

# 国外航空领域机器人技术发展现状与趋势分析

祁 萌, 李晓红, 高彬彬

(北方科技信息研究所, 北京 100089)

**[摘要]** 近年来,以工业机器人为代表的智能制造装备的发展受到国外航空制造业的高度关注。分析了航空制造领域扩大机器人应用的必要性,并阐述了波音、空客等国外领先航空制造商扩大机器人应用的主要发展模式,重点从喷涂、焊接、装配、复合材料构件成型与机械加工等方面分析了航空制造领域机器人最新应用现状以及重点应用方向,在此基础上分析了机器人技术发展趋势。全面了解掌握国外领先航空制造商推广应用工业机器人的主要发展策略、当前应用现状及未来发展方向,对于推动我国航空领域机器人技术发展起到重要借鉴作用。

**关键词:** 航空制造; 工业机器人; 协同机器人; 装配; 复合材料加工; 3D 打印

## Development Status and Trend Analysis of Robot Technology in Foreign Aviation Field

QI Meng, LI Xiaohong, GAO Binbin

(Northern Science and Technology Information Institute, Beijing 100089, China)

**[ABSTRACT]** In recent years, The development of intelligent manufacturing equipment represented by industrial robots has been paid great attention by foreign aviation manufacturing industry. This paper analyzes the necessity of expanding the application of robots in the field of aviation manufacturing. The main development modes of expanding robot application by leading foreign aviation manufacturers such as Boeing and Airbus are described, The latest application status and key applications direction of robot in aviation manufacturing field are analyzed from spraying, welding, assembling, composite component forming and machining. On this basis, the development trend of robot technology is analyzed. Fully understand and master the main development strategies of leading foreign aviation manufacturers to promote the application of industrial robots, current application status and future development direction, which plays an important role in promoting the development of robot technology in China's aviation field.

**Keywords:** Aviation manufacturing; Industrial robot; Cooperative robot; Assembly; Composite material processing; 3D printing

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.12.097

在全球智能制造发展热潮背景下,以工业机器人为代表的智能制造装备的发展受到国外航空制造业的高度关注。为应对全球航空业订单不断增长的需求,在焊接、成形、装配等航空制造领域大量部署应用机器人技术已成为波音、空客等国外知名航空制造商一致认同的技术途径之一。机器人技术的广泛应用,不仅对提升飞机研制生产效率和质量、降低生产成本、提高综合性能等方面发挥着重要作用,而且对于转变飞机研制生产模式,提升航空制造业智能化水平,实现产业转型升级发展,具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。

## 1 广泛应用机器人是航空制造业实现产业升级的必然选择

### 1.1 扩大机器人应用是航空制造商满足高速发展内生动力所需

伴随经济的高速发展,全球范围内飞机订单数量

急剧增长。据波音公司预测,到 2023 年世界商业航空飞机新增数量将翻番,待建飞机数量将超过 35000 架,市场规模约 4.8 万亿美元。波音、空客等大型航空企业从 2015 年起就计划要持续增加飞机产量。波音公司计划 3 年内使波音 737 飞机产量实现从 42 架 / 月增加到 52 架 / 月,波音 787 飞机产量从 2016 年的 12 架 / 月增加到 2020 年 14 架 / 月的目标。空客公司也计划增加 A320 飞机产量,2018 年从 42 架 / 月增加到 50 架 / 月<sup>[1-2]</sup>。

为实现上述目标大范围部署应用机器人技术已成为解决现有制造能力与需求不匹配问题有效的技术途径之一。波音、空客等全球知名航空制造商已在机身、大型机翼结构件、短舱、塔架、风扇罩、推力反向器等飞机核心构件的制造中广泛地应用机器人<sup>[2-3]</sup>。

## 1.2 扩大机器人应用是航空制造商面对新一轮科技革命和产业变革的时代所需

在航空制造领域,传统的研制生产手段主要依靠工人技艺,存在严重的制造一致性差等问题,很难满足航空制造业现代化、柔性化的制造需求。随着以智能制造为核心的新工业革命的到来,工业机器人作为实现智能制造的关键技术之一,已被越来越多地引入航空制造工厂,由于其所具有的可重复性、高刚性和高精度等特点,在提高航空武器装备质量、保障人身安全、改善劳动环境、减轻劳动强度、提高生产率、节约原材料、降低生产成本等方面有着显著优势,显现出日益重要的作用。

