

# 航空领域自动喷涂技术的应用现状与前景

张博文<sup>1</sup>, 任寿伟<sup>1</sup>, 王健<sup>1</sup>, 赵静<sup>1</sup>, 温泉<sup>1</sup>, 李体军<sup>1</sup>, 庞新宇<sup>2</sup>

(1. 国营四达机械制造有限公司, 陕西 咸阳 712200; 2. 太原理工大学机械工程学院, 太原 030024)

**摘要:** 随着航空工业的快速发展, 飞机服役环境越来越恶劣, 对表面性能要求越来越高, 其中喷涂是提高耐腐蚀性、抗氧化等性能的重要方法, 在航空领域应用广泛。相较于传统的人工喷涂方法, 自动化喷涂机器人具有高精度、高效率 and 厚度一致性等优势, 在飞机蒙皮、飞机发动机部附件等表面涂层的制备过程中发挥着越来越重要的作用。简述了自动化喷涂技术在航空领域的应用现状和研究进展, 在此基础上探讨自动化喷涂技术面临的主要技术挑战和未来发展趋势。

**关键词:** 航空领域; 自动喷涂技术; 机器人; 表面喷涂; 航空制造

**中图分类号:** V262 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)02-0064-08

由于飞机在多变和恶劣的环境中运行, 因此其表面性能要求优于一般工业产品, 如抵抗极端天气(酸雨、冰雹)腐蚀<sup>[1-2]</sup>、抵御高速流动空气磨损、减少雷达反射截面积<sup>[3]</sup>等性能要求。喷涂技术在提升航空部附件表面性能中发挥着关键作用, 其将涂料(油漆、粉末或其他材料)<sup>[4]</sup>通过喷枪或其他设备以雾状或粒子状的形式均匀地涂敷在零件表面, 为飞机部附件提供必要的防护。其中, 涂层厚度的均匀性对于确保其性能至关重要, 厚度不均匀将导致表面凹凸不平, 可能出现针孔、流挂、脱落、橘皮<sup>[5]</sup>等工艺缺陷, 影响外观平滑度和涂层性能, 甚至可能对飞机的飞行安全造成威胁。当涂层过薄时, 金属表面更容易受到环境的侵蚀, 会出现磨损与剥落, 从而缩短涂层使用寿命。当涂层过厚时, 涂层在实际使用中可能会出现裂纹, 这不仅造成材料不必要的损耗, 还会削弱涂层的保护功能。因此, 为保证涂层的高质量和高性能, 必须严格控制涂层厚度的均匀性<sup>[6]</sup>。传统的喷涂依赖于手工操作, 虽然手工喷涂灵活, 但也存在以下缺点。首先, 涂层的质量取决于工人的技能和经验<sup>[7]</sup>, 这导致不同工人作业时, 涂层容易出现厚度差异, 无法保证厚度均匀性。其次, 手工喷涂无法长时间作业, 效率相对较低, 成为

制约产能提升的瓶颈。此外, 手工喷涂工作环境中常存在挥发性的涂料, 对于人体有害, 尽管可以采取防护措施, 但长期接触仍会对工人健康产生不利影响, 无法满足日益增长的环保标准要求。随着我国航空制造业向自动化和智能化转型<sup>[8]</sup>, 对产品质量和安全性的要求日益提高。传统的手工喷涂方法逐渐显示出其局限性, 因此自动化喷涂系统替代手工操作已成为航空制造业发展的必然趋势, 以适应航空制造领域对于质量更高、效率更高的发展要求。本文旨在梳理自动化喷涂技术在航空领域的应用现状和发展脉络, 探讨自动化喷涂技术在航空领域面临的挑战, 最后提出了促进自动喷涂技术在航空产品制造中应用的建议, 以期望为自动化喷涂技术在航空领域的快速发展提供一些有益的建议。

## 1 自动喷涂技术概述

### 1.1 定义

自动喷涂技术是指利用自动化设备将涂料以雾化的形式均匀地喷涂在各种工件表面的工艺方法<sup>[9]</sup>。主要通过计算机编程预先设定好喷涂路径、速度、涂料流量等参数, 然后由机器人或机械臂自动执行喷涂任务, 两者相结合精确控制喷涂过程,

