

浅析大飞机数字化设计与制造技术

谢 剑¹,李正强²,黄 帅²,乔文峰²

(1. 上海飞机设计研究院飞控部,上海 200436;

2. 上海飞机设计研究院民用飞机模拟飞行国家重点实验室,上海 200436)

[摘要] 大飞机工程是一个国家具有战略性的高技术产业链,而数字化技术在大飞机设计制造过程中的应用有效推进了大飞机的设计制造进程。论述了大飞机数字化技术的几个典型特征,并从设计制造的9个方面浅析了数字化技术在大飞机设计制造中的应用,涵盖了大飞机设计制造的大多数领域。展望未来数字化技术将会越来越深入地融入到大飞机设计与制造的每个角落。

关键词: 大飞机;数字化;全三维;设计;制造

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.05.087



谢 剑

工程师,工学博士,毕业于上海交通大学机械动力工程学院,现工作于上海飞机设计研究院,从事大飞机高升力系统的设计研发验证工作。

大飞机工程是一个国家具有战略性的高技术产业链,所涉及专业之广,运用技术之新远远超过其他行业,是现代化科技技术高度集成化的系统性工程,也是衡量一个国家科技工业水平乃至综合国力的标志之一。我国已经多次从战略级高度看待并定义了大飞机产业,目前,国产支线飞机均取得里程碑进程,虽然近年来我国大飞机产业迅猛发展,但是大飞机事业仍然任重而道远,多方位技术的攻关仍在进行中。

数字化技术是以计算机软硬件、周边设备、协议和网络为基础的信息离散化表述、定量、感知、传递、存储、处理、控制、联网的集成技术^[1]。大飞机的数字化设计与制造利用现代计算机技术和信息技术,建立一系列数字化描述空间并在其中进行设计与制造。其实质是建立数字化模型,完成设计与制造过程的数字化^[2-4]。本文概括介绍大飞机数字化技术的特征,以大飞机的数字化技术需求为背

景,对目前数字化技术在大飞机设计与制造中的应用进行分析。

大飞机数字化技术特征

1 研制方法的本质改变

数字化设计技术的引入使得飞机研制方法从早先的基于物理实体样机的方式转变为基于三维数字样机的方式。早期的飞机传统研究过程大致可分为4阶段:概念设计、初步设计、详细设计和生产制造。4个阶段中,飞机主机商均需要通过制作真实缩比例物理样机来验证飞机设计的准确性,研制过程是串行的,前面一阶段未完成验证,无法继续开展下一阶段的设计改进工作^[5]。

而在现代大飞机研制过程中,传统的物理样机和模线已经被数字化的三维数字样机所替代,跨部门和跨专业协调设计可以方便实现,研制过程可以并向进行。目前,国产大飞机采用自主知识产权的全三维数字样机设计,飞机所有结构部件和系统设

备均通过构型项挂接三维数字样机平台,通过对整个平台的数字化管理与检查,相关专业可以很清晰地得到目前设计的各项数据,如设备结构距离、干涉情况、过于靠近情况,并对检查结果进行评估以及时改进设计,极大缩短了协调设计周期;并且全三维数字样机贯穿研制过程多个阶段,从概念设计至生产发图阶段持续有效并进行改进。

2 贯穿整个飞机研制过程

数字化的技术贯穿了整个大飞机研制过程。从横向看,多学科多专业多合作单位借助数字化平台充分整合起来,所有设计制造数据通过数字化设计工具高效地流转传递;从纵向看,数字化技术贯穿了整个大飞机的设计研发制造流程,各个阶段都借助于数字化工具极大地提高了研制效率,甚至说,数字化技术在大飞机研制的某个阶段产生革命性的颠覆影响。详细论述见本文后续关于大飞机设计制造技术的各方面应用。

大飞机具有自主知识产权的全周期数字化技术与平台、数字化定义与工具的使用贯穿整个飞机的研制阶段,从方案论证阶段至详细设计阶段,再到工程发展、试验取证阶段,直至大飞机的交付,处处展示了数字化技术的魅力和效率,数字化技术贯穿了整个产品研制过程。

