



飞机数字化装配技术 发展与展望

Development and Prospect of the Aircraft Digital Assembly Technology

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 梅中义 黄超 范玉青



梅中义

北京航空航天大学机械工程及自动化学院副教授,毕业于北京航空航天大学航空宇航制造工程专业,主要从事飞机数字化装配与测量技术、飞机数字化设计与制造技术等方面的研究与开发工作。

飞机装配技术经历了从人工装配、半自动化装配到如今数字化装配的发展过程,已经形成了一整套数字化装配技术体系。其中,柔性装配以及脉动生产线的应用大大提高了飞机的装配质量和效率,智能装配技术更是未来飞机数字化装配发展的趋势。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.18.032

回顾飞机工业的发展,飞机装配技术经历了从人工装配、半自动化装配到数字化装配的发展历程,随着各国经济与技术的进步,数字化装配技术已经在多个国家的飞机制造领域广泛应用。

飞机数字化装配技术涉及飞机设计、零部件制造、数字化自动钻铆、数字化互换协调、数字化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]。由于飞机装配工作的高复杂性和高精度,柔性装配已经成为飞机数字化

装配技术的重要组成部分,而飞机智能装配技术已经成为飞机装配技术发展的新方向,对飞机智能装配技术的研究将对我国飞机装配水平及航空企业智能制造水平的全面提升起到重要的推动作用。

飞机数字化装配技术发展回顾

在 20 世纪 80 年代,由于现代网络的兴起,加上计算机技术的不断发展,美国波音、洛克希德·马丁公司,还有欧洲的空客公司这些大型飞机公司都陆续地对飞机数字化装配技术进行应用,并已取得成功,典型的

产品包括波音 787、A380 与 JSF 等。其中洛克希德·马丁公司在进行 JSF 战斗机研究制造之中,将每架飞机的生产周期由之前的 15 个月缩短到了 5 个月,把工装数量从 350 个降低到 19 个,实现降低成本 1/2。采用数字化装配技术后,取消了大部分的制孔工具与工装,利用较为先进的龙门钻削系统,充分利用了激光定位、电机驱动的精密切孔,提高了孔的质量,最终节省了九成以上的时间^[2]。而美国波音 787 客机的装配连接中,充分应用复合材料,根据复合材料的力学性能特点,对其连接技术进行改善,根据此应用需求以及钻孔需求,波音公司与其他公司合作研制了专用的自动化钻孔铆接设备与技术,从而提高波音 787 的装配质量与速度,同时也降低了成本。另外,波音 787 还在总装过程中采用了 iGPS 系统,使多用户、大尺度、高精度的测量成为了可能^[3]。此外波音公司还采用了数字化的壁板装配系统,对电磁铆接技术与柔性装配工装进行集成,解决了大型构件自动化装配面临的困难;在波音 737、波音 757、波音 777 移动装配生产线的基础上,波音 787 采用脉动生产线模式,使得整条生产线具有分工明确细致、工作量单一重复和装配线过程流畅等优势,提高飞机生产效率。

进入 21 世纪,飞机制造已经步入数字化时代,工程设计通过 CAD 来定义,工艺设计通过 CAPP 进行数字化仿真,工艺装备设计通过数字化定义和发放,质保通过数字化技术进行测量,零件制造可以实现全方位的数控加工,飞机装配大面积采用数字量传递技术^[1]。

蓬勃发展的飞机数字化装配技术

数字化技术在飞机装配中的应用大大提高了飞机制造质量,减少了工装数量,缩短了生产周期,降低了

生产成本。随着数字化装配技术发展,已经形成了一整套飞机数字化装配技术体系。

1 飞机数字化装配关键基础技术

飞机数字化装配关键基础技术主要包括:

(1) 面向数字化装配的飞机结构设计技术。飞机数字化装配实施成功的关键在于将数字化装配的具体需求融入到飞机结构设计中,即面向数字化装配的飞机结构设计,在结构设计过程中,需要融入与装配相关的关键点^[4]。

