

# 航空制造涂装机器人研究进展\*

赵景山<sup>1</sup>, 罗宏图<sup>1</sup>, 王立平<sup>1</sup>, 郭立杰<sup>2</sup>

(1. 清华大学机械工程系, 北京 100084;

2. 上海航天设备制造总厂, 上海 201100)

**[摘要]** 航空大型零部件的自动化涂装集机械、电子、控制、传感器及软硬件系统等技术为一体,是实现航空大型零部件自动化喷涂的关键制造工艺,也是我国争夺国际大飞机市场急需攻克的核心技术之一。总结了涂装机器人的研究现状,介绍了涂装机器人的最新进展,归纳了行业发展中面临的主要问题,探讨了未来机器人的发展趋势。

**关键词:** 涂装机器人; 自动化喷涂; 控制; 人工智能; 物联网

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.04.047



赵景山

博士、副教授,主要从事空间机构的结构设计与动态性能分析、车辆工程、工业机器人机构的型综合、运动分析与优化、动力学性能分析、工作空间分析、轨迹规划与运动控制等方面的研究。

2013年,德国政府提出了“工业4.0”战略,迅速引起了世界各国的广泛认同。不久,美国、日本、英国相继提出了各自的工业制造计划,而

我国的制造业顶层设计——“中国制造2025”也应运而生,为我国制造业制定了明确的战略目标。在这些宏大的制造业战略中,机器人有着不可或缺的地位。机器人技术是现代科学与技术交叉和综合的体现,机器人的应用水平反映了各国制造业的核心竞争力,代表着一个国家的综合科技实力和水平,许多国家都已把机器人技术列入本国21世纪高科技发展计划。因此,机器人的研究与应用已成为智能制造的最重要的研究方向,成为衡量一国工业化水平的重要标志<sup>[1-5]</sup>。同时,随着机器人技术的不断成熟,研究人员将它们广泛应用到生产生活的各个领域,代替人类完成众多艰苦、危险和不宜由人直接参与的工作,改善了人类的工作环境。其中,比较常见的有军用机器人、探测机器人、农业机器人和医疗机器人等<sup>[6-12]</sup>。

在航空制造业中,飞机表面涂层能有效防止飞机零部件的腐蚀,提高飞机的运行稳定性和可靠性。优质的涂层能大大减少飞机高速飞行时的空气阻力,降低油耗;同时,在恶劣的天气中,涂层能缓冲和减少雨雪

对飞机机身的冲击,提高飞机的使用寿命。在军用领域,飞机涂层还必须兼具隐身功能。我国第五代隐形战斗机要求在以高亚音速甚至超音速巡航时,涂层能有效吸收各种雷达的发射波。这对涂层的厚度、均匀性和隐身性能都提出了极高的要求<sup>[13]</sup>。相比于人工作业,机器人喷涂更加稳定、高效和均匀,具有更高的涂层质量。可见,自动化涂装是我国航空制造业发展的重要方向<sup>[14-15]</sup>。本文简要梳理喷涂机器人的发展脉络,归纳现有的技术难题,以期为我国早日突破关键技术,实现航空大型零部件自动化喷涂的产业化提供一些建议。

## 喷涂机器人发展现状

目前,波音和空客这两大国外飞机制造商在涂装领域均有着近60年的经验积累,但在整机喷涂时仍主要采用手工和半自动化的喷涂工艺(见图1)。其喷涂质量在很大程度上取决于工人操作的熟练程度,有时仍不免会发生脱漆、桔皮、流淌、针孔等外观问题,严重影响涂装质量和顾客满意度。自动化喷涂是民机提高外观质量和客户满意度的有力保障。在

\*基金项目:重大专项:喷涂机器人(20161820009)。

军用领域,为了提高第五代战斗机隐身涂层的质量和性能,美国军方与洛克希德马丁和达索两个公司合作研制了自动化涂装生产线。2011年,该涂装生产线正式投入使用,其中 DELMIA 机器人系统主要用于 F-35 的自动化喷涂,如图 2 所示,该套系统的喷涂流量误差为  $\pm 3\%$ ,保证 95% 以上的涂层测量点厚度满足公差要求<sup>[16-17]</sup>。

我国航空制造业在自动化涂装方面的研究起步相对较晚,目前国内航空制造业对自动化喷涂系统的开发仍处于探索试验阶段。2015年,上海飞机制造有限公司、清华大学和江苏长虹智能装备集团有限公司联合研发的混联机器人用于喷涂飞机大部件(见图 3),该机器人结构轻巧、刚度大、精度高,并通过将伺服电机布置在远离喷头的位置来提高喷涂机器人的防爆性能<sup>[18-19]</sup>。同年,上海飞机制造有限公司承担了“大型飞机自动化喷涂设备研制与应用示范”国家客机支撑项目,致力于提高国产飞机的整体喷涂质量和防护效

果。图 4 为研制的概念方案。2017年,清华大学与上海航天设备制造厂共同设计了龙门式三维正交的喷涂机器人(见图 5),该方案采用的过约束可伸缩机构刚度大,运动控制简单,能高精度完成航天大零部件的喷涂作业<sup>[20]</sup>。

