



Digital Assembly Technology System of Aircraft

西安飞机工业(集团)有限责任公司 何胜强



何胜强

研究员级高级工程师, 现任中航工业西飞总工程师、副总裁。先后担任轰六某重点型号总设计师、国家中长期科技发展重大专项中某重点型号制造系统总工程师、中航工业航空制造技术首席专家。先后荣获国防科工委国防科技工业武器装备型号研制个人二等功1次; 中航工业个人一等功3次, 个人二等功2次; 获国防科学技术奖特等奖1次, 二等奖1次。

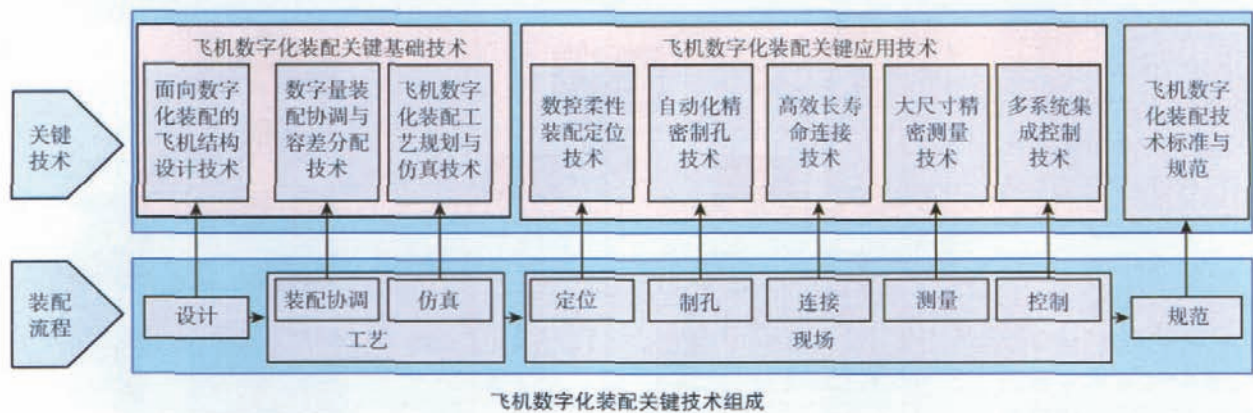
飞机数字化装配技术体系涉及多学科多领域的综合研究与应用, 通过飞机数字化装配技术体系的研究, 突破飞机数字化装配关键技术, 构建飞机数字化装配装备, 可彻底改变我国目前基于二维图纸的工艺规划方式, 有效提高装配工艺准备效率; 彻底改变我国航空产品装配连接基本上靠工人手工实施的生产现状, 提高生产效率, 减少协调环节。

随着我国飞机重大型号工程实施, 在融入国际航空产业链、数字化技术广泛深入应用等方面不断推进, 我国的飞机设计与制造技术得到了飞速发展。

在零件制造技术方面, 近年来我国航空企业引进了大量先进的数控机床, 通过多年的数控工艺与方法的研究与实践, 基本掌握了大型复杂金属结构件的制造技术, 使飞机零件数控加工能力全面提升, 零件制造质量和效率大幅提高, 零件制造技术已具

备坚实的基础。

在装配技术方面, 飞机装配是将零件、组件或部件按照设计和技术要求进行组合、连接形成高一级的装配件或整机的过程。飞机装配由于产品尺寸大、形状复杂、零件以及连接件数量多, 其劳动量占飞机制造总劳动量的一半左右甚至更多^[1]。我国航空企业结合型号需求开展了壁板自动钻铆、大部件柔性对接等关键技术及装备的研究和应用, 在数字化装配技术方面开展了有益的尝试和试



飞机数字化装配关键技术组成

配技术。

数字量装配协调与容差分配技术是保证飞机装配准确度,提升飞机产品质量的关键。目前,我国在飞机的装配过程中仍主要沿用20世纪五六十年代前苏联航空制造业根据实物样件以模拟量形式传递零部件的形状和尺寸的方法^[3],采用大量复杂刚性型架进行定位和夹紧的传统手工装配方法,装配精度、质量稳定性、装配效率等很难满足要求,进而导致相关产品国际适航认证获批艰难。而数字量装配协调与容差分配技术在工艺规划阶段以飞机数字化设计数据为基础,在数字化环境下完成对飞机协调方案及容差方案的规划,保证装配可行性、装配精度与装配质量。其关键技术点在于:

