

飞机大部件自动对接装配技术

Automated Joint Assembly Technology for Large Structure of Aircraft

中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司 郭洪杰



郭洪杰

中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司飞机装配专业技术专家,主要研究领域为虚拟装配仿真与无图制造技术、数字化柔性装配技术。拥有国家专利3项,现场可视化装配技术研究成果获得国防科技进步奖二等奖。

世界航空工业发展近百年来,各项技术取得了突飞猛进的发展,尤其在飞机装配与制造领域不断突破新的技术创新。近十余年来,波音777、波音787、A340、A380为代表的大飞机集中反映了飞机先进装配技术的现状和发展趋势,在飞机总装阶段,由于柔性装配技术的发展,传统的固定对接平台/精加工台已逐渐被由数控千斤

顶(或定位器)、跟踪定位系统(激光跟踪仪或iGPS系统)、计算机控制系统等组成的柔性对接平台所取代。使用自动化调姿工装,基于现场总线,构建多轴同步运动控制网络,实现多机械装置的协调运动,准确平稳地实现大部件姿态调整 and 对接。柔性对接平台具有定位精度高、可自动控制和通用性强(能够适应不同尺寸的机身机翼结构)的特点,采用后可大幅提高飞机装配质量、缩短装配周期、节省装配费用。这种柔性对接平台现已在波音、空客飞机装配中广泛应用。国内关于飞机大部件自动对接装配的技术研究也取得了一定进展,其中论述有代表性的有浙江大学的张旭^[1]、中航工业北京航空制造工程研究所的许国康^[2]

和北京航空航天大学的邹冀华^[3]等。

飞机研制不断向大型化、高可靠性的方向发展,飞机部件结构中大量应用钛合金、复合材料等难加工材料和锯齿蒙皮对缝,对飞机各大部件的对接装配提出更高的要求,迫使国内飞机大部件对接技术由模拟量协调、固定专用工装手工调姿装配向数字量协调、柔性化工装自动调姿装配方向发展,研究和应用基于数字量协调的飞机大部件自动对接装配技术势在必行。

和北京航空航天大学的邹冀华^[3]等。

飞机研制不断向大型化、高可靠性的方向发展,飞机部件结构中大量应用钛合金、复合材料等难加工材料和锯齿蒙皮对缝,对飞机各大部件的对接装配提出更高的要求,迫使国内飞机大部件对接技术由模拟量协调、固定专用工装手工调姿装配向数字量协调、柔性化工装自动调姿装配方向发展,研究和应用基于数字量协调的飞机大部件自动对接装配技术势在必行。

数字化技术在飞机大部件对接中的应用

现代飞机大部件自动对接装配

技术涉及面向柔性装配的数字化产品定义、装配工艺规划与仿真优化、数字化柔性定位、自动控制、先进测量与检测和计算机软件等众多先进技术和装备,是机械、电子、控制、计算机等多学科交叉融合的高新技术。

1 面向柔性装配的数字化产品定义

面向柔性装配的数字化产品定义是实现飞机大部件自动对接装配的技术基础,飞机的结构特点和分离面的划分对大部件对接装配的模式产生直接影响,因此,在产品定义时充分考虑装配定位、工装安装、数字化测量及零件加工的方便性,将工艺需求的关键特征提前数字化预定义到产品结构上,统一加工基准、装配基准和测量基准,可大幅度简化工装结构,提高装配精度和装配效率。有些产品结构特点非常不利于飞机部件的支撑固定,为了更顺利地实现飞机部件的对接和支撑定位,在产品定义阶段需要设计专用的工艺接头用于飞机部件的支撑固定和运输,这种面向柔性装配的数字化产品定义在F35飞机装配中得到广泛应用,例如图1中机身的装配和图2中机身运输对接所用固定支撑专用工艺接头,这种设计大幅度简化了工装设计,使定位器拆装操作更方便。

2 装配工艺规划与仿真优化

数字量协调替代传统模拟量协调是实现飞机大部件自动对接的必要条件,研究、定义和建立数字量形式的协调依据(建立数字化标准工装),实质上就是关键特征的数字化传递过程,协调工艺应结合实际装配需求,按设计分离面、对接面、部件进行分层管理关键特征信息。面向大部件对接的测量关键特征包括:基准点集、测量点集、测量标识物等。关键特征的设置应考虑装配各阶段测量的方便性和可达性,受装配应力影响小,能够真实地反映部件的姿态等原则。按以上规则提取关键特征点后,按点位置、所处零部件加工方