喷涂机器人的研究热点主要集中在轨迹优化和喷枪的建模分析两方面。1986年,离线编程技术首次应用到喷涂领域,Klein<sup>[21]</sup>尝试设计了一套喷涂离线编程系统,在该系统支持下进行交互式设计,可有效优化喷枪的运动轨迹。Antonio<sup>[22]</sup>采用数值计算的方法研究了喷涂机器人的轨迹设计和优化问题,得到了目标泛函的最优解,并证明了运动轨迹的有效性。Arikan 等<sup>[23]</sup>建立了涂料的分

布方程,然后讨论了轨迹优化的方法,最后采用试验的手段验证了优化轨迹的可行性。2000年,Zaki<sup>[24]</sup>在轨迹设计方面另辟蹊径,用 CCD 摄像采集 CAD 数据并建立三维模型,最后完成了喷枪的轨迹规划。Sheng 等<sup>[25]</sup>系统地提出了喷枪三维空间路



图1 大飞机喷涂  
Fig.1 Coating airplane



图2 F-35战斗机喷涂  
Fig.2 Painting F-35 fighter



图3 混联机器人用于喷涂飞机两翼  
Fig.3 Coating wing with hybrid robot

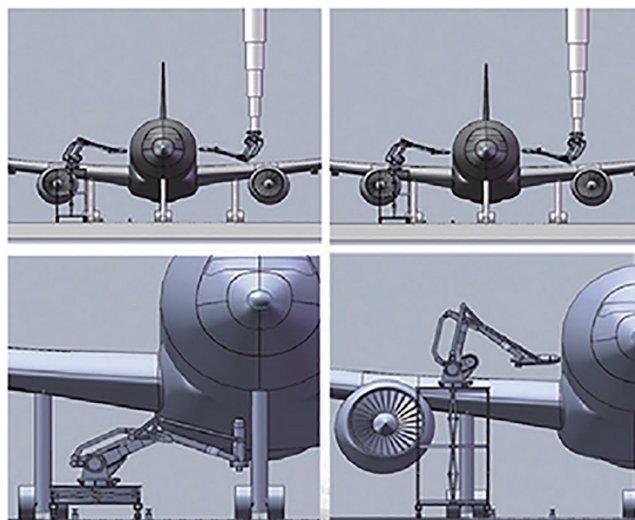


图4 整机自动化喷涂方案  
Fig.4 Automatic coating for airplane

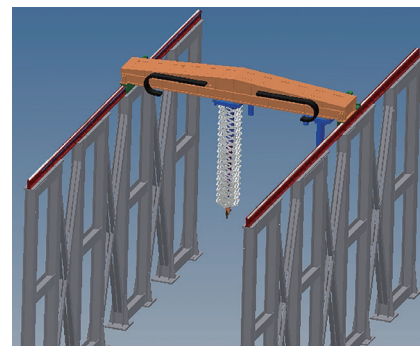


图5 超大零部件喷涂方案  
Fig.5 Coating structure for huge parts

径设计的相关原则。2004年, Sheng等<sup>[26]</sup>又提出在复杂曲面上进行分片,从而化繁为简,实现复杂曲面的喷涂作业。2010年, Gyorfi等<sup>[27]</sup>采用遗传算法和图搜索方法实现了喷涂轨迹的优化。Tewolde等<sup>[28]</sup>利用蚁群算法优化了复杂自由曲面上喷枪轨迹,提高了喷涂效率。Chen等<sup>[29]</sup>研究了喷枪塑料机轨迹间距的问题,主要解决了面片交界处的喷枪轨迹优化问题。Chen等<sup>[30]</sup>讨论了基于曲面CAD模型的喷涂机器人轨迹规划方法与Atkar方法的优缺点。

国内的喷涂机器人研究主要集中在机器人构型和运动仿真两方面。许多研究者深入分析了喷涂机器人的运动学和动力学问题,解决了喷涂机器人运动灵活性、工作空间以及奇异位形等问题。彭商贤等<sup>[31]</sup>在机器人手臂静动特性上进行了探索,有效解决了喷涂机器人运动精度问题。王战中等<sup>[32]</sup>利用矩阵方程和方向余弦对喷涂机器人进行了逆运动学分析,并通过试验验证了逆运动学结果。蔡蒂等<sup>[33]</sup>对喷涂机器人的运动空间进行了分析,并通过蒙特卡罗法和理论计算结果进行了对比。赵德安等<sup>[34]</sup>根据复杂曲面分片交界处喷枪空间路径相对于交界线的3种位置关系,探讨了涂层厚度计算方法和喷枪轨迹优化问题。范柯灵等<sup>[35]</sup>采用摄动法分析了机器人的位姿误差。曾勇等<sup>[36]</sup>提出了最小二乘圆弧逼近思想,在保证喷涂精度的同时有效减少了复杂曲面的分片数。陈伟华等<sup>[37]</sup>利用抛物线逼近法也对喷枪轨迹优化问题进行了研究。

飞机整机喷涂领域的另一个重要研究内容是重构飞机复杂形貌。Bausen等<sup>[38]</sup>结合现有飞机外表面对预喷涂问题进行了研究,提出了机器人自动喷涂方案。2012年, Ferreira等<sup>[39]</sup>利用激光对飞机复杂表面进行扫描,重构了飞机表面复杂形貌。Chai等<sup>[40]</sup>利用TOF相机实

