

关于飞机数字化装配对接技术的研究

Research on Joining for Aircraft Digital Flexible Assembly Technology

中航飞机汉中飞机分公司 王 声 梁泽荣 吴军豪 苏卫华 肖望东

[摘要] 飞机部件对接技术是把构成飞机基本结构的各个部件连接在一起,形成机身、机翼或整个飞机的过程。近年来,随着数控加工技术、激光测量技术、计算机控制技术、机器人技术、计算机网络和应用集成技术的迅猛发展,飞机装配由人工装配转化为半自动化、自动化装配。

关键词: 部件对接 数字化对接 数字化测量 机器人制孔 工艺协调数据集

[ABSTRACT] Aircraft part joining technology is to connect aircraft parts which constitute the basic structure of aircraft together, is the forming process of the fuselage, wing, or the whole aircraft. In recent years, with the rapid development of NC machining technology, laser measurement technology, computer control technology, robot technology, computer network and application integration technology, aircraft assembly is converted from by artificial assembly into semi-automatic, automatic assembly.

Keywords: Part joining Digital joining Digital measurement Robot drilling Process coordinate data set

数字化装配对接技术在国外主要集中体现在飞机的总装脉动式生产线中机身总装对接与翼身对接站位上,通过数字化装配对接技术全面提升飞机的对接效率和对接质量。如:在F-35的生产中应用脉动装配对接线,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787的飞机总装配中也应用了脉动装配对接线(见图1),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的操作安全得到更大的保障^[1]。

我国在飞机数字化装配对接技术上,多年来是接触研究了一些装配新技术的基础性理论。随着国内外技术交流的深入,国外的一些系统、设备生产厂商将数字化的相关技术及配套设备、设施相继引进国内,促进国内的数字化装配对接技术实现了跨越式发展。

结合设备引进与技术理论基础研究,目前国内已有

几家科研院所、高校在数字化装配技术上取得了突破。如在大飞机物理样机研制过程中,北京航空制造工程研究所研制的机翼数字化对接系统、浙江大学研制的机翼与机身数字化对接系统,都进行了实物安装和部分应用验证,这为数字化装配对接技术的发展提供了有力支撑。

本文以实施数字化对接技术的各项具体实例为例,通过对比传统的对接技术,系统地阐述并介绍数字化对接技术中的各项关键技术。

1 数字化对接技术原理

1.1 传统对接技术原理

我国航空制造业的制造技术水平从总体上看,可以说仍然以传统的制造工艺为主,有的甚至还停留在五、六十年代的水平上。装配对接技术主要仍采用模线、样板、各种样件(安装量规、安装模型、对接平板)等,以模拟量传递方式为主导的传统技术,对接时主要采用固定工装型架、以留工艺余量进行手工修配为主的对接方法,此方法存在着装配协调环节多、协调的工艺技术方法复杂、效率低、准确度差等缺点,导致装配效率低、产品质量水平较低,进而严重制约了整个飞机的交付周期。

1.2 数字化对接技术原理

数字化对接技术主要通过数字量(产品数模或工艺协调数据集/数字标工)协调的方式,利用数字化制造的装配孔、工艺接头进行快速的定位连接,或利用数控多轴联动控制技术和数字化测量技术,来实现空间多自由度位姿调整运动,从而实现飞机部件的自动化、柔性化对接技术。国外利用数控多轴联动控制技术和数字化测量技术来实施数字化对接技术实施过程,如图2所示。

2 关于数字化对接技术实施步骤与流程的概述

数字化对接主要按照以下步骤进行:

(1)对接前开展的工艺设计工作。主要包括对接协调方式的选择、定位方法与定位基准的选择、三维A0的编制、对接工装的设计、对接前的工艺仿真验证等方

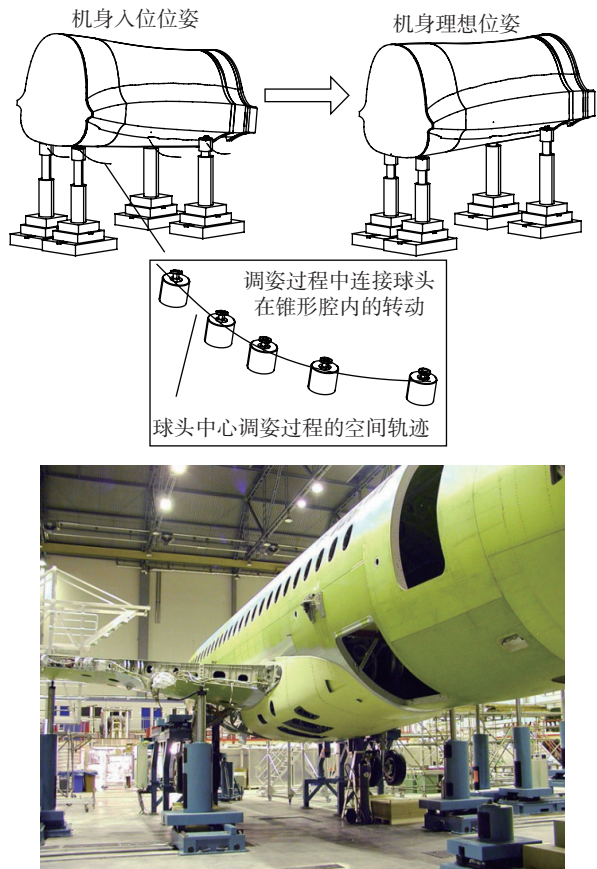


图1 数字化对接技术原理及国外实施展示图

Fig.1 Principle and implementation of digital joining technology

面内容。

(2) 对接的基准部件及对接部件的运输与就位。主要是指采用由全向移动平台、柔性支撑系统和控制系统等部分组成的运输架车能全方面、多坐标、高精度地完成对接工作。

(3) 对接系统的定位调姿与运动轨迹的控制。根据飞机全机对接装配的工艺特点,安装自动对接柔性定位机构及其多轴运动控制系统。利用对接柔性定位机构及其多轴运动控制系统能够实现对部件的有效支撑,并且能够开展对其进行空间6个自由度的位姿空间自

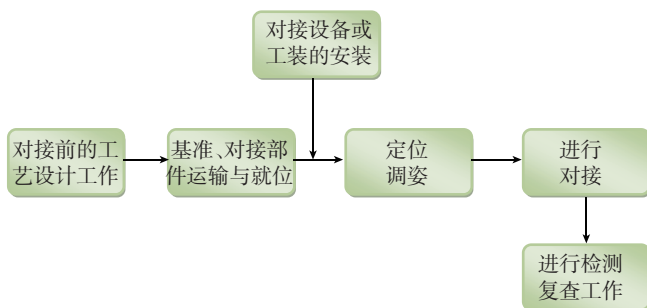


图2 数字化对接技术实施流程简图

Fig.2 Implementation process diagram of digital joining technology

动调整。

(4) 完成正确姿态调整后利用先进的制孔技术或连接方式完成对接工作。

(5) 最后,对对接后的部件进行全方位的检测与复查,确保对接的位置正确与对接质量良好。按照上述步骤将整个数字化对接的实施流程进行归纳后如图3所示^[2]。

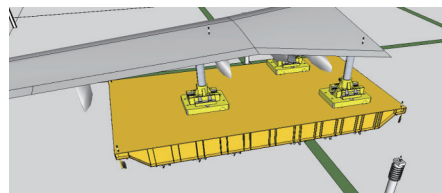


图3 国外利用AVG进行飞机部件仿真

Fig.3 Physical simulation of aircraft part by using AVG

3 按照实施流程开展的主要研究

3.1 对接前的工艺设计工作

3.1.1 对接协调方式的选择

传统的对接协调方式多采用实物标准工艺装备(后简称“标工”)进行模型尺寸的传递与协调,常见的对接实物标工包含对接平板、各类安装量规等物件。但随着MBD技术的普遍推广与应用,以及为便于开展工艺并行工作、打通数字化生产线、节省大量的实物标工制造成本、周期和存放场地等,具有显著优势的数字标工协调方式逐渐被应用到飞机的对接协调中。

