

智能化技术在涂装线工程管理中的应用实践

黄琼

天津七所高科技有限公司, 天津 300409

DOI:10.61369/ERA.2026020004

摘要：在制造业智能化转型的背景下，作为产品表面质量控制起到关键作用的涂装线环节，其工程管理的效率连同精度，对企业生产效益产生的直接影响不容小觑。然而传统涂装线工程管理存在着诸如进度管控滞后，质量检测过度依赖人工以及成本核算较为粗放等亟待解决的痛点。本文基于在智能化技术应用方面所开展的实践工作，从进度、质量、成本还有安全这四大核心管理维度出发，对物联网、人工智能以及数字孪生等技术究竟该如何落地的路径展开深入探讨，借由典型场景分析与成效总结这一方式，提出了技术融合优化方向，旨在给涂装线工程管理的智能化升级提供具有实践意义的参考依据。

关键词：智能化技术；涂装线；工程管理；物联网；数字孪生

The Application Practice of Intelligent Technology in the Engineering Management of Coating Lines

Huang Qiong

Tianjin Qisuo High-tech Co., LTD., Tianjin 300409

Abstract : Against the backdrop of the intelligent transformation of the manufacturing industry, the coating line, which plays a crucial role in controlling the surface quality of products, has a direct impact on the production benefits of enterprises due to the efficiency and accuracy of its engineering management. However, traditional coating line engineering management has some urgent pain points that need to be solved, such as lagging progress control, excessive reliance on manual quality inspection, and relatively rough cost accounting. Based on the practical work carried out in the application of intelligent technologies, this article starts from the four core management dimensions of progress, quality, cost and safety, and conducts an in-depth discussion on how to implement technologies such as the Internet of Things, artificial intelligence and digital twins. Through the analysis of typical scenarios and the summary of achievements, it proposes the direction of technology integration and optimization. It aims to provide a practical reference basis for the intelligent upgrade of coating line engineering management.

Keywords : intelligent technology; painting line; project management; internet of things (IoT); digital twin

引言

涂装工艺在机械制造、汽车以及家电等行业内属于核心工序，涂装线工程管理涵盖着从工艺设计、设备调试，再到生产运行、质量管控等全流程，而其管理水平直接决定着产品外观质量、生产周期与运营成本这些重要方面。随着市场对产品质量要求持续提升，且环保法规愈发收紧，传统依赖人工经验的管理模式已越来越难以适应规模化、高精度的生产需求，比如在进度管理中设备故障响应滞后致使工期延误，质量检测中人工目视存在漏检风险，成本管理方面能耗与耗材浪费现象极为突出。在如此背景下，物联网、人工智能、数字孪生等智能化技术与涂装线工程管理深度融合，成为破解行业痛点、提升管理效能的关键路径，其应用实践具备重要的行业借鉴价值。

一、智能化技术在涂装线工程管理中的应用基础

在技术支撑层面，物联网技术构建起涂装线全要素的数据采集网络，通过在预处理槽、喷涂机器人以及烘干炉等关键设备上，部署诸如温度、压力、转速等类型的传感器，并且结合 RFID 技术对

工件进行全程溯源，从而实现对设备运行参数、工件加工状态以及物料消耗等各类数据的实时采集。大数据平台会对采集到的多维度数据，进行清洗以及整合等处理，进而为管理决策提供有力的数据支撑。人工智能技术重点聚焦于对数据的深度挖掘，通过算法模型达成质量缺陷识别、设备故障预警等智能分析功能。数字孪生技术

作者简介：黄琼（1986.05-），女，河北衡水人，本科，机械工程师，研究方向：涂装线。

则构造出涂装线的虚拟映射模型，实现物理场景与虚拟场景的实时同步，为流程优化与模拟仿真提供重要载体。

在流程适配方面，需要打破传统涂装线那种“设计-调试-生产”的线性管理模式，构建基于数据的动态管理流程。例如在工艺设计阶段，借助数字孪生模型开展流程模拟，提前对喷涂路径与烘干参数进行优化；在生产运行阶段，建立起设备运维与质量管控的联动机制，达成故障预警与质量问题的溯源分析。这种技术与流程之间的协同关系，为智能化应用奠定了极为坚实的基础。

