中提出了用面向对象的"层级模型"来表示飞机总体概念方案实例,即以自顶向下的实例-信息源-属性组-属性段-独立属性5层结构进行分解表示.本研究进一步对层级模型进行了改进,即在结构件实例的描述上采用了面向对象的层级模型描述方法,如图1所示,图中各个层级含义分别为:

1)实例:实例层主要记录结构件名称、编号、版本号和基本描述等结构件实例基础信息.

2)信息源:信息源记录的主要是与结构件实例方案初始设计相关的信息,如结构件实例的几何参数和非几何参数.

3)属性组:属性组按照信息源信息的不同进行细分,如几何参数可分为直接定义的几何参数和可根据直接参数计算得出的间接几何参数.

4)属性段:属性段是对部分属性组信息的细化分类,如结构件的直接几何参数可进一步分为定位参数、截面形状和截面尺寸等.

5)独立属性:独立属性是结构件实例参数层级模型的最低层次,记录了结构件方案实例的基

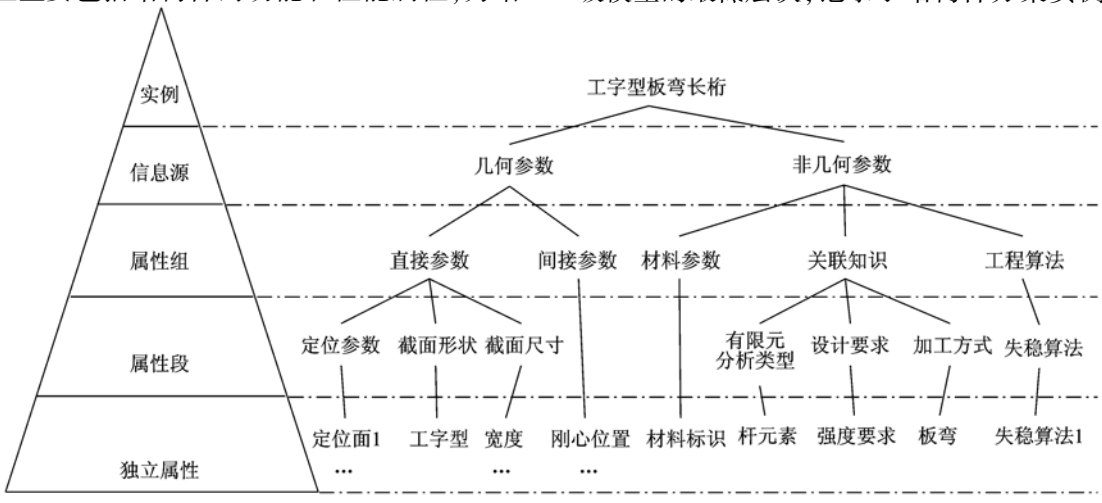


图1 结构件实例层级模型

础属性,如描述截面形状、尺寸等的所有参数.

2　结构件实例库总体设计及实现

2.1　系统总体设计

在以上改进的结构件实例层级模型定义及结构件参数梳理的基础上,根据结构件设计中的应用需求,提出了结构件实例库系统的总体框架结构,如图 2 所示,结构件实例库由管理层、数据层和应用层 3 部分组成.

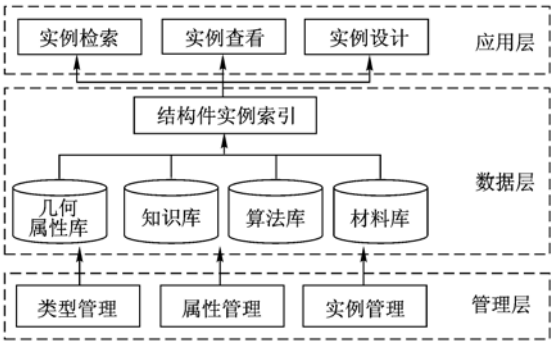


图 2　飞机结构件实例库系统框架结构

数据层是整个结构件实例库的主体,包括结构件几何属性库、关联知识库、工程算法库和材料库等结构件基础数据库,通过统一的结构件实例索引机制把以上各基础数据库中的数据与各结构件实例进行关联,方便查询与应用结构件实例时进行调用.

