

面向现代飞机装配的长寿命机械连接技术

Long-Life Mechanical Connecting Technology for Modern Aircraft Assembly

南京航空航天大学民用飞机先进装配技术中心 韦红余 陈文亮
上海飞机制造有限公司航空制造技术研究所 蒋红宇 孙小峰



韦红余

博士,南京航空航天大学机电学院航空宇航制造工程系教师,主要从事航空精密钣金成形理论、成形工艺、成形设备及飞机装配理论、装配工艺与装备等方面的研究。参加国家自然科学基金、江苏省自然科学基金、航空基金及镇江市重大科技计划项目等课题多项,在国内外重要学术期刊及学术会议上发表论文 10 余篇。

飞机装配是根据尺寸协调原则,将飞机零组件按照设计进行组合、连接,形成更高一级的装配件或整机的过程。在飞机制造业中,机械连接技术是一项量大、面广的航空制造基础技术。尽管各种新型连接技术(如变

形连接,胶接等)在飞机制造中不断被采用,但机械连接仍是现代飞机制造的主要连接形式,约占飞机结构连接的 70% 以上,且主要采用铆接和螺接形式。

形连接,胶接等)在飞机制造中不断被采用^[1],但机械连接仍是现代飞机制造的主要连接形式,约占飞机结构连接的 70% 以上,且主要采用铆接和螺接形式。

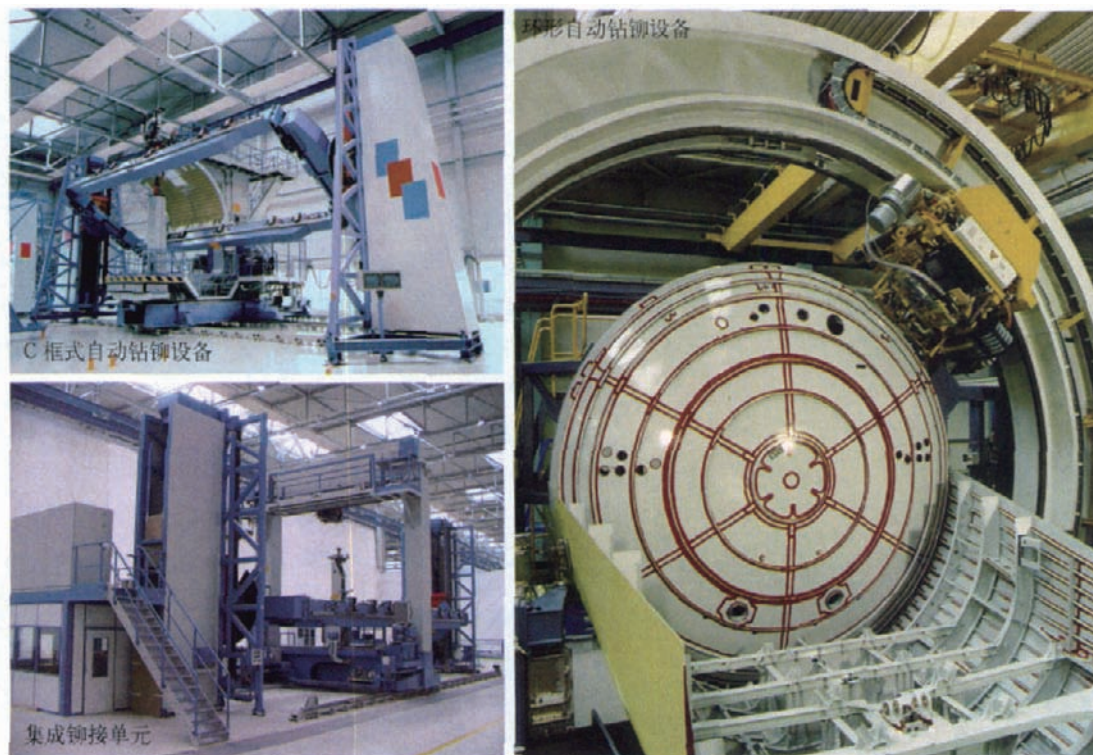
飞机寿命即是从投入使用开始,在经过中修或大修后恢复使用,直到由于造成产品破坏的原因不可能再予以排除,使得产品必须终止使用的这段时间^[2]。据统计,在飞机的全部安全故障总数中,机体损伤的故障数量约占 12% ~ 30%,因此可以认为飞机机体的寿命决定了飞机的总寿命,而其中疲劳破坏是飞机机体损伤的基本原因。据统计,多达 75% ~ 80% 的疲劳破坏发生在机体连接部位,因此研究长寿命连接技术在现代飞机制造中的应用变得更加重要。

