

基于模型定义的飞机全三维设计实现技术

Aircraft Full Three-Dimensional Design Implementation Technology Based on MBD

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 梅中义 杨涛



梅中义

北京航空航天大学机械工程及自动化学院副教授,博士,毕业于北京航空航天大学航空宇航制造工程专业,主要从事飞机数字化装配与测量技术、飞机数字化设计与制造技术等方面的研究与开发工作。

纵观全球飞机研制,随着信息技术和计算机技术的快速发展,国际最新的在研飞机普遍采用全三维设计技术,彻底取消二维图纸,所有零部件的三维设计作为唯一权威性的数据集,供用户的所有后续环节使用。采用全三维数字化设计方法,通过在线关联设计和并行产品定义,不仅能

全三维设计技术的主导思想不只是简单地将二维图纸的信息反映到三维数模中,而是充分利用三维模型所具备的表现力,去探索便于用户理解且更具效率的设计信息表达方式。

提高协同效率,而且能摒弃传统设计方法中大量二维图纸,提高了飞机协同设计效率,推动了飞机制造业的数字化变革。采用三维实体数字化模型进行预装配,能最大程度地减少设计错误,提高设计质量,结合设计信息和制造信息,进一步缩短飞机研制周期。

波音公司在梦幻客机 787 的研制过程中,要求全球合作伙伴采用基于模型定义(Model Based Definition, MBD)作为整个飞机产品制造过程中的唯一依据,即在虚拟环境中设计、构建和测试 787 飞机生产前的数字化制造工艺,通过生产现场的网络终端传递制造数据,实现波音 787 全三维研制,并最终取得了成功^[1]。现阶段,国内各航空企业也正在实施

和应用 MBD 技术,本文将结合飞机结构的设计特点,介绍实现飞机全三维设计的技术方法,包括:全三维设计开发环境、基于 MBD 的全三维设计规范、关联设计驱动的协同设计方法、全三维设计数据组织与管理、全三维工程注释信息的组织与管理、三维设计模型的轻量化应用、三维标准件库的建立和使用等。

全三维设计技术概念

全三维设计技术在波音公司 787 的研制中被广泛应用,国内航空工业全三维设计技术也是从波音的转包生产中得到学习、启发、借鉴和应用。通俗来讲,全三维设计就是在建立三维模型时,不仅要包含精确的产品几何模型,还需要包含表示产品

尺寸、公差、基准等非几何信息,以满足下游工艺设计和检验设计的要求,替代原二维图样的功能,从而实现取消二维图纸的功能^[2]。全三维设计过程中全部采用三维模型,其典型特征便是基于模型的定义技术(Model Based Definition)。

MBD 概念源于美国机械工程师协会于 1997 年在波音公司的协助下制定的标准研究和制定工作,并于 2003 年正式成为美国国家标准“Y14.41 DIGITAL PRODUCT DEFINITION DATA PRACTICES”(数字化产品定义数据的实施)^[3]。波音公司在本标准的基础上,做了进一步研究,制定了公司的基于模型定义 MBD 技术应用规范 BDS-600 系列。该技术将三维制造信息 PMI 与三维设计信息共同定义到产品三维数字化模型中,使 CAD 和 CAM 等实现真正高度集成,数字化技术的应用有了新的跨越式发展,可不再使用二维图纸。图 1 为波音全三维零件设计实例。

从设计制造技术的发展来看,三维模型取代二维图纸是大势所趋,但对于如何用三维模型涵盖所有设计制造信息,近几年国内航空厂所虽然从波音生产转包中学习和借鉴了一些全三维设计的理念和方法,并在国内某些型号的研制过程中进行了尝试和使用,但是相比波音、空客等国际领先航空制造公司,国内的全三维设计技术还不够成熟,面临着设计规范不统一、协同设计系统不完善等问题。

全三维设计实现技术

全三维设计技术的主导思想不只是简单地将二维图纸的信息反映到三维数模中,而是充分利用三维模型所具备的表现力,去探索便于用户理解且更具效率的设计信息表达方式。采用全三维模型的设计方式将打破传统的二维图纸为主的设计理

