

# 飞机数字化柔性精准装配 技术研究及应用

## Study and Application Technology on Digital Flexible Accurate Assembly for Aircraft

中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司 赵建国 郭洪杰 王丽秀  
中国人民解放军驻沈阳飞机工业(集团)有限公司军事代表室 王 韬 陈海峰 李云飞 董 宇



赵建国

博士,工程师,研究方向为数字化测量和柔性装配技术。

飞机具有结构尺寸大、形状复杂、连接件数量多的特点,装配的工作量约占整个飞机制造工作量的40%~50%。传统飞机装配采用模拟量进行协调,需要大量复杂的专用工装,飞机各部件的协调装配工作要按模线、样板、标准样件等模拟量来保证,工装安装和校验的传递环节长、误差大,装配效率和产品质量很

飞机部件数字化装配系统非常复杂,它集成了飞机装配工艺学、飞机制造技术、数字化测量与控制技术、三维CAD系统仿真和机械结构力学等,涉及专业学科较多。本文通过对数字化柔性工装执行系统、大尺度光学数字化测量检验系统、控制系统和数字化自动柔性装配工艺的研究,构建了符合国内产品特点和生产组织管理方式的柔性数字化装配系统。在控制系统的统一协调下,对现场数据进行实时采集、分析,驱动数控执行系统调整飞机姿态,实现整个装配过程的全数字量协调,最终提高飞机装配质量和效率。

难达到较高水平,导致新机型的研制周期长达5年甚至10年以上(制造标准工装的周期通常在1~2年或更长)。

航空武器装备的多品种、小批量和低成本快速研制等需求推动了测量设备在加工、制造和装配中的高度集成。

国外正大力发展先进飞机装配技术,普遍采用数字化柔性装配工装,不仅缩短生产周期、改进装配过程、显著提高装配质量和效率,而且通用性使其适用于多种飞机的装配,

大幅度地减少了工装数量,并且便于实现自动钻铆。如波音公司借鉴汽车工业中的生产线概念,建立了适应民机柔性装配的生产线<sup>[1]</sup>,用于717、737、747、757以及787等机型的生产。在军机方面,美国F22的装配采用一种U型装配生产线,使得装配周期由16个月缩短为12个月<sup>[2]</sup>。在F/A22的基础上,F35的3种机型包括CTOL(着陆型)、STOVL(短距离垂直起落型)、CV(舰载型)的装配均在同一条装配线上进行,提高了装配生产率,节省了装配空间,而且

在整个 F35 项目寿命期内,节省了 3 亿美元<sup>[3]</sup>。国内关于数字化装配的技术也取得了一定进展,其中代表性的有浙江大学的张旭<sup>[4]</sup>、中航工业北京航空制造工程研究所的许国康<sup>[5]</sup>和北京航空航天大学邹冀华<sup>[6]</sup>等。

为满足新一代飞机高可靠性、长寿命、隐身和轻量化的需求,简化工装安装和校验过程,取消标准样件,大幅缩短工装制造周期,实现新型飞机的快速研制和生产,提高飞机装配质量,降低研制成本,研究数字化柔性精准装配技术势在必行。

### 飞机数字化柔性精准装配系统

飞机部件数字化装配系统非常复杂,它集成了飞机装配工艺学、飞机制造技术、数字化测量与控制技术、三维 CAD 系统仿真和机械结构力学等,涉及专业学科较多。本文通过对数字化柔性工装执行系统、大尺度光学数字化测量检验系统、控制系统和数字化自动柔性装配工艺的研究,构建了符合国内产品特点和生产组织管理方式的柔性数字化装配系统。在控制系统的统一协调下,对现场数据进行实时采集、分析,驱动数控执行系统调整飞机姿态,实现整个装配过程的全数字量协调,最终提高飞机装配质量和效率。

