

# 机器人钻铆系统研究与应用现状\*

战 强,陈祥臻

(北京航空航天大学机器人研究所,北京 100191)

**[摘要]** 铆接是飞机装配中的主要连接方式,高效高质量的钻孔与铆接技术是提高飞机装配质量与装配效率的关键。机器人钻铆系统以其高灵活性、低成本的特点逐渐进入到飞机装配领域,成为自动化钻铆系统中的新军。首先对国内外机器人钻铆系统的研究和应用状况进行了介绍和分析,然后对国内机器人钻铆系统存在的主要问题进行了概括,最后总结了目前机器人钻铆系统需解决的关键技术及相关研究工作,以供研究者们参考。

**关键词:** 机器人钻铆;手工钻铆;自动钻铆;飞机装配;钻铆质量

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.04.024



战 强

教授、博导,主要从事复杂机构设计及运动控制研究,完成钻孔机器人、大负载搬运机械手等重点科研项目,获全国发明展览会银奖、中航科技进步三等奖等。

现代飞机制造技术的发展对飞机的疲劳寿命、密封、防腐的要求越来越高<sup>[1]</sup>,例如我国的军机、干线飞机的寿命要求分别为 8000 飞行小时

\* 基金项目:国家重点研发计划“面向飞机装配的机器人智能钻铆技术与系统”(2017YFB1301700)。

和 50000 飞行小时以上。据统计,飞机机体疲劳失效事故的 70% 源于结构连接部位,其中 80% 的疲劳裂纹产生于连接孔处,因此连接质量极大地影响着飞机的安全和寿命<sup>[2]</sup>。目前飞机制造工作量的 30%~45% 为飞机装配工作,其中装配方式以铆接为主,采用先进的制孔和铆接技术是提高飞机装配质量的有效技术途径<sup>[3]</sup>。钻铆连接方式具有工艺过程简单、检查和排除故障容易、连接强度稳定可靠、适用于结构复杂的各种金属和非金属材料之间连接等优点<sup>[4]</sup>。

目前,飞机钻铆方式主要有两种:手工钻铆、自动化钻铆。手工钻铆灵活性高,但钻铆质量、重复性以及钻铆效率上仍存在不足,同时钻铆过程中产生的废屑会威胁人体健康<sup>[5]</sup>。国外钻铆技术几十年的应用证明,自动化钻铆效率比手工钻铆高 10 倍,同时能够节约安装成本、改善劳动条件、确保安装质量、减少人为因素造成的缺陷<sup>[1]</sup>,采用自动化钻铆设备实现大型构件的制孔和铆接是提高装配质量和效率的有效途径<sup>[6]</sup>。目前主要有 3 种自动化钻铆系统:基于全自动托架的自动钻

铆系统(包含 C 型和 D 型钻铆系统)、龙门式自动钻铆系统(包含龙门卧式、立式钻铆系统,机身半筒段环铆系统)和机器人钻铆系统<sup>[7]</sup>。这 3 种钻铆系统与手工钻铆在灵活性与加工质量上的对比关系如图 1 所示。前两种自动钻铆系统的加工质量高,但设备体积庞大、系统复杂、价格昂贵,应用局限性较高。随着工业机器人负载能力、位置精度的提高,配备了多功能末端执行器的机器人钻铆系统既能保证设备的灵活性,同时也能保证加工的精度和效率<sup>[8-9]</sup>。目前,机器人钻铆系统主要应用于飞机翼

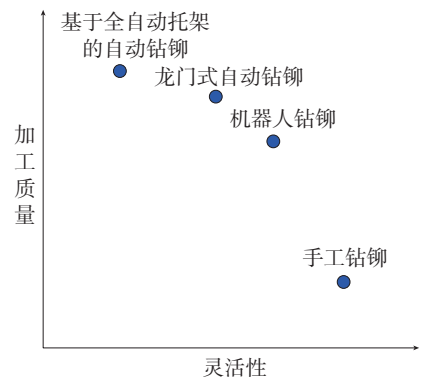


图1 不同钻铆方式的灵活性与加工质量对比  
Fig.1 Flexibility and quality comparison of different drilling and riveting ways

面类、壁板类等可达性好的组、部件的自动钻孔和铆接等装配作业,加装了导轨的机器人钻铆系统在不移动工件的情况下也能完成大部件的钻铆加工<sup>[10]</sup>。此外,针对复杂装配环境下的部件通过预先规划路径,可大大提高钻铆的效率、安全性及稳定性<sup>[11]</sup>。