(2) 数字化互换协调技术。数字化互换协调方法是一种先进的基于数字化产品定义和标准工装定义的协调互换技术,用于保证生产和工装之间、生产工装与产品之间、产品部件和组件之间的尺寸和形状协调互换。数字化互换协调方法利用数控加工、成形制造出准确的零件外形和所有的定位元素。在工装制造时,通过数字测量系统(如激光跟踪仪、数字照相测量和室内 GPS 等设备)实时监控、测量工装或产品上相关控制点(关键特性)的位置,建立起产品零部件基准坐标系统,并在此坐标系中将工装或产品上关键特征点的测量数据和 3D 模型定义数据直接进行比较,分析出空间测量数值与理论数据的偏差情况,作为检验产品是否合格及进一步调整的依据。

(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、合理地规划装配工艺,分析、仿真,可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。图 1 为波音 787 客机总装对接数字化仿真。

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

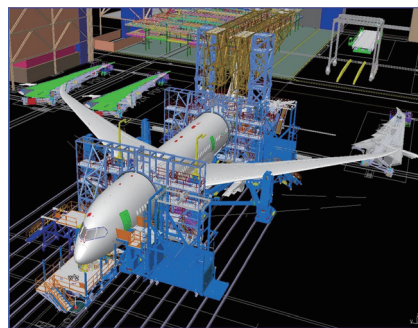


图1 波音787客机总装对接数字化仿真

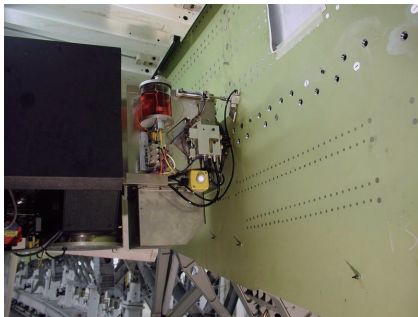
性关键技术,主要针对装配过程中的定位、制孔、连接、测量、控制等环节,构建相应的试验单元,支持数字化装配技术的应用实施^[4],主要包括:

(1) 数字化定位技术。以数字化为基础的定位技术包括数字测量定位技术、特征定位技术、柔性定位技术等。数字测量定位技术是指针对飞机产品的结构特点、定位要求,借助数字化测量设备或系统进行飞机零部件的定位;特征定位技术利用数字化定义、数控加工的具有配合关系的配合面、装配孔或工艺凸台、工艺孔等设计或工艺特征,实现零件之间的相互定位,保证装配的一致性和高装配质量;柔性定位技术是指通过采用柔性工装满足不同产品的定位需要。随着飞机装配质量越来越高的要求,数字化定位技术已经成为飞机零部件高效、高精度定位的重要保障。

(2) 数字化自动制孔技术。随着新工艺的不断涌现和新材料技术的不断发展,传统的装配方式无法满足现代航空制造业对于高精度和高效率的要求,对飞机结构件制孔提出了更高的要求,因此,自动制孔技术应运而生。数字化自动制孔就是按照三维模型编制 CAD/CAM 数控程序,由机床按照数控程序自动完成制孔加工。自动制孔设备的结构形式主要有龙门式柔性导轨制孔、柔性轨道制孔、机器人制孔和爬行机器人制孔等,这些设备已被应用于飞机装配制孔,大大提高了飞机装配制孔效率