3 向全三维技术发展

如今的主流设计数模建模较为广泛地使用三维建模手段,大飞机产业中国内外使用较为广泛的三维数模建模软件有 CATIA、Pro/E、UG 等。传统三维数模建模软件可以对零部件进行精确的几何建模,使用各种算法有效生成飞机舵面、翼身整流罩等复杂曲面的外形,但是所构成的三维数模无法集成各类工艺信息,因此设计人员需要使用投射模块将三维数模转化为二维图纸,并在二维图纸中加入所需要的工艺流程以及各类设计的直接表述。而且,传统的三维建

模中,零件关键部位的放大剖面图也无法表示。因此,在实际设计生产过程中,设计人员不仅要进行三维建模,更需转化为二维图纸以加入更多的非几何信息和放大剖面图。这种分离的二次图纸管理,往往会产生二次错误风险,可能难以保证数据的一致性^[5]。

而全三维技术则是在传统三维建模软件中进行二次开发,进一步加入多项功能,让设计员可以直接在三维数模中直接加入各种非几何信息和直接设计意图,如公差和粗糙度的要求、设计工艺的改进、润滑油信息、倒角如何处理等。无论是飞机设计人员,或是负责生产装配的工厂人员,均使用同一份全三维技术模型传递所有工程信息,极大地缩短了飞机研制生产周期,节省了飞机研制生产成本。

从我国研制的两款喷气大飞机可以清晰地看到上述发展转变的脚步,某商用支线飞机在初步设计阶段和详细设计阶段初期所建立的飞机数据模型均为三维实体模型,而到详细设计后期与工程发图阶段设计人员均将三维实体模型转化为二维图纸模型并将各类工艺制造信息标准在二维图上传递至生产装配工厂,这增加了模型构型管理项,增加了转化环节,并造成设计与工厂沟通过程中部分信息的脱节遗漏。而后大飞机从概念设计初始便定义了采用全三维数字技术,生产数据的发放均通过三维模型执行。设计人员和生产人员可以从全三维模型中得到所有的工程信息,极大地提高了各参研单位、部门之间协调的效率,降低了飞机研制费用,缩短了飞机研制周期。

数字化设计制造技术应用

1 方案设计与决策

大飞机方案设计与决策的数字化技术通过使用计算机辅助飞机总

体设计软件工具并结合大飞机自身运营特点,围绕安全性、经济性、舒适性和环保性的要求,开发出有特色的先进软件系统,为方案设计与决策阶段的工作提供支持;数据化软件系统集成分析市场中心、相关咨询机构和民航局各类行业运营和市场分析报告,提出具体飞机的性能要求和主要技术需求,在此基础上形成一系列的基础方案,然后通过对方案的各类调研和综合分析,持续完善方案;通过软件综合评估对比各类方案信息,支持总设计师系统选定最佳的初步总体方案,并确定“型号设计要求”。

2 综合设计与工程发展

综合设计与工程发展中的数字化技术主要应用于大飞机总体方案论证阶段的初步设计和研制阶段的详细设计,其目的是通过使用一系列数字化工具与方法提升上述两个阶段的综合设计能力。客观要求是基于一个基本总体方案,综合运用各类数字化定义工具与方法(图1),协助飞机总体设计与布置人员高效进行飞机的总体布置与设计,各个系统专业设计人员进行结构部件和系统部件的三维数字化模型布置,反复协调完成全机三维数字化电子样机,在三维数模中集成各类工艺信息和设计意图,发放工厂。在初步设计和详细设计中,主干线为全机数字化定义的不断推进;次支线为全机各专业部门通过协同对不同的部件和分系统开展设计,形成了一系列数字化设计分系统,如总体气动设计分系统、结构强度设计分系统、动力推进系统设计分系统、机械系统设计分系统、电气系统设计分系统等。各个分系统开发或者配置不同的数字化设计软硬件,分系统之间通过核心处理系统相连,核心处理系统负责将各个分系统的设计实时地综合到服务器的全机三维数模中,通过对核心处理系统的操作可以实时地调动全机的电子

