

# Reliability analysis and maintenance optimization path of railway turnout equipment in municipal railway

Pu Guo Pan Chen Nan An

China Railway Tongtong Track Operation Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang, 325000, China

## Abstract

As critical components in urban rail transit systems, turnout equipment directly impacts train safety and overall system efficiency. Due to prolonged high-frequency operation, these devices are susceptible to environmental factors, operational loads, and maintenance conditions, leading to increased failure rates that disrupt transportation operations. This study analyzes common fault types and their evolution patterns based on turnout equipment's structural and functional characteristics, systematically identifying key reliability factors. By evaluating existing maintenance systems, we propose optimization strategies focusing on condition monitoring, parameter alerts, and data integration. These measures aim to enhance equipment operation efficiency, ensure stable urban rail transit operations, and provide theoretical foundations for upgrading maintenance technologies in rail infrastructure.

## Keywords

Urban Rail Transit; Turnout Equipment; Reliability Analysis; Fault Diagnosis; Maintenance Optimization

# 市域铁路道岔设备可靠性分析与检修优化路径探析

郭璞 陈攀 安楠

中铁通轨道运营有限公司, 中国·浙江温州 325000

## 摘要

市域铁路道岔设备作为轨道交通系统中的关键构件, 其运行状态直接影响列车通行的安全性与系统整体效率。由于道岔设备在长期高频运行中易受到环境、载荷和操作条件等多重因素影响, 导致故障率上升, 进而对运输组织产生干扰。本文基于道岔设备结构及功能特征, 分析其常见故障类型与演化规律, 系统梳理影响其可靠性的关键因素。在此基础上, 识别当前检修体系存在的问题, 从状态感知、参数预警与数据融合等维度提出优化路径, 旨在提升设备运维效能, 保障市域铁路系统平稳运行, 为轨道交通设施检修技术升级提供理论依据与技术支持。

## 关键词

市域铁路; 道岔设备; 可靠性分析; 故障诊断; 检修优化

## 1 引言

市域铁路作为城市公共交通的重要骨干, 其运行质量直接关系到市民出行效率与交通系统整体运行安全。道岔设备承担着轨道转换的核心功能, 是列车路径切换的关键节点, 其性能稳定性对列车运营秩序与列控系统协同响应具有决定性作用。伴随线路通行密度的持续提升与运能负载的不断加剧, 道岔设备面临的运行强度与使用频率显著提高, 由此带来故障率上升、维修成本增长等现实问题。传统检修模式以周期性人工维护为主, 难以满足现代轨道交通高密度、高可靠性的运行需求。为解决设备可靠性不足与检修效率滞后之间的矛盾, 亟需通过系统分析故障成因与运行风险, 构建精准高效的检修优化路径, 从而实现设备状态的动态掌控

与运维策略的科学调整。

## 2 市域铁路道岔设备运行特性与故障规律

### 2.1 道岔结构类型及其功能构成特征

市域铁路道岔结构通常由基本轨、尖轨、辙叉、护轨、连接装置和驱动机构等部分构成, 不同类型道岔根据设计速度、曲线半径和分支角度在布置上有所差异。对称分叉道岔、单开道岔、交叉渡线等具备不同的转辙功能与轨向导引能力, 适配于不同交通组织需求。在高速通行条件下, 结构必须保证轨距连续性和动力传递平稳性, 驱动系统则承担轨向切换与定位保持的重要任务。电动转辙装置通过控制装置驱动道岔尖轨运动, 保障列车运行路径调整的准确性与安全性。长期运行过程中, 各结构部位协同程度直接影响整体功能表现, 对其性能评估需综合结构布局、构件连接状态和响应时间等指标进行系统化分析。

【作者简介】郭璞(1995-), 男, 中国陕西西安人, 本科, 助理工程师, 从事温州市域铁路S1\ S2线设备维保研究。

## 2.2 不同运行工况下道岔关键部位的受力变化

在实际运行过程中,道岔关键部位承受复杂多变的载荷作用,尖轨区域易受到集中轮载冲击,辙叉心部则承受频繁交叉剪切力。高速运行条件下,轮轨动态作用力峰值可达到常规工况下的1.6倍,受力持续时间缩短但冲击频次显著增加。气温变化对钢轨热胀冷缩反应显著,20℃以上温差引起的横向位移可达5毫米,尖轨锁闭装置需维持持续稳定定位。制动过程中,轨面附加摩擦力提升20%,对滑床及扣件系统稳定性构成考验。频繁道岔转换情况下,驱动杆系统磨损速率提高至日常运行的1.4倍,润滑失效导致摩擦阻增加,对设备保持性能提出更高要求,需依据不同工况加载模型进行动态仿真与疲劳寿命评估。