管理层负责实现实例库系统的管理与维护,包括结构件类型管理、结构件属性管理和实例管理. 通过类型管理用户可以管理实例库中的结构件类型数据,比如新建、修改和删除梁、肋、长桁、框、蒙皮壁板等结构件类型及其子类型;通过属性管理用户可以管理各类型结构件的属性信息,包括定义和修改各类型结构件的几何参数类型、材料参数类型、关联知识类型和工程算法类型等所需的数据属性种类;通过实例管理用户可以在定义完结构件类型和结构件属性后进行单个或批量结构件实例的新建、修改和删除,完成结构件实例的定义. 通过以上模块可以完成对数据层中的结构件实例数据进行增加、删除和修改等维护管理工作.

应用层直接面向结构设计人员,提供结构件实例检索和实例查看的基本功能,并通过结构件实例设计接口为实例库系统外部的 CAD 设计系统提供几何与材料等结构件信息,从而完成基于实例库的结构件实例建模功能. 应用层通过实例索引机制与数据层进行数据交互.

2.2　系统构造与实现

在软件实现上结构件实例库采用基于客户端/服务器(C/S, Client/Service)的软件结构,基于 Oracle 并利用 VC. NET 进行开发. 其中管理层和应用层为客户端程序,数据层存储于服务器,整个实例库系统支持通过网络的分布式访问.

结构件实例库系统的建立,最重要的是各种结构件实例数据的搜集与整理. 通过查阅飞机结构设计、飞机手册等相关书籍和文献资料[16-20]等途径,整理并归纳了适用于方案阶段结构设计的梁、肋、长桁、框、蒙皮壁板等 5 大类典型结构件共 68 个结构件实例. 根据 1.1 节和 1.2 节的实例描述方法梳理了各结构件的简化几何模型属性,包括各结构件的定位和截面信息等数据,图 3 为典型结构件几何属性描述. 总结了各结构件相关的结构设计知识与工程算法数据[21],搜集了常用的结构设计材料信息[22-23]并进行了入库. 实例库系统支持用户自定义增加新实例,借助实例库管理层的客户端程序,用户可以通过 GUI 交互录入结构件实例数据或以 xml 数据文件格式对实例数据进行批量导入.

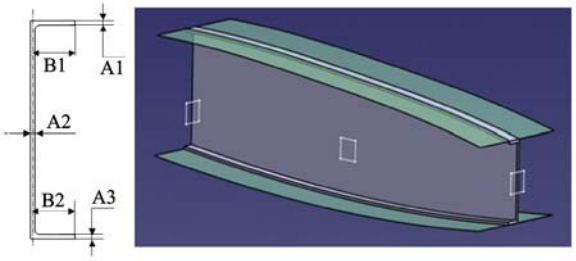


图 3　典型结构件几何属性描述

3　基于实例库的机体结构参数化设计

通过实例库中的结构件实例几何信息进行方案阶段机体结构的参数化设计是结构件实例库的重要功能. 利用实例库的参数化实例设计接口,以北京航空航天大学自主研发的开放式飞机总体设计系统 OpenCADS[13] 为基础实现了基于结构件实例库的参数化机体结构快速设计. 以下从机体结构参数化建模方法和系统实现逻辑等方面进行详细论述.

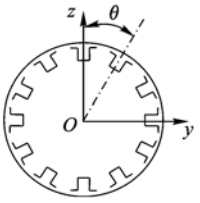
3.1　机身结构参数化建模方法

3.1.1　*机身结构参数化布置*

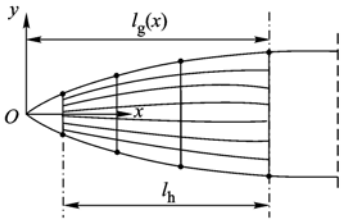
典型的飞机机身结构形式有梁式结构、桁架式结构、硬壳式结构、桁条式结构和桁梁式结构[2]. 现代军用飞机和民用运输机的机身结构受力形式多采用桁条式和桁梁式结构,由于这两种结构形式在参数化描述和建模方法上类似,故本

文仅讨论在方案设计阶段桁梁式结构的参数化建模方法,桁条式结构按照桁梁式结构的建模方法进行简化处理即可.