#### 1 数控定位系统

国内外飞机机身大部件柔性对接工装都采用了定位器技术。定位器是一种 3 自由度的模块单元,具有定位精度高、工作可靠、可重组、数字量协调、自动化和占地面积小等优点。飞机大部件对接系统基于移动式模块化可重构并联机构的整体设计理念,根据最佳配合原理,采用成组定位器技术,分别支撑飞机的前机身、中机身、后机身,通过定位器组的协调运动,使待装配体(机身)具有 6 自由度运动特征,在数字化测控系统的控制之下,自动完成飞机合装的定

位、移动、调整、对接等作业。数控定位器具体结构如图 1 所示。

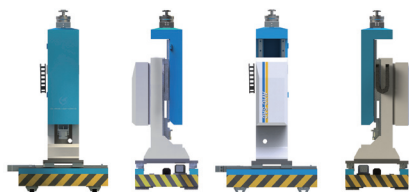


图1 数控定位器

#### 2 大尺度光学测量系统

测量检验系统应充分发挥 iGPS (具有大尺寸空间、多任务、实时高精度、快速测量的特点)和激光跟踪仪(局部高精度)各自的优点,构建覆盖飞机装配现场工作空间的多系统异构整体测量场,对制造过程中的工件位置、尺寸、姿态等几何信息进行实时测量、管理,并同时反馈给控制系统,实现工装的定位补偿和闭环控制。

iGPS 系统通过角度交汇实现空间坐标测量,其网络测站数目多、组网方式灵活、测量范围大,但因耦合

环节多,在基量网中测站布置和接收器之间存在精度优化匹配的问题,不但基站位置影响测量精度,而且不同的基站组合对测量定位误差的影响也不尽相同。本文以 2~4 个基站组成的小型网络作为典型单元研究网络布局及误差特性,通过现场条件下的多种基站组合实验,理论分析得到 iGPS 典型单元构型及该构型下坐标测量误差分布(见图 2)。结果表明 4 站 O 型布局的整体测量精度最高,3 站 L 型布局对两站布局测量精度的增强幅度约为 40%,O 型布局对 L 型测量精度的提高幅度大部分处于 20% 以内。

通过上述基站布局对测量精度的影响研究,经大量计算,建立了各典型布局覆盖面积的近似模板。在已知间距的情况下可对典型布局的覆盖面积进行估算,并结合待测工件数模进行关键点可测性分析,为选择典型布局形式提供依据,进一步通过数学模型分析评估在该布局下基站

