

# 大飞机数字化制造关键技术

韩志仁

(沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 沈阳 110136)

**[摘要]** 大型飞机数字化制造是一个非常复杂的系统工程,主要关键技术包括数字化并行协同技术、仿真技术、数字化测量技术、智能集成技术、柔性制造技术、飞机部件便捷传送技术、数字化信息处理技术、脉动线制造技术等,通过这些关键技术保证大飞机数字化制造的每个环节高效、顺利地进行,从而保证大飞机研制和生产周期短、质量高、成本低。对关键技术进行了综述分析,指出了关键技术中技术要点和关键问题,对更好地开展大飞机数字化制造具有参考作用。

**关键词:** 大飞机; 数字化制造; 协同仿真; 数字化测量; 柔性制造

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2016.1/2.053



韩志仁

教授,博士,博士生导师,主要研究方向为钣金成形 CAE 和数字化制造技术。

大飞机是一个国家军事战略的重要技术支柱,也是国家经济的重要领域。大飞机的设计制造集成国内前沿高新技术,是国家基础工业水平的体现,同时可以提升国家整体技术水平。在美国、欧洲等国家大飞机产

业不仅带动了经济、技术的迅猛发展,而且在相关领域取得了绝对的话语权,在战略上占领了先机。

大飞机具有气动外形要求严格、设计更改频繁、产品构型众多、零件材料和形状各异、内部结构复杂、空间紧凑、各类系统布置密集以及零组件数量巨大等特点<sup>[1]</sup>,因此大飞机研制过程复杂、周期长、技术难度大。随着数字化技术的应用,大飞机的设计、制造模式均发生了变化,由传统的工程图纸、实物样机、模拟量传递为主的设计制造串行模式,发展成为目前的基于 MBD 的三维综合信息模型和数字量传递的数字化设计制造并行模式。设计模式的改变使制造依据全部数字化,取消了实物样机、标准样机等模拟量依据,不仅节省了存放空间,而且保证了制造依据的稳定性。大飞机数字化设计制造模式下更适合数控技术、自动化技术、智能技术、知识库技术、信息存储传递和共享技术、计算机软件的应用,因此,数字化制造的技术体系和关键技术发生了根本变化。

## 数字化并行协同技术

一个部门或一个公司很难独立完成大飞机的设计制造,需要很多公司共同合作开展大飞机的设计制造,目前,主要的民用大飞机公司(如波音和空客)的制造商分布在全世界,波音 787 制造商分布见图 1。在数字化环境下的大飞机并行协同设计制造需要解决以下主要问题<sup>[2-5]</sup>:(1)数字化环境下设计阶段制造工艺审查、工艺准备、工装设计等与设计并行协调机制、环境的建立、运行的问题,保证设计产品数据与制造工艺人员使用的数据的一致性和实时性;(2)数字化环境下设计制造异地

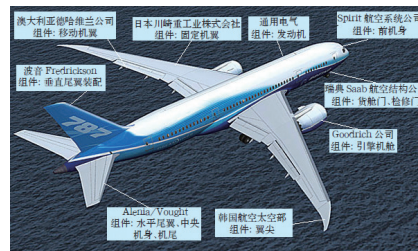


图1 波音787全球化生产网络

Fig.1 Globalization production network of boeing 787

协同问题。包括 MBD 技术体系差异性问题、数据异构问题、信息的传递和管理问题、设计更改的实时更新问题、知识工程的共享与安全问题等；通过数字化并行协调技术在大飞机研制中的应用，将在所有设计商、制造商之间架起信息高速公路，解决信息异构、信息实时传递、实时更新等问题。数字化并行协同技术是大飞机设计制造的关键技术之一。

### 仿真技术

仿真技术是一门多学科的综合性技术，在飞机制造过程中仿真技术的应用起到重要作用<sup>[6-8]</sup>。在零件制造阶段可以用有限元仿真软件优化工艺，降低成本，提高质量，解决工艺性问题。在航空业橡皮囊成形、蒙皮拉形等钣金成形方面已经大量采用商业有限元软件(如图 2 所示)，机械加工、复合材料制造、铸造等各种制造方法均可以利用有限元仿真优化工艺；飞机装配阶段采用 DELMIA 软件可以进行装配过程仿真(如图 3 所示)，在工装设计阶段检查工装的合理性，可以仿真飞机部件及总装的工艺过程，判断装配工艺的合理性，同时仿真过程也可以作为飞机装配的三维 AO (Assembly Order) 的一部分；在新机生产线布局过程中，可以采用生产线仿真 Plant Simulation 软件对飞机生产线、工厂、车间等分析和优化生产布局、资源利用率、产能和效率、物流和供需链等(如图 4 所示)，从而提高效率；测量仿真可以