## 国外机器人钻铆系统研究与应用现状

针对航空制造领域的特殊需求,国外工业机器人企业通过与航空制造企业合作率先开展了机器人钻铆技术的研究和应用<sup>[12]</sup>。美国 Electroimpact、GEMCOR 公司以及德国 KUKA、BRÖTJE 公司是当今世界机器人钻铆技术的引领者,相关产品已经在各大机型上成功应用。

早在 2001 年,美国 Electroimpact 公司就与英国空客公司设计开发了基于 KUKA KR360 的 ONCE (One-sided Cell End effector) 机器人自动钻削系统<sup>[13-15]</sup>,如图 2 所示,用于 F/A-18E 后缘襟翼的制孔、镗窝和测量以及波音 737 飞机襟翼的钻孔与镗窝<sup>[16-17]</sup>。该机器人系统可满足铝、钛、复合材料等叠层的制孔和镗窝工作<sup>[18]</sup>。

美国 GEMCOR 公司采用 Fanuc M900 机器人配合 G1000 末端执行器,研制了一种适用于狭窄空间的机器人钻铆系统,如图 3 所示。该系统采用了 GEMCOR 公司的全电动紧固技术实现高精度、无毛刺、视觉同步钻铆,定位速度是人工定位的 3~4 倍,安装舱门上 860 个紧固件的总时间为 190min,平均每分钟 4.5 个<sup>[19]</sup>。

德国 KUKA 公司 2012 年开始同波音公司合作研发“机身自动直立装配系统(Fuselage Automated Upright Build, FAUB)”,将在 2020 年用于波音 777X 型双通道客机的装配,如图 4 所示<sup>[20]</sup>。该系统能实现机器人在前、后机身内外部的协同作业,可进行大面积机身壁板的高效组装,每天可完

成精确钻孔并铆接 60000 个紧固件,显著提高了飞机装配的安全性、装配质量及生产效率<sup>[21]</sup>。

德国 BRÖTJE 公司研制的 RACe (Robot Assembly Cell) 机器人钻铆系统<sup>[22]</sup>如图 5 所示,采用 KUKA KR360 机器人,并为机器人开发了 Cell-Control 软件,显著提高了机器人的重复性和定位精度。自 2009 年 4 月以来,该机器人钻铆系统已经成功投入生产应用,钻铆周期 10.25s<sup>[23-24]</sup>。在此基础上,BRÖTJE 公司开发了高刚度、高精度的钻铆机器人 Power RRAC,如图 6 所示,绝对定位精度为  $\pm 0.4\text{mm}$ ,末端负载达到

600kg<sup>[25]</sup>。

国外其他公司也开发了机器人钻铆系统。瑞典 Novator 公司研发出一套新型机器人制孔系统 Orbital E-D100,如图 7 所示,能够实现复合材料、钛、铝以及组合叠层材料的无毛刺、高精度钻孔<sup>[26]</sup>。意大利 Bisiach & Carrù (B&C)公司设计了双机器人自动钻铆系统,用于波音 787 机尾部件的自动钻铆和涂胶<sup>[27]</sup>。

## 国内机器人钻铆系统研究与应用现状

国内在机器人钻铆技术方面的研究起步稍晚,经过航空制造企业、高校和科研院所的共同努力,已研制了多型样机并实现了应用。2007~2009 年,北京航空航天大学与航空工业沈飞、沈阳机床厂合作研制成功国内第一套机器人钻孔系统,如



图2 Electroimpact机器人自动钻孔系统 ONCE

Fig.2 One-sided Cell End effector (ONCE) robotic drilling system of Electroimpact