## 2.3 道岔系统常见故障模式与发生频率分布

道岔系统常见故障可归类为尖轨移动障碍、辙叉区损伤、电动转辙装置失效、信号反馈异常和异物卡阻等类型。尖轨活动受阻占全部故障比例的26%,多由异物侵入、缺乏润滑或滑床变形引发。辙叉心损耗主要集中在轮轨接触点,材料疲劳裂纹发生率达17%,高频运行区域尤为显著。电动转辙装置内部齿轮磨损、电机烧毁和控制器响应延迟占道岔故障的22%,运行时长超过3000小时后风险显著增加。信号反馈延迟和异常显示占比12%,通常由接触不良或电缆老化引起。异物卡阻如碎石、冰雪或杂物导致操作失败占比9%,多见于环境暴露或清扫不及时区域,影响道岔切换成功率,需建立高频巡视与自动检测机制应对高发故障点。

## 3 道岔设备可靠性影响因素系统分析

### 3.1 设备自身材质性能与设计适配性的耦合关系

道岔设备的可靠性直接受制于材质强度、抗疲劳性能及结构设计合理性之间的协同关系。钢轨与辙叉区常采用U75V钢材,其屈服强度达880MPa,具备较强抗裂能力,但在日过载200次以上区域,其接触面硬度下降速率加快,45天内下降幅度达到9%。部分道岔采用低摩擦合金材料以延长辙叉使用寿命,平均提升周期30天。结构适配性方面,尖轨长度从2.4米延伸至3.1米后,有效分散轮轨作用力,降低了尖轨磨损率约18%。铸造与焊接精度对接口间隙影响显著,当误差控制在0.3毫米以内,设备寿命可延长约600小时。结构设计若未与材质性能协调匹配,将出现局部过应力累积,降低可靠运行时限,需通过参数协调与冗余容差提升结构适应力。

### 3.2 外部环境条件对道岔运行稳定性的干扰效应

外部环境中的温湿变化、尘污沉积、冰冻气候与高温热胀对道岔系统产生持续干扰。在40℃以上高温天气下,轨温升高至55℃,尖轨膨胀导致扣压结构应力增加19%,对道岔闭锁精度形成挑战。冬季极端低温至-15℃时,电动转辙装置启动延迟平均增加1.8秒,导致操作失败率上升12%。粉尘污染日均积聚量达18克/米,影响接触系统导

通性能,引发信号反馈错误率达8%。暴雨或潮湿条件下,道岔绝缘性能降低,尖轨间电压差升高至28V,干扰联锁系统稳定运行。连续冻融交替使滑床沉降速率提升2.3毫米/月,影响尖轨回位能力与闭锁可靠性。环境影响的复合性加剧了道岔部件的应力累积与响应失衡,需通过区域特性评估制定差异化适应性对策。

## 3.3 日常作业过程对设备性能衰减的累积作用

作业过程中人员操作方式、检修频次及维护手段对设备性能的持续性构成显著影响。在每月平均15次人工巡检下,由于作业标准不一导致尖轨油脂补充不均,润滑缺失区域磨损速率上升32%。维修过程中电动装置重复拆装超过8次后,齿轮传动误差增幅为0.4度,反馈响应误差增加13%。日常作业未及时清除轨面杂物,轨头积尘超标率达22%,进而影响闭合检测传感器识别精度。设备调试时未严格执行定位检测规范,道岔复位精度偏差范围扩展至±1.1毫米,增加闭锁失败风险。操作人员更替频繁且培训覆盖率不足,综合操作误差率高达14%,对关键部位产生非计划性应力扰动,缩短整体寿命周期约210小时。累积性偏差最终导致系统整体性能指标呈下降趋势,需强化全流程标准化作业体系与技术支撑体系。

## 4 现有道岔检修体系运行瓶颈与技术短板

### 4.1 基于周期模式的检修机制适应性不足问题

道岔设备普遍采用周期性检修模式进行维护,检修频率多以30天或60天为一个周期进行安排,未能有效覆盖故障高发时段。设备在高频运行区段的使用强度显著不同,单日道岔转换次数可达220次,而低频段不足80次,两类设备统一检修周期造成资源浪费与风险遗漏并存。部分道岔在计划检修前已出现性能下降信号,尖轨动作时间延长超过1.5秒,但因未到检修周期而未被及时处理,最终导致强制停用的比例达到7%。突发性设备故障多集中在周期内中后阶段,超过63%的设备故障发生在检修周期超过20天之后。周期模式无法依据设备运行状态动态调整检修计划,造成过检与漏检并存,直接影响维修效率与运行安全。精细化管理水平不足成为阻碍检修体系提效的结构性短板。

### 4.2 检修流程中的人员操作差异与误差积累

现有道岔检修工作大量依赖人工操作,受操作习惯、技术熟练度与作业环境影响,不同作业人员在操作流程中的误差差异较为显著。在5组独立作业队伍中,尖轨检测误差范围波动在±0.6毫米至±1.3毫米之间,造成数据一致性差距超过60%。润滑作业过程中,单位面积内润滑油覆盖量在不同操作人员之间差异达18毫升,致使局部摩擦系数增加0.07,造成动作阻力提升。设备复位检测存在松动或漏检现象,每月平均误检率达4.3%,在高密度运行区段形成潜在风险。作业记录填写标准不一致,数据缺失率在12%以上,难以为故障回溯与趋势分析提供有效支撑。重复拆装