**收稿日期:** 2024-08-04

**基金项目:** 山西省重点研发项目(202102010101009, 202102010101006)

**作者简介:** 张博文(1998—), 男, 陕西宜川人, 硕士, 助理工程师, 研究方向为工业大数据分析以及装备智能运维; 任寿伟(1981—), 男, 陕西咸阳人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为航空装备维护与管理; 王健(1980—), 男, 陕西咸阳人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为航空装备维护与管理; 赵静(1983—), 女, 陕西咸阳人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为航空材料表面处理; 温泉(1989—), 男, 陕西咸阳人, 博士, 高级工程师, 研究方向为航空材料表面处理; 通信作者李体军(1990—), 男, 山东枣庄人, 博士, 工程师, 研究方向为航空产品表面处理及设备研制; 庞新宇(1984—), 女, 山西太原人, 博士, 教授, 研究方向为机械故障诊断。

以此实现高效率和高质量的涂层效果。喷涂过程中,系统还可以实时监控并调整喷涂参数,以适应不同部件的需求。

## 1.2 系统组成

自动喷涂系统主要由以下几部分组成。

(1)雾化喷涂系统:包括流量控制器、雾化器和空气压力调节等,负责将油漆雾化并均匀地喷涂到工件表面。

(2)机器人或机械臂:用于携带喷枪,按照预定路径进行喷涂。机器人或机械臂是自动喷涂系统的核心部分,一般可采用5或6自由度的关节式结构,能够灵活地进行喷涂作业。

(3)喷料供给系统:为喷涂系统提供稳定的喷料供应,确保喷涂过程中的连续性和稳定性。

(4)喷涂控制系统:负责控制喷涂过程中的各种参数,如空气压力、流量输出和开枪信号等,确保喷涂过程的稳定性和一致性。

(5)中央控制部分:作为整个喷涂系统的大脑,负责接收输入信号、处理数据和发出控制指令。

(6)安全保护装置:如安全门、防尘罩和防护窗,用于隔离漆尘,保护操作者的健康并防止环境污染。

通过以上诸多组成部分共同工作,形成了一个完整的自动喷涂系统,能够实现高效、精准、环保的喷涂作业。

## 1.3 技术优势

自动喷涂技术在工业制造领域有多方面优势,主要体现在以下几个方面。

(1)提高喷涂质量:自动喷涂技术通过精确控制喷涂轨迹和参数,确保喷涂层的均匀性和一致性,从而显著提升产品的喷涂质量。

(2)提高生产效率:自动化喷涂系统可以不间断地进行喷涂作业,减少了因人工操作导致的中断,提高了生产效率和产量。

(3)参数可控性:自动喷涂技术允许用户精确控制喷涂过程中的各种参数,如静电电荷、雾化面积、风扇宽度等,以适应不同产品的喷涂需求。

(4)灵活性和适应性:自动喷涂机器人具有较大的活动半径,能够喷涂具有复杂几何结构的产品,包括内表面和外表面,适应不同航空产品和零部件的喷涂。

(4)提高材料使用率:自动喷涂技术通过精确控制喷涂过程,提高了材料的使用率,减少了材料浪费。

(5)安全性提升:作业人员无需直接接触有害气体和化学品,通过中央控制系统远程操作,提高了工作的安全性。

综上,自动化喷涂以其高效、环保、灵活和经济性等优势,在现代工业生产中发挥着越来越重要的作用。

## 2 自动喷涂技术在航空产品的应用

自动喷涂技术可应用于航空附件产品的生产,包括发动机部件、飞机结构件、内饰件等。能够满足航空制造业对涂层性能的严格要求,如耐磨性、耐腐蚀性、抗冲击性等。自动喷涂技术是航空附件产品制造中不可或缺的一部分,它不仅提高了生产效率和产品质量,还为航空制造业的可持续发展做出了重要贡献。

在我国,自动喷涂技术的研究和应用已经取得了显著的进展<sup>[6]</sup>。国内众多研究机构、大学和企业在这一领域进行了深入的研究和技术创新。例如,中国科学院、中国航空工业集团公司等国家级研究机构在自动喷涂技术的基础理论和应用研究方面取得了突破性成果。同时,清华大学、北京航空航天大学等高等学府通过产学研结合,推动了自动喷涂技术的工程化和产业化发展。此外,一些企业如中国商飞、中航工业等也在飞机制造领域积极采用和推广自动喷涂技术,提升了生产效率和产品质量。