二、智能化技术在涂装线工程管理各环节的应用实践

（一）进度管理：全流程可视化与动态调控

涂装线进度管理其核心需求在于以确保包含预处理、喷涂、烘干以及检验的各工序能够实现顺畅衔接，从而减少设备出现闲置以及工件形成积压为目的。在传统管理情形之下，进度跟踪主要依靠人工巡检记录，致使工序衔接所出现的滞后问题难以被及时发现。而智能化技术凭借“数据实时采集-进度动态预警-流程智能优化”这种模式，达成进度管理朝着精准化方向发展的目标。在数据采集这一环节当中，借助物联网传感器对各工序诸如工件流转数量、设备运行状态以及工序完成时长等数据实施实时采集，并且结合 RFID 芯片对工件自上线直至下线的全流程时间节点予以记录，这些数据经过边缘计算节点处理后会上报至管理平台。就像在汽车车身涂装线里，每个车身都携带着唯一的 RFID 标签，当其经过预处理槽时就会自动记录进出槽的时间，于喷涂工位则记录机器人喷涂开始和结束的时间，以此实现对各工序耗时进行精准统计。在进度预警以及调控方面，基于大数据构建起进度偏差预警模型，当某工序的完成时间超出标准阈值达 10% 的时候，平台便会自动触发预警，并且通过可视化界面显示出滞后工序及其产生的原因。与此同时，智能排程系统结合实时数据对生产计划进行动态调整^[1-5]。

（二）质量管理：全流程溯源与智能检测

在过程参数管控方面，利用物联网对涂装关键工艺参数实施实时监控操作，建立起参数波动和质量风险之间的关联模型。比如在喷涂工序过程当中，实时监测喷涂压力、涂料粘度以及喷枪移动速度等参数情况，一旦参数超出预设的范围，系统就会立刻暂停设备运行并且发出警报，以此避免批量质量问题的产生。在烘干工序方面，借助温度传感器实时采集炉内不同区域的温度数据，以此保证工件受热均匀，减少涂层出现开裂、脱落等各类缺陷的状况。在智能缺陷检测方面，运用机器视觉与 AI 算法替代人工检测的方式。于检验工位部署高清相机与光源系统，针对工件表面展开 360° 拍摄工作，拍摄所得图像经过 AI 缺陷检测模型处理之后，能够精准识别像针孔、流挂、橘皮等常见缺陷，识别精度能够达到 99% 以上。与此同时，模型通过持续学习人工复核数据从而不断优化自身，进一步提升检测的准确率。与人工检测相比较而言，智能检测不仅将检测效率提升了 3 倍，还能够有效避免因人工疲劳而导致的漏检问题。在全链条溯源范畴内，借助区块链精心搭建质量溯源平台，将工件的 RFID 信息跟各工序参数以及检测结果以关联形式存储起来，这样一来，当质量问题被察觉到的时候，凭借工件编号便能够迅速追溯到对应的生产设备、操作人员以及原材料批次等相关信息，从而实现质量责任的精准

定位，同时也为工艺优化提供所需的数据支撑^[6-10]。

（三）成本管理：精准核算与节能降耗

在能耗管理层面上，于喷涂机器人、烘干炉以及水泵等主要能耗设备处部署智能电表、水表还有燃气表，对能耗数据进行实时采集工作，借助大数据分析手段来识别是否存在能耗异常状况。比如说说烘干炉作为涂装线的主要能耗设备，系统通过分析炉内温度和工件数量之间匹配关系，进而智能地调节燃烧器功率，以避免由于“空炉运行”或者“过度加热”而造成的能耗浪费现象。在耗材管理相关方面，通过物联网达成涂料、溶剂等耗材的精准计量操作。在涂料输送管道上安装流量传感器，针对各喷涂工位的涂料消耗量实施实时监测，结合工件数量以及喷涂面积，计算出单位产品涂料消耗标准，一旦实际消耗超出标准值时，系统自动进行预警，对“涂料泄漏”或者“喷涂参数不当”等一系列问题展开排查。与此同时，智能配料系统依据工件颜色以及批次需求，精准地调配涂料配比，从而减少废料的产生量。在成本动态核算方面，系统把实时采集到的能耗、耗材、人工等诸多数据跟成本核算模型相结合，生成单位产品成本动态报表，为管理层对生产计划做出调整以及优化成本结构提供实时数据方面的支持，从而改变了传统“月末算账”所存在的滞后性弊端。

