

冶金铁路无人调车机械系统的路径规划与控制研究

牛传辉

河南钢铁集团安阳钢铁股份公司运输作业部 河南 安阳 455004

摘要: 冶金铁路无人调车系统需适应短距离、低速、复杂轨道环境。系统构建包括: 分析调车作业环境特征, 构建路径规划技术体系, 涵盖全局路径规划与局部路径优化; 设计运动控制系统, 涉及车辆动力学建模与轨迹跟踪控制策略; 通过硬件在环仿真平台模拟实际环境进行系统集成, 并构建性能评估指标体系, 从路径规划效率、轨迹跟踪精度、系统鲁棒性等维度全面验证系统运行效果。

关键词: 无人调车机械系统; 路径规划; 控制系统设计

引言: 冶金铁路调车作业在冶金生产中占据关键地位, 其作业环境复杂, 运输系统以短距离、低速运行特征, 轨道布局独特, 多频次调车作业对路径规划实时性要求极高。调车作业受冶金工艺流程时序、轨道容量及特殊轨道条件等约束。在此背景下, 构建科学合理的路径规划技术体系与运动控制系统至关重要。路径规划涵盖全局与局部, 需适应静态与动态环境; 运动控制要精准建模车辆动力学特性, 设计有效的轨迹跟踪控制策略。系统集成与验证环节不可或缺, 硬件在环仿真平台能模拟实际作业环境, 性能评估指标体系可全面衡量系统性能。本文围绕冶金铁路无人调车系统展开研究, 旨在提升调车作业的效率、安全性与稳定性。

1 冶金铁路调车作业环境特征分析

1.1 冶金铁路运输系统的结构特性

冶金铁路运输系统以短距离、低速运行为核心运行特征, 轨道布局呈现独特结构。轨道多分布于生产区域内部, 弯道数量较多且分布密集, 尽头线应用频繁, 同时道口设置密集, 增加了轨道网络的复杂性。复杂作业环境中存在多种障碍物, 固定障碍物主要为生产相关的厂房与各类设备, 分布于轨道周边区域; 动态障碍物则包括作业人员及其他各类车辆, 其移动轨迹具有不确定性。多频次调车作业是冶金生产的重要特点, 作业间隔短、任务衔接紧密, 这就对路径规划提出了极高的实时性要求, 需确保路径规划能够快速响应作业需求, 保障作业连续高效推进。

1.2 调车作业的约束条件

冶金工艺流程具有严格的连续性和时序性, 调车作业作为生产环节的重要组成部分, 需严格遵循工艺流程的时序要求, 这种约束具有刚性, 无法随意调整, 否则会影响整个冶金生产的正常推进。轨道容量存在明确限制, 无法同时容纳过多机车运行, 而冶金生产中多机车

协同作业需求突出, 需合理分配轨道资源, 避免出现轨道占用冲突。特殊轨道条件在冶金区域较为常见, 大坡度轨道会增加机车运行阻力, 小半径曲线则对机车转向和稳定性提出更高要求, 这就需要控制算法具备较强的适应性, 能够根据不同轨道条件做出精准调整, 保障调车作业安全稳定^[1]。

2 路径规划技术体系构建

2.1 全局路径规划方法

全局路径规划是冶金铁路无人调车路径规划技术体系的核心基础, 重点实现静态环境下的最优路径生成, 核心采用改进算法完成路径搜索与构建, 通过对基础算法的参数优化与逻辑完善, 有效提升路径搜索的效率与合理性, 确保规划路径能够适配冶金铁路的作业场景需求。冶金铁路拓扑地图的构建是全局路径规划的重要前提, 需科学明确地图构建的核心方法, 合理界定节点与边的具体表征对象, 节点主要用于表征轨道运行中的关键控制点, 边则用于表征相邻关键控制点之间的轨道段, 通过这种方式实现冶金铁路轨道网络的精准建模, 为后续路径规划提供可靠的基础支撑。启发式函数的设计需充分结合冶金调车作业的实际需求, 综合考量多种核心代价因素, 重点融入轨道长度、道岔转换时间等关键参数, 构建科学合理的复合代价函数, 确保规划出的路径既具备经济性, 又能满足作业高效性要求^[2]。并且融入动态障碍物避让策略, 通过相关算法实现动态环境下的路径灵活调整, 明确采样空间约束要求, 将路径搜索区域严格限定在有效轨道范围内, 有效避免无效搜索行为, 提升搜索效率, 同时妥善处理非完整约束, 将车辆运动学模型全面融入路径生成的全过程, 确保规划路径与机车实际运动特性高度适配, 保障路径的可执行性。