在技术创新方面,我国研究人员开发了多种适应复杂曲面喷涂的机器人系统,通过先进的传感器和算法实现了对喷涂过程的精确控制。例如,利用机器视觉和人工智能算法,实现了喷涂路径的自动规划和优化,显著提高了喷涂的均匀性<sup>[10]</sup>和一致性。此外,我国在喷涂材料的研发上也取得了进展,开发了适应特殊环境要求的高性能涂料,如具有隐身功能的吸波涂料,进一步拓展了自动喷涂技术的应用范围。

### 2.1 飞机表面自动喷涂系统

王朝晖等<sup>[11]</sup>提出一种飞机表面自动喷涂系统,通过多层次控制程序结构实现对飞机外表面喷涂轨迹的规划和自动化喷涂作业的定位。该系统包括主逻辑层、控制程序层和辅助功能层,主逻辑层负责调用控制程序层和辅助功能层中的功能模块;控制程序层包含飞机表面的分区及相应的喷涂控制程序模块;辅助功能层包括喷涂工艺参数、运动参数、系统默认参数等内容。通过将以上多种工具平台的集成应用,实现一种简单可靠的喷涂控制程序的离线编程方法,并利用三维仿真对喷涂生产控

制方案进行论证,试验结果表明系统能够有效地管理和调度整个喷涂过程,确保喷涂的均匀性和精度。缪东晶等<sup>[12]</sup>提出一种适用于飞机等大型自由曲面产品自动喷涂系统。该系统由三台机器人同时作业,通过计算机辅助三维交互应用(computer-aided three-dimensional interactive application, CATIA)二次开发技术,将喷涂作业涉及的飞机位姿标定、喷枪轨迹规划等关键技术环节对应的软件操作集成到 CATIA 平台中,以此极大地提高飞机自动化喷涂水平。最后,通过对模拟工件进行实际喷涂试验以及对涂层厚度进行测量的结果显示,所提出自动化喷涂系统具备可行性,显著提高了涂层质量。如图 1 所示,为模拟工件实际喷涂试验示意图。曹培等<sup>[13]</sup>针对一般情况下飞机蒙皮喷涂时计算机辅助设计(computer-aided design, CAD)模型未知的问题,借助逆向工程技术,首先利用双目视觉三维扫描仪对飞机蒙皮进行扫描,然后在 Geomagic Studio 软件中进行逆向设计,拟合得到模型的非均匀有理 B 样(non-uniform rational B-splines, NURBS)曲面,最后导入 Unigraphics 加工模块中实现曲面的重构。通过对飞机蒙皮进行仿真喷涂,结果表明:采用此种方法对飞机蒙皮进行喷涂轨迹规划,满足高效、精确和灵活编程的要求,在编程效率和轨迹精度上优于在线示教编程,并且适用于其他自由曲面。图 2 为喷涂轨迹仿真效果图。

## 2.2 飞机整机自动喷涂系统

早在 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研制的飞机表面自动喷涂系统(small aircraft finish application robotic installation, SAFARI)<sup>[14]</sup>,通过将喷涂机器人安装在可移动平台上,实现了对飞机整个表面的全方位喷涂,如图 3 所示。

洛克希德·马丁公司应用计算机辅助特种喷漆



图 1 模拟工件实际喷涂试验<sup>[12]</sup>

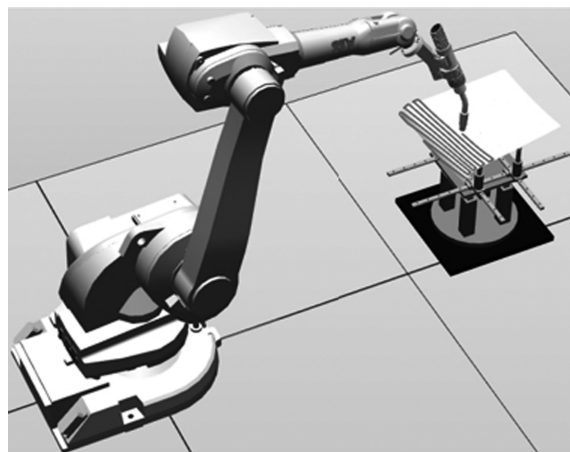


图 2 喷涂轨迹仿真效果图<sup>[13]</sup>



图 3 波音公司整机喷涂系统<sup>[14]</sup>

机器人(computer aided special paint expelling robot, CASPER)系统,最初用于 F-22 战斗机部分组件的喷涂<sup>[15]</sup>,后来发展到喷涂中机身和整机的能力。该公司也研制了机器人飞机精整加工系统(robotic aircraft finishing system, 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,采用离线编程方法进行作业规划,系统主要用于对全机状态下的 F-35 战斗机进行喷涂。张波等<sup>[16]</sup>提出一种飞机整机自动喷涂系统。该系统设计了机械系统和定位系统,以适应飞机喷涂范围大、表面复杂的需求。通过使用多自由度、大行程、高负载的机器人变位机,扩大了机器人的可达工作范围,提高了喷涂效率。图 4 为整机喷涂系统的布置。