- 在规范化的产品和工装三维模型基础上,快速有效地构建起支持数字化装配的装配协调基准;

- 以协调基准为基础,规划数字

化装配环境下的装配协调路线;

- 针对不同装配对象的关键特性,分析装配过程变形,并提出补偿方案;

- 结合装配准确度、装配变形及误差传递过程,分析和优化装配容差,实现装配容差的数字化分配。

(3)飞机数字化装配工艺规划与仿真技术。

飞机装配过程涉及了成千上万的零部件、工装、夹具、工具,并有大量装配操作等,精确、合理地规划、分析、仿真它们参与装配的各个细节(即装配工艺),有效解决装配工艺设计中的装配不协调、干涉、碰撞、超差等问题,保证产品精准快速装配,是提高产品装配效率和质量的关键。

- 针对数字化装配工艺方案,建立数字化装配系统仿真模型,进行系统布局仿真;

- 以装配仿真为手段,进行仿真式三维装配指令规划与优化;

- 针对自动化装配工艺装备,实现基于离线仿真分析与实时测量相结合的装配数控代码生成;

- 以飞机零部件及其工装的数字样机为基础,针对飞机的功能和性能、理论外形和结构,实现涵盖“零件—部件”装配作业过程的三维可视化仿真;

- 以装配作业过程仿真和数字化装配系统布局仿真为基础,进行数字化装配环境下的人机功效仿真。

2 飞机数字化装配关键应用技术

飞机数字化装配关键应用技术是指支撑飞机数字化装配现场的共性关键技术,主要针对装配过程中的定位、制孔、连接、测量、控制等环节进行研究,并构建起相应的实验单元,支持数字化装配技术的应用实施,主要包括:(1)数控柔性装配定位技术;(2)自动化精密制孔技术;(3)高效长寿命连接技术;(4)大尺寸精密测量技术;(5)多系统集成控制技术。

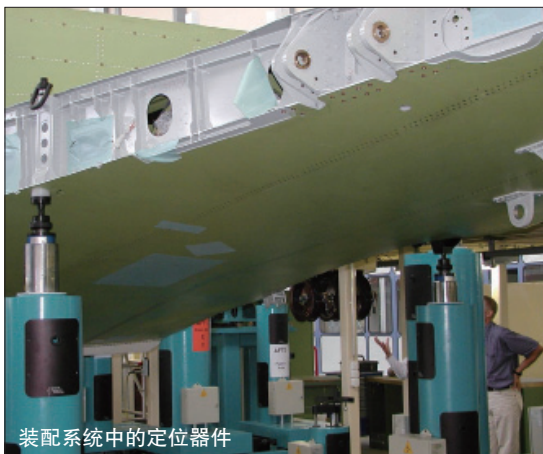
(1)数控柔性装配定位技术。

柔性定位与夹持技术是柔性工装设计的基础与核心,由于飞机结构件尺寸大、形状复杂,导致定位与夹持件的配合方式有很多的限制。而飞机产品的零件多为薄壁件,其在装配过程中易产生形态多样的装配变形。因此,为保证飞机装配精度,需要研究合理的数控柔性装配定位技术,提高装配结构件的定位精度和重复定位精度。

- 针对飞机典型部件的结构特点,提取其定位、夹持技术需求,确定定位器布局、夹持、驱动方式,开展壁板、框、梁等典型结构的数字化定位器的模块化结构设计;

- 实现飞机数字化装配环境下基于测量误差的柔性定位方案;

- 实现柔性定位与飞机结构件的



装配系统中的定位器件

姿态调整,保证多定位器协同运动控制及构件位置姿态精确调整;

- 根据飞机产品的特点,开发飞机数控柔性装配定位单元。

(2) 自动化精密制孔技术。

飞机产品的连接多为机械连接,其中以螺接和铆接方式为主,连接前必须对相关零部件进行制孔。由于我国现在飞机装配上仍然大量采用人工制孔的方式,制孔水平受人工影响大,孔质量参差不齐,无法保证装配精度,同时装配效率低,使得最终产品的稳定性差,其装配连接质量直接影响产品结构抗疲劳性能与可靠性^[4]。同时,复合材料结构件的广泛应用对我国发展的航空重点型号的研制周期、装配连接质量、产品性能等提出了更高要求。在装配工艺方法方面,我国主要针对金属结构的制孔积累了大量的工艺方法和工艺参数,形成了成熟的工艺流程,而面向复合材料结构件的制孔还未形成相应的装配工艺体系。因此,飞机数字化装配自动化精密制孔技术主要包括了以下技术要点:

- 复合材料、铝合金、复合叠层结构制孔的刀具参数、切削速度、进给量、冷却方式等工艺参数试验与优化设计技术;

- 狭小空间下精密制孔技术;

- 复合叠层结构制孔执行器小型化、轻型化设计及精确定位;

- 根据飞机产品装配特点,开发飞机自动化精密制孔单元。

(3) 高效长寿命连接技术。

随着飞机耐久性和可靠性要求不断提高,长寿命连接是大飞机研制必将广泛采用的连接方法。干涉配合能提高结构疲劳寿命,已成为结构延寿的主要工艺方法。为提高结构疲劳寿命,国内外各先进飞机制造中均采用了大量干涉配合紧固件。如空客 A320 机翼下壁板,仅钛合金干涉螺栓就有 11000 个,伊尔 86 上使用的各种干涉配合螺栓达 34400 个。

我国目前干涉配合紧固件一般采用液压压入或锤击打入的方法^[5],这些方法导致紧固件容易屈服并膨胀,安装比较困难;对于具有较大干涉量的紧固件,采用打入的方法容易造成孔壁损伤,最终导致飞机使用寿命上的缺陷。因此,飞机数字化装配高效长寿命连接技术主要包括了以下技术要点:

- 装配过程中的大尺寸装配件、装配工装结构变形分析技术;

- 支持密封连接、长寿命连接的复合材料干涉铆接、干涉螺接技术;

- 钛合金铆钉、钛合金高锁螺栓连接技术;

- 根据飞机产品装配特点,开发飞机高效长寿命连接单元。

(4) 大尺寸精密测量技术。

飞机装配过程数字化是依靠精准可靠的测量系统提供的数据来保证的,测量数据是数字量协调的基础数据,高精度的测量方法是实现数字化装配定位、制孔、连接的基础。而飞机产品常常具有尺寸大、精度高的特点,因此其对测量系统、测量技术的要求非常高。精密测量技术主要有以下几个要点:

- 面向数字化装配的激光跟踪测

量方法;

- 面向飞机总装的 iGPS 测量方法;

- iGPS 测量与激光跟踪测量组合的测量方法;

- 根据飞机产品的特点,开发飞机大尺寸精密测量单元。

(5) 多系统集成控制技术。

控制系统是飞机数字化装配的大脑,但是在飞机数字化装配过程中,与装配相关的硬软件系统众多,数据处理方式多样,设计数据、工艺数据、测量数据、定位数据、制孔数据、连接数据等之间存在大量的交互与协调,而多系统集成控制技术便是实现交互与协调的基础,主要有以下几个要点:

- 数据处理标准和接口集成技术;

- 基于设备精度的误差动态补偿技术;

- 基于三维数模的离线控制和基于实时测量反馈的在线控制技术;

- 根据飞机数字化装配系统的特点,开发飞机多系统集成控制单元。

3 飞机数字化装配技术标准与规范

飞机数字化装配技术标准和规范是对飞机数字化装配过程中相关



波音787总装车间

技术的高度总结,是将理论研究、基础技术研究转化为生产应用的桥梁,是飞机制造企业进行数字化装配实施的指导原则,因此为了保证飞机数字化装配体系的顺利实施,有效地为我国在数字化装配领域提高数字化装备自主研发能力、实现自主知识产权和技术成果的推广,必须研究相关的飞机数字化装配技术标准与规范,按照飞机数字化装配流程其主要包括了3大类标准与规范:

- 设计类标准规范:面向数字化装配的飞机结构设计规范、三维标注方法手册,针对不同类型零组件的建模规范等;

- 工艺类标准规范:数字化协调技术规范、数字化装配容差分配技术规范、数字化装配工艺方案规划相关技术规范、飞机数字化装配仿真技术规范等;

