

# 集成管理系统在飞机装配柔性工装上的应用

王 巍,王诚鑫,周一

(沈阳航空航天大学航空航天工程学部,沈阳 110136)

**[摘要]** 采用柔性工装对飞机零部件进行装配,会产生巨大的信息量,为提高飞机装配过程的信息管理的质量与效率,目前采用集成管理系统对飞机装配柔性工装进行控制与管理,来实现飞机装配过程的集成化。对集成管理系统在飞机装配柔性工装上的应用进行研究,首先对集成管理系统的构架、数据格式以及通信接口等进行概述;之后对柔性工装的数据传输与调形驱动过程进行分析,对飞机柔性装配技术体系进行总结;最后对集成管理系统在柔性工装上的应用现状进行研究。研究表明,集成管理系统可以提高柔性工装的装配效率与信息管理质量。

**关键词:** 柔性工装;飞机装配;信息管理;集成管理系统

## Application of Integrated Management System in Aircraft Assembly Flexible Tooling

WANG Wei, WANG Chengxin, ZHOU Tianyi

(Aerospace Engineering College, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**[ABSTRACT]** To improve the quality and efficiency of the information management of aircraft assembly process, the integrated management system is used to control and manage the aircraft assembly flexible assembly to realize the integration of aircraft assembly process. In this paper, the integrated management system in the application of flexible aircraft assembly fixtures, the architecture of integrated management system, data format and communication interface are summarized, such as data transmission and adjustment of flexible fixture after driving process is analyzed, and to summarize the plane flexible assembly technology system, finally, the present situation of the application of integrated management system on the flexible fixture were studied. Through the research, the integrated management system can improve the assembly efficiency and information management quality of flexible tooling.

**Keywords:** Flexible tooling; Aircraft assembly; Information management; Integrated management system

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2019.13.092

当前,德国正在制造业领域积极推行工业 4.0 计划,成为引领全球新工业革命的典型<sup>[1]</sup>,中国顺应国际工业发展趋势提出了中国制造 2025,航空工业作为评价一个国家工业水平的主要标准,是中国制造 2025 的重要组成部分,对于实现中国制造 2025 的工业发展任务起关键作用。航空工业主要是指飞机的制造与装配,飞机的制造与装配是一个复杂且信息具大的过程,集成管理系统是解决这个问题的关键。本文对飞机柔性工装的集成管理系统进行研究。

### 1 国内外柔性工装集成化发展现状

国际上知名的飞机制造企业,包括空客、波音、麦道等都已经对飞机产品的各个装配阶段研发出相对应的柔性工装,并通过集成管理系统对装配过程进行控制与

信息管理。目前,国内飞机制造企业,对于飞机的装配,大部分仍以传统的刚性工装为主,很难做到对于飞机装配过程的集成化管理。

近几年,国内也研制出了许多柔性工装设备。如航空工业制造院,浙江大学等研制的飞机大部件对接柔性工装系统,北京航空航天大学与沈飞集团联合设计的飞机壁板柔性工装,但总体来看,我国飞机装配柔性工装的研究仍然处于初级阶段,能够应用到实际生产中的柔性工装数量较少,没有形成规模化、集成化的柔性装配体系。

### 2 柔性工装集成管理系统的构架

集成管理系统是飞机装配柔性工装的大脑与核心,该系统不仅可以生成与管理柔性工装数据,还能够控制

柔性工装对飞机零部件的装配运动<sup>[2]</sup>。如图1所示,集成管理系统主要有7个功能模块。

装配工艺方案管理模块主要功能是工人工作信息管理,工作现场可视化,装配工艺文件的制定。驱动数据生成模块的主要功能是将理论数据与实测数据进行分析处理来产生工装驱动优化数据。虚拟仿真模块的主要功能是对飞机零部件进行虚拟装配仿真,来对飞机装配过程进行评估与在线反馈。工装运动控制模块的主要功能是控制工装的调形运动,来实现装配的自动化。故障诊断与维护模块的主要功能是系统检测与维护,故障诊断与检修,以及数据的记录。装配基础数据库模块主要是对装配工艺数据的存储、查询、删改与管理。测量数据接口模块主要是对装配的测量数据进行采集,存储与传送。