## 2.3 飞机发动机叶片燕尾基座自动化喷涂

董慧芬等<sup>[17]</sup>针对人工喷涂飞机发动机叶片燕尾基座工作效率低,喷涂质量难以保证,提出自动化喷涂解决方案:首先,设计了涂料雾化系统和机器人本体系统,并做了相应的仿真控制实验;然后,建立了飞机发动机叶片燕尾基座的结构模型,对平面喷涂模型和曲面喷涂模型进行了涂层均匀性分析;最后,依据均匀性分析结果计

算出涂层最优重叠宽度,以此进行机器人喷涂路径规划。

基于以上的研究,可为飞机发动机叶片燕尾基座的实际喷涂提供参考。图5为喷涂机器人仿真结构,图6为飞机发动机叶片燕尾基座结构。

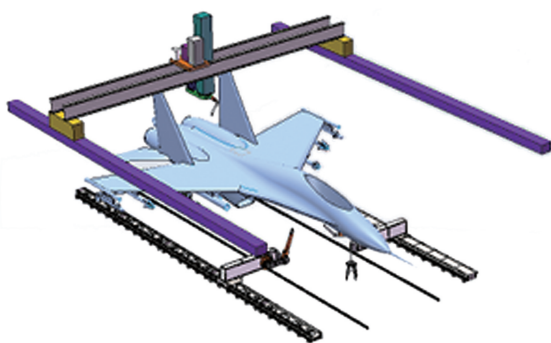


图4 喷涂系统布置图<sup>[15]</sup>

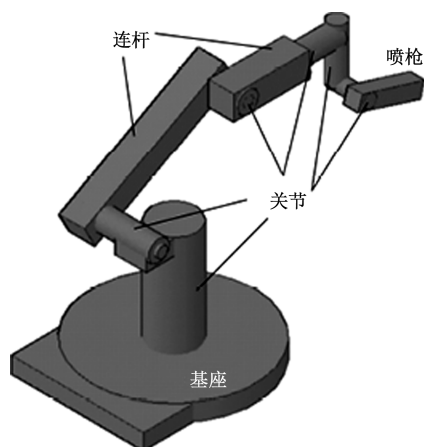


图5 喷涂机器人仿真结构图<sup>[17]</sup>



图6 飞机发动机叶片燕尾基座结构图<sup>[17]</sup>

## 2.4 飞机零件自动喷涂系统

姜帅等<sup>[18]</sup>开发一套基于视觉识别的自动喷涂系统,用于解决民机喷涂零件种类繁多、摆放位置不固定、无夹持装置等问题。系统使用工业二维相机和5轴机械臂带动的三维相机进行零件识别和位姿匹配,通过引入滞步系数和解耦合的思想改进粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO),提升全局最优搜索能力,加快迭代收敛速度。针对零件位姿随机且表面复杂的情况,采用曲面分片的办法规划喷涂路径,并采用 Bézier 曲线规划机器人关节空间轨迹,实现机器人的平稳运动。

为检验喷枪路径规划算法对于多个复杂曲面零件的路径规划效果,基于 Robot Studio 环境下选用 IRB52 喷涂机械臂进行仿真。结果表明:机器人轨迹规划算法可以完成不同姿态、复杂表面零件的喷涂路径自动规划任务。图7为自动喷涂系统硬件结构。

## 2.5 航空紧固件自动喷涂机控制系统

曹玉满<sup>[19]</sup>设计一种上位机与下位机控制方式的航空紧固件自动喷涂机控制系统。上位机与下位机之间采用工业以太网的方式进行数据通信。上位机采用工业控制计算机记录生产和工艺信息,下位机采用可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)为控制器,通过伺服驱动器和伺服电机实现喷涂系统的定位和速度调节,采用模拟量比例控制的方式来调节喷枪的压力。图8为全自动喷涂机实物。