2.2 局部路径优化技术

局部路径优化技术主要用于解决全局路径在实际运

行过程中与现场环境、机车运行状态的适配问题,核心采用模型预测控制技术实现轨迹的实时调整,能够快速响应现场环境的动态变化以及机车运行过程中出现的偏差,及时对路径轨迹进行修正,确保路径具备良好的动态适应性,保障调车作业的平稳推进。滚动优化框架的设计是局部路径优化的关键环节,需重点实现预测时域与控制时域的协同匹配,合理设定两个时域的参数,既兼顾轨迹预测的前瞻性,提前预判可能出现的问题,又保障控制执行的及时性,确保轨迹调整指令能够快速落地,有效提升轨迹调整的精准度。多目标优化函数的构建需综合考量调车作业的核心需求,将安全性、平滑性、能耗作为三大核心优化目标,通过加权组合的方式科学平衡各目标的优先级,避免单一目标优化导致其他性能下降,实现路径整体性能的全面优化。针对动态障碍物带来的安全隐患,需重点开展障碍物运动预测与轨迹重规划工作,通过相关滤波技术实现动态障碍物状态的精准估计,实时捕捉障碍物的运动趋势与状态变化,同时构建完善的碰撞风险评估模型,通过几何距离与时间窗口的双重判断,精准识别各类碰撞隐患,一旦达到风险阈值,及时触发轨迹重规划流程,确保调车作业的安全稳定。

3 运动控制系统设计

3.1 车辆动力学建模

冶金调车机车运行中,其动力学特性呈现显著非线性。车辆启动、制动及转向时,牵引力与速度、转向角度与加速度间存在复杂非线性关系。这种特性源于机械传动间隙、摩擦力变化及轮轨动态耦合作用。尤其在低速工况下,非线性效应更为突出,导致车辆响应延迟和轨迹偏差。精确建模需分析多体动力学效应,明确各部件间相互作用力,为控制策略设计提供基础支撑。牵引与制动系统响应存在迟滞现象,主要由电机电气延迟和机械传动惯性引起。电机从接收指令到输出转矩需经历电磁转换过程,传动装置弹性变形会进一步加剧响应滞后。频繁启停时,迟滞效应导致实际速度与目标值偏差,影响轨迹跟踪精度。建模需通过实验数据拟合迟滞环节传递函数,量化时间延迟与幅值衰减特性,为控制算法补偿提供依据。轨道不平顺是引发车辆振动的主要外部激励源,包括钢轨接头冲击、轨枕间距误差及几何形位偏差等。激励通过轮轨接触传递至车体,引发垂向、横向及纵向振动。建模需考虑悬挂系统动态特性,分析一系、二系悬挂刚度与阻尼对振动传递的影响。需区分确定性激励与随机激励,采用频域分析确定振动主频范围,为振动抑制策略设计提供目标频段。控制变量(牵引力、转

向角度)与执行机构(电机、转向机构)间存在复杂映射。牵引力控制需通过电机调速实现,涉及电流环、速度环双闭环结构,需分析电机转矩-电流特性及传动效率。转向控制需协调道岔状态与转向机构动作,确保轮缘与辙叉正确啮合。建模需整合执行机构动力学方程,明确控制指令到实际输出的传递路径,为控制算法输出限幅提供依据^[3]。牵引力与制动力生成依赖电机转速精确控制。电机转速与输出转矩关系受电磁特性制约,需建立转矩-转速特性曲线模型。牵引工况下,转速与车辆速度通过传动比关联,需考虑传动效率损失;制动工况下,电机作为发电机运行,需分析再生制动与机械制动协调机制。转换模型需整合电气参数、机械参数及运动学关系,形成完整映射链。转向控制与道岔状态耦合是冶金铁路调车关键问题。车辆通过道岔时,转向机构需根据道岔开向调整轮对角度,确保轮缘与护轨无碰撞。建模需分析道岔几何结构(导曲线半径、辙叉角)对转向角度的限制,结合通过速度计算允许最大转向速率。

3.2 轨迹跟踪控制策略

PurePursuit算法通过模拟跟车行为实现路径跟踪,核心为动态预瞄点选择。算法以车辆当前位置为圆心,预瞄距离为半径作圆,与目标路径交点即为预瞄点。车辆沿圆弧运动至预瞄点形成闭环控制。该算法适用于低速场景,计算量小且稳定性高,但固定预瞄距离易导致大曲率路段跟踪滞后。需优化预瞄距离选择逻辑,提升复杂路径适应性。预瞄距离动态调整是提升算法适应性的关键。距离过短导致转向频繁、车辆抖动;过长使系统响应迟缓。调整方法需综合车速与路径曲率:高速或大曲率路段增大预瞄距离以提前规划转向;低速或小曲率路段缩短距离以提高灵敏度。可采用模糊控制或查表法,根据车速-曲率组合实时计算最优距离,平衡精度与稳定性。轨道不平顺引发车辆侧向位移,导致实际路径与目标偏差。补偿机制需通过传感器实时检测横向距离,结合不平顺统计特性(波长、幅值)预测偏差趋势。采用前馈与反馈结合控制:前馈部分根据激励提前调整转向;反馈部分通过PID调节消除剩余偏差。需设置偏差阈值,避免补偿过度引发系统振荡。冶金调车环境存在轨道不平顺、风扰、负载变化等干扰源^[4]。抗干扰设计需兼顾鲁棒性与适应性:鲁棒性设计通过提高算法对模型误差容忍度确保稳定运行;适应性设计通过在线参数辨识或干扰估计动态调整控制参数。具体方法包括滑模控制切换项设计、自适应控制参数更新律设计,以及结合观测器的干扰补偿策略,形成多层次抗干扰体系。滑模控制通过强制系统状态沿预设滑模面运动,对模型不确定性具