桁梁式机身结构的主要结构件包括桁梁、长桁、机身隔框和蒙皮 4 种类型. 在布置上其描述参数包括:①机身蒙皮厚度;②桁梁数量和长桁数量;③各桁梁和长桁沿机身轴向的起始位置和结束位置;④各桁梁和长桁在机身剖面上沿蒙皮周边的布置位置;⑤机身隔框的数量及各隔框沿机身轴向的布置位置. 在描述桁梁和长桁在机身某剖面上沿蒙皮周边的布置位置时采用以下的方法:取该剖面的型心 O' 为极点,顺时针方向为极角度正方向,与绝对坐标系的 z 方向重合为 0°极角建立该剖面的极坐标系. 这样由于桁梁和长桁以机身蒙皮内曲面为布置约束,故以桁梁或长桁的横截面型心轴线与机身剖面型心 O' 的连线与 0°极角线的夹角 θ 即可唯一地确定桁梁或长桁的布置位置. 图 4 为典型桁梁式机身结构布置的参数化描述,图 4a 和图 4b 的 y 坐标一致,均为绝对坐标系坐标.



a 桁梁和长桁在机身剖面上的参数化布置



$l_g(x)$—隔框沿机身轴向的布置坐标;

l_h—桁梁或长桁沿机身轴向的布置长度.

b 桁梁、长桁和隔框沿机身轴向的参数化布置

图 4 典型桁梁式机身结构布置的参数化描述

3.1.2 机身结构建模方法

以下分别讨论适用于方案设计阶段桁梁式机身结构的蒙皮、隔框、桁梁和长桁的几何建模方法.

蒙皮的建模以机身外形曲面模型为基础和约束,沿曲面法向向内放缩一定的蒙皮厚度,最后施加蒙皮材料属性即可完成带厚度的机身蒙皮模型构建.

机身隔框有环形刚框式、腹板式、构架式等结构类型[2]. 由于大部分的机身普通框和加强框采用环形刚框式结构,所以仅讨论环形刚框式隔框的建模方法. 除了机身隔框的数量及各隔框沿机身轴向的布置位置等布置参数,机身隔框的建模还需要环形刚框的环形宽度和隔框的截面参数等隔框几何参数. 建模的过程为:①通过隔框布置参数、机身曲面获取隔框的实际站位剖面;②通过环形刚框的归一化结构件截面参数、环形刚框的环形宽度、站位剖面和机身蒙皮曲面模型得出隔框站位面处的实际结构件截面形状;③将隔框结构件截面以机身蒙皮曲面外形为约束,沿站位剖面与机身曲面的交线为引导线进行放样生成实体模型;④附加隔框的材料属性信息. 图 5 为机身隔框的几何建模过程.

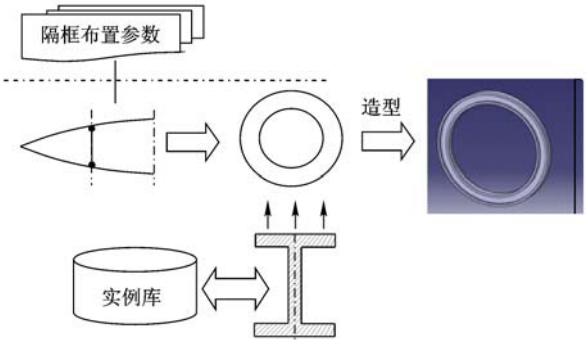


图 5 机身隔框几何建模过程

桁梁和长桁的建模方法类似,以桁梁的建模方法为例,建模过程为:①根据桁梁的布置参数获取桁梁的起点和终点站位剖面及沿机身轴线方向的布置平面;②获取桁梁截面几何参数信息;③将桁梁结构件截面以机身蒙皮曲面外形为约束,沿布置平面与机身曲面的交线为引导线进行放样生成实体模型;④附加桁梁的材料属性信息. 图 6 为机身桁梁的几何建模过程.