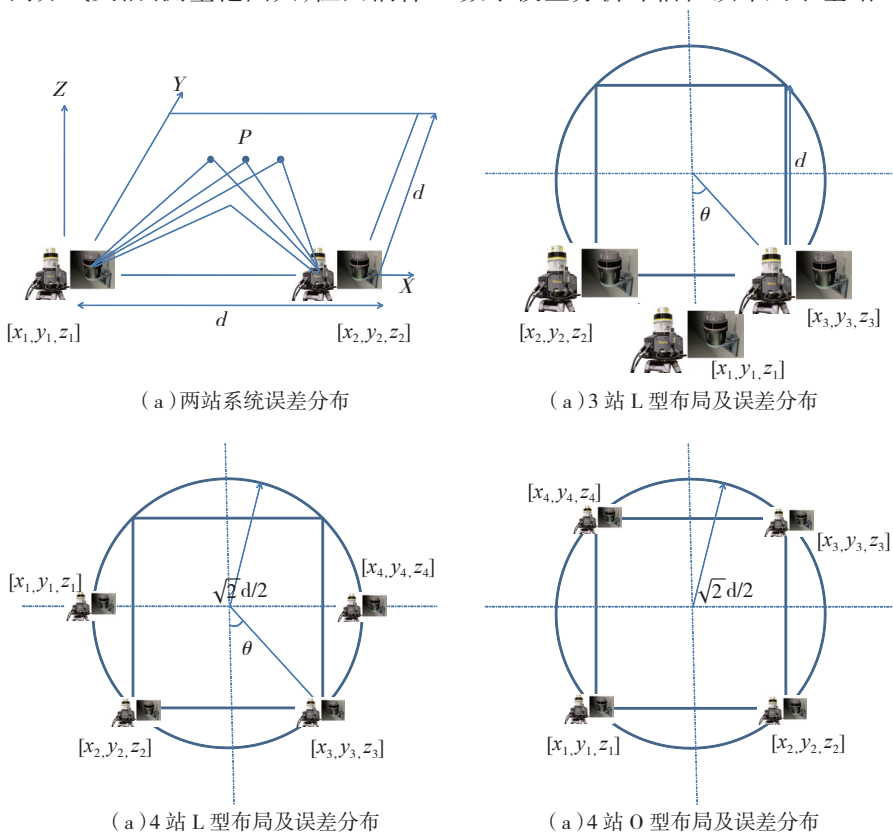


图2 不同布局iGPS测量误差对比

定位精度。

由于采用干涉测距原理,激光跟踪仪在长度测量范围和测量精度上具有无可比拟的优势。在整体测量场中引入跟踪仪可充分发挥其测量范围大、精度高的优势。进一步优化测量场的整体测量精度。在测量场内不同位置布设精度控制点,由激光跟踪仪通过距离平差的方法修正其角度编码器造成的测量误差,获得控制点的高精度空间坐标。此时,在整体测量场空间内将这些控制点作为约束条件对场内发射器分组进行进一步平差定向,可有效统一坐标系,形成覆盖全场的整体高精度测量控制场。

### 3 自动化管控系统

自动化管控系统以 iGPS 和激光跟踪仪组成的测量网为基础,通过测量飞机零部件表面关键点坐标,实时解算飞机部件位置和空间姿态,并结合工装控制系统实现部件装配的闭

环动态引导,如图 3 所示。飞机部件的空间姿态解算方程包含多个未知变量,而且考虑到实际飞机部件制造、加工和装配误差的存在,测量点往往多于 3 个,随之带来了过约束问题。本文通过刚体空间姿态方程寻优算法求解空间变换参数,以此提高飞机部件空间姿态解算的精度和效率。

数字化测量系统作为飞机柔性对接工装的一部分,如何同其他系统无缝连接,实现工装系统的集成化,提高系统的效率至关重要。本文基于工业 OPC 平台,整合 iGPS 和激光跟踪仪测量系统、执行系统和控制系

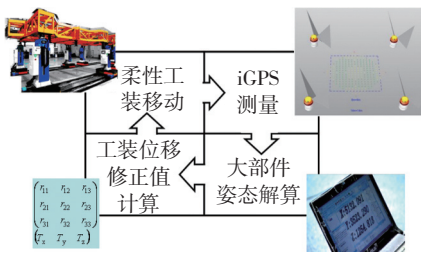


图3 基于iGPS的飞机装配流程

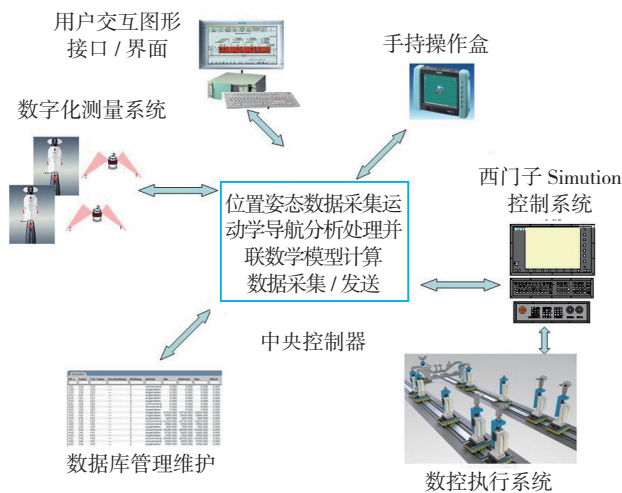


图4 数字化柔性装配系统集成控制架构

环动态引导,如图 3 所示。

控制系统根据大部件对接系统工艺规划结果,实现系统管理及测量功能,以系统管理模块实现 iGPS 系统和激光跟踪仪现场测量资源的统一调配,有效管理和实时监控,以测量功能模块实现大型工件空间姿态的实时解算、状态显示及数据统计分析。

