



# 飞机全三维数字化建模技术

## Full 3D Digitized Modeling Technology of Aircraft

中航通飞研究院有限公司 王咏梅 田宪伟



王咏梅

中航通飞研究院标准化研究室主任, 研究员。现从事标准、材料、构型管理研究工作, 曾参与直-15、直-9系列、运12系列飞机等多个型号的研制工作, 并获中航工业集团科技进步二等奖、立功等个人奖项。目前, 参与蛟龙600、领航150、海鸥300等飞机型号的研制工作。

本文简要概述了数字化建模的发展阶段, 总结了当今主要的数字化建模方法, 阐述了MBD模式下关联设计建模、机加和钣金参数化建模、标准件建模的主要技术。

纵观全球飞机研制, 数字化技术已成为各大飞机公司提升企业研发效能、优化企业研制流程、提高企业创新能力的有效工具。数字化建模技术的应用正迅速改变着传统制造业的工作模式, 数字化建模技术的发展经历了从手工绘图到二维CAD的应用, 再到二维+三维设计模式, 一直到现在的全三维建模技术MBD 3个发展历程, 实现了从平面投影技术到全三维实体模型数字样机以及完整数字化产品定义的转变。

产品数字化建模意味着整个产品生命周期中, 产品不同阶段的信息

可以数字化展示、处理和交换。数字化建模技术在产品的设计制造中占有极其重要的地位, 是产品开发的重要手段, 随着三维CAD设计软件的普遍使用, 数字化建模技术已逐渐成熟完善, 但随着MBD技术在飞机研制中的应用, 产品数字化建模技术的内涵在不断地丰富和扩展。一个完整的数据模型是所有几何信息和非几何制造信息的集合体, 它包含了3个基本因素: 第一个是产品生命周期的不同阶段属性信息和特征的集成; 第二个是产品属性信息及形状、特征、尺寸、公差能够数字化表达、处理

和转换;第三个因素就是集成化的模型应该在分布式环境下管理,便于协同设计,三维实体模型能够作为生产制造过程中的唯一依据。MBD 技术促使 CAD/CAM 与 PDM/PLM 的结合越来越紧密,产品的数字化建模技术的概念也扩展为 3 个层次:最低层是产品数字化模型数据,中间层是产品模型数据的数字化转换,最顶层是产品数据管理系统。MBD 技术的应用不仅仅是在产品设计中建立数字模型,而是要建立一个面向产品 PLM 协同研制的基于 MBD 模型的数字化技术体系,建立基于 MBD 模型的单一产品数据源的分布式、动态协同工作环境,用于支撑整个供应链的相关设计、制造单位(部门)的高效协同工作,确保产品研制数据的一致性、有效性、安全性、完整性和可追溯性<sup>[1]</sup>。

### 数字化建模的发展历程

产品数字化建模技术源于几何图形化建模技术,20 世纪 50 年代至今,几何建模技术经历了线框造型、曲面造型、实体造型 3 个阶段。线框造型与曲面造型因其自身的缺点无法满足工程需要,随着计算机技术的不断进步,很快被实体造型取代。实体造型是 20 世纪 70 年代开始发展起来的一门新的造型技术,比曲面造型增加了三维体的实心部分的表达,得到了三维形体的无二义性描述,能够在完整的几何模型上实现零件的质量计算、有限元分析、数控加工和消隐渲染图的生成。20 世纪 90 年代,美国 PTC 公司在实体造型的基础上引入参数化特征造型技术,将几何建模技术推到一个新阶段。目前,主流 CAD 软件均采用参数化特征造型作为主要的几何建模手段<sup>[2]</sup>。参数化特征建模多局限于零件建模本身,对于具有复杂装配结构的产品,零件间的参数化很难驱动,法国达索公司在参数化建模原理上引入关联设计技术,开发出与 CATIA

无缝集成的 VPM (Virtual Product Management) 产品数据管理系统,在全三维设计过程中,通过建立模型之间的相互依赖关系,从而实现飞机研制中上下游专业设计输入与设计输出之间的影响、控制和约束关系。此阶段虽然实现了三维的关联设计,但在建模过程的最后仍然要从三维模型投影生成二维工程图,存在巨大的工时浪费和更改管理困难。在 21 世纪初,美国机械工程师协会在波音公司的协助下开始有关 MBD 标准的研究和制定工作,并于 2003 年使之成为美国国家标准(ASME Y14.41-2003),随后 CAD 软件公司把此标准设计到工程软件中。波音公司在经过 737-NX 型号中初步应用 MBD 技术后,2004 年开始在 787 客机的设计和制造中全面应用 MBD 技术,并通过开发系列化建模工具,将参数化与知识工程融合,将全三维数字化建模技术推向更高的应用程度,彻底摆脱二维工程图纸,真正的实现了向三维数字化设计制造一体化转变。

