

飞机数字化设计与制造技术 最新发展

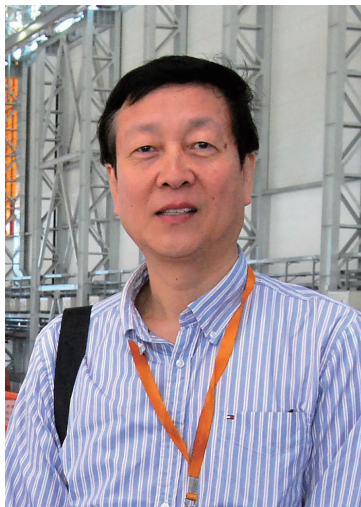
王建华, 李汝鹏

(中国商飞上海飞机制造有限公司, 上海 200436)

[摘要] 自 20 世纪 90 年代波音 777 全数字飞机面世以来, 飞机数字化经过了几个不同的发展时期。在经过了 3D 定义飞机几何参数到 3D 数控加工和数字化装配的重点发展过程后, 飞机设计与制造进入了全逻辑关系的联动数字化时代。为了进一步了解目前的状况, 分析了飞机数字化设计与制造技术的最新发展和应用。

关键词: 飞机设计; 飞机制造; 数字化; 智能制造; 并联设计

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.05.078



王建华

曾任中航工业西安飞机工业(集团)有限责任公司副总工艺师兼工艺装备总工程师、上海航空特种车辆有限责任公司总工程师兼总工艺师、上海飞机制造有限公司工装部部长。现任中国商飞上海飞机制造有限公司支线型号总工艺师, 研究方向为飞机设计与制造的最优化结合。

目前世界上先进制造的主要标志就是数字化设计与制造, 在引领世界先进制造业潮流的飞机制造业方面, 数字化设计与制造技术更是得到普遍应用。20 世纪 90 年代世界上全数字飞机面世以来, 飞机数字化经过了几个不同的发展时期, 在经过了 3D 定义飞机几何参数到 3D 数控加工和数字化装配的重点发展过程后, 飞机设计与制造进入了全逻辑关系的联动数字化时代。为进一步了解目前的状况, 本文对飞机数字化设计与制造技术的最新发展和应用进行分析。

飞机数字化设计与制造的概念和内涵

常规来说, 飞机研制中主要有设计和制造专业, 现代飞机制造的理念把飞机研制涉及的范围拓宽到飞机的全寿命周期, 如今人们提到的飞机数字化设计与制造是指飞机数字化产品设计三维工程定义、数字化飞机制造三维工艺定义、数字化工艺装备设计三维定义、数字三维检测技术

等, 同时结合各个过程中的虚拟仿真、网络传递、数字制造、在线信息管理等技术对飞机产品的整个数字化的执行过程^[1]。

其内涵包括飞机产品设计阶段采用基于模型的产品定义(Model-Based Definition, MBD)技术。在这个过程中, 产品设计充分利用 CATIA 工具, 使用试验仿真技术和使用环境虚拟仿真技术等。

在工艺设计阶段, 制造工程师通过诸如 IDEAL 等平台得到工程设计的 MBD 产品定义, 采用 DELMIA 等模拟仿真技术进行工艺三维设计, 从而得到适用于数字化工厂使用的厂房工艺布局方案、制造过程规划以及相适应的零件制造流程、装配工艺仿真、物流运转模拟、工具配套计划、工装准备进度等^[2]。在整个工艺设计和实施阶段, 通过数字化工具实现无图制造。

另外, 是在飞机工艺装备的数字化设计和制造技术中, 无缝地传递飞机产品 MBD 定义, 建立工艺装备的 TMBD (Tooling Model-Based

Definition) 体系,使飞机工艺装备在飞机生产线全生命周期内实现数字化作业。

自从波音 777 飞机(图 1)大面积采用数字化技术研发以来,世界上各个飞机制造企业都在向数字化技术的方向发展,数字化设计与制造已成为代表飞机技术先进性、安全可靠、协作高效性和使用长寿命的标志。随着数字化设计与制造在近 20 年来形成高校的重点学科,现代制造业把数字化当作基本手段已经是不争的现实,而飞机制造业又是实现数字化最好的试验场地和环境。