## 3 面临的挑战

自动化喷涂技术的发展为航空工业产品的自动化喷涂带来创新的解决方案。这些技术的进步不仅提升了喷涂作业的灵活性,还拓展了自动化喷涂的应用范围。当前市场上的主流喷涂机器人品牌,如 ABB、KUKA、YASKAWA 和 FANUC,其软硬件技术已经达到一个成熟和可靠的水平。这些先

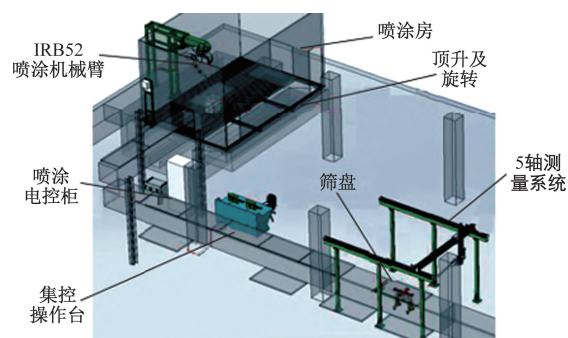


图7 自动喷涂系统硬件结构图<sup>[18]</sup>



图 8 全自动喷涂机实物图<sup>[19]</sup>

进的喷涂机器人不仅能够提供高精度的喷涂轨迹控制,还能够适应多变的喷涂环境和要求,为飞机制造等行业的自动化喷涂提供了坚实的技术基础。然而,尽管技术已经成熟,喷涂机器人在实际应用中,自动化喷涂技术在航空产品应用中面临着一系列挑战,这些挑战主要来自于航空产品的特殊性以及对喷涂质量的高要求。

### 3.1 尺寸和形状多样性

飞机蒙皮等航空零件通常具有复杂的自由曲面形状,这使得喷涂轨迹的规划变得复杂<sup>[20-22]</sup>。需要精确的三维模型和高效的算法来生成机器人喷涂轨迹,以确保喷涂的均匀性和精度。飞机零件在喷涂系统中的摆放位置具有随机性,因此需要高精度的定位系统来确定位置误差。

### 3.2 涂料的特殊要求

航空产品使用的涂料通常具有特殊的化学和物理特性,自动喷涂过程中,涂料的流变特性对喷涂效果有重要影响,曹玉满<sup>[19]</sup>提及喷涂流量误差控制在一定范围,这要求喷涂系统能够精确控制涂料的流变特性,保证喷涂的一致性。航空涂料通常需要在特定的温度和湿度条件下固化。自动喷涂系统需要与固化工艺紧密结合,以确保涂层的性能。军用飞机的涂层往往需要具备隐身功能,能够吸收雷达波。这要求涂料具有特殊的电磁性能,自动喷涂系统必须能够适应这类特殊涂料的喷涂要求。

### 3.3 工艺流程的复杂性

航空产品的喷涂工艺可能包括多个步骤<sup>[23]</sup>,如表面预处理、底漆、面漆以及后续的固化等。每个步骤都需要精确控制,以确保最终的喷涂质量。航空制造业的生产模式可能包括小批量定制和大批量生产。自动化喷涂系统需要具备足够的灵活性,以适应不同的生产需求。

### 3.4 系统集成的挑战

将喷涂机器人集成到现有的生产线中,需要考虑与其它制造系统的兼容性<sup>[24-25]</sup>,包括物料输送、质量检测、环境控制等。例如,自动喷涂机器人需要与物料运输系统紧密集成,以确保喷涂材料和待喷涂零件的及时供应。要求喷涂机器人能够与自动化物料搬运系统(如自动导引(automated guided vehicle, AGV)、输送带等)无缝对接,实现自动化的物料运转。喷涂过程对环境条件(如温度、湿度、灰尘度等)有严格要求,自动喷涂系统需要与环境控制系统集成,以确保喷涂环境满足工艺要求。

### 3.5 质量控制的严格性

航空产品对喷涂质量的要求极高<sup>[14]</sup>,任何缺陷都可能导致严重的安全隐患,航空零件的涂层质量直接关系到飞机的安全性、耐用性和隐身性能。因此,喷涂质量的检测是保证航空零件性能的关键环节,自动喷涂系统需要配备视觉检测系统、激光扫描系统等质量检测设备,以实现喷涂后的即时质量反馈和缺陷检测。

