

# 复合材料壁板单面紧固件机器人自动钻铆技术\*

肖庆东<sup>1,2</sup>, 甘露<sup>1,2</sup>, 尚江坤<sup>1,2</sup>, 梁雪梅<sup>1,2</sup>

(1. 中国航空制造技术研究院数字化与柔性装配研究室, 北京 100024;

2. 数字化制造技术航空科技重点实验室, 北京 100024)

[摘要] 随着复合材料在飞机机体结构上的广泛应用,其装配过程大量选用单面紧固件,列举复合材料壁板及单面紧固件装配过程存在的问题,分析机器人钻铆技术在航空制造领域的应用现状,阐述复合材料壁板机器人自动钻铆技术的难点,并开展关键技术研究,设计开发机器人自动钻铆系统。系统具备复合材料壁板自动定位压紧、测量、制孔、送钉及紧固件安装等功能,可大幅提升复合材料结构件装配质量和效率。

关键词: 自动钻铆; 机器人; 复合材料; 单面紧固件; 壁板

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.15.042



肖庆东

高级工程师,主要从事飞机数字化柔性装配技术研究及航空专用装备研制工作,重点开展柔性装配技术、机器人自动钻铆技术、智能化生产线等技术研究。曾获航空工业集团科技进步奖3项、立功2次。

复合材料具有高比强度、比刚度、优异的可设计性和抗疲劳性等综合性能,新一代军民机的轻量化需求,带来了复合材料的广泛应用<sup>[1-2]</sup>。其应用已经从次承力构件扩展到主承力构件,机体复合材料的比重甚至可以用来反映一个国家飞机制造业的水平。例如F-22飞机的复合材料用量超过了30%,波音787飞机的复合材料用量超过了50%,直升机和小型飞机复合材料用量甚至达到70%~80%,甚至出现全复合材料飞机<sup>[3-5]</sup>。

飞机机体连接装配孔的数量巨大,据统计,一架F-16战斗机大约有24万个装配孔,一架波音747客机有300万个装配孔。而飞机机体结构的疲劳损伤与破坏大多发生在机体连接部位,因此机体连接质量对飞机结构疲劳寿命至关重要<sup>[6-7]</sup>。

复合材料壁板与金属框梁连接

装配过程中,复合材料结构制孔易出现分层和偏心,需高速切削,而金属结构制孔工艺与复合材料结构有较大不同,需根据材料区别设置不同的制孔参数。现有手工制孔的条件下,制孔质量主要取决于操作工人的技能,无法设置不同的工艺参数,制孔精度较低,可靠性差,易造成复合材料分层<sup>[8]</sup>。另外,复合材料壁板结构的装配连接多为单面紧固件,例如单面拉拔抽钉,易出现手工安装一致性差、镦头尺寸不合格、单面间隙及芯杆突出或凹陷值超差等问题,排故时需要将抽钉分解重铆,甚至换更大一号的抽钉铆接,否则影响飞机的连接性能。同时壁板装配的单面紧固件数量巨大,如某型直升机中机身前构件共有连接件7715个,其中单面紧固件数量为4151个,手工制孔铆接的劳动强度大、效率低。

单面紧固件铆接的特点是拉断

\*基金项目: 国防基础科研项目(JCKY2018205A001)。

面平整,铆接后不需要铣平,紧固件和装配孔之间可形成干涉配合。其铆接安装过程如图 1 所示,具体步骤为:(1)将紧固件芯杆端部、钉套插入到壁板连接孔内;(2)然后拉拔紧固件的芯杆,将芯杆端部拉入钉套,消除夹层间隙,将壁板夹层压实;(3)芯杆的端部继续把夹层内的钉套胀大,并挤压钉孔,产生干涉配合;(4)继续拉拔,将锁圈压入芯杆的空腔;(5)芯杆被拉断,完成紧固件的铆接安装。

本文针对复合材料壁板单面紧固件铆接安装过程中存在的问题,开展单面紧固件机器人钻铆技术研究,开发机器人自动钻铆系统,实现复合材料壁板结构的自动测量、定位压紧、制孔、送钉及单面紧固件铆接,提高飞机壁板装配的质量和效率。