现了三维模型表面快速重构。

## 未来发展的趋势

随着航空技术的发展,我国对精密制造的需求越来越密切,迫切需要拥有自主核心技术的机器人。经过多年的研究和积累,我国工业机器人存在的短板越来越清晰,例如自主规划和干涉碰撞检测依然依赖人工、生产准备周期长、不能实现柔性化生产等<sup>[41-46]</sup>。因此,未来航空领域的工业机器人需要能更好地适应小批量甚至单件的多样化、柔性制造要求,能在短时间内实现生产准备,缩短生产周期,提高机器人的使用率。同时,未来工业机器人在精度、稳定性等方面的要求也会越来越高,工业机器人在制造精度和连续生产方面的优势和特点将越来越明显。以下简述未来工业机器人发展的核心问题:

(1)高精度定位是精密制造的基础。航空制造业跟其他制造业最大的不同是航空制造的零部件尺寸都很大,很难用常规工装完成准确定位和固定。这个制造特点对工业机器人的定位精度提出了很高的要求,航空制造领域的工业机器人需要具备绝对的定位精度,关键技术是工业机器人末端在精密定位设备的引导下需实现准确定位。目前工业界比较常见的是激光跟踪仪和iGPS<sup>[47-51]</sup>,这两种设备能实现大范围内的位置定位,在局部测量中视觉、激光测距传感器也能发挥重要作用。未来必将有更多的新型精密测量定位技术应用到机器人上,进一步提高机器人的精密制造能力。

(2)精度补偿是确保精密制造的关键。末端精度补偿是弥补定位精度不足和消除误差传递与累计的关键技术。通过建立定位误差的数学模型和机器人末端的补偿算法,能有效提高末端的控制精度<sup>[52-53]</sup>。因此,未来的工业机器人将引入形变传感器,对关节、位置、温度等因素引起

的形变进行检测,然后通过建立的误差传递模型得到补偿参数,进而实现对伺服电机的补偿控制。

(3)智能轨迹规划是实现柔性制造的基本手段。航空制造中多样化零件要求机器人具备自适应制造的能力,降低单件生产准备时间,提高灵活性和实效性<sup>[54-58]</sup>。随着机器学习、神经网络等人工智能技术的成熟,智能轨迹规划变得越来越现实,提高工业机器人实现自主规划和柔性制造能力是先进制造技术发展的重大趋势。另外,随着云计算平台、大数据挖掘等技术的发展,越来越多的机器人将互联互通,实现信息共享和优化资源配置,提高工业机器人的快速分析决策、协同合作的能力。

## 未来发展的策略

国内喷涂机器人的发展在汽车行业的推动下实现了大规模工业应用,但很多企业都是耗费巨资从国外引进的喷涂生产线,缺乏独立自主的核心技术。同时,国外引进的喷涂机器人生产线与国内劳动者素质和生产水平不能很好匹配,导致高昂设备经常处于闲置状态。因此,根据我国劳动者素质和生产需求开发高可靠性高精度的喷涂机器人尤为重要。我国喷涂机器人的发展需要立足工业机器人行业基础,利用现有的工业机器人技术和优势实现长足发展。同时,结合人工智能与物联网、云计算等先进技术,加快完成机器人的升级换代。自动化涂装机器人产业属于高端制造业,前期研发、生产和制造需要投入高昂的成本,只有实现规模化生产才能显示出巨大的经济效益。因此,涂装机器人制造企业要立足国内巨大市场需求,快速占据国内市场,早日实现规模化生产。同时,涂装机器人制造能力与我国工业基础密切相关,需要我国政府和企业长远规划,致力于培育一批机器人制造相关的上下游企业,扶植一批具有核

心竞争力的机器人核心部件制造商、系统集成商和整机制造商等,让国内机器人制造拥有强大的工业基础,为我国喷涂机器人发展提供坚强后盾。另外,涂装机器人的长远发展需要我国更加致力于实现产学研紧密结合,尤其是加强机器人先进技术转化能力,抓紧在机器人集成应用工艺和应用成本等方面实现质的突破,提高机器人制造工艺水平,早日实现先进制造工艺和集成技术产业化。

### 1 规模化生产是涂装机器人实现更新换代的基础

涂装机器人是自动化涂装生产线中的具体操作装备,需要在应用中结合具体对象、环境和工艺,在生产中发现不足并进行改进设计和升级。通过市场需求不断促进喷涂机器人的稳定性、可靠性和加工精度的提高。同时,喷涂机器人的柔性化作业需要机器人与配套的工装夹具、检测装置等紧密协同,形成制造系统工程<sup>[59-60]</sup>。喷涂机器人在生产线中,其投入产出比、无故障时间是企业首要关注的问题,其次才是喷涂机器人价格与性能。因此,喷涂机器人在应用上需要坚持工艺优先的原则,努力实现产业规模化生产,降低单套机器人的生产成本。只有实现批量化生产方能在保证一定获利空间的条件下,在价格上也能与ABB这样的国际机器人制造企业具有竞争优势。同时,要在喷涂机器人应用领域加大调研力度,把握住机器人的行业趋势,实现产销兼顾,眼前利益与长远发展相结合。市场需求是驱动工业机器人发展的直接动力,我国已经提出“中国制造2025”的战略目标,在未来10年里工业机器人的需求将是持续增长的。当前我国很多企业喷涂工人的工作环境还是危险、繁重的,且大多为单调操作,很多年轻人不愿意进入到人工喷涂企业工作,导致企业招工难和人工成本升高。随着国内机器人规模化应用,机器人单

