

# 飞机机翼模块化装配技术研究\*

王守川<sup>1</sup>,郝 巨<sup>1</sup>,李西宁<sup>2</sup>,郭 峰<sup>1</sup>,王永宏<sup>1</sup>,王战峰<sup>1</sup>

(1. 航空工业西飞技术装备设计所,西安 710089;

2. 西北工业大学机电学院,现代设计与集成制造技术教育部重点实验室,西安 710072)

**[摘要]** 针对某大飞机机翼模块化工程实现,对飞机部件模块化装配技术背景和机翼模块化特征进行了分析,梳理出了机翼模块化流程和影响因子,从机翼模块化装配流程、机翼模块化/集成化装配、活动翼面模块化调装与测试3方面进行了工程设计。对机翼集成化/柔性化装配的高集成工作平台、柔性化滑轨安装车和活动翼面单元化测试的控制逻辑结构、测试方法、测试设备规划进行了详细的设计分析。最后对机翼模块化装配实施与应用效果进行了介绍。

**关键词:** 模块化装配;装配平台;滑轨安装;活动翼面;作动控制;偏角检测;传感器检测

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.13.068



王守川

高级工程师,研究方向为飞机工艺装备和数字化装备,先后获得 27 项国家专利授权,发表论文 5 篇,获航空工业科技进步三等奖 2 项、陕西省国防科技奖和陕西科技奖三等奖各 1 项、国防管理创新一等奖和国家管理创新二等奖各 1 项。

模块化制造是把模块化思想用于产品制造过程,按照模块化原则将制造要素分解成结构和功能相对独

\*基金项目:装备预研共用技术项目(41423010202)。

立的单元模块,按照产品制造需求进行单元模块的配置、组合、重构与测试、交付,通过构造一种可重构制造环境,使制造系统能够快速适应多品种、变批量、互换性强产品的制造需求<sup>[1]</sup>。按照这个定义,可以将飞机模块化制造从产品工艺工序的单元化和工艺装备的集成化、柔性化两个层面进行理解,两个层面也可以进行组合。细分飞机模块化制造则可分为零件模块化制造、组件模块化装配和工艺装备集成化/柔性化3部分,零件模块化制造和组件模块化装配主要针对产品零/组件的加工、装配、测试和交付等工艺过程进行单元化分解,工艺装备集成化/柔性化则主要针对适应不同产品对象具有模块化加工、安装、测试的通用、可重构、柔性的工艺装备类型<sup>[2-3]</sup>或针对工艺装备本身的单元化集成化。

目前世界大型民用飞机制造商分为两类,一类是具备全流程制造能力的飞机制造厂(如俄罗斯的一些飞机制造厂),这类制造厂的飞机制造大部分实行部件装配、总装测试的生产模式;另一类是将主要部件外包

仅留总装生产线的飞机制造厂(如波音、空客等),这类制造厂主要部件和设备交由供应商生产,大部分采用单元化的模块化制造、装配和测试的生产交付模式<sup>[4]</sup>。由于产量和制造单元集中等因素,国内主机厂对工装模块化特别是其中的集成化/柔性化技术有一定研究,但在飞机部件产品安装、测试、交付的组件模块化技术方面研究较少。飞机机翼制造过程中,机翼、机身各部件基本构件和较为独立的系统安装完成后,在总装时进行总体系统安装和测试,总装安装测试工作量非常大,一旦测试出现问题,部件则需返回部件厂进行返修,这种返修对于飞机大部件特别是大飞机制造尤为困难,相应的制造成本会增加,交付周期会延长。

随着飞机型号和批量增加,基于模型定义的装配、柔性装夹、3D 打印、虚拟现实等用于飞机产品快速研制的新技术不断应用<sup>[5-7]</sup>,国内飞机制造专业分工愈趋明显,原来大而全的总装配检测模式亟待改变,在产品交付和生产线中柔性和模块化逐渐成为发展趋势<sup>[8]</sup>。本文结合

飞机研制需求,对飞机机翼模块化装配技术进行了研究,通过工序改进和工艺装备研发,将机翼翼盒装配变成了完整的装配单元,实现了机翼模块化装配。

## 机翼模块化装配流程构建

机翼模块化装配是在部件模块化设计基础上开展模块化装配、测试和交付的一种装配技术,要解决机翼模块化装配,需要从特征分析开始梳理出机翼部件相关模块化的基本元素,下面从模块化特征、传统装配流程、模块化装配流程、模块化实施关键技术 4 个方面进行分析。