### 机器人钻铆技术应用现状

机器人钻铆技术在国外航空制造领域(尤其是大型固定翼飞机的装配)应用广泛,发展比较成熟<sup>[9-10]</sup>。意大利 BC 公司为波音和空客公司提供了自动化装配生产线,分别用于波音 787 和 A380 机身部段的装配。针对波音 787 梦想客机的中机身 44 段和 46 段配置了 4 条基于机

器人钻铆的装配生产线,机器人钻铆系统包括外部和内部两套,二者配合工作,实现复合材料机身壁板的自动制孔和环槽钉的安装。外部机器人系统负责完成自动测量、压紧、法向调整、制孔镗窝、吸屑、涂胶及插钉等工作,内部机器人系统负责完成自动压紧、吸屑、环圈安装、挤压成型、拉断钉杆、收集废杆等工作,如图 2 所示。

随着技术发展,国外直升机自动化、数字化装配技术也日渐成熟,已经形成成套工艺和装备,广泛应用于空客、贝尔和西科斯基等著名飞机公司的直升机机体部件及分系统的装配过程。图 3 为空直公司某型直升机机身总装机器人自动化装配系统,该系统通过自动化定位工装对机身结构进行夹持定位,采用数字化测量、机器人精确定位、自动制孔与单面紧固件安装等技术,实现了新型直升机机体结构的自动化装配,装配时间不超过 28h,大大提高了机身结构的装配质量和效率,满足了直升机结构高性能要求。

近年来国内相关研究院所全面展开自动钻铆技术方面的研究,取得了一定的技术突破。几大主机厂在

民机转包及国产民用飞机的生产及研制过程中引进了国外的自动钻铆机,包括 GEMCOR、BROETJE 和 EI 公司的钻铆机,在军机的研制过程中采用了国内研制的自动制孔装配系统,包括翼面类、机身类壁板的五坐标制孔系统和机器人制孔系统等。但针对复合材料壁板单面紧固件自动钻铆技术的研究刚刚起步,系统关键技术待突破。

### 单面紧固件机器人钻铆系统

机器人自动钻铆系统主要由设备系统、控制系统、软件系统及测量系统组成,其中设备系统包括:移动 AGV、机器人本体、末端执行器、送料系统及其他附件。机器人本体、送料系统及其他附件集成在移动 AGV



图2 波音787机身段自动钻铆系统  
Fig.2 Automatic riveting system of Boeing 787 fuselage section

