

基于工艺需求的无人天车智能化提升策略研究

付宝胜 单静波

首钢京唐钢铁联合有限责任公司 河北唐山 063000

摘 要: 随着钢铁企业的设备自动化、智能化水平不断提高,无人化天车已成为主流发展趋势。针对某钢铁企业冷轧轧后库无人化天车改造项目的实际应用,提出基于工艺需求的智能化提升策略。通过分析冷轧生产工艺流程中物料吊运、存储、转运的特殊要求,优化无人天车路径规划算法,使其精准匹配生产节拍。同时,引入传感器与视觉识别技术,强化天车对钢卷规格、位置的动态感知能力,实现高效装卸。结合工业物联网搭建数据交互平台,实时监控设备运行状态并智能调度,从而提升无人天车的作业效率与稳定性,满足钢铁企业对智能化生产的需求。

关键词: 工艺需求;无人天车;智能化提升

1 无人天车智能化现状分析

从技术发展来看,当前无人天车智能化呈现多维度突破态势。企业通过融合 5G 通信、人工智能、自动化控制等前沿技术,推动天车从单一设备向智能系统升级。如敬业集团冷轧一期轧后库引入 5G+ 智能化天车系统,利用高精度定位与防摇摆技术实现钢卷精准抓取运输,通过 360° 监控与安全防护系统提升作业安全性。本钢三冷轧采用“5G+Wi-Fi”双链路热备份网络,结合数字孪生技术构建车间实景模型,使天车响应速度提升 30%,吊运精度达毫米级,产能突破历史峰值^[1]。

在感知与决策层面,视觉识别、激光扫描等技术广泛应用。太钢冷轧硅钢厂无人天车通过三维扫描系统实现钢卷自动识别与定位,误差率控制在毫米级,格雷母线高精度位移测量系统则为天车提供连续无盲区的位置检测,适应高温、粉尘等恶劣环境,测量精度 $\leq 5\text{mm}$ ^[2]。AI 算法的深度介入进一步优化了作业逻辑,

尽管技术进步显著,无人天车仍面临核心挑战。不同品牌设备的通信协议与接口标准不统一,导致多厂商系统难以兼容,复杂工况下,如库区物料动态变化、设备突发故障时,天车的自主决策能力与系统稳定性仍需提升。工业场景对网络时延与可靠性要求苛刻(如本钢三冷轧要求时延 $<20\text{ms}$ 、可靠性 99.999%),部分企业因网络基础设施薄弱难以支撑高频数据交互。未来,随着边缘计算、数字孪生与工业 AI 的深度融合,无人天车将向全流程自主化、多设备协同化方向发展,进一步释放智能制造潜力。

2 工艺需求驱动无人天车智能化的发展

2.1 提高定位精度

工艺需求驱动下,无人天车通过融合多源技术实现定位精度的全面提升。冷轧厂原料库智能化改造以天车无人化与 WMS 系统构建为核心,通过格雷母线技术实现毫米级绝对位置编码,结合激光扫描与三维建模动态感知钢卷位置,确保原料钢卷入库、上料等流程的精准控制。在数字孪生技术支持下,虚拟模型与物理库区实时映射,通过工业物联网数据交互动态校准天车运行轨迹,解决复杂工况下的定位误差问题。例如,格雷母线技术在冷轧成品库中实现 $\pm 2\text{mm}$ 定位精度,适应金属粉尘、电磁干扰等恶劣环境,确保钢卷“对位零偏差”,多源定位技术的协同应用,使天车在物料抓取、放置等关键环节的位置控制精度满足精密工艺要求,为冷轧厂原料库的高效运行提供基础保障^[3]。