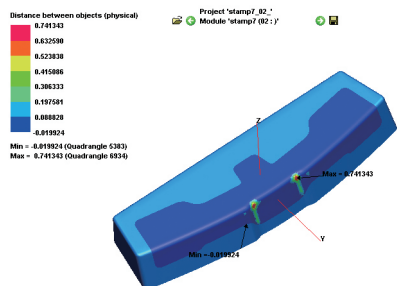


图2 钣金件橡皮囊液压成形有限元仿真图  
Fig.2 Rubber forming simulation for sheet metal

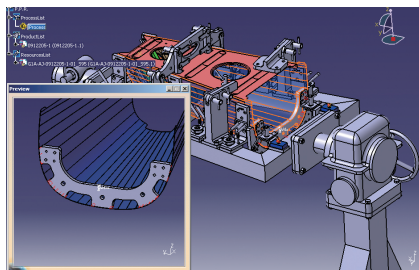


图3 飞机装配仿真  
Fig.3 Aircraft assembly simulation

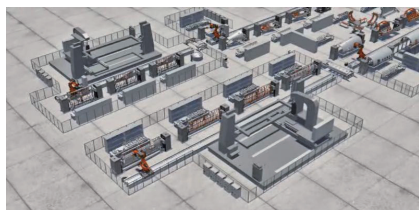


图4 生产线仿真  
Fig.4 Production line simulation

对测量路径进行几何仿真，检验测量路径的合理性，防止测量过程中的误碰问题。仿真技术可应用于飞机数字化制造的各个环节，是关键技术之一。

### 高效、高精度数字化测量技术

以数字化设计的工程数据集为依据进行飞机研制和生产过程中，飞机和工装的零件和装配件的检验方法发生了改变，传统的检验采用仪器、量具和检具等进行产品合格性判断，对具体的尺寸量可以不关心。而数字化制造过程中，检验是通过测量数据分析做出合格性判断。

通过数字化测量设备直接得到被测对象的具体量值，飞机数字化制造过程中测量技术是关键技术之一<sup>[9-15]</sup>。按类型可以分为零件级测量、部件级测量、整机测量等。在零件级测量中主要解决测量效率如何提高和如何保证测量精度的问题，零件级产品外观尺寸相对小，可以在一个单一的测量环境下进行，一般以三坐标测量仪为主，配合使用激光扫描、蓝光测量等非接触式测量方法(如图 5 所示)。部件级测量中测量设备可能处于不同的位置(如图 6

所示)，如何通过基准点将不同的测量坐标系有效地拟合在一起，如何减小匹配误差是关键，同时大型部件测量中需要采用集成技术将几台测量设备和工业机器人整合在一起，构成部件测量系统(图 7 所示)。飞机整机测量主要采用非接触测量方法，通



图5 零件级测量  
Fig.5 Part measurement

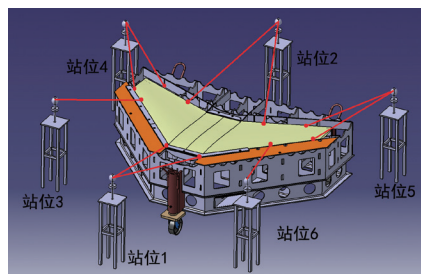


图6 部件级测量  
Fig.6 Component Measurement

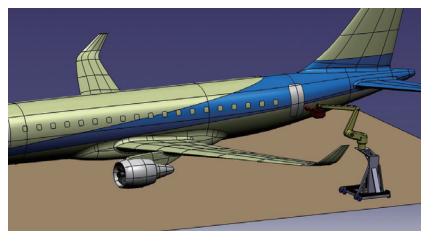


图7 测量集成技术  
Fig.7 Measurement integration technology

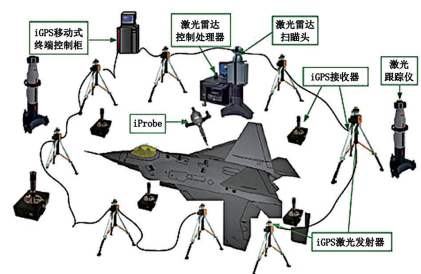


图8 整机测量  
Fig.8 Whole Aircraft Measurement

过基准实现飞机定位、坐标系拟合等(如图8所示),采用激光跟踪仪、IGPS、蓝光测量仪等测量设备构建一个测量系统,由于该测量系统涉及的设备多、坐标系不统一等问题,整机测量系统的搭建是关键技术之一。