机成本会逐步降低。下面以某焊接机器人的产业化规模效应为例进行分析。随着我国机器人突破核心零部件技术障碍,上下游零部件生产商资源不断整合优化配置,材料加工件批量化生产的实现,1000台套的机器人单机生产成本将降低56%,如图6所示<sup>[61]</sup>。因此,我国要加速整合工业机器人产业链的上下游企业,大幅降低工业机器人和配套设备的制造成本,促进机器人成本和人力成本平衡点的到来,这是我国未来工业机器人实现快速发展的必由之路(如图7所示)<sup>[61]</sup>。

### 2 实现国产工业机器人稳定可靠工作是核心

机器人故障对企业生产影响巨大,提高机器人连续可靠工作的能力是提高生产效率和市场推广的重要

保障。因此,我国工业机器人要实现产业化应用,首先要在保证拥有良好的设备可靠度的前提下控制单机生产成本。机器人的大规模应用是降低单机成本最佳方案。这就需要机器人制造厂商能够根据产品制造流水线的需要提供一整套的自动化生产线。通过智能化的服务提高其运行的附加值,均摊前期高成本的投入。在工业机器人的工程应用中,其可靠性主要依赖于机构设计、材料、制造工艺、核心部件、控制算法和后期维护等。现阶段我国工业机器人的可靠性与国外仍有较大差距,尤其是高速转动的部件精度、插拔频繁的接口、反复使用的按钮和电子元器件等方面故障率居高不下,这些问题仍一直困扰着一线工作者。据统计,国外某工业机器人在生产线上的平均

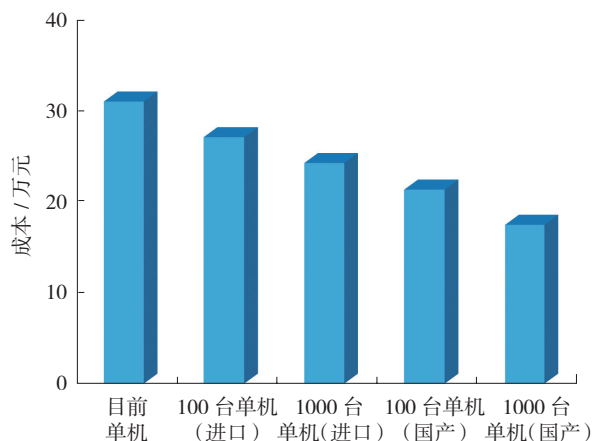


图6 工业机器人的规模与成本  
Fig.6 Scale and cost of industry robot

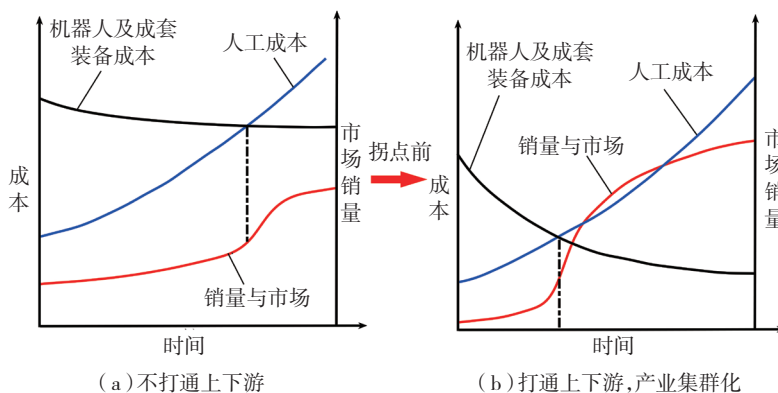


图7 成本与市场销量  
Fig.7 Cost and market volume

无故障时间大约为 50000h, 在 8 年的运行时间内单台工业机器人的故障率仅为  $0.2 \times 10^{-4}$ 。例如某厂配套了 100 台国外某机器人, 完成一个作业的时间周期为 120s, 作业流程采用串联方式, 则 100 台工业机器人的故障率为:

$$1 - (1 - 0.2 \times 10^{-4})^{100} = 0.002$$

假设该作业流水线的平均无故障时间为 500h, 则平均  $500 \times 60/2=15000$  台才会在该流水线中出现一次故障。若平均维修时间扩大 1 倍, 则相当于损失了  $2 \times 2 \times 60/2=120$  台。由此可见生产线对工业机器人可靠性的依赖程度之高。

### 3 实现工业机器人核心零部件国产化是手段

轻型高精度减速器、精密伺服电机和可靠稳定的驱动器、控制器等模块化的单元部件是工业机器人最主要的核心零部件, 对整体机器人的制造精度起着至关重要的影响<sup>[62]</sup>。以国内使用的机器人为例, 其关键零部件主要是电机和减速器, 如图 8 所示。

我国在工业机器人核心零部件领域长期处于模仿阶段, 研发投入不足, 现阶段还难以和国外机器人制造企业竞争。同时, 我国仍存在着重视系统研发, 忽视关键零部件制造和工艺的研究, 影响了我国工业机器人制

造实现产业化的进程。工业机器人的核心零部件占总体机器人制造总成本达到 70% (见图 9), 而我国高端工业机器人的核心零部件仍然依赖进口, 整机制造成本高, 大大制约了我国机器人制造业的发展, 成为我国由机器人应用大国转为机器人制造强国的瓶颈。因此, 我国机器人制造企业, 尤其是机器人关节机构、防爆电机和减速器等核心零部件制造商要加大研发投入和创新力度, 在制造工艺和产业化生产方面尽快突破关键技术, 实现我国关键零部件制造国产化。

