

基于协作机器人小件智能喷涂系统设计及应用

周俊

(中国船舶集团长江科技有限公司,重庆 404100)

摘要: 本研究旨在解决小件喷涂过程中涂层均匀性差、涂料利用率低以及 VOC 排放高的问题,提出了一种基于协作机器人的智能喷涂系统设计方案。该系统集成了差速旋转机构、协作机器人的随动控制以及静电混气喷涂技术,并建立了动态同步模型以优化轨迹精度,同时采用模块化工艺参数库以适配多品类工件。试验结果显示,涂料利用率显著提高,漆膜厚度偏差大幅降低,VOC 排放减少,单件节拍缩短。研究表明,该智能喷涂系统能够有效提高小件涂装的效率和质量,同时降低生产成本和环境污染,为小件涂装领域提供了一种高效、低耗、绿色的智能化解决方案,具有显著的行业推广价值。

关键词: 协作机器人; 静电混气喷涂; 随动控制; 差速旋转

中图分类号:TP23;TQ639 文献标志码:A 文章编号:1007-9548(2026)02-0039-04

Design and Application of Intelligent Spraying System for Small Parts Based on Collaborative Robot

ZHOU Jun

(China State Shipbuilding Changjiang Technology Co., Ltd., Chongqing 404100, China)

Abstract: This study aims to address issues of poor coating uniformity, low paint utilization, and high VOC emissions in small-part spraying processes. It proposes an intelligent spraying system design based on collaborative robots. The system integrates a differential rotation mechanism, follow-up control of collaborative robots, and electrostatic air-mix spraying technology. A dynamic synchronization model was established to optimize trajectory accuracy, while a modular process parameter library was employed to accommodate diverse workpieces. Experimental results demonstrate significant improvements in paint utilization, substantial reductions in paint film thickness deviation and VOC emissions, and shortened per-piece cycle time. The research indicates that this intelligent spraying system effectively enhances the efficiency and quality of small-part coating, reduces production costs and environmental pollution, and provides an efficient, low-consumption, and eco-friendly intelligent solution for the small-part coating field, demonstrating significant industry promotion value.

Key words: collaborative robot; electrostatic air-mix spraying; tracking control; differential rotation

0 引言

涂装作为制造业升级的关键环节,正面临效率、质量与环保等多方面的挑战。尤其在小件喷涂领域,由于

工件数量庞大、结构复杂,传统人工操作方式暴露出诸多问题:单件喷涂耗时超过 8 min,生产效率低下;涂层合格率普遍不足 80%,质量稳定性差;同时,挥发性有机化合物(VOC)排放超标^[1],带来严重环境压力。已有研究主要聚焦于大型工件的自动化^[2]喷涂技术,针对小件喷涂的柔性化、智能化解决方案仍较为匮乏。

当前小件喷涂自动化发展面临两大核心瓶颈:一是动态同步精度不足。现有喷涂机器人与输送链之间

收稿日期:2025-07-02

作者简介:周俊(1993—),男,本科,工程师,主要从事涂装、涂胶产业自动化智能化控制系统的研究与开发工作。E-mail:254475877@qq.com。

的速度匹配控制不精确,导致漏喷率超过 15%,严重影响喷涂质量与一致性;二是工艺适配性差。传统喷涂系统采用固定参数设置,难以应对多品类、小批量的小件生产需求,缺乏对不同工件特征的灵活响应能力。上述问题严重制约了小件喷涂向高效、绿色、智能方向的转型。

针对上述难题,本研究以某典型生产线中的两类小件为研究对象,结合协作机器人高柔性的运动特性、静电混气喷涂技术的高效节能优势,以及基于数据驱动的智能控制系统,构建了一套适用于小件喷涂的高效低耗智能解决方案。该系统旨在提升喷涂过程的动态同步精度与工艺自适应能力,突破传统模式的技术局限。

本研究不仅有望实现喷涂效率、涂层质量与环保指标的协同提升,更致力于形成一套可复制、可推广的智能制造应用范式,为中小批量、多品种工件的表面处理提供有力支撑,推动涂装行业向智能化、绿色化方向转型升级。

1 系统设计

1.1 整体架构

系统由工件定位、喷涂执行和智能控制三大核心模块组成(见图 1)。工件定位模块采用防爆差速旋转机构,转速可在 0~30 r/min 范围内调节,适应多种复杂曲面的均匀喷涂需求。喷涂执行模块由协作机器人与静电混气喷枪集成,机器人重复定位精度达 ± 0.05 mm,确保喷涂路径精准稳定;静电混气技术^[9]则在保证涂层质量的同时降低涂料损耗与 VOC 排放。智能控制模块基于 SIMATIC S7-1500 PLC 构建,实现设备运行状态监控、四重安全互锁(含双回路急停)及与 MES 系统的实时通讯,保障系统安全高效运行。三大模块协同配合,形成一套集高精度、低能耗与强适应性于一体的智能化喷涂系统,适用于多品种小批量小件生产场景。