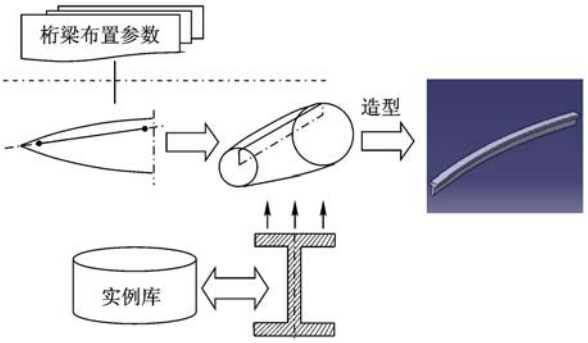


图 6 机身桁梁几何建模过程

3.2 机翼结构参数化建模方法

机翼结构由蒙皮、桁条、翼梁、纵墙和翼肋等 5 种类型结构件构成. 蒙皮骨架式翼面是最常见的翼面结构形式,又可分为梁式、单块式和多墙式结构形式[2]. 梁式结构是应用最为广泛的机翼结

构形式,而在模型构建方法上单块式和多墙式结构与梁式结构类似,所以本文仅讨论在方案设计阶段梁式机翼的参数化建模方法,单块式和多墙式结构参考梁式机翼进行推广即可.

在布置上梁式机翼结构的描述参数[24]包括①机翼蒙皮厚度;②翼梁、纵墙、桁条的数量和翼平面布置点;③翼肋数量和翼平面布置点.

梁式机翼结构的蒙皮建模与机身蒙皮方法类似,采用以翼面曲面模型为约束加厚的方法进行几何建模.

翼肋的建模过程为:①通过布置参数得到翼肋的布置平面及起点和终点站位剖面;②获取归一化结构件截面参数并以蒙皮曲面为约束得出翼肋实际截面形状;③将翼肋结构件截面以机翼蒙皮曲面外形为约束沿布置平面进行放样生成实体模型;④附加翼肋的材料属性信息. 图 7 为机翼翼肋的几何建模过程.

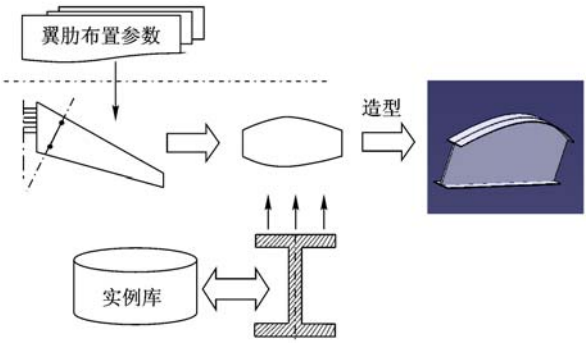


图 7　机翼翼肋几何建模过程

翼梁、纵墙和桁条等机翼纵向构件的建模方法与机身桁梁类似,通过布置参数和结构件几何属性参数获取结构件实际截面,再沿机翼蒙皮放样即可生成结构件几何模型. 图 8 为机翼翼梁和纵墙的几何建模过程.

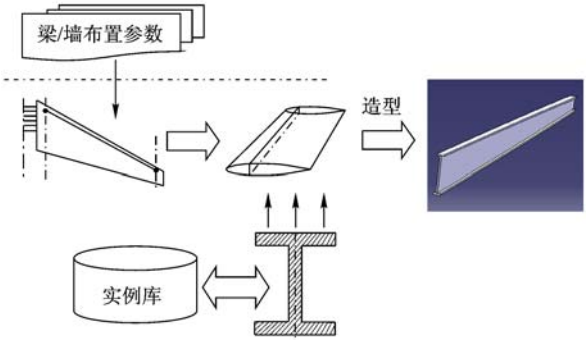


图 8　机翼翼梁/纵墙几何建模过程

3.3　交互式结构快速设计实现逻辑

基于 3.1 节和 3.2 节讨论的机体结构参数化建模方法,以开放式飞机总体设计系统 OpenCADS 为基础实现了基于结构件实例库的交互式结构快速设计,实现逻辑如图 9 所示,具体过程为:①在 OpenCADS 环境中完成机体蒙皮曲面和机体结构布置参数的定义;②在结构件实例库中交互式地选择所需的结构件实例并通过实例库的参数化实例设计接口将结构件定位面参数和归一化截面参数等结构件几何属性参数传入 OpenCADS 环境中;③结合机体蒙皮曲面和结构布置参数将结构件几何属性参数实例化生成结构的实际定位面和实际截面信息;④以机体蒙皮曲面为约束进行参数化造型并附加材料属性生成机体结构模型.