当代飞机制造技术的发展,对飞机结构疲劳寿命、密封、防腐的要求越来越高,为了满足现代飞机对各种

性能严格要求,航空制造领域发展了各种先进连接技术,如自动钻铆技术、电磁铆接技术、机器人钻铆技术、干涉连接技术、难加工材料连接技术等。

自动铆接技术

自 20 世纪 50 年代始,美国、德国等国家就发展了一系列飞机装配生产线上应用的自动钻铆机(如图 1 所示)^[3]。国内外几十年的应用证明,采用自动钻铆设备,装配效率可比传统的手工铆接提高 7 倍以上,并能节约安装成本、改善劳动条件、保证装配质量、减少人为造成的缺陷。现在世界各航空工业发达国家都已广泛采用这项技术,如波音 767 机身的机铆率为 97%^[4]。随着国内的国际转包项目及自身发展的需要,国内多家航空企业先后从国外引进了多台自动钻铆设备^[5]。国内在自动钻铆技

图1 自动钻铆机系统^[7]

术方面的研究开发起步较晚,目前,仅有成飞、西飞、沈飞、北京航空制造工程研究所等几家航空单位拥有开发、应用该技术的实力。

自动钻铆系统由钻铆机、托架系统、各种附件和相应的软件组成,能够完成飞机组合件的紧固件孔的坐标定位、钻孔(镗窝)、涂密封胶、测量工件夹层厚度、自动选铆钉、铆接和铣切钉头等工序。自动钻铆系统主要包括自动钻铆机和数控托架2部分,自动钻铆机用于完成一系列的钻铆过程;数控托架主要包括托架围框、托板、立柱以及相关附件,用于飞机部件的定位和夹持。关键技术主要包括:自动钻铆工艺与装备技术、托架变形分析与误差补偿技术、自动钻铆数字化工艺仿真技术等^[6]。近年来,国际上自动钻铆技术呈如下趋势:(1)由传统的液压驱动型向电磁力(脉冲磁场力)驱动和全电驱动(采用电伺服滚珠丝杠技术)的方向发展;(2)由自动钻铆机/托架系统的配置向由数控自动钻铆机/钻铆单元、柔性装配工装、数字化定位和检

测系统、机器人系统、自动物料传送系统等集成的柔性化装配系统发展。

电磁铆接技术

电磁铆接是在电磁成形工艺基础上发展起来的一种新型铆接工艺,它利用电能-磁场能-机械能的转化,应用冲击大电流技术获得瞬间冲击载荷作用于铆钉,铆钉在应力波作用下发生塑性变形,实现铆接工艺。电磁铆接与电磁成形原理基本相同,只是在放电线圈与被连接件之间增加了一个线圈和应力波放大器,其原理如图2所示。

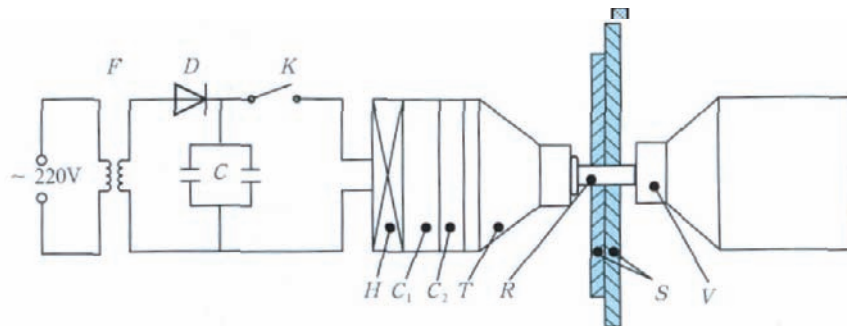


图2 电磁铆接原理

F—升压变压器;D—整流器;C—电容器;K—开关;H—缓冲器;C₁—铆枪线圈;C₂—一次级线圈;T—应力波调节器;R—铆钉;S—被连接件;V—顶铁

与传统的铆接工艺相比,电磁铆接属于冲击加载。其加载速率大、被连接材料应变率大,变形方式不同于压铆等静态加载,能够一次完成铆头的成形,可用于屈强比高、应变敏感、难成形材料铆钉的铆接,如TB2-1、A286等^[8-9]。电磁铆接可以实现大直径铆钉的铆接,是实现干涉配合铆接、复合材料干涉配合铆接的理想工艺方法之一^[10-11];