图3 配备G1000末端执行器的GEMCOR机器人钻铆系统

Fig.3 GEMCOR robot drilling and riveting system with G1000 end-effector



图4 机身自动直立装配系统

Fig.4 Fuselage Automated Upright Build (FAUB) robotic system

图8所示,实现了某机型油箱下壁板钛铝夹层的自动钻孔、铰孔与铆窝,产品加工质量达到装机件要求,加工周期比人工缩短50%以上<sup>[28]</sup>。

航空工业北京航空制造工程研究所自主研发了双机器人数字化制孔系统,完成了多功能末端执行器的研制,成功应用于多类航空产品的自

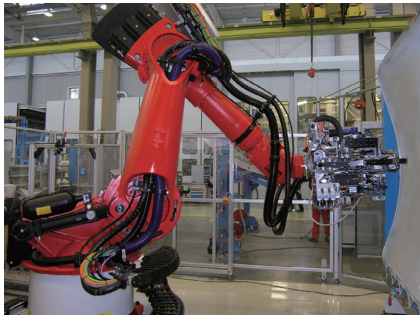


图5 RACe机器人钻铆系统

Fig.5 Robot Assembly Cell (RACe) robot drilling and riveting system



图6 Power RACe机器人钻铆系统

Fig.6 Power RACe robot drilling and riveting system

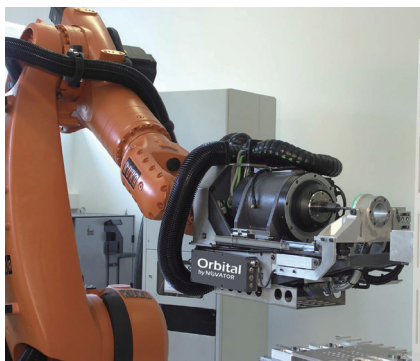


图7 Orbital E-D100机器人钻铆系统

Fig.7 Novator robot drilling and riveting system with Orbital End Effector-D100

动制孔、铆接中。

航空工业成飞联合西北工业大学等高校共同开发了壁板类零部件的自动制孔系统,已成功实现某型飞机翼翼面的钻铰铤一体制孔<sup>[29-30]</sup>。西北工业大学针对某型飞机壁板类组件研发了机器人自动钻铆装配系统,并研究了飞机壁板装配变形工艺实时控制策略、机器人制孔系统集成控制等技术方法<sup>[31]</sup>。

成飞与南京航空航天大学针对飞机机翼部件的自动制孔需求,合作研制了壁板类部件/组件/零件数字化柔性装配、智能制孔系统<sup>[32]</sup>。南京航空航天大学也对机器人钻铆系统末端执行器<sup>[33]</sup>、机器人精度补偿<sup>[34]</sup>、钻铆系统的集成控制<sup>[35]</sup>进行了研究。

浙江大学等单位开展了双机器人协同钻铆<sup>[36]</sup>、自动钻铆执行器<sup>[37]</sup>的相关研究,研制出一种基于双机器人协同的机器人钻铆系统以及与其配套的多功能终端执行器。

## 国内机器人钻铆系统存在问题

目前,国外已在多个机型上应用了机器人钻铆系统,拥有丰富的工程应用经验;国内的机器人钻铆系统虽然已有应用,但与国外相比还存在较大差距。目前国内机器人钻铆系统存在的主要问题包括:(1)机器人钻铆系统末端执行器功能单一,集成度与可靠性低。机器人钻铆系统末

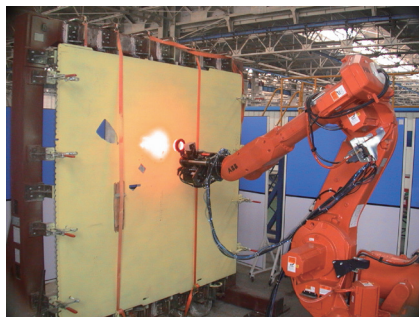


图8 北航、沈飞、沈阳机床联合研制的机器人钻孔系统

Fig.8 Robot drilling system developed by BUAA, SAC and SYMG

端执行器并没有实现真正的多功能设计,通用性低;缺乏模块化、系列化、标准化设计,在加工精度、使用寿命、稳定性等方面与国外差距较大。(2)部分关键技术有待突破。比如,误差补偿技术、多机器人协同控制技术、在线监测技术、离线编程技术等方面有待突破。(3)机器人钻铆系统智能化程度不高。智能化钻铆软件、人机交互协同作业、钻铆过程智能联合规划、系统故障智能诊断等技术有待进一步研究。机器人钻铆系统环境感知能力、全方位作业信息融合能力差,未实现通过实时作业状态智能调整作业参数来进一步提高作业质量。(4)未形成机器人钻铆工艺数据库,实际应用经验严重不足。现阶段机器人钻铆过程工艺参数的确定大都基于实验室模拟试验,尚未形成基于标准化作业理论的实际机器人钻铆工艺数据库,距离机器人钻铆工业化应用还有很长的路要走。

## 机器人钻铆系统的关键技术

目前,国内外虽然已经实现了机器人钻铆系统在飞机装配中的应用,但还存在很多不足,还有多项关键技术需要攻关。下面对各关键技术及其研究情况进行介绍。

### 1 系统误差补偿技术

机器人钻铆系统的加工误差主要由以下几个部分构成:机器人误差、机器人辅助运动系统(如导轨)误差、工装误差、末端执行器误差,要提高机器人钻铆系统的加工精度则需要对以上几种误差进行测量和补偿。

(1)作为机器人钻铆系统的主要运动载体,机器人主要功能是将钻铆末端执行器精确定位到飞机部件的待加工装配位置,因此机器人钻铆系统中的工业机器人主要以绝对点位控制为主。然而,重复定位精度达到 $\pm 0.1\text{mm}$ 的工业机器人,其绝对定位精度只有 $\pm 2\sim 3\text{mm}$ <sup>[38]</sup>,典型的航空工业需求的绝对定位精度至少要

