

# 重载铁路线路维护养护优化途径分析

赵剑

国能朔黄铁路发展有限责任公司肃宁分公司 062350

**【摘要】**重载铁路是煤炭、矿石等大宗商品运输的主要渠道，在我国资源调配中发挥重要作用。但值得关注的是，重载铁路在长期运行中，由于线路需要频繁承受轨轮施加的作用力，导致轨轮磨损率大幅度提升，各种病害随之产生。如此不仅会增加铁路运行的安全隐患，还会影响大宗商品的稳定供应。而想要保证线路始终处于安全运行状态，就要认识到维护养护的重要性。所以，本文将对此展开研究，通过阐述重载铁路线路常见病害，提出行之有效的维护养护优化途径，旨在为重载铁路稳定运行夯实基础。

**【关键词】**重载铁路；线路；维护；养护

Analysis of optimization ways of maintenance and conservation of heavy-haul railway lines

Zhao Jian

Shunying Branch of Guoneng Shuohuang Railway Development Co., LTD 062350

**【Abstract】** Heavy-haul railways are the primary channels for transporting bulk commodities such as coal and ore, playing a crucial role in resource allocation in China. However, it is noteworthy that over long-term operation, heavy-haul railways frequently bear the forces exerted by wheel-rail interactions, leading to a significant increase in wear rates and various types of track defects. This not only increases safety risks for railway operations but also affects the stable supply of bulk commodities. To ensure that the tracks remain in safe operation, it is essential to recognize the importance of maintenance and care. Therefore, this paper will conduct research on this issue, detailing common track defects in heavy-haul railways and proposing effective optimization methods for maintenance and care, aiming to lay a solid foundation for the stable operation of heavy-haul railways.

**【Key words】** heavy-haul railway; line; maintenance; care

## 引言：

重载铁路虽然运输效率远超普通铁路，但线路承受着的机械应力也相对较大。如果维护检修不及时，则容易导致潜在病害不断发展，最终引发列车脱轨等安全事故。现阶段，随着我国重载列车运输规模的逐渐扩大，保障其运输安全也被上升到国家交通战略层面。线路作为承受重载列车运行的主要载体，其维护养护工作的重要性也逐渐突出。这也意味着，本文对重载铁路维护养护优化途径展开研究，无论在保障列车稳定运行，还是维护国家经济命脉安全畅通来说，都有十分显著的现实意义。

## 一、重载铁路线路维护养护优化的意义

### （一）延长线路使用寿命

重载铁路凭借着强大的运输能力成为我国大宗商品运输的主要途径，但列车本身荷重较大，加上长期运行，所以对轨道结构面安全带来严峻挑战，导致轨枕断裂、轨道几何

尺寸变形等问题层出不穷，严重威胁行车安全。为了化解这些难题，在轨道结构维护上，引入激光钢轨打磨技术精准处理表面磨损与微裂纹，降低轮轨接触应力，使钢轨更换周期得到延长，同时采用耐腐蚀性更强的高强度复合材料轨枕，并借助智能监测系统实时评估轨枕状态，及时更换受损部件<sup>[1]</sup>；在路基养护方面，在设计阶段铺设新型隔温材料减少温度影响，施工时运用强夯法与振动压实技术增强密实度，日常养护中利用探地雷达建立三维病害模型精准定位隐患，针对软土路基采用真空预压排水固结法结合土工格栅加筋技术提升土体强度。这些综合优化措施，有效减缓了轨道结构损耗，降低了路基病害风险，显著提升轨道结构稳定性与耐久性，为延长线路使用寿命筑牢根基。

### （二）提高列车运输效率

在重载铁路运营中，线路故障与运行速度是制约运输效率的主要问题，而智慧化养护体系成为破解这一问题的关键。依托应力应变传感器、分布式光纤传感等先进监测技术，铁路部门构建起应力应变传感器网络，确保覆盖钢轨、轨道板等关键部位，进而动态捕捉列车重载运行下的应力集中区

域, 轨检车搭载的激光测量系统能精准识别毫米级轨距变化, 探伤仪借助超声与电磁技术实现钢轨内部裂纹的亚毫米级检测。与此同时, 通过全站仪、电子水准仪等高精度仪器, 将轨距误差严格控制在 $\pm 2\text{mm}$ , 每 10m 水平偏差不超过 3mm, 大幅提升轨道平顺性。这种集智能监测、精准调校于一体的养护模式, 既保障了列车按图准点运行, 又通过提速增效与节能降耗, 实现运输效率与经济效益的双重跃升。

