

基于工艺需求的无人天车智能化提升策略研究

付宝胜¹, 单静波²

1. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司, 河北 唐山 063000

2. 北京首钢自动化信息技术有限公司, 北京 100041

DOI:10.61369/ERA.2026090009

摘 要 : 钢铁企业设备逐步走向自动化、智能化, 无人化天车正成为一种主要的发展趋向。针对某钢铁企业热轧成品库无人化天车改造项目而言, 给出依靠工艺需求的智能化改进方案, 通过剖析热轧生产工艺流程中物料吊运、储存、转运的独特之处, 优化无人天车的路径规划算法, 让其准确契合生产节奏。而且采用传感器和视觉识别技术, 加强天车对钢卷规格、位置的动态感知能力, 做到高效装卸。利用工业物联网形成数据交互平台, 随时监测设备运行状况, 并实施智能调度, 以此来提升无人天车的工作效率及其稳定性, 进而符合钢铁企业智能化生产的需要。

关 键 词 : 工艺需求; 无人天车; 智能化提升

Research on Intelligent Improvement Strategy of Unmanned Crane Based on Process Requirements

Fu Baosheng¹, Shan Jingbo²

1.Shougang Jingtang United Iron and Steel United Co., LTD., Tangshan, Hebei 063000

2.Beijing Shougang Automation Information Technology Co.,Ltd., Beijing 100041

Abstract : The equipment of steel enterprises is gradually moving towards automation and intelligence, and unmanned overhead cranes are becoming a major development trend. For the unmanned overhead crane renovation project of a steel enterprise's hot rolling finished product warehouse, an intelligent improvement plan based on process requirements is proposed. By analyzing the unique features of material lifting, storage, and transportation in the hot rolling production process, the path planning algorithm of the unmanned overhead crane is optimized to accurately match the production rhythm. Moreover, sensors and visual recognition technology are used to enhance the dynamic perception ability of the overhead crane on the specifications and positions of steel coils, achieving efficient loading and unloading. By utilizing the Industrial Internet of Things to form a data exchange platform, the operation status of equipment can be monitored at any time, and intelligent scheduling can be implemented to improve the efficiency and stability of unmanned overhead cranes, thereby meeting the needs of intelligent production in steel enterprises.

Keywords : process demand; unmanned crane; intelligent improvement

引言

随着钢铁企业加速向自动化、智能化转型, 无人天车已成为物料搬运系统升级的重要方向。然而, 热轧库区高温、多尘、多车协作的复杂工况对无人天车的定位精度、防摇控制及调度效率提出了极高要求, 现有系统在实时性、工艺适配性方面仍存在明显不足。本文以某钢铁企业热轧库无人天车改造为研究对象, 聚焦工艺需求驱动下的智能化提升策略, 从系统架构优化、功能模块完善、智能决策升级与人机协同四个维度展开研究, 旨在构建适应复杂工况的无人天车智能控制体系, 为同类场景的智能化改造提供可复用的技术方案。

一、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^[1-2]。

在感知与决策层面,视觉识别、激光扫描等技术广泛应用。首钢京唐热轧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 $\leq 5\text{mm}$ ^[3]。AI算法的深度介入进一步优化了作业逻辑,

技术虽有大幅改进,但无人天车仍存在核心难点:各品牌设备的通信协议及接口标准并不统一,这使得多厂商系统很难相互适配;在复杂工况下,比如库区物料不断变动或者设备突然出现故障的时候,天车自身的决策能力和系统的稳定性还要加强^[4]。工业场景对于网络时延和可靠性的要求很严格(就像首钢京唐一冷轧原料库就要求时延小于20毫秒,可靠率达到99.999%),有些企业由于网络基础设施比较差,无法承受高频次的数据交换。日后,伴随边缘计算、数字孪生和工业AI深度融合,无人天车将会朝着全流程自主化、多设备协同化的方向去发展,从而更好地发挥智能制造的潜能。