### 1 模块化特征分析

机翼是飞机最重要的组成部分,由翼盒、活动翼面、油液系统、发动机吊挂等组成<sup>[9]</sup>,机翼与机身从中央翼处进行结构分离,事实上形成了单元结构,具有整体装配的模块化基本特征,但也仅限于结构,其活动翼面的操纵和油箱通联等无法在机翼展开,如果要将机翼分解为完全独立的单元,则所有的系统试验需要在机翼部件制造完成。所以,其模块化特征包含了结构和系统两大特征。

### 2 传统装配流程分析

从某大飞机结构制造过程来看,传统装配方式在部装阶段机翼部件需要完成的是部件对接装配、滑轨安装等工作内容,在总装阶段则是以针对机翼部件相关活动部件运动状态、

传感器状态等的调装测试工作为主。根据飞机运动控制及结构原理进行流程分析,活动翼面所有控制通过中央翼穿过机身直达驾驶舱总控台,其所有操作及控制信号数据采集和处理均在总控台中进行某大飞机机翼传统装配总体流程见图 1。

### 3 模块化装配流程分析

依据某大飞机机翼传统装配流程及特征分析,其结构装配已经脱离总装,装配流程主要是将对接和架外放在部装,将总装配和活动翼面检测放在总装阶段,对于机翼模块化装配影响最大的因素是总装阶段的测试,要实现机翼模块化装配,首先需要改变机翼传统装配流程,针对装配集成化、调姿对接数字化柔性化、滑轨安装柔性化、活动翼面测试单元化等方面进行模块化调整,将传统部装阶段的对接/架外和总装阶段的活动翼面检测全部前移至部装阶段,改变后的机翼模块化装配流程见图 2 (具有

填充色的为模块化主流程)。

### 4 模块化装配关键技术分析

依据机翼装配特征和流程分析,机翼模块化装配关键技术包含机翼装配工作平台模块化高集成技术和活动翼面模块化调装与测试技术两部分。机翼装配工作平台模块化高集成技术针对安装问题,在符合产品设计规范的前提下,把飞机机翼作为一个模块化单元进行装配,将传统的机翼结构对接装配、襟翼滑轨安装、机翼架外系统安装等工作进行模块化/集成化/柔性化装配。活动翼面模块化调装与测试技术针对测试问题,主要完成活动翼面相关作动控制、偏角检测、机载传感器检测等调装与测试工作。