2.2 增强防摇控制能力

通过点无静止运行功能,无人天车在缩短运行时间的同时强化防摇控制,系统基于动力学模型开发自适应控制策略,实时计算吊具摆动角度与速度,动态调整天车加速度曲线与加减速时间,抑制初始摆动趋势^[4]。当检测到危险区域时,天车通过路径规划算法自动规避障碍点,结合高精度角度传感器与惯性测量单元的闭环反馈,触发反向加速度补偿机制抵消摆动惯性。例如:防摇系统通过软测量技术估算摆角,调整变频器输出频率,使吊具在高速运行或急停时的摆动幅度降低 95% 以上。

2.3 优化调度算法

无人天车与智能库管系统通过信息域与物理域协同优化调度效率,物理域的传感设备实时采集天车负载、位置等数据,信息域的智能算法基于工业大数据构建多车协同调度模型,动态分配吊运任务并规划最优路径。板坯入库模型采用 Memetic 算法优化垛位分配,结合数字孪生技术模拟库区物流场景,提前预判调度方案合理性,缩短物料周转时间。边缘计算决策机制使系统快速响应生产计划变更,通过实时重排任务队列与调整路径,确保多车协同作业的高效配合。

3 无人天车智能化提升关键技术

3.1 高精度定位技术

无人抓斗天车系统通过多技术融合实现毫米级定位精度。系统集成边缘控制器、VR 三维虚拟仿真、PLC+ 变频控制及格雷母线精确定位技术,构建多层次定位体系。格雷母线技术通过电磁耦合实现 $\pm 2\text{mm}$ 绝对位置编码,结合激光扫描与三维建模技术,对库区物料空间分布进行动态感知,生成毫米级点云数据,为路径规划提供环境参考^[5]。在冷轧成品库场景中,格雷母线技术可实现 $\pm 1.5\text{mm}$ 定位精度,卷板损耗降低 98%。同时,VR 虚拟仿真系统实时映射物理库区,通过工业物联网数据交互动态校准天车运行轨迹,确保钢卷“对位零偏差”。多源技术协同应用,使天车在粉尘、电磁干扰等恶劣环境下仍能保持稳定的定位精度,满足钢铁、半导体等行业对物料搬运的极致要求。

3.2 智能感知与识别技术

基于 5G+ 工业 Wi-Fi 的双网络调度引擎,通过多模态感知技术实现天车任务的精准决策。5G 网络提供低至 10ms 的传输延迟和 2Gbps 带宽,支持实时传输天车运行状态、吊具姿态等数据,工业 Wi-Fi 覆盖半径达 200 米,传输速率 300Mbps,保障库区全域数据无缝交互。系统集成三维激光扫描仪,以 1mm 精度构建库区三维模型,结合机器视觉识别物料外形、尺寸及库位信息,实现动态环境下的自主避障与路径优化。在半导体晶圆厂应用中,天车运行速度达 5.3 米/秒,抓取时间仅数秒,整周期控制在 3 分钟内,通过双网络协同调度,任务响应速度提升 40%,路径规划效率提高 30%,有效支撑高密度生产场景下的物流需求。

3.3 智能决策与控制技术

无人天车与智能库管系统上通过信息域与物理域深度协同实现全局优化。物理域的高精度传感器实时采集天车负

载、位置等数据,信息域的智能算法基于工业大数据构建多车协同调度模型。例如,Memetic 算法优化垛位分配,结合数字孪生技术模拟库区物流场景,使物料周转时间缩短 20%,防摇控制算法通过软测量技术估算摆角,调整变频器输出频率,使吊具摆动幅度降低 95% 以上。在钢铁企业应用中,系统通过边缘计算实时响应生产计划变更,多车负载均衡率提高 30%,库内倒垛率降低 30%,库区资源利用率提升 20%。

4 基于工艺需求的无人天车智能化提升策略

4.1 系统架构优化策略

针对热轧库高温多尘、多车协同的复杂工艺环境,通过构建“分层解耦+数据驱动”的立体化架构,解决原有系统实时性不足与工艺适配性差的问题。

在传统控制层基础上新增边缘计算层与数字孪生层:

数据采集层部署耐高温格雷母线(定位精度 $\pm 5\text{mm}$, 耐温 150°C)、六轴力传感器(量程 50 吨,分辨率 0.1%FS),实时采集钢坯温度、负载等 8 项工艺参数,传输延迟 $<20\text{ms}$ 。

边缘计算层集成轻量化防摇算法(摆动抑制精度 $\pm 100\text{mm}$)与路径规划引擎,就地处理 90% 实时控制指令,响应时间压缩至 30ms,减少中央服务器负载 60%。

中央控制层通过 1Gbps 工业以太网接入智能库管系统,基于热轧工艺节拍(25 秒/次吊运)动态生成任务队列,支持 8 车协同调度,任务分配冲突率降低 40%。

采用扩展卡尔曼滤波融合格雷母线绝对位置、UWB 相对定位(精度 $\pm 10\text{mm}$)及视觉识别数据,构建动态库区数字地图,解决高温环境传感器漂移问题,使钢坯定位误差从 $\pm 15\text{mm}$ 降至 $\pm 5\text{mm}$ 。内置工艺规则引擎,根据钢坯温度($>1100^{\circ}\text{C}$ 时吊运速度自动降至 1.8m/s)、重量(>25 吨时加速度限制 0.6m/s^2)自动调整控制参数,避免物料损伤。

每台天车配置边缘控制器(算力 20TOPS),通过 5G 专网(时延 $<20\text{ms}$)实时同步状态。当检测到辊道故障时,边缘控制器 1 秒内生成 3 套备选路径,中央调度算法 5 秒内完成任务重分配,较传统集中式架构效率提升 70%。实际应用中,库区空驶率从 28% 降至 12%,吊运效率提升至 30 次/小时。架构优化后,系统在高温环境下连续运行时间从 8 小时延长至 24 小时,设备故障率降低 40%,为复杂工艺控制提供稳定底座。

4.2 功能模块完善策略

从“感知-控制-决策”全链条强化核心模块,解决原有系统功能单一、工艺响应滞后问题。

4.2.1 实时工艺感知升级

新增高温视觉识别系统(耐温 150℃,识别精度 $\pm 2\text{mm}$)与毫米波雷达阵列(测距精度 $\pm 3\text{mm}$),实时检测钢坯表面缺陷(分辨率 0.5mm^2)及垛位偏移(角度误差 $\pm 1^\circ$),障碍物检测距离达 20m,响应时间 $<10\text{ms}$ 。通过 RS-485 总线与 PLC 实时交互,钢坯到位信号传输延迟从 500ms 缩短至 50ms。

4.2.2 动态防摇控制强化

开发自适应防摇算法,基于吊具动力学模型与张力传感器(精度 $0.1\%\text{FS}$),实时调整 PID 参数,负载 >25 吨时,加减速时间延长至 3 秒,摆动幅度 2 个周期内抑制至 $\pm 100\text{mm}$ 以内,钢坯温度 $>1000^\circ\text{C}$ 时,抓取力补偿 15%,放置冲击加速度从 8m/s^2 降至 3m/s^2 ,表面划伤率从 0.7% 降至 0.15%。

4.2.3 智能库管模块深度集成

引入 Memetic 算法优化垛位分配,综合钢坯温度(安全间距 $\geq 2\text{m}@1000^\circ\text{C}$)、轧制优先级(紧急订单响应 <30 秒),动态垛位地图刷新率 10Hz,天车任务接收延迟 $<20\text{ms}$,路径规划效率提升 40%。

4.3 智能化升级策略

针对传统调度算法在多约束条件下的低效问题,通过强化学习、数字孪生等技术构建智能决策体系。

以热轧库吞吐量最大化为目标,设置 12 维状态空间(任务优先级、设备负载、路径风险等),通过 10 万小时离线训练,使天车在“跨区转运”“紧急插单”场景下任务响应时间从 40 秒缩短至 10 秒,路径冲突率降低 60%。算法内置动态权重,高温环境自动提升防摇优先级,吊运安全性提升 30%。