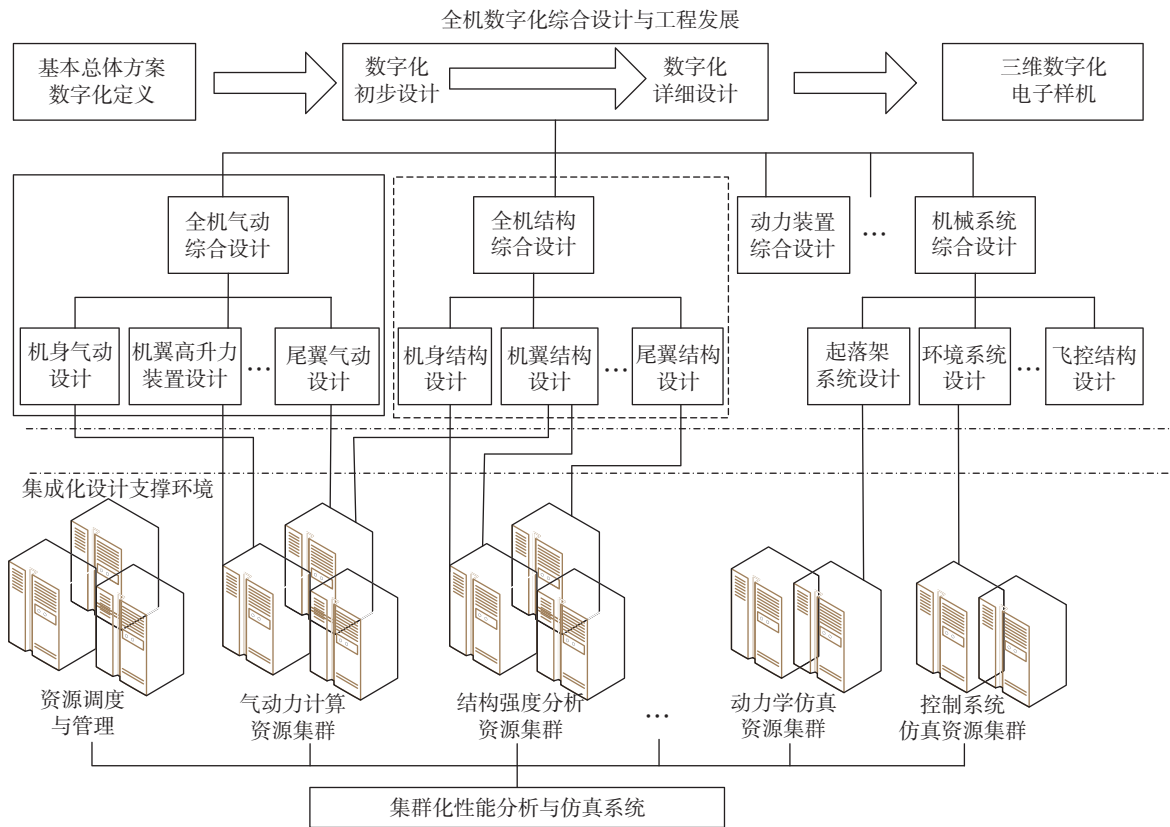


图1 大飞机综合设计与工程发展的数字化技术流程

Fig.1 Digital technology procedure of general design and engineering development for large aircraft

样机^[1]。

3 性能分析与仿真

大飞机的气动外形设计、结构强度设计、系统性能设计等都需要借助于功能强大的工程化、数值化性能分析和仿真软件。飞机设计员通过初步的比较经济的数字仿真结果来验证需求是否被满足以及相关设计是否可以被改进。如在初步设计和详细设计阶段,需要精确地分析全机的气动特性、结构和各系统部件重量特性、飞机的操稳飞行品质、结构强度验算等,进入工程发展阶段需要在系统试验之前通过仿真来分析验证系统部件的设计性能,对于大飞机而言,目前噪声仿真分析也成为其仿真分析中的重要组成部分。