### CATIA 环境下 数字化建模的方法

CATIA 以其先进的混合建模技术、在整个产品周期内的方便的修改能力、所有模块的相关性和并行的设计环境使得它能支持从概念设计到产品实现的全过程,它也是世界上第一个实现产品数字样机开发的软件,是全球航空业界普遍使用的一个集成产品开发环境。飞机自身特点决定了其在产品设计上具有产品结构复杂、零部件数量庞大、材料种类繁多、产品制造上具有工艺专业种类多等特点。CATIA 针对不同工艺类型的零件如:机加件、钣金件、复合材料件、管路件等开发了不同的模块来满足不同的数字化工艺制造要求。对于不同的零件,设计者采用不同的建模方法和建模思路关系到零件数字化的过程,影响着产品的开发

效率。CATIA 环境下建模方法主要有以下 6 种:

(1) 正向设计。这是常规设计中使用最多的一种方法,设计者根据经验,按照建模规范逐步建模,根据不同的成形工艺,模型可以是表面模型或者实体模型,要求设计尺寸精确,以满足数字化制造要求。传统情况下要根据投影关系利用 CATIA 工程图模块绘制二维工程图,MBD 模式下只要在三维数模上利用 CATIA 三维标注模块完成相关尺寸及公差等标注,三维模型直接作为制造的唯一依据。

(2) 逆向工程。它是将实物转变为三维模型的相关数字化技术、几何模型重建技术和产品制造技术的总称,即将已有产品或实物模型转化为工程设计模型和概念模型,在此基础上对已有产品进行解剖、深化和再创造,是一种以实物(油泥模型)为基础产生三维数据的设计过程,这一建模技术早期在我国飞机、汽车、机械产品的仿制中普遍使用,是产品设计的初级形式,该技术带动了三维 CAD 软件的广泛使用,推动了这些行业的快速发展。

(3) 标准件建模。随着工业的发展,有一部分零件已经被标准化,形成了国标、航标等标准件,这类零件可以利用 CATIA 的标准件库模块一次建模、重复引用,从而节约建模时间,加快设计进度。

(4) 参数化设计。就是将模型中的定量信息参数化,建立图形约束和几何关系与尺寸参数的对应关系,通过改动图形的一个或多个尺寸或是修改已定义的零件参数,自动地响应对图形中相关部分尺寸的变动,从而完成对图形的驱动。

(5) 二次开发建模。CATIA 为了满足不同用户的使用需求,给用户预留了进行二次开发的接口,CAA (Component Application Architecture, 组件应用架构) 为用户提供了一系

列开发工具,用以实现宏程序执行、几何形体生成等功能。MBD 技术的应用将产品的参数化和二次开发建模技术融合并提升到智能设计阶段,在设计中融入更多的工程知识和规则,实现更高层次上的数字化建模。

(6) 关联设计。在三维设计过程中,通过参数化设计技术建立模型之间的相互依赖关系,从而实现产品设计中上下游专业设计输入与设计输出之间的影响、控制和约束关系。关联设计技术把单个零件的参数化建模技术上升为模型和模型之间的几何元素的驱动关系,是目前国内外飞机研制的最新的、主要的建模方法,使飞机的研制流程从串行研制模式向并行协同的关联设计模式转变。

### 基于 VPM 的关联建模技术

关联设计是数字化技术应用到一定水平、数字化设计和产品数据管理深度融合的结果。波音把关联设计列为 B787 飞机研制十大技术成果的第一位,足见关联设计技术在飞机研制数字化技术应用中的重要性。ENOVIA VPM 系统是达索公司为实施基于 CATIA V5 的在线关联设计而搭建的协同平台,其关联设计主要基于以下技术实现:(1) 参数化建模:创造一个零件的几何变量或参数使用;(2) 关联建模:在不同的数据模型之间建立链接;(3) 在配置的环境中进行在线设计。

VPM 环境下,提供以下几种工具实现关联设计:(1) Reference to Reference,这是在两个 CATIA 文件之间的链接,这些链接只考虑到几何之间的关系,但不考虑零件在某一个特定产品中的相对定位。如在进行螺母螺钉的设计时,允许在设置螺母直径时,将其与螺钉直径建立关系。这样如果修改了驱动两个元素之一,其直径将自动更改。(2) Instance to Instance 在一个产品的实例之间的相对定位的链接,没有驱动几何,适