3.1.2 对接定位方法及定位基准的选择

传统的对接定位基准主要为水平测量点,也可以使用对接面的接头连接孔及定位导向销进行定位,但大部分均以使用对接定位型架为主。而数字化对接技术主要以设置在部件上的辅助定位接头及定位测量点进行定位与找正。

3.1.3 三维AO及对接工装的设计

在进行三维AO编制时必须重点考虑对接状态是否明确、对接基准部件选择是否合理、对接的顺序安排是否正确、对接的施工通路是否开敞、对接的操纵性是否优良等问题。对接工装的设计要以方便现场施工为准,工装的可靠性要能满足产品的设计要求,吊挂、托架、接头方便、灵活以及便于快速安装与拆卸。

3.1.4 对接前的工艺仿真验证

基于MBD技术的数字化对接技术相比传统的对接手段而言,最突出的表现是可以利用计算机专业软件对对接的装配顺序(验证产品的装配与拆卸过程)、装配干涉检查(验证产品装配中的碰撞、接触、间隙问题)、人机工程(验证人员在工作环境中的负荷、姿态、操作安全等

问题)、飞机产品与制造资源的支配、使用,进行动态的仿真模拟,以便在实际对接之前及时发现对接装配过程中存在的各类问题,进行提前预防^[3]。目前,国内各大主机厂主要采用3D compose与DELMIA软件来进行上述方面的仿真验证工作。

3.2 对接的基准部件及对接部件的运输与就位工作

我国现有的传统飞机装配每个部件均有专用运输车辆,即“专车专用,一车一用”的生产组织模式。对接主要采用人工方式,依靠固定工装和吊线锤、直尺、光学经纬仪等传统的光学和尺规测量,配以手动装配工装,实现飞机对接装配、全机水平测量和成品附件安装校准。而目前飞机主流的对接趋势是由飞机部件全向移动运输架车(AGV)来完成飞机部件的运输和架外作业,它不但是飞机装配的重要工艺装备,更是飞机对接装配的移动运输平台。

全向移动运输架车(ACV)按照导向方式可分为有线与无线2种,有线导向相比较无线导向具有路径的跟踪能力强、行驶稳定性好、运行速度较快、运行实时性好、技术成本低等优点,但对运行环境要求较高。另外,对于对接系统来说,定停精度是影响对接的最关键性因素,定停精度是指AGV在停车时与预定位置的偏差,它由方向偏差和距离偏差2部分组成。在飞机搬运过程中,AGV应能在所要求的工位上与基准部件进行准确对接。国外先进的AGV制作厂家,导线定位定靠精度可以达到 $\pm 2\text{mm}$,激光定位停靠精度可以达到

$\pm 10\text{mm}$ 。

3.3 对接系统的定位调姿与运动轨迹控制

3.3.1 对接系统的定位调姿与运动轨迹控制原理介绍

飞机部件位姿调整与运动轨迹控制是飞机全机数字化自动对接的核心内容,是实现飞机大部件位置姿态平稳、柔性、精确调整的关键技术。图4为随动球铰式的飞机大部件定位驱动策略原理图,用于机翼位姿调整。

3.3.2 对接系统的定位调姿与运动轨迹控制技术

根据飞机全机对接装配的工艺特点,研制了自动对接柔性定位机构及其多轴运动控制系统。自动对接柔性定位机构及驱动控制系统是通过柔性定位器依照一定布局规则,形成柔性定位器阵列,实现对部件的有效支撑,并形成能够对其进行空间6个自由度的位姿空间自动调整的联动结构。

柔性定位器是自动对接柔性定位机构的基本组成部分。在对飞机大部件柔性定位要求充分调研的基础上,完成了包括结构组成、驱动参数计算和伺服电机选型等柔性定位机构基本单元的设计。

针对飞机不同大部件的自身结构和对接定位运动特点,提出了能够可靠支撑飞机大部件的随动式柔性定位机构:3-2-1六自由度随动球铰式柔性定位机构,适用于机翼平面类部件,可实现飞机部件全自由度无冗余的位置姿态调整;3-2-1-1七自由度随动托架式机身柔性定位机构,适用于机身等筒型类部件,通过托架能提供稳定可靠的支持,并实现全自由度无冗余的位置姿态调整。在此基础上,提出基于随动托架式的飞机大部件定位策略、基于随动球铰式的飞机大部件定位策略,算法简单可靠、适应性强。