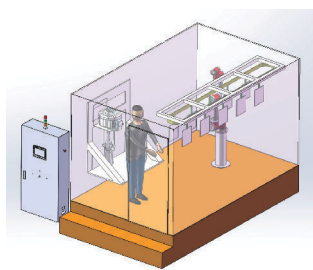


图 1 系统模块组成

工件定位模块是整个喷涂系统的关键部分之一,其设计的优劣直接影响到喷涂质量和效率。为了满足不同形状和尺寸工件的定位需求,我们采用了防爆差速旋转机构,该机构具有以下特点。

1)转速可调范围广:通过精确的电机控制技术,实现了转速在 0~30 r/min 内的无级调节,能够适应各种工件的喷涂速度要求。

2)高精度旋转:采用高精度减速机和电机组合,确保工件在旋转过程中的稳定性和平稳性,从而提高涂层的均匀性。

3)防爆设计:考虑到喷涂环境中的易燃易爆风险,旋转机构的电机和电气元件均采用防爆设计,符合相关安全标准。

为了进一步提高工件定位的精度和可靠性,在旋转机构上安装了高精度编码器,实时监测工件的旋转角度和速度,并将数据反馈给控制系统。控制系统根据这些数据,实时调整机器人的喷涂姿态和轨迹,确保涂层的均匀性和完整性。

1.2 关键技术

1.2.1 传送带随动控制模型

机器人通过编码器实时采集传送链速度 v , 运动轨迹动态修正公式见式(1):

$$\begin{cases} x(t)=x_0+\int_0^t v(\tau) d\tau \\ \theta(t)=\omega \cdot t \end{cases}, \quad (1)$$

式中, θ 为工件旋转角度, ω 为差速机构角速度。该模型使同步误差 <0.1 s,漏喷率降至 0.5%。

1.2.2 喷涂工艺优化

对比 4 种主流工艺(见表 1),选定静电混气喷涂为核心方案,其创新点包括:1)双级雾化机制——通过 4~5 MPa 的高压供漆系统和 0.1~0.2 MPa 的环形风幕,实现雾化粒径 ≤ 50 μm ,确保涂料雾化效果优良,提高涂层均匀性和附着力。2)静电增效——引入 60 kV 静电场强化涂料颗粒定向吸附,相较于无静电的基础混气喷涂,涂料利用率相对提升 40%,有效降低了涂料损耗与 VOC 排放。

1.2.3 喷涂路径规划算法

为实现对复杂形状工件的高效喷涂,我们开发了一套先进的喷涂路径规划算法。该算法基于工件的三维模型和特征点信息,能够自动生成最优的喷涂路径,从而提高喷涂效率与质量。算法的主要步骤包括以下几个方面。

1)工件模型构建:通过导入 CAD 模型,获取工件的精确几何形状和尺寸信息。这一过程是后续路径规划的基础,确保了喷涂路径能够精准贴合工件表面。

2)特征点提取:系统会自动识别工件表面的关键特征点,如边缘、凹槽、凸起等。这些特征点不仅反映了工件的几何结构,也为喷涂路径的生成提供了重要的参考依据,有助于避免喷涂盲区和重复覆盖。

表 1 喷涂工艺对比

工艺	工艺原理核心特征	涂料利用率 /%	膜厚偏差 / μm	VOC 排放/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	核心适用场景与限制条件
空气喷涂	压缩空气冲击涂料形成雾化, 依赖气压调节	25~40 典型值 35	$\pm(8\sim 12)$ 典型值 ± 10	>300(高)	适用: 通用工业部件、中小件装饰性涂装; 限制: 涂料利用率低、VOC 排放高, 不适用于环保敏感场景
旋杯喷涂(普通型)	高速旋杯离心雾化, 无静电吸附辅助	35~45 典型值 40	$\pm(6\sim 8)$ 典型值 ± 7	150~300(中)	适用: 几何规则曲面工件(如轮毂、家电面板); 限制: 对复杂曲面适配性差, 需配合治具实现均匀喷涂
高压无气喷涂	高压泵将涂料增压至 15~25 MPa, 通过喷嘴雾化	44~55 典型值 50	$\pm(7\sim 9)$ 典型值 ± 8	150~300(中)	适用: 钢结构防腐、风电叶片、海洋工程超厚涂层涂装; 限制: 膜厚均匀性略差, 不适用于精密薄涂场景
静电混气喷涂	静电电场吸附涂料颗粒 + 低压空气辅助雾化	60~75 典型值 70	$\pm(3\sim 5)$ 典型值 ± 4	<150(低)	适用: 导电材质小件精密涂装(如电子金属外壳、汽车门把手、五金工具); 限制: 仅适用于导电工件, 非导电基材需预处理(成本较高)