念,由此也带来一系列设计模式的变革。全三维设计技术的实现主要包括以下几个方面:全三维设计开发环境、基于 MBD 的全三维设计规范、关联设计驱动的协同设计方法、全三维设计数据组织与管理、全三维工程注释信息的管理、三维设计模型的轻量化应用、三维标准件库的建立和使用等。

1 全三维设计开发环境

全三维设计主要采用三维 CAD 设计系统来实现三维模型的设计和更改。目前,国内外的主流三维设计

软件主要有:CATIA、UG、Pro/E 等。由于 CATIA 具有强大的曲面功能以及友好的建模环境一直被航空厂所追捧,成为飞机制造领域占统治地位的 CAD 软件。在 CATIA 中包含产品几何信息和非几何信息的集成模型,以规范树和设计模型的形式在界面中显示,其中产品的尺寸和公差信息直接在几何实体上标注和显示,图 2 为 CATIA 中零件实体上的标注信息。

零部件的非几何信息以一定的形式存放在规范树中。在 CATIA 中,

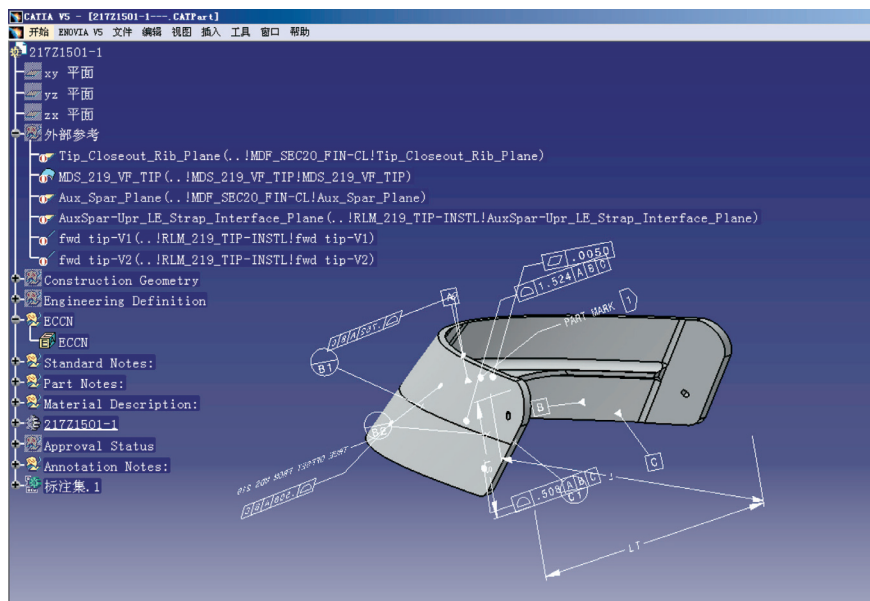


图1 波音全三维零件设计实例

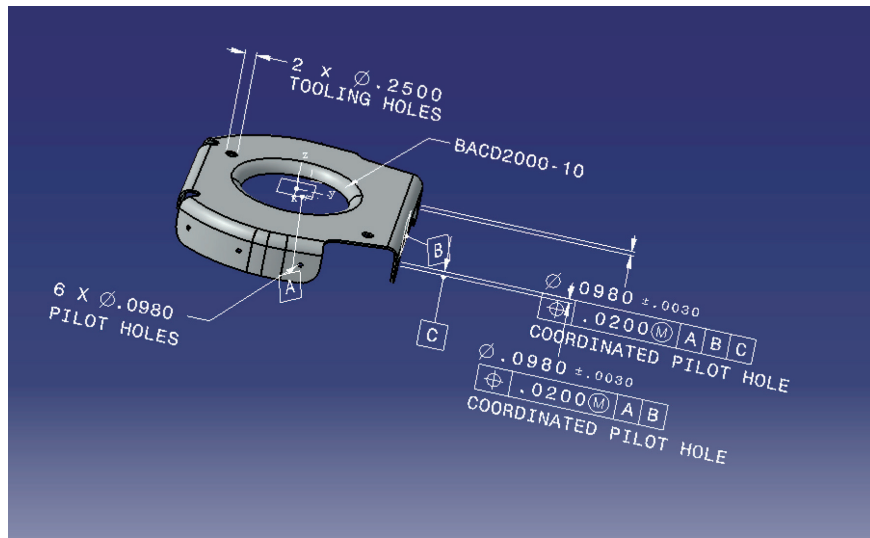


图2 CATIA中三维模型标注信息

规范树采用分类集合的方法,把全三维模型数据信息进行分类组织管理,用户可以通过对规范树的操作,快速准确地查看相关的产品定义信息,整个规范树伴随着产品几何模型的创建逐步生成。图3中,三维设计过程中零件的几何形状显示在图中右侧,而零件的注释信息则显示在图左侧的规范树中。

