知识驱动飞机翼面结构快速设计

唐家鹏 席 平 胡毕富 许进峰

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191) (上海航天技术研究院, 上海 201109)

摘 要: 为提高飞机翼面结构初步设计阶段的质量和效率,对飞机翼面结构的建模过程进行研究. 定义了结构布局坐标系及构件位置参数引用规则,提出了基于模板的翼面结构快速建模的方法. 选择适合的参数化工具开发了知识驱动的飞机翼面结构的快速设计系统,将设计方法、规则及专家经验等知识进行封装,实现了翼面结构的自动布局并生成布置模型. 在此基础上针对模型不同单元的生成逻辑,分别进行了实体模型的建立,通过用户自定义特征(UDF, User-Defined Features)技术进行几何特征体的参数化建模,在布置模型基础上自动实例化. 最后通过飞机机翼翼盒结构实例验证了方法的可行性和有效性.

关 键 词: 翼面结构; 知识; 参数化建模; 布置模型; 实体模型

中图分类号: V 221

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2013)06-0808-05

Knowledge-driven rapid design on aircraft wing structure

Tang Jiapeng Xi Ping Hu Bifu

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Xu Jinfeng

(Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: In order to improve the quality and efficiency of aircraft wing structure in the preliminary design stage, modeling process of aircraft wing structure was studied. The coordinate of the structure layout and component location parameters rules were defined. Rapid modeling method of wing structure based on the template was represented. The appropriate parametric tool which can meet the development requirements of the wing structure was selected and rapid design system of knowledge-driven aircraft wing structure was developed. Knowledge of design methods, rules and expert experience was encapsulated into a template. Automatic layout of the wing structure was achieved and a layout model was generated. Solid modeling was processed separately according to the different generation logics of layout model. Parametric modeling of the geometric characteristics of the body through user-defined features (UDF) technology was accomplished and automatically instantiated on the basis of the layout model. Finally, aircraft wing box structure example was given to demonstrate that the method is feasible and effective.

Key words: wing structure; knowledge; parametric modeling; layout model; solid model

飞机的结构设计、分析和优化是一个不断迭代的过程,要求在初步设计阶段就能够快速进行结构布局. 基于知识的参数化设计是通过对产品的特征实例、尺寸参数和检验规则等元素的控制来驱动产品全关联参数的变更,从而达到模型的自动设计,是实现飞机翼面结构建模和快速设计的最佳手段[1]. 目前,飞机翼面结构的布局和实体模型的生成通常由设计人员手动交互实现,设计质量和结果严重依赖设计人员的技术水平和经验,设计过程中缺乏有效的数字化手段对设计知

收稿日期: 2012-06-18; **网络出版时间**: 2012-11-29 11:04

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20121129.1104.018.html

基金项目: 国家"863"高技术发展研究资助项目(2009AA043306)

作者简介: 唐家鹏(1979-),男,山西太原人,博士生,roshking@163.com.

识和经验进行积累,同时相关的规范无法得到有效的贯彻,这种方式很难满足企业对建模过程快速化的要求. 本文提出了模板参数化的方法,将设计过程中的设计方法和定义规则等知识封装为模板,开发了知识驱动的飞机翼面结构的快速设计系统,以翼面的外形和结构尺寸参数作为输入,实现翼面结构的自动布局,并能够根据优化结果改变输入参数,实现模型的快速修改,在布置模型基础上自动实例化,可以快速生成结构的实体模型.

1　参数化工具选择

CATIA 是航空企业进行结构设计最常用的 CAD 建模软件和手段,参数化设计都基于 CATIA 环境进行. CATIA V5 中可定制的有效的参数化存在 4 种不同层次,最重要的参数化工具包括组件应用架构(CAA, Component Application Architecture),VBScript,智能软件(知识模式、用户自定义特征(UDF, User-Defined Features))和 CATIA 本身参数化,如图 1 所示. 其中 CAA 的可定制程度最高并且由 CAA C++ API 提供的界面最优,但其程序语言相对复杂且对用户要求比较高,VBScript 虽然在功能上不及 CAA 强大,但开发难度小,能够与 CATIA 更好地兼容,并完全可以满足翼面结构开发的功能要求[2].

UDF 能实现任意复杂的几何特征体的参数化建模,被认为是 CATIA 中非常独特的功能,UDF 可以通过知识模式手动或自动实例化实体.