和质量。图2所示为自动化制孔设备。

(3) 数字化自动铆接技术。数字化自动铆接技术集电气、液压、气动、自动控制为一体,在装配过程中不仅可以实现组件(或部件)的自动定位,同时还可以一次完成铆接工作。数字化铆接技术近几年来发展迅速,已由原来结构简单、功能单一的带托架自动化铆接机,发展成为装配工装和铆接设备从结构到功能都高度一体的数字化自动铆接系统。自动铆接系统主要包括自动铆接机和数控托架两部分,自动铆接机用于完成一系列的铆接过程,数控托架主要包括数控围框、托板、立柱以及各种附件等,用于工件的定位和夹持。自动铆接机需与相应的托架系统相配套,才能发挥自动铆接技术的优势,较大尺寸及复杂的结构,尤其是大型飞机机身和机翼壁板、双曲度壁板的自动铆接,需要配备全自动托架(CNC)系统以实现工件的自动定位和调平。数字化铆接系统自动化程度的提高,不仅提高了飞机的装配效率,也是保证飞机装配质量的重要手



(a) A380 机翼壁板自动钻孔设备



(b) 环形轨道自动化制孔设备

图2 自动化制孔设备

段。图3(a)为机身蒙皮自动铆接;图3(b)为美国 GEMCOR 公司研制应用于发动机进气罩的自动铆接设备;图3(c)是 GEMCOR 公司全数控式 G2000 型铆接机,整个半圆机身壁板可以放在工作框架中,与下方一个小 C 形结构互相联动,进行托架翻转,这样可从一边铆到另一边;图3(d)为未来爬行机器人自动铆接。

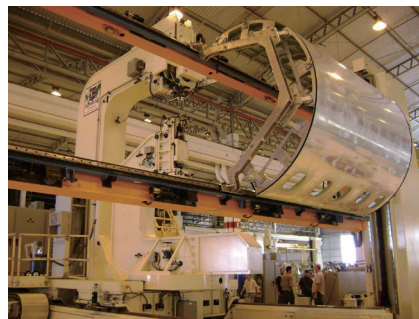
(4) 高效长寿命连接技术。随着飞机耐久性和可靠性要求不断提



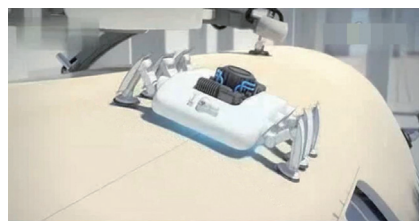
(a) 机身蒙皮自动铆接



(b) 波音 787 发动机进气罩自动铆接



(c) 机身壁板自动铆接



(d) 未来爬行机器人自动铆接

图3 自动铆接设备

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。高性能航空器的机械连接结构必须采用先进的连接技术,如采用干涉配合铆接、电磁铆接、新型紧固件、孔挤压强化等来提高连接结构的抗疲劳性能与可靠性,减轻结构质量。而采用自动化或半自动化的连接设备则能显著提高工作效率及连接质量的稳定性。

(5) 数字化检验测量技术。传统的测量技术已难以满足飞机制造中快速、高效、高精度检测要求,数字化检测技术已成为打通飞机复杂零件与大尺寸零部件设计、制造、装配、检测一体化流程,提升检测效率与水平的关键环节。应采用基于数字化检测设备(三坐标测量机、激光跟踪仪、激光雷达、激光扫描仪、iGPS 等)的产品三维检测与质量控制手段,建立数字化检测技术体系,开发计算机辅助检测规划与测量数据分析系统,制定相应的数字化检测技术规范,以实现提高检测效率与质量的目标。波音公司正在开发三维激光扫描成像技术,可以通过摄像头和激光扫描传感器捕捉工厂和装配中的飞机三维图像,如图4所示,在未来的飞机总装线中,机器人手持该设备扫描飞机和制造环境,然后与设计文档对照,就可以安全地拆卸部件并精确地定位自动化装配设备^[5]。

