

# 面向整机的机器人喷涂系统 回顾与展望\*

王国磊<sup>1</sup>; 王宁涛<sup>2</sup>; 陈 愚<sup>1</sup>

(1. 清华大学机械工程系, 北京 100084;

2. 中航工业成都飞机设计研究所, 成都 610091)

[摘要] 由于飞机尺寸大、重量大、工艺特殊,面向整机的机器人喷涂系统技术复杂度高,设备投资大,属于门槛较高的高端制造装备,有需求并掌握该项技术的企业仍属于极少数。对目前世界上具有代表性的整机喷涂系统进行了回顾,从中归纳出整机自动化喷涂的研制难点和共性关键技术,并在此基础上对整机喷涂系统的技术发展趋势做了简要的分析。

关键词: 飞机; 机器人; 喷涂

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.16.076



王国磊

博士,清华大学机器人及自动化实验室助理研究员,主要研究领域为机器人技术、智能制造技术与装备。近年来,一直围绕航空制造领域开展特种机器人与先进制造装备的研究,参与、承担国家自然科学基金等相关课题 10 余项,在国内外重要期刊及学术会上发表论文 10 余篇。

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61403226); 摩擦学国家重点实验室项目(SKLT09A03)。

涂装作业易燃易爆,且漆雾有毒有害,对工人的健康和生命安全威胁很大,而机器人喷涂不但可以替代人在有毒有害的环境下工作,而且具有喷涂质量稳定、避免人身伤害等优点。因此,经多年发展,喷涂机器人现已成为工业机器人的最典型应用之一,在汽车、电子、家具等行业得到了广泛使用。

但飞机喷涂,特别是大部件和整机的喷涂,由于航空产品大多尺寸庞大,远超常见工业机器人的工作空间,需要经过专门设计、改造或集成形成大型喷涂系统,技术复杂度和门槛较高,目前大多采用航空制造企业与科研院所联合研制的手段,没有形成大批量生产。

本文首先对整机自动化喷涂系统与设备的现有成果进行简要回顾,进而对整机喷涂系统研发和应用的关键技术进行总结和探讨,藉此对整机喷涂技术的未来发展路线进行了梳理,供业内人士参考。

## 代表性整机喷涂系统

### 1 波音公司的辅助喷涂系统

20 世纪 90 年代,为了对客机表面进行喷涂,波音公司将大型工作平台安装在塔式起重机上,喷涂时,工人登上工作平台,利用起重机将工作平台和工人运送到待喷涂区域附近,由工人手工完成喷涂任务,如图 1 所示。虽然这套系统运用了自动化技术,但目的只是将工人运送到指定位置,本质上还是人工喷涂,故对于保护工人的身体健康,提高涂层均匀性和重复性而言,帮助并不大。据报道,波音公司近期对此套系统进行了升级改造,将塔式起重机替换为固结于厂房顶端的龙门移动架。

### 2 SAFARI 系统

1994 年,美国华纳罗宾斯空军后勤中心和佐治亚罗宾斯空军基地联合发表了一份报告,在报告中介绍了其研制的飞机表面自动喷涂系统(Small Aircraft Finish Application

Robotic Installation, SAFARI)。该设备的结构特点是将喷涂机器人安装在具有可移动平台上,该平台能在马鞍形状导轨上移动,同时能带动机器人升高或降低、前伸或后退,从而实现了对飞机整个表面的全方位喷涂,如图1所示。这套系统主要用于F-15战斗机的表面修复喷涂任务,也能对其他翼展在13.1m以下的飞机进行涂装,如F-18、F-117、F-14、T-38等。

### 3 CASPER/LARPS系统

洛克希德·马丁公司应用了计算机辅助排机器人专用漆(Computer Aided Special Paint Expelling Robot, CASPER)系统,最初的目的是完成F-22战斗机部分组件的喷涂,随着系统不断完善和集成,具备了喷涂中机身和整机的能力。

大型飞机机器人喷涂系统(Large Aircraft Robot Painting System, LARPS)是这套系统的前身,最初在廷克空军基地用于涂层去除,2001年经美国桑迪亚国家实验室改造后用于F-22机身表面的喷涂。