机器人技术的广泛应用,是航空制造业向智能化迈进的一大标志,也是新时代航空制造业发展的必然趋势,对于转变飞机制造模式,加速航空制造企业智能工厂建设,提升航空制造业智能化水平,实现产业转型升级发展,意义深远,影响重大<sup>[3-4]</sup>。

## 2 广泛合作、注重创新,已成为国外航空制造商主要发展模式

### 2.1 与知名机器人厂商紧密联系,扩展机器人应用范围

在工业机器人领域,全球知名生产厂商主要集中在以日本、德国等发达国家,如日本发那科(FANUC)、安川电机(YASKAWA)、德国库卡(KUKA)、瑞典ABB公司等厂商生产的工业机器人已经成为一种工业标准在全球得到广泛应用。近年来,国外领先航空制造商通过与这些知名机器人厂商建立起紧密合作关系,不断扩展机器人在航空制造领域的应用范围。

波音公司与德国库卡、日本川崎重工等知名机器人厂商紧密合作开展专项研发,其中波音公司针对自身产品特点及应用中所需的各项关键技术,提出实用需求;机器人企业主要负责机器人本体技术及适用性技术开发。波音公司是最早开始选用喷涂机器人的航空制造商,随着机器视觉、精确定位、环境感知、人机交互等机器人关键技术水平的提高,机器人的应用范围已向自动化装配、复合材料加工等复杂精密制造领域应用扩展。空客也与日本川田工业公司、日本川田工业株式会社等机器人厂商开展了紧密合作,从2015年起就每年持续增加机器人的应用<sup>[3-4]</sup>。

### 2.2 重视新技术研发,引领工业机器人发展方向

作为推动下一代机器人技术开发及产业化的美国先进机器人制造创新机构,由美国卡内基梅隆大学(CMU)领导,旨在联合工业界、学术界、政府与非盈利组织成员等各界力量,围绕人机协同机器人、可移动机器人、人形机器人等下一代新型机器人技术,加速技术

革新步伐,引领机器人技术发展方向。波音、空客等国外领先航空企业作为该机构的重要成员,重视并积极推动机器人技术在航空业的引领作用,为下一代新型、前沿性机器人研发与产业化搭建桥梁<sup>[5]</sup>。

2016年2月,空客公司宣布与日本、法国相关机构合作成立的机器人联合实验室开发人形机器人,该种机器人能够进入飞机装配线上工人难以达到的工作区域,与工人协同完成复杂工作任务,这将是工业机器人应用的一次大变革,预计未来10~15年能将这种人形机器人用于工厂生产中,该项目目前重点研究采用先进计算算法,对机器人的环境感知和行为动作进行数字化仿真,提高机器人控制、规划和自学习能力<sup>[6]</sup>。空客公司还牵头开展了名为“飞机组装的未来探索”(FUTURASSY)的项目,使用两台由日本川田工业株式会社(Kawada)制造的人形机器人来承担飞机组装过程中的重复性工作,提升工厂自动化装配水平。

## 3 机器人在航空制造领域应用范围迅速扩展

近年来,随着对高效安全研制生产越来越高的要求,以及灵巧操作、自主导航、环境感知、人机交互等机器人关键技术水平的提高,在焊接、表面喷涂、钻孔等相对简单的传统工艺环节,机器人的应用迅速扩展;在装配、复合材料加工、3D打印等复杂精密制造领域,机器人的应用不断取得突破<sup>[7-8]</sup>。

### 3.1 飞机复杂结构件表面喷涂、焊接等制造环节应用普遍

喷涂、焊接等是飞机研制生产中应用最普遍的工艺技术。机器人的应用,可显著提高复杂结构件制造效率及质量一致性,消除对环境和工人健康的影响。

目前喷涂机器人已经实现飞机机身、尾翼、机鼻、舱门等飞机结构件的喷涂加工。波音公司采用日本川崎KJ314喷涂机器人进行波音777飞机的喷涂加工,KJ314喷涂机器人安装于高架基座或线轨上,能够实现180°旋转,使其在连续运动过程中一直处于工作区域范围内,相比普通喷涂机器人,该机器人的工作区域扩大了1倍,喷涂能力是普通喷涂机器人的2倍,无需额外垂直升降机,就可实现对直升机机身、飞机机翼等大型结构件的连续喷涂加工<sup>[2]</sup>。

