

Application of Digital Assembly Technology and Process Equipment in Large Aircraft Development

中航飞机西安飞机分公司 成书民 张海宝
西北工业大学 康永刚



成书民

现任中航飞机西安飞机分公司工艺研究所所长。近年来,参与了中航工业航空科技发展战略与规划研究、《航空制造工程手册-飞机装配》分册修订、中国商飞大型客机 C919 项目联合论证等工作,参与轰六系列、飞豹系列、新舟系列、新支线、大客等型号研制,先后 3 次荣立中航工业新机研制个人三等功。

大型飞机数字化装配技术与装备的应用实施,突破了数字化装配关键核心技术,以及组件、部件和总装配数字化装配工艺装备的研制技术,提高了大型飞机装配的生产效率和相应组部件的装配质量,同时减轻了工人劳动强度,减少了工艺装备数量。

针对大型飞机结构尺寸大、装配难度大、装配质量要求高的特点,国外在新型号研制过程中已经普遍采用了数字化装配技术,相关技术装备实现了组件、部件和总装配的全面应用^[1]。A380、A400M、B787、A350、F-22 和 F-35 等新型军民机大量地应用柔性装配工装、自动钻铆系统、

数字化测量系统、数字化移动系统、离线编程和仿真软件等进行自动化装配,实现了飞机的高质量、高效率装配,并大幅减少了飞机装配所需的标准工装和生产工装^[2-5]。如波音 737 新一代飞机,标准工艺装备减少 80%, F-35 研制中减少了 95%,法国达索公司 Falcon 的传统工装减到

零;同时大幅提高了产品的装配质量,如B747机翼装配精度由原来的10.16mm提高到0.25mm,提高了近50倍;B777客机的238个项目利用三维数字化设计与虚拟装配工程思想,研制周期从8年缩短到5年,装配周期缩短50%^[6-7]。

我国大型飞机具有高质量稳定性、高可靠性的需求,为了提高飞机装配质量和效率、降低研制成本,飞机数字化装配技术和装备在大型飞机研制中的应用势在必行,同时大型飞机研制周期短、工作量大的特点又为数字化装配技术与装备的应用提供了应用平台。在飞机数字化装配技术体系框架指导下,围绕大型飞机研制特点和需求,针对组件装配、部件装配、总装配的技术特点和工艺需求,开展了数字化装配关键基础技术、关键应用技术的研究和应用,形成了典型的组件、部件、总装配数字化装配工艺装备系统,并在大型飞机研制中开展了创新应用实践。

大型飞机数字化装配工艺需求分析

1 组件装配工艺需求分析

传统的飞机组件基本上都是采用整体刚性型架进行装配,用型架卡板定位零件和控制飞机的外形,采用刚性定位器确定零件的位置,采用标准平板保证对接分离面的协调准确度,采用标准量规保证交点的协调准确度。这种装配技术劳动强度大、生产效率低,所使用的工装、设备通用性差,难以满足小批量、多机种的生产需要。

在壁板装配制孔方面,主要以手工制孔为主,制孔效率低。手工制孔方法不能确保制孔钻头轴线与工件表面垂直以及钻头的准确定位,制孔时容易出现斜孔、偏孔等问题,制孔质量依赖于操作工人的技能水平,制孔精度、质量稳定性差。我国大型飞

机对研制周期、装配质量、连接精度等提出了更高的要求,迫切需要自动化装配连接技术支持。

在壁板装配连接方面,主要采用手动铆枪进行手工连接装配,效率低、劳动强度大。手动铆接时由于施铆力不均匀、受力部位不一致可能出现偏钉、歪钉,甚至导致铆接失败,铆接质量稳定性差。

2 部件装配工艺需求分析

传统的飞机部件装配依靠刚性装配型架来定位,依靠人工制孔来连接。其协调方式以设计图样为基础,通过模线、样板等模拟量进行协调,协调环节较多,路线较长,且多为实物协调,各环节误差积累后,易产生不协调问题,严重情况下会影响到装配的准确度,并且这种误差积累的原因很难透彻分析和清晰描述。

而飞机部件数字化装配则依靠数控定位器定位,依靠数控设备或人工制孔进行连接。协调环节少,协调路径短,且均以数模(数字量)进行协调,所有零件、工装均按照同一数模制造,相应误差积累小,装配准确度高。