二、工艺需求驱动无人天车智能化的发展

(一) 提高定位精度

工艺需求推动之下,无人天车借助融合多种技术来达成定位精度的全方位优化。热轧成品库的智能化改造重点在于天车无人化以及创建WMS系统,利用格雷母线技术做到毫米级别的绝对位置编码,并凭借激光扫描和三维建模随时掌握钢卷的位置,从而保障原料钢卷入库、上料等过程能够精确控制^[5]。依靠数字孪生技术,虚拟模型和实际库区可以即时对应,经由工业物联网的数据交互动态调整天车的行驶路径,化解复杂情况下产生的定位误差。格雷母线技术在冷轧成品库达成 $\pm 2\text{mm}$ 的定位精度,可以应对含有金属粉尘、存在电磁干扰等不良环境,使得钢卷“对位”毫无差错。多种定位技术共同作用,令天车在物料夹持、安放等重要步骤中的位置把控达到精细工艺标准,进而给热轧厂成品库的高效运作供应基本支撑^[2]。

(二) 增强防摇控制能力

通过点无静止运行功能使得无人天车既能缩减运行时间,又能加强防摇控制。该系统依靠动力学模型创建起自适应控制策略,随时考量吊具的摆动角度及速度,并据此动态调节天车的加速度曲线以及加减速时间来抑制其最初的摆动态势。一旦察觉到危险区域,天车就会凭借路径规划算法自行避开障碍点,而且借助高精度角度传感器和惯性测量单元形成的闭合回路反馈来激活反向加速度补偿机制,以消除摆动惯性。比如防摇系统利用软测量技术去估计摆角并调节变频器的输出频率,从而使得吊具在高速运行或者紧急停止的时候,其摆动幅度缩减到95%以上。

(三) 优化调度算法

无人天车和智能库管系统经由信息域与物理域协作来提升调度效率。物理域的传感设备会即时收集天车负载、位置等相关数据;信息域的智能算法依靠工业大数据形成多车协同调度模型,

并动态分配吊运任务,规划最佳路径。热轧成品入库模型利用Memetic算法优化垛位分配,加上数字孪生技术模拟库区物流场景,预先判断调度方案是否合理,从而缩减物料周转时间。边缘计算决策机制能让系统迅速应对生产计划的改变,它会及时重新安排任务队列并调整路径,以保证多车协同作业时能有效配合。

三、无人天车智能化提升关键技术

(一) 高精度定位技术

无人钢卷吊运天车系统依靠多种技术融合来达成毫米级的定位精准度。该系统把边缘控制器、VR三维虚拟仿真、PLC+变频控制以及格雷母线精确定位技术融合起来,形成多层次的定位体系。格雷母线技术利用电磁耦合做到 $\pm 2\text{mm}$ 的绝对位置编码,再配合激光扫描和三维建模技术,可以随时察觉库区物料的空间分布情况,并创建出毫米级别的点云数据,给路径规划赋予环境参照。在冷轧成品库这种情况下,格雷母线技术能够达到 $\pm 1.5\text{mm}$ 的定位准确度,而且能把卷板的损失缩减到只剩2%。VR虚拟仿真系统会及时反映物理库区的状态,通过工业物联网的数据交互来动态调整天车的行驶路线,从而保证钢卷“对位无误”。当采用大量源技术共同作用的时候,即使是在灰尘弥漫或者存在电磁干扰这样糟糕的环境中,天车仍然可以维持稳定的定位精确度,这正好符合钢铁、半导体等行业对于物料运输提出的苛刻需求。

(二) 智能感知与识别技术

依靠5G+工业Wi-Fi这种双网络调度引擎,可以凭借多模态感知技术做到对天车任务精确决策。5G网络其传送时延低至10毫秒,带宽高达2Gbps,能够及时传递天车运作状况、吊具姿态等相关数据;而工业Wi-Fi的覆盖范围达到200米,传送速率为300Mbps,从而确保库区各个角落的数据得以顺畅交流。该系统整合了三维激光扫描仪,利用1毫米的精度创建起库区的三维模型,并且借助机器视觉来识别物料的外形、大小以及库位信息,以此达成在动态环境中自动避开障碍物并优化路线的目标。应用于半导体晶圆厂的时候,天车的行驶速度可达到5.3米/秒,抓取所需时间不过几秒钟,整个过程控制在3分钟以内。经由双网络共同调度之后,任务的响应速度加快了40%,路径规划的效率提高了30%,有效地满足了高密度生产环境下物流方面的需求。