达到  $\pm 0.3\text{mm}$ <sup>[22]</sup>。因此,提高机器人的绝对定位精度是机器人钻铆系统能够顺利应用的关键。机器人的定位误差主要由机器人运动学误差、环境因素误差、控制系统误差以及载荷变形误差等组成<sup>[39]</sup>,提高机器人定位精度的方法主要分为基于参数标定的精度补偿方法<sup>[40]</sup>和基于非参数标定的精度补偿方法(如基于人工神经网络的补偿方法<sup>[41]</sup>、各关节轴加装二级高精度编码器<sup>[42]</sup>等)。

(2) 导轨是用于安装机器人的活动机架,可将机器人移动到给定的站位,加大了机器人沿导轨方向的运动空间,保证了机器人沿导轨方向大范围、大批量作业的可行性,也被称为机器人第7轴<sup>[43]</sup>。导轨需具备较高的定位精度和较好的刚度,不能产生任何影响机器人定位精度的变形,通常采用高精度的全消除齿轮传动箱与精密齿条传动的全闭环控制来提高其定位精度<sup>[44]</sup>。

(3) 工装在机器人钻铆系统中主要实现飞机部件的定位与加持工作,其自动化程度和工作的可靠性直接影响钻铆的速度和质量<sup>[45]</sup>。为了提高飞机组件装配连接质量和精度,可采用数字化柔性工装技术,通过优化装配工艺,建立可重组的模块化、数字化、柔性化工装系统<sup>[46]</sup>,同时也可将人机仿真技术与动态测量技术应用到柔性工装系统中<sup>[47]</sup>。

(4) 末端执行器是机器人钻铆系统与工件直接接触的执行机构,负责机器人钻铆系统各种功能的实现,加工精度会在这里得到直接体现<sup>[48]</sup>。末端执行器的结构复杂、参数及功能众多,主轴转速、进给量、冷却方式、刀具参数等都会对钻铆精度造成影响。采用误差补偿方法及正交试验方法来合理选择工艺参数可实现末端执行器高精度、高效率的工作<sup>[49]</sup>。

## 2 双机器人协同作业技术

目前机器人钻铆系统多采用单

机器人自动钻铆,但其只适用于开敞结构,且灵活性不高。双机器人钻铆系统具有更好的灵活性,能够通过更换末端执行器实现更加复杂的任务,且适用于电磁铆接等高质量铆接方式<sup>[50]</sup>。通过在两侧机器人上装载不同的传感器,能提高钻铆系统的智能化与自动化程度,同时也对钻铆系统的集成化技术、路径规划技术以及协同控制技术等提出了更高的要求<sup>[51]</sup>。双机器人钻铆系统集成了 CCD 相机、力/力矩传感器、激光位移传感器等多种传感器,为了将这些传感器的单侧检测信息转换到双机器人系统下,需要利用快速标定法或依靠外界设备的精密标定法对机器人基坐标系进行标定,为双机器人协同定位及协同控制打下基础,保证机器人的空间定位和协同运动的精度<sup>[52]</sup>。同时,双机器人的协同运动规划、同步过程/轨迹规划、通信系统/软件规划也是双机器人协同作业技术的关键研究方向。

## 3 在线监测技术

在机器人钻铆系统作业过程中,需要对制孔、镗窝、涂胶和铆接等工序进行工艺性检测和质量检测,传统的手工检验和离线检测已远远不能满足飞机装配过程中对检测速度和精度的要求<sup>[53]</sup>。为了实现对机器人钻铆系统自动化、集成化、智能化的多方位同步监测,需要发展能够多参量检测、多传感器集成、多数据融合的在线监测技术,提高机器人钻铆系统加工效率及质量。

目前机器人钻铆系统在线监测技术主要包括:压紧力监测与控制、孔位法向测量、制孔质量监测等。压紧力监测主要依靠接触式传感器对压紧力进行实时反馈与调节,抑制末端执行器相对工件的法向振动和切向滑动,从而保证加工孔的质量<sup>[54]</sup>。孔的垂直度虽不会改变孔的加工直径,但会影响铆接质量,孔位法向测量大都依靠多激光位移传感器,主要

方法包括向量叉积法<sup>[55]</sup>、二次曲面拟合法<sup>[56]</sup>等。制孔质量监测主要包含制孔直径、镗窝尺寸等信息,可采用接触式探针监测<sup>[57]</sup>或非接触式激光监测<sup>[58]</sup>等方式完成制孔质量的在线监测,提高后续装配质量。