3 飞机总装工艺需求分析

传统的飞机总装生产模式针对不同装配件采用了大量复杂的、硬性的、专用的实物标准工装和装配工装,其可变性、可重构性差,无通用性且成本高,主要缺点是:

- (1) 飞机部件,特别是大型飞机大部件笨重,人工推动困难,效率低;
- (2) 对接装配质量不高,手工操作时,对接面上孔销配合精度不高,常造成强行挤压装配,易产生应力,对疲劳强度影响大;
- (3) 对接装配协调采用模拟量传递方式,协调问题较多;
- (4) 工装研制周期长;
- (5) 全机测量工作往往安排在装配工作完成后,不能有效做到全生产过程的质量控制。

因此,迫切需要飞机数字化装配

技术的深入应用。

面向大型飞机研制的数字化装配关键技术

飞机数字化装配技术总体体系结构主要包括飞机数字化装配关键技术和数字化装配工艺装备两大部分^[8]。飞机数字化装配技术体系涉及飞机设计、零部件制造、装配工艺规划、数字化柔性定位、精密制孔连接、自动控制、先进测量与检测和计算机系统集成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。

飞机数字化装配关键技术是整个飞机数字化装配体系的基础,面向大型飞机的研制需求,基于全数字量传递的装配流程,首先开展了面向数字化装配的数字量装配协调与容差分配技术、飞机数字化装配工艺规划与仿真技术等基础理论与方法的研究;针对装配过程中的定位、制孔、连接、测量、控制等环节,开展了数控柔性装配定位技术、自动精密制孔技术、高效长寿命连接技术、大尺寸精密测量技术、多系统集成控制技术的研究。

上述关键技术的突破,保证了飞机数字化装配体系的顺利实施,为大型飞机数字化装配技术的深入应用和装备研发奠定了技术理论基础。通过飞机数字化装配关键基础技术的研究、关键应用技术的研发、技术标准与规范的规划与编制,形成了大型飞机数字化装配关键技术体系,如图1所示。

大型飞机数字化装配工艺装备研发与应用

借鉴国外先进技术经验,面向我国大型飞机结构特点,基于关键基础技术和应用技术的研究工作,通过自主研发,分别构建了典型的组件、部件和总装配数字化装配系统,并在大型飞机研制中实现了成功应用。