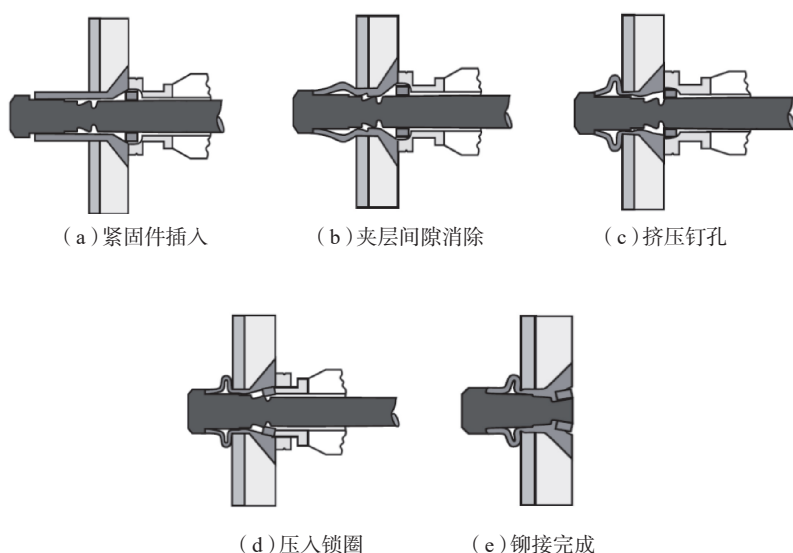


图1 单面紧固件铆接安装过程  
Fig.1 Riveting process of blind fastener

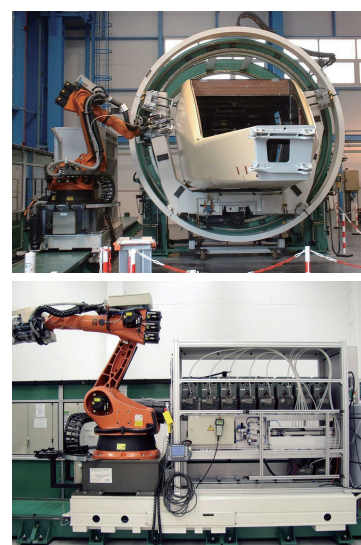


图3 某型直升机自动化装配系统  
Fig.3 Automatic assembly system for a helicopter

上,末端执行器安装在机器人本体上。本系统机器人本体采用 KUKA 公司的 KR240R2900 机器人,工作半径不小于 2896mm,负载不小于 240kg,重复定位精度  $\pm 0.06\text{mm}$ 。系统在 AGV 的驱动下进行站位间的移动,可实现多站位复合材料壁板组件的自动制孔和单面紧固件安装,如图 4.5 所示。

机器人自动钻铆系统的主要工作流程为:

(1) 站位 1 的复合材料壁板结构件完成装配预连接定位,在 AGV 的驱动下机器人钻铆系统移动到站位 1,并进行上电初始化。

(2) 钻铆系统末端执行器的照相单元对站位 1 进行基准点信息采集,测量系统实现产品坐标系与机器人系统坐标系的统一。

(3) 机器人搭载末端执行器移动到产品钻铆区域,照相单元采集钻铆区域的基准孔信息,控制系统进行计算分析,并调用软件系统的离线程序,准备钻铆操作。

(4) 末端执行器移动到第一个装配孔位,进行法向测量及调姿,制孔单元开始制孔,末端执行器并行完成送钉、涂胶,然后安装单元进行插钉以及单面紧固件自动安装。

(5) 机器人驱动末端执行器移动到下一个孔位,并依次循环完成该区域的钻铆操作。



图4 单面紧固件机器人自动钻铆系统  
Fig.4 Robot automatic riveting system for blind fastener

(6) 机器人驱动末端执行器移动到下一钻铆区域,并进行步骤(3)~(5)工序循环,直至完成站位 1 复合材料结构件的钻铆操作。

(7) AGV 驱动机器人钻铆系统移动到站位 2,进行另一复合材料结构件的自动钻铆操作,如图 6 所示。

### 机器人自动钻铆关键技术

机器人自动钻铆技术涵盖 AGV 移动技术、机器人技术、测量技术、钻铆技术以及集成控制等多项技术,专业面广,实现难度大,需要突破如下关键技术。

#### 1 机器人钻铆系统自动定位

机器人自动钻铆系统通过 AGV 实现厂房内的移动以及站位间的转移,因此需要对 AGV 移动过程进行引导。目前常用的 AGV 的引导方式有电磁感应引导、激光引导以及视觉引导 3 种方式<sup>[1]</sup>。本系统采用电磁

感应引导的方式进行 AGV 的导航,即在厂房地面及站位间的地面敷设电磁条,通过磁带引导,使 AGV 能够自主识别路径,实现自主导航。而在产品钻铆站位设置二维码矩阵,通过 AGV 上安装的 PGV 读头进行扫描,精确判断 AGV 的位置信息,从而实现其精准移动和定位。二维码矩阵的精度最高可达到  $\pm 0.2\text{mm}$ ,加上控制误差和移动误差,AGV 的定位精度可达到  $\pm 1\text{mm}$ ,如图 7 所示。

AGV 设备的运动一般采用麦克纳姆轮或橡胶轮,可灵活地在厂房及站位间进行全向运动,但这两种轮与地面的接触面积都很小,抓地能力有限,在自动钻铆过程中由于机器人的运动以及末端操作的振动,AGV 设备易产生滑移,严重影响自动钻铆过程的精度。因此,为保证自动钻铆过程 AGV、机器人及末端执行器的基础稳定,本系统采用零点定位装置实