规范树中的大部分标注特征信息都不是单独存在的,而是与几何模型特征有关,依附于几何模型特征并形成关联关系,满足设计人员和后期加工制造人员的修改和查询要求。另外,规范树中的非几何信息和特征具有关联性,当点击几何元素时相关联的元素都会高亮显示;非几何信息存放在规范树中,这些非几何信息包括各种标注信息,如标准注释、零部件注释、标注说明、还有各类连接定义等,这些非几何信息由与三维CAD系统相配套的PDM软件负责存储和管理,使CAD中的产品几何数据与非几何信息实现高度集成。

2 基于 MBD 的全三维设计规范

全三维设计技术的实现以全三维信息模型为载体,在统一的产品设计技术规范定义下,集成几何属性、非几何属性、管理属性等信息,作为设计、指导生产制造和装配、检测的单一数据源^[4]。表1为完整零部件MBD规范树结点信息。

全三维设计模式中要求三维模型能够确定产品统一信息包含的内容,梳理面向产品全生命周期的集成化过程信息,加强制造工艺信息(如加工、装配、检测等)、构型管理信息及物料信息建模,建立全三维信息模型,采用统一的规范对过程信息进行规范,保证信息在不同平台和不同业务中能得到语义一致的数据,实现过程信息的集成、数据源一致和形式统一。这就要求飞机设计部门必须研究三维模型尺寸公差标注技术、剖视图生成技术、加工要求标注技术、特

征视图捕获创建与管理技术等,在采用MBD进行三维零件和装配模型的标注技术等内容的基础上,编写制定统一的MBD三维标注规定,撰写全三维设计技术规范,并且在飞机设计过程中真正贯彻实施,才能保证飞机全三维设计信息的准确性和规范性,并保证下游生产制造过程中的可用性^[5]。

3 关联设计驱动的协同设计方法

关联设计是一种特殊形式的参数化设计方法,其驱动参数为上游设

计的几何特征,例如上游设计中的参考点、基准线、辅助面、坐标系等,其表现形式为上游设计对下游设计的影响关系,关联设计可以抽象为公式:

$$Y=f(x), \quad (1)$$

其中, x 为上游设计给下游设计的输入, Y 为建立在上游设计输入基础上的下游设计, f 为上下游设计间建立的关联关系^[6]。关联设计是全三维设计中的关键技术,是全三维设计数字化应用的体现,融合了协同和管理