CASPER和LARPS系统的结构组成类似,均在一个可以大范围移动的无人搬运车(Automatic Guided Vehicle, AGV)平台上安装有平面关节型机器人(Selective Compliance Assembly Robot Arm, SCARA)结构的升降台,升降台末端安装有6轴喷涂机器人,通过移动平台和升降台的协调运动,将机器人运送至待喷涂区域附近进行作业。

### 4 RAFS系统

除此之外,比较具有代表性的成果还有洛克希德·马丁公司制造技术部开发的机器人部件精整系统(Robotic Component Finishing System, RCFS)和机器人飞机精整系统(Robotic Aircraft Finishing System, RAFS)<sup>[1]</sup>。RCFS主要完成对F-35的垂尾、平尾和其他小部件的自动化喷涂,而RAFS主要用于对全机状态

下的F-35战斗机进行喷涂,如图2所示。

RAFS系统由飞机定位装置、涂料输送系统、三坐标移动单元等组成,其中机身两侧的机器人安装在水平移动导轨上,尾部的机器人另加备了垂直导轨以能够喷涂飞机背部。RAFS系统采用离线编程方法进行作业规划,即基于飞机的三维模型,利用专门的路径规划软件生成机器人轨迹并仿真模拟,极大地减轻了机器人编程的难度和工作量。此外,这套喷涂系统专门设计了飞机定位装置,提高了喷涂程序的复用性。

### 5 AFADS

为了取代在希尔空军基地服役超过20年的老旧去漆系统,美国西南研究院研制了先进战斗机描绘系统(Advanced Fighter Aircraft Depaint System, AFADS)系统。AFADS系统由两台独立机器人系统(分别布置在飞机的两侧)、飞机定位装置、操作控制室、漆层去除装置组成<sup>[2]</sup>。该系统在旧系统的基础上做了一系列的技术改进,如机器人的工作空间增大了3m、采用专门设计的机械手臂,末端执行器更灵活,可以更好地适应复杂的飞机表面等。目前,西南研究院正在围绕激光去漆技术、路径编程技术和移动平台做进一步的探索。

### 6 国内进展

随着旧战机更新换代和新战机量化生产的需求日益增长,国内航空制造企业自动化喷涂技术和设备的需求开始变得强烈起来,并引导了相关技术的发展和进步,如清华大学研制的超长特种喷涂机器人<sup>[3]</sup>,北京机械工业自动化研究所与沈飞研制的飞机尾翼自动喷涂系统等<sup>[4]</sup>,但面向整机状态喷涂的只有某制造厂与



图1 波音公司的辅助喷涂系统  
Fig.1 Assistant painting systems of Boeing SAFARI



图2 应用于F-35的RAFS系统  
Fig.2 RAFS system applied in F-35

清华大学联合研制的大型多机器人喷涂系统取得了实际应用,在结构、控制、测量、软件、工艺和系统集成方面积累了宝贵的经验<sup>[5-6]</sup>。此外,中国商飞也于2013年开始立项对民用飞机超大部件的自动化喷涂技术与系统进行研究<sup>[7]</sup>。

## 关键技术

应用机器人进行整机或大部件级别的喷涂必须考虑以下几个问题:

(1) 客机等民用飞机的长度动辄在30m以上,即使是小型飞机,长度和翼展通常也在8m以上,远大于常见工业机器人的作业空间。因此,如何使机器人能充分、完整地覆盖整个对象表面是研制整机喷涂系统要面临的第一个问题。

(2) 整机状态下的飞机重量达十几吨甚至几十吨,难以移动和精确定位,安全、可靠地定位飞机并方便、快捷地测量其位置和姿态是系统要考虑的第2个问题。

(3) 现代喷涂工艺对层厚、色差、表面缺陷等工艺要求非常高,即使是

相对来说小型的机械产品(如手机、汽车),也需要经验丰富的技师进行长时间的程序示教和调试,才能调出合格的机器人动作程序,但飞机尺寸庞大且造型复杂,依靠示教器完成机器人喷涂路径的规划,时间和难度是不可想象的。况且,对于批量制造行业来说,即使程序调试复杂也不是问题,因为一旦程序调试完成即可长期使用,然而飞机属于典型的多品种小批量生产,过长的程序调试时间容易导致系统工作效率降低。考虑到这些问题,面向航空产品特别是整机级别对象的机器人喷涂设备研制关键技术包括以下几个方面:

1 系统结构设计

系统方案和结构设计是整机喷涂系统最首要的内容,良好的方案和结构设计必须综合考虑对象尺寸、工艺需求和系统集成系统的作业空间、作业效率、实施成本和升级空间。

从现有整机喷涂系统的发展历程和实施效果来看,将关节式机器人搭载于移动平台上以完整覆盖大尺度、复杂结构的喷涂对象,并采用多台喷涂机器人组成多机器人喷涂系统以提高系统工作效率是最具效率和成本优势的方案。系统结构设计方面的关键技术包括:

(1) 移动变位机构。主要功能是将机器人运送到合适的喷涂站位,从移动方式上,现有整机喷涂系统的移动机构可以分为导轨式和AGV两种;从构型上看,有铺地式、龙门式和关节臂式等;从自由度数目看,可利用水平移动、垂直移动和旋转关节构成1~3个自由度不等的结构。不同的移动变位机构各有优势,对系统整体布局影响最大,需要根据对象尺寸和机器人工作空间确定。

(2) 多机器人分工和布局设计。当采用多台机器人组成喷涂系统时,必须结合对各机器人的分工和布局进行优化,这要求对实际对

象和使用需求非常清楚,且有非常丰富的实践经验。

(3) 车间设计。从生产流程和车间管理的角度对系统方案进行优化,设计多功能、生产线化、一专多能的喷涂系统专用车间是提高系统功效和生产效率的重要途径。

2 机器人设计和选择

设计上,喷涂机器人必须考虑安全防爆问题,以及涂料和空气管路的走线。非球形空心手腕结构在喷涂机器人上有比较多的应用,因为这种结构形式虽然在传动和运动学上更为复杂,但可以实现内部走线。考虑到ABB、Kuka、Fanuc、Yaskawa、D ü rr 等公司都有成熟的喷涂机器人产品,研制整机喷涂机系统也可以采用成品喷涂机器人进行系统集成,这种做法的优势在于可以缩短研发周期,且在可靠性、安全性上更有保障。但现有成品喷涂机器人对飞机等大尺度喷涂对象来说,工作空间普遍偏小,因此选择成品喷涂机器人时需要结合移动变位机构的设计对工作空间、重量等性能指标做妥善权衡。

3 编程与仿真

航空产品的大尺寸、复杂外形使得示教编程工作量和耗时过长,单件小批的生产模式又使得喷涂对象经常发生变化,因此方便、快捷的编程方法和可以对喷涂过程进行预览的仿真环境变得十分重要。借助离线编程系统(Offline Programming System, OPS)生成喷枪轨迹是减少机器人生产准备时间的重要手段。

机器人喷涂离线编程与仿真系统的框架如图3所示,其输入是喷涂对象的三维模型、工艺需求和喷涂对象与机器人的位置关系,规划器计算喷涂轨迹后由解释器在仿真环境下进行验证,即通过逆运动学计算机器人的实际运动,确保喷涂过程安全、可实现,然后将轨迹编译为机器人控制程序发送给控制器控制机器人进行实际喷涂。如果采用了移动变位机构,机器人工作空间分析、喷涂区域划分、机器人移动机构的运动等问题都是离线编程系统需要解决的问题<sup>[8-11]</sup>。