### 4 结合人工智能、物联网等先进技术实现弯道超车

传统的工业机器人巨头已经在机器人领域深耕多年, 占据了国内外巨大的市场份额<sup>[63]</sup>。国内的工业机器人生产厂商要实现追赶甚至超越, 需要结合日渐成熟的人工智能、物联网、云计算和大数据等技术, 实现人工智能技术在制造领域的落地。目前, 国内在人工智能领域的研究水平与国外差距逐渐缩小, 甚至在某些应用领域处于世界一流水平<sup>[64]</sup>。因此, 人工智能技术与工业机器人技术的深度融合有利于我国从传统制造大国升级为智能制造强国。在传统制造业中, 人工智能技术起始于局部作业, 然后再逐渐改造升级, 并推广到整个制造生产线, 最后实现从物流、

库存、生产和销售流程的智能管理和制造, 建立起了智能工厂。

与此同时, 物联网的发展将现实世界和虚拟世界的联系变得越来越紧密, 使得人离物的距离越来越近, 使得生产越来越便捷<sup>[65]</sup>。物联网技术使机器人之间数据的传输和分析、资源配置更加高效便捷。而机器人生产过程中沉淀下来的海量数据通过大数据分析技术, 通过有针对性地处理和整合, 挖掘制造过程中存在的优势与不足, 为航空制造优化提供分析、设计、决策的可靠数据。另外, 云计算技术不仅能作为数据处理存储手段, 而且能共享不同制造设备间的数据<sup>[65-67]</sup>。可以设想, 未来的航空制造将融合物联网、大数据挖掘和云计算到生产、物流、销售的每个环节, 并通过人工智能永不间断地实现自主优化, 从而有效降低从生产制造到销售的每一个环节的成本, 实现资源的最优配置, 同时也能快速响应生产中的动态变化, 实现柔性化生产。因此, 工业机器人和物联网技术、大数据挖掘以及云计算等的创新融合, 使得未来制造企业的生产、运行的管理的网络越来越智能, 将每一个机器、每一个产品和企业紧密连通, 打通智能制造的全链条要素。

## 结论

我国航空制造业正在蓬勃发展,

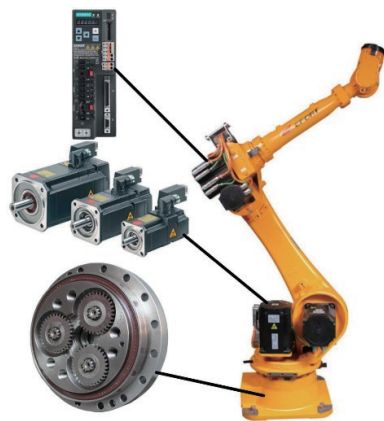


图8 工业机器人关键零部件  
Fig.8 Key parts of industrial robot

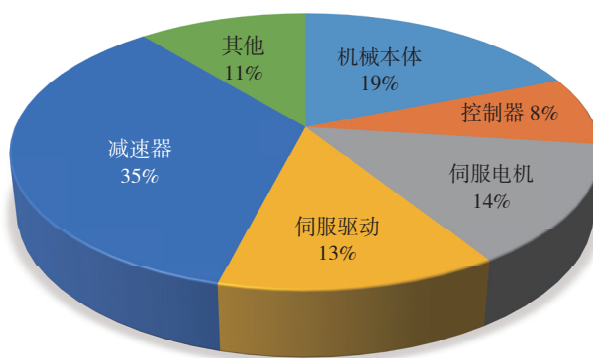


图9 工业机器人成本分析  
Fig.9 Cost analysis of industry robot

新材料、新工艺不断涌现,航空企业迫切需求高质量、低成本、柔性化制造的设备来提高企业竞争力。实现大飞机零部件和整机的高效高质量自动化喷涂,将为企业带来巨大的经济和社会效益,也是我国飞机制造企业与国际波音和空客两大巨头竞争大飞机市场的核心竞争力。随着我国工业机器人应用规模不断扩大,其应用成本不断降低,也将驱动国内企业不断突破核心零部件技术,形成良性循环。同时,在智能制造领域需要提前布局,加紧与人工智能、物联网、云计算的融合,尽快实现工业机器人的升级换代,实现喷涂机器人的后发追赶甚至超越。

### 致谢

感谢上海商用飞机制造公司提供图1,感谢江苏长虹智能制造有限公司提供现场喷涂试验图3,感谢清华大学机械工程系赵东捷、国汝君和刘向博士前期所做的工作以及所提供的宝贵资料和图片。

### 参考文献

[1] SIEGWART R, NOURBAKHSH I R, SCARAMUZZA D. Introduction to autonomous mobile robots[J]. *Industrial Robot*, 2004, 2(6): 645-649.

[2] YAZAWA T, MASUZAWA Y, TANABE T, et al. Industrial robot: US8882430[P]. 2014-11-11.

[3] DE F M, BECCHETTI A, PATRIGNANI A, et al. Extending an industrial robot controller: implementation and applications of a fast open sensor interface[J]. *Robotics & Automation Magazine IEEE*, 2005, 12(3): 85-94.