多轴联动控制系统是保证飞机大部件柔性平稳精确运动的物理核心,从物理上实现柔性定位机构各轴的同步平稳运动。为此,选用可支持多轴同步运动的SIMOTION D435运动控制系统作为底层运动控制平台,在控制过程中引入三向力传感器能够有效防止部件运动过载或可能发生的碰撞,开发了专用运动控制软件,其功能主要包括:基于TCP/IP协议与对接装配轨迹规划软件数据通信的数据通信模块,定位器的运动控制模块;监控、报警与故障处理模块等。

3.4 开展的相关对接工作

数字化对接工作的核心主要集中在数字化、柔性化、自动化制孔的环节。以中航工业汉中飞机分公司某型机机身后段的数字化研制为例:垂尾与尾段对接区缘的定位孔采用五坐标数控制孔,垂尾对接区的超大直径($\phi 52\text{mm}$)对接孔的钻制采取了自动进给钻的方式进行了取制、在机身后段总装时将各分部件进行对接时采取

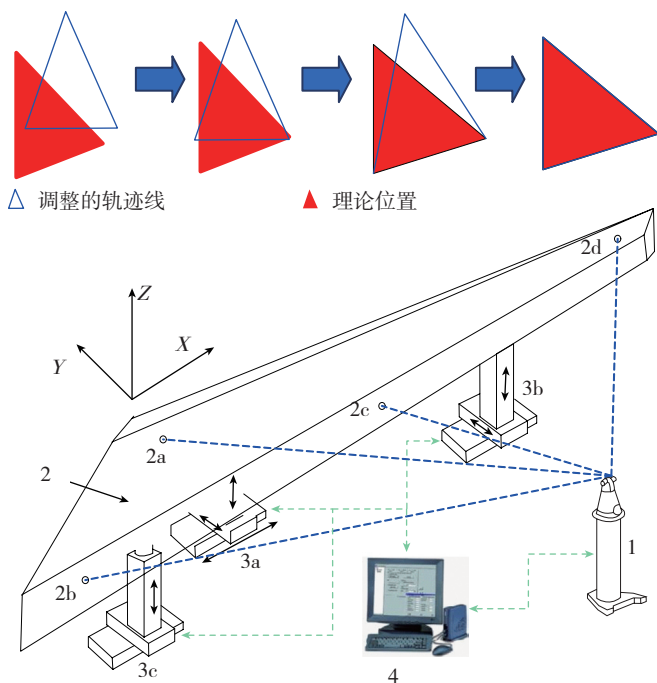


图4 随动球铰式的飞机大部件定位驱动策略原理图

Fig.4 Principle diagram of positioning driven strategy for follow-up knuckle ball aircraft parts

了基于工业机器人的自动制孔系统。而在其他型号的数字化工厂对接研制过程中,如:机身前段与中段的对接过程中,对接区采用了柔性的爬行机器人制孔系统完成了对接工作。

机器人柔性自动制孔具有自动精确定位功能,能灵活运动(包括能在工作范围内的移动、转动),同时具有快速实施对孔检测、自动校正、自动调整、自动选位、自动监测、制孔等功能,制孔精度可达H9。通过机器人柔性自动制技术不但能够满足具有装配定位精度要求的安装定位孔和装配孔,实现一次性完成钻孔、检测,还能实现柔性制造中的高精度位姿调整及一次性制孔,实现了柔性中的自动制孔,解决了对接制孔工作中存在的质量稳定性差、生产效率低、工人劳动强度大等诸多问题。

3.5 开展的对接检测的工作

目前,在飞机总装对接过程中得到应用的大尺寸空间测量设备主要有以下3种:

- (1) 激光跟踪仪;
- (2) 激光雷达;
- (3) 室内GPS测量。

激光跟踪仪是一台以激光干涉仪或绝对测距仪为测距手段、以绕2个轴转动的角度编码器为测角手段的移动式坐标测量机。激光跟踪仪系统可以轻松实现目标的静态坐标测量和动态轨迹跟踪,是一种高精度、高分辨率、大范围、智能化的动态测量仪。利用激光跟踪仪进行部件对接检测的示意图见图5所示。