采用焊接整体机身壁板代替传统的铆接机身壁板,可极大地减轻结构件重量、降低制造成本、提高生产效率,目前已成为大型航空企业飞机制造技术的发展趋势之一。美国月蚀航空公司在Eclipse-500型商务飞机上采用机器人搅拌摩擦焊实现了飞机蒙皮复杂曲面带筋壁板的焊接,单架飞机共用136m长的搅拌摩擦焊焊缝代替7378个铆钉,效率比自动铆接提高6倍,比手动铆接提高60倍<sup>[2]</sup>。

### 3.2 在自动化装配方面的应用不断取得突破

飞机装配过程中需完成大量钻铆、对接等操作,利用机器人代替人工进行自动化装配是提高飞机制造效率最有效的途径,波音、空客等知名航空企业近年来都将飞机装配线作为机器人的主要应用领域之一,旨在提升飞机装配的自动化程度,代替人工执行重复作业,将劳动工人解放出来承担更重要的任务。

2017年,波音公司与德国库卡公司联合开发的机身自动直立装置(FAUB)系统全面用于新型波音777X生产线,该系统可实现机器人在前、后机身内外部的协同作业,显著改善安全性和生产质量,并提高机身的生产效率。2017年,波音公司还与Electroimpact公司合作,针对波音787飞机机身装配开发出一个先进的多机器人协作单元——Quadbots,在机身两侧分别配备2台Quadbot同时工作如图1所示。4台机器人同时工作可大幅提高飞机机身装配效率,紧固件安装效率提升30%,且装配质量也显著提升<sup>[9]</sup>。

空客公司目前已使用了能够自主沿着飞机机身内部移动的轻量化单臂机器人,实现结构支架的流水线安装。空客公司计划安装具有多自由度的协作机器人,用于执行更复杂的工作。空客公司正在试验在A380方向舵装配线上使用双臂仿人机器人,这种仿人机器人将和工人一起进行铆接工作,致力于实现人机协同装配<sup>[10]</sup>。

### 3.3 开始用于大型复合材料构件成型与机械加工等领域

如今复合材料已经成为航空制造领域不可或缺的一部分,也是当前机器人技术中最具有吸引力的应用领域之一。目前,工业机器人已经实现了机翼、机身、整流罩等复合材料构件的自动铺丝和自动铺带,铺放过程的在线检测是发展重点;另外,复合材料构件高精度加工机器人已在飞机制造中获得应用。

波音公司在其波音777X、波音787等型号飞机结构件制造中,都采用了飞机结构件制造商Electroimpact公司等专门定制的纤维机器人系统,进行飞机复合材料结构件制造中的自动铺带和切割加工。空客公司也在其A350XWB飞机复合材料纵梁和机架制造中采用了纤维铺放机器人。庞巴迪公司已经在其C系列支线飞

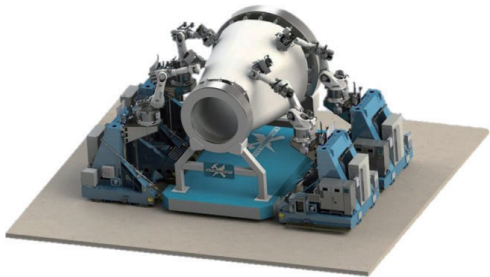


图1 Quadbots机器人单元  
Fig.1 Quadbot cell layout

机中采用了Coriolis复合材料公司开发的自动铺丝系统进行飞机复合材料构件制造<sup>[2]</sup>。

航空制造商美国轨道ATK公司与美国国家国防制造与加工中心、英格索尔机床公司合作开发出自动化复合材料结构检测系统(ACSIS),在该系统将一个标准的库卡KR-16机械臂与自动铺带设备集成起来,机器人/扫描头通过编程控制,沿着与铺放头相同的路径运动,可实现自动铺带过程的在线检测,对丝束褶皱、桥接、缝隙、重叠、杂质等制造异常进行检测。目前,轨道ATK公司已成功采用该系统对正在自动铺带加工的平面或复杂曲面飞机零件结构进行检测,缺陷检测通过率可达98.4%~99.7%<sup>[11]</sup>。