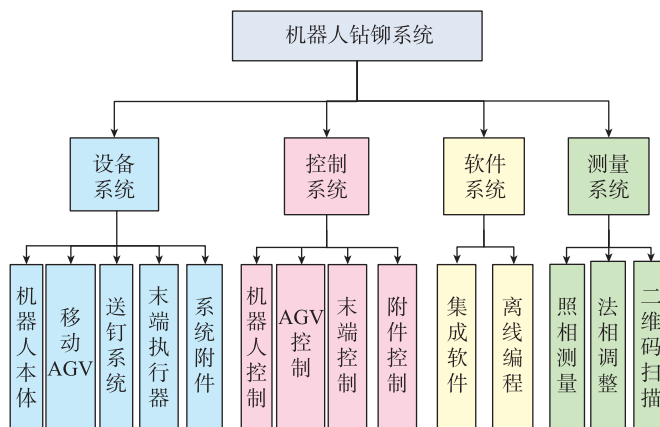


图5 机器人自动钻铆系统组成  
Fig.5 Robot automatic riveting system

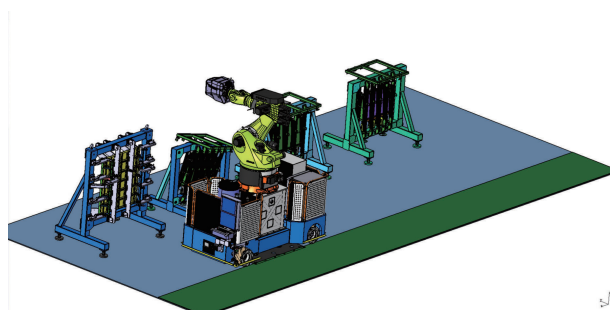


图6 机器人自动钻铆系统工作过程  
Fig.6 Process of robot automatic riveting system

现 AGV 与厂房地基的定位锁紧,严格控制自动钻铆过程系统的基础稳定性。具体方案为:产品钻铆站位区域的地基预埋钢板,AGV 设备的车体与钢板预埋件上分别安装 4 套杯锥快速锁紧装置(零点定位装置),其单点锁紧力可达 5t。AGV 设备通过二维码矩阵引导精确定位后,车体整体下降,4 套杯锥插入,自动与地基锁紧,实现 AGV 设备及机器人钻铆系统的精确定位与锁紧,如图 8 所示。

## 2 单面紧固件自动制孔与安装末端执行器

制孔和单面紧固件安装是复合材料壁板结构件装配过程中的关键环节,国外集成自动制孔与单面紧固件安装的末端执行器技术已经成熟,并在复合材料翼面等壁板部件的装配中实现了应用。目前国内在自动制孔方面已经有了一些初步应用<sup>[12]</sup>,但在单面紧固件安装的自动化方面则还处于研究阶段。集成自动制孔与单面紧固件安装的末端执行器技术难点在于:(1)末端执行器的结构形式,各功能单元的换位形式<sup>[13]</sup>;(2)单面紧固件为细长形结构,自动送钉单元设计难度大;(3)抽钉安装单元的紧凑设计,以及末端执行器与各功能单元的集成。

本文所涉及的机器人自动钻铆系统的末端执行器结构设计如图 9 所示,包含照相检测、压脚机构、自动制孔、送钉单元、自动涂胶、抽钉安装及法向调整等多个单元,具备自动特征定位、法向找正、压紧、制孔镗窝、送钉、涂胶、安装等功能,能够实现复合材料壁板结构件的自动钻铆。

单面紧固件为细长型结构,长度与直径的比值接近 10,自动送钉的难度极大。本系统末端执行器的送钉单元结构组成如图 10 所示,该单元主要由捕获组件、夹持组件以及旋转插入组件组成。其工作流程为:(1)送料系统将单面紧固件输送到末端