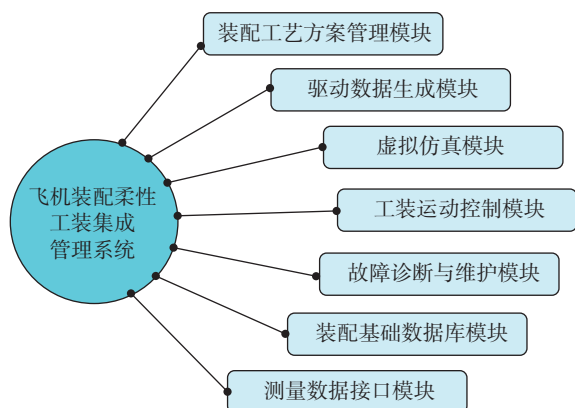


图1 飞机装配柔性工装集成管理系统功能构架

Fig.1 Functional framework of aircraft assembly integrated management system

### 3 集成管理系统的文件格式与通信接口

集成管理系统不同数据之间的通信是集成管理系统运行的关键环节。飞机装配过程中的文件格式较多,总体上分为5种格式,如图2所示,主要有CAD系统的三维数模文件格式,CAD系统的轻量化文件格式,文本格式,视频文件格式和表格文件格式。

其中,CAD三维模型格式主要是用来保存和管理飞机三维数模和柔性装配工装的三维数模,CAD系统轻量化文件格式主要是保存和管理柔性工装轻量化模型,文本格式主要包括装配工艺规划数据,柔性装配工装所需的驱动数据,定位单元当前状态数据的载体文件。视频文件格式主要管理数据对象为装配仿真录像。表格文件格式主要管理对象有在线测量系统中的测量分析软件所需要特征点的理论坐标值,测量反馈值载体文件等数据类型导出文件。

通过上述分析可知,集成管理系统主要有3种接口对数据格式进行通信传送,主要包括CAD系统的接口、在线测量系统接口、集成控制系统接口。其中CAD系统接口主要用于导入飞机产品与装配生产线理论模型数据。在线测量系统的接口主要用于读取装配过程中的测量数据,并将测量数据保存在管理系统中。集成控制系统接口主要将生成的工装优化驱动数据传输到集成控制系统中,驱动工装定位器调形到位。