合于装配约束。设计一个螺栓,实例实例链接提供设计员设置螺栓螺母的相对位置。可以建立同轴度和螺母和螺栓头之间的距离限制。如果移动其中一个元素,另外一个元素将遵循并保持正确的相对位置。(3) Instance to Reference 这个类型的链接既考虑到了模型几何之间的链接关系,又考虑到了零件之间的位置关系。这种关系就是讲前面 2 种关系的组合使用,在关联设计中骨架模型与零件之间的联系就是此种链接。

飞机设计过程是一个不断更改和迭代的过程,上游设计的更改往往会引起下游设计的更改,在 VPM 环境下可通过以上手段建立骨架模型,把模型的参数化设计上升为模型和模型之间的几何元素的驱动关系,设计更改通过骨架模型自上向下传递,最后驱动零件模型的更改。飞机研制过程中,必须在概念研制阶段就制定详细的关联设计规划,根据型号的特点,对结构进行合理的组织和划分,总结和梳理出对象各部分之间的相互影响关系,建立上下游设计之间的约束和控制关系,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。骨架模型作为关联设计的神经中枢,驱动着下游的零件设计,骨架模型划分的是否合理,将决定自上向下关联设计的成与败。骨架模型划分的合理,数据更新在各层级骨架模型间实现顺利传递,并最终驱动零件数据更新;骨架模型划分不合理,可能会导致某些骨架过于庞大、骨架模型载入缓慢,发布元素结构树很难管理,元素不集中,设计员不易查找、调用,影响设计效率,骨架模型维护困难,严重的可能导致下游数据无法更新<sup>[3]</sup>。

### 机加、钣金件全三维数字化建模技术

机加、钣金零件的几何模型既是运动仿真的前提,也是进行有限元等

分析的必要条件,更是工艺和数控编程等制造过程的基础。目前国内外飞机设计制造领域,机加、钣金类的金属零件已率先实现了在 CATIA 环境下的全三维数据集定义,三维模型完全取代了传统的工程图纸,实现了无纸化设计制造。MBD 模式下零件的建模不仅要考虑建模的顺序及品质达到工艺及数字化加工的要求,而且要考虑建模的效率,还要兼顾设计和制造之间数字化传递数据的管理问题。建模的基本技巧和规范只是最基本的建模技术,全三维模式下不但要充分利用好参数化的特征定义与控制,利用好三维模型的表现力,更好、更准确地表达设计意图,更要充分利用知识工程模块,实现建模智能化,使工程信息的抽取和知识的挖掘变的更为容易。

MBD 模式下参数化建模包含 2 个方面内容:

(1) 几何信息的参数化建模。

几何信息主要包括零件实体、工程几何、外部参考和构造几何等。对几何信息的操作主要是对参数的操作,首先应该对零件参数进行分析,目的在于对零件参数进行分类,并在零件参数中提取能直接驱动结构的主参数。这些参数可以分为 3 种类型:一类是不变参数,它是指在零件的各种变型中始终保持不变的参数。第二类是可变参数,是指在零件的各种变型中可以改变的参数。还有一类是导出参数,是指由其他参数计算出来的参数。

(2) 非几何信息的参数化建模。

非几何信息主要有通用说明、零件说明、标注说明、材料描述、基准、尺寸和公差标注、管理信息等。

MBD 模式下基于特征的参数化建模必须综合考虑几何信息和非几何信息的参数化,充分利用 CATIA 提供的 KWA (知识顾问)、KWE (知识专家)、PKT (知识模板) 等知识工程应用手段,借助 CATIA 先进的

CAA 二次开发工具,将设计过程中的设计准则、规范、原理、经验等采用 IF—THEN 形式表达,建立相应设计规则库,存储大量的设计规则、设计规范、设计原理和设计经验,组成企业的基础结构库。

图 1 是某型号飞机的全机结构电子样机,图中的机体结构件多为具有相似特征的机加、钣金件。通过分析结构件特点、整理结构件信息,总结典型特征,将不同系列的典型结构件模板模型参数化,即在结构模板基础上,用一组参数与一系列基准要素来约束定义模型图形,对于不同的几何模型,可以通过修改参数,重新选取建模基准驱动模板发生变化,达到参数化的目的,并通过特征拼接技术实现变型设计,提高建模的效率和规范性,这是当今数字化建模的高级形式。