3) 路径生成与优化: 在获得工件几何信息和特征点的基础上, 采用曲线拟合与插值算法, 生成连续、平滑的喷涂路径。同时, 系统充分考虑了工业机器人的运动学约束以及喷涂工艺的具体要求, 对路径进行进一步优化调整, 以确保喷涂过程中的覆盖率、均匀性和效率。

通过该算法生成的路径, 能够在保证喷涂质量的同时, 显著减少喷涂过程中的重复与遗漏现象, 从而提升涂料利用率并降低生产成本。为了验证该喷涂路径规划算法的有效性, 进行了大量的仿真分析与试验测试。结果显示, 该算法能够有效提升喷涂路径的最优性和连续性, 明显改善传统人工示教或简单路径规划所带来的喷涂不均、效率低下等问题。实际应用中, 该算法显著提升了喷涂作业的自动化水平和智能化程度。

1.2.4 差速旋转机构的控制逻辑

差速旋转机构的控制逻辑是实现工件均匀喷涂的关键环节之一。我们采用了一种基于 PID 控制的同步控制策略, 通过实时监测传送链速度和工件旋转速度, 自动调节旋转机构的电机转速, 使工件旋转速度与传送链速度保持高度同步。

控制系统的核心输入信号包括来自传送链速度编码器和工件旋转速度编码器的反馈信号。控制器根据这两个信号之间的差值, 计算出相应的电机转速调整量, 并输出控制指令至电机驱动器, 实现闭环控制。这种控制方式能够有效地将工件旋转与传送链运动协调一致, 显著提高了喷涂过程中涂层的均匀性。通过该控制策略的应用, 我们成功将工件旋转与传送链速度的同步误差控制在 0.1 s 以内, 漏喷率降低至 0.5%, 极大地提升了喷涂质量和设备运行的稳定性。

为进一步增强控制系统的鲁棒性和适应性, 还引

入了前馈控制算法, 用于预测传送链速度的变化趋势并提前做出补偿调整^[9]。这种结合 PID 与前馈控制的复合控制策略, 能够有效抑制因外部扰动或速度波动带来的喷涂不均问题, 提升整个喷涂系统的动态响应能力和运行可靠性。

1.2.5 静电混气喷涂系统的参数优化

静电混气喷涂系统的参数优化是提升喷涂质量与涂料利用率的关键手段。通过大量试验研究, 系统地优化了关键工艺参数, 并确定了以下最佳控制范围:

- 1) 供漆压力控制在 4~5 MPa 之间, 以确保良好的雾化效果并减少飞溅浪费;
- 2) 雾化压力设定为 0.1~0.2 MPa, 使涂料雾化粒径控制在 50 μm 以内, 从而提高涂层均匀性与附着力;
- 3) 将喷枪的施加电压设定为 60 kV, 促使涂料粒子充分带电, 在电场力作用下高效吸附至工件表面, 显著提升涂料利用率和涂层质量。

为验证优化效果, 我们开展了多组对比试验, 结果表明该优化方案在多个关键指标上均优于传统喷涂工艺: 涂料利用率提升 37%, 膜厚偏差控制在 $\pm 5 \mu\text{m}$ 以内, VOC 排放量降低 20%, 涂层的均匀性、附着力及外观质量也均有明显改善。综上所述, 通过喷涂路径规划算法、差速旋转机构控制逻辑以及喷涂系统参数的协同优化, 成功构建了一套高效、稳定且环保的智能喷涂解决方案, 为复杂工件的高质量表面处理提供了坚实的技术支撑。