为了克服以上挑战,航空制造企业需要与喷涂设备制造商、软件开发商以及研究机构紧密合作,共同开发和优化自动化喷涂技术。此外,企业还需要建立一套完善的管理体系,以确保自动化喷涂系统的顺利实施和长期运行。通过这些努力,自动化喷涂技术有望在航空制造业中发挥更大的作用,提高生产效率,降低成本,并最终提升产品的市场竞争力。

## 4 未来发展趋势

随着全球制造业的持续进步和工业 4.0 战略的深入实施,自动化喷涂技术作为智能制造的关键组成部分,正在迎来前所未有的发展机遇。特别是在航空等大型结构件制造领域,自动化喷涂不仅大幅提升生产效率,还极大地提高产品涂层的均匀性和质量,满足了市场对高端制造的迫切需求。然而,面对日益复杂的生产环境和不断变化的市场需求,自动化喷涂技术的未来发展必须解决现有技术的局限性,如增强机器人的适应性与灵活性、实现更高精度的定位以及优化喷涂参数等。

未来的自动化喷涂技术将趋向于更加智能化、集成化和协同化<sup>[26]</sup>。通过引入多传感器信息融合、人工智能算法、云计算和大数据分析等先进技术,喷涂机器人将能够实现更加精准的作业,同时降低对环境的影响,并提升操作的安全性。具体有如下几个方面。

#### 4.1 智能控制系统

自动喷涂机器人可融合人工智能控制算法进行自主规划和干涉碰撞检测<sup>[6]</sup>,减少人工的干预。使得喷涂机器人能够根据实时反馈自动调整喷涂参数,如喷涂速、涂料流量和喷枪与工件的距离,以适应不同形状和尺寸的工件。此外,智能控制系统可配备有直观的用户界面,操作人员可以通过界面轻松设置喷涂参数,监控喷涂状态,简化操作流程。同时,结合物联网技术,智能控制系统<sup>[27-28]</sup>可以实现远程监控和控制喷涂机器人,提高生产管理的灵活性。

#### 4.2 喷涂质量检测

目前,自动喷涂技术尚停留开环完成喷涂作业。伴随着图像识别领域的蓬勃发展<sup>[29]</sup>,自动喷涂系统可集成喷涂质量检测技术<sup>[30]</sup>,形成闭环的喷涂系统。例如,使用图像处理方法提取缺陷特征,并通过深度学习等算法进行分类和定位,将缺陷信息即时反馈给系统处理,以确保最终喷涂作业完成后质量达到标准。

#### 4.3 MES、PLM 系统集成

将喷涂机器人与制造执行系统(manufacturing execution system, MES)、产品生命周期管理(product lifecycle management, PLM)等信息化系统集成,以实现生产流程的自动化和智能化管理<sup>[31-32]</sup>。通过与MES、PLM等系统的集成,喷涂机器人可实时接收生产指令和产品数据,同时将喷涂过程中的数据反馈给信息化系统,实现数据的无缝流动。MES系统可以提供生产调度功能,根据生产计划和实时的生产状态,优化喷涂机器人的工作流程,减少停工时间,提高生产效率。

#### 4.4 大数据技术赋能

伴随着工业数字化、信息化的大力推进,未来大数据分析技术也将为自动化喷涂系统赋能<sup>[33-34]</sup>。通过收集喷涂过程中产生的大量数据,运用大数据分析技术分析历史喷涂数据,可以识别出影响喷涂质量的关键参数,并优化这些参数的设置。例如,通过分析不同喷涂速度和涂料流量下的质量反馈,可以找到最佳的喷涂参数组合。通过分析喷涂设备运行数据,可以预测设备可能出现的故障。例如,通过监测喷涂机器人关节的振动和温度,可以预测关节的磨损情况,并提前进行维护。大数据分析还可以帮助识别喷涂过程中的质量问题,如涂层不均匀、厚度不一致等,并及时调整喷涂策略,提高产品质量。

#### 4.5 机器视觉与传感器集成

目前,自动喷涂系统已有集成机器视觉的相关应用案例<sup>[18]</sup>。未来,可以利用机器视觉系统和多种传感器(如距离传感器、压力传感器等)<sup>[35-37]</sup>来提高喷涂机器人对工件位置、形状和颜色的识别能力。将来自不同传感器的数据进行融合,可以获得更全面、准确的工件和环境信息,提高喷涂机器人的决策能力<sup>[38-39]</sup>。传感器的集成还可以提高喷涂质量的一致性和可追溯性,通过精确控制喷涂参数,减少返工和废品率。