（四）安全管理：风险预判与智能防控

在风险监测这个领域，在涂装车间内部署可燃气体传感器、烟雾报警器以及红外热像仪等多种设备，实时监测车间内部可燃气体浓度、温度以及设备运行温度等安全指标。例如当涂料储存区可燃气体浓度达到设定阈值的时候，系统马上触发声光报警，并且自动关闭区域通风阀门，启动防爆排风设备。在喷涂机器人作业区域，借助视觉传感器对人员闯入情况进行监测，一旦发现有违规闯入现象，立即暂停设备运行，进而避免安全事故的发生。在智能预警层面，依赖于基于 AI 算法精心构建起可用于安全风险预测的模型，通过对设备运行参数、环境指标以及历史事故数据等进行深入剖析，以此来对潜在风险加以预判；比如说，对喷涂机器人的振动频率与运行噪声数据展开分析，提前识别像轴承磨损这般的故障隐患，从而发出预防性维护预警，以避免由设备故障所引发的诸如火灾或者机械伤害之类的安全事故。而应急联动范畴内，构建起具有智能化特征的应急响应系统，当安全事故一旦发生，该系统便会自动启动应急预案，包含切断事故区域电源与气源，引导消防设备精准定位火灾位置，并且同时借助车间广播与指示灯来引导人员疏散，以此将事故造成的损失尽可能降低至最低限度。

（五）设备管理：预测性维护与效能提升

涂装线设备管理将降低非计划停机时间、提升设备综合效率（OEE）设定为核心目标，而传统设备管理所常采用的“故障后维修”或者“定期预防性维修”模式，它们可能会导致生产中断，也可能因为过度维修而增加成本，在实现智能化转型之后，是通过“实时状态监测-故障精准预判-智能维护调度”这般的模式去达成预测性维护的升级。于状态监测这个环节当中，为喷涂机器人、输送链条、烘干炉风机等关键设备上装上振动传感器、温度传感器以及电流传感器，以此实时采集设备运行数据，这些数据在经过边缘计算节点过滤降噪处理，会被传输到设备管理平台，进而建立起设备健康档案。就好比以喷涂机器人来说，系统会持续追踪其关节电机温度、运动轨迹偏差之类的数据，由此形成健康曲线基准。

（六）人员管理：智能排班与技能提升

在涂装线高效运行中，人员管理起着保障作用，其核心在于做到人力配置最优化与技能水平精准匹配这两方面，然而在传统管理状况下，排班主要依靠经验判断，这样很容易出现人力冗余或者短缺的情形，技能考核又依赖人工评估，主观性比较强，智能化管理则是借助“需求精准测算-智能排班调度-技能数字化管理”的方式得以升级。在人力需求测算方面，系统会把生产计划中的工件批次、工艺复杂度与设备运行状态相结合，通过大数据模型对各工位实时人力需求进行精准预测，比如当批量生产高难度曲面工件的时候，就会自动增加喷涂工位辅助人员配置。智能排班系统会综合考量员工技能等级、考勤记录以及休息需求，自动生成最优排班表，还支持一键调整换班、加班等特殊需求，进而确保人力与工位需求精准匹配，人力冗余率也得以降低20%。

三、应用成效与典型案例分析

A 汽车零部件企业为了有效解决传统涂装线所面临的管理痛点问题，实施了智能化升级改造这一举措，构建起“物联网+数字孪生+AI”的工程管理体系，并且取得了相当显著的应用成效；具体来看，在进度管理环节，凭借智能排程以及实时监控手段，涂装线生产周期从原本的8小时被成功缩短至6小时，订单交付及时率也随之提升到98%；在质量管理方面，通过AI缺陷检测系统使缺陷率由0.8%降低至0.15%，客户投诉率亦下降了60%；在成本管理层面，单位产品能耗下降达18%，涂料损耗率从5%降至1.2%，每年能够节约成本超过300万元；在安全管理领域，实现了对安全隐患的实时预警，全年未发生重大安全事故情况。该案例清晰地表明，智能化技术的应用并非仅仅简单地设备进行替换，而是借助数据把各个管理环节加以贯通，实现管理模式由“经验驱动”朝着“数据驱动”方向的转变，显著提升涂装线工程管理的效率、精度以及安全性。