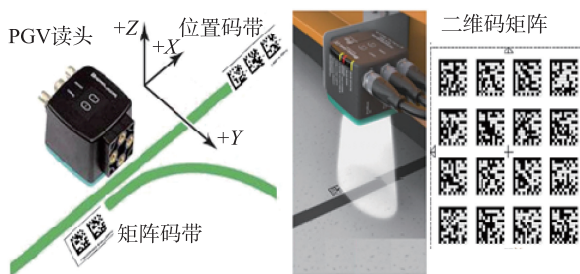


图7 AGV精准移动和定位  
Fig.7 Accurate moving and locating of AGV

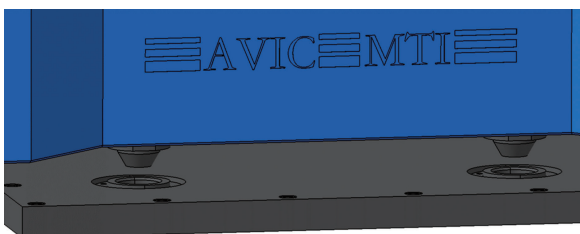


图8 机器人自动钻铆系统定位锁紧  
Fig.8 Location and locking of robot riveting system

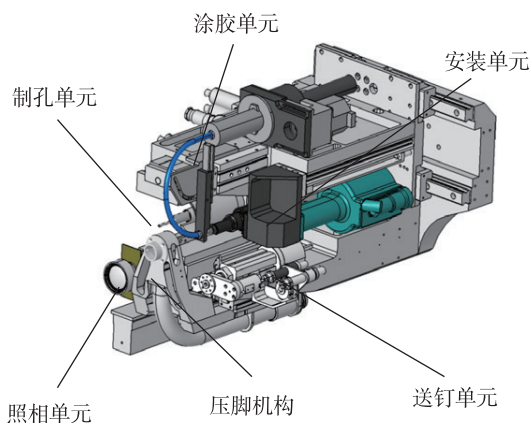


图9 末端执行器结构组成  
Fig.9 End-effector structure

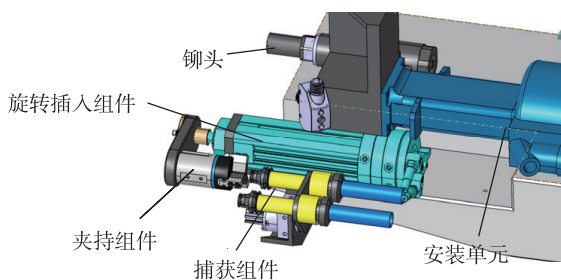


图10 送钉单元结构组成  
Fig.10 Feeding unit structure

执行器,捕获组件将其捕获定位;(2)然后夹持组件夹持紧固件的钉头端,在旋转插入组件的驱动下并将其从捕获组件拔出;(3)旋转插入组件将紧固件转位,插入到安装单元的铆头内;(4)安装单元进给运动,驱动铆头将单面紧固件插入到钉孔内。

### 3 基于数字化测量的自动钻铆位姿精确调整

复合材料壁板结构自动钻铆过程中,装配孔垂直度及位置度是其高质量装配的重要体现,而机器人钻铆位姿的精确控制和调整是该过程的关键环节,其主要技术难点包括孔位照相测量与精确定位,以及壁板结构与机器人钻铆系统坐标系找正;钻铆表面法向测量与机器人位姿精确调整。

(1)基于现场测量的机器人钻铆精确定位。

末端执行器照相单元通过对壁板结构的基准孔进行照相测量,并进行计算分析,拟合产品坐标系,从而确定机器人钻铆的工作位置。其工艺过程为<sup>[14]</sup>:控制系统通过以太网发送图像采集命令,照相单元打开光源进行照射,同时 CCD 相机拍摄工件的图像,通过对包含有基准孔的产品图像进行处理与分析,获取基准孔的外轮廓信息,通过视觉算法计算出基准孔中心与理论坐标的位置偏差,并把数据反馈给自动钻铆控制系统进行二次定位,从而保证钻铆过程中装配孔位置度,其工作原理如图 11 所示。

(2)曲面法向激光测量与钻铆姿态精确调整。

机器人自动钻铆系统采用多点激光测距方法实时求解钻铆点的法向,进而调整钻铆末端执行器的姿态。本系统在末端执行器的压脚机构上设计安装了 4 个激光测距仪,如图 12 所示。激光测距仪发射激光,并接收反射信号,据此计算出直线距离。通过 4 个测距仪的距离值数

据拟合出钻铆孔位处的蒙皮法向,机器人自动钻铆系统根据该法向数据,实现钻铆过程中钻铆姿态的精确调整<sup>[15-16]</sup>。

### 4 机器人自动钻铆多系统集成

采用计算机集成控制,实现离线编程的数据导入,依据工艺参数,实现钻铆孔位的机器人定位控制、末端执行器钻铆循环控制,包括送钉系统控制、基准孔照相测量及现场视频监视等协调控制,满足自动钻铆的要求<sup>[17-18]</sup>。

控制系统包含多个子系统,其中机器人的控制采用其本身的 KRC4 控制器,末端执行器的控制采用倍福数控系统,同时还有测量信息等数

据,因此需要搭建一个平台实现不同系统间的信息交互及协调控制,本系统采用上位计算机的集成控制软件实现上述功能。上位机软件系统采用以太网通信的形式与系统中其他单元进行通信,协调各个分单元的控制及顺序、测量及安全防护。如图 13 所示,上位机软件系统通过各种信息的反馈判断机器人、末端执行器是否按上位机发送的指令运行,以及是否运行到位,同时进行测量数据、过程参数、报警历史记录等的管理。