## 4 离线编程技术

离线编程系统作为机器人钻铆系统的关键组成部分之一,是实现机器人、多功能末端执行器、柔性工装等工艺装备协调配合完成整个装配过程的纽带,直接影响着钻铆加工精度、装配效率与装配质量<sup>[59]</sup>。用于飞机装配的离线编程技术主要包含以下几方面的内容:(1) 工艺信息提取,其作为离线编程系统的数据源,是离线编程技术的基础。以基于特征建模技术的产品三维数字化模型或基于模型定义的产品数字化模型为操作对象,将离线编程系统所需要的待加工特征信息添加到产品的三维数字化模型上,得到产品工艺特征信息模型<sup>[60]</sup>。(2) 机器人任务规划,指导机器人钻铆的整个工作流程,直接影响加工效率与加工质量,是离线编程技术的核心。机器人任务规划主要包括加工孔序列规划、加工路径规划以及加工轨迹规划3个方面。(3) 离线仿真与优化,对加工过程进行仿真,检查并修正干涉点,优化运动轨迹,检验整个加工过程的合理性,是离线编程技术成功实施的保障。机器人钻铆系统中所使用的大都为六轴工业机器人,需要离线仿真与优化帮助选择最佳钻铆位姿,并避开奇异点与极限点<sup>[61]</sup>。

## 5 末端执行器技术

机器人钻铆末端执行器是基于工业机器人的飞机钻铆系统的关键部件之一,负责了系统的主要加工功能,其结构、重量、体积、动态性能等参数都能直接影响到制孔和铆接的质量。末端执行器与机器人之间的连接方式分为同轴式、悬挂式和侧面式3种,安装方式会对机器人的可达

性、可操作性、关节使用度以及受力产生不同影响<sup>[62]</sup>。末端执行器的功能模块主要分为:(1)主加工模块,用于完成钻铆加工任务,包括压紧工件、伺服进给、钻铤成形、压铆拉铆等工作;(2)检测模块,用于采集加工全过程的信息,包括基准孔信息检测、加工法向及深度检测、铆钉信息检测等工作;(3)辅助模块,负责钻铆过程的辅助工作,包括涂胶、插钉、真空吸屑等工作。目前具有代表性的末端执行器,例如 ONCE 末端执行器<sup>[63]</sup>、Orbital E-D100 末端执行器<sup>[64]</sup>、ALEMA 多功能末端执行器<sup>[65]</sup>等已达到较高水准,在智能化、模块化与可重构化方面已取得较好效果,且具有环境感知能力。未来末端执行器技术的发展正朝着宽加工范围、多加工对象、智能化、模块化、集成化、高效、高可靠性的方向发展。

## 结论

机器人钻铆系统具有高度的灵活性和成本优势,是传统飞机自动钻铆系统的有益补充。随着机器人技术及机器人钻铆技术的发展,机器人钻铆系统在飞机制造业中的应用也会逐步增多。目前,国外研制的机器人钻铆系统已在多个机型上实现了应用,大大提高了装配效率;国内也在机器人钻铆技术方面进行了大量研究,研制了多款机器人钻孔、铆接系统,并实现了应用,但在技术和应用两个层面显著落后于国外。因此,国内的飞机制造主机厂、科研院所、大专院校等需要继续努力深入研究,突破机器人钻铆系统的核心关键技术,研制出具有更高技术水平和实用性的机器人钻铆系统,提升我国在机器人钻铆技术、机器人钻铆装备及飞机自动化装配方面的整体水平。

## 参考文献

[1] 楼阿莉. 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.

[2] 王黎明, 冯潼能. 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): 42-45.

WANG Liming, FENG Tongneng. Application of digital automatic drill-Riveting technology in aircraft manufacture[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(11): 42-45.

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

[4] 何文治. 航空制造工程手册: 飞机装配[M]. 第2版. 北京: 航空工业出版社, 2010: 252-264.

HE Wenzhi. Aviation manufacturing engineering handbook: Aircraft assembly[M]. 2nd ed. Beijing: Aviation Industry Press, 2010: 252-264.

[5] FROMMKNECHT A, KUEHNLE J, EFFENBERGER I, et al. Multi-sensor measurement system for robotic drilling[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017, 47: 4-10.

[6] 卜泳, 许国康, 肖庆东. 飞机结构件的自动化精密制孔技术[J]. 航空制造技术, 2009, 52(24): 61-64.

BU Yong, XU Guokang, XIAO Qingdong. Automatic precision drilling technology of aircraft structural part[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(24): 61-64.

[7] 王珉, 陈文亮, 郝鹏飞, 等. 飞机数字化自动钻铆系统及其关键技术[J]. 航空制造技术, 2013, 56(S1): 80-83.