### 机翼集成化/柔性化装配

针对模块化装配的结构问题和机翼传统分散分离装配现状,首先通过单元化、集成化、柔性化等模块

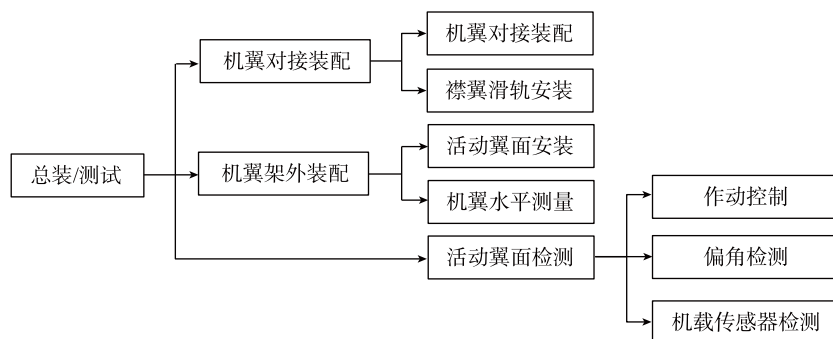


图1 飞机机翼传统装配流程

Fig.1 Traditional assembly process of aircraft wing

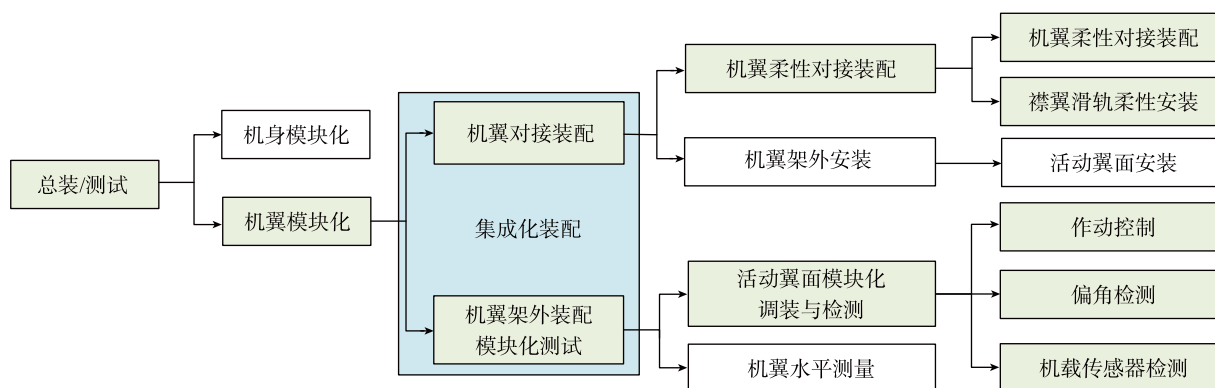


图2 飞机机翼模块化装配流程

Fig.2 Modular assembly process of aircraft wing

化装配技术优化,将外翼中央翼对接装配、襟翼滑轨安装、活动翼面安装测试、机翼水平测量等工作在一个平台进行集成装配,将滑轨进行柔性化装配。

## 1 装配平台总体方案

### 1.1 装配内容分析

按照安装方法和工作量,将整个机翼模块化工作内容分为对接装配和架外安装测试两个站位。

对接装配站位设计主要考虑完成外翼与中央翼的对接装配、襟翼滑轨安装两部分工作,站位利用数控定位器对外翼和中央翼进行空间姿态调整,利用工艺装备托架对外翼重力方向变形状态进行支撑优化,利用柔性安装车对各组滑轨进行低应力安装。

架外安装测试站位设计主要考虑完成活动翼面模块化安装与测试、机翼水平测量两部分工作,站位利用活动翼面模块化安装与测试装备对包含襟翼、副翼、扰流板的的活动翼面进行安装、运动及传感器测试,利用数字化调姿设备对机翼进行整体支撑,根据测量数据开展姿态调整机翼水平点测量<sup>[10-11]</sup>。

### 1.2 装配平台一体化设计

模块化装配首先要实现一体化,即基于两个站位建立统一的一体化高集成平台,从机械结构将对接装配和架外安装测量两个站位有机地结合成一体。

由于架外测试站位需要将襟翼打开,所以架外测试站位要高于对接装配站位,要统一两个站位,首先需要考虑两个站位的结合及上下、交互通道,其次需要考虑风、电的一致性。针对该问题,平台在展向两侧设置了6处上下通道、两个站位设置了4处交互通道、设置了统一的风/电控制中心,同时在平台下部空闲位置设置了统一规划统一布局的物料存储区。

## 2 装配平台结构

根据总体设计思路,将工作平台

按照功能进行结构设计:

(1)定位支撑采用数控调姿定位器,对接装配站位由两个外翼向固定位置的中央翼进行对接,左右外翼支撑调整各设置2组各4台数控调姿定位器;架外测试站位仅在中央翼处支撑飞机,采用4台数控调姿定位器进行定位和水平测量点调平。

(2)由于飞机部件姿态调整需要对飞机部件进行支撑,所以对接装配站位的外翼部件在中央翼位置需要设置固定支撑定位托架,在外翼调姿前需要有辅助支撑托架;架外测试站位的全机翼部件在外翼位置需要设置辅助水平调整支撑托架。

(3)统一工作平台布局,由于对接装配站位和架外测试站位均按照机翼外形布局,所以,集成平台将两个站位平行布置,通过对通道和护栏的设置统一两个站位的高度。活动翼面运动控制及测试工艺装备主要接口在中央翼后,其测试柜、液压驱动源等布置在架外测试站位中央翼后靠近对接装配站位处,其襟翼作动控制依据襟翼连杆位置放置在中央翼后下方。由于滑轨在机翼航向后端,滑轨安装车布局在对接装配站位航向后。