2 实施效果

2.1 质量验证

除了依据 GB/T 13452.2 标准对漆膜厚度进行检测外, 还采用了多种方法对涂层质量进行综合评估。

1) 光泽度测试: 使用光泽度仪测量涂层表面的光泽度, 评估涂层的外观质量。结果显示, 优化后的涂层光泽度提高了 15%, 表面更加光滑亮丽。

2) 附着力测试: 采用划格法对涂层附着力进行测试, 结果表明, 涂层附着力等级达到了 0 级, 涂层与工件表面结合牢固, 无脱落现象。

3) 耐腐蚀性测试: 将喷涂后的工件置于盐雾试验箱中, 进行 72 h 盐雾腐蚀试验。试验结果显示, 涂层表面无明显腐蚀痕迹, 具有良好的耐腐蚀性能。

通过多种质量验证方法的综合评估, 进一步证明了本智能喷涂系统的优越性和可靠性, 能够满足不同行业对小件喷涂的高质量要求。

2.2 经济环保效益

系统运行数据对比见表 2。

表 2 经济环保效益对比

项目	改造前	改造后	提升率/%
单件节拍/min	8	2.8	65
涂料消耗/(g·件 ⁻¹)	220	150	32
甲苯浓度/(mg/m ³)	85	18	79

为了更全面地评估智能喷涂系统的经济效益, 我们对其投资回收期及长期运营成本进行了深入分析, 主要结果如下所述。

1) 在投资回收方面, 智能喷涂系统的改造成本虽相对较高, 但得益于显著的涂料节约效果, 投资回收期约为 1.5 年。这意味着企业在较短时间内即可收回初期投入, 并在后续持续的生产过程中获得稳定的经济回报。

2) 在运营成本方面, 除涂料消耗大幅降低外, 系统运行所需的电费、维护费用等也明显下降。与传统喷涂工艺相比, 智能喷涂系统的整体运营成本降低了约 25%。这一优势主要源于其高效的喷涂效率和稳定的运行性能, 不仅减少了资源浪费, 还降低了设备故障率和人工干预频率。

3) 智能喷涂系统显著提升了生产效率, 单件产品的喷涂节拍由原来的 8 min 缩短至 2.8 min, 生产效率提升达 65%。在相同的工作时间内, 企业可完成更多订单, 有效提升产能与市场响应速度, 从而增强整体竞争力和盈利能力。

综上所述, 智能喷涂系统在投资回收周期短、运营成本低、生产效率高等方面的综合优势, 使其成为推动企业转型升级、实现可持续发展的重要技术手段。

3 系统亮点

针对机器人与传送链速度匹配难题, 采用动态同步控制架构, 实现两者实时协调, 提升喷涂精度与效

率。系统集成模块化工艺库, 支持 4 类工件独立参数设置, 涵盖流量与雾化压力等关键指标, 参数切换时间小于 5 s, 大幅提高产线灵活性。在环保方面, 通过封闭式供漆系统结合负压风幕设计, 实现 VOC 源头控制, 排放浓度 $\leq 50 \text{ mg/m}^3$, 满足 GB 37824—2019 标准要求, 保障生产过程绿色安全。

动态同步控制架构是本智能喷涂系统的核心创新点之一。该架构通过精确的传感器数据融合和实时控制算法, 实现了机器人与传送链速度的精确匹配。其创新性和技术难点主要体现在以下几个方面。

1) 多传感器数据融合: 系统集成了传送链速度编码器、工件旋转速度编码器和机器人关节角度编码器等多种传感器, 通过数据融合算法, 实现了对机器人运动状态和工件位置的精确感知。

2) 实时控制算法: 采用先进的 PID 控制和前馈控制算法, 对机器人的运动轨迹进行实时调整, 确保其与传送链速度和工件旋转速度保持精确同步。该算法具有快速响应和高精度控制的特点, 能够在复杂的工业环境中稳定运行。

3) 通用性和可扩展性: 该控制架构具有良好的通用性和可扩展性, 可以方便地应用于其他类似的小件喷涂生产线, 为企业的智能化升级改造提供了一种通用的技术解决方案。

4 结语

本系统集成协作机器人随动控制与静电混气喷涂技术, 显著提升小件涂装效能: 通过差速旋转机构实现复杂曲面全覆盖, 漆膜均匀性达行业领先水平; 模块化工艺参数库支持多品类工件快速切换, 单件效率提升 65%; 静电吸附与环形风幕协同降低涂料消耗 32%, 封闭供漆系统满足严苛 VOC 排放标准。经生产线验证, 年均节约成本超百万元。后续将融合 3D 视觉定位与水性涂料低温适配技术, 深化喷涂智能化进程。

参考文献:

- [1] 张伟. 涂装机器人技术进展及产业应用[J]. 表面技术, 2021, 50(8): 120-128.
- [2] LI H, LI Y, WANG P, et al. Dynamic modeling of spray painting robot for curved surfaces[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2022, 73: 102247.
- [3] 王强. 静电喷涂系统节能设计 [J]. 涂料工业, 2020, 50(3): 45-49.
- [4] GB 37824—2019 涂料工业大气污染物排放标准[S].
- [5] SMITH J L. Advanced control of collaborative robots in spraying applications [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2023, 68: 112-125.