### 4 柔性工装驱动数据生成与传送

柔性工装驱动数据的产生需要理论数据与实测数据作为数据源,其中理论数据在工装设计阶段已经得

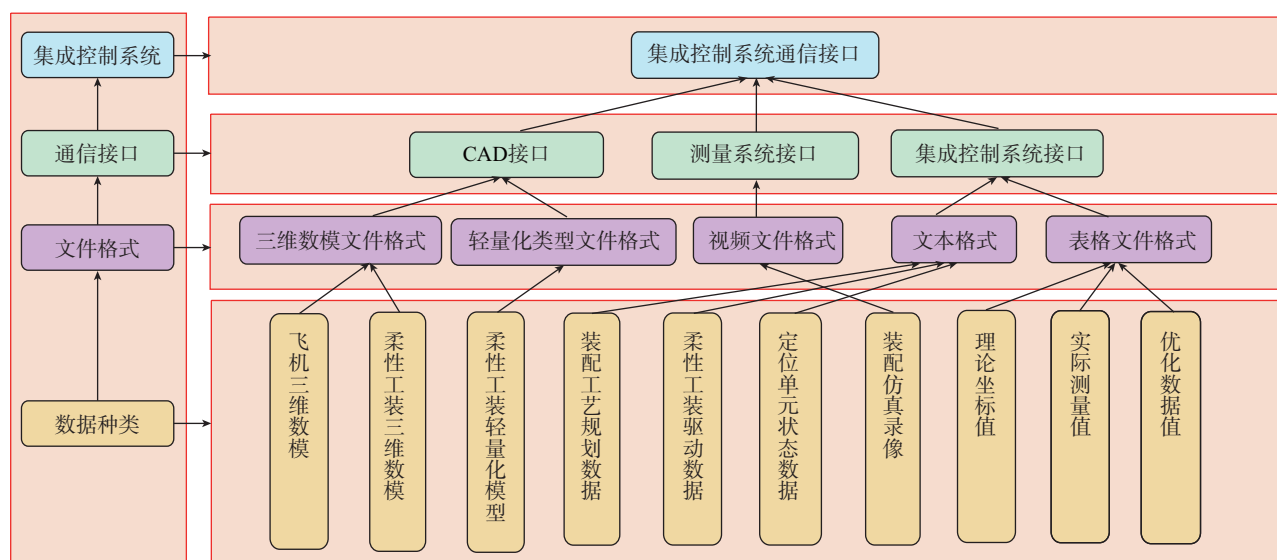


图2 集成管理系统通信接口

Fig.2 Power communication interface of integrated management system

到,实测数据需要数字化测量设备对飞机装配过程进行跟踪测量来得到,如图3所示,目前我国在飞机制造业,主要应用激光跟踪仪、经纬仪、iGPS、照相测量以及全站仪等数字化测量设备,不同设备对应不同的在线测量软件。在测量过程中,在线测量软件会对飞机装配过程中的实测数据进行采集与处理,并将测量数据传递给优化分析软件。

柔性工装对于飞机零部件的装配需要集成控制系统产生的驱动数据来控制,其中驱动数据主要由虚拟仿真系统与离线编程产生,飞机装配柔性工装的驱动数据主要包括3种,有理论数据,实测数据与优化驱动数据,如图4所示。

理论数据是通过产品数模与装配工艺生产线模型进行装配仿真而产生的柔性工装定位数据,理论数据生成较快,并且理论数据不考虑飞机零部件以及柔性工装的制造误差。

实测数据是通过数字化测量设备对零部件上的定位点进行测量而产生的实际位置数据,实测数据考虑了零部件以及柔性工装的制造误差。

优化驱动数据是将理论数据与实测数据进行比较分析,并通过数据处理软件,得到的工装驱动数据,其主要用于装配过程复杂且装配精度要求较高的飞机零件、组件及部件之间。

优化驱动数据具体生成过程如下:假设飞机某部件上有 $n$ 装配定位点,这些装配定位点在飞机坐标系下的理论坐标值为 $(X_i, Y_i, Z_i)$ ,其中 $i$ 代表装配定位点个数, $(i=1,2,3, \dots, n)$ 。这些装配基准点在飞机坐标系下,激光跟踪仪测量的实测坐标值为 $(X_i, Y_i, Z_i)$ 。则在飞机坐标系下,该部件工装运动调形优化驱动数据生成算法为:

$$\begin{cases} \Delta X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X_i) \\ \Delta Y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_i) \\ \Delta Z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - Z_i) \end{cases}$$

经过该算法生成的优化驱动数据,最终会经过数据处理软件生成工装驱动命令,传送给工控机,来控制柔性工装调形<sup>[3]</sup>。

### 5 飞机柔性装配技术体系

通过对飞机装配工装技术理论与方法和柔性装配工装关键技术的研究,以及在典型柔性工装的基础上,对柔性工装的应用推广及发展趋势的探索,可初步建立如图5所示的飞机柔性装配技术体系<sup>[4]</sup>。飞机柔性装

配技术体系中主要包括飞机装配工装技术理论与方法、柔性装配工装关键技术、典型柔性工装、柔性工装的应用推广及柔性工装发展趋势等5个模块。

飞机装配工装技术理论与方法是柔性工装的设计与发展的理论基础,飞机装配工装技术理论主要包括飞机装配模式及特点、工装功用及结构形式、飞机典型结构装配工装的形式和特点、面向装配的设计方法研究、无型架装配理论方法、决定性装配理论方法以及工装低