(4)统一测量布局,平台包含了2个平台、3组数控调姿定位器、2套机翼支撑调整工艺装备、1套活动翼

面运动控制及测试工艺装备,需要考虑的是多装备的系统协调性。针对该问题,在平台内表面下设置包围整个平台的固定支撑测量点,将所有测量点统一在一个坐标系下,建立平台全局坐标系,所有装备按照全局坐标系进行整体布局。飞机机翼模块化高集成工作平台见图3。

### 3 柔性化滑轨安装车

滑轨安装针对6对12根滑轨安装,其滑轨宽度大致在150mm左右,前轴承定位孔基本一致,按长度分为3组,6处高低位置在500~1500mm之间。要实现模块化装配,滑轨安装车设计时需要考虑适应轴承孔、滑轨宽度、长度、高度,即需要支撑结构宽度适应,长度可调和总体可升降、前后左右平移,安装车整体采用气动/手动升降、手动平移。安装车需要在各滑轨位置间转换,所以需要带行走脚轮,到位后需要驻车支撑将车固定。滑轨安装车见图4。

## 活动翼面单元化测试

针对模块化装配的系统问题,活动翼面按照单元化在装配平台进行测试。机翼活动翼面具有飞机部件中最复杂的运动控制。对水平测量或飞机其他部件而言,活动翼面更具有难度和典型现实意义,在产品交付中实现模块化装配具有重要意义。要解决活动翼面模块化问题,实现其

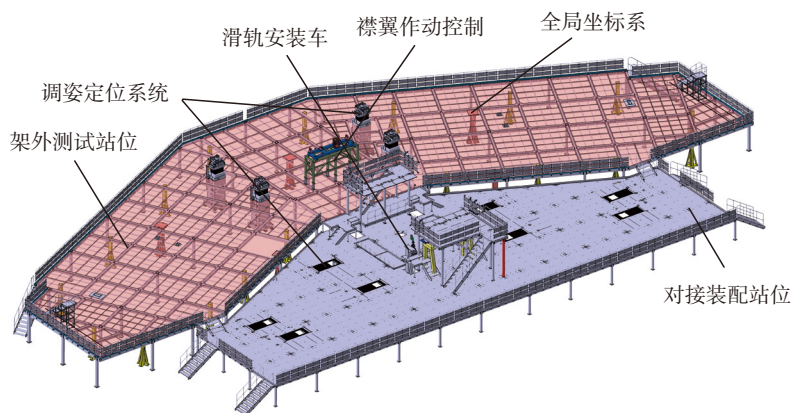


图3 飞机机翼模块化高集成工作平台

Fig.3 Aircraft wing modular high integration working platform

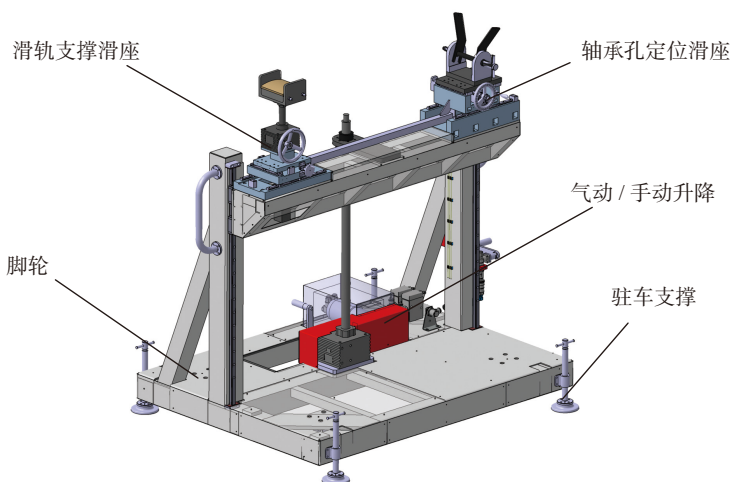


图4 飞机滑轨安装车  
Fig.4 Aircraft rail mounting vehicle

单元化和集成化,需从控制逻辑结构分析、测试方法分析、测试设备规划3方面入手进行工程设计。

### 1 控制逻辑结构分析

控制逻辑结构分析即分析模块化对象的控制与测试的控制逻辑结构。根据飞机控制/测试原理及特性,可以分析出襟翼、副翼、扰流板在作动控制、舵面偏角检测两方面的控制逻辑结构图,根据传感器的激励、信号处理原理可以分析出机载传感器的调装测试逻辑结构图。根据功能控制分析,得出某大飞机活动翼面控