[4] ABELE E, WEIGOLD M, ROTHENBÜCHER S. Modeling and identification of an industrial robot for machining applications[J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2007, 56(1): 387-390.

[5] 顾震宇. 全球工业机器人产业现状与趋势[J]. *机电一体化*, 2006, 12(2): 6-9.

GU Zhenyu. The current situation and trend of global industrial robot industry[J]. *Mechanical & Electrical Integration*, 2006, 12(2): 6-9.

[6] 姬江涛, 郑治华, 杜蒙蒙, 等. 农业机器人的发展现状及趋势[J]. *农机化研究*, 2014(2): 1-4.

JI Jiangtao, ZHENG Zhihua, DU Mengmeng, et al. The development status and trend of agricultural robots[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2014(2): 1-4

[7] 李鹏, 胡梅. 国外军用机器人现状及发展趋势[J]. *国防科技*, 2013, 34(5): 17-22.

LI Peng, HU Mei. The present situation and development trend of foreign military robot [J]. *National Defense Science and Technology*, 2013, 34(5): 17-22.

[8] MARCHANT G E, ALLENBY B, ARKIN R C, et al. International governance of autonomous military robots[M]. Netherlands: Springer, 2015.

[9] KHURSHID J, HONG B R. Military robots - a glimpse from today and tomorrow[C]// *Control, Automation, Robotics and Vision Conference*, 2004. IEEE, 2004, 1: 771-777.

[10] KREBS H I, VOLPE B T, WILLIAMS D, et al. Robot-aided neurorehabilitation: a robot for wrist rehabilitation[J]. *IEEE Transactions on Neural Systems & Rehabilitation Engineering: A Publication of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society*, 2007, 15(3): 327-35.

[11] CATAERINE L, JAMES P M. Educating children with autism[M]. Washington: National Academy Press, 2014.

[12] STONE P, VELOSO M. Multiagent systems: a survey from a machine learning perspective[J]. *Autonomous Robots*, 2000, 8(3): 345-383.

[13] 王立亮. 浅谈影响民用飞机零件喷涂质量的因素[J]. *现代涂料与涂装*, 2014(6): 33-35.

WANG Liliang. A brief discussion about the factors that affect the quality of aircraft parts spraying[J]. *Modern Paint and Finishing*, 2014(6): 33-35.

[14] 翟晓伟. 大型乘用车生产线喷涂机器人规划设计与控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.

ZHAI Xiaowei. Design and control of spraying robot in large car product line[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.

[15] 刘亚威. 机器人喷涂在F-35的应用[J]. *航空科学技术*, 2011(5): 16-18.

LIU Yawei. The application of spraying robots on the F-35[J]. *Aeronautical Science and Technology*, 2011(5): 16-18.

[16] SEEGMILLER N A, BAILIFF J A, FRANKS R K. Precision robotic coating application and thickness control optimization for F-35 final finishes[J]. *SAE International Journal of Aerospace*, 2010, 2(1): 284-290.

[17] PONTICEL P. Lockheed goes with common interface for F-35 painting [EB/OL]. *Aerospace Engineering and Manufacturing*. (2011-04-14)[2018-01-05]. <http://www.sae.org/mags/sve/9701>.

[18] 朱利中. 飞机大部件喷涂机器人的设计与分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.

ZHU Lizhong. Design and analysis of a spraying robot for large-dimension aircraft components[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.

[19] ZHU L, WANG L, ZHAO J. Mechanism synthesis and workspace analysis of a spraying robot for airfoil[M]// *Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots II*. London: Springer International Publishing, 2016.

[20] GUO R J, ZHAO J S. Topological principle of strengthened connecting frames in the stretchable arm of an industry coating robot[J]. *Mechanism & Machine Theory*, 2017, 114: 38-59.

[21] KLEIN A. CAD-based off-line programming of painting robots[J]. *Robotica*, 1987, 5(4): 267-271.

[22] ANTONIO J K. Optimal trajectory planning for spray coating[C]// *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 1994, 3: 2570-2577.

[23] ARIKAN M A S, BALKAN T. Modeling of paint flow rate flux for elliptical paint sprays by using experimental paint thickness distributions[J]. *Mechanics Research Communications*, 2005, 26(1): 609-617.

[24] ZAKI A, ESKANDER M. Spray painting of a general three-dimensional surface[C]// *Proceedings of 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. New York: IEEE, 2000, 3: 2172-2177.

[25] SHENG W, XI N, SONG M, et al. Automated CAD-guided robot path planning for spray painting of compound surfaces[C]// *Proceedings of 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. New York: IEEE, 2000, 3: 1918-1923.

[26] SHENG W, CHEN H, XI N, et al. Optimal tool path planning for compound surfaces