机器人自动钻铆系统由集成软件系统统一控制,软件系统根据工艺流程协调各个功能部分的控制顺序,

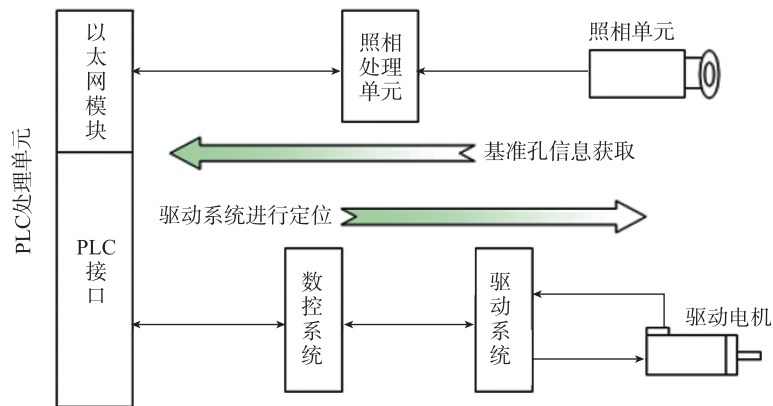


图 11 照相单元工作原理

Fig.11 Principle of photographic measurement unit

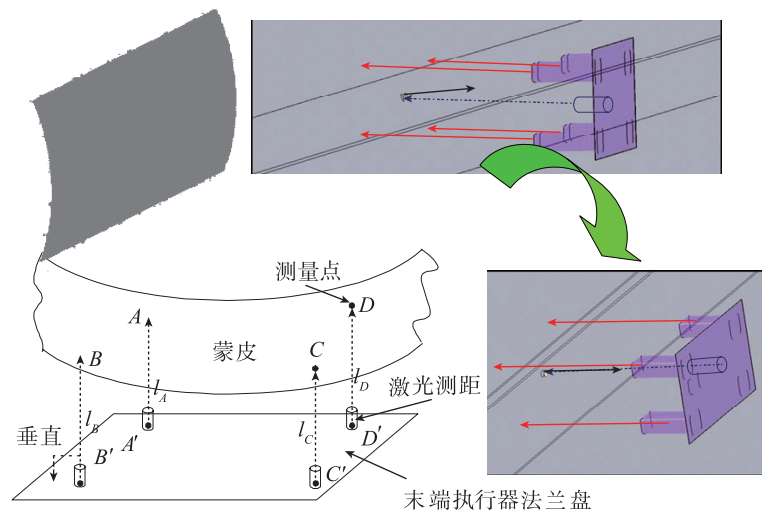


图 12 孔法向测量精确调整姿态

Fig.12 Surface vector measurement and accurate posture adjustment

并接收离线编程的钻铆位置数据,实现钻铆循环控制并进行参数管理及记录,如图 14 所示。

### 结论

随着复合材料在飞机机体结构上的广泛应用,自动钻铆系统的需求凸显,尤其针对单面紧固件的自动钻铆技术是提高复合材料壁板结构装配质量的关键。

本文开展了机器人钻铆自动定位、单面紧固件自动钻铆末端执行

器、钻铆过程位姿精确调整、多系统集成等关键技术研究,设计开发了复合材料单面紧固件机器人自动钻铆系统。

机器人自动钻铆系统具有柔性化、数字化和模块化的特点,可实现复合材料壁板结构件的自动压紧、测量、制孔、送钉及单面紧固件安装。后续应通过大量工艺试验进行系统的优化与成熟度提高,尽快实现该系统在复合材料壁板装配生产中的工程应用。