制逻辑结构(图5)和机载传感器测试逻辑结构(图6)。

### 2 测试方法分析

测试方法分析即根据控制逻辑结构明确模块化对象运动控制及测试的基本方法和分类,大致分为3步。第1步,流程转换,即从总装阶段将活动翼面运动控制及测试从总装流程剔除,放置在部装状态下;第2步,建立方法,根据活动翼面在部件阶段中央翼、机身、总控台等关联部件缺失的特征,确定在部件装配阶段只能根据运动控制及测试的基

本功能进行分类控制的方法;第3步,明确分类,按分类控制原则和方法,根据功能和结构相近的基本原理,将活动翼面的基本功能分为作动控制、偏角检测、机载传感器检测3大部分。

### 3 测试设备规划

测试设备规划即根据方法和分类分别建立独立的作动控制、偏角检测、机载传感器检测3类调装测试设备,以在部装阶段分类完成模块化对象相关运动控制和测试,按照相同功能、性能统一设备的原则,共规划设计了襟翼作动、副翼/扰流板作动、偏角检测、机载传感器检测共3类4台设备。

(1)作动控制。设备针对襟翼、副翼、扰流板的驱动并对运动过程中的零点、前后极限进行检测确定,由于襟翼为机械驱动轴系,所以襟翼需要单独构建一套独立的直接通过机械电机驱动设备;由于副翼、扰流板均为液压驱动,液压压力相同,驱动伺服阀组为机翼部件自带,只需要提供电源激励,所以可以共同构建为一套设备。

(2)偏角检测。设备主要针对襟翼、副翼、扰流板在机翼水平状态

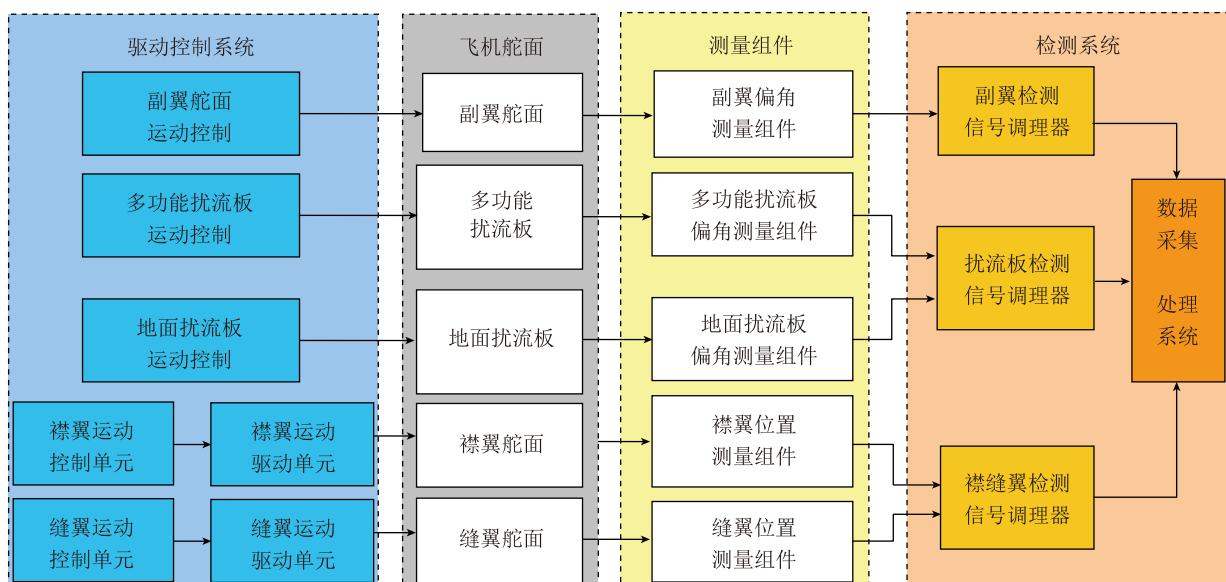


图5 飞机活动翼面舵面控制逻辑结构  
Fig.5 Aircraft active airfoil rudder surface control logic structure