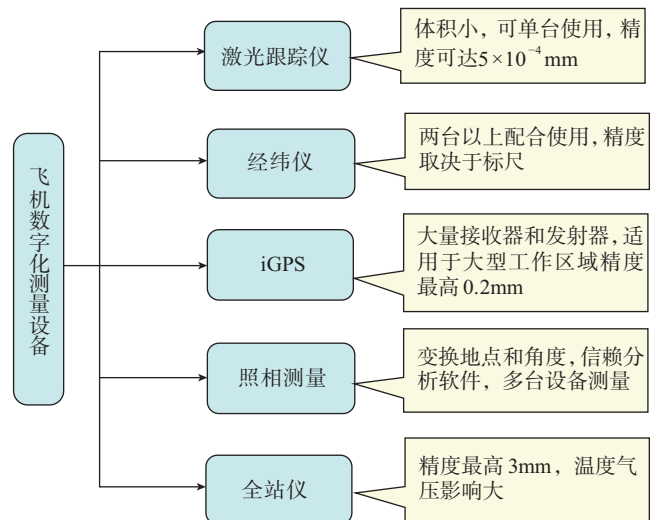


图3 数字化测量设备

Fig.3 Digital measuring equipment

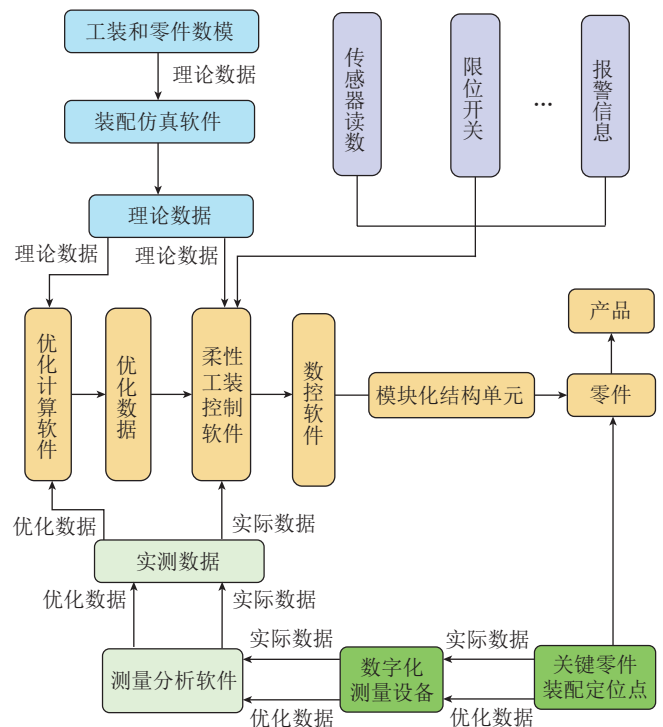


图4 集成管理系统数据传送流程

Fig.4 Data transfer flow of integrated management system

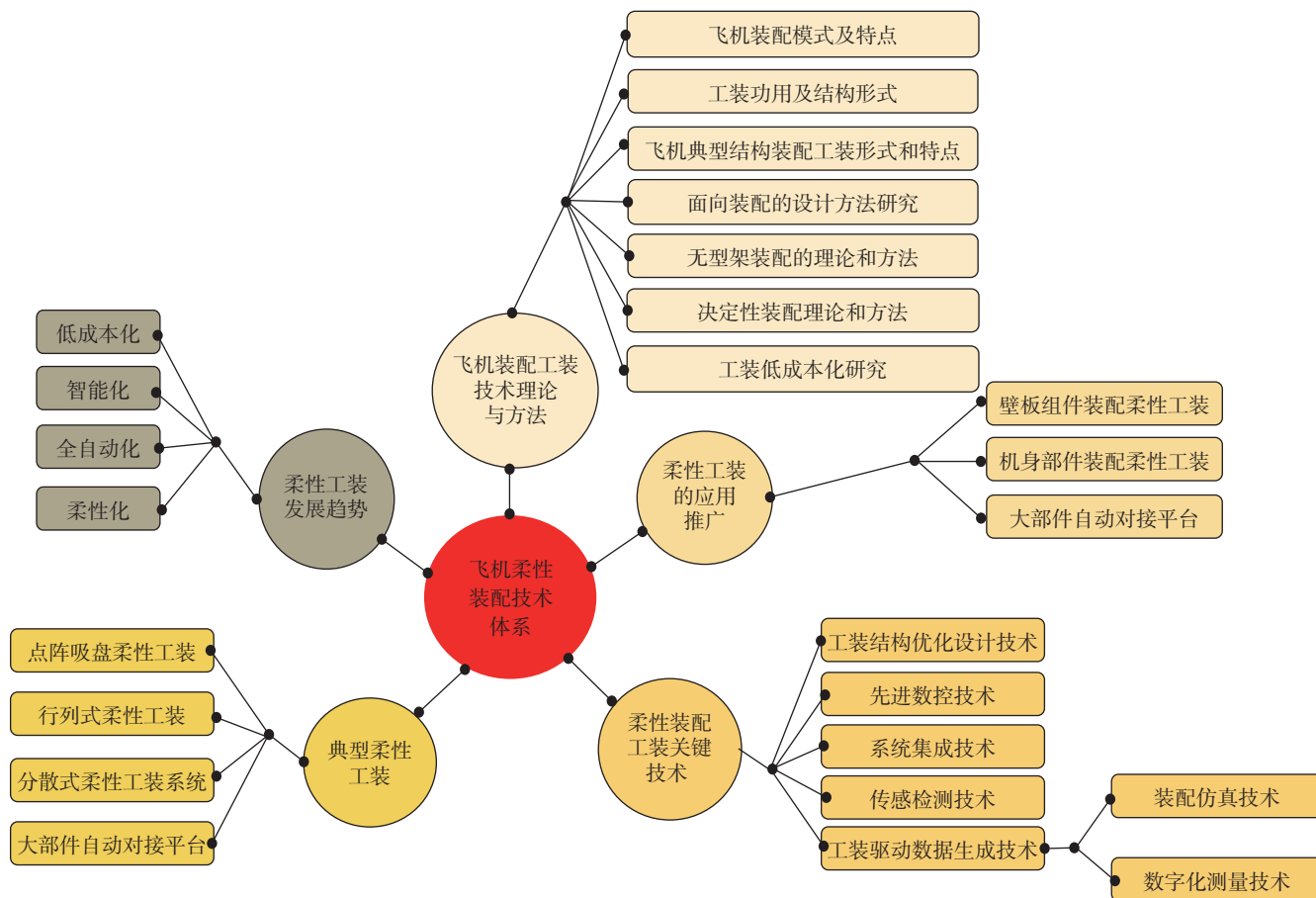


图5 飞机柔性装配技术体系

Fig.5 Aircraft flexible assembly technology system

成本化研究等部分。

集成管理系统集成了柔性工装结构优化技术、先进数控技术、系统集成技术、传感检测技术、工装驱动数据生成技术等柔性工装关键技术，是柔性工装关键技术的结合体。

目前，在飞机装配4个典型柔性工装中，集成化程度较高的是大部件自动对接平台，飞机装配自动对接平台是一个集成了装配工装体系、在线测量系统、工装控制系统的综合性集成系统。根据飞机大部件对接工装的结构特点可把当前的大部件对接平台分为3种形式：柱式结构工装平台、塔式结构工装平台和塔柱混联式结构工装平台。

目前柔性工装已经在4种典型柔性工装的基础上，产生出壁板组件柔性工装、机身部件装配柔性工装等新形式工装，此外，柔性工装也会逐渐向低成本化、智能化、全自动化、深度柔性化发展。