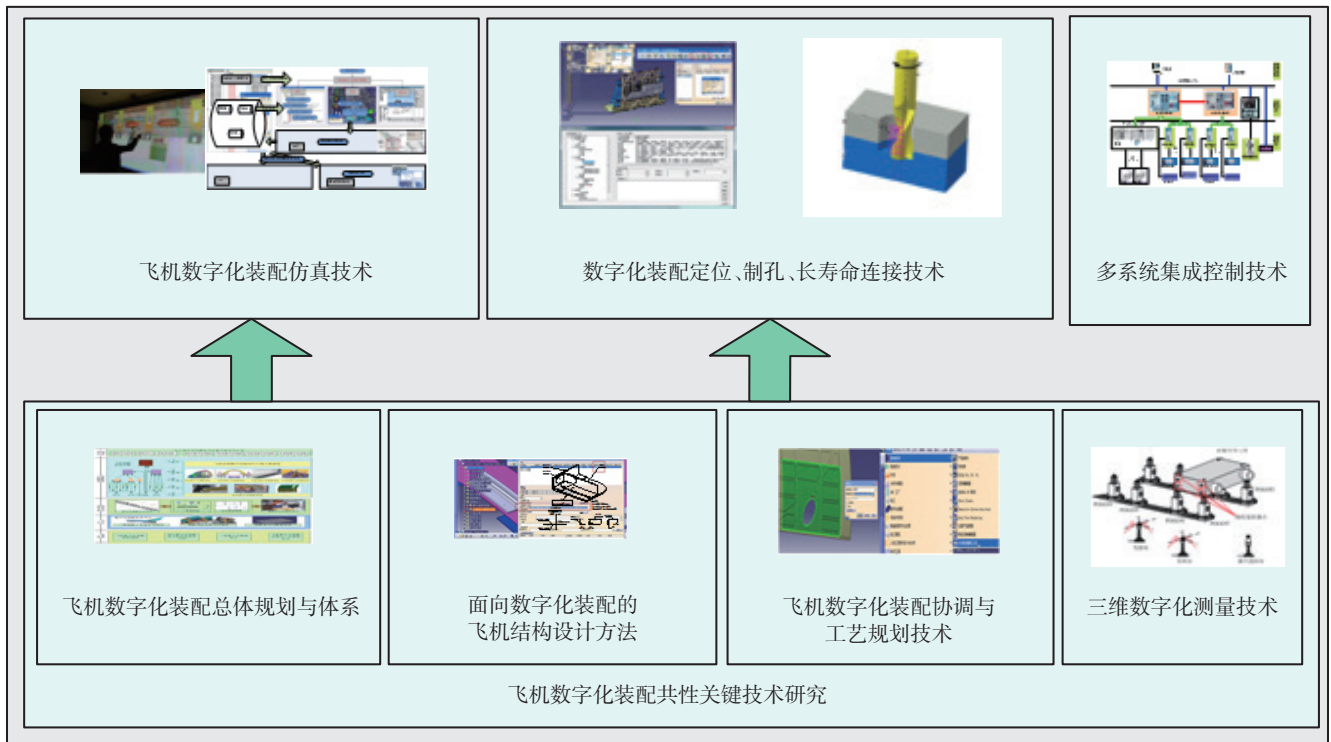


图1 飞机数字化装配共性关键技术

1 中机身壁板组件数字化装配系统的构建与应用

中机身典型壁板组件结构如图2所示。上壁板由3块蒙皮组成,考虑到自动钻铆设备加工能力,可将上壁板按照蒙皮划分为3块小壁板,每块壁板由蒙皮、长桁、剪切片组成。3块小壁板通过预装配、自动钻铆形成固定的壁板后,通过相应的工装拼接在一起,形成大壁板,在拼接过程中,安装相关的框。考虑到3块小壁板具有相似的结构,可将3块小壁板用同一柔性工装进行预装配。

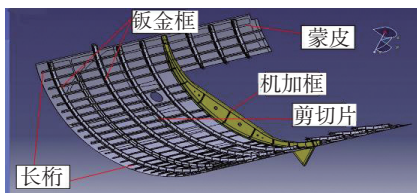


图2 中机身前段上壁板结构

依据中机身壁板装配工艺性分析,采用数字化装配技术,通过关键技术攻关,结合自动钻铆设备自主研发了壁板预装配柔性工装系统、大框

+小框壁板自动钻铆系统、壁板拼接柔性工装系统等完整的壁板组件数字化装配系统,如图3所示,并应用于中机身上壁板装配过程中。该系统实现了壁板组件的流程和数据集成,提高了系统的数字化协调能力,对壁板组件的装配质量和效率提供了有力的保障。

1.1 壁板预装配柔性工装系统构建

在该系统中,大围框作为工装的主体结构,是整个工装的骨架基准,通过地面基座与地面连接,其上布置有按照自动钻铆系统大围框上工装夹持定位的定位器,用于定位小围框。

小围框是产品夹持支撑结构,其上布置有内形卡板,起到框的作用,可用于定位剪切片,还布置有蒙皮拉紧带挂钩、蒙皮边缘定位器和长桁边缘定位器,用于蒙皮和长桁定位。预组合后,小围框可带产品安装在自动钻铆系统大围框上,实现壁板的自动钻铆。

可移动立柱是该柔性工装系统

的核心部分。其上布置有长桁夹持定位器,通过可移动立柱在X方向的移动和长桁定位器在可移动立柱上的Y、Z向的移动,实现了长桁定位器的柔性布置,满足不同壁板的定位要求,从而实现了工装的柔性。而这种运动是通过计算机控制,通过电机实现自动移动,并针对不同的壁板进行定位器的重构,从而实现了数字化和柔性化。壁板预装配柔性工装系统如图3(a)所示。

1.2 壁板拼接柔性工装系统构建

飞机机身壁板自动制孔用于自动钻铆后小壁板的拼接制孔,以保证拼接部位制孔质量。采用机器人+末端执行器的方式。在拼接过程中,壁板框在航向可以用剪切片作为基准进行定位,在翼展方向可采用定位孔的方式定位,小壁板的定位采用壁板边缘(也是蒙皮边缘)挡件和蒙皮拉紧带的方式定位。