另外电磁铆接后坐力小^[12]、铆接工艺质量稳定,且电磁铆接可以减小铆接噪声、改善劳动条件。电磁铆接可以解决飞机制造中普通锤铆无法铆接大直径铆钉和钛合金等难成形材料连接问题。另外,采用电磁铆接技术可以有效解决当前大飞机结构的长寿命连接问题。

电磁铆接技术已经在波音、空客系列飞机制造中得到应用,Electroimpact公司为英宇航公司提供E4000自动电磁铆接系统,用于A340~A360的制造;为波音公司的军用运输机部分(即麦道公

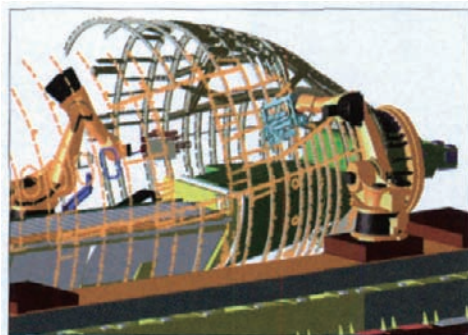
司)制造 E5000 自动化翼梁装配系统,用于 C17 的翼梁装配^[13]。最新研制的 A380 飞机也采用了电磁铆接技术^[14]。俄罗斯伏尔加航空科学技术中心研究开发的 YMK-6AM、YMK-8AM 磁脉冲铆接设备已经用于伊尔-86 飞机的生产,研制的 YMKCH-3 装置已用于发动机燃烧室筒体 Cr-Ni 钢等铆钉的铆接^[15]。当前,对于电磁铆接这项新技术的研究主要集中于电磁铆接设备和铆接工艺 2 方面,而对铆接过程中的铆钉

的能力。采用机器人技术,可以改善工作环境、减轻劳动强度、提高劳动效率。相对于汽车工业而言,机器人在飞机制造工业中的应用起步较晚。这是由于飞机的结构尺寸大、形状复杂,特别是相对于汽车等工业其产量小等因素使得利用机器人技术从事飞机制造成本高。随着现代飞机制造业的发展,飞机工业发达国家都已纷纷将机器人技术应用于飞机制造中(如图 3 所示)。A380 机翼壁板组装系统、A340-600 机翼壁板组装、

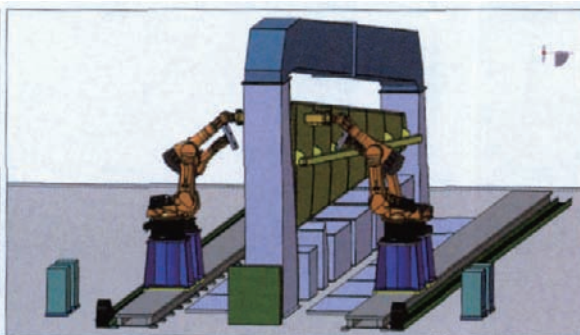
人自动钻铆系统。

机器人系统通常配合多功能钻铆末端执行器及位姿标定系统构成机器人柔性钻铆系统,如图 4 所示,其典型的结构为工业机械臂+钻铆末端执行器+检测及标定系统。工业机械臂是机器人钻铆系统承载的主体部分,完成末端执行器的精确定位与定姿,然后由末端执行器完成钻铆作业,检测及标定系统对作业过程及定位精度进行实时测量,并反馈给中央控制器系统。整个系统都由中央控制器控制。

准确的定位技术是影响机器人技术在航空钻铆过程中应用的关键。由于机器人本身的移动定位精度较低,通常辅以精确的图像处理技术(即视觉识别技术)进行精确定位。机器人视觉识别系统的关键是



(a) 机器人在波音-787 41 段装配中的应用



(b) 机器人在波音-787 机翼壁板装配中的应用

图3 机器人在飞机制造中的应用^[19]

变形机理研究相对较少。在电磁铆接设备方面,余公藩 1981 年开始进行电磁铆接技术的研究,并研制了电磁铆接设备^[16]。进入“九五”后,曹增强等人对电磁铆接技术进行了较为系统的研究^[17],并对低电压电磁铆接技术进行了初步研究^[18]。电磁铆接工艺方面,主要是各种工艺参数的优化设计。各种工艺参数主要包括成型线圈、驱动片、应力波放大器、铆模和铆钉的最佳尺寸等。同时还需要对设备中的系统电阻和电感进行优化选择。