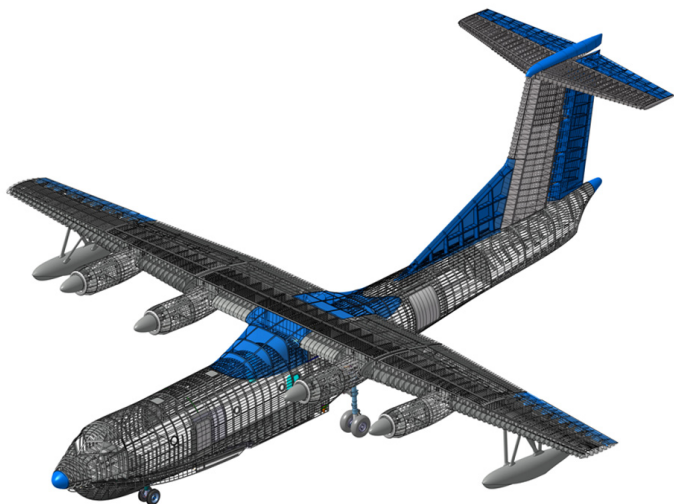


图1 飞机主要结构电子样机

## 标准件的数字化建模技术

在飞机机体装配设计/制造过程中,需要定义及使用大量的标准件,通常标准件的数量占全机零件数量的 80% 左右,为了提高效率,航空企业普遍采用了 CATIA 或 VPM 提供的标准件库功能,利用知识工程 (KnowledgeWare) 模块中的 Formular 命令、Design Table 命令以及 Catalog

命令功能进行参数化标准件建模。在建模时首先利用 Formular 命令建立参数,并为这些参数合理地命名,在建立模型时把这些参数同模型的主要尺寸关联起来,之后利用 Design Table 的命令把这些模型参数存储到表格中,最后将数据表格与模型同时入库,也就是 Catalog 功能,在使用时实时利用表格之中的参数进行模型的驱动,生成新的模型,从而形成标准件的系列化和组合化,一次建模、重复引用。这种建模方法对实例化的标准件非常实用,大大提高了效率,一定程度上满足了型号研制的需要。采用 MBD 技术后,标准件的使用方式发生了根本变化,如果全机所有标准件全部进行实例化引用,数据量巨大,设计员的重复工作很多,浪费时间,管理也不方便,因此出现了标准件的简化表达技术。

MBD 模式下,标准件中的紧固件类标准件简化表达通常采用点、线、圆组合的方式表达,点代表紧固件头部的位置,线代表紧固件最终的长度和方向,圆代表螺母、垫圈、钉套的位置。在 Catia 中采用几何图形集的形式来表达紧固件的结构化数据,几何图形集的名称为紧固件的牌号和规格,几何图形集下以参数的形式对紧固件的名称、重量、重心、规范及

要求进行表达。因紧固件定义具有重复性,利用 CATIA 的 CAA 二次开发工具开发快速定义工具及简化表达紧固件知识库,简化表达紧固件知识库和实体标准件库的的标准件参数应相互关联,为了便于电子样机的干涉检查,简化表达的紧固件可以实时调用实体标准件库的轻量化数模进行装配检查。紧固件定义采用知识推理的机制,根据连接面的距离,自动计算紧固件的长度,按照紧固件的关联组合,自动进行紧固件的匹配选择,并完成紧固件的信息提取、数量统计、牌号统计、以 XML 结构化格式对紧固件 BOM 输出、实现紧固件信息的集成和共享。

## 结束语

随着计算机技术的飞速发展和 MBD 技术的广泛应用,数字化建模技术发生了翻天覆地的变化,本文简要概述了数字化建模的发展阶段,总结了当今主要的数字化建模方法,阐述了 MBD 模式下关联设计建模、机加和钣金参数化建模、标准件建模的主要技术。在新时期、新研制模式下,如何快速、准确、规范的完成产品的数据建模,并把数据模型作为制造的唯一依据已是航空企业为提高设计质量,缩短设计周期、降低研制费用的有力武器,也是我们探索建模技术的方向,随着数字化技术应用的广度和深度不断加强,数字化建模技术将更加智能化、知识化。

## 参考文献

- [1] Grieves M. Product lifecycle management: driving the next generation of lean thinking. New York: McGraw-Hill, 2006.
- [2] 刘爱军,黄松波,闫光荣. 三维 CAD 混合建模技术研究. 第十五届中国科协年会第 27 分会场: 现代图学推动数字设计与制造论文集, 2013.
- [3] 田宏伟,曲直. 基于 MBD 的关联设计技术在飞机研制中的应用. 航空工程进展, 2013(3):381-385.

(责编 小城)