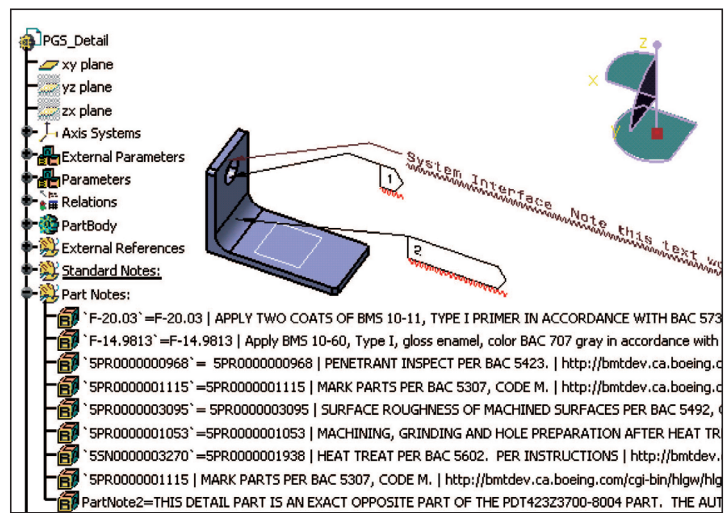


图3 规范树中零件注释信息

表1 零部件MBD规范树结点信息

结点类型	说明	适用范围
xy plane	CATIA 默认	必需
yz plane	CATIA 默认	必需
zx plane	CATIA 默认	必需
PartBody	实体特征造型	零件模型,根据需要
External References	关联设计时引用的其他模型几何元素	根据需要
Construction Geometry	建造本模型所必须的一些基础点线面	根据需要
Engineering Geometry	有关坐标系与基准面信息	根据建模需要
Reference Geometry	引用有关零件实体模型	根据建模需要
Standard Notes	标准说明	必需
Part Notes	零件说明	必需
Annotation Notes	标注说明	必需
Material Description	材料描述信息	零件模型必需
Approval Status	管理信息	必需
Annotation Set	标注集	根据需要
Publication	其他模型管理设计时引用信息	根据零件模型需要

的理念。波音在总结 787 飞机研制中,关联设计被列为十大关键技术,足见关联设计在飞机全三维设计技术实现中的重要性。

飞机采用全三维设计技术需要在概念研制阶段就制定详细的关联设计规划,对飞机结构进行合理的组织和划分,以形成产品骨架模型合理的层次关系,使得骨架之间的影响关系易于控制。结合实时在线的协同设计平台,使得不同部门的设计人员能够在设计初期就明确确定零部件的关联信息,保证设计的一致性和完整性。目前流行的 CAD 软件系统只是支持模型的参数化设计,即单一模型的参数设计,不能实现模型与模型之间的关联设计,因此要想实现全三维模型的关联设计,除了需要 CAD 软件以外,还需要借助配套的 PDM 数据管理系统,对设计对象进行分析,总结和梳理出对象各部分之间的相互影响关系,总结出决定设计对象的主要因素,建立相应的关联模型,指导飞机全三维研制的整个过程。

4 全三维设计数据组织与管理

采用全三维模型的设计模式,需要考虑飞机从详细设计、虚拟仿真到加工制造整个生命周期所包含的数据信息,因此必须拥有基于能覆盖全部设计制造流程的数字化网络信息系统,才能实现真正意义上的全三维设计。

波音 787 在研制过程中采用了全球协同环境(Global Collaboration Environment, GCE)系统来支撑整个飞机的全球协同设计模式,在以全三维设计模式中采用了基于 MBD 的三维数据集为核心,借助标准管理系统、标准工艺管理系统、CAD 系统、工艺设计和分析以及产品数据管理等系统,通过 MBD 数据集集成产品的设计制造信息,建立一套基于 MBD 数据集的工艺设计分析方法和数据管理办法,最终实现设计制造过程的无图纸化,图 4 为波音全三维设

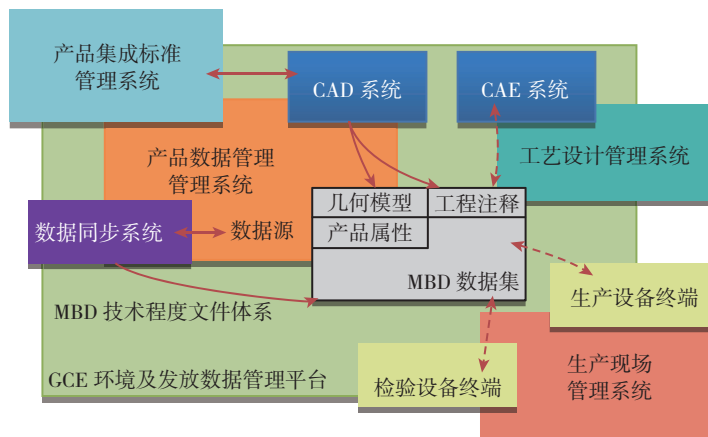


图4 全三维设计数据管理应用系统框架

计中全三维数据管理应用系统框架^[7]。

全三维数据管理应用框架中以全三维数据模型以及全球协同环境 GCE 平台为基础,在管理应用系统中,全三维数据模型为整个协同设计环境提供数据支持,通过全球协同环境,设计人员和工艺工程人员能够彼此共享设计信息,能够将设计中存在的制造问题及时地反馈给设计人员,通过数据同步系统和 GCE 平台,最终修改的设计信息能被传递到生产和检验设备中。产品标准集成管理系统则管理着所有设计、工艺、制造和检验的标准,所有这些标准的工作