机器人钻铆技术

作为一种集机械电子、控制、计算机、传感器、人工智能等多学科先进技术于一体的高技术产品,智能工业机器人已综合了人和机器人的特长,既有人对环境状态的快速反应和分析判断力,又有长时间持续工作、高精高速、高可靠性、不惧恶劣环境

A320 系列机翼壁板组装、波音 787 机身框架的钻铆和副翼/襟翼的组装单元、波音 747 地板网格组装系统、波音 737 系列大梁组装系统都已应用了机器人自动钻孔系统或机器

实现对目标确实时的提取,而目标提取的实质是图像分割。在基于视觉识别与定位的机器人钻铆系统中,主动目标的位置是通过 CCD 处理摄像机获取图像得到的,因此图像

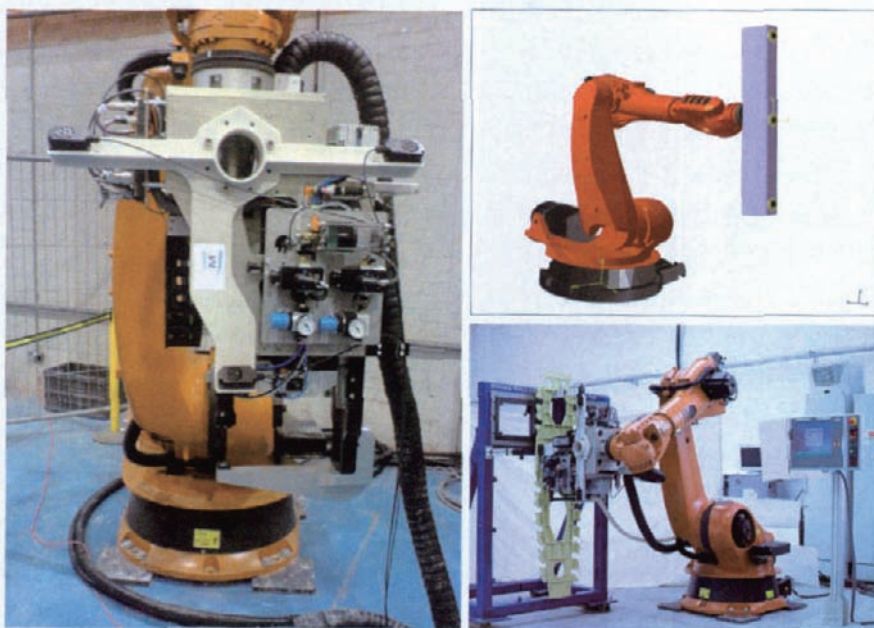


图4 典型机器人钻铆系统结构及应用^[19]

处理是目标识别与定位的基础,其过程一般包括图像预处理、图像分割和图像识别等步骤,原理如图5所示。通过采用先进的视觉识别系统,在

要大型装配件的手工装配带来的问题是:随着飞机结构件加大,其价值也增加,手工生产的问题会导致昂贵的维修、零件报废和生产计划推迟。

大量采用手工方式,其制造模式仍为手工作业为主、自动化半自动化装配作业为辅。这种传统的飞机制造模式,无论从作业质量、作业精度上,还是作业效率上都无法满足现代飞机制造的要求。为保证将来国内现代飞机,特别是大型民用飞机制造的高质量、高精度、长寿命、高效率的连接要求,根据国内飞机制造上的先进长寿命连接技术发展现状,参照国外军、民机先进长寿命连接技术的总体应用状况,提出以下建议:

(1) 积极拓展先进长寿命连接技术的工艺研究,特别是面向新材料的连接制造工艺,如复合材料的连接等;

(2) 大力开展面向先进长寿命连接的工艺装备研究,研制适合现代飞机,特别是适合于民用大型飞机的高质量、高精密、高效连接装备,如全数字化控制的自动钻铆机、机器人铆接平台、柔性铆接平台等;

(3) 积极开展与先进长寿命连接工艺装备相配套的柔性工装研究,工装技术是工艺装备合理高效应用关键技术,没有良好的工装设备配合工作(如与自动钻铆配合工作的数控托架技术),工艺装备甚至无法作业;