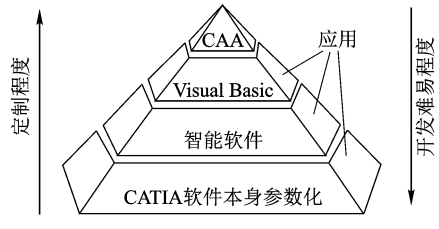


图 1　CATIA 参数化程度

为了实现更广泛的设计空间,丰富的参数化是必不可少的. 本文在进行翼面结构自动布局和实体模型的快速生成时需要结合以上描述的参数化,如图 2 所示. 规则处于整个结构的最上层,根据预定顺序控制知识模式,进而驱动 VBScript 和 UDF 实现建模过程的参数化.

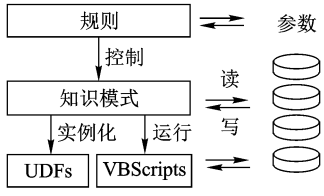


图 2　知识驱动过程

2　翼面结构快速建模

飞机翼面结构设计要求基于翼面结构的弦平面,进行梁、肋和长桁构件的布局,生成翼面结构布置模型. 布置模型包括了构件站位面、轴线及腹板面的结构布置信息.

2.1　结构布局定义

结构布局采用文献[3]的参数坐标系定义翼面构件,翼面坐标系如图 3 所示. 其中:s 为展向位置参数(根部为 0,梢部为 1);c 为弦向位置参数(前缘为 0,后缘为 1);t 为厚度位置参数(上表面为+1,弦平面为 0,下表面为-1).

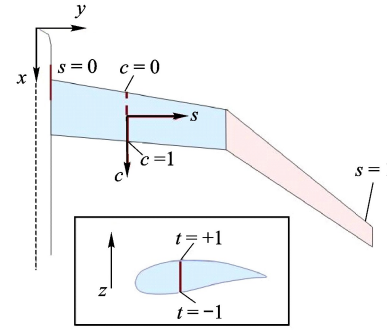


图 3　参数布局定义

构件所有位置的引用必须与此参数坐标系,或指定的相对其他结构部件相关联,构件的位置参数应满足下列 3 种情形:①由参数坐标 $P(c,s,t)$ 来描述;②由几何参考相关联(比如翼肋顺航向)来定义;③由其他构件的相对位置(比如平行或垂直某构件)来定义.

2.2　构件创建过程描述

翼面结构的几何特征由区域定义的边界确定,内部的结构布置特征由梁、长桁等纵向构件与横向构件肋的位置等参数确定[4].

翼面结构构件组成及布置方式可以定义为如下形式:

〈结构布置〉::=(〈梁〉,〈肋〉,[长桁],{〈站位面〉,[轴线],[腹板面]})

〈梁站位面布置方式〉::=(〈按比例〉)

〈肋站位面布置方式〉::=(〈顺航向〉,〈平行某肋站位面〉,〈垂直梁〉)

〈长桁站位面布置方式〉::=(〈按比例〉,〈平行梁站位面〉,〈平行某长桁站位面〉)

基于翼面结构的弦平面(厚度位置参数 $t=0$)进行翼面构件的布置,定义构件的结构参数[5-6].

1) 梁:贯穿上下翼面,可描述为站位面和腹板面.

① 起始、分段点和终止位置由参数坐标 $P(c,s)$ 描述,轴线由各点连接而成;

② 基于梁轴线和弦平面确定梁的站位面;

③ 通过站位面与上下翼面求交并填充相交区域生成梁的腹板面.

2) 翼肋:也具有贯穿上下翼面的性质,可描述为站位面和腹板面.

① 位置通常由梁和肋构件来确定. 机身连接处翼肋站位面为顺航向布置,其余大多为垂直前梁或后梁轴线布置,或选择平行已布置好的肋站位面;

② 通过站位面与上下翼面求交并填充相交区域生成肋的腹板面;

③ 确定腹板面的起始和终止位置.

3) 长桁:依附于上下翼面,可描述为站位面和上下翼面轴线.

① 起始、分段点和终止位置由参数坐标 $P(c,s)$ 描述或由梁站位面或长桁站位面来确定,轴线由各点连接而成;

② 基于轴线和弦平面确定长桁的站位面;

③ 通过站位面与上下翼面求交生成长桁轴线;

④ 确定长桁的起始和终止位置.