何信息定义内容多、定义过程复杂,在管理和使用拥有大量注释信息的三维模型时往往带来很多操作的不便,而且在三维注释信息的后期使用过程中需要特定的格式来表达工艺、装配等制造信息,例如在 CATIA 中零件的材料注释以一个最长字符为 1022 的字符串表示,每个标注说明文本字符必须满足这样的格式: A|B|C。根据标注说明的不同数据来源, A、B、C 分别有不同的含义,一般规定 A 为特征号, B 为材料注释标识号, C 为说明描述,描述该处材料文本信息。图 5 为 CATIA 中材料注释格式。

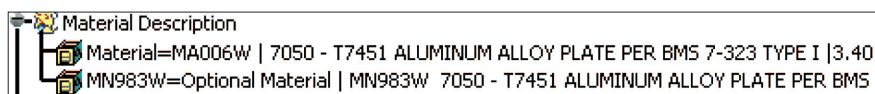


图5 CATIA中材料注释

方法、指令、要求都被统一编码并由计算机管理和发布,任何授权的供应商都能够检索到相关的标准,这就保证了所有供应商执行统一的标准,从而达到统一的质量要求。

5 全三维数据模型工程注释信息管理

全三维模型工程注释信息是指在三维模型数据集中规范树中所定义的零件信息,包括各种标注信息,如标准注释、零部件注释、标注说明、各类连接定义等^[8]。这些非几

设计人员人为输入工程注释信息过程复杂,通常无法保证注释格式的正确性。因此有必要在全三维设计软件中进行一定的二次开发,实现三维模型注释信息的快速创建和有效管理,图 6 为基于 VBA 开发的 CATIA 工程注释信息管理软件界面,此软件可以实现三维数据模型中工程注释信息的有效管理,主要有以下特点:

(1) 从三维模型数据集中提取规范树和标准注释管理系统中的工

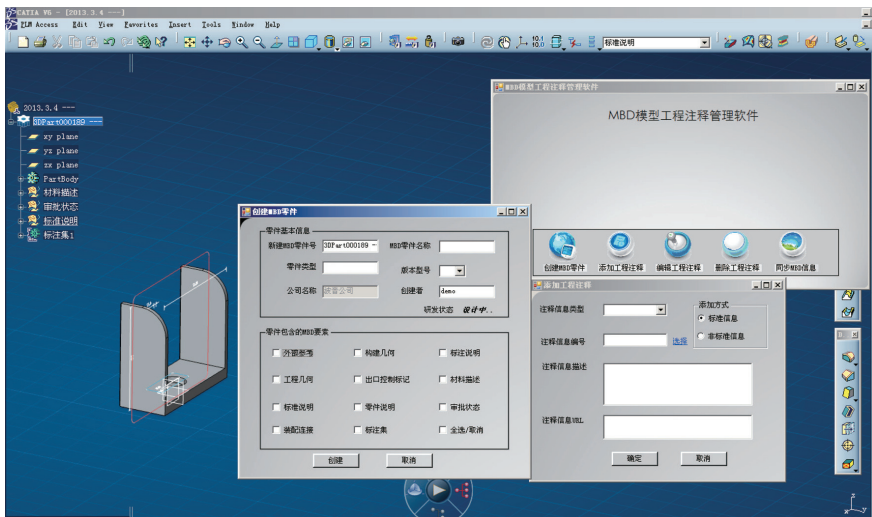


图6 基于VBA开发的CATIA工程注释管理软件

程注释信息。工程注释信息的提取主要是指零件注释、标准注释、标注说明、材料说明和标准件等。工程注释管理软件可以实现这些信息从规范树中快速提取到数据库, 传送给与三维设计软件配套使用的 PDM 软件。

(2) 可以实现工程注释信息的添加、更新和删除等功能。简化了工程注释过程, 确保注释信息的规范性, 并且通过工程注释信息的有效管理, 能够保证以后的三维模型工程注释信息与 PDM 数据库的一致性, 确保工艺、装配人员的可用性。

(3) 能够实现与 PDM 数据管理软件同步。当对三维模型的规范树中内容进行修改以后, 工程注释管理软件都会自动检测, 对修改的信息进行同步和更新, 保证使用该模型的后续人员能够得到最新最完整的注释信息。