4 对象定位

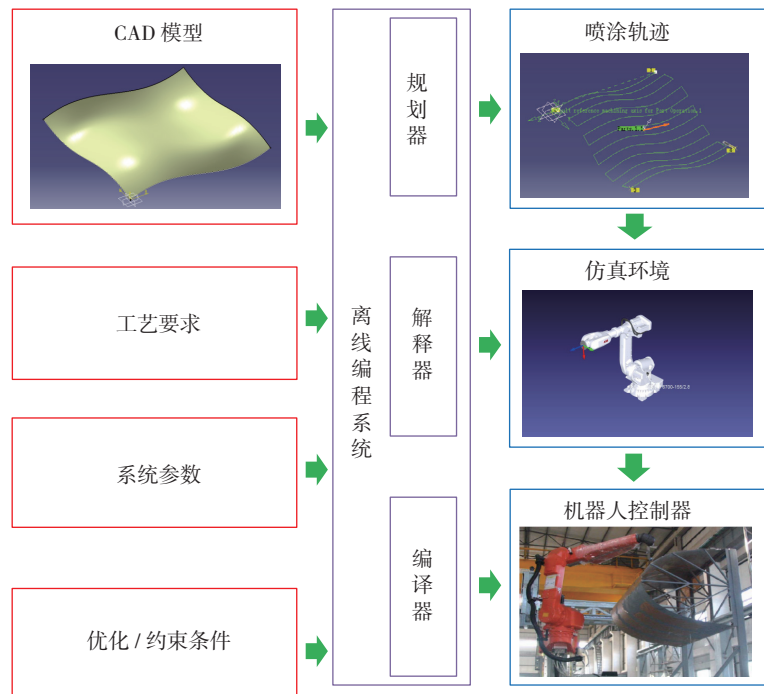


图3 喷涂机器人离线作业规划框架

Fig.3 Off-line programming framework of robotic painting

对象定位是由于飞机的大尺寸和大重量特性难以精确停靠,每次作业前对飞机停靠位置和姿态进行测量,以便将飞机的位置和姿态参数传送给离线编程系统,对喷涂轨迹加以修正。航空业常见的大尺度测量仪器有激光跟踪仪、iGPS等,但目前较先进的整机喷涂系统都集成了自身的定位装置,以降低系统对外部测量仪器的依赖,并减少测量过程中人为干预,提高定位自动化程度,缩短生产准备时间。集成定位系统设计取决于测量技术的选择,如接触式测量装置、激光测距技术和CCD相机等,每种测量技术都有自身的优势和局限。如视觉传感器成本最低,但其自身需要标定,且成像效果易受光线条件影响,对算法要求比较高。

将测量传感器集成在机器人末端,利用一个传感器测量多个标志点,从而减少测量传感器的数量是降低系统成本的有效方式,其本质是将机械臂当做测量臂,利用机器人运动学计算求得测量标识点的位置。

### 5 工艺方法与装备

目前,溶剂型涂料常用的喷涂方法包括空气喷涂、无气喷涂、混气喷涂、静电喷涂等。其中空气喷涂设备简单,易于操作,效率高,适应性强,是最为广泛的喷涂方式。空气喷涂设备主要分为3大部分:供气设备、供料设备和喷枪。供气设备提供所需要的高压雾化气源、扇形控制气源、枪针控制气源等;供料设备则提供涂料搅拌、涂料输送和控制等功能;喷枪安装在机器人末端,是涂料的雾化和涂敷的主要执行机构。

工艺装备上,空气喷涂存在较大涂料损耗,随着人们环保意识的增强,对减少污染、降低能耗日益重视,高上漆率和低能耗的工艺设备一直是喷涂技术进步的重要标志。从工艺方法上,保障涂层表面质量、附着力、厚度均匀性,以及减少过喷、避免浪费都是工艺研究的重

要内容。

## 未来新趋势

回顾整机喷涂系统的发展历程可以看出,整机喷涂技术在过去的十余年间取得了巨大的进展,但技术的进步是无止境的,现有喷涂系统在喷涂效能、操作性、安全性、可拓展性、设备柔性上还有进步空间。未来整机喷涂系统需要重点发展的关键使能技术包括:

### 1 更灵活安全的机械臂

由于飞机结构的特殊性,常见的6自由度工业机器人有时无法满足喷涂作业的需求,这意味着未来对专用、特种、非标喷涂机器人的需求会越来越强烈,因为只有针对具体对象和工艺需求进行深入的分析才能引领本体结构的创新设计。例如,冗余自由度设计可以使机器人具有更大的工作空间、灵活性更高,而具有关节力反馈能力的柔性机械臂在发生意外碰撞时更为安全。