WANG Min, CHEN Wenliang, HAO Pengfei, et al. Aircraft automatic drilling and riveting system and its key technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(S1): 80-83.

[8] LIANG J, BI S S. Design and experimental study of an end effector for robotic drilling[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 50(1-4): 399-407.

[9] OISSON T, HAAGE M, KIHLMAN H, et al. Cost-efficient drilling using industrial robots with high-bandwidth force feedback[J].

Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2010, 26(1): 24-38.

[10] 李菡. 基于双机器人协同的自动钻铆终端器及其自动供钉装置的设计与研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.

LI Han. Study on dual-robot-based drilling & riveting end-effector and automated rivet feeding apparatus[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.

[11] 毕树生, 宗光华, 梁杰. 机器人技术与航空制造业[J]. 机器人技术与应用, 2009(3): 25-31.

BI Shusheng, ZONG Guanghua, LIANG Jie. Robotics and aviation manufacturing[J]. Robot Technology and Application, 2009(3): 25-31.

[12] 冯华山, 秦现生, 王润孝. 航空航天制造领域工业机器人发展趋势[J]. 航空制造技术, 2013, 56(19): 32-37.

FENG Huashan, QIN Xiansheng, WANG Runxiao. Developing trend of industrial robot in aerospace manufacturing industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(19): 32-37.

[13] DEVLIEG R. Expanding the use of robotics in airframe assembly via accurate robot technology[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2010, 3(1): 198-203.

[14] DEVLIEG R, SITTON K, FEIKERT E, et al. ONCE (One-sided Cell End effector) robotic drilling system[R]. SAE Technical Paper, 2002.

[15] DEVLIEG R, FEIKERT E. One-up assembly with robots[R]. SAE Technical Paper, 2008.

[16] DEVLIEG R. High-accuracy robotic drilling/milling of 737 inboard flaps[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2011, 4(2): 1373-1379.

[17] ATKINSON J, HARTMANN J, JONES S, et al. Robotic drilling system for 737 aileron[R]. SAE Technical Paper, 2007.

[18] DEVLIEG R. Robotic trailing edge flap drilling system[R]. SAE Technical Paper, 2009.

[19] BARTON E, STUHLSATZ J. Drivmatic automatic fastening system with single robot positioner[R]. SAE Technical Paper, 2017.

[20] WAURZYNYIAK P. Aerospace automation stretches beyond drilling and filling[J]. Manufacturing Engineering, 2015, 154(4): 73-86.

[21] 董一巍, 李晓琳, 赵奇. 大型飞机研制中的若干数字化智能装配技术[J]. 航空制造技术, 2016, 59(S1): 58-63.