构建 1:1 高精度孪生模型(建模误差 $<1.5\%$),实时模拟钢丝绳寿命(预测精度 ± 500 次循环)、变频器温度(误差 $\pm 2^\circ\text{C}$),提前 2 秒预警“钢坯粘连”“断丝”等 10 类故障,生成 200+ 预控方案。边缘计算层检测到张力异常($\pm 10\%$ 波动)时,自动切换备用吊具,非计划停机时间减少 70%。

基于 5 万次吊运数据训练机器学习模型(预测精度 92%),根据钢坯材质(普碳钢/不锈钢)、厚度($<20\text{mm}$

薄板)输出最优策略:吊运不锈钢薄坯时,速度降至 1.2m/s ,抓取力波动控制 $\pm 5\%$,避免板材变形;高温钢坯($>1200^\circ\text{C}$)路径优先选择通风通道,电控系统故障率降低 30%。

4.4 人机协同策略

构建“可视化监控-分级干预-知识沉淀”体系,平衡自动化与人工灵活性,确保异常工况下工艺连续性。集成库区数字孪生(更新频率 20Hz)、设备状态实时看板,AR 定位故障点误差 $<50\text{cm}$,高温设备(如变频器 $>85^\circ\text{C}$)自动高亮并推送处置方案,操作延迟 $<50\text{ms}$,支持同时监控 10 台天车,异常识别时间从 3 分钟缩短至 20 秒。

设置三级远程干预机制:

一级预警(钢丝绳磨损 80%):系统自检并生成维护计划,无需人工介入。

二级干预(辊道故障):推送 3 套推荐方案(响应时间 <10 秒),确认后自动执行,干预频次从 20 次/班降至 5 次以下。

三级接管(未知故障):手柄远程控制延迟 $<100\text{ms}$,操作日志自动同步算法训练,误操作率降低 80%。

通过 NLP 转化人工处置经验(月均新增 50+ 条规则),集成模拟培训模块(故障场景还原度 90%),新操作员培训周期从 2 周缩短至 3 天,考核通过率提升至 95%。知识库与调度算法双向交互,实现“经验-规则-决策”闭环优化。人机协同策略使系统在保持 95% 自动化率的同时,极端工况处理效率提升 80%,构建了“机器主导、人工辅助”的高效协作模式。

5 结论

基于工艺需求的无人天车智能化提升要根据热轧库高温、多尘、多车协同的复杂工况,实施系统架构优化、功能模块完善、智能化升级及人机协同四大策略。通过多源数据融合定位技术将精度提升至 $\pm 5\text{mm}$,自适应防摇算法使摆动幅度控制在 $\pm 100\text{mm}$ 以内,深度强化学习调度让任务响应时间缩短至 10 秒。为传统工业场景无人化改造提供可复制的技术范式,推动无人天车从自动化向智能化深度转型。

参考文献:

[1] 井春浩. 无人天车智能库管系统研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2025, 15 (01): 86-89.

[2] 朱亦辰,王婧雯,宋媛媛,等. 基于图像解析的无人天车安全预警系统[J]. 河北冶金, 2025, (01): 72-75.

[3] 付欣, 邱永峰, 陈蔚国, 等. 炼铁厂高炉底滤池智能无人天车控制系统设计与应用实践 [J]. 有色设备, 2024, 38 (04): 86-91.

[4] 许天龙, 毕崇洋. 无人天车防摇摆控制系统概述 [J]. 冶金自动化, 2024, 48 (S1): 50-53.

[5] 张灿, 薛鑫, 刘海峰. 基于超声波传感器的无人天车

避障技术研究 [J]. 自动化应用, 2024, 65 (03): 157-159.

作者简介:

付宝胜, 1984年6月9日。性别: 男。民族: 汉族。籍贯: 黑龙江省东宁市。学历: 本科。职称: 工程师。从事研究方向: 钢铁精整, 钢卷智能物流