### 5 结论

自动化喷涂技术在航空产品制造领域的应用已经成为提升生产效率、保证喷涂质量、降低环境与健康风险的重要手段。随着航空工业对产品性能的要求的不断提高,自动喷涂技术正面临着新的挑战 and 机遇。当前,离线编程和仿真技术的应用,使得喷涂路径和工艺参数的优化可以在不影响生产的情况下进行,进一步提高生产效率和工艺灵活性。然而,自动喷涂技术在航空领域的应用仍面临诸多挑战,这主要是因为航空产品本身具有的特殊性。例如,航空零件复杂多样、航空涂料的特殊物化性能、航空产品工艺复杂、航空制造系统集成度高、航空产品质量控制严格等。

展望未来,自动喷涂技术在航空产品制造中的发展前景广阔。随着全球制造业的持续进步和工业4.0战略的深入实施,我国在自动喷涂技术领域的发展迎来前所未有的机遇。通过国家层面的战略规划和政策支持,我国航空工业的自动化和智能化转型将得到强有力的推动。这不仅会促进喷涂技术的创新,也将加速产业的升级和结构优化。航空制造产品自动喷涂技术的领先,需要持续地研发投入和技术创新。通过重大科技项目和研发计划的实施,可为喷涂机器人的设计与控制、喷涂材料的研发以及喷涂工艺的优化提供坚实的基础。如今,自动喷涂技术已被广泛应用于汽车、建筑等多个行业,显著提高了生产效率和产品质量。在航空工业体系下,借鉴成熟的工业产线,通过智能化改造和自动化生产线的建设,航空制造企业在生产过程中可实现更高的自动化水平和更低的运营成本。同时,大数据分析、云计算、物联网等先进技术的应用,将使得喷涂系统能够实现更加智能化的故障预测、质量控制和生产管理。以ChatGPT为代表的人工智能(artificial intelligence, AI)技术应用已经掀起了新一轮的产业变革,因此加快将新兴智能