DONG Yiwei, LI Xiaolin, ZHAO Qi. Approach to the intelligent digital assembly

- process for large aircraft and its related key technologies[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(S1): 58–63.
- [22] MEHLENHOFF T, VOGL S. Automated fastening of aircraft cargo door structures with a standard articulating robot system[R]. SAE Technical Paper, 2009.
- [23] LOGEMANN T. Mobile robot assembly cell (RACe) for drilling and fastening[R]. SAE Technical Paper, 2016.
- [24] MUELLER-HUMMEL P, MEINERS C. New concept on drills up to 5/8" (16mm) for one shot IT8 robot application[R]. SAE Technical Paper, 2012.
- [25] DILLHOEFER T. Power RACe[R]. SAE Technical Paper, 2017.
- [26] WHINNE E, LIPCZYNSKI G, ERIKSSON I. Development of orbital drilling for the Boeing 787[J]. *SAE International Journal of Aerospace*, 2008, 1(1): 811–816.
- [27] 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.
- [28] ZHAN Q, WANG X. Hand-eye calibration and positioning for a robot drilling system[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 61(5–8): 691–701.
- [29] 刘春, 余立强. 基于工业机器人的机身系统定位方法研究[J]. *航空制造技术*, 2014, 57(21): 122–124.
- LIU Chun, YU Liqiang. Research on positioning method of fuselage system component based on industrial robot[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014, 57(21): 122–124.
- [30] 曾德标, 万世明, 李迎光, 等. 装配机器人加工站位设置混合优化算法[J]. *图学学报*, 2016, 37(4): 496–501.
- ZENG Debiao, WAN Shiming, LI Yingguang, et al. A hybrid optimization algorithm for working position setting of assembling robot[J]. *Journal of Graphics*, 2016, 37(4): 496–501.
- [31] 凌扬洋, 李西宁, 李卫平, 等. 适应自动钻铆的壁板预装配柔性定位装置设计[J]. *机械科学与技术*, 2014, 33(3): 465–468.
- LING Yangyang, LI Xining, LI Weiping, et al. Designing flexible positioning device for aircraft's pre-assembled panel to accommodate drilling and riveting[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2014, 33(3): 465–468.
- [32] 何晓煦, 田威, 曾远帆, 等. 面向飞机装配的机器人定位误差和残差补偿[J]. *航空学报*, 2017, 38(4): 292–302.
- HE Xiaoxu, TIAN Wei, ZENG Yuanfan, et al. Robot positioning error and residual error compensation for aircraft assembly[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(4): 292–302.
- [33] 李震宇, 田威, 廖文和. 用于复材自动钻铆末端执行器的设计及应用[J]. *机电一体化*, 2016(5): 54–58.
- LI Zhenyu, TIAN Wei, LIAO Wenhe. Design and application of automatic drilling and riveting end executor using in composite materials processing[J]. *Mechatronics*, 2016(5): 54–58.
- [34] 洪鹏. 基于精度补偿应用的机器人柔性自动钻铆集成控制技术[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- HONG Peng. Robot flexible automatic drilling and riveting integrated control technology based on accuracy compensation application[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [35] 张晋, 田威, 周敏, 等. 机器人自动钻铆系统集成控制技术[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(9): 38–42.
- ZHANG Jin, TIAN Wei, ZHOU Min, et al. Integrated control system of robot automatic drilling and riveting technology[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(9): 38–42.
- [36] 石鑫. 双机器人协同钻铆系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- SHI Xin. Research on dual-robotic synergic drilling and riveting system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [37] 李菡, 余德忠. 一种基于双机器人的自动钻铆终端器设计[J]. *机械科学与技术*, 2010, 29(10): 1297–1301.
- LI Han, YU Dezhong. Design of a drilling & riveting end-machine based on dual-robot[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2010, 29(10): 1297–1301.
- [38] OLSSON T, HAAGE M, KIHMAN H, et al. Cost-efficient drilling using industrial robots with high-bandwidth force feedback[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2010, 26(1): 24–38.
- [39] 周炜. 飞机自动化装配工业机器人精度补偿方法与实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- ZHOU Wei. Precision compensation method and experimental study of industrial robot for aircraft automatic assembly [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012.
- [40] ELATTA A Y, GEN L P, ZHI F L, et al. An overview of robot calibration[J]. *Information Technology Journal*, 2004, 3(1): 74–78.
- [41] WANG D L, BAI Y H, ZHAO J Y. Robot manipulator calibration using neural network and a camera-based measurement system[J]. *Transactions of the Institute of Measurement & Control*, 2012, 34(1): 105–121.
- [42] DEVLIEG R, SZALLAY T. Applied accurate robotic drilling for aircraft fuselage[J]. *SAE International Journal of Aerospace*, 2010, 3(1): 180–186.
- [43] 王巍, 惠帅, 梁涛, 等. 柔性导轨自动制孔机器人离线编程与仿真技术研究[J]. *航空制造技术*, 2012, 55(S1): 125–127, 132.
- WANG Wei, HUI Shuai, LIANG Tao, et al. Study on off-line programming and simulation of flexible track automatic drilling robot[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2012, 55(S1): 125–127, 132.
- [44] 钱大鹏. 铝合金、钛合金的机器人制孔关键工艺分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- QIAN Dapeng. Key Process analysis of aluminum and titanium alloy whit robot drilling system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [45] 俞鸿均. 面向自动钻铆机的飞机柔性工装设计技术研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2016.
- YU Hongjun. Research on aircraft flexible tooling design technology of automatic drilling and riveting machine[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2016.
- [46] 胡智元, 李西宁, 梁青霄, 等. 飞机中机身壁板预定位柔性工装技术研究[J]. *航空制造技术*, 2015, 58(S1): 122–125.
- HU Zhiyuan, LI Xining, LIANG Qingxiao, et al. Pre-position flexible tooling technology for aircraft fuselage panel[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015, 58(S1): 122–125.
- [47] 王巍, 俞鸿均, 高雪松, 等. 面向自动钻铆机的机身壁板模块化工装设计[J]. *航空制造技术*, 2015, 58(21): 34–38.
- WANG Wei, YU Hongjun, GAO Xuesong, et al. Modular tooling design of aircraft fuselage panel for automatic drilling and riveting machine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015, 58(21): 34–38.
- [48] 王建, 刘浩, 田威, 等. 面向飞机自动化装配的制孔末端执行器的设计[J]. *南京航空航天大学学报*, 2012, 44(S1): 19–22.
- WANG Jian, LIU Hao, TIAN Wei, et al. Design of drilling end effector for aircraft

automatic assembly[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(S1): 19-22.