6 全三维设计模型的轻量化管理和应用

飞机在采用全三维模型设计过程中, 必然产生大量包含管理属性、几何属性、非几何属性等信息组成产品模型。上述信息对设计工程师非常重要, 但是对参与产品研制过程的其他人员来说, 并不需要上述所有信息。对于产品开发全生命周期过程

而言, 参与协同开发的团队成员除设计人员外, 不同角色的人员仅需要与之相关的部分模型信息, 因此实现局域角色的产品模型轻量化可以提高模型的高压缩比, 实现复杂模型的快速加载, 有效支持下游产品快速制造^[9]。目前三维模型轻量化主要分为 2 种方法: 一种是通过在大型 CAD 软件系统安装特定插件进行转换; 另一种则是通过厂商推出的第三方转换软件进行转换。同时为了实现对轻量化模型的便捷传阅, 也需要具有不同的浏览方式, 当前, 针对格式文件的浏览方式也主要有 2 种: 一种是通过三维可视化浏览器进行读取; 另一种是通过安装系统插件实现, 因此, 三维设计模型的轻量化及可视化一般思路如图 7 所示。



图7 三维模型轻量化过程

随着全三维设计技术的不断发展, 国际信息化厂商纷纷推出各种新的三维数据交流及可视化方案, 目的是在保留基本模型信息的基础上, 实现文件轻量化以及与三维软件无关联性, 来满足全三维设计过程中不同部门和人员对三维模型的使用要求。目前, 轻量化三维可视化解决方案种类很多, 所具备的功能、特点、实现技术手段也各不相同。例如法国达索公司推出的 3DXML 格式是一种通用的、轻量化的、基于 XML 的格式。3DXML 高度压缩复杂数据, 提供快速的文件传输和短暂加载时间, 同时保持了交换图形的精确几何, 方便工艺、工装等人员的使用。同时 3DXML 可以和 Web 紧密集成, 使其具备了广泛的传播性, 提高了全三维设计过程中信息交流以及协同工作的能力。图 8 为达索系统的 3DXML 三维模型轻量化解决方案。

7 全三维设计过程中标准库的建立和使用

飞机全三维设计过程中, 除了设计生成重要的产品三维模型以外, 工程技术人员还需要在设计过程中创建大量的标准件三维模型, 而在标准件三维模型的创建过程中, 需要反复查阅手册以确定零部件的标准外形与尺寸, 耗费了大量的时间, 而且随着飞机设计复杂性的不断提高, 重复性的标准件设计不仅降低了全三维设计效率, 还延长了飞机产品的设计周期^[10], 因此有必要在飞机设计过程中, 建立和使用三维模型标准件库。三维标准件库的使用不仅能提高设计人员的设计效率, 而且能在设计过程中不断被修正和完善, 及时补充新的标准件模型。

目前 UG、Pro/E、

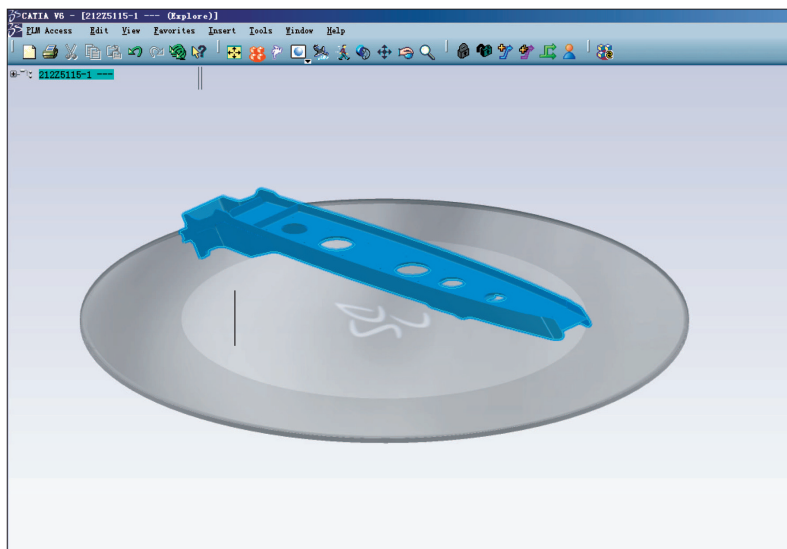


图8 达索系统的3DXML三维模型轻量化解决方案

CATIA 等三维 CAD 软件都自带标准件库的开发功能,其中在航空领域影响最大,使用最广的当属达索公司的 CATIA 软件, CATIA 虽然有自己的标准件库功能,但其格式是开发商自己定义的专业格式,更新维修性不强,这就要求国内航空厂根据自身情况建立一个以企业标准为主,兼顾国家标准 GB 和行业标准 HB 的三维标准件库,进而有效节约产品开发过程中结构相似零件的设计时间,以缩短飞机全三维设计时间。在 CATIA V5 中建立三维标准件库,可以采用以下 3 种方法:

(1) 使用 CATIA 软件提供的 Formula 功能、Design Table 功能和 Catalog 功能,建立和使用三维标准件库。

(2) 使用基于 VBA 的引用对象库,将 CATIA 的库文件加入程序框架,引用 CATIA 的类对象、函数等,进行二次开发。

(3) 通过应用 CATIA 提供的二次开发工具 RADE 和库函数 CAA (Catia Application Architecture) 的接口,在 VS 环境中创建标准件库应用程序。

CATIA 中创建标准件三维模型首先需要结合标准件几何信息和实

体设计工具完成建模工作,然后利用 Formula 工具建立用户参数,给零件各尺寸添加参数关联,创建设计参数表,设计参数表的创建可以通过文本格式建立,也可以通过 Excel 电子表格建立。在建立完参数表以后,启动 Catalog 模板,通过 Add Part Family 功能把建立的参数设计表和参数化模型导入 Catalog 模板中,从而完成标准件的创建,以支持全三维设计工作中对标准件的使用。

推动全三维设计技术的全面应用

全三维设计技术的采用,大幅度提高了飞机研制的技术水平,加快了飞机研制的整体效率,提高了飞机的整体质量。尽管目前全三维设计技术在国内航空领域得到了应用,但相比国外同类企业的应用水平,国内推广和实施全三维设计技术还有很多问题需要解决。首先全三维设计的技术水平和能力不足,要实现全三维数字化设计需要设计人员、工艺人员、检验人员及技术工人掌握基本的三维数字化设计知识,了解相关的概念和原理,操作相关的软件和系统,这就对他们的技术水平和能力提出了相应的要求。其次,全三维设计

体系还不够完善,全三维模型的设计模式对现有的设计体系、工艺体系、检验体系及制造体系带了深刻的影响,要深入推广全三维设计技术的应用,就必须针对飞机研制现状进行分析研究,构建满足工程研制需求的全三维设计体系。面对我国数字化研制现状,必须结合现阶段发展基础,大力推广全三维设计技术,推动我国的航空制造业进一步发展。

结束语

飞机全三维设计技术是对我国新时期航空制造业提出新要求和新挑战,是一项复杂的系统工程,国内数字化技术虽然在近几十年得到了巨大发展,但是与国际航空企业的应用水平还有一定的差距。相信随着我国航空业大力发展,飞机数字化应用水平一定会上一个更高的台阶。

参考文献

- [1] 梅中义. 基于 MBD 的飞机数字化装配技术. 航空制造技术, 2010(18):42-45.
- [2] 刘俊堂. 全三维飞机设计技术及其应用. 航空制造技术, 2010(18):68-71.
- [3] American Society of Mechanical Engineers. ASME Y14.41-2003 digital product definition data practices. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2003.
- [4] 周秋忠, 范玉青. MBD 技术在飞机制造中的应用. 航空维修与工程, 2008(3):55-57.
- [5] 刘看旺. 全三维研制技术推动飞机研制体系变革. 航空制造技术, 2011(1):78-82.
- [6] 刘俊堂, 刘看旺. 关联设计技术在飞机研制中的应用. 航空制造技术, 2008(14):45-47.
- [7] 范玉青. 基于模型定义技术及其实施. 航空制造技术, 2012(6):42-47.
- [8] 田承根, 朱天文, 刘新宇. 全三维技术在飞机设计中的应用. 航空制造技术, 2011(22):57-59.
- [9] 范玉青, 梅中义, 陶剑. 大型飞机数字化制造工程. 北京: 航空工业出版社, 2011.
- [10] 胡国强, 贾辉. 基于 CATIA V5 的三维标准件库的创建与应用. 轻型汽车技术, 2010(10):34-37.

(责编 亦非)