## 6 集成管理系统在柔性工装上的应用

如图6所示为飞机装配柔性工装闭环控制过程。柔性工装应用集成管理系统进行装配工艺规划，同时进

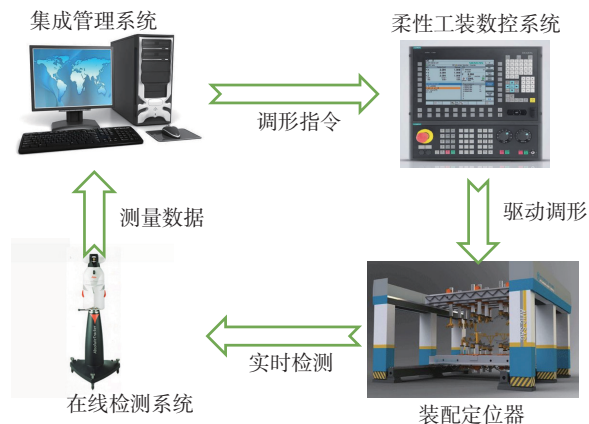


图6 柔性工装闭环控制过程

Fig.6 Flexible tooling control process

行装配工艺仿真，将生成的工装理论驱动数据解析为数控系统动作调形指令并传递至柔性工装的数控系统。

然后，数控系统根据动作指令计算各定位器轴的调形轨迹，驱动定位器调形，定位器调形到位后，在线检测系统实时测量定位器位置，并将测量数据传递至离线编程与仿真管理系统，最后，离线编程与仿真管理系统将测量数据与理论数据进行比较，检查其是否满足装配要

求,若测量数据无法满足装配需求,系统将自动生成优化数据并由数控系统进一步调形,直到定位器位置精度满足要求。

如图7所示,柔性工装集成管理系统集合了工装结构优化设计技术、先进测控技术、系统集成技术、传感检测技术和工装驱动数据生成技术。在集成管理系统控制下的4种典型柔性工装在飞机装配过程中的用途:多点阵真空吸盘式柔性工装主要用在平尾翼、垂直尾翼以及机身壁板的装配中应用;行列式结构柔性工装主要用于飞机的机翼壁板和翼梁装配;分散式柔性工装主要用于机身或机翼的零部件装配;对接平台主要用于飞机大部件的对接过程中。

应用典型柔性工装对飞机组件、部件进行装配时,会产生误差。不同类型柔性工装产生的误差范围不同。如成飞万世明等研制的可快速重构的行列式柔性工装,最高修正误差范围可达2mm<sup>[5]</sup>。郭洪杰<sup>[6]</sup>研制的飞机大部件自动对接平台,可以将飞机部件对接调姿偏差控制在0.252mm以下。点阵式吸盘柔性工装,在工装控制器的控制程序下,可控制各个真空吸盘运动到精确定

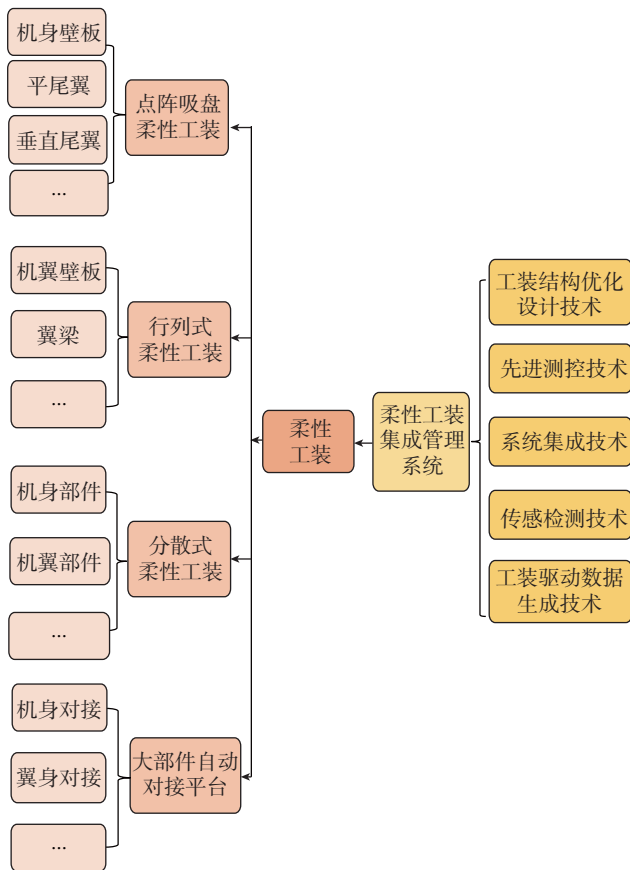


图7 集成管理系统在飞机柔性装配中的应用

Fig.7 Application of integrated management system in aircraft flexible assembly

置,定位精度可达0.127mm<sup>[7]</sup>。

图8为某机身尾段的集成化装配工装。该机身尾段主要由蒙皮、长桁、环框、骨架等组成。在机身尾段装配过程中,机身尾段部件协调环节多,外形准确度要求高,由于现行的补偿数控加工能力不足和经济上的考虑<sup>[8]</sup>,对机身尾段装配的数字量与模拟量进行集成化管理,来对机身尾段装配的协调性进行优化。