[49] 郝小忠. 末端执行器制孔精度试验研究[J]. 工具技术, 2011, 45(11): 25-27.

HAO Xiaozhong. Experimental research of accuracy on end effector drilling[J]. Tool Engineering, 2011, 45(11): 25-27.

[50] 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.

[51] SMITH C, KARAYIANNIDIS Y, NALPANTIDIS L, et al. Dual arm manipulation—a survey[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2012, 60(10): 1340-1353.

[52] 张杨, 高明辉, 周万勇, 等. 自动钻铆系统中工业机器人协同控制技术研究[J]. 航空制造技术, 2013, 56(20): 87-90, 94.

ZHANG Yang, GAO Minghui, ZHOU Wanyong, et al. Research on industrial robot cooperative control technology for automatic drilling and riveting system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(20): 87-90, 94.

[53] 贺美华. 基于多传感器集成的机器人自动钻铆在线检测技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

HE Meihua. Research on on-line detection technology of robotic drilling and riveting system based on integration of multiple sensors[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and

Astronautics, 2013.

[54] OLSSON T, HAAGE M, KIHLMAN H, et al. Cost-efficient drilling using industrial robots with high-bandwidth force feedback[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2009, 26(1): 24-38.

[55] 公茂震, 袁培江, 王田苗, 等. 航空制孔机器人末端垂直度智能调节方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(10): 1400-1404.

GONG Maozhen, YUAN Peijiang, WANG Tianmiao, et al. Intelligent verticality-adjustment method of end-effector in aeronautical drilling robot[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(10): 1400-1404.

[56] 杜兆才. 数字化钻铆的曲面法向测量方法[J]. 航空制造技术, 2011, 54(22): 108-111.

DU Zhaocai. Measurement method for evaluating normal direction of surface for digital drilling and riveting[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(22): 108-111.

[57] SMITH J, KOCHHAR-LINDGREN D. Integrated hole and countersink inspection of aircraft components[R]. SAE Technical Paper, 2013.

[58] MALCOMB J R. Laser profilometry for non-contact automated countersink diameter measurement[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2014, 7(2): 263-268.

[59] 陈亚丽. 机器人自动钻铆系统离线任务规划方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.

CHEN Yali. Method research on robotic off-line task planning of robot automatic drilling and riveting system[D]. Nanjing: Nanjing University of

Aeronautics and Astronautics, 2015.

[60] 彭江涛, 谭红, 石章虎, 等. 基于MBD的飞机钻铆机器人离线编程技术研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(9): 55-59.

PENG Jiangtao, TAN Hong, SHI Zhanghu, et al. Research on the technique of MBD-based off-line programming for aircraft drilling and riveting robot[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(9): 55-59.

[61] ZHU W D, QU W W, CAO L H, et al. An off-line programming system for robotic drilling in aerospace manufacturing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(9-12): 2535-2545.

[62] 梁杰, 毕树生. 制孔执行器的安装方式对机器人性能的影响[J]. 机械工程学报, 2010, 46(21): 13-18.

LIANG Jie, BI Shusheng. Effects of drill end effector's mounted method on the robot performance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(21): 13-18.

[63] DEVLIEG R, SITTON K, FEIKERTT E, et al. ONCE (One-sided Cell End effector) robotic drilling system[R]. SAE Technical Paper, 2002.

[64] BRINKSMEIER E, FANGMANN S, MEYER I. Orbital drilling kinematics[J]. Production Engineering, 2008, 2(3): 277-283.

[65] Alerna Automation. Multifunction end effector[EB/OL]. [2017-10-10]. <http://www.alemaauto.fr/index.php/en/solutions-dautomatisation/effecteur-multifonction.html>[EB/OL].

通讯作者: 战强, E-mail: qzhan@buaa.edu.cn。

## Research Status of Robot Drilling and Riveting System and Its Applications

ZHAN Qiang, CHEN Xiangzhen

(Robotics Institute, Beihang University, Beijing 100191, China)

**[ABSTRACT]** Riveting is the main connection mode in aircraft assembly. High efficiency and high quality drilling and riveting technology is the key to improve the assembly quality and assembly efficiency of aircraft. With its high flexibility and low cost, the robot drilling and riveting system has gradually entered the field of aircraft assembly and becomes a new force in the automatic drilling and riveting system. Firstly, the research status and application of robot drilling and riveting system at home and abroad are introduced and analyzed. Then, the main problems existing in the robot drilling and riveting system at home are summarized. Finally, the key technologies to be solved in this area are summarized, which provide reference for the researchers.

**Keywords:** Robot drilling and riveting; Manual drilling and riveting; Automatic drilling and riveting; Aircraft assembly; Drilling and riveting quality

(责编 文竹)