(6) 多系统集成控制技术。在

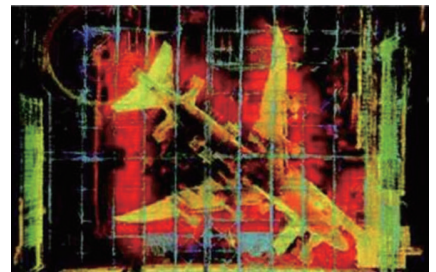


图4 波音747-8总装线三维激光扫描成像

飞机数字化装配过程中,配套软硬件系统众多,数据处理方式丰富,设计、工艺、测量、定位、制孔、连接等数据间存在大量的交互和协调关系。系统集成与控制技术是实现交互与协调的基础,它将数字化装配技术中各支撑单元即所有自动化装配设备、传感器、测量设备通过通信网络集成在一起,共享信息,形成一个协调运作的全闭环控制系统。

柔性装配是飞机数字化装配发展要点

飞机数字化柔性装配技术是建立在计算机数字信息处理平台上,融合飞机的全数字量协调技术,应用计算机信息技术、数字控制技术、数字测量技术、柔性工装技术、多系统集成技术和数字仿真分析技术,采用各种数控装配工具,进行制孔、铆接,完成部件的连接,能适应场地和时间的变化要求,在有限的场地内快速完成装配任务,大大减少装配工装的使用,简化型架^[6]。柔性装配工装作为柔性装配系统的关键部分和硬件主体,“壁板-部件-大部件对接”装配过程的柔性工装结构形式各不相同,下面主要针对飞机装配不同阶段介绍不同形式的柔性工装。

1 多点阵真空吸盘式柔性工装

多点阵真空吸盘式柔性工装是由带真空吸盘的立柱模块单元阵列排布组成的工装结构。立柱单元由伺服电机驱动,可以沿空间3个方向运动到任意位置。通过立柱单元的控制移动和真空吸盘的自适应倾斜调节,可生成与任意产品曲面相符合的均匀分布的吸附点阵。通过真空吸盘的吸附夹持作用,将产品装夹紧固^[7]。图5所示为壁板类零件多点阵真空吸盘式柔性工装。

2 行列式结构柔性装配工装

行列式结构柔性工装适用于飞机壁板类和翼梁的装配。行列式结构柔性工装是由模块化结构单



图5 壁板零件多点阵真空吸盘式柔性工装

元——立柱组成的,以行列式独立排列分布。立柱单元上装有可三维移动调整的夹持单元,通过调节夹持单元的位置来完成不同产品组件、部件的装配。

3 飞机部件柔性装配

3.1 机翼类部件柔性装配

根据不同机翼的大小、构型,机翼类部件柔性装配主要可以分为:(1)翼盒数字化装配。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。(2)前后缘类数字化装配。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。(3)机翼数字化对接。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^[4]。

3.2 机身类部件柔性装配

按照机身的典型结构划分,机身类部件柔性装配主要可以分为:(1)机头柔性装配。机头部件外形曲率变化非常复杂,协调要求高,因此,需要其柔性装配能基于先进测量装置,采用数字化手段保证各零组件特殊的外形以及机头前、中、后部和地板等各单元对合。(2)中机身柔性装配。中机身是飞机部件对接的基准,是主要的承力部件和气密舱段,对寿命、强度、密封要求高,因此,其柔性装配能应用智能调姿、自动钻铆等技术保证在航向与展向的装配精度。(3)后机身柔性装配。后机身外形曲率变化大,与平垂尾间对接精度及气动外形要求高,因此,其柔性装配能应用数字化测量、机器人精密制孔等技术,保证外形、交点等的准确度。

3.3 平、垂尾类部件柔性装配

目前大量复合材料构件在平、垂尾结构中得到应用,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。

4 大部件柔性对接

波音、空客等飞机制造商在总装阶段已大量使用柔性对接,其主要分为3种类型。

(1)柱式结构的自动对接。其工装布局分散、开敞性好,定位器向上支撑,调整和定位飞机部件产品。定位器与飞机部件产品采用工艺支撑连接,由伺服电机驱动实现X、Y、Z 3个方向的运动。由3台以上这样的定位器就可以支撑、调整、定位一段飞机大部件。