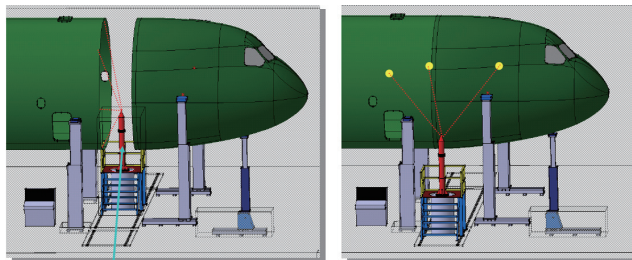


图5 利用激光跟踪仪进行部件对接检测的示意图
Fig.5 Diagram of parts joining test by using laser tracker

iGPS系统和激光雷达在国外的飞机研究机构、制造工厂等广泛应用于高精度数据采集、形貌提取、装配调试、智能化对接等方面,中航工业陕飞目前正在开展此课题的研究工作。

iGPS系统和激光雷达在对接系统应用的原理图如图6所示^[4],其中,在该方案中,iGPS系统作为一个整体的、总的控制数据提供对象存在,在需要进行对接的大部件、姿态调整控制台、自动移动载具等需要实时知道位置信息进而对其进行姿态或是行为控制的器件上放置足够数量的iGPS系统接收器,以确保可以获得该

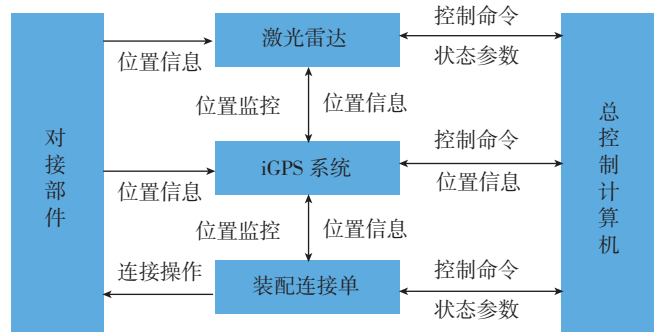


图6 iGPS系统和激光雷达在对接系统应用的技术原理图
Fig.6 Principle diagram of iGPS system and laser radar in joining system

器件的6自由度空间信息,将信息传送给总控计算机处理后,再传送到运动控制部分,进而驱动姿态调整控制台来调整飞机部件的三维姿态,或是调整自动移动载具位置来把激光雷达或是其他仪器送到合适的位置。激光雷达放置在自动移动载具或是固定在支架上,配合iGPS系统进行数据采集来提高整体精度。

4 结束语

相比于传统的模拟量协调对接技术而言,数字化柔性对接技术具有装配协调环节少、装配工装(特别是标准工装)使用量低、工装制造精度高、自动化程度高、装配效率高,研制周期短、研制费用低等诸多优点。

在数字化柔性对接技术的研究过程中体现了许多先进的数字化制造思想,如:数字化装配孔系的直接对接;协调方式由传统的实物标工向数字标工的转变、数字化仿真技术的预防、数字化测量手段精确检测、无型架装配的数字化柔性精准对接等,它的成功研制体现了中航工业陕飞数字化技术发展的新阶段。这些技术既是公司科技发展水平的一个缩影,也是我国不断提高飞机装配的技术水平的体现,它的成功研制能帮助缩小国内数字化制造技术与国际先进制造水平的差距,提高我国制造技术的国际竞争能力以及在国际项目合作中的参与地位,对加强国家经济建设和保卫国家安全具有战略性的意义

参考文献

- [1] 郭恩明. 飞机自动对接与检测技术研究. 航空制造技术, 2005(9): 28-32.
- [2] 《航空制造工程手册》总编委员会主编. 航空制造工程手册·飞机装配. 北京: 航空工业出版社, 1993: 411.
- [3] 张旭. 飞机大部件对接装配过程中的干涉检测技术研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2008.
- [4] 杜昌达, 李丽娟. 飞机自动对接与检测技术研究[D]. 吉林: 长春理工大学, 1982.

(责编 亿霖)