机器人本身具有六自由度的运动轴,加上机器人沿航向运行的导轨,共计七自由度运动。在自动制孔

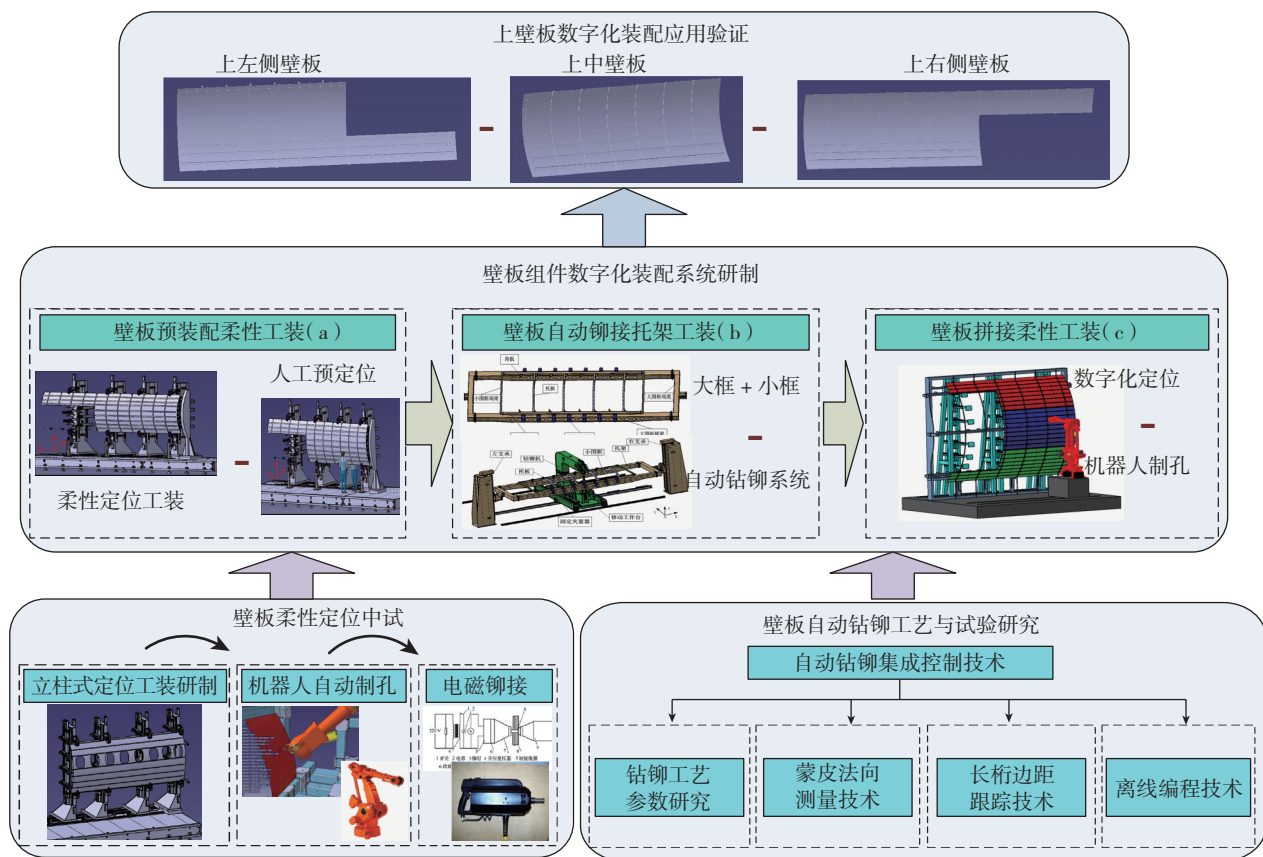


图3 中机身壁板组件数字化装配系统

应用中,依据自动制孔末端执行器的功能需求,基于有限元方法对整个结构的设计进行优化,以结构紧凑和轻量化为目标,以与机器人的标准连接结构和稳定性为约束条件,利用 Isight 和 Abaqus 软件对执行器的材料、各功能部件的尺寸、机械加工方式等进行优化设计,采用激光测距传感器对待装配区域的空间姿态进行实时测量与计算,激光测距传感器安装在自动制孔装置的末端,垂直于加工轴线。