### 2 更智能的编程系统

离线编程相对于示教来说已经极大地减少了程序调试环节的耗时和工作量,但现有的离线编程系统仍需要大量的人机操作,特别是喷涂路径优化、运动仿真、程序检查、程序修正等环节,因此在对工艺深入了解的基础上,将路径规划、机器人轨迹优化、干涉校验、工艺参数与过程优化等环节封装起来,并自动实现,将客

户端的操作和对人员的要求降到最低,是未来的发展方向。

### 3 对象定位与调姿机构

从现有整机系统使用经验看,使用定位调姿装置可减少飞机的定位误差,有利于缩短生产准备时间。但现有工装大多是针对具体对象专门设计的,若能在设计时充分考虑可重构性和柔性,使之适应不同尺寸和类型的产品,并形成软硬件相结合的移动工装,融合搬运、支撑、定位、调姿多功能于一体,不但可大大提高生产效率,且可降低工装的总体开销。

### 4 新工艺方法和装备

为了获得良好的喷涂质量,需要事先进行大量、反复的试验和调试,这一过程不但耗费大量的时间,而且过分依赖操作者的实践经验,因此深入开展机器人喷涂工艺方法研究,开发集成化工艺过程优化软件,支撑喷涂工艺参数和轨迹优化,对于保证喷涂作业质量稳定性、提高喷涂作业的标准化和规范化程度具有非常重要的指导意义。在喷涂装备上,现有喷涂装置在涂料混合、多种涂料切换以及上料、清洗、保障、监测等环节的自动化和规范化程度上还有提高空间。此外,飞机上存在很多大曲率甚至曲率突变曲面,保障这些区域的涂覆均匀性和上漆率也依赖于工艺方法和装备的进步。

### 5 多功能末端执行器

如图4所示,从工艺流程上看,

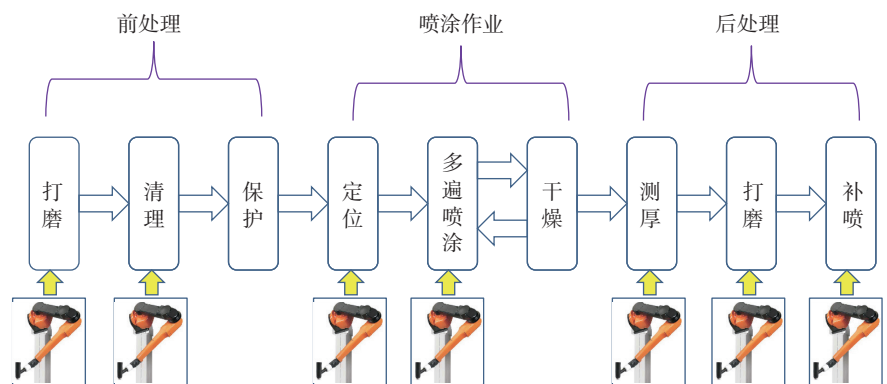


图4 涂装作业流程与机器人化探讨

Fig.4 Feasibility of complete robotic coating process

涂装作业可以大致分为前处理、喷涂和后处理 3 个主要过程,包括打磨、清理、保护、喷涂、干燥、测厚、修补等主要环节,喷涂在整个涂装过程中所占的工作量和耗时比例在 10% 左右,因此喷涂机器人研究不能局限于喷涂本身,将机器人技术拓展应用到整个涂装过程的其他环节,才能有效缩短整个涂装环节的时间,提高作业效率。从现有技术和设备的发展水平看,打磨、清理、测厚、修补等环节都可以探讨机器人化的可能性。