### 智能集成技术

集成是科学发展的普遍规律,集成科学与技术对实现国家战略需求、促进国民经济发展具有极其重要的地位和作用。在各个领域,单项技术的发展趋势则是逐渐走向集成,再发展到工业自动化最终实现集成制造。

大飞机数字化制造中,运用集成技术可将各种商业软件和硬件集成为一个智能集成的制造系统。参与集成的软件包括CAD、CAE、CAM、PDM、MIS、CAPP等软件,硬件包括工业机器人、数控单元、AGV等智能单元作为系统的主体运动单元,制孔和铆接器、测量设备、定位单元、支撑单元等作为末端执行单元,运动单元和末端执行单元进行合理的搭配集成,通过数控编程和相关软件的集成开发,形成一套智能集成的制造系统。如机身、机翼等部件装配工装、大部件对接平台、大部件测量系统、

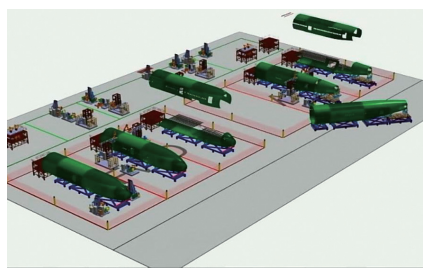


图9 采用智能集成技术搭建的脉动线

Fig.9 Putting up pulse production line by using intelligent integrated technology

脉动线等均采用了智能集成技术(如图9所示)。

集成技术是飞机制造关键技术之一<sup>[16]</sup>,通过对优秀单项技术的集成,利用各种技术的先进性、稳定性、可靠性等优势,保证智能集成系统的先进性、可靠性,同时集成技术用于

飞机制造还具有生产准备的敏捷性,保证大飞机研制的周期。

### 柔性制造技术

在飞机数字化制造过程中,由于数字化技术赋予了工艺、设备工装、管理计划等调整和再造的能力,大飞机制造一般几个型号同时进行,生产过程中采用的工艺和工装具有相似性,一些环节根据需要赋予管理和设备柔性,实现较少的设备工装等资源,满足更多的零部件制造需要,同时柔性制造技术可以缩短飞机的研发周期,降低飞机的研发成本,提高飞机装配质量。柔性制造技术也是飞机制造的关键技术之一。

飞机柔性制造技术包括柔性制造单元(由1台或数台数控机床或加工中心构成的加工单元)、零件柔性制造工装、装配柔性工装、柔性管理(利用信息管理的实时性实现计划的实时调整与管理)。飞机柔性制造技术是数字化设计制造优势的体现,也是数字化制造技术优势发挥的关键<sup>[17-19]</sup>。

### 飞机部件便捷传送技术

大飞机特点之一就是尺寸大,飞机的部件尺寸大,部件运输是关键技术之一。部件的转运包括厂内转运、车间内转运、异地转运等环节。厂内大部件运输主要采用汽车和AGV等工具运输,车间内大部件运输采用AGV、行吊等方式,异地运输采用航空、船舶、汽车等方式运输。在这些运输的方式中均需要专用的保形和支撑工装,运输工具需要使用专门设计和制造的船舶、汽车等<sup>[20-22]</sup>,同时在飞机设计阶段需要针对部件运输方式对飞机结构进行设计。大部件运输也是大飞机制造的关键技术之一。

### 高效数字化信息处理技术

数字化设计制造终极结果是无纸化设计和无纸化制造,所有的飞机制造依据、飞机制造工艺信息、设

备管理信息、异地协同、企业管理、知识工程等均通过计算机信息化处理技术实现。数字化制造的关键就是消灭信息孤岛,打通所有环节的信息通道,实现高效、实时、准确的信息传输、更新、保存等。高效数字化信息处理技术是大飞机制造的关键,直接影响整个制造体系运行正常与否和运行效率。目前,数字化信息处理涉及很多方面,如PDM、ERP、MIS、CAPP、CAE、CAD等软件管理着不同的信息,将这些信息合理地存储、高效处理、有效融合、实时更新等,构建一个高效的数字化信息处理平台,才能保证大飞机制造的高效运作<sup>[23-27]</sup>。