飞机设计数字化的最新进展

1 数字化设计定义系统

如今的飞机设计数字化不再停留在单纯的产品几何数字化定义阶段,而是普遍采用 MBD。MBD 是在过去三维设计的基础上,增加有利于制造、采购、管理等大量数字化信息,将飞机产品特有的所有几何信息和过去不包含在飞机产品定义里的非几何特征信息整合在一个模型中,建立基于 MBD 的几何定义、工艺参数和资源信息的统一工作平台,通过协议数据平台实现三维结构化数模的真实无遗失信息传递,保持整个过程的数据唯一性、一致性、共享性和同源性,真正达到飞机研制的协同设计、异地制造目的^[3]。目前,全世界各个飞机制造企业普遍采用或趋向采用 MBD 数字化设计定义技术。

对于 MBD 技术来说,CAD/CAM 工具是支持其存在和发展的基础,而 PDM/PLM 系统是其发挥作用的框架与桥梁^[4]。MBD 技术结合 PLM 技术或 MHI 技术,运用单一数据源的数据中枢系统(Multi-HUB)发挥指令性作用。对于企业内部来说,有利于优化企业制造流程结构方式,建立单一数据源的分布式并行工作环境;



图1 波音777全数字化飞机制造生产现场

Fig.1 Fully digital manufacturing field of Boeing 777

对于全球合作来说,有利于构造跨区域供应商动态协作工作模式。波音公司在 787 飞机上首次采用 PLM 解决方案完成了从工程设计到数字化生产的全过程,自称为全世界首架虚拟飞机。

另一方面,MBD 借助基础设计系统提供的先进 CAA 二次开发工具,充分利用模块化的专业顾问库、经验专家库、标准模板库等手段,将数据定义规范、产品功能原理、工程设计原则、工艺设计准则、结构设计经验等采用数字化的形式表达,运用大数据原理,建立海量的设计职能库,存储大量的设计信息,取代了传统的飞机设计手册和工艺设计规范,组成飞机研制的基础结构库^[1]。

数字化定义系统作为目前飞机研制普遍采用的系统还在不断地完善和发展,并且,每个飞机制造企业在 MBD 方面的理解概念和定义原则并不完全一样,例如波音和空客两大航空制造业巨头对 MBD 的运用还是各自有不同,特别是对于 MBD 数据的传递和管理,两家更是有很大区别。

2 数字化设计环境

除建模的深度和范围在不断更新和发展外,产品数字化建模技术的方法也在不断地丰富和扩展,在常见

的正向设计、逆向设计、标准件建模、参数化建模、二次开发建模等方法的基础上,基于全过程的数字化概念使得越来越多的产品采用关联设计等更科学的方法。

关联设计技术是把孤岛式的单一计算机设计单元建立成有互联关系的联动设计平台,把单个并且互不关联的零件建模技术集成为模型之间的几何元素甚至非几何元素的相互驱动或联动关系,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,在关联设计中,工作关注的焦点在于要素间如何建立联系,在这方面比较著名的系统是在线关联设计协同平台 ENOVIA VPM 系统。在此环境下,常用的关联设计工具有:参数与参数链动(Reference to Reference),位置与位置链动(Instance to Instance),参数和位置同时链动(Instance to Reference)等。

关联设计带来的优势在于使设计技术要求更明确,设计任务更清晰,对设计实现的最终目标更清楚,对数据选择性的设计共享更直接,模型结构树更短,设计步骤更清晰,发现设计更改或设计错误更容易,数据的快速重用更方便,项目的管理状态更直观,易于 IPT 团队间的实时协同

设计,可以使用不同设计节点上任何人发布的设计数据,减少知识库管理的工作量。关联设计是目前国内外飞机研制最新的、主要的建模方法,是数字化技术提高到一定水平的情况下,数字化多专业设计和各类数据管理高度融合的结果。关联设计为数字化设计建立了一个良好的互动平台^[5]。

关联设计技术尽管不是最新的概念,但真正在整个型号研制中使用则是在诸如波音 787,空客 A380、A350、A400M 等 21 世纪研发的新型大型客机上,这些型号飞机普遍采用了 MBD 环境下的关联设计。波音在回顾 787 飞机研制成果时,把关联设计列为 10 大技术成果的首位,说明了波音公司对关联设计技术的重视程度。空客在研制 A400M 运输机和 A350 客机时,广泛使用关联设计技术,更显示了关联设计技术在飞机研制数字化技术应用中的重要性。国内也有个别军机型号尝试着采用关联设计技术,均获得成功。期待中国的下一代民机设计也开始使用关联设计技术。