在大飞机性能分析与仿真过程中,计算流体力学、结构有限元分析等软件已经是常用工具,但其消耗巨大的计算资源和时间,而且价格比较昂贵,因此可以创新性地应用它们,

例如将它们集中在配置较高的计算机硬件上,并通过专业软件进行管理和调度,形成集群化的优势。

4 试验试飞

大飞机试验从学科专业角度来分包括各类气动试验、强度试验、结构试验、系统试验工程模拟器试验、试飞试验等,从适航验证角度来分包含MOC4(铁鸟)试验、MOC5(机上地面)试验、MOC6(试飞)试验、MOC8(工程模拟器)试验,还包括供应商的各类MOC9(部件鉴定)试验。大飞机试验的开展一方面是为了验证方案和设计是否能够满足设计要求,另一方面是为了向局方表明飞机的设计可以满足适航条款。上述如此繁多的试验必然产生大量的数据,各试验单位和提出专业一般有自成体系的一套数据采集处理工具,如果设计过程中引入中心试验信息管理系统,对所有试验数据综合存储、管理,可以极大增加试验数据的处理利

用效率。

如图2所示,大飞机试验中引入中心数据库,集中地管理设计单位提出的试验任务书、试验部门和合作试验供应商传回的试验数据、分析报告等相关信息。各相关专业通过试验核心管理平台可以高效调用各类数据,尽快处理分析试验结果,优化设计^[1,6]。

5 营运与制造

虚拟现实营运和制造仿真技术利用数字化软硬件,模拟大飞机营运中的典型参数如客舱参数、应急疏散参数、地面维护保障参数、总装环境等(图3),通过对飞机与人员、机场设施、制造车间等外部环境的沉浸式仿真,在设计早期就能以很低的代价验证设计方案能否满足营运过程和制造过程中的相关要求,提高大飞机的安全性、经济性、舒适性和可靠性。

虚拟现实仿真提供了基于计算机三维数字电子样机的高度仿真,

并获得了工程模拟器才可以达到的高度人机交互,它集成了设计方、维修方和客户的交互平台,可以在虚拟的环境下进行维护、训练和验证;而且,随着计算机能力的提升,虚拟场景可以更加逼真地模拟制造和营运过程中出现的任何人员和环境,仿真结果对整个方案的评价更有说服力。

6 知识管理

大飞机的设计与制造是一个超级复杂的系统工程,研制过程中必须尽可能使各阶段的工作规范化、标准化,以保证型号的成熟度并提高在局方以及公众心中的认可度。知识管理中的数据化技术主要体现在以下几个方面:

(1)有效收集、管理国内外已有的设计资料及数据(如各个机型的CMM、AMM、设计参数等)、以往设计过程中出现的问题(如专家评审中的问题,系统PDR/CDR中的问题)和解决方法,将解决归零报告及时电子归档,以便后续参考使用。目前具有两个型号的数据使用平台,所有技术文件均通过平台完成电子签审发布和归档。

(2)建立大数据库统一管理研制过程中的各类海量标准规范和手册并用于指导设计,使飞机设计研制有据可依,并使飞机能够更加紧跟国际先进标准的步伐,更好地满足了各方面的要求。

(3)管理基础性设计资源,例如发动机、机载设备、座椅、机上设施等。建立可扩展数据库,不断丰富完善其中数据,以方便需要时调用。

7 适航取证

适航取证是大飞机区别于其他飞机的主要特点,也是一大技术难点。适航取证中的数字化技术主要借助于数字化平台,与知识管理相结合建立大适航取证数据库,通过使用大平台可以方便调用适航取证系统的条例库,查询某型号所用条例的细则、相关的咨询通告等,并将历次接