的角度偏转进行测量,由于偏角检测均是对角度传感器进行控制,只是测量针对不同位置、不同型别,所以可以共同构建为一套设备。

(3) 机载传感器检测。设备则是针对襟翼、副翼、扰流板各类位置、接近、角度等传感器按产品设计标定值开展传感器供电激励、输出信号检测、输出信号现场调理、输出信号现场监视等测试工作,活动翼面主要传感器为接近传感器、位置传感器、角度传感器等,均属于将微电流、微电压转换为数据的读取方式,所以可以共同构建为一套设备。

飞机活动翼面调装与测试装备实物见图 7。

### 实施与应用

航空工业西飞某大飞机机翼在国内首次实施模块化装配后,机翼在部件装配完成驱动装置的液压、飞控

等试验,进行活动翼面运转调试,全方位检测机翼装配后的运动位置和模拟飞行状态,将所有试验中出现的问题及时封闭在机翼装配阶段,通过集成化和柔性化装配,减少了机翼交付总装后发生故障风险,以及交叉作业、排故时间,同时加快了整体生产节拍。通过几架机的模块化装配实践,装配质量大幅提升。实施机翼模块化装配前后保留故障变化见图 8。

### 结论

综合来看,机翼装配通过活动翼面等工艺工序的单元化等模块化装配技术进行优化,大幅减少了总装阶段调装、测试工作,使部件装配交付总装对接后可直接达到整机联调状态,将潜在故障提前暴露、提前解决,大幅缩短整机生产周期,提高产品质量和生产效率;通过装配工作平台集成化和滑轨安装工艺装备的柔性

化等模块化装配技术,使得机翼装配工序更加集中,机翼内部产品安装通用性更好。未来飞机模块化装配技术将在更大范围被采用,也必将为飞机产品制造带来更大的效益。

### 参考文献

[1] 常品要. 模块化制造关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.

CHANG Pinyao. Research on key technologies of modular manufacturing[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.

[2] 贾延林. 模块化设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.

JIA Yanlin. Modular design[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1993.

[3] 范玉青. “波音 787: 全球制造”下的总装革命[J]. 大飞机, 2014(1): 40-43.

FAN Yuqing. “The Boeing 787: Global Manufacturing” revolution[J]. Large Aircraft, 2014(1): 40-43.

[4] 《航空制造工程手册》总编委员会. 航空制造工程手册: 工艺装备[M]. 北京: 航空工业出版社, 1993.

Editorial Board of Aerospace Manufacturing Engineering. Aviation manufacturing engineering Manual: process equipment[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1993.

[5] 许国康. 飞机总装移动生产线技术[J]. 航空制造技术, 2008, 51(20): 40-43.

XU Guokang. Movable production line technology for aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(20): 40-43.

[6] 李西宁, 支劭伟, 蒋博, 等. 飞机总装数字化脉动生产线技术[J]. 航空制造技术, 2016, 59(10): 48-51.

LI Xining, ZHI Shaowei, JIANG Bo, et al. Digital pulsation production line for aircraft final assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(10): 48-51.

[7] 马强. 飞机工艺装备模块化设计技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.

MA Qiang. Research on modular design technology of aircraft technology and equipment[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.