英国BAE系统公司在其F-35战斗机生产线上安装了全新的复合材料机器人全自动精确铤孔加工单元(图2),该套加工单元由多个协作机器人构成,不同机器人之间能够相互配合,自动高质量地完成移动、孔的精确定位、调整姿态、夹紧、铤孔等一系列工序,有效解决现有复合材料铤钻设备笨重、制孔效率低、质量一致性问题,每天能够完成铤孔的翼板数量从2个提高到20个,未来将广泛用于军用飞机复合材料构件的高效精确制孔,可为企业节省数百万英镑的生产成本<sup>[12]</sup>。

### 3.4 机器人技术与增材制造技术融合,开始用于飞机结构件制造

机器人技术与增材制造技术都是当前重点发展的智能制造关键技术,近年来综合运用上述两项技术优势的机器人增材制造平台研究应用活跃,开始用于飞机支架、支撑结构等的制造。

美国Arevo Labs公司建成世界上首台机器人增材制造系统,该系统采用熔融沉积成形技术,由六轴机器人快速3D打印超强热塑性复合材料部件,用于制造飞机支架、支撑结构以及无人机机身和机翼等复合材料零部件<sup>[13]</sup>。洛克希德·马丁公司和机器人集成商Wolf Robotics公司建成世界上首台“多机器人增减材混合设备(图3)”,该设备由两个机器人串行工作,一个机器人主要完成增材制造功能,挤压头逐层连续沉积聚酯纤维,实现零部件结构成形;另一个机器人具有多功能,采

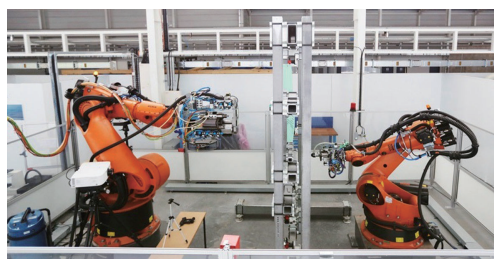


图2 机器人自动化铤孔加工单元  
Fig.2 Robot automatic counterbore processing unit

用一种工具快换装置在不同的加工头之间转换,以去除多余材料。该种机器人增材制造设备具备增材制造、减材加工和工艺过程监测、尺寸检查、热测量等多种功能,适用于多种材料加工,目前已经过航空装备零部件制造的验证<sup>[14]</sup>。

### 3.5 便携式、可移动、人机协同机器人成为航空制造领域重要发展应用方向

随着机器人在加工速度、精度、可靠性、负载等方面的性能不断提升,国外大型航空制造商开始着力研究将便携式、可移动、人机协同等机器人应用于大型复杂结构件、复杂空间位置的自动化、高效、精密制造,并取得显著突破。

2017年,美国洛克希德·马丁公司推出全球首台碳纤维复合材料混联构型便携式加工机器人 XMini (图4),旨在实现航空领域复杂结构、复杂空间位置的高效精密制造。该机器人具有如下优点:(1)质量轻、便携性强,设备总重仅为 250kg,无需重型搬运机械和特殊工具即可完成拆解组装;(2)尺寸小,空间可达性强,可进入到工人难以到达的复杂空间,提高加工质量与一致性。(3)刚度、加工精度高,其重复定位精度为  $\pm 5\mu\text{m}$ ,达到同类混联机器人的 2 倍以上。洛克希德·马丁公司表示,还将在 F-35 等战斗机生产中采用此设备<sup>[15]</sup>。

2017年,空客公司在一架空客 A320 飞机的  $7\text{m} \times 2\text{m}$  的碳纤维增强复合材料垂直尾翼面加工中验证了德国弗劳恩霍夫生产技术和应用材料研究所开发出的模块化、自适应、可移动机器人铣削系统(图5),该系统平均定位误差为 0.17mm,实现了机器人协同进行大型碳纤维复合材料零部件的高精度加工,提升了大型复合材料构件的加工效率和加工质量、降低了加工成本<sup>[16-17]</sup>。