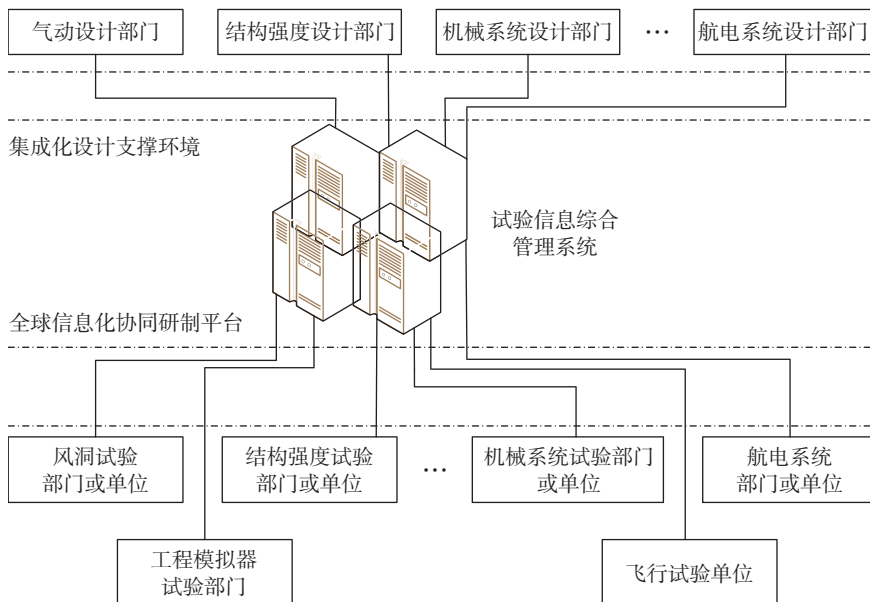


图2 大飞机试验综合管理中心数据库应用管理

Fig.2 Database application management of general management center for large aircraft test

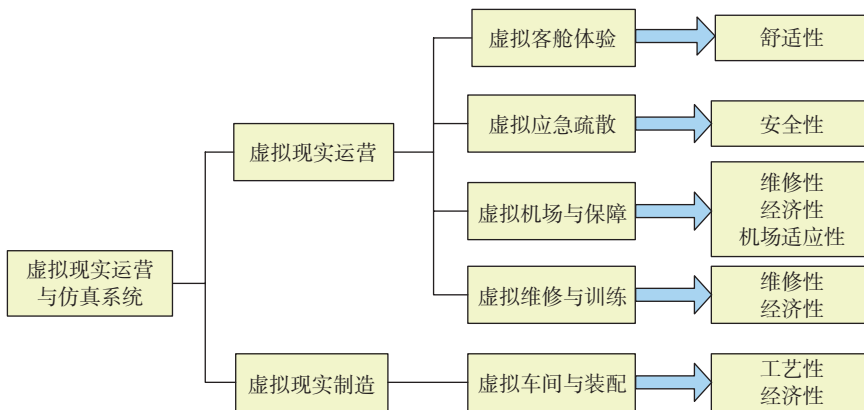


图3 大飞机虚拟营运与制造仿真应用

Fig.3 Virtual operating and manufacturing simulation application for large aircraft

收局方审查资料统一组织管理,相关问题描述作标签提示,以便后续型号参考利用。

8 项目管理

数字化技术除了给大飞机设计与制造提供研制过程中的技术层面支持外,还应提供项目管理的支持应用。大飞机研制过程中,数字化的项目管理系统对于建议高效化、流程化的集成管理意义十分重大。近年来工业制造中应用较为广泛的企业资源计划管理系统(ERP)能够对企业的人力资源、财务成本、综合保障、资产整合等企业职能全方位管理,极大提高了企业资源管理能力。

大飞机的数字化管理系统可以基于上述成熟的ERP,如有必要进行二次开发,使得各个系统的功能更加紧密地服务于大飞机设计的各个环节。

大飞机数字化项目管理系统中期待建议如图4中的5个基本管理模块,分别为项目规划与控制子系统、项目资源管理子系统、质量管理子系统、合作事务管理子系统和指令与审核支持子系统。项目规划与控制子系统主要为新飞机项目设计,它的作用为规划整个项目的关键节点和主要进度,并根据已经规划好的节点控制各参研部门或IPT团队的研