4) 蒙皮:蒙皮的区域分块由梁、肋和长桁的位置确定,因此通常不需要定义.

完成构件参数的定义,进行翼面结构的参数化布局,设计流程如图4所示.

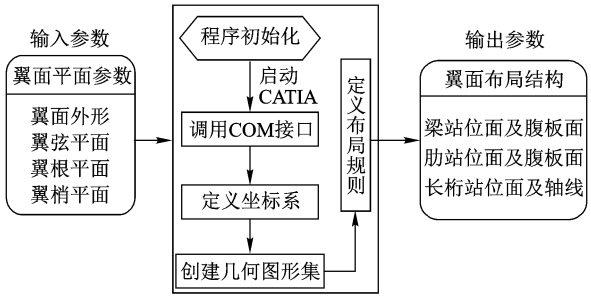


图4 结构布局流程

3 模板参数化设计

模板技术可认为是一种类似基于实例推理的知识重用技术,它是基于事物相似性和设计方法的复用技术原理. 其基本思想是:从一类相似的事物中抽象出一种框架型的模板,任何一个类似的事物都可作为以模板为超类派生的类型的实例. 其核心是设计信息的重用和参数化的变异[7].

虽然翼面部件数量很多,但从内部构件结构组成来说,差别不大. 例如机翼和平尾结构,都是由横向构件肋、纵向构件梁和长桁以及蒙皮组成. 虽然结构尺寸和构件数量有所不同,但构件的功能及所起作用相同,构件的布置方式和生成过程类似. 因此,飞机翼面部件具有很强的模板化特征. 目前翼面结构的布局通常由结构设计人员通过手动交互完成,获得结果和更改结果的过程必须大量人工操作,对于相对复杂的机翼盒段结构往往需要很长的时间进行建模,这在很大程度上影响了结构设计过程的效率. 实际上,可以将结构工程师在设计过程中的设计方法、定义规则和经验等知识通过归纳封装为模板,后台程序驱动CATIA自动完成结构布置模型的生成,实现知识驱动的模块化设计. 通过翼面部件结构设计的参数化,在设计修改新的部件或同类部件时,只需利用同一模板,经过数据替换和参数修改即可以完成新的或同类部件的布局设计.

图5为翼面部件布局过程参数化建模的模板. 在模板界面中通过拾取给定的参考元素以及输入构件的信息,可以快速地完成梁、肋和长桁等主要结构件的参数化建模. 完成构件的创建即可实现布置模型的生成,输出的模型如图6所示.



图5 翼面结构设计模板

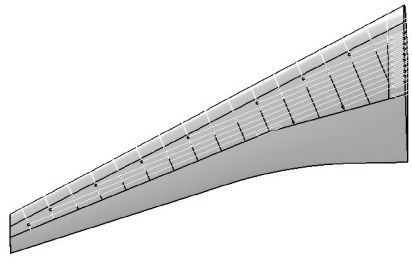


图6 机翼翼盒布置模型

4 实体模型快速生成

翼面结构布置模型生成后,设计人员通常需要进一步得到结构的几何实体模型,以检查构件之间的协调. 手动交互生成模型通常费时费力,同时如果布置模型改变,实体模型必须随之更新,因此需要采用快速设计方法来实现实体模型的自动

生成.

4.1　用户自定义特征

用户自定义特征即 UDF 是满足零件一项或几项不可再分的功能单元、具有一定通用性的一系列形状特征(包括系统提供的预定义形状特征和已定义的用户自定义特征)组合而成的平面图形或几何实体[8].

基于特征的设计是 CAD 系统基本的设计范式之一[9]. CATIA 的 UDF 可以将一个简单的实体生成用户化的特征,特征的参数可以自定义. 用户根据自身的实际需要,将一些常用的结构集成为自定义的各种特征并以用户自定义特征实例存放到实例库中,在需要的时候可以直接调用. UDF 有效地扩充了已有特征造型模块所提供的形状特征的范围及能力,加入设计模型后,和已有特征一样具备参数化的形状以及位置尺寸. 飞机翼面结构构件几何截面形状为固定的若干种,如图 7 所示. 利用用户自定义特征的概念进行设计将减少数据的存储量,大大提高设计效率.