英国 GKN 航空旗下荷兰福克(Fokker)公司研究采用人机协同机器人完成 A350 外襟翼钻孔操作的可行性以及与人协同工作的安全性,在与人工协同工作模式下,其移动速度减小到 250mm/s,力矩大小也有所控制,以确保工人安全。此项研究选用德国库卡公司的 7 轴机器人 LBR iiwa,该机器人基于人类手臂设计,具有极高的灵活性、精确度和安全性等特征,功能很接近人类手臂,可在适当位置进行灵活操作和控制。同时,所有轴都具有防碰撞功能,配有集成的关节力矩传感器,在它碰到人时会自动远离<sup>[18]</sup>。

## 4 机器人技术在航空制造领域发展趋势

随着工业机器人在航空制造中应用的越来越广泛,其加工速度、精度、可靠性、负载、易操作和易维护性等性能在不断提高,呈现出以下发展趋势。

(1)机械结构向着模块化、可重构化方向发展。模块化可重构机器人是机器人研究应用领域一个新的发展方向,它能够根据不同的任务和环境来选择不同的结构形式,具有良好的自组织、自适应能力,在各种未知环境和非结构环境下尤其适用<sup>[5]</sup>。

(2)以人为核心的作业系统,实现作业过程中人机协同发展。人机协同机器人柔性化程度更高,具有工序轻量化、小型化、精细化的特点,人机协同机器人可辅助工人一同工作,不仅可提高生产效率,还可进一步提高



图3 多机器人增材减材混合设备  
Fig.3 Multi-robotic machine performing additive and subtractive machining simultaneously



图4 XMini混联加工机器人  
Fig.4 Xmini hybrid processing robot



图5 可移动机器人系统正在进行A320飞机复合材料垂尾翼面加工  
Fig.5 Mobile robot system machining a shell of an A320 vertical tail plane

机器的稳定性和安全性<sup>[5]</sup>。

(3) 在有类走动和其他机器运行的制造环境中, 机器人可对路径规划、自主移动及动态障碍物规避作出快速响应, 实现机器人在动态制造环境中对其尺寸和配置及其需规避的障碍物等的状态感知、自主移动<sup>[5]</sup>。

(4) 控制系统向开放化、高集成度方向发展。通过采用PC机的开放型控制系统, 便于标准化、网络化, 控制系统器件集成度会越来越高, 控制柜将越来越小巧。

## 5 结论

当前, 我国航空装备产品的发展正处于加速创新阶段, 装备性能的提高和功能的拓展, 对材料、工艺、质量、效率、可靠性等要求不断出新, 推广应用机器人的需求迫切、意义重大。如: 航空领域喷涂、装配等制造过程, 由于工作量大、空间位置复杂等原因, 迫切需要加工精度高且灵活的自动化设备来提高效率, 降低成本, 保障工人安全。国外大型航空制造商围绕便携式、可移动、人机协同等未来重点发展的机器人技术, 积极谋划, 大胆布局, 加速技术革新步伐, 目前有些机器人已可替代人工或固定式专用机床, 根据制造任务灵活配置, 经济、快速地响应生产需求变化。但目前我国航空制造业机器人的普及程度与国外航空制造业比还有很大差距, 应借助“中国制造2025”提供的战略契机, 将工业机器人在航空制造领域的发展和应作为航空制造业发展的一个重大问题, 集中相应资源和力量加以解决; 工业机器人技术的大范围应用, 不仅对于转变飞机制造模式, 提高航空制造水平具有重要意义, 而且对于整个国防制造领域也可起到重要的示范引领作用。