(三) 智能决策与控制技术

无人天车与智能库管系统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%。

四、基于工艺需求的无人天车智能化提升策略

（一）系统架构优化策略

热轧库存在高温多尘、多车协作这样复杂的工艺环境，要解决原有系统实时性短缺以及工艺适配性欠佳的情况，可以形成“分层解耦+数据驱动”的立体化架构。

在传统控制层基础上新增边缘计算层与数字孪生层：

数据采集层采用耐高温格雷母线（定位精度 $\pm 5\text{mm}$ ，耐温 150°C ）以及六轴力传感器（量程 50吨 ，分辨率 0.1FS ），可以即时采集钢坯温度、负载等8个工艺参数，并且其传送延迟小于 20ms [4]。

边缘计算层融合了轻量化防摇算法（摆动压制精度 $\pm 100\text{mm}$ ）以及路径规划引擎，可以就地处理高达90%的即时控制指令，其响应时间被缩减到 30ms ，从而减轻中央服务器60%的负担。

中央控制层经由 1Gbps 工业以太网接入智能库管系统，按照热轧工艺节拍（ $25\text{秒}/\text{次吊运}$ ）动态生成任务队列，具备8车协同调度能力，任务分配冲突率缩减40%。

利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 $\pm 10\text{mm}$ ）以及视觉识别数据，创建动态库区数字地图，化解高温环境下传感器漂移的问题，使得钢坯定位误差由 $\pm 15\text{mm}$ 缩减到 $\pm 5\text{mm}$ 。并且内部设有工艺规则引擎，按照钢坯温度（当温度高于 1100°C 时，吊运速度会自行减慢至 1.8m/s ）、重量（如果超过 25吨 就将加速度限定为 0.6m/s^2 ）来自动调节控制参数，从而防止物料遭受损害。

每台天车设有边缘控制器，其算力为 20TOPS ，该控制器经由 5G 专网与系统其他部分保持实时同步，其时延小于 20ms 。一旦察觉到辊道出现故障，边缘控制器便会在1秒之内给出3条替代路径，而中央调度算法也只需再过5秒就能完成任务的重新安排，相比于传统的集中式架构，其效率得到了高达70%的改善。在实际操作过程中，库区的空驶率由28%缩减到12%，吊运效率更是达到了惊人的30次/小时。经过架构改良之后，系统在高温环境里可以连续运行长达24个小时，设备的故障率缩减了足足40%，从而给复杂工艺的控制赋予了一个稳定的根基。

（二）功能模块完善策略

提升“感知—控制—决策”这条链路上的核心模块，以此来解决最初系统功能单一、工艺反应迟钝的情况。

1. 实时工艺感知升级

新添高温视觉识别系统，该系统耐温 150°C ，识别精度达 $\pm 2\text{mm}$ ；毫米波雷达阵列的测距精度为 $\pm 3\text{mm}$ 。这些设备可及时监测钢坯表面缺陷（分辨率为 0.5mm^2 ）、垛位偏移状况（角度误差 $\pm 1^\circ$ ），其障碍物检测距离为 20m ，响应时间小于 10ms ，经由 RS-485 总线与 PLC 即时交互，钢坯到位信号的传递时延从 500ms 缩减至 50ms 。

2. 动态防摇控制强化

开发自适应防摇算法，凭借吊具动力学模型和精度达 0.1FS 的张力传感器，可适时调整 PID 参数。当负载超出 25吨 时，加减速历时3秒，摆动幅度在2个周期内不超过 $\pm 100\text{mm}$ ；钢卷温度大于 600°C ，抓取力提升15%，放置冲击加速度由 8m/s^2 减至 3m/s^2 ，表面划伤率由 0.7% 降至 0.15% 。