测量过程中,系统在钻点周围选择一系列特征点,用来求解相关定位的位置与方向。中机身壁板拼接柔性工装系统如图 3 (c) 所示。

通过中机身壁板数字化装配系统的构建与应用,突破了壁板装配柔性定位、机器人制孔及制孔末端执行器等关键技术,实现了中机身壁板数字化装配系统的研发及应用。

2 部件数字化装配系统研制与应用

2.1 中机身部件数字化装配系统研制与应用

中机身是大型飞机结构承前启后的关键部件,是飞机部件对接的基础,其协调关系复杂、装配准确度要求高,机身外形公差 $\pm 1.0\text{mm}$,长桁轴线、框轴线位置公差 $\pm 1.0\text{mm}$,其装配精度直接影响机身各段对接以及机翼机身对接质量。

中机身分为前机身上壁板、下壁板、左右侧壁板;中机身上壁板、下壁板、左右侧壁板,以及翼身对接加强框、主起落架安装加强框、纵悬梁、纵梁等组件,这些组件作为中机身部件的装配单元,按照一定的流程和定位方式组合在一起,形成中机身部件,如图 4 所示。

中机身装配需确定各装配单元的装配基准、装配流程、定位方式、连接关系。通过各相关关键环节的应用研究,中机身部件数字化装配系统集成了调姿定位子系统、测量子系

统、自动制孔子系统、集成控制子系统和操作平台子系统 5 部分系统,满足中机身部件各装配单元的调姿定位、姿态评价和自动制孔等功能,实现了数字化装配的应用。中机身数字化装配系统应用如图 5 所示。

中机身部件数字化装配系统的研制与应用,突破了中机身调姿定位、壁板变形恢复、柔性定位方法、自动精密螺旋制孔及精密镗孔等关键技术,实现了中机身部件的精确装配。

2.2 机翼数字化装配系统构建与应用

机翼数字化装配流程:首先,进行中央翼和外翼的吊装定位,然后对外翼姿态进行调整,完成插入对合,自动化加工对接孔并进行螺栓安装,进行外翼姿态检验。机翼数字化对接平台布局如图 6 所示,包括数控定位系统、柔性制孔系统、激光测量系统、集成控制系统。