统,统一数据接口和格式,采用 TCP/IP 协议通信(如图 4 所示),将工艺信息、生产过程信息、制造管理信息等进行统一描述和存放,具有信息完备、语义一致、定义灵活、操作方便、表达集成和应用独立的特性,反映了产品的信息本质,从概念上和逻辑上对数据进行合理的规划和设计。在

应用层面,提供一个相应的组件集成规范平台,该平台支持可扩展性,能够对系统的发展和变化做出快速响应,最终保障数据在系统上的交换和共享。

### 数字化柔性装配工艺优化

针对飞机装配的需求,数字化柔性装配工艺研究相应的装配工艺流程以及数字化测量方法,建立覆盖工作现场的全局多系统异构数字化测量场,与数字化工艺装备构建符合飞机装配特点的柔性数字化装配系统;通过现场测量数据采集定量的分析,协助数控定位系统进行位置补偿和闭环控制,进而提高飞机装配质量和效率。数字化柔性装配工艺设计及优化主要包括装配工艺仿真和测量工艺设计。

装配工艺仿真:针对飞机的结构特点和产品技术图样要求,首先划分工艺分离面,规划装配工艺顺序,然后借助虚拟仿真技术,进行装配工艺仿真,及时发现产品设计缺陷和装配工艺问题,优化装配工艺顺序,改善飞机装配工艺性和可维护性,降低返工率,提高飞机装配质量和效率。

测量工艺设计:主要包括测量特征点的选取、数字化测量场的构建和测量误差分析与修正。具体内容如下:

(1) 测量特征点的选取。关键特征点装配单元为数据集,包括基准点集、测量点集、测量标识物等。在飞机部件上选取关键特征点,并进行仿真优化,根据各测量特征对测量精度的贡献率,对检测特征加以适当的权重系数,以提高飞机装配精度。

(2) 测量场的构建。数字化测量设备都有其技术特点和适用范围,单一测量设备难以满足飞机各装配环节的需求。针对不同测量任务,选用相应的测量设备,进行测量场布局仿真分析,搭建覆盖全局和局部的多系统异构测量场,发挥 iGPS 测量速

度快、测量范围广、同时执行多个测量任务、扩展性强和可进行动态测量的优点,对飞机部件进行初定位及对接过程的动态监控,利用激光跟踪仪测量精度高的特点,对飞机部件姿态进行精确修正,实现飞机的高效率、高精度装配。

(3) 测量误差分析与修正技术。仪器自身测量误差、测量系统转站误差、不同测量设备间转换误差、测头(靶球、接受器等)系统误差、工件形状误差和算法计算误差等交互影响,影响因素较为复杂,通过对各误差项进行研究,确定内在联系,参照数据处理中的测量不确定度分析方法,对误差项的影响因子进行界定,并加以优化控制,提高系统测量精度。

## 应用验证及实施效果

### 1 工艺验证

采用上述研究方法,以某机型模拟试验件对接试验进行验证。工艺试验件尺寸为  $18\text{m} \times 13\text{m} \times 6\text{m}$ , 总重  $5\text{t}$ 。通过前期在模拟试验件上选取若干个关键点,并将其在真实飞机坐标系下的坐标值作为理论坐标值,以此理论坐标值为目标引导值;以关键点测量值作为大部件定位的控制数据,引导定位对接工装进行位置调整。在部件到达理论位置后,引导结束,并采用激光跟踪仪进行精调。将测量关键点坐标值与理论值进行比较,以验证大部件定位对接系统的调姿精度。