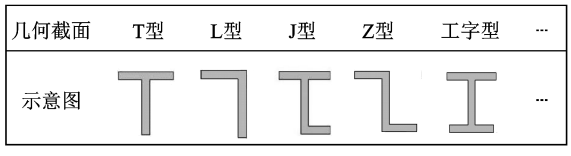


图 7　翼面构件几何截面特征

4.2　UDF 的封装及调用

用户自定义特征 UDF 实际上是对造型系统中已有的形状特征和造型方式的封装. 通过封装,屏蔽了很多繁琐的几何造型操作,而将与应用有关的参考几何元素、约束和尺寸以接口的形式提供给设计人员. 这些参数和几何元素由设计人员在对 UDF 进行实例化时指定. 通过调用 UDF,达到了简化造型操作,定制与扩展原有特征造型系统的目的.

在 UDF 的封装和调用过程中,实现其准确定位是关键. 本文通过草图所在平面及截面的两点 P_1 和 P_2 作为定位参数来实现截面的完全定位,如图 8 所示.



图 8　UDF 定位

4.3　几何截面特征构建

根据飞机翼面结构构件几何截面的特点,分别提取其中的一些形状特征组合输出成用户自定义特征,从而实现相同类型不同尺寸特征的设计,各种类型截面的主要特征如下:

T 型:缘条宽度,缘条厚度,角度;

L 型:缘条宽度,缘条厚度,角度;

J 型、Z 型、工字型:缘条宽度,缘条厚度.

飞机翼面结构中,梁和肋构件的截面与翼面外形直接相关,必须对缘条与腹板之间的角度进行约束,以满足与翼面外形贴合的要求. 梁和肋通常为 C 型或工字型,因此,选择缘条的几何截面特征为 T 型和 L 型.

UDF 包含的信息除了特征集合外,还包括关联尺寸、特征定位和特征语义等各方面的信息,如图 9 所示.

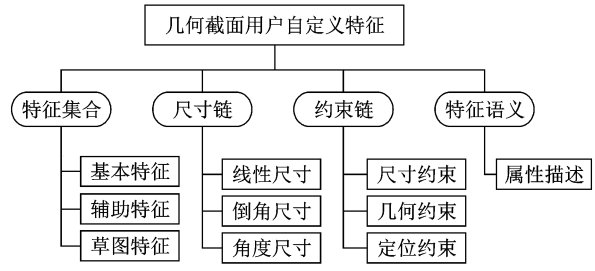


图 9　用户自定义特征信息结构图

图 9 中,特征集合包括了输出到用户自定义特征的一系列形状特征;尺寸链用于控制各形状特征的几何参数;约束链除了对特征几何尺寸的限制外,还提供了涉及几何截面 UDF 的定位的约束信息;特征语义是对用户自定义特征中的某些特征进行语义描述.

4.4　实体模型创建

虽然通过用户自定义特征功能可以简化设计过程,实现翼面结构几何截面的实例化,但每次调用 UDF 只能生成一个截面特征,而翼面结构的构件数量众多,类型也各有不同,通过这种方式仍然不能满足翼面结构实体模型的自动快速生成. 本文利用 UDF 参数化的优势,通过 VBScript 与 UDF 相结合的方式进行实体造型,实现建模过程更高层次的参数化.

飞机翼面结构布置模型包括两种类型的单元:一维单元和二维单元. 其中:

〈一维单元〉::=(〈梁缘条〉|〈肋缘条〉|〈长桁〉)

〈二维单元〉::=(〈梁腹板〉|〈肋腹板〉|〈蒙皮〉)

两种单元属性不同,因此实体模型生成过程也不相同. 一维单元需要通过文档实例化的方式读取磁盘中的截面特征零件文档,调用 UDF 来完

成模型的创建,而二维单元实体模型的生成通过在程序中偏移指定单元曲面的厚度来实现.

4.4.1 一维单元生成逻辑

梁缘条、肋缘条和长桁的实体模型的生成过程即是 UDF 调用及实例化的过程,UDF 的调用根据用户输入几何截面类型,调用了实例库中相应的设计实例的一份拷贝. 其中,各种类型的几何截面参数都是可参数化的,根据截面类型的不同,系统分别提供相应的参数实现其参数化驱动. 截面类型除了几何参数外,还有结构参数用于驱动不同截面类型的切换.