### 脉动线制造技术

对于飞机制造业来说,其产品总装长期以来都采用传统的固定站式装配模式,由于该模式中飞机不动,人员、设备、零件等均根据需要配送到固定站位,带来管理困难,容易造成混乱。这种模式带来了产品交付周期长、产品质量难控制等问题。移动式装配生产线以缩短交付周期、提高产品质量、拉动上游生产、降低制造成本、提高资源利用率为目标,已在汽车行业得到成功应用。将该思想应用于飞机制造,同时考虑飞机的批量小的问题,采用按节拍间断式脉动生产线生产飞机,保证大飞机生产的质量和效率<sup>[28-31]</sup>。

飞机脉动生产线技术包括根据装配流程及工艺布局确定站位和各站位工作量、节拍及人员配置,保障飞机交付速率;结合厂房实际情况合理规划工艺布局,定置产品、器具、物料及人员,保障飞机装配生产线流动控制,方便现场生产管理;制定严格的计划管控体系,并在生产现场实施看板可视化管理,有效监控现场生产流程;建立零件、标准件、成品件等物料的配送制度,并配置合理数量的物流配送车及零组件存放托架,满

足生产线的保障需求;培养每位员工的质量意识,并将质量监控贯穿于每一工序之中,由过程质量控制来保证产品最终质量。中航工业成飞复材厂在飞机零部件装配采用脉动生产线,速率提升 83%,故障率降低 85%,加班率减少 97%<sup>[6-9]</sup>。

脉动生产线是大飞机生产的关键技术,脉动线的前期设计和建设非常重要,是生产线正常运行的基础。飞机装配的零件供应商数量多、渠道复杂,不仅包括本厂自己制造的零件,而且还包括其他大型企业的产品、小型企业的产品、研究所的产品等,由于很多零件供货渠道单一,或者零件生产的原材料供应不稳定等诸多因素造成飞机装配管理复杂,因此脉动线的信息管控系统是脉动线的行政管理手段同等重要。

## 结束语

我国大飞机研制起步晚,在数字化设计制造背景下,从高起点开展大飞机的数字化设计制造研制,有利于快速缩短与国际先进水平的差距,同时也面临巨大挑战。数字化并行协同技术、仿真技术、数字化测量技术、智能集成技术、柔性制造技术、飞机部件便捷传送技术、数字化信息处理技术、脉动线制造技术等关键技术的成功应用是提高我国大飞机水平的关键,目前国内在大飞机数字化制造的关键技术方面均开始应用,各个方面逐渐完善,但由于我们的技术底子薄弱,应用还处于初级水平,很多环节不顺畅,不同环节应用水平良莠不一,仍然存在信息孤岛等问题,没有完全形成系统,我国在大飞机研制过程中对关键的技术应逐渐形成规范、提高应用的水平、完善数字化体系,从而保证大飞机研制的高效性、敏捷性、高质量。

## 参考文献

[1] 李原. 大飞机部件数字化柔性

装配若干关键技术[J]. 航空制造技术, 2009(14):48-51.

LI Yuan. Key technologies for digital flexible assembly of large commercial jet component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(14):48-51.

[2] 王永栓, 王晓丽, 向颖, 等. 航空工业数字化协同现状与发展[J]. 航空制造技术, 2009(11):62-65.

WANG Yongshuan, WANG Xiaoli, XIANG Ying, et al. Current status and development of digital collaboration in aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(11):62-65.

[3] 冯潼能, 王铮阳, 宋娅. MBD 技术在协同设计制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2010(18):64-67.

FENG Tongneng, WANG Zhengyang, SONG Ya. Application of MBD in collaborative design and manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(18):64-67.

[4] 黄迪生. 数字化协同与大飞机工程[J]. 中国制造业信息化, 2008(9):13-15.

HUANG Disheng. Digital collaborative and large aircraft project[J]. China's manufacturing industry informatization, 2008(9):13-15.