3 缩短飞机设计时间的探索

为了缩短飞机设计时间,加快 MBD 的建模速度,空客于近年引进了 DATADVANCE 公司开发的 MACROS 设计软件,并在新飞机的多个领域研发中使用了这款软件,解决了建模中的数值优化问题、数据高水准分析问题和复杂协

调系统的高级算法问题,同时,缩短了 10%~20% 的飞机设计前置时间(lead time)^[6]。

还有飞机公司在探索基于 MBD 和多代理的飞机结构件协调设计、基于 WetMeeting 的 MBD 协调设计和基于 JAVA 3D/Web 的协调设计等。

飞机制造数字化的最新进展

1 数字化制造系统——数字化工厂

在数字化飞机设计与制造系统中,数字化制造不再是单一的数控化、自动化生产模式,而是以数字技术、网络信息技术与先进制造技术不断融合、发展和应用相结合的高平台展现在人们面前,这里重点介绍的是数字化工厂(Digitalized Factory)(图 2)。

数字化工厂技术是将 MBD 数字模型定义和经过 DELMIA 虚拟工艺仿真设计的制造过程信息,经过 PDM(Product Data Management)、MRP(Manufacturing Resource Planning)、MIS(Management Information System)为主体的制造信息支持系统和数字控制系统转化,以 MBI(Multiplex Bus Interface)的形式发布给制造作业的各类操作者,包括人和设备,实现数字流环境下的飞机制造。

2 数字化制造环境下的技术和方法

在数字化飞机制造过程中的数字化工厂大环境下,各家航空制造企

业采用了许多先进的制造技术和方法,比如数字化精准制造技术(包括钣金精准制造、机加精准制造、复材零件精准成形、激光精密成形、系统附件三维制造以及锻铸件精密成形技术等)、结构件整体加工技术(包括钛合金超塑成形等)、柔性化快速制造技术(包括数字化柔性装配技术、数字化柔性制孔技术、数字化工艺装备技术等)、直接数字制造技术——3D 打印技术(包括加法制造、快速原形、个性化制造、分层制造、快速制造等)、数字化检测技术、信息化中枢指挥技术等。

还有在飞机部件生产中以高能量密度、高焊接精度和高焊接效率为特点的激光焊接替代铆接的先进技术,过去仅在军机机体制造中使用,现在已经在最先进的民机壳体壁板上得到大面积运用。比如空客 A380 飞机上的机身壁板蒙皮与长桁的连接、机翼油箱隔板与加强筋的连接就是采用的激光焊接技术,连接质量大幅度提高的同时,使得飞机重量减轻 18%。

近期,随着中国制造 2025、工业 4.0 等概念的推出,航空制造业在寻求和探索智能制造的方法,自动化制造、机器人辅助装配、流水线集成、移动生产等一批新技术都得到实施。

数字化给飞机设计和制造过程带来的变革和突破

数字化技术不仅为飞机研制注入数字化的概念,而且给飞机设计和制造过程带来了巨大的变革和突破。过去,一个飞机型号从工程设计开始到飞机实体进入装配阶段,往往要经过一个漫长的过程,这其中要进行的工作至少包括产品设计方案规划阶段、详细设计阶段、成熟度出图阶段、工艺准备阶段、生产准备阶段、零组件制造阶段,最后实施装配。