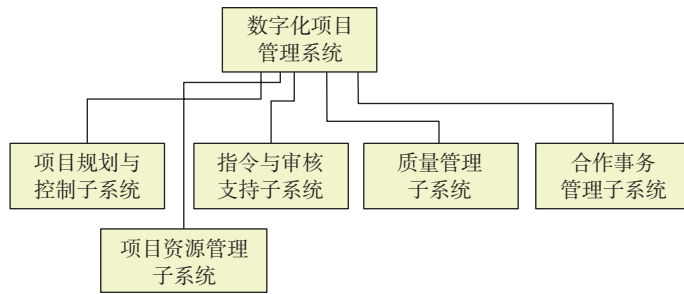


图4 数字化项目管理系统的组成

Fig.4 Composition of digital project management system

发进程；项目资源管理子系统主要用于调用分派飞机设计制造过程中的各类资源，包括人力资源、设备资源等，针对具体大飞机型号建立 IPT 团队并为 IPT 团队分配具体的人力资源，实施过程中根据项目进度智能地适当增加或者减少资源控制人力成本；质量管理子系统建立完整的质量数据库，管理型号研制过程中各类评审或者质量自查、复查产生的质量事件并及时通知设计人员协调解决关闭；合作事务管理子系统对合作供应商或者制造商的相关活动和事务进行管理，存储各类供应商提交的设计资料和数据，向供应商发放设计要求文件和相关数模等；指令与审核支持子系统集成总师决策系统指令平台，提供设计部门相关执行行动项关闭接口。

9 制造过程

传统飞机制造过程中尺寸传递仍大量采用模线样板法，它借助具有特定形状和尺寸的专门模具，使飞机设计图纸中的形状和尺寸能够准确传递到零件上。该方法的缺点是会产生误差的累积叠加，各个环节的尺寸误差均可能反映到最终的零件上，而为了控制最终零件的误差，一方面，设计人员可能对单个零件的尺寸公差要求得特别严谨，超过了生产单位的技术能力；另一方面，如果设计人员放松了单个零件的尺寸公差，巨大的积累误差可能造成飞机部装和总装的困难，造成某些部件无法装配或者强行装配后产生巨大的应力，不

能满足疲劳强度要求。

大飞机制造过程中数字化技术期望贯穿设计制造的整个上下游，是对整个飞机进行的并行协同定义、建模和仿真。全三维数模技术的应用避开了三维数模生成二维图纸的环节，使得三维数模数据从设计上游无缝传递到制造下游，具体的应用中可以期望将这些三维定义数据直接与制造车间的数字化加工设备相连，并与检测设备接轨，实现设计数据与制造参数之间的精确对接^[5-9]。

结束语

大飞机的数字化设计与制造是大飞机高科技含金量的体现，是信息技术和大飞机工程有机结合的具体应用。数字化技术将会越来越多地体现在大飞机设计的更多环节，如大飞机飞控系统数字化设计技术、大飞机气动外形数字化设计技术、大飞机数字化高集成化装配等。随着信息技术的发展和计算机处理能力的提高，数字化技术会引起大飞机设计集成的创新、生产制造的自动集约化，必将推动大飞机工业产生革命性的巨变，引领航空工业迈上新的台阶。

参考文献

- [1] 吴光辉, 刘虎. 大型客机数字化设计支持体系框架 [J]. 航空学报, 2008,29(5):1386-1394.
- [2] 宁振波. 数字样机在飞机设计中的应用 [J]. 航空制造技术, 2002(10):20-21.
- [3] 徐光明. 数字化技术在超七飞机研制中的应用 [J]. 中国制造业信息化, 2003(6):53-54.
- [4] 周祖德, 李刚炎. 数字制造的现状与发展 [J]. 中国机械工程, 2002,12(6):531-533.
- [5] 于勇, 范玉青. 飞机构型管理研究与应用 [J]. 北京航空航天大学学报, 2005,21(3):278-283.
- [6] 杨玺, 范玉青. 飞机构型控制技术初探 [J]. 北京航空航天大学学报, 2000,16(3):357-360.
- [7] 任晓华. 美国信息化带动航空工业发展实例 [J]. 航空制造技术, 2003(11):23-25.
- [8] 飞机设计手册总编委会. 飞机设计手册—民用飞机总体设计 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2005.
- [9] 姜国华. 虚拟现实技术及在航空航天中的应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.

Sinica, 2008,29(5):1386-1394.

[2] 宁振波. 数字样机在飞机设计中的应用 [J]. 航空制造技术, 2002(10):20-21.

NING Zhenbo. Application of digital mock-up in aircraft design[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2002(10):20-21.