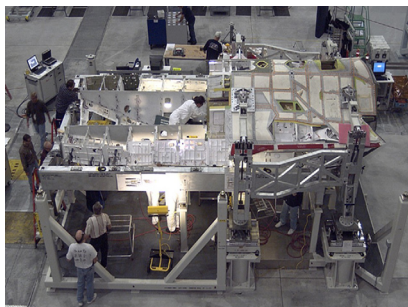


图1 F35中机身支撑固定专用工艺接头



图2 中机身运输对接专用工艺接头

法、精度、刚度以及对飞机姿态的贡献率等信息对关键特征点进行分类、编号,并分配相应的权重系数。

装配仿真是对大部件对接装配工艺规划进行验证和优化的必要手段,分别对装配路径、测量方案和关键特征优先算法进行仿真分析和优化。进行基于数字量协调的大部件对接工艺仿真主要有2个作用。第一个是设计阶段的预装配过程控制,在设计阶段三维装配环境中,调入产品三维数模、资源三维数模,模拟完成零件、组件、成品等数模上架、定位、装夹、装配(连接),下架等工序的路径规划,实现产品装配过程和拆卸过程的三维动态仿真,发现装配过程中的碰撞、干涉等缺陷。第二个是测量系统配置与测量过程规划及仿真,基于现有测量软件(如SA)和自行开发的功能模块,在产品及工艺设计的相同开发平台(CATIA/DELMIA)下实现,主要包括可测量性分析、测量系统配置和测量过程规划等功能模块、测量仪器知识库及支持算法(包括优化配置算法、不确定度算法、容差协调算法等)。

3 数字化柔性定位

大部件对接柔性装配工装的系

统组成主要由机械结构部分、控制系统、测量系统和计算机软件等组成。大部件对接柔性装配工装的主要机械执行机构分为3种形式:柱式结构、塔式结构和塔-柱混联结构。

(1)柱式结构。其外形特征类似Pogo柱,向上支撑和驱动飞机部件。每台定位器可由伺服电机驱动在X、Y、Z3个方向上移动,由3~4台或更多这样的定位器就可以支撑、调整、定位一段飞机大部段。具有定位精度高、工作可靠、可重组、占地面积小和工作空间开敞性好等优点。

(2)塔式结构。其特征是结构形体较大,具有像伸缩臂一样的运动调整部分,从侧面支撑和驱动部件,且承载重量较大。这种定位形式对飞机结构的支撑部位有高强度、易连接等特殊要求。

(3)塔-柱混联结构。波音787总装中采用的是一种混联形式的自动定位机构,定位器不直接与部件相连,采用托架与部件相连,通过驱动托架对机体部件进行位姿调整。其优点是部件调整受力条件更好、调整更灵活、对产品设计更有利、更适合于大型结构和复合材料部件等。

国内,某型号的大部件对接工装,定位器成组置于可移动的小车上,满足大范围移动要求,每个定位器可进行三自由度微调,飞机通过托架与定位器相连,进而实现了飞机的六自由度调姿,但工装结构复杂、体积庞大、开敞性较差。

中航工业沈飞公司与大连四达公司在综合分析国内外大部件自动对接平台结构特点基础上,结合公司在研在制机型具体需求,联合研制了具有自主知识产权的飞机大部件自动对接柔性装配平台,结构如图3所示。沿X向平行放置3组导轨,定位器则置于导轨上方,可大范围移动适应多机型变化要求,而且每个定位器可沿Y、Z方向小范围调整,在闭环控制下实现了飞机的六自由度精确



图3 大部件自动对接柔性装配平台

调姿,不仅满足了实际需求,而且工装结构大为简化,有效地降低了技术风险和控制难度。

4 自动控制

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。主要研究内容包括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、飞机多系统集成控制单元开发技术等。

4.1 误差分析与优化控制

关键特征的数字化传递过程误差是不可避免的,主要包括测量系统误差、定位系统运动误差、零部件变形误差和算法误差等,各因素之间是相互独立的,参照数据处理中的测量不确定度分析方法,对上述误差进行分析与优化控制。

测量系统误差主要来源于5个方面:仪器自身测量误差、测量目标(靶球)安装和定位误差、测量系统转站误差,不同测量系统间转换误差和

环境影响误差。可通过以下方法控制误差:可通过选择高精度测量设备,准确安装定位测量目标,减少转站次数并设置合理的转站点,不同测量系统间设定合理的转换接口和算法,将信息零损失降到最低,提供良好的测量环境(包括减少振动,维持适当温度和湿度,减小空气扰动等)。

减少定位系统运动误差可从优化运动轴电机的动态响应特性,通过光栅尺进行闭环位置控制,消除减速器间隙,优先选用丝杠传动,选用齿轮传动应做好消除措施并采用合理的软件补偿,提高支撑系统和传动部件的刚度。

不同的支撑方式,零部件在重力作用下的变形有较大差异,这导致关键特征在传递过程中产生较大的不确定度,对飞机的装配精度影响最大。为提高装配精度,必须对一些特征量进行补偿,主要的方法有经验法、解析法和数值法,经验法精度最低,解析法受飞机结构影响应用受限,数值法精度高、适用范围广。数值法主要利用有限元、有限差分法等建立数学模型,辅以试验提高模型的合理性,通过计算预确定飞机零部件上各特征量在不同支撑模式下的变形量,并以此为依据进行修正,大大提高对接过程中飞