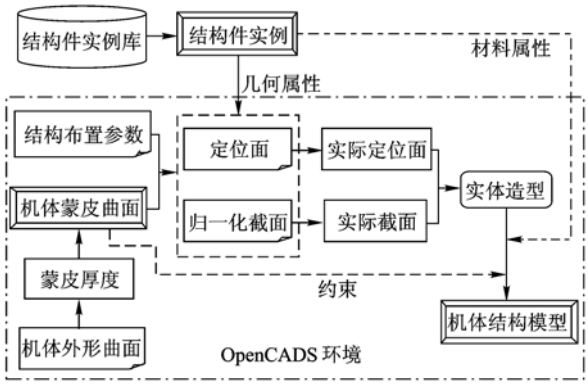


图 9　基于实例库的飞机结构快速设计实现逻辑

4　应用实例

为说明本文所提出方法的有效性,给出了基于结构件实例在 OpenCADS 系统中所实现的某型飞机机体结构设计方案和建模模型.

本方案机身采用桁梁式结构,桁梁设计选取结构件实例库中的工字型截面挤压型材桁梁结构件实例,长桁设计选取结构件实例库中的 L 型截面板弯成形结构件实例,机身隔框设计选取结构件实例库中的环形刚框式钣金普通框结构件实例和环形刚框式机加工加强框结构件实例;翼面结构设计采用多墙式结构,翼梁和纵墙设计选取 T 型截面挤压型材组合腹板梁结构件实例,翼肋设计采取工字型截面整体机加成形肋结构件实例. 图 10 和图 11 为结构设计方案整体和细节模型. 以此结构设计方案模型为基础附加材料属性信息

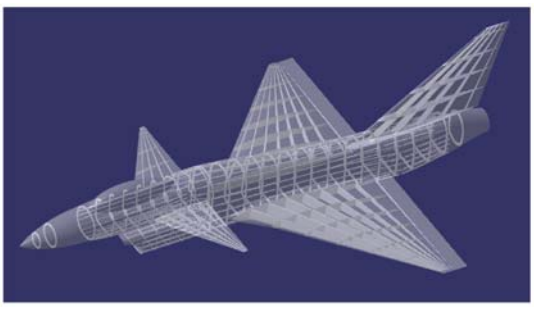


图 10　基于实例库实现的某型飞机结构设计方案

由系统计算所得的结构主要质量特性见表 1.

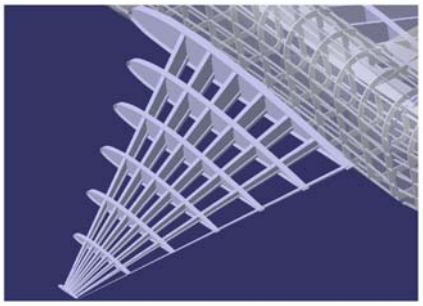


图 11 方案模型细节

表 1 方案机体结构质量特性

类别	质量/kg	质心 x/m	质心 y/m	质心 z/m
所有结构	3 660.891	7.878 9	0	1.952 5
机身结构	1 463.704	7.505 7	0	2.029 9
机翼结构	1 390.564	8.575 8	0	1.574 0
鸭翼结构	322.910	4.702 5	0	2.550 9
垂尾结构	483.713	12.125 0	0	3.020 3

5 结 论

1）研究了参数化结构件实例描述方法应满足的要求，提出了改进的层级模型实例描述体系，建立了面向对象的、抽象化且完整的飞机结构件实例参数化描述方法.

2）在飞机结构件实例层级模型定义及参数化描述的基础上，提出了结构件实例库系统的总体框架结构，开发了系统原型. 利用公开资料搜集与整理了各种典型结构件实例数据并进行了数据的入库.