(2)塔式结构的自动对接。其结构形体较大,具有像伸缩臂一样的运动调整部分,可从侧面支撑和驱动飞机部件,承载质量较大^[8]。

(3)混联结构的自动对接。波音787总装中采用的是一种混联形式的自动定位机构,如图6所示。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、对产品的设计更有利、更适合于大型结构和复合材料部件。



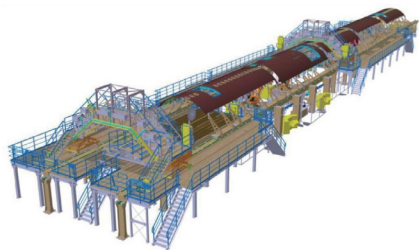
图6 波音787总装

飞机装配新模式——脉动生产线

随着商用飞机的需求量急剧增

长,军用飞机研制任务增多,传统的机库式飞机装配模式已无法适应现代飞机制造要求,国外飞机制造商对飞机装配生产线作了重大研究^[9]。在这种背景下,一种先进的飞机脉动装配生产线应运而生。

脉动生产线采用自动化、数字化的设计思路,最大限度地减少人为因素产生的影响,从而保障产品质量。脉动生产线是连续移动装配生产线的过渡阶段,不同的是脉动装配生产线可以设定缓冲时间,对生产节拍要求不高,当生产某个环节出现问题时,整个生产线可以不移,或留给下个站位去解决;当飞机的装配工作全部完成时,生产线就脉动一次。图7(a)为A350壁板脉动式装配线(Pulse Motion Line, PML),在生产过程中,机身壁板在生产线上是一件接着一件,由一个最小的安全间隙分开,当所有区域的工作指令完成后,就执行一次脉动,同时壁板移动4.5m到下一个工作区。因此,每块壁板的生产进展就可以从它在PML的位置很容易地推断出来。根据A350壁板结构,在每一次脉动中多达7个隔框在一定区域内进行钻铆工作^[10];图7(b)为波音787总装脉动生产线,整条脉



(a) A350 壁板脉动式装配线



(b) 787 总装脉动生产线

图7 脉动生产线

动装配生产线分为5个工作区,一个机位就是一个工作区。0号工作区是预装配区,停放主要的大部件;1号工作区完成前机身,中机身,后机身,左、右机翼和尾段6大部件的对接总装配;2号工作区安装起落架、发动机等,还有地板、绝缘毯、次结构件安装及管路、液压系统的收尾工作;3号工作区主要工作是内装饰、辅助动力设置APU安装及动力装饰的初步试验;4号工作区主要进行各种各样的测试工作。

最近10年航空制造技术,特别是基于MBD模型的数字制造技术有了突破性发展。MBD模型在产品全生命周期的贯彻,简化了制造、测量和检验、数据采集的过程,更有利于智能化和自动化设备的利用^[9]。从汽车生产自动化移植到飞机制造的“集成装配线(Integrated Assembly Line, IAL)”是目前最先进的飞机制造技术。集成装配线IAL实际上就是一种自动化、智能化的脉动装配线,它最大化地使用机器人和自动化设备,为飞机生产提供更加强大的制造和装配能力,实现用手工方法很难达到的严格质量要求,并提供了一个更有效率的装配环境。集成装配线包括自动化装配工装系统、运输系统和制造系统,通过工厂的通信系统对全部设备进行集中和无线控制。2012年,F-35的大部件分包商诺斯罗普·格鲁门和BAE分别宣布了它们的“集成装配线”开始运行,并开始交付在IAL生产的中机身和后机身部件。

脉动装配线是建立在现代先进制造理论和管理思想基础上的,如精益思想和方法、柔性制造理论、大规模定制生产理论、数字制造、自动化和智能制造等。其目的是让飞机运动起来,如同汽车装配线一样高效率、低成本地制造飞机,满足某一阶段市场或战争对某种飞机的集中需求。