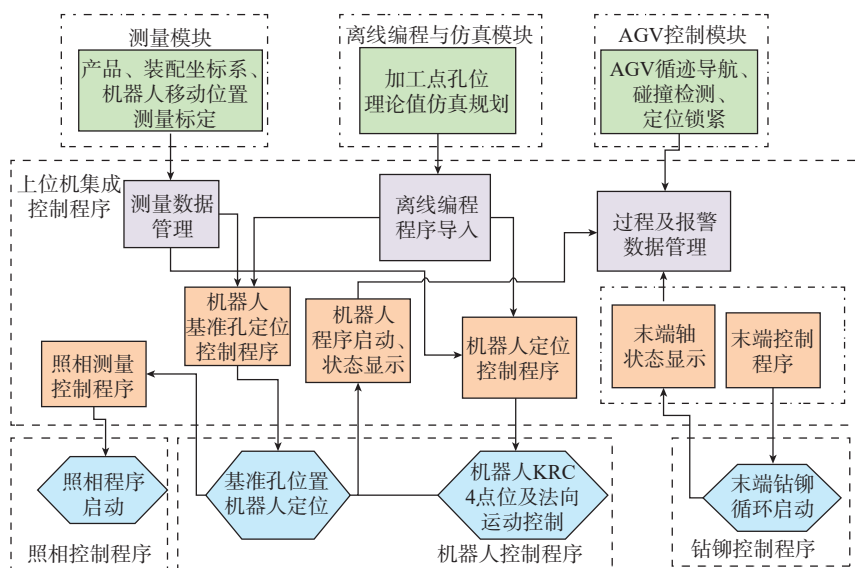


图13 多系统协调控制图

Fig.13 Multi-system coordination control chart

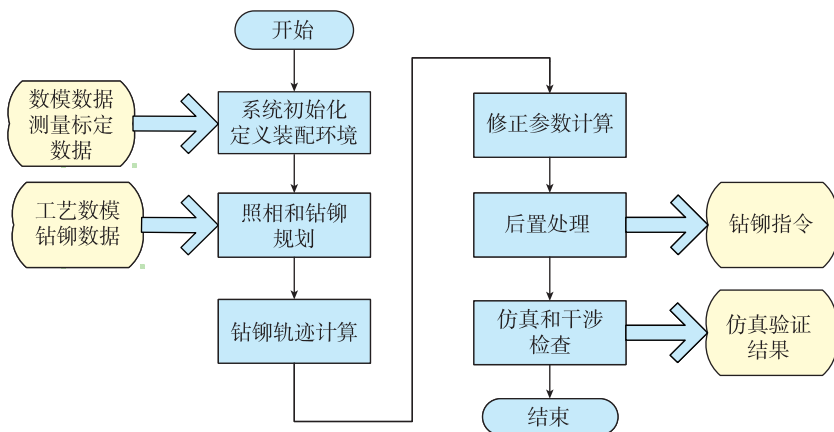


图14 软件系统控制流程

Fig.14 Integrated control flow of software system

### 参考文献

[1] 马立敏,张嘉振,岳广全,等. 复合材料在新一代大型民用飞机中的应用[J]. 复合材料学报, 2015, 32(2): 317-322.

MA Limin, ZHANG Jiazhen, YUE Guangquan, et al. Application of composites in large commercial aircraft[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(2): 317-322.

[2] 冯军. 复合材料技术在当代飞机结构上的应用[J]. 航空制造技术, 2009, 52(22): 38-42.

FENG Jun. Application of composite material technology in contemporary aircraft structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(22): 38-42.

[3] 陈绍杰. 复合材料技术与大型飞机[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 605-610.

CHEN Shaojie. Composite material technology and large aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 605-610.

[4] 陈绍杰. 复合材料技术发展及其对我国航空工业的挑战[J]. 高科技纤维与应用, 2010, 35(1): 1-7.

CHEN Shaojie. Development of composite materials technology and its challenges to China's aviation industry[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2010, 35(1): 1-7.

[5] 黄承恭,吴建华. 复合材料在直升机上的应用与发展[C]// 复合材料:生命、环境与高技术—第十二届全国复合材料学术会议论文集. 天津:天津大学出版社, 2002.

HUANG Chengong, WU Jianhua. Application and development of composite materials in helicopters[C]//Proceedings of NCCM-12. Tianjin: Tianjin University Press, 2002.

[6] 楼莉莉. 国内外自动钻铆技术的发展现状及应用[J]. 航空制造技术, 2005, 48(6): 50-52.

LOU Ali. The development status of automated drilling and riveting and its application[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005, 48(6): 50-52.

[7] 喻龙,章易镰,王宇晗. 飞机自动

钻铆技术研究现状及其关键技术[J]. 航空制造技术, 2017, 60(9):16-25.

YU Long, ZHANG Yilian, WANG Yuhan, et al. Research status of aircraft automatic drilling and riveting system and its key technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(9): 16-25.