3）研究了方案设计阶段飞机机体结构的参数化设计方法，利用实例库的参数化实例设计接口，以开放式飞机总体设计系统 OpenCADS 为基础实现了基于结构件实例库中的结构件实例几何信息的参数化机体结构快速设计，并通过一个应用示例验证了方法和系统的有效性.

参考文献（References）

[1] 顾诵芬. 飞机总体设计[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2001
Gu Songfen. Aircraft conceptual/preliminary design [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2001(in Chinese)

[2] 郦正能，张玉珠，方卫国. 飞行器结构学[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2005：23－26
Li Zhengneng, Zhang Yuzhu, Fang Weiguo. Aircraft structural analysis [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2005: 23－26(in Chinese)

[3] Simos D: PIANO user's guide[EB/OL]. United Kingdom: Lissys Limited, 2008[2011－02－21]. http://www.lissys.demon.co.uk/feats.html

[4] Masoud R R. A framework for preliminary design of aircraft structures based on process information[R]. NASA Grant NAG-1-1716, 1998

[5] Taylor R M, Weisshaar T A. Structural information technologies for aircraft design process improvement[R]. AIAA Paper 2000-1375, 2000

[6] Sensmerier M D, Samareh J R. Automatic aircraft structural topology generation for multidisciplinary optimization and weight estimation[R]. AIAA Paper 2005-1893, 2005

[7] Robinson J C, Yates E C, Jr, Turner M J, et al. Application of an advanced computerized structural design system to an arrow-wing supersonic cruise aircraft[R]. AIAA Paper 75-1038, 1975

[8] Leifsson L T. Multidisciplinary design optimization of low-noise transport aircraft [D]. Virginia: Department of Aerospace and Ocean Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2006

[9] Wagner T, Valasek J. Comparison of computational methods for stability and control analysis [R]. AIAA Paper 2005-140, 2005

[10] Fidanci M, Miller J R, Strauss D J. Integrating automated multidisciplinary optimization in preliminary design of non-traditional aircraft [R]. ADA380252, 2000

[11] Roskam J, Anemaat W A. General aviation aircraft design methodology in a PC environment [R]. AIAA Paper 96-5520, 1996

[12] 刘虎. 飞机概念设计支持理论与原型系统研究 [D]. 北京：北京航空航天大学航空科学与工程学院，2004
Liu Hu. Research on support theory and prototype system for aircraft conceptual design [D]. Beijing: School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004(in Chinese)

[13] 罗明强，刘虎，武哲. 开放式飞机总体设计环境的原型研究[J]. 航空学报，2008，29(4)：954－959
Luo Mingqiang, Liu Hu, Wu Zhe. Prototype system research on open conceptual aircraft design [J]. Acta Aeronautica et Astrnautica Sinica, 2008, 29(4): 954－959(in Chinese)

[14] 徐元铭，龚尧南. 飞机结构有限元模型化的智能化方法应用研究 [J]. 航空学报，2001，22 (3)：207－211
Xu Yuanming, Gong Yaonan. Application of intelligent method for finite element modeling of aeronautical structure[J]. Acta Aeronautica et Astrnautica Sinica, 2001, 22(3): 207－211(in Chinese)

[15] Liu Hu, Lu Xinlai, Luo Mingqiang, et al. Case-based reasoning for developing initial aircraft concepts [R]. AIAA Paper 2006-1487, 2006

[16] 王志瑾，姚卫星. 飞机结构设计[M]. 北京：国防工业出版社，2007
Wang Zhijin, Yao Weixing. Aircraft structures design [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2007(in Chinese)

[17] 日托米尔斯基 Г И. 飞机结构学[M]. 沈阳：中国航空工业集团沈阳飞机设计研究所，2000
Житомирский Г И. Aircraft structural analysis [M]. Shenyang: Shenyang Aircraft Design Institute, 2000(in Chinese)

（下转第 590 页）

5 结 论

本文提出了一种基于非线性路径跟随导引和自适应神经网络动态逆的受油机轨迹跟踪控制方法,其具有以下特点:

1) 将非线性路径跟随导引方法扩展到受油机轨迹跟踪的纵向导引控制.