智能装配是飞机数字化装配发展方向

目前,以网络化智能制造为代表的第四次工业革命浪潮正席卷全球,以数字化为基础的智能制造模式应运而生。第四次工业革命,即工业4.0,以智能制造为主导,旨在通过充分利用信息通讯技术和网络空间虚拟系统——信息物理融合系统(CPS)相结合的手段,将制造业向智能化转型。航空工业历来都是各国争夺技术领先的战略高地,美国欧盟等都希望借助于正在涌来的新一轮工业革命,使各自的航空产业具有更强的竞争力^[11]。对于飞机装配过程而言,由于其高复杂性和高精度的特点及其高质量和低周期的研制目标,对智能制造技术的需求迫切,因此研究飞机智能装配制造技术必将对飞机装配水平的提升以及航空制造业的创新发展到起到重要的推动作用。

1 飞机智能装配内涵

飞机智能装配就是将飞机装配过程中的零部件、工装夹具、机器设备、物流、人、系统等深度融合,借鉴高度智能化的人体神经系统原理,将智能化装配系统模型构建为与之相对应的物理信息融合系统,逐次建立自动化装配单元、装配生产线、车间、智能检测与监控系统信息获取与集成、信息处理与决策、知识积累与自适应控制等技术,形成飞机智能化装配系统^[12]。

2 飞机智能化装配的关键技术

飞机智能装配关键技术是整个飞机智能化装配的基础,它涵盖了飞机装配的设计、工艺、现场、规范等众多环节。其主要包括:

(1) 面向智能装配的飞机数字化设计技术。将用户对产品的需求和研发人员对产品的构想建立成信息物理融合系统的虚拟产品模型,并考虑产品装配工艺分离面的划分,对产品进行模块化设计。基于模型和

知识开展产品的功能性能仿真分析与优化,保证产品的功能性能满足用户要求,使用户可以全过程参与减少技术风险^[13]。

(2) 虚拟现实仿真优化技术。在现有的仿真技术上增加了从感官和视觉上尽量贴近真实,在人机工效分析基础上对装配全过程进行优化,保证装配全过程顺利实施。其特点是可以按照人们的意愿任意变化,这种人机结合的新一代智能界面,是智能装配的一个显著特征。

(3) 智能装配工装设备的设计制造技术。装配过程的自动化、智能化必须借助定制的专用智能化工艺装备来实现。首先要全面实现装配过程的机械化和自动化,在此基础上,通过嵌入式系统实现系统与设备、设备与设备、设备与人之间的互联互通,为实现智能化装配奠定基础。

(4) 装配过程在线检测与监控技术。建立可覆盖装配全过程的数字化测量设备与监控网络,在现有数字化测量技术上增加传感器、RFID、物联工业网络等用来实时感知、监控、分析、判断装配状态,实现装配过程的实时监测。

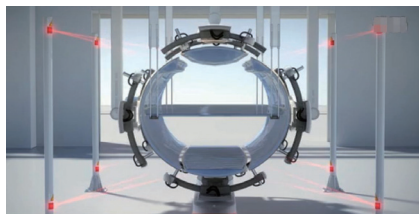
(5) 智能装配制造执行技术。智能装配中的制造执行系统应是集智能设计、智能预测、智能调度、智能诊断和智能决策于一体的智能化应用管理体系。

伴随着数字化、虚拟现实、物联网、人工智能、大数据、云计算、计算机仿真以及网络安全等技术的不断发展,未来的飞机智能装配工厂强调人与自动化的有机融合,在飞机装配中充分发挥人的智能、柔性等特点。在未来的飞机智能装配工厂里,工人穿戴智能产品、手持智能工具,人与机器融为了一体,充分体现了信息物理融合系统概念。空客公司为了在市场份额争夺战中取得更好的成绩,追求先进的制造技术,拟采用自动化流水线的“未来工厂”概念,即数字