图9为集成管理系统对尾段装配协调性的优化过程。通过集成管理系统对机身垂尾的装配过程的集成化管理,来保证机身垂尾装配的质量与效率。

## 7 结论

飞机装配集成管理系统是现代化飞机装配的技术基础与关键。飞机装配集成管理系统的研发与设计,对于逐步实现我国飞机装配的集成化应用,使得飞机装配制造成为制造行业的领先模式起到关键作用。要立足实现未来飞机制造工厂中,所有零组件管理设备系统、柔性装备、对接系统、运输装备、检测与在线测量系统等先进装备与系统,与人相互结合形成一体化集成管理系统,来满足中国先进飞机研制需求,使我国走上航空强国之路。

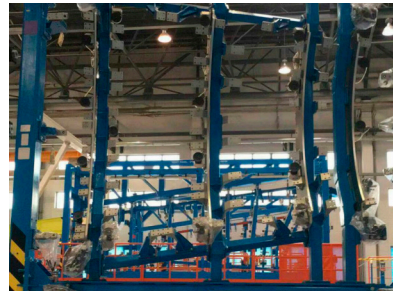


图8 集成管理系统在某机身尾段上的应用

Fig.8 Application of integrated management system in rear section of fuselage

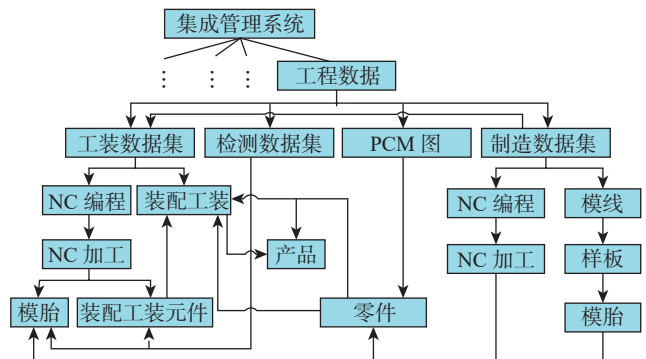


图9 集成管理系统对尾段装配协调性优化过程

Fig.9 Coordination optimization process of tail section assembly by integrated management system

(下转第101页)

展, 2012, 3(4): 82-87.

LU Haiyan. Simulation data management solutions for aerospace industry[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2012, 3(4): 82-87.

[8] 田彦明, 窦云江, 李忠飞. 航空发动机仿真数据管理系统研究[J]. 企业技术开发, 2015, 34(12): 17-18.

TIAN Yanming, DOU Yunjiang, LI Zhongfei. Research on aero-engine simulation data management system[J]. Technological Development of Enterprise, 2015, 34(12): 17-18.

[9] 许鸿杰, 沈波. 飞机研制过程中仿真生命周期管理的研究[J]. 航空制造技术, 2015, 58(18): 92-95.

XU Hongjie, SHEN Bo. Research on simulation lifecycle based on system engineering management of aircraft development process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(8): 92-95.

[10] 全静, 汪伟, 郝明. 基于 SOA 的航空发动机设计仿真集成管理系统[J]. 机械设计, 2017, 34(6): 82-87.

QUAN Jing, WANG Wei, HAO Ming. Construction of aero engine design simulation integrated management system based on SOA [J]. Journal of Machine Design, 2017, 34(6): 82-87.

[11] 章翔峰. 支持多学科协同设计的航天产品仿真数据管理系统[J]. 航天制造技术, 2013(6): 58-61.

ZHANG Xiangfeng. Simulation data management system of aerospace product supported MDO[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2013(6): 58-61.