建模过程中,分别在构件两端调用 UDF,自动生成几何截面特征. 由构件站位面、站位面在翼面外形和弦平面上的交点作为 2 个定位点,3 个元素共同实现截面特征的定位,并通过建模的多截面技术实现一维单元实体模型的快速生成.

4.4.2 二维单元生成逻辑

梁腹板、肋腹板以及蒙皮等二维单元实体的生成通过对曲面进行加厚来实现.

曲面的加厚有 2 个偏移方向及偏移量(蒙皮的实体生成只在 1 个方向上偏移).

第 1 偏移:$0.5\times s\times(1-t)$.

第 2 偏移:$0.5\times s\times(1+t)$.

其中,s 为梁腹板和肋腹板生成实体的厚度;t 为梁腹板和肋腹板站位面在实体中的相对位置,取值在-1.0 ~ 1.0 之间.

4.4.3 实体模型生成

基于以上建模逻辑,运行模板自动生成翼面结构的实体模型,如图 10 所示.

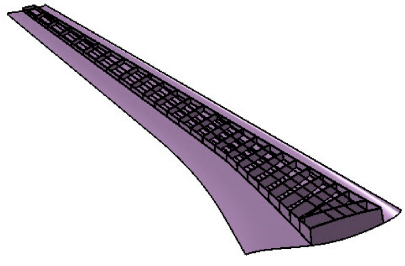


图 10 机翼翼盒结构实体模型(隐去上翼面)

5 结 论

1) 采用知识驱动的模板参数化技术,基于过程重用的思想,将设计人员手动交互过程中归纳的设计方法和规则封装为具有标准形式的知识组件,实现了飞机翼面部件结构布置模型的自动生成,并可以根据优化结果,改变设计输入参数,实现模型的快速修改. 利用模板这种“再设计”技术,可以极大缩短设计周期,提高设计效率和建模的标准化程度.

2) 创建了翼面结构构件梁、肋和长桁的几何截面特征库,通过 VBScript 语言和用户自定义特征 UDF 技术,完成几何特征体的参数化建模,在布置模型基础上自动实例化,快速生成翼面结构的实体模型,提高了建模效率.

参考文献(References)

[1] Sridhar Chintapalli. The development of a preliminary structural design optimization method of an aircraft wing-box skin-stringer panels[J]. Aerospace Science and Technology,2010(14):188-198

[2] Christof Ledermann, Paolo Ermanni. Dynamic CAD objects for structural optimization in preliminary aircraft design[J]. Aerospace Science and Technology,2006(10):601-610

[3] La Rocca Gianfranco, Van Tooren Michel J L. A knowledge based engineering approach to support automatic generation of FE models in aircraft design[C]//45th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reno, Nevada: American Institute of Aeronautics and Astronautics,2007,17:11724-11735

[4] La Rocca Gianfranco, Van Tooren Michel J L. Knowledge-based engineering approach to support aircraft multidisciplinary design and optimization[J]. Journal of Aircraft,2009,46(6):1875-1885

[5] 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)

[6] Sensmeier M, Samareh J. Automatic aircraft structural topology generation for multidisciplinary optimization and weight estimation[C]//46th AIAA/ASME/ASC Structures and Materials Conference. Austin, Texas: American Institute of Aeronautics and Astronautics,2005:1893

[7] 王义林,胡贤罡,张启丰. 基于模板的汽车覆盖件拉延模具结构参数化设计[J]. 模具,2009,5(4):98-101

Wang Yilin, Hu Xian'gang, Zhang Qifeng. Parameterized design of the drawing dies structure for automobile panel on the basis of the template[J]. Die and Mould,2009,5(4):98-101(in Chinese)

[8] 张敏,苏兰海. 基于 CAA 的 CATIA 用户自定义特征创建[J]. 机械设计与制造,2008,7(6):87-89

Zhang Min, Su Lanhai. The creation of user defined geometric feature based on CAA/CATIA[J]. Machinery Design and Manufacture,2008,7(6):87-89(in Chinese)

[9] Ledermann C, Hanske C, Wenzel J, et al. Associative parametric CAE methods in the aircraft pre-design[J]. Aerospace Science and Technology,2005,9(7):641-651

(编 辑:文丽芳)