- in spray forming processes[C]// Proceedings of THE 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE, 2004, 1: 45-50.
- [27] GYORFI J S, GAMOTA D R, MOK S M, et al. Evolutionary path planning with subpath constraints[J]. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 2010, 33(2): 143-151.
- [28] TEWOLDE G S, SHENG W. Ant colony optimization for tool path integration in spray forming processes[C]//Proceedings of 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. NEW York: IEEE, 2007: 2394-2399.
- [29] CHEN H, FUHLBRIGGE T, LI X. Automated industrial robot path planning for spray painting process: a review[C]//Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. New York: IEEE, 2008: 522-527.
- [30] CHEN H, FUHLBRIGGE T, LI X. A review of CAD - based robot path planning for spray painting[J]. Industrial Robot, 2009, 36(1): 45-50.
- [31] 彭商贤, 唐蓉城, 管桦, 等. 喷涂机器人手臂静动特性研究[J]. 机械设计, 1990(6): 46-50.
- PENG Shangxian, TANG Rongcheng, GUAN Ye, et al. Study on static characteristics of spraying robot arm[J]. Mechanical Design, 1990(6): 46-50.
- [32] 王战中, 张大卫, 安艳松, 等. 非球型手腕 6R 串联型喷涂机器人逆运动学分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2007, 40(6): 665-670.
- WANG Zhazhong, ZHANG Dawei, An Yansong, et al. Inverse kinematics analysis of the non-spherical wrist 6R series spraying robot[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2007, 40(6): 665-670.
- [33] 蔡蒂, 谢存禧, 张铁邹, 等. 基于蒙特卡洛法的喷涂机器人工作空间分析及仿真[J]. 机械设计与制造, 2009(3): 161-162.
- CAI Di, XIE Cunxi, ZHANG Tiezou, et al. Spatial analysis and simulation of spraying robot based on monte carlo method[J]. Machinery Design and Manufacture, 2009(3): 161-162.
- [34] 赵德安, 陈伟, 汤养. 面向复杂曲面的喷涂机器人喷枪轨迹优化[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2007, 28(5): 425-429.
- ZHAO Dean, CHEN Wei, TANG Yang. Optimization of spray gun trajectory for complex curved surfaces[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2007, 28(5): 425-429.
- [35] 范柯灵, 张铁, 蔡蒂. 六自由度喷涂机器人位姿误差分析[J]. 机电产品开发与创新, 2008, 21(1): 18-19.
- FAN Keling, ZHANG Tie, CAI Di. The position and pose error analysis of a six degrees of freedom spray robot[J]. Development & Innovation of Machinery, 2008, 21(1): 18-19.
- [36] 曾勇, 龚俊, 陆保印. 面向直纹曲面的喷涂机器人喷枪轨迹优化[J]. 中国机械工程, 2010(17): 2083-2089.
- ZENG Yong, GONG Jun, LU Baoyin. Optimization of spray gun trajectory on rounded curved surface[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010(17): 2083-2089.
- [37] 陈伟华, 张铁, 周伟, 等. 喷涂机器人轨迹规划的研究[J]. 机床与液压, 2009, 37(3): 16-17.
- CHEN Weihua, ZHANG Tie, ZHOU Wei, et al. Research on the trajectory planning of spraying robot[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2009, 37(3): 16-17.
- [38] BAUSEN D, KUHLENSCHMIDT B, HAUSMANN K, et al. Device and method for pretreating exterior surfaces of an aircraft to be painted: US8481884[P]. 2013-07-09.
- [39] FERREIRA M, MOREIRA A P, NETO P. A low-cost laser scanning solution for flexible robotic cells: spray coating[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(9-12): 1031-1041.
- [40] CHAI X, WEN F, CAO X, et al. A fast 3D surface reconstruction method for spraying robot with time-of-flight camera[C]//Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. New York: IEEE, 2013, 823: 57-62.
- [41] 石勇. 中国装备制造业: 基础技术是短板[J]. 经济导刊, 2015(6): 72-74.
- SHI Yong. China's equipment manufacturing industry: the basic technology is the short board[J]. Economic Herald, 2015(6): 72-74.
- [42] 沈谦, 张正良, 吴海燕. 装备制造业补短板关键在率先智能化[J]. 浙江经济, 2016(11): 25-27.
- SHEN Qian, ZHANG Zhengliang, WU Haiyan. The key to the manufacturing of equipment manufacturing is the intelligence[J]. Zhejiang Economy, 2016(11): 25-27.
- [43] 小聂. “中国制造 2025” 填补短板正当时[J]. 中国设备工程, 2015(6): 22-25.
- XIAO Nei. It is time to fill the shortcoming to accomplish 'Made in China 2025' [J]. China Plant Engineering, 2015(6): 22-25.
- [44] 张洁, 吕佑龙. 智能制造的现状与发展趋势[J]. 高科技与产业化, 2015, 11(3): 42-47.
- ZHANG Jie, LÜ Youlong. The present situation and development trend of intelligent manufacturing[J]. High-Technology & Industrialization, 2015, 11(3): 42-47.
- [45] 赵洪武, 周宏进, 曹可军. 浅谈工业机器人在制造业中的应用[J]. 科技与企业, 2013(10): 282.
- ZHAO Hongwu, ZHOU Hongjin, CAO Kejun. The application of industrial robot in manufacturing industry[J]. Technology & Business, 2013(10): 282.
- [46] 蔡自兴, 郭璠. 中国工业机器人发展的若干问题[J]. 机器人技术与应用, 2013(3): 9-12.
- CAI Zixing, GUO Fan. Some problems of industrial robots in China[J]. Robot Technique and Application, 2013(3): 9-12.
- [47] 张春富, 张军, 唐文彦, 等. 激光跟踪仪在大尺寸工件几何参数测量中的应用[J]. 工具技术, 2002, 36(5): 26-28.
- ZHANG Chunfu, ZHANG Jun, TANG Wenyan, et al. The application of laser tracker in geometrical parameter measurement of large size workpiece[J]. Tool Engineering, 2002, 36(5): 26-28.
- [48] 任永杰, 郑继贵, 杨学友, 等. 利用激光跟踪仪对机器人进行标定的方法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(9): 195-200.
- REN Yongjie, ZHU Jigui, YANG Xueyou, et al. A method of calibrating a robot with a laser tracker[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(9): 195-200.
- [49] 王巍, 黄宇, 庄建平. 激光跟踪仪在飞机装配工装制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2004, 47(12): 81-84.
- WANG Wei, HUANG Yu, ZHUANG Jianping. The application of laser tracker in aircraft assembly fabrication[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2004, 47(12): 81-84.
- [50] DEPENTHAL C. Path tracking with IGPS[C]//International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. Zurich, 2010: 1-6.
- [51] HADA Y, TAKASE K, OHGAKI K, et al. Indoor navigation of multiple mobile