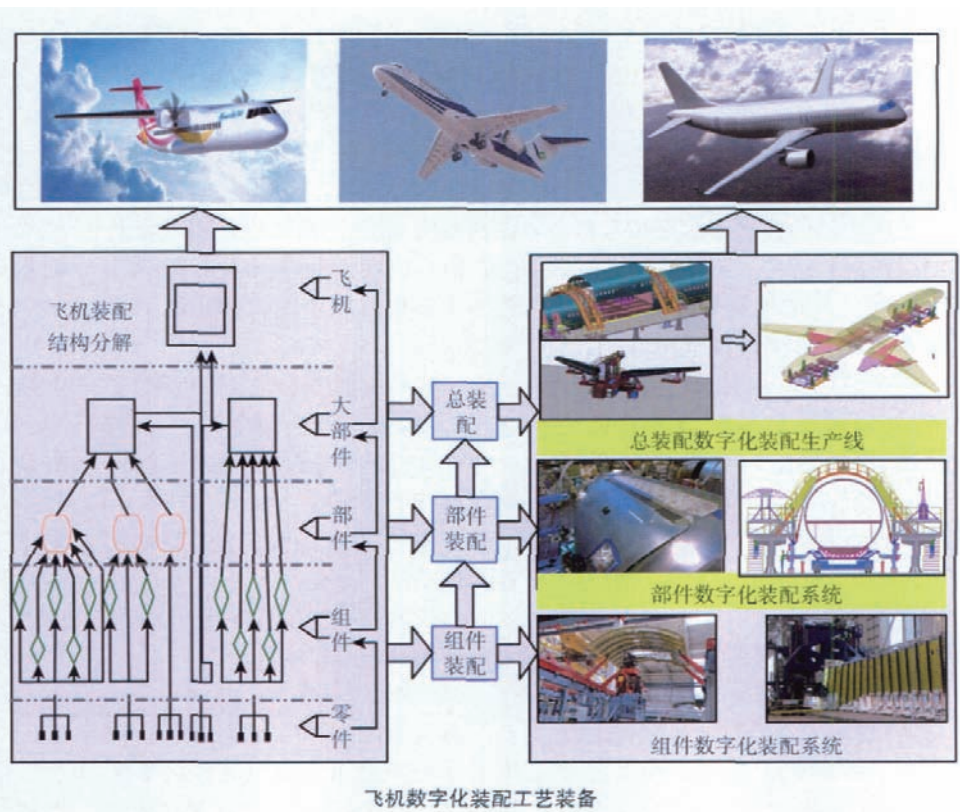
- 装配操作类标准规范:数字化柔性定位规范、自动化精密制孔规范、长寿命连接规范、数字化测量技术规范、集成控制技术规范等。

飞机数字化装配工艺装备

飞机数字化装配工艺装备是实现飞机数字化装配的重要支撑,按照飞机“组件—部件—总装”的装配流程,相关的装配系统可以分为3大类:组件数字化装配系统,部件数字化柔性装配系统,飞机总装数字化装配生产线。

1 组件数字化装配系统

飞机组件装配精度直接影响后续部件和总装的装配质量,是保证飞机装配精度的基础。根据结构形式特点,飞机组件可以分为壁板类组件和框梁类组件,其装配过程主要包括定位、夹紧、制孔、连接、测量等。传统的装配方法主要依靠刚性装配型



架和手工装配完成,其存在装配质量的差异,装配质量更多地受制于装配作业人员的经验技术,且刚性装配型架的制造周期直接影响了装配效率。组件数字化装配系统主要包括了数字化预装配工装系统、自动化制孔系统、自动化钻铆系统,通过系统集成形成较完整的组件数字化装配系统:

- 数字化预装配工装系统:针对肋、蒙皮、长桁、框等零件结构特点,通过合理的定位点布局、变形分析、误差补偿过程,保证对组件装配的数字化柔性定位。

- 自动化制孔系统:以机器人、大型数控机床为基础,配以功能全面的末端执行器,融合孔变形分析、制孔工艺参数决策的技术,保证对组件的精准制孔。

- 自动化钻铆系统:以数控编程、多自由度定位、自动钻铆、实时测量等为基础,构建合理的快速反馈控制机制与数据传递通道,保证对组件连接(螺栓、铆接等)的高精度与高

效率。

2 部件数字化柔性装配系统

对于飞机产品,不同的部件有着不同的结构特点,因此其数字化装配系统各不相同,但按照相关的功能,可将部件数字化装配系统分为数字化装配定位系统、数字化装配自动制孔系统、自动化连接系统、数字化测量系统和集成控制系统。按照飞机部件结构形式的不同,飞机部件数字化柔性装配系统可以分为:

(1) 机翼类部件柔性装配系统。根据不同机翼的大小、构型,机翼类部件柔性装配系统主要可以分为:

- 翼盒数字化装配生产线系统。以移动平台为基本的装配平台,配合激光导引定位系统,完成翼盒类部件的数字化装配。

- 前后缘类数字化装配系统。基于机器人制孔系统和柔性定位子系统,完成前后缘类数字化装配。

- 机翼数字化对接系统。采用支撑式结构,通过调整机翼各段在空间中的位置,保证机翼的对接装配。



装配对接系统中的移动支撑



空客A400M的总装定位部件

尾结构中得到应用,同时在装配过程中交点多,厚度变化明显、协调关系复杂,因此其柔性装配系统具有精度很高的数字化精加工平台,能快速转换工艺参数的自动制孔系统等,以保证复材与金属合金装配的准确度。

3 飞机总装数字化装配生产线

目前,国外已在飞机的总装配生产中应用了移动生产线或脉动式生产线,以提高飞机的生产率和质量。如在 F-35 的生产中应用移动装配线,节省车间空间并能在项目全寿命期内节省 3 亿美元。波音公司在波音 777 的飞机总装配中也应用了移动装配生

产线,使得生产系统更精益且更有效。在提高生产效率和质量的同时,还能使制造飞机的人员得到更大的保障^[6]。

针对国内飞机产品特点和批量生产的需求,飞机总装数字化装配生产线主要包括了 5 个站位,其中机翼总装和机身总装为 1 个站位的 2 个并行的总装站点,其相关组成如下:

(1) 第一站位: 机翼总装,实现外翼与中央翼数字化装配、机翼系统数字化装配; 机身总装,实现机身段数字化总装对接。

(2) 第二站位: 翼身对接,主要进行机翼机身柔性对接、平垂尾与机身数字化对接、电缆敷设、油箱安装、导管安装、起落架安装等。

(3) 第三站位: 系统安装,采用自动化与人工结合的方式,安装操纵系统、操纵台、仪表板、电子设备架、照明设施、发动机等。

(4) 第四站位: 系统检查,借助计算机及相关的检测仪器进行特设

系统的导通绝缘检查、特设系统的通电检查、气/油密检查、氧气及动静态气密检查等。

(5) 第五站位: 总检测试,各系统收尾、装饰恢复、总检、适航检、全机水平测量等。

结束语

飞机数字化装配技术体系涉及多学科多领域的综合研究与应用,通过飞机数字化装配技术体系的研究,突破飞机数字化装配关键技术,构建飞机数字化装配装备,可彻底改变我国目前基于二维图纸的工艺规划方式,有效提高装配工艺准备效率;彻底改变我国航空产品装配连接基本上靠工人手工实施的生产现状,提高生产效率,减少协调环节。在减少生产返工和维修次数的同时,提升定位连接精度;减少大量的装配工装,减少装配返工次数和使用维修次数,降低人力成本。同时,由于相关关键技术本身的共通性,通过进一步的扩展与推进,还能够应用到航天器、大型船舶、战略潜艇等的数字化装配过程中,支持航天、船舶等制造业数字化技术的发展与进步,技术成果的进一步转化和推广将有效带动我国相关基础工业(冶金、化学、机械、电子等)的全面发展。

参考文献

- [1] 郭恩明. 国外飞机柔性装配技术. 航空制造技术, 2005(9):28-32.
- [2] 李原. 大飞机部件数字化柔性装配若干关键技术. 航空制造技术, 2009(14):48-51.
- [3] 范玉青. 飞机数字化装配技术综述. 航空制造技术, 2006(10):44-48.
- [4] 魏志刚, 薛亮. 飞机先进装配技术及其发展. 海军航空工程学院学报, 2009, 24(1): 119-120.
- [5] 曹增强. 应对我国大飞机研制的装配连接技术. 航空制造技术, 2009(2): 88-91.
- [6] 刘善国. 先进飞机装配技术及其发展. 航空制造技术, 2006(10):38-41.

(责编 侧卫 小城)