[8] 王黎明, 冯潼能. 航空专用设备—数字化自动钻铆技术在飞机制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2008, 51(11): 32-35.

WANG Liming, FENG Tongneng. Application of digital automatic drilling and riveting technology in aircraft manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(11): 32-35.

[9] 刘东平, 申林远, 朱亚蓉, 等. 玻璃纤维复合材料与铝合金叠层低损伤制孔工艺参数研究[J]. 航空精密制造技术, 2017, 53(6): 5-8.

LIU Dongping, SHEN Linyuan, ZHU Yarong, et al. Study on technological parameters of low damage hole making of glass fiber composite and aluminum alloy laminates[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2017, 53(6): 5-8.

[10] 杜兆才, 姚艳彬, 王健. 机器人钻铆系统研究现状及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2015, 58(4): 26-31.

DU Zhaocai, YAO Yanbin, WANG Jian. Research status and development trends of robot drilling and riveting system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(4): 26-31.

[11] 龚辉. 基于工业机器人平台的自动供钉系统设计研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.

GONG Hui. Design and research of automatic rivets feeding system based on industry robots platform[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.

[12] 张在房, 杨新军, 魏海峰. 基于多传感器信息融合的AGV导航系统[J]. 机械工程师, 2005(1): 43-44.

ZHANG Zaifang, YANG Xinjun, WEI Haifeng. AGV navigation system based on multi-sensor information fusion[J]. Mechanical Engineer, 2005(1): 43-44.

[13] 张杰, 王超伟, 连鹏. 移动机器人自动钻铆技术及装备[J]. 制造业自动化, 2015(10): 125-128.

ZHANG Jie, WANG Chaowei, LIAN Peng. Mobile robot automatic riveting technology and equipment[J]. Manufacturing Automation, 2015(10): 125-128.

[14] 韩洁, 肖庆东, 杜兆才. 机器人钻铆系统铆接单元及工艺技术[J]. 航空制造技术, 2017, 60(6): 95-99.

HAN Jie, XIAO Qingdong, DU Zhaocai.

Riveting unit and technological process of robot drilling and riveting[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(6): 95-99.

[15] 向勇, 田威, 洪鹏, 等. 双机器人钻铆系统协同控制与基坐标系标定技术[J]. 航空制造技术, 2016, 59(16): 87-92.

XIANG Yong, TIAN Wei, HONG Peng, et al. Collaborative control and base coordinates calibration technology for dual-robot drilling and riveting system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(16): 87-92.

[16] 曲绍君, 邹方. 一种新型飞机曲面壁板自动制孔法向测量方法[J]. 航空制造技术, 2015, 58(21): 134-137.

QU Shaojun, ZOU Fang. A novel method of automatic drilling's normal measurement for aircraft curved panel[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(21): 134-137.

[17] AEHNELT M, BADER S. Tracking assembly processes and oroviding assistance in smart factories[C]. Icaart. 2014: 161-168.

[18] CAMPOS A, JOHNSON R, KENNEDY J. System and method for wiring an aircraft: US2016004863 [P]. 2016-02-18.

通讯作者: 肖庆东, E-mail: fenghuo4000@126.com.

## Robot Automatic Riveting Technology for Blind Fastener of Composite Panel

XIAO Qingdong<sup>1,2</sup>, GAN Lu<sup>1,2</sup>, SHANG Jiangkun<sup>1,2</sup>, LIANG Xuemei<sup>1,2</sup>

(1. Division for Digital and Flexible Assembly, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

2. Aeronautical Key Laboratory for Digital Manufacturing Technology, Beijing 100024, China)

**[ABSTRACT]** With the wide application of composite materials in aircraft body structure, one-sided fasteners are also widely used in the assembly process. In view of the problems existing in the assembly process of composite panels and one-sided fasteners, the application status of robotic riveting technology in aviation manufacturing is analyzed, the difficulties of robotic riveting technology for composite panels are expounded, and the key technology research is carried out, then the robot automatic riveting system is designed and developed. The system has the functions of automatic positioning and clamping, measuring, drilling, feeding and fastener riveting of composite panels assembly process, which can greatly improve the assembly quality and efficiency of composite structural parts.

**Keywords:** Automatic riveting; Robot; Composite; Blind fastener; Panel

(责编 长青)