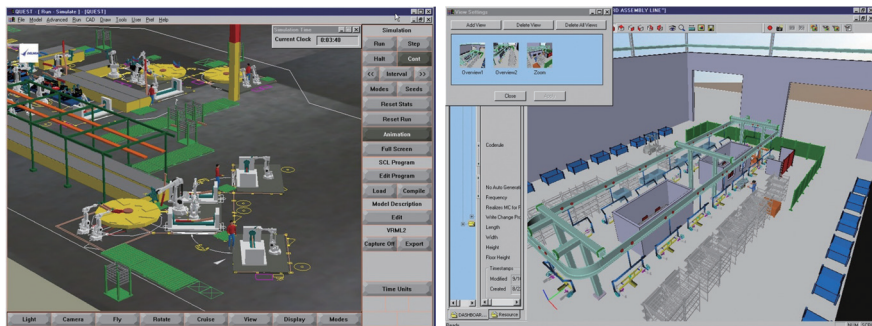


图2 数字化工厂案例
Fig.2 Digital factory cases

由于数字化技术的普遍应用,特别是并行设计和数字化工厂的实现,为飞机研制采用了诸如并行工程工作法等先进制造方法创造了平台和条件。

并行工作是将不同的专业或部门通过一定的约束条件和工作规则,集中在一个工作环境中,在同一平台上进行同一项目目标而工作结果不同的活动,从而推动项目缩短周期,协调推进。并行工作是集成地、并行地设计产品及其相关过程(包括制造过程和支持过程)的系统方法。并行工作方法有很多种,如专业并行、型号并行、跨职能并行、跨地域并行、临时并行、重组结构并行等工作模式^[7]。

空中客车公司为在欧洲范围内高效研发新飞机,建立了并行工程ACE领导小组,对每个型号的研制提出并行工程工作的组织方案,指导并行团队的工作;同样,波音对于每个型号飞机的研制,均采用并行工程的模式,并且固化为“波音 7X7 事业部”的形式存在。

并行工程的特点为基于集成制造的并行性、并行有序、群组协同、面向工程的设计和计算机仿真技术。针对这 5 个特点,最好的方法是成立飞机型号事业部,特别是大胆把工程设计与工艺设计及工艺装备设计专业合并,在产品的方案设计初期就由工艺、工装及制造人员开始介入,进行面向制造和装配的产品设计,将工程信息、工艺信息、工装信息、检测信息等一一在 MBD 数模中体现,按照工程发展成熟度的原则分阶段发放综合协调数模,以综合协调数模为依据,产生生产制造所需的工艺数据集、数控加工数据集、装配数据集、工装数据集、测量数据集,同时开始材料采购、工装制造、零件制造,适时开展部件装配。这体现了基于集成制造的并行性、群组协同、面向工程的设计和计算机仿真技术等特点,这就

是国内近年称之为“大工程”组织的概念(图 3)。

数字化虚拟六维现实环境仿真技术 VR 的应用,如图 4 所示,为飞机研发人员进入虚拟空间的任意位置提供了可能^[8]。通过虚拟现实技术不仅能提前发现和解决飞机实体制造中的不协调问题,还为高层管理及时提供了可视化的信息,从而真正实现了传统工作方法过程中无法实现的全空间、全领域、全功能零接触的理想化环境,可大大提高飞机设计的质量,减少飞机制造的费用,缩短研发周期^[8]。目前,波音、空客、庞巴迪及国内飞机制造业都在使用和建造自己的虚拟六维现实环

境。

飞机设计与制造技术未来的发展

对于飞机设计与制造技术的未来数字化发展,行业人士始终在不停地进行研究。洛克希德·马丁公司在美国新一代战机制造中,从设计开始到最终装配,形成了不间断的数字链路,创建了“数字线(digital thread)”,这种新的简捷而又实用的工作模式^[9]大大提高了现场的工作效率,提高了供应商成品的配套准确性,特别是为每架战机保存了完善的生产过程信息数据,为飞机的外场维修服务提供了便利条件^[10]。

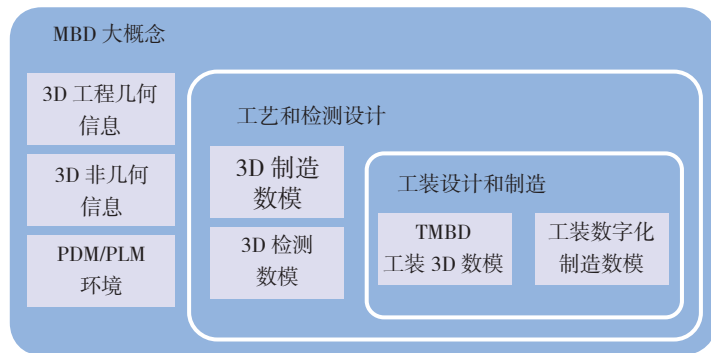


图3 MBD下的大工程概念

Fig.3 Big project concept under MBD



图4 数字化虚拟六维现实环境

Fig.4 Digital six-dimensional virtual reality environment

美国 NGMTI(下一代制造技术计划)提出了未来 10 年在美国飞机制造业中拟采用更新的制造技术——基于模型的企业(Model-Based Enterprise, MBE)。MBE 是一种比数字化工厂更进一步的数字化制造实体,它采用更完整和更科学的多维建模与仿真技术,集 MBD、DF、PDM、MIS、ERP 等数字化运作之大成,对产品的全寿命流程进一步优化,采用科学的模拟与分析工具,在产品形成的每一个阶段及时发现问题和给出最合理的解决方案,对动作执行作出最科学的行动决策,从根本上提高产品的设计开发效率、加工装配质量和销售支援迅捷。MBE 也许将成为未来飞机先进制造技术的又一个高平台,从而代表数字化飞机设计与制造的未来发展趋势^[1]。