化、数字化技术融合应用到航空工业领域的自动化喷涂系统中,提高航空领域智能制造的核心竞争力。

### 参考文献

- [1] BIERWAGEN G, BROWN R, BATTOCCHI D, et al. Active metal-based corrosion protective coating systems for aircraft requiring no-chromate pretreatment[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2010, 68(2): 48-61.
- [2] 王瑜,王歆铖. 飞机防除冰机理及超疏水材料的机载应用[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(1): 72-87.
- [3] LIU Z H, HUANG P L, GAO X, et al. Multi-frequency RCS reduction characteristics of shape stealth with MLFMA with improved MMN[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2010, 23(3): 327-333.
- [4] 刘健健. 飞机发动机风扇叶片压力面润滑剂自动喷涂研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.
- [5] 李徐佳,任国奇,李贵敬,等. 涂料干燥成膜过程及开裂机理综述[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(9): 3499-3510.
- [6] 赵景山,魏松涛,赵东捷,等. 超大作业空间涂装机器人研究进展[J]. *航空制造技术*, 2023, 66(12): 46-58.
- [7] 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.
- [8] 赵景山,罗宏图,王立平,等. 航空制造涂装机器人研究进展[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(4): 47-54.
- [9] 闫洪乐. 喷涂机器人机构综合与结构拓扑优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [10] 张云鹏,万冰华,赵彦伟,等. 喷涂角度对螺栓表面涂层厚度均匀性的影响[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(6): 2362-2366.
- [11] 王朝晖,陈恩,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.
- [12] 缪东晶,吴聊,徐静,等. 飞机表面自动喷涂机器人系统与喷涂作业规划[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2015, 45(2): 547-553.
- [13] 曹培,杨涛,王天琪,等. 面向飞机蒙皮的机器人喷涂轨迹规划[J]. *现代制造与工程*, 2020(10): 72-77.
- [14] 王国磊,王宁涛,陈恩. 面向整机的机器人喷涂系统回顾与展望[J]. *航空制造技术*, 2016(16): 76-80.
- [15] 石闻. F-22 战斗机的机器人表面喷涂[J]. *航空制造工程*, 1997(8): 22-25.
- [16] 张波,刘晨,赵宏剑,等. 飞机整机自动喷涂系统初探[J]. *制造业自动化*, 2014, 36(11): 74-76.
- [17] 董慧芬,刘健健,吕波漾. 飞机发动机叶片燕尾基座自动化喷涂研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2020(5): 113-118.
- [18] 姜帅,宋立滨,陈晓永,等. 基于视觉识别的民机零件专用自动喷涂系统[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2023(10): 1650-1657.
- [19] 曹玉满. 航空紧固件自动喷涂机控制系统的开发[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [20] 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): 149-151.
- [21] 宁祎,孟蒙. 喷涂机器人路径规划方法分析与展望[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(35): 19-27.
- [22] 陈伟,赵德安,李发忠. 复杂曲面的喷涂机器人喷枪轨迹优化与试验[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(1): 204-208.
- [23] 宁莉,王国磊. 面向航空产品的自动化喷涂工艺研究[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(12): 59-64.
- [24] 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.
- [25] 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(19): 32-37.
- [26] 乔新义,付宇晨. 喷涂机器人智能技术应用现状及前景[J]. *现代涂料与涂装*, 2023, 2(10): 35-38.
- [27] 刘亚军,訾斌,王正雨,等. 智能喷涂机器人关键技术研究现状及进展[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(7): 53-74.
- [28] ZHU Q, LI J, YUAN P, et al. Accuracy compensation of a spraying robot based on RBF neural network[C]// *Proceedings of the 2016 International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM)*. Macau, China: IARM, 2016: 414-419.
- [29] LIU H Y, WANG W J, WANG R J, et al. Image recognition and force measurement application in the humanoid robot imitation[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61(1): 149-161.
- [30] 顾旭. 基于视觉的工件表面质量检测系统的设计与实现[D]. 沈阳: 中国科学院大学(中国科学院沈阳计算技术研究所), 2021.
- [31] 韩利华. 基于惯性导航和视觉传感器信息融合的移动机器人定位研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [32] Enrique D V, MARCON E, FRAK A, et al. Industry 4.0 enabling manufacturing flexibility: technology contributions to individual resource and shop floor flexibility[J]. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2022, 33(5): 853-875.
- [33] JIANG M, ZHANG L. Big data analytics as a service for affective humanoid service robots[J]. *Procedia Computer Science*, 2015, 53: 141-148.
- [34] ALLAM K. Big data analytics in robotics: unleashing the potential for intelligent automation[J]. *EPH-International Journal of Business & Management Science*, 2022, 8(4): 5-9.
- [35] 戈新良. 基于多种传感器信息融合的移动机器人的环境辨识[D]. 天津: 河北工业大学, 2003.
- [36] LIANG Y X, CAO G Z, QIU H, et al. Development of the three-dimensional scanning system based on monocular vision[C]// *Proceedings of the 2015 6th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA)*. Hong Kong: IEEE, 2016: 1-5.
- [37] 郑家旺. 多传感器融合的涂装机器人研发[D]. 武汉:

- 武汉理工大学, 2011.
- [38] 袁子祺, 苏炜斌, 梅晓君, 等. 智能喷涂机器人的研究与应用[J]. 建筑机械化, 2023, 44(12): 38-41.
- [39] 王东洋, 潘宇晨, 蒙古彬, 等. 面向船舶外板并联式喷涂机器人构型综合[J]. 机械设计与研究, 2022, 38(3): 65-69.

## Application Status and Prospects of Automatic Spraying Technology in the Aviation Field

ZHANG Bowen<sup>1</sup>, REN Shouwei<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>, ZHAO Jing<sup>1</sup>, WEN Quan<sup>1</sup>, LI Tijun<sup>1</sup>, PANG Xinyu<sup>2</sup>

(1 National Sida Machinery Manufacturing Company, Xianyang 712200, Shaanxi, China; 2. School of Mechanical and Transportation Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** With the rapid development of the aviation industry, the service environment for aircraft has become increasingly harsh, and the demand for surface performance is higher than ever. Spraying is an important method to enhance properties such as corrosion resistance and oxidation resistance, and it is widely used in the aviation field. Compared to traditional manual spraying methods, automated spraying robots offer several advantages, including high precision, high efficiency, and consistent thickness, playing a more and more important role in the preparation of surface coatings for aircraft skins and engine components. The current application status and research progress of automated spraying technology in the aviation field were briefly described, and on this basis, the main technical challenges and future development trends were discussed.

**Keywords:** aviation field; automatic spraying technology; robots; surface coating; aviation manufacturing