[3] 徐光明. 数字化技术在超七飞机研制中的应用 [J]. 中国制造业信息化, 2003(6):53-54.

XU Guangming. Application of digital technology in aircraft development[J]. Manufacturing Information Engineering of China, 2003(6):53-54.

[4] 周祖德, 李刚炎. 数字制造的现状与发展 [J]. 中国机械工程, 2002,12(6):531-533.

ZHOU Zude, LI Gangyan. On state and development of digital manufacturing[J]. China Mechanical Engineering, 2002,12(6):531-533.

[5] 于勇, 范玉青. 飞机构型管理研究与应用 [J]. 北京航空航天大学学报, 2005,21(3):278-283.

YU Yong, FAN Yuqing. Study and application of aircraft configuration management[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005,21(3):278-283.

[6] 杨玺, 范玉青. 飞机构型控制技术初探 [J]. 北京航空航天大学学报, 2000,16(3):357-360.

YANG Xi, FAN Yuqing. Pilot study of aircraft configurations control[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000,16(3):357-360.

[7] 任晓华. 美国信息化带动航空工业发展实例 [J]. 航空制造技术, 2003(11):23-25.

REN Xiaohua. Informatization driving development of American aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2003(11):23-25.

[8] 飞机设计手册总编委会. 飞机设计手册—民用飞机总体设计 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2005.

Aircraft Design Manual Editorial Board. Aircraft design manual—civil airplane conceptual design[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2005.

[9] 姜国华. 虚拟现实技术及在航空航天中的应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.

JIANG Guohua. Virtual reality technology and its application in aeronautics and astronautics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007.

Digital Design and Manufacturing Technology Analysis on Large Aircraft

XIE Jian¹, LI Zhengqiang², HUANG Shuai², QIAO Wenfeng²

- (1. Flight Control Department, Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 200436, China;
2. State Key Laboratory of Civil Aircraft Flight Simulation, Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 200436, China)

[ABSTRACT] Large aircraft program is high-tech industry with national strategy. Digital technology application in large aircraft has greatly promoted the design and manufacturing procedure of large aircraft. The paper describes several typical features of large aircraft digital technology and analyzes the digital technology application in large aircraft design and manufacturing from 9 aspects which cover most areas in large aircraft design and manufacturing. Digital technology will be more and more applied into every corner in large aircraft design and manufacturing in the future.

Keywords: Large aircraft; Digitalization; Full 3D; Design; Manufacturing

(责编 李丹)

(上接第 72 页)

Status and Development Trends of Polymer Matrix Composites on Advanced Aeroengine

CHEN Wei

(AVIC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

[ABSTRACT] This paper introduces the development and applications of advanced polymer matrix composites on aircraft engine at home and abroad, discusses the problems in the development of domestic polymer matrix composites. Finally, the problems to be solved urgently, such as raw material, low cost technology, design system and tools, airworthiness requirements are also discussed.

Keywords: Polymer matrix composite; Aeroengine; Fan casing; Fan blade

(责编 李丹)

(上接第 77 页)

XU Jinmei. Study on processing technology of large thin wall casing[J]. China New Technologies and Products, 2012(18):118.

[7] 山高刀具(上海)有限公司. 航空发动机机匣加工解决方案[J]. 航空制造技术, 2014(12):102-103.

Seco Tools (Shanghai) Co. Ltd. Solution for processing aeroengine casing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(12):102-103.

Research on Key Technology of Aeroengine Casing CNC Machining

REN Junxue¹, TIAN Weijun¹, YAO Changfeng¹, LIU Zhiwu²

- (1. Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. AVIC Xi'an Aero-Engine (Group) Ltd., Xi'an 710124, China)

[ABSTRACT] As the key component of aeroengine, it is difficult to guarantee the casing machining quality because of the complicated shape and structure. In this paper, through analyzing the structural characteristics of the casing, the technical difficulties in processing and manufacturing, a set of multi-axis CNC machining process is proposed, which effectively solves the problem of the quality and efficiency of aircraft casing processing. The process method has certain reference function and popularization value for the CNC machining of aerospace thin-walled parts.

Keywords: Thin-walled component; Casing; Process parameter; CNC machining

(责编 李丹)