[5] WANG Qianping, FAN Lin, WU Xuhui. Research on the new airplane develop system based on 3D-digital technique and multi-companies collaboration[J]. Procedia Engineering, 2015,99:101-110.

[6] 刘春, 张洪瑞, 史红祥. 装配仿真技术及其在飞机装配中的应用[J]. 航空制造技术, 2015(15):10-13.

LIU Chun, ZHANG Hongrui, SHI Hongxiang. Assembly simulation technology and its application in aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(15):10-13.

[7] 王巍, 俞鸿均, 安宏喜, 等. 飞机数字化装配生产线布局仿真技术研究[J]. 制造业自动化, 2015(5):64-66.

WANG Wei, YU Hongjun, AN Hongxi, et al. Research on simulation about aircraft digital assembly line layout[J]. Manufacturing Automation, 2015(5):64-66.

[8] 何丽红. 三维装配仿真技术在飞机数字化装配中的应用[J]. 黑龙江科学, 2015(4):75-76.

HE Lihong. 3D assembly simulation technology in the application of the aircraft digital assembly[J]. HeiLongJiang Science, 2015(4):75-76.

[9] 梅中义, 朱三山, 杨鹏. 飞机数字化柔性装配中的数字测量技术[J]. 航空制造技术, 2011(17):44-49.

MEI Zhongyi, ZHU Sanshan, YANG Peng.

Digital measurement of aircraft digital flexible assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(17):44-49.

[10] 汪西, 张俐, 王亮, 等. 机身部件柔性装配数字化测量技术应用[J]. 航空制造技术, 2013(1/2):93-97.

WANG Xi, ZHANG Li, ZHANG Liang, et al. Application of digital measurement technology in aircraft fuselage flexible assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(1/2):93-97.

[11] 郭洪杰. 浅谈数字化测量技术在飞机装配中的应用[J]. 航空制造技术, 2011(21):26-29.

GUO Hongjie. Development of digital measurement technology based on aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(21):26-29.

[12] 姚庆丰. 数字化测量技术及系统在飞机装配中的应用[J]. 科技前沿, 2012(7):15.

YAO Qingfeng. Digital measurement technology and application in aircraft assembly system[J]. Frontiers of Science and Technology, 2012(07):15.

[13] 邹爱丽, 王亮, 李东升, 等. 数字化测量技术及系统在飞机装配中的应用[J]. 航空制造技术, 2011(21):72-75.

ZOU Aili, WANG Liang, LI Dongsheng, et al. Application of digital measuring system in aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(21):72-75.

[14] 李鑫. 数字化测量技术在飞机装配中的应用[J]. 航空制造技术, 2014(13):52-55.

LI Xin. Application of digital measurement technology in aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(13):52-55.

[15] 海克斯康测量技术(青岛)有限公司. 现代大飞机数字化测量技术[J]. 航空制造技术, 2012(22):54-56.

Hexagon metrology qingdao LTD. Digital measurement technology of large aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(22):54-56.

[16] 王巍, 俞鸿均, 谷天慧. 先进飞机智能制造装备集成系统[J]. 航空制造技术, 2015(13):51-55.

WANG Wei, YU Hongjun, GU Tianhui. advanced intelligent manufacturing equipment integration system for aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(13):51-55.

[17] 潘卫军. 现代柔性制造技术及其发展[J]. 装备制造技术, 2007(12):89-92.

PAN Weijun. Modern flexible manufacturing technology and development[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2007(12):89-92.

[18] 郭洪杰. 大型飞机柔性装配技术[J].

航空制造技术, 2010(18):52-54.

GUO Hongjie. Flexible assembly technology for large commercial aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(18):52-54.

[19] 王巍, 贺平, 万良辉. 飞机柔性装配技术研究[J]. 机械设计与制造, 2006, 11(11):88-90.

WANG Wei, HE Ping, WAN Lianghui. Study of technology on aeroplane flexible assembly[J]. Machinery Design & Manufacture, 2006, 11(11):88-90.

[20] 吴晓峰, 赵祉江, 柳权. 大空间尺寸测量及大部件运输、跟踪、定位技术[J]. 航空制造技术, 2009(24):38-41.

WU Xiaofeng, ZHAO Zhijiang, LIU Quan. Measurement, transportation, tracing and positioning technology for huge-size part[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(24):38-41.

[21] 郭洪杰, 康晓峰, 王亮, 等. 飞机部件装配数字化柔性工装技术研究[J]. 航空制造技术, 2011(22):94-97.