模拟试验件以任意姿态上架,采用激光跟踪仪结合 iGPS 的测量手

段,试验件采用 6 个测量点,调整姿态后如图 5 所示,具体数据见表 1。由表 1 可见,姿态调整误差最大为  $0.252\text{mm}$ ,完全满足飞机装配的气动外形、间隙和阶差的要求,可用于新一代飞机的科研生产。



图5 对接工艺试验

### 2 实施效果

本文研究成果在某型飞机研制中获得了成功应用,具备与美国 F22 和 F35 装配工装相同的功能。iGPS 结合激光跟踪仪建立了覆盖飞机柔性装配系统的全局测量场,在优化布局下实现动态  $(200\mu\text{m}+10\mu\text{m})/\text{m}$ 、静态  $(10\mu\text{m}+5\mu\text{m})/\text{m}$  的坐标测量精度,并保证  $5\text{点}/\text{s}$  的动态测量速度。

飞机数字化柔性精准装配系统,采用柱式并联数控定位系统,实现飞机前、中、后段机身的数字化自动调姿与无应力对接装配,动态装配路径误差不大于  $0.2\text{mm}$ ,经激光跟踪仪修正后对接精度小于  $0.1\text{mm}$  (仅为传统工艺的  $20\%$ )。针对不同机型,只需更换少量工艺连接件便可适应不同装配需求,节省了大量工装设计、加工及调试的时间和成本。

## 结束语

(1) 建立了飞机数字化柔性精准装配系统。该系统融合了数字化测量、数控定位、自动化集成控制、工艺仿真及优化等技术于一体,打破了传统基于模拟量协调的装配模式,满足了飞机隐身性、长寿命、轻量化、多构型和快速研制的的需求。

(2) 对面向飞机装配的数字化测量技术进行了研究。结合 iGPS 和激光跟踪仪,建立了覆盖飞机柔性装配系统的全局测量场,在优化布局下实现动态  $(200\mu\text{m}+10\mu\text{m})/\text{m}$ 、静态  $(10\mu\text{m}+5\mu\text{m})/\text{m}$  的坐标测量精度,并保证  $5\text{点}/\text{s}$  的动态测量速度。

(3) 通过试验,验证了本文研究成果的工艺合理性,并在多个飞机研制中获得成功应用,缩短飞机装配周期  $50\%$  以上,精度偏差仅为传统工艺的  $20\%$ 。

## 参考文献

- [1] 任晓华. 新型飞机自动化装配技术. 航空制造技术, 2005(12):32-35.
- [2] 范玉青. 现代飞机制造技术(修订本). 北京:北京航空航天大学出版社, 2001.
- [3] Fort Worth, TX. Lockheed Martin F-35 Joint Strike Fighter Automated Electronic Mate and Assembly System [EB/OL]. <http://www.aint.com/JSFProject.html>.
- [4] 张旭. 飞机大部件对接装配过程中的干涉检测技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2008.
- [5] 许国康. 飞机大部件数字化对接技术. 航空制造技术, 2009(24):42-45.
- [6] 邹冀华, 刘志存, 范玉青. 大型飞机部件数字化对接装配技术研究. 航空制造技术, 2006, (8):36-38. (责编 谷雨)

表1 姿态调整数据对比

测点	调整后值			理论值			调姿误差		
	X	Y	Z	x	y	z	$d_x$	$d_y$	$d_z$
1	8044.3665	366.2103	1696.1727	8044.3420	366.1404	1696.1136	0.025	0.070	0.059
2	12574.6069	366.7130	1695.9996	12574.4050	366.1610	1696.1210	0.202	0.252	-0.121
3	10474.6451	365.9930	-3.9219	10474.6526	365.9053	-3.9505	-0.007	0.088	0.029
4	11524.7361	366.1498	-3.9170	11524.6463	365.9250	-3.7785	0.090	0.225	-0.139
5	8002.4906	-259.5363	-1823.8137	8002.4870	-259.2433	-1823.8247	0.004	-0.193	0.011
6	12472.5670	-80.2742	-1826.2919	12472.4331	-80.3519	-1826.1793	0.134	0.078	-0.113