利用数字化支撑定位设备保证

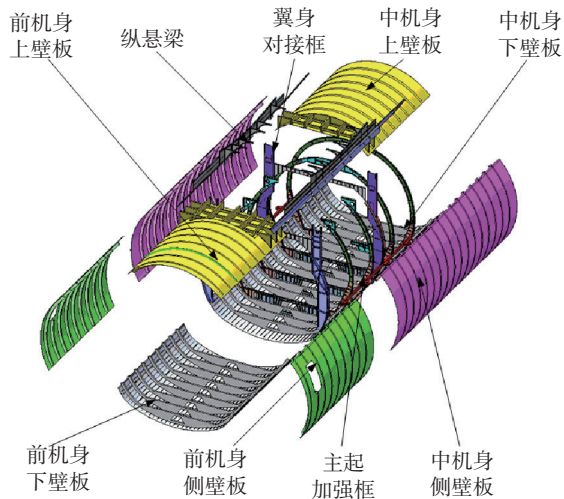


图4 中机身结构示意图

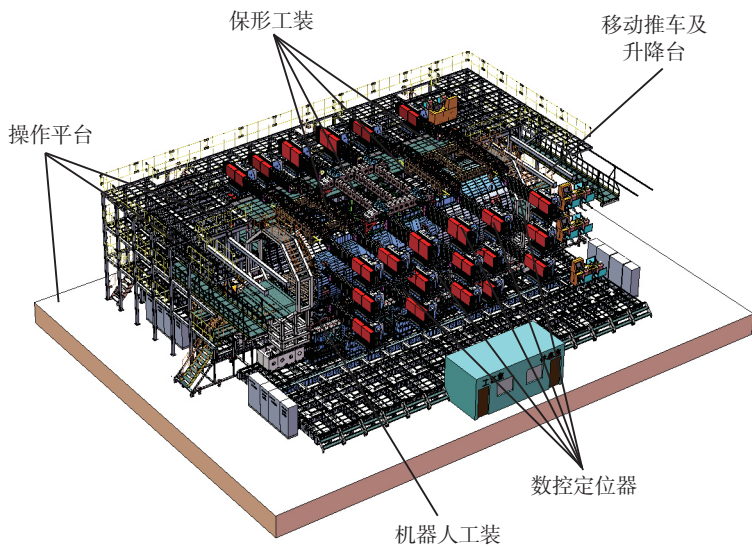


图5 中机身数字化装配系统

外翼与中央翼的安装姿态,通过数据传递来约束支撑设备的运动方向,调整定位姿态实现外翼与中央翼的对接。对接区采用自动化加工设备制孔,采用高干涉紧固件进行连接,满足长寿命连接的需要。在机翼的上下翼面各设置一台柔性加工机床,配有自动钻铆装置,制孔和铆接可一次完成。在每一台设备上增加横向和纵向的导轨,可自由加工上下翼面的连接孔并进行铆接,并在完成一面机翼的对接工作后,可移动到另一面进行加工。通过激光设备记录外翼与中央翼的定位点、外形点、交点等数据,反馈给数控定位系统进行姿态调整,也可以进行机翼对接后的扭曲度

检查。

机翼数字化装配系统构建与应用,突破了机翼部件的精确调姿与入位、大部件数字化水平测量、自动化

精加工、柔性自动钻铆等关键技术,实现了外翼和中央翼的精确对接。

3 总装配数字化平台系统

针对大型飞机装配特点,研制了飞机大部件数字化对接系统,包含各大部件操作台、数控定位器、辅助支撑定位器等核心数字化装配系统,如图7所示。该系统配置了一体化固定工作平台,覆盖人工操作范围,并采用局部电动升降和延伸,使装配工人更加安全舒适。移动工作平台采用气垫输送移位或AGV运输方式,对于较高操作台可采用机电一体化控制升降,不工作时减少操作台占用空间。

数控定位器是调姿、对接系统的终端执行机构,主要由机械本体和电气驱动控制两个部分组成。根据功能、支撑位置和承载的不同,把数控定位器分为机身主数控定位器、机身前辅助支撑定位器、机身后辅助支撑定位器、机翼主数控定位器和机翼辅助支撑定位器。

辅助支撑定位器用于解决飞机的辅助支撑,不参与机身姿态调整,确保飞机大部件对接过程稳定、安全。对接是通过机身主数控定位器支撑和实现机身姿态调整,完成机身调姿,充分考虑机身准确入位的便捷性和安全性要求,与机身上的工艺球头构成球铰连接,提供自动化操作和人工操作模式。