GUO Hongjie, KANG Xiaofeng, WANG Liang, et al. Research on flexible tooling technology for digital assembly of aircraft fuselage[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(22):94-97.

[22] 姚定, 余晶, 黄翔, 等. 基于全向移动与多点柔性支撑的飞机大部件运输技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 4(44):74-78.

YAO Ding, SHE Jing, HUANG Xiang, et al. Large aircraft component transport based on omni-directional mobile and multi-point

supporting[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 4(44):74-78.

[23] 王爽, 张振明, 田锡天, 等. 计算机辅助飞机装配协调工艺设计系统研究[J]. 机械设计与制造, 2006, 10(10):43-44.

WANG Shuang, ZHANG Zhenming, TIAN Xitian, et al. Computer-aided aircraft assembly coordination process planning system[J]. Machinery Design & Manufacture, 2006, 10(10):43-44.

[24] 李翌辉, 孙树栋, 何卫平, 等. 打通飞机数字化生产线的流程研究[J]. 航空制造技术, 2005(2):28-33.

LI Yihui, SUN Shudong, HE Weiping, et al. Research on the process of the digital production line of aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005(2):28-33.

[25] 徐圣, 刘晓明, 姚小虎, 等. 基于MBD的飞机数字化定义技术[J]. 科技创新导报, 2011(27):48-49.

XU Sheng, LIU Xiaoming, YAO Xiaohu, et al. Digital definition technology of aircraft based on MBD[J]. Science and Technology Consulting Herald, 2011(27):48-49.

[26] 严建成. 航空业信息化现状浅谈——飞机制造业信息化难点及建议[J]. CAD/CAM与制造业信息, 2008(9):18-20.

YAN Jiancheng. The present situation of aviation industry informatization -- the difficulties and suggestions of Aircraft Manufacturing Informationization[J]. CAD/CAM and Manufacturing Information, 2008(9):18-20.

[27] 白永红, 王泽玉, 邱晔. 飞机制造企业 PDM 的组织和实施[J]. 航空制造技术,

2004(6):87-91.

BAI Yonghong, WANG Zeyu, QIU Xi. Organization and implementation of PDM for aircraft manufacturing enterprises[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2004(6):87-91.

[28] 任义, 丁林静, 李鑫, 等. 娜脉动生产线助力飞机装配质量提升[J]. 中国质量, 2012(4):40-41.

REN Yi, DING Linjing, LI Xin, et al. Pulse powered aircraft assembly production line quality improvement[J]. The Chinese Quality, 2012(4):40-41.

[29] 郭佳, 吴永林. 通用飞机总装脉动式生产线构建[J]. 航空制造技术, 2015(5):58-61.

GUO Jia, WU Yonglin. Construction of pulsating production line of general aircraft for final assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(5):58-61.

[30] 薛良昌. 飞机总装脉动生产线及其信息管理系统的应用与研究[J]. 航空制造技术, 2014(18):89-91.

XUE Liangchang. Application and research of pulsating aircraft assembly production line and its information management system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(18):89-91.

[31] 李金龙, 王碧玲, 赵璐. 脉动装配生产线的应用与发展[J]. 航空制造技术, 2013(17):58-60.

LI Jinlong, WANG Biling, ZHAO Lu. Application and development of pulse assembly line[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(17):58-60.

## Key Technology for Digital Manufacturing of Large Aircraft

HAN Zhiren

(Aeronautical Manufacturing Technology Digitization National Key Discipline Laboratory, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**[ABSTRACT]** The digital manufacturing of large aircraft is a very complicated system project. Its main key technologies include the digital concurrent and collaborative technology, the simulation technology, the digital measurement technology, the intelligent integration technique, the flexible manufacturing technique, the convenient transmission technology of aircraft component, the digital information processing technology, the pulsation line manufacturing technology and so on. Through these key technologies, each link of digital manufacturing of large aircraft can be ensured high efficiency and smooth, which guarantees the short study and production cycle, high quality and low production cost of large aircraft. Comprehensive analysis is made on these key technologies and some technical points and key problems are proposed, which has some reference effect for better developing digital manufacturing of large aircraft.

**Keywords:** Large aircraft; Digital manufacturing; Collaborative simulation; Digital measurement; Flexible manufacturing

(责编 宁宁)