为了支撑这些过程,开发集成或能够快速更换测头、磨具、吸尘装置、清洗装置、测量装置、相机等元器件的多功能末端执行器有助于深化机器人在涂装作业中的应用。

### 结束语

尽管业内都意识到了机器人整机喷涂的价值和意义,也都积极进行了各种尝试和开发,但由于系统集成度和复杂度比较高,设备投资比较大,造成系统技术门槛比较高,属于高端制造装备,有需求并掌握该项技术的企业仍属于极少数,技术发展成熟度也没有达到标准工业机器人的水平,没有孕育出成熟的制造商和统一的行内标准。但需求是最强劲的牵引力,我们有理由相信在我国航空制造业高度发展的时代背景下,整机喷涂技术和设备将会取得快速进步,

在世界航空制造领域拥有自己的一席之地,这也符合发展具有我国特色的高端机器人技术和装备的大路线。

### 参考文献

- [1] 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, 2009, 2(1):284-290.
- [2] DAN H W, WIEDMANN S L, SOLOMON D P. A large-scale robotic system for depainting advanced fighter aircraft[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2011, 4(2):1125-1132.
- [3] 陈雁, 邵君奕, 张传清, 等. 复杂管道喷涂系统研制[J]. 机械设计与制造, 2009(11): 1-3.
- CHEN Yan, SHAO Junyi, ZHANG Chuanqing, et al. Complex pipeline coating system development[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(11): 1-3.
- [4] 赵宏剑, 王刚, 张波, 等. 飞机尾翼自动喷涂系统[J]. 制造业自动化, 2013, 35(2): 153-156.
- ZHAO Hongjian, WANG Gang, ZHANG Bo, et al. The wings of the aircraft automatic spraying system[J]. Manufacturing Automation, 2013, 35(2): 153-156.
- [5] 王朝晖, 陈慧, 吴聊, 等. 面向飞机表面喷涂的多层次控制程序结构[J]. 航空学报, 2013, 34(4):928-935.
- WANG Chaohui, CHEN Ken, WU Liao, et al. Multi-level control program structure for aircraft surface spray[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(4):928-935.
- [6] 缪东晶, 王国磊, 吴聊, 等. 自由曲

面均匀喷涂的机器人轨迹规划方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(10):1418-1423.

MIU Dongjing, WANG Guolei, WU Liao, et al. Trajectory planning for freeform surface uniform spraying[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2013, 53(10):1418-1423.

[7] 宋袁曾, 陈洁, 毛景. 大型飞机整机涂装自动化实施探讨与展望[J]. 航空制造技术, 2016(10):52-56.

SONG Yuanceng, CHEN Jie, MAO Jing. Discussion and prospects of trunk aircraft exterior automatic painting for large civil aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(10):52-56.

[8] 陈雁, 邵君奕, 张传清, 等. 喷涂机器人自动轨迹规划研究进展与展望[J]. 机械设计与制造, 2010, 2(2):149-151.

CHEN Yan, SHAO Junyi, ZHANG Chuanqing, et al. Developments and prospects of research on automatic trajectory planning for painting robot[J]. Machinery Design & Manufacture, 2010, 2(2):149-151.

[9] 吕世增. 空心非球型手腕喷涂机器人设计及关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.

LÜ Shizeng. Research on design and key issues for paint robot with hollow non-spherical wrist[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.

[10] 杨扬. 基于特种工件的大工作空间喷涂机器人设计与分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.

YANG Yang. The design and analysis of one huge work space spray painting robot used for special workpiece[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.

[11] SHENG W, CHEN H, XI N, et al. Tool path planning for compound surfaces in spray forming processes[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2005, 2(3): 240-249.

## Review and Prospects of Robotic Aircraft Painting System

WANG Guolei<sup>1</sup>, WANG Ningtao<sup>2</sup>, GHEN Ken<sup>1</sup>

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

2. AVIC Chengdu Aircraft Design & Research Institute, Chengdu 610091, China)

**[ABSTRACT]** There are only a few enterprises have requirements and really master aircraft robotic painting technologies until now, because of high technical complexity and huge investment caused by large size, large weight and special process demand of aircraft. In this paper, the representative systems in the world at present are reviewed firstly, then the essential and key technologies of developing aircraft robotic painting system are concluded, finally the future technology developing trends are briefly analyzed.

**Keywords:** Aircraft; Robot; Painting

(责编 古系)