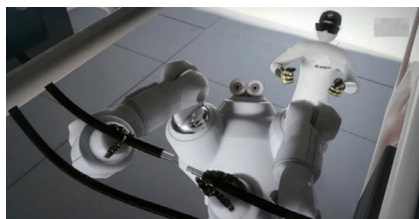
化工厂。空客以 50 年后推出的大飞机为对象,采取诸如基于模块的大数据管理、可穿戴的无线通讯设备、自动导向运输车实施 JIT/JIS 准时准确装配技术、柔性安装设备、超高频 RFID 协同装配定位、室内 GPS 导向装配、爬行机器人钻铆连接、机身自动对接装配,用“增强现实”控制双臂机器人安装,用数字化喷墨式喷漆机进行喷漆直至数字化交付客机等一系列最新的科技成果。图 8 为空客发布的“未来工厂”概念。

结束语

数字化装配技术代表了现代飞



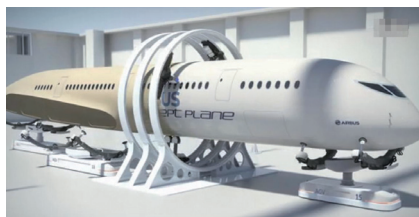
(a) 机身自动装配现场



(b) “增强现实”控制双臂机器人安装



(c) 大部件自动对接现场



(d) 数字化喷墨式喷漆机进行喷漆

图 8 空客的“未来工厂”概念

机制造的发展方向,柔性装配以及脉动生产线的应用大大提高了飞机的装配质量和效率,智能化装配更是适应未来高端武器装备实现多品种、变批量、低成本、高质量、快速研制的必然选择,其研究和应用既是技术的革命,又是观念的革命,更是管理的革命。深入研究并逐步应用数字化装配技术,在提升产品质量和生产效率的同时,更能促进我国航空产品生产的观念性改变及管理体制的变革,攻克我国飞机装配及制造技术中的薄弱环节,实现飞机制造技术水平的重大突破。

参考文献

- [1] 王建华. 从 A380 装配看宽体客机的数字化装配技术. 航空制造技术, 2015(4):44-46.
- [2] 陈雪梅, 刘顺涛. 飞机数字化装配技术发展与应用. 航空制造技术, 2014(1/2):60-65.
- [3] 于勇, 陶剑, 范玉青. 波音 787 飞机装配技术及其装配过程. 航空制造技术, 2009(14): 44-47.
- [4] 何胜强. 飞机数字化装配技术体系. 航空制造技术, 2010(23):32-37.
- [5] 刘亚威. 未来飞机装配工厂的典型场景. 航空制造技术, 2014(21):54-56.
- [6] 梅中文, 朱三山, 杨鹏. 飞机数字化柔性装配中的数字测量技术. 航空制造技术, 2011(17):44-49.
- [7] 王建华, 欧阳佳, 陈文亮. 飞机柔性装配工装关键技术及发展趋势. 航空制造技术, 2013(17):49-52.
- [8] 郭洪杰. 大型飞机柔性装配技术. 航空制造技术, 2010(18):52-54.
- [9] 李金龙, 杜宝瑞, 王碧玲, 等. 脉动装配生产线的应用与发展. 航空制造技术, 2013(17):58-60.
- [10] Hein C, Schneider H. Versatile NC part programs for automated fastening systems in pulsed assembly lines. SAE, 2011:2771.
- [11] 姚雄华, 郑党党, 范林. “两化”融合与飞机数字化性能样机. 航空科学技术, 2015, 26(3):10-13.
- [12] 郭洪杰, 杜宝瑞, 赵建国, 等. 飞机智能化装配关键技术. 航空制造技术, 2014(21):44-46.
- [13] 姚艳彬. 飞机智能装配技术. 航空制造技术, 2014(23):57-59.

(责编 玲犀)