3. 智能库管模块深度集成

用 Memetic 算法去改良垛位分配状况，要全面考量钢坯温度（安全间距至少为2米/1000摄氏度），还要考虑轧制优先级（紧急订单响应时间低于30秒），动态垛位地图的更新频率是10赫兹；天车任务接收会有所延迟，其值小于20毫秒，路径规划的效率得到了提升，增幅达到40%。

（三）智能化升级策略

传统调度算法在多约束条件下存在效率低的情况，可以利用强化学习、数字孪生等技术形成智能决策体系来解决这个问题。

把热轧库吞吐量做到最大当作目标，创建包含12个维度的状态空间（任务优先级、设备负载、路径风险等等）。经过10万小时的离线训练之后，天车在“跨区转运”“紧急插单”这些情况下，任务响应时间由原来的40秒缩减到10秒，路径冲突的发生几率下降了60%；而且算法里自带动态权重，一旦处于高温环境就会自动加大防摇的优先等级，这样吊运的安全性就提升了30%。

创建 $1:1$ 高精度孪生模型，其建模误差小于 1.5% 。该模型可即时模拟钢丝绳寿命（预测精度为 ± 500 次循环）、变频器温度（误差 $\pm 2^\circ\text{C}$ ），并且能提前2秒发出“钢坯粘连”“断丝”等10类故障的警报，形成200多个预控方案；边缘计算层察觉张力存在异常（ $\pm 10\%$ 波动）时，会自动切换备用吊具，如此一来，非计划停机时间缩减了七成。

依靠包含五万次吊运的数据来塑造机器学习模型，其预测精准度达92%。按照钢坯材质（普碳钢或者不锈钢）、厚度（小于20毫米的薄板）给出理想策略：吊运不锈钢薄坯的时候，把速度减慢到1.2米每秒，并把抓取力的波动幅度限定在正负5%以内，防止板材发生形变；对于温度超过 600°C 的高温钢坯，要预先选取通风的路线，而且电控系统的故障概率会缩减30%。

（四）人机协同策略

创建起“可视化观察—分级干涉—知识凝结”的体系，协调好自动化与人工灵活度，保证在异常工况时工艺能持续下去。把库区数字孪生（刷新率 20Hz ）、设备状态即时看板融合进来， AR 定位故障点误差小于50厘米；高温设备（比如变频器超过 85°C ）会自动高亮显示并且推送处理方案，操作延迟低于50毫秒，可以同时观察10台天车，异常识别时间从3分钟缩减到20秒。

设置三级远程干预机制：

一级警报（钢丝绳磨损达80%），系统会自行检测并形成守护方案，不需要人员干涉。

二级干预针对辊道故障情况，给出三套推荐方案，其响应时

间小于10秒，经确认之后会自动执行，这样做的结果就是干预的频率由每班20次缩减到不足5次。

三级接管（未知故障）时，手柄远程控制延迟小于100ms，而且操作日志会自动同步算法展开训练，这样误操作率就可缩减八成。

NLP 把人工处理的经验转化为规则，每月新增50多条；模拟培训模块能还原90%的故障场景，新操作员的培训时间从两周缩减到三天，合格率也达到95%。知识库和调度算法相互影响，实现“经验—规则—决策”的闭环优化。人机协同策略让系统保留95%的自动化水平，而且在极端工况下的处理速度加快80%，创建起“机器为主、人工协助”的高效合作形式。

五、结论

要针对工艺需求来加强无人天车的智能化水平，按照热轧库高温、多尘、多车协作这样复杂的工况，采用系统架构优化、功能模块充实、智能化改进以及人机协作这四项策略。利用多源数据融合定位技术把精度改善到 $\pm 5\text{mm}$ ，依靠自适应防摇算法把摆动幅度控制在 $\pm 100\text{mm}$ 之内，凭借深度强化学习调度使得任务响应时间缩减到10秒，给传统工业场景的无人化改造提供可借鉴的技术范例，促使无人天车由自动化朝着智能化深入转变。

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.