## 参考文献

- [1] Manufacturing News. Assembly automation takes off in aerospace industry[EB/OL]. [2015-04-13]. <http://news.d2p.com/assembly-automation-takes-off-in-aerospace-industry/>.
- [2] Robotic Industry Association. Aerospace manufacturing on board with robots[EB/OL]. [2016-02-18]. [https://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Industry-Insights/Aerospace-Manufacturing-on-Board-with-Robots/content\\_id/5960](https://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Industry-Insights/Aerospace-Manufacturing-on-Board-with-Robots/content_id/5960).
- [3] International Federation of Robotics(IFR). World robotics 2017 Industrial Robots[EB/OL]. [2015-8-30]. <https://ifr.org/worldrobotics>.
- [4] Robotic Industries Association. Robots in aerospace applications[EB/OL]. [2012-07-31]. [https://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Industry-Insights/Robots-in-Aerospace-Applications/content\\_id/3591](https://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Industry-Insights/Robots-in-Aerospace-Applications/content_id/3591).
- [5] Manufacturing.gov. Robots in manufacturing environments manufacturing innovation institute [EB/OL]. [2016-06-19]. <https://www.manufacturing.gov/news/announcements/2016/06/dod-noi-robots-manufacturing-environments-manufacturing-innovation>.

[www.manufacturing.gov/news/announcements/2016/06/dod-noi-robots-manufacturing-environments-manufacturing-innovation](http://www.manufacturing.gov/news/announcements/2016/06/dod-noi-robots-manufacturing-environments-manufacturing-innovation).

- [6] Airbus Group. Airbus group to develop humanoid robots with french and japanese researchers.[EB/OL]. [2016-02-12]. <http://www.airbus.com/content/dam/corporate-topics/publications/press-release/Press%20Release-Airbus%20Group%20to%20Develop%20Humanoid%20Robots%20with%20Research%20Partners-EN.pdf>.
- [7] HANAN FISHMAN. The digital driven machine shop of the future [EB/OL]. [2016-01-03]. <http://www.mmsonline.com/>, 2016.
- [8] Advanced Manufacturing. Makes for a good defense[EB/OL]. [2015-03-03]. <http://www.advancedmanufacturing.co.uk>, 2015. 03.
- [9] EVERHART T. Neighboring mobile robot cell with drilling and fastening internation [EB/OL]. [2017-01-20]. [doi:10.4271/2017-01-2094](http://doi:10.4271/2017-01-2094).
- [10] Robotics Virtual Organization. A roadmap for U.S. robotics from internet to robotics, 2013 edition [EB/OL]. [2017-07-15]. <http://robotics-vo.us/node/332>, 2016-03-19.
- [11] JEFF SLOAN. Orbital ATK complete automated composites inspection system[EB/OL]. [2015-10-23]. <https://www.compositesworld.com/news/ncdmm-ingersoll-orbital-atk-complete-automated-composites-inspection-system>.
- [12] BAE. BAE systems: behind the scenes of the F-35 Fighter [EB/OL]. [2017-05-23]. <https://www.themanufacturer.com/articles/bae-systems-behind-the-scenes-of-the-f-35-fighter/>.
- [13] AREVO INC. Arevo labs introduces first-of-its-kind robotic additive manufacturing platform for 3D printing composite parts [EB/OL]. [2015-11-16]. <http://arevolabs.com/arevo-labs-introduces-first-of-its-kind-robotic-additive-manufacturing-platform-for-3d-printing-composite-parts/>.
- [14] MUELLER R, VETTE M, GEENEN A, et al. Improving working conditions in aircraft productions using human-robot-collaboration in a collaborative riveting process [EB/OL]. [2017-01-20]. 2017, <http://doi:10.4271/2017-01-2096>.
- [15] NEUMANN K. True mobile/portable drilling and machining, a paradigm shift in manufacturing[R]. SAE Technical Paper, 2017: 10.4271/2017-01-2084.
- [16] SUSEMIHL H, BRILLINGER C, STURMER S, et al. Referencing strategies for high accuracy machining of large aircraft components with mobile robotic systems [EB/OL]. [2017-01-21]. <http://doi:10.4271/2017-01-2166>.
- [17] MUIJS L, SNIJDERS M. Collaborative robot applications at GKN aerospace's fokker business [EB/OL]. [2017-01-20]. <http://doi:10.4271/2017-01-2091.1>.
- [18] WILL K. 5 robot Trends to watch for in 2016[EB/OL]. [2016-01-01]. <https://www.technologyreview.com/s/545056/5-robot-trends-to-watch-for-in-2016/>.

通讯作者: 祁萌, 硕士、助理研究员, 从事先进制造技术情报研究和战略研究, E-mail: 723298652@qq.com。

(责编 大漠)