2) 采用导引环与姿态控制环分离的控制策略,根据动力学关系将导引指令转换为姿态角指令,实现了导引律与控制律的综合.

3) 当存在尾涡等风扰动和模型不确定性时,本文轨迹跟踪控制方法的高度和侧向跟踪误差均小于 1.5 m,可以满足自动空中加油接近段的控制要求.

4) 所提出的基于角速率误差方程的 PI 型自适应神经网络姿态控制系统,能够有效避免大自适应增益时的振荡现象,具有较好地姿态跟踪控制能力.

参考文献 (References)

[1] Nalepka J P, Hinchman J L. Automated aerial refueling: extending the effectiveness of unmanned air vehicles[R]. AIAA 2005-6005, 2005

[2] Bloy W A, Khan M M. Modeling of the receiver aircraft in air-to-air refueling[J]. Journal of Aircraft, 2001, 38(2): 393-396

[3] 李大伟,王宏伦. 自动空中加油阶段加油机尾涡流场建模与仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(7): 776-780
Li Dawei, Wang Honglun. Wake vortex effect modeling and simulation in automated aerial refueling[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(7): 776-780 (in Chinese)

[4] Fravolini M L, Ficola A, Campa G, et al. Modeling and control issues for autonomous aerial refueling for UAVs using a probe-drogue refueling system[J]. Aerospace Science and Technology, 2004, 8(7): 611-618

[5] Tandale M D, Bowers R, Valasek J. Trajectory tracking controller for vision-based probe and drogue autonomous aerial refueling [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2006, 29(4): 846-857

[6] Keisuke E, Takeshi Y, Hiroyuki T, et al. Guidance and control system design for chase UAV[R]. AIAA 2008-6842, 2008

[7] Park S, Deyst J, How J P. Performance and Lyapunov stability of a nonlinear path-following guidance method[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2007, 30(6): 1718-1728

[8] Leitner J, Calise A, Prasad J. Analysis of adaptive neural networks for helicopter flight control[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1997, 20(5): 972-979

[9] Schumacher C. Adaptive flight control using dynamic inversion and neural networks[R]. AIAA 1999-4086, 1999

[10] Stevens B L, Lewis F L. Aircraft control and simulation[M]. New York: Wiley, 2003: 80-85

[11] 李大伟,王宏伦. 无人机自动空中加油飞行控制技术[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(增): 126-130
Li Dawei, Wang Honglun. UAV flight control in automated aerial refueling[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(suppl): 126-130 (in Chinese)

(编 辑:刘登敏)

(上接第 584 页)

[18] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册:第 10 册 [M]. 北京:航空工业出版社, 2005
Editorial Board of Aircraft Design Manual. Aircraft design manual: book 10 [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2005 (in Chinese)

[19] Niu C Y. Airframe structural design: practical design information and data on aircraft Structures[M]. 2nd ed. Hong Kong: Adaso Adastra Engineering Center, 2006

[20] Niu C Y. Composite airframe structures: practical design information and data[M]. Hong Kong: Conmilit Press, 1988

[21] 崔德刚. 结构稳定性设计手册 [M]. 北京:航空工业出版社, 1996
Cui Degang. Structural stability design manual [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1996 (in Chinese)

[22] 中国航空材料手册编委会. 中国航空材料手册:第 1 册 [M]. 北京:中国标准出版社, 2002
Editorial Board of China Aeronautical Materials Handbook. China aeronautical materials handbook: book 1 [M]. Beijing: Standards Press of China, 2002 (in Chinese)

[23] 中国航空材料手册编委会. 中国航空材料手册:第 3 册 [M]. 北京:中国标准出版社, 2002
Editorial Board of China Aeronautical Materials Handbook. China aeronautical materials handbook: book 3 [M]. Beijing: Standards Press of China, 2002 (in Chinese)

[24] 罗明强,冯昊成,刘虎,等. 民用飞机机翼结构快速设计及自动化调整 [J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(4): 468-471
Luo Mingqiang, Feng Haocheng, Liu Hu, et al. Rapid wing structure design and automated scheme adjustment for civil aircraft[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(4): 468-471 (in Chinese)

(编 辑:李 晶)