(4) 大力开展在线检测技术研究,飞机装配过程中大量采用机械连接,每个连接位置的质量都将直接影响整个飞机的装配质量,每个连接位置质量检测与控制的好坏,也就成为控制飞机总体装配质量的关键;

(5) 大力发展数字化技术,数字化是实现现代飞机制造的关键和前提,先进长寿命连接技术的应用必然需要使用数字化技术对工艺装备、工装设备进行控制,以及对产品进行检测、质量分析等,并且也需要使用数字化技术进行管理。

本文有参考文献20篇,因篇幅所限未能一一列出,读者如有需要请向本刊编辑部索取。(责编 小颖)

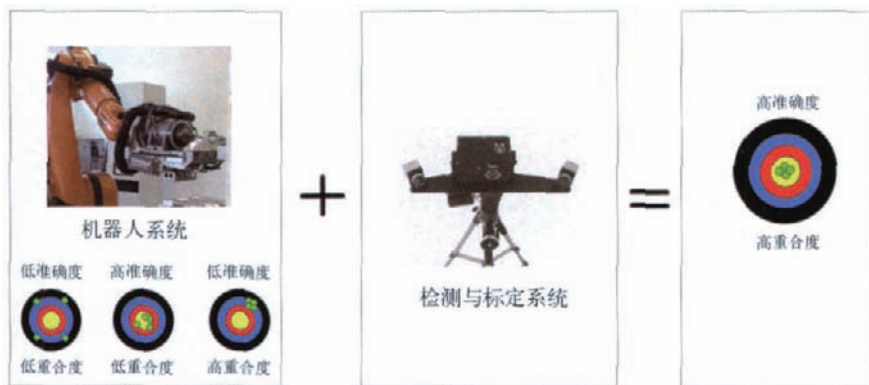


图5 定位及重复定位原理

500mm的直线范围内可以实现定位精度 $\pm 0.1\text{mm}$ 和重复定位精度 $\pm 0.1\text{mm}$ 。

便捷式柔性制孔技术

常规自动化设备的刚性结构提供了加工和装配精密零件的能力。在飞机装配中,用户通常根据飞机结构件装配特点来定制设备。这种定制刚性结构设备通常很重且结构尺寸大,并按定位精度进行驱动,而精度通常受到工程设计允差、零件制造偏差和设备工作范围等多种因素影响,大尺寸、高刚度、高精度设备必然非常昂贵。实际工程应用中,自动化装配随着零件尺寸的增大而大大受限,有时限于成本的制约而无法使用常规的自动化设备来装配大零件,最后不得不手动连接大型装配件。主

基于柔性导轨的便捷式自动化设备为替代常规自动化装备提供了一种可能。

便捷式柔性制孔技术是一种基于柔性轨道的制孔技术,其典型结构通常由柔性轨道+制孔末端执行器+检测及标定系统组成。它可以代替通常采用四轴、五轴甚至更多轴传统自动化设备的一种低成本选择。将2条柔性导轨真空吸附在飞机结构件上,导轨上装有小车,内有二轴驱动的钻孔主轴。导轨设计成在一个平面上为精确刚性结构;在另一个平面上为柔性结构的模式(如图6所示)。

先进长寿命机械连接技术发展建议

当前,国内飞机装配连接作业仍

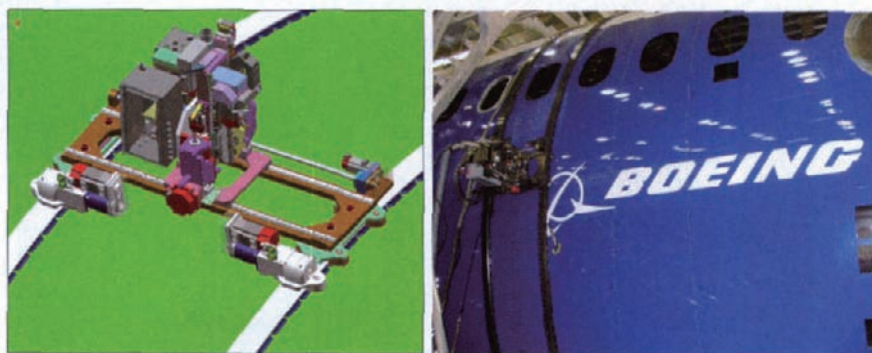


图6 柔性轨制孔平台原理及应用^[20]