大部件数字化对接平台系统的

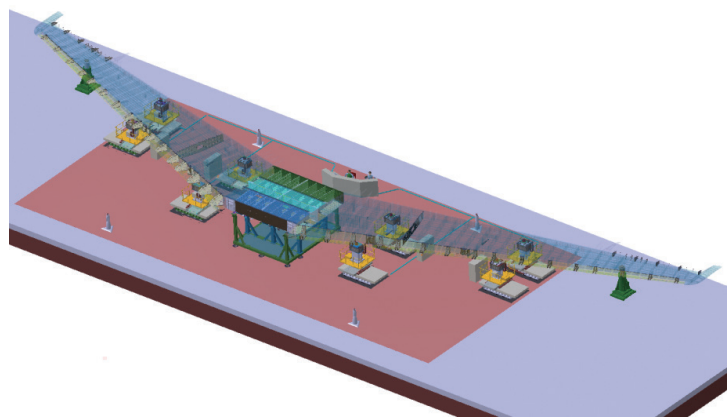


图6 机翼数字化对接平台

表1 典型数字化装配系统在大型飞机研制过程中的应用效果

应用领域	数字化装配系统	解决的核心问题	应用效果
组件	中机身壁板预装配柔性工装系统	同一套工装适应中机身 12 块壁板装配	减少厂房使用面积,提高了装配效率,将大量的中机身壁板装配操作进行了有效集中
	中机身壁板自动钻铆系统	提高连接质量和效率	大框 + 小框的生产模式提高了生产效率,减轻了工人劳动强度;自动钻铆提高了铆接质量和效率
	中机身壁板拼接制孔工装系统	拼接部位的自动制孔;同一套工装适应 3 块不同的超级壁板	提高了制孔效率和质量,减少了厂房使用面积,使得装配站位得到有效集中;装配周期缩短一半;降低人力成本 50%
部件	中机身部件数字化装配系统	解决施工通路和壁板调姿通路被阻挡的问题,提高装配质量	提高了装配、检测效率和装配质量;装配周期缩短一半
	机翼部件数字化装配系统	解决了对接孔与壁板的垂直度和孔径精度低、效率低、劳动强度大等问题	实现了大直径和高厚度孔的自动制孔,实现了机翼部件的快速姿态调整
总装	大部件数字化对接平台	实现与其他部件供应商的交界面准确对接、数字化测量、数字化大部件对接	实现了大部件对接的一体化,减少工艺装备数量

应用,突破了大部件位姿的精确调整、气垫输送/AGV 等关键技术,提高了飞机装配质量和效率。

4 典型应用效果分析

围绕大型飞机平台,在组件、部件、总装配等各个环节开展的数字化装配技术研究和装备研发工作,已经应用于大型飞机的研制生产,提高了研制效率和质量,典型的数字化装配系统及其在大型飞机研制过程中的应用效果如表 1 所示。

结束语

大型飞机数字化装配技术与装备的应用实施,突破了数字化装配关键核心技术,以及组件、部件和总

装配数字化装配工艺装备的研制技术,提高了大型飞机装配的生产效率和相应组部件的装配质量,同时减轻了工人劳动强度,减少了工艺装备数量,并在以下方面形成了创新突破:

(1) 研发了具有自主知识产权的典型壁板组件、机身部件和大部件对接数字化装配系统,形成了我国首条大型飞机部件装配生产线,构建完成了面向大飞机的数字化装配技术体系,引领了多个型号数字化装配技术的研发与应用。

(2) 突破了飞机数字化装配基础理论与多项关键技术,包括面向数字化装配的装配协调与工艺规划理论方法、大型复杂航空结构大数据量数字化装配作业过程仿真技术方法、大型壁板变形恢复和柔性定位方法、复杂航空外形构件一体化自动精密制孔方法、大尺度空间全局测量及装配误差分析与反馈方法。

(3) 实现了我国飞机装配过程中协调方式从模拟量传递转变为数字量传递,

定位方式从传统刚性转变为柔性定位,装配方式从手工、半自动转变为基于数控设备的自动化装配,人员思想由传统保守向先进数字化方向转变,有力地支撑了大型飞机的顺利研制,为我国后续多个型号的数字化装配技术研究与应用起到了示范作用。

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] 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. 计算机集成制造系统, 2007(7):1367-1373.
- [3] 许国康. 大型飞机自动化装配技术. 航空学报, 2008,29(3): 734-740.
- [4] 王亮, 李东升. 飞机数字化装配柔性工装技术体系研究. 航空制造技术, 2012(7):34-39.
- [5] 郭志敏, 蒋君侠, 柯映林. 基于 POGO 柱三点支撑的飞机大部件调姿方法. 航空学报, 2009(7): 1319-1324;
- [6] 王亮, 李东升, 罗红宇. 飞机装配数控柔性多点工装技术及应用. 北京航空航天大学学报, 2010,36(5): 540-544.
- [7] 杜兆才. 蓬勃发展的数字化柔性装配技术. 航空制造技术, 2012(1):100-101.
- [8] 何胜强. 飞机数字化装配技术体系. 航空制造技术. 2010(23): 32-37.

(责编 谷雨)

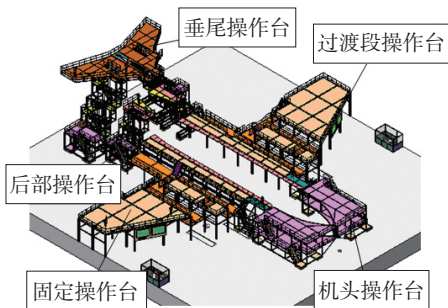


图7 总装配工作平台