[8] 姜丽萍. 基于模型定义的中机身自

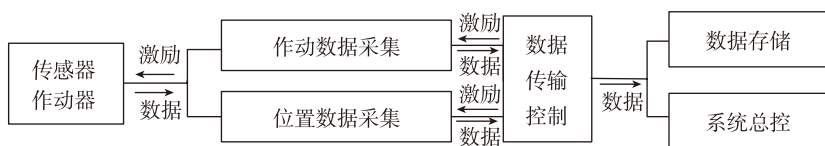


图6 飞机活动翼面机载传感器测试逻辑结构

Fig.6 Aircraft active airfoil airborne sensor test logic structure



图7 飞机活动翼面调装与测试装备

Fig.7 Aircraft active airfoil mount and test equipment

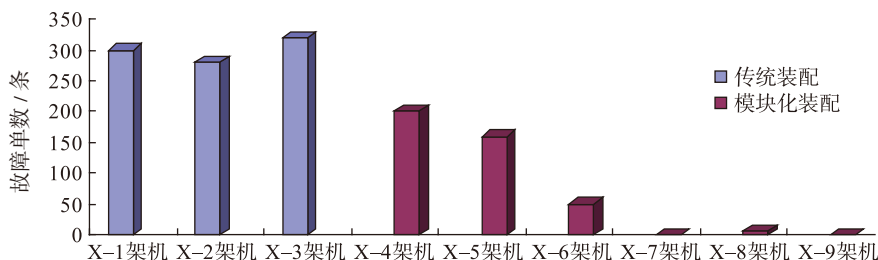


图8 实施机翼模块化装配前后保留故障条数变化情况

Fig.8 Number of faults before and after implementing wing modular assembly

动化装配关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.

JIANG Liping. Research on key technologies for automatic assembly of midship fuselage based on model definition[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.

[9] 常俊超, 姜楠. 基于 3D 打印技术在航空领域的应用分析 [J]. 科技资讯, 2015(14):13.

CHANG Junchao, JIANG Nan. Application analysis based on 3D printing technology

in aviation field [J]. Science & Technology Information, 2015(14): 13.

[10] 王飞, 杨湘龙, 冯允成. 虚拟现实仿真技术及在飞机装配中的应用 [J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(2): 213-216.

WANG Fei, YANG Xianglong, FENG Yuncheng. Virtual reality simulation and its application on aircraft assembling[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(2): 213-216.

[11] 李晓红, 高彬彬. 先进制造技术创

新促进空客“未来工厂”建设 [J]. 航空制造技术, 2016, 59(10): 28-31.

LI Xiaohong, GAO Binbin. Advanced manufacturing technology innovation promoting the construction of “Future Factory” of airbus group[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(10): 28-31.

通讯作者: 李西宁, 博士、副教授, 研究方向为装配与连接技术、板料成形技术, E-mail: lixining@nwpu.edu.cn.

## Research on Modular Assembly Technology of Aircraft Wing

WANG Shouchuan<sup>1</sup>, HAO Ju<sup>1</sup>, LI Xining<sup>2</sup>, GUO Feng<sup>1</sup>, WANG Yonghong<sup>1</sup>, WANG Zhanfeng<sup>1</sup>

(1. Tooling Design Institute, AVIC Xi'an Aircraft Industrial (Group) Company Ltd., Xi'an 710089, China;

2. Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**[ABSTRACT]** In view of the engineering realization of the modular assembly of a large aircraft wing, the technical background and the modular features of the aircraft components module are analyzed, and the module assembly process and the influencing factors are combed. The engineering design of wing assembly process, wing integration / flexible assembly and active airfoil unit is carried out. The integrated flexible working platform and rail mounting vehicle are designed. The design and analysis of control logic structure, test method and test equipment planning for aircraft active airfoil are finished. Finally, the application of wing module assembly and its effect are introduced.

**Keywords:** Modular assembly; Assembly platform; Rail mounting; Active airfoil; Actuation control; Deflection detection; Sensor detection

(责编 铃兰)

(上接第 62 页)

## Application on Cooperative Measure Technology for Aircraft Assembly

ZHAO Jianguo, DENG Chunli, GUO Hongjie, YU Siyang

(AVIC Shenyang Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Shenyang 110034, China)

**[ABSTRACT]** To meet requirements of measure during aircraft assembly process, such as big dimension, high accuracy, multitask and quick measure, the methods are developed including precision calibration of measure basis network facing on aircraft digital assembly, multi-systems cooperative measure, and technology solutions are described. Then measuring basis network covering total aircraft based on USMN is built to improve accuracy measuring reference. Work pattern of cooperative measure including multi-system is established to extend measuring scope and accuracy. The method was developed in this paper can realize the measurement of internal hidden features, hole position information, axis, mating surface, aerodynamic profile, flush and gap on the aircraft skins, meets the requirements of three-dimensional digital measurement for aircraft assembly. At last, the methods of cooperative measure are validated by measure process experiment of huge components assembly and huge parts surface feature including aerodynamic profile, flush and gap on the aircraft skins.

**Keywords:** Aircraft assembly; Cooperative measure; Precision calibration of measure net; USMN (Unified Spatial Metrology Network); 3D digital measuring

(责编 铃兰)