欧洲空中客车公司在先进设计和制造方面也提出了许多崭新的概念,比如,相对应“职能工厂”,空客极力在进行“未来工厂”的探索和实践,在 A350 和 A380 飞机的制造中,基于虚拟仿真、数字化样机、精益生产、关键信号等技术,空客成功采用了“数字工厂”技术,下一步空客结合“智慧飞行”计划,会将“电子商店”、“全生命周期数字化”等理念作为其创新的重点。

结束语

飞机设计与制造随着数字化技术的发展而不断创新,本文仅对目前最主要的技术进行了分析,但无论如何变化和进步,在一定时间段内,飞机设计和制造方面流行的先进技术类别是相对固定的,作为飞机制造行业要做的最合适和正确的事情是不断追求先进,踏实做好现在,科学规划好未来,使飞机数字化设计与制造技术一步一个脚印,为制造出更先进的飞机而努力。

参考文献

- [1] 陈绍文. 数字化制造的内涵、未来和当前的应用问题 [EB/OL]. [2011-07-27]. http://articles.e-works.net.cn/CAPP/Article89260_2.htm.
- [2] CHEN Shaowen. The connotation, future and current application of digital manufacturing [EB/OL]. [2011-07-27]. http://articles.e-works.net.cn/CAPP/Article89260_2.htm.
- [3] GRIEVES M. Product life cycle management: driving the next generation of lean thinking [M]. New York: McGraw-Hill, 2006.
- [4] 于勇,陶剑,范玉青. 大型飞机数字化设计制造技术应用综述 [J]. 航空制造技术, 2009(11):56-60.
- [5] YU Yong, TAO Jian, FAN Yuqing. Application of digital design and manufacturing technology for large aircraft [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(11):56-60.

[4] 段玲利. 基于 MBD 的飞机数字化设计技术应用分析 [J]. 科技创新与应用, 2015(35):112.

DUAN Lingli. Application and analysis of aircraft digital design technology based on MBD [J]. Science and Technology Innovation and Application, 2015(35):112.

[5] FRANZ K, HÖRNSCHEMEYER R, EWERT A, et al. Life cycle engineering in preliminary aircraft design [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2012:473-478.

[6] 依然. 空客采用新数值分析软件缩短飞机设计时间 [J]. 航空制造技术, 2013(15):22.

YI Ran. Airbus uses a new numerical analysis software [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(15):22.

[7] CURRAN R, ZHAO X. WJC verhagen concurrent engineering and integrated aircraft design [M]. Berlin: Springer International Publishing, 2015:571-606.

[8] 姚雄华,李磊,张杰. 虚拟现实技术在飞机设计中的应用 [J]. 航空制造技术, 2013(3):67-70.

YAO Xionghua, LI Lei, ZHANG Jie. Application of virtual reality technology in aircraft design [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(3):67-70.

[9] KINARD D, MARTIN L. The digital thread—key to F-35 joint strike fighter affordability [J]. Aerospace Manufacturing and Design, 2010,9:70-75.

[10] PRICE M, RAGHUNATHAN S, CURRAN R. An integrated systems engineering approach to aircraft design [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2006,42(4):331-376.

Latest Development of Aircraft Digital Design and Manufacturing Technology

WANG Jianhua, LI Rupeng

(COMAC Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436, China)

[ABSTRACT] Since Boeing 777 fully digital aircraft occurred in 1990s, aircraft digitization has experiences several different development periods. From the process of defining the geometry parameters of the 3D aircraft to the 3D numerical control machining and the digital assembly, the aircraft design and manufacturing has entered the linkage of the whole logic relationship. In order to further understand the current situation, we analyze the latest development and application of the aircraft digital design and manufacturing technology.

Keywords: Aircraft design; Aircraft manufacturing; Digitization; Intelligent manufacturing; Parallel design

(责编 李丹)