通讯作者: 乔建明, 硕士, 研究方向为数字化制造、数字化产品设计和工艺, E-mail: tallqiao@qq.com. (责编 一元)

(上接第91页)

WEI Ran, JIA Lijie. Study progress of curing-induced springback for thermosetting composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(23-24): 104-105.

[10] 庞杰. 复合材料结构固化变形分析及其控制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.

PANG Jie. Analysis and control on cured deformation of composite structure[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.

[11] 庞杰, 黄传勇. 复合材料整体壁板固化变形控制方法研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(3): 119-120.

PANG Jie, HUANG Chuanyong. Study on control method of cure-induced deformation for integrated composite panel[J]. Computer Simulation, 2013, 30(3): 119-120.

[12] 刘海静. 汽车顶盖冲压成形数值模拟及回弹优化研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2016.

LIU Haijing. Research on numerical simulation of the stamping forming and the springback optimization of the car roof[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2016.

[13] 王亮, 李东升. 飞机数字化装配柔性工装技术体系研究[J]. 航空制造技术, 2012, 55(7): 34-39.

WANG Liang, LI Dongsheng. Flexible tooling technology system for aircraft digital assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(7): 34-39.

[14] 翟婷婷, 张凤英. 曲面薄壁零件柔性装配定位系统设计与实现[J]. 航空制造技术, 2014, 57(22): 27-29.

ZHAI Tingting, ZHANG Fengying. Design and realization of flexible assembly positioning system for thin-wall component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(22): 27-29.

[15] 彭艳敏. 整体壁板展开建模及喷丸成形延展补偿技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

PENG Yanmin. Research on technologies of development and elongation compensation of integer panel for shot peen forming[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

通讯作者: 彭艳敏, 高级工程师, 研究方向为飞机装备数字化设计与制造、金属塑性成形、复合材料成型, E-mail: xiaohai19820127@163.com.

(上接第96页)

## 参考文献

[1] 黄阳华. 德国“工业 4.0”计划及其对我国产业创新的启示[J]. 经济社会体制比较, 2015(2): 1-10.

HUANG Yanghua. German “Industry 4.0” plan and its enlightenment to China's industrial innovation[J]. Comparison of Economic and Social Systems, 2015(2): 1-10.

[2] 冯子明. 飞机数字化装配技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2015.

FENG Ziming. Aircraft digital assembly technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2015.

[3] 武锋锋, 李东升, 王亮. 面向机身柔性装配的在线编程技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(4): 641-648.

WU Fengfeng, LI Dongsheng, WANG Liang. On-line programming technology for flexible assembly of airframe[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(4): 641-648.

[4] 李西宁, 胡匡植, 李维亮, 等. 飞机数字化柔性装配工装技术[J]. 航空制造技术, 2013, 56(12): 40-43.

LI Xining, HU Kuangzhi, LI Weiliang, et al. Aircraft digital flexible assembly tooling technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(12): 40-43.

[5] 万世明, 陈亚丽, 肖爽, 等. 基于行列式柔性工装快速重构方法的研究[J]. 航空制造技术, 2015, 58(19): 80-82.

WAN Shiming, CHEN Yali, XIAO Shuang, et al. Research on fast reconstruction method based on determinant flexible tooling[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(19): 80-82.

[6] 郭洪杰. 飞机大部件自动对接装配技术[J]. 航空制造技术, 2013, 56(13): 72-75.

GUO Hongjie. Automatic docking assembly technology for large aircraft parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(13): 72-75.

[7] 王亮, 李东升. 飞机数字化装配柔性工装技术体系研究[J]. 航空制造技术, 2012, 55(7): 34-39.

WANG Liang, LI Dongsheng. Research on the technology system of aircraft digital assembly flexible tooling[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(7): 34-39.

[8] 张尧. 某型飞机尾段装配工艺性及容差分析研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2014.

ZHANG Yao. Research on assembly process and tolerance analysis of a certain type of aircraft tail section[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2014.

通讯作者: 王巍, 博士、教授, 主要研究方向为数字化制造技术、逆向工程技术、容差分析技术和柔性工装模块化技术, E-mail: wwsh595@163.com.

(责编 一元)