有强鲁棒性。轨迹跟踪中,滑模面可设计为位置与速度误差线性组合,确保状态有限时间收敛。针对非线性特性,需采用高阶或终端滑模设计消除抖振。结合边界层方法或饱和函数替代符号函数,降低控制输入高频切换对执行机构冲击,提升实际可行性。调车作业中车辆负载变化导致动力学参数时变,影响跟踪精度。自适应控制通过在线估计参数变化并调整控制律应对此问题。设计可采用模型参考自适应控制,以理想轨迹为参考模型,通过调整控制器参数使实际输出跟踪参考;或采用自抗扰控制,将参数变化视为扩展状态,通过非线性组合实现扰动补偿。自适应律设计需满足稳定性条件,避免参数估计发散。

4 系统集成与验证

4.1 硬件在环仿真平台

硬件在环仿真平台是冶金铁路无人调车系统集成与验证的核心支撑载体,核心作用是模拟实际作业环境与系统完整运行状态,规避实际测试的风险与成本,为系统各项性能的全面测试提供精准、可靠的仿真环境。虚拟轨道环境建模是平台搭建的核心环节,需全面覆盖典型冶金铁路场景,精准还原轨道网络的整体布局、轨道周边的各类环境特征以及作业过程中涉及的各类相关要素,严格保证虚拟环境与实际冶金铁路作业场景的高度一致性,为后续系统路径规划算法、运动控制策略等各项性能的仿真测试提供真实、贴合实际的环境基础。车辆动力学仿真模型需采用高精度多体动力学模型,全面、精准捕捉机车运行过程中的各类动力学特性,细致模拟机车牵引、制动、转向等各类运行状态,充分考量各类内在与外在影响因素对机车运行的作用,确保模型具备极高的精度与可靠性,能够真实反映机车在实际作业过程中的动态响应,为系统控制策略与路径规划算法的有效性验证提供精准、可靠的模型支撑。

4.2 性能评估指标体系

性能评估指标体系是系统集成完成后,全面验证其运行效果、衡量系统整体性能的核心依据,需科学、合理地构建全面覆盖系统运行关键环节的评估指标,确保

能够精准、全面地衡量系统的各项性能表现。路径规划效率是评估系统路径规划环节性能的重要指标,主要通过计算时间与路径长度两个核心维度进行综合衡量,计算时间直接反映路径规划算法的响应速度与运行效率,路径长度则反映规划路径的合理性与经济性,二者有机结合可全面、客观地评估路径规划环节的整体运行效能^[5]。轨迹跟踪精度直接决定系统运行的精准性,主要通过横向偏差与航向角误差两个核心维度进行评估,精准衡量机车对规划轨迹的跟随能力与精准度,确保机车能够平稳、精准地按照规划轨迹完成调车作业。系统鲁棒性是保障系统在复杂作业环境下稳定运行的关键,主要通过障碍物出现频率与通信丢包率两个维度进行评估,全面衡量系统在各类干扰因素作用下的适应能力与稳定运行能力,为系统性能优化提供明确方向。

结束语:冶金铁路无人调车作业涉及多方面复杂内容。从作业环境特征看,运输系统结构独特,调车作业约束条件多。路径规划技术体系涵盖全局与局部规划,为调车提供科学路径。运动控制系统设计从车辆动力学建模到轨迹跟踪控制策略,保障机车稳定运行。系统集成与验证环节,硬件在环仿真平台模拟实际场景,性能评估指标体系全面衡量系统性能,涵盖路径规划效率、轨迹跟踪精度、系统鲁棒性等关键指标。未来,需持续优化各环节,推动冶金铁路无人调车技术迈向更高水平,实现安全、高效、智能的调车作业。

参考文献:

- [1]李芳,刘吉洋.铁路调车作业安全问题研究[J].铁道运营技术,2021,26(3):11-13.
- [2]谢博才,杨华昌,冯军.铁路车站调车作业综合监控系统设计研究[J].铁道运输与经济,2021(011):042.
- [3]武帅,李季涛,张美勇.铁路客运站调车作业计划执行过程仿真平台的研制与开发[J].铁路计算机应用,2021,30(6):5.
- [4]冀永曼.人工智能技术及其在机械设计中的应用与发展趋势[J].农机使用与维修,2023(09):76-78.
- [5]尚麟宇,冯军,刘明端,等.铁路车站调车作业安全防护设备运维管理系统研究[J].铁道运输与经济,2022,42(2):6.