机姿态的计算精度。

每种算法都有其相应的应用条件,应综合考虑特征量的误差来源、误差性质和误差权重等的影响,选取合理的算法,有效降低算法误差的影响。

4.2 大部件对接姿态解算及集成控制技术

大部件对接以工位范围内的室内GPS测量网为基础,优选最佳位置处发射器基站,通过测量安装在大部件表面已知关键点处的接收器坐标实时解算大部件位置和空间姿态,并结合大部件对接柔性工装控制系统实现大部件对接的闭环动态引导。

大部件位姿解算基于刚体运动学原理,用关键点实测值与目标值作为对应点,计算二者所在刚体的姿态配准关系。大部件对接引导软件根据大部件对接系统框架规划结果,实现系统管理及测量功能,以系统管理模块实现室内GPS系统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测量过程中的坐标三维实时解算、状态实时显示及数据统计数据分析。飞机大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,随之带来了约束问题,通过研究刚体空间姿态方程寻优算法,提高飞机大部件空间姿态解算的精度和效率。

基于工业OPC平台,整合室内GPS测量系统、执行系统和控制系统,统一数据接口和格式,采用TCP/IP协议通信,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,最终保障在系统上进行数据的交换和共享。

5 数字化测量技术

大部件对接系统通常主要由测量系统、控制系统、执行机构和计算机软件4部分组成,测量系统的精度直接影响控制系统的控制精度以及后续的执行机构,直接影响大部件对接的效率及质量,因此测量系统是大部件对接的龙头、关键和核心技术。在传统的飞机制造过程中,大部件对接和装配通常要依靠固定装配型架和工人的技能,人工对接测量效率低、质量一致性差,严重时甚至影响飞机的使用性能。随着测量技术的

许断光、无需转站、一次标定多次使用、动态实时等优点。

应用验证

以某机型大部件对接工艺试验为例进行验证。模拟工艺件尺寸约为 $18\text{m} \times 13\text{m} \times 6\text{m}$,分为3段,总重5t。中机身段以任意姿态上架,采用激光跟踪仪结合iGPS的测量手段,机身段采用6个测量点,具体数据见表1。由表1可知,姿态调整误差最大为0.252mm,完全满足飞机装配的气动外形、间隙和阶差的要求。

目前,应用该柔性自动对接平台已实现多架飞机的大部件自动对接

结构设计和系统集成控制管理进行了深入研究。给出了特征量的提取和管理方法,论述了误差分析法,通过工艺仿真技术,对装配路径、测量系统配置与测量过程进行了合理规划,给出了测量系统搭建原则、测量方案制定和测量设备选取方法等。对国内飞机大部件自动对接装配有一定的参考价值和指导意义。

大部件自动对接装配技术虽然已实现了工程化应用,但数字化柔性装配技术在国外的工程化应用还处于初级阶段,存在类似柔性工装的使用、定检、维护和归属分类(属于工装还是设备)等诸多问题,技术体系还不成熟,

表1 姿态调整数据对比

测点	调整后值			理论值			调整误差		
	X	Y	Z	x	y	z	dx	dy	dz
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

飞速发展和进步,激光跟踪测量技术给飞机大部件的自动化对接提供了强有力的支持,但是由于现场环境等的种种原因,使得对接过程中部件的测量和监测存在困难。为此,沈飞公司根据飞机部组件装配、大部件自动对接和全机水平测量应用需求,开展室内空间定位系统(iGPS)研究,在装配车间应用iGPS系统可建立永久稳定测量基准坐标系,形成多系统异构空间测量场,与数字化工艺装备系统集成,通过现场测量数据采集定量的分析,驱动控制系统对定位进行补偿和闭环控制,来提高飞机装配质量和效率。解决大尺寸室内空间测量和定位问题,为飞机大部件数字化柔性装配测量提供了解决途径。该系统具有可以多用户测量、测量过程允

装配的工程化应用,装配效率较传统方法提高50%以上。尤其重要的是各大部件均在无应力或较小应力状态下实现的自动对接装配,而且,各大部件在对接后的装配准确度量可控。这对提高飞机结构寿命和抗疲劳性能意义深远。

结论与展望

大部件自动对接装配技术已不单单是提高产品质量、生产效率的手段,而是新一代军机制造不可缺少的必备技术,需要从产品定义开始入手,建立数字化柔性装配技术体系,贯通产品、工艺、工装、装配和检测全过程。本文结合某型机大部件对接的工程实际应用,对数字量协调的工艺设计、面向飞机装配的数字化测量技术、柔性工装

需要从大量的工程实践中总结梳理成功的经验,制定相关的技术规范和标准,完善技术体系。本文只针对大部件自动对接装配技术进行了探讨分析,实现了柔性工装、数字化测量检测设备的协同规划与管理,下一步应对建立数字化柔性装配生产线相关技术展开深入研究,实现飞机的整个装配过程的柔性化、自动化。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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
- [3] 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 亦非)