四、智能化应用存在的问题与优化方向

（一）存在的主要问题

尽管智能化技术在涂装线工程管理当中已然取得相当显著的成效，然而依然存在三个方面的问题：其一是技术融合深度不够

充足，部分企业仅仅实现单一环节的智能化情形，像是单独应用智能检测或者能耗监控，却没有形成全流程的数据贯通，最终导致出现“信息孤岛”这一现象；其二是专业人才处于短缺状态，既了解涂装工艺同时又掌握智能化技术的复合型人才极度匮乏，导致部分先进设备与系统没办法充分发挥其效能；其三是成本投入门槛相对较高，中小企业由于受到资金方面的限制，难以承担全套智能化系统的研发与改造所需费用。

（二）优化方向

一方面，致力于构建一个旨在打破各系统数据壁垒进而实现进度、质量、成本以及安全管理的数据协同并借助数字孪生模型达成全流程可视化管控的一体化智能管理平台；另一方面，着重通过企业与职业院校展开合作开设专门的“涂装智能化”定向专业以及同步开展内部培训来提升现有管理人员智能化操作技能的方式加强人才培养与引进；再一方面，针对中小企业的实际需求推广一种能够通过开发“按需选配”的模块化系统以降低智能化升级门槛（例如先着手实现像质量检测这类关键环节的智能化改造而后再渐进式扩展至全流程）的模块化智能解决方案。

五、结论

智能化技术被认为涂装线工程管理提供了一种具备全新视角的解决方案，借助物联网、人工智能以及数字孪生等前沿技术在进度、质量、成本和安全管理等诸多环节得以深度应用，传统管理模式的痛点由此被有效破解，管理效能获得显著提升的目标得以实现。经由实践表明，涂装线工程管理的智能化升级，其核心要点在于以数据为核心构建一套闭环管理体系，达成从“被动应对”往“主动防控”以及从“经验决策”迈向“数据决策”的实质性转变。虽然目前仍存在诸如技术融合程度尚显不足、专业人才较为短缺等等一系列问题，但伴随技术持续走向成熟以及成本逐步降低的趋势，智能化管理被推测极有可能成为涂装线工程管理未来的主流模式，进而为制造业的高质量发展提供不可或缺的有力支撑。

参考文献

- [1] 徐波涛, 吴连伟, 刘洋, 郑英杰, 李化贤, 杜金亮. 发动机涂装线装备全寿命周期精细化管理研究与应用[J]. 中国设备工程, 2024, (S1): 319-322.
- [2] 田云, 卜洪涛, 王森, 操金明. 拖拉机驾驶室及覆盖件高端涂装线规划设计新思路[J]. 现代涂料与涂装, 2023, 26(06): 21-23.
- [3] 黄海山. 完颜成功. 60 JPH 智能化涂装生产线的规划策略[J]. 汽车实用技术, 2023, 48(11): 179-183.
- [4] 陈蒙, 张竞予. 特种集装箱涂装线的智能化改造[J]. 黑龙江科学, 2023, 14(10): 148-150.
- [5] 王博. 钢桥智能化涂装机器人导航方式的探索与应用[J]. 现代涂料与涂装, 2023, 26(05): 18-20+23.
- [6] 李建军, 张安永, 王德龙. 钢结构智能化涂装分析——以宁波舟山港主通道为例[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(24): 14-17.
- [7] 李鸿伟, 厉志成, 张岳. 桥梁钢结构智能化涂装设备的开发与应用研究[J]. 四川水泥, 2022, (08): 233-235.
- [8] 王伟, 蔡明波, 周军红, 杨高阳, 梁公峰, 高如国. 钢结构智能环保涂装线设计分析与应用[J]. 建筑施工, 2022, 44(02): 384-386.
- [9] 本刊. 晋工机械智能化叉装机产业化技改项目竣工投产[J]. 石材, 2020, (02): 21.
- [10] 万阳, 江益群, 周智勇, 许建伟, 于建新, 邹文峰, 华军. 发动机涂装线智能化升级改造项目的策划与实施[J]. 电镀与涂饰, 2019, 38(14): 743-746.