- robots in a dynamic environment using iGPS[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, New York: IEEE, 2002, 3: 2682-2688.
- [52] 刘军, 张立安. 基于末端执行器视觉系统的制孔精度补偿技术浅析[J]. 才智, 2013(18): 210-211.
- LIU Jun, ZHANG Li'an. A brief analysis of hole precision compensation technology based on end-effector vision system[J]. Intelligence, 2013(18): 210-211.
- [53] 曲巍威, 董辉跃, 柯映林. 机器人辅助飞机装配制孔中位姿精度补偿技术[J]. 航空学报, 2011, 32(10): 1951-1960.
- QU Weiwei, DONG Huiyue, KE Yinglin. The precision compensation technique of the configuration hole in the robot assisted plane[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(10): 1951-1960.
- [54] 林胜. 柔性制造技术及其发展[J]. 航空制造技术, 1999, 42(5): 13-18.
- LIN Sheng. Flexible manufacturing technology and its development[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1999, 42(5): 13-18.
- [55] 郭恩明. 国外飞机柔性装配技术[J]. 航空制造技术, 2005, 48(9): 28-32.
- GUO Enming. Foreign aircraft flexible assembly technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005, 48(9): 28-32.
- [56] 许国康. 大型飞机自动化装配技术[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 13-13.
- XU Guokang. Large aircraft automation assembly technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 13-13.
- [57] TAMAS K, SEBASTIAN L, FERNANDO G, et al. A flexible costing system for flexible manufacturing systems using activity based costing[J]. International Journal of Production Research, 2000, 38(7): 1615-1630.
- [58] BREWER M, WESTBROOK J. The introduction of automation to an aerospace contractor: a case study—the flexible manufacturing cell[J]. Engineering Management Journal, 1994, 6(3): 9-14.
- [59] 石林. 焊接机器人系统集成应用发展现状与趋势[J]. 机器人技术与应用, 2016(6): 17-21.
- SHI Lin. Application development status and trend of welding robot system integration[J]. Robot Technique and Application, 2016(6): 17-21.
- [60] 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 technology of automatic riveting system for robot[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(9): 38-42.
- [61] 王田苗, 陶永. 我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J]. 机械工程学报, 2014, 50(9): 1-13.
- WANG Tianmiao, TAO Yong. Research status and industrialization development strategy of chinese industrial robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(9): 1-13.
- [62] 晓雷. 国产工业机器人步入快速“生长期”[J]. 中国设备工程, 2014(11): 10-15.
- XIAO Lei. Domestic industrial robots step into the fast "growing period"[J]. China Plant Engineering, 2014(11): 10-15.
- [63] 张宇. 国外工业机器人发展历史回顾[J]. 机器人产业, 2015(3): 68-82.
- ZHANG Yu. Development history of industrial robots in foreign countries[J]. Robot Industry, 2015(3): 68-82.
- [64] 曹承志. 人工智能技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- CAO Chengzhi. Artificial intelligence technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [65] 王保云. 物联网技术研究综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(12): 1-7.
- WANG Baoyun. Overview of Internet of things technology[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2009, 23(12): 1-7.
- [66] 张建勋, 古志民, 郑超. 云计算研究进展综述[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(2): 429-433.
- ZHANG Jianxun, GU Zhimin, ZHENG Chao. Overview of the progress of cloud computing[J]. Application Research of Computers, 2010, 27(2): 429-433.
- [67] 吴吉义, 平玲娣, 潘雪增, 等. 云计算: 从概念到平台[J]. 电信科学, 2009, 25(12): 1-11.
- WU Jiayi, PING Lingdi, PAN Xuezheng, et al. Cloud computing: from concept to platform[J]. Telecommunications Science, 2009, 25(12): 1-11.

通讯作者: 赵景山, E-mail: jingshanzhao@mail.tsinghua.edu.cn.

## Technology Progress in Aerial Spraying Robot

ZHAO Jingshan<sup>1</sup>, LUO Hongtu<sup>1</sup>, WANG Liping<sup>1</sup>, GUO Lijie<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer, Shanghai 201100, China)

**[ABSTRACT]** The automatic spraying of huge aviation components is an integration of machinery, electronics, controlling, sensing and software and hardwares. It is the key manufacturing process for automatically coating the large aviation components, and is one of the key technologies to compete in the international market for large aircrafts. This paper mainly introduces the state of current research on coating robots, the latest development of coating robot, and the major problems in development. It also discusses the development tendency of the technology in the future.

**Keywords:** Spraying robot; Automatic coating; Control; Artificial intelligence; Internet of things

(责编 铃兰)