作业未严格执行力矩控制,紧固件松动率上升3%,形成结构性疲劳隐患。人工主导模式下的高差异性和低一致性逐渐削弱检修工作的可控性与系统稳定性。

#### 4.3 信息化手段覆盖不足对隐患预控能力的制约

在道岔设备管理体系中,信息化手段的覆盖范围较窄,部分区段尚未实现设备状态在线监测,致使故障信号无法实时捕捉与处理。目前具备状态检测装置的道岔占比不足38%,剩余设备仍依赖人工巡查,导致信息采集周期延长至48小时以上,难以满足快速响应需求。数据分析环节中,仅有52%的检修单位具备历史数据归档功能,长期运行趋势无法准确建模,导致预警能力减弱。传感器布设密度不足,平均每个道岔设备仅配备3组关键监测点,无法覆盖全部高应力部位。信息系统与作业平台之间缺乏有效对接,75%的检测数据需手工录入,增加错误率与延迟时间。部分故障预警模型仍停留在静态阈值设定阶段,动态调整与智能分析功能尚未落地,限制了隐患识别的深度与预控策略的精准性。

### 5 道岔设备检修路径的优化策略探析

#### 5.1 构建基于状态感知的道岔健康评估体系

道岔设备运行状况需通过关键性能参数的实时感知与动态采集实现精准掌握。以电动转辙装置为核心的控制系统应配备响应时间、电流变化、尖轨位移、闭锁稳定性等多类传感器,对设备运行全过程进行连续监测。状态感知体系不应局限于单点数据,而应通过多参数联动实现整体健康状态判别,构建综合评估模型对设备运行趋势作出量化判定。引入模糊评判算法与动态权重调整机制,有助于形成基于历史性能与即时响应之间的差异分析,确定设备健康指数区间。尖轨滑动阻力、辙叉冲击力等作为关键指标参与建模,可用于识别疲劳衰减、异常摩擦或结构松动等状态,避免潜在故障扩散。结合巡检记录与状态参数数据,评估结果将具备时效性、针对性与可比性,为后续检修路径设计提供定量依据。

#### 5.2 建立参数阈值预警机制提升检修决策精准度

以故障先兆特征为导向建立道岔设备关键参数的多级阈值体系,可有效提升预警信号的响应速度与干预效率。对尖轨动作时长、电动电流峰值、锁闭位偏差等典型指标设定分级阈值区间,在系统运行中自动比对数据波动趋势,形成红、黄、蓝三级风险等级划分。动态阈值模型应融合气候

因素、设备运行周期与历史负荷特征,具备随运行工况自我调节能力。参数超限触发报警后自动生成检修建议项,涵盖润滑、紧固、校正等具体操作内容,减少人为干预依赖。设置阈值灵敏度调整机制避免过度警报扰动,使检修响应具有更强针对性。各类阈值与故障样本建立映射关系,构建基于故障概率评估的判定逻辑框架,实现设备状态的定量识别与精准处置,在保障安全性的同时提升资源配置效率。

#### 5.3 推动多源数据融合下的检修计划智能生成模型

道岔设备管理中必需打破信息孤岛,实现状态数据、环境数据与运维记录等多源信息的深度融合,通过构建智能决策模型提升检修计划的科学性。融合数据包括实时传感器采集值、检修日志、操作记录、故障报告与视频图像等,以时间序列结构建立数据仓库。系统应具备任务分配、人员匹配与物料准备功能,确保执行路径完整闭环。通过反馈机制修正模型预测偏差,实现持续迭代优化。计划生成过程以任务可视化平台展示,支持多部门协同操作与监督,推动检修管理由经验驱动向数据驱动转型。

### 6 结语

市域铁路道岔设备作为轨道系统中运行频率最高、结构复杂度较高的核心构件,其可靠性水平直接影响线路运行效率与安全边界的稳定性。传统检修模式在面对高强度使用环境与复杂故障类型时,已难以满足精准高效的运维需求。通过深入剖析道岔结构特性、故障演化机制及其影响因素,可为设备运行状态提供全周期的感知与判断支持。推动状态评估、阈值预警与智能计划三位一体的检修优化路径,不仅有助于提升运维工作的前瞻性与协同性,也为市域铁路设备管理模式创新提供可行方向。

#### 参考文献

- [1] 赵阳,窦礼同,崔超越.基于CiteSpace的铁路道岔设备研究知识图谱可视化分析[J].昭通学院学报,2024,46(05):65-75.
- [2] 林海香,赵正祥,卢冉,白万胜,胡娜娜,陆人杰.面向高速铁路道岔设备故障处置的知识图谱构建与应用[J].铁道学报,2024,46(07):73-80.
- [3] 赵正祥.面向高铁道岔设备故障处置的知识图谱构建与应用[D].导师:林海香;刘涛.兰州交通大学,2024.
- [4] 尹桐.铁路道岔自动化清扫技术与设备研究[D].导师:张晓东;雷勇锋.石家庄铁道大学,2024.