### (三) 保障铁路运营经济效益

在重载铁路养护领域, 智能化升级虽然前期投入资金规模较大, 但却是降低全生命周期成本、提升经济效益的核心路径。通过部署物联网传感器实时采集钢轨应力、扣件松动等数据, 结合大数据预测部件磨损趋势, 实施精准预防性维护, 继而降低维护成本。同时, 轨道铣磨车、智能巡检机器人等自动化设备替代人工, 可以大幅度降低人力成本, 数字化管理平台优化养护计划, 进一步压缩不必要开支<sup>[2]</sup>。这种“技术+数据”驱动的养护模式, 不仅实现从被动维修到主动预防的转变, 更显著提升成本控制能力。而由此带来的运输效率提升、服务品质升级与线路寿命延长, 直接转化为可观收益。这种多重效益叠加, 能够助力铁路运营企业实现降本增效与市场竞争力的双重跃升。

## 二、重载铁路线路常见病害

### (一) 钢材接头危害

重载铁路凭借超大轴重与高频次运行模式实现高效运输, 但也让钢材接头长期承受严峻考验。单轴超 25 吨的列车反复碾压, 使接头处承受普通线路 3 倍以上冲击力, 轨端应力集中引发金属疲劳; 接头螺栓受振动影响, 预紧力每年以 5%~8% 速率衰减, 夹板频繁受力塑性变形, 大幅削弱连接强度;  $-40^{\circ}\text{C}$  至  $60^{\circ}\text{C}$  的温差致使钢轨热胀冷缩, 接头处数百兆帕的温度应力与列车荷载叠加, 加速结构劣化, 加之焊接工艺存在未焊透、夹杂物超标的缺陷, 进一步埋下病害隐患。这些因素导致病害呈现多样化: 螺栓松动使钢轨产生 0.5~2mm 水平位移, 夹板扭曲变形致贴合度不足 70%, 接头区域钢轨磨耗深度超出正常部位 40% 形成波浪形磨耗带, 轨端肥边形成 3~5mm 宽、1~2mm 厚的凸起, 共同造成轨面不平顺的“错牙”现象<sup>[3]</sup>。而这些病害严重威胁铁路安全与效益, 松动接头可能引发钢轨分离甚至脱轨, 异常磨耗使钢轨更换周期缩短至正常寿命 60%、维护成本增加 30% 以上, 轨端肥边与车轮碰撞产生 500kN 冲击力和 100 分贝噪音, 据统计, 接头病害导致列车限速运行, 运输效率降低 15%~20%, 单次故障直接损失数十万元, 更可能引发区域性运输瘫痪, 冲击国民经济。

### (二) 线路爬行病害

重载铁路线路爬行作为典型病害, 其成因与列车运行特性、轨道结构缺陷及电路故障密切相关。重载列车启动时  $0.2\text{--}0.3\text{m/s}^2$  的加速度与制动时产生的数百千牛纵向力, 使车轮与钢轨间黏着力剧烈波动, 当长期碾压、雨水冲刷导致道床阻力系数从  $12\text{--}15\text{kN/m}^2$  降至  $8\text{--}10\text{kN/m}^2$ , 便难以抗衡列车纵向力, 容易引发钢轨位移。同时, 轨枕铺设间距超设计标准  $\pm 50\text{mm}$ 、道床密实度低于 90%、扣件扣压力衰减至  $60\text{N}\cdot\text{m}$  以下, 进一步削弱轨道约束能力; 轨道电路绝缘破损引发的电蚀, 降低钢轨与轨枕间摩擦系数, 也成为爬行诱因。线路爬行发生时, 直线段轨枕中心线偏差可达 50~100mm, 曲线段轨枕歪斜超  $5^{\circ}$ , 轨缝差值达 10~15mm, 甚至出现连续大轨缝或轨缝顶死现象, 伴随扣件扭矩降至设计值 70% 以下、钢轨产生 2~5mm 波浪形弯曲, 道岔区域尖轨与基本轨密贴间隙超 4mm, 转辙设备动作阻力增大、电流升高 20%~30%<sup>[4]</sup>。这些异常给铁路运行带来严重危害: 轨道几何形位被破坏, 使车轮对钢轨冲击力激增 30%~50%、振动加速度提升  $5\text{--}10\text{m/s}^2$ , 加速设备磨损, 钢轨寿命缩短 20%~30%、轨枕更换周期提前 1~2 年; 大轨缝引发的 800~1000kN 轮轨冲击力易致断轨, 轨缝顶死产生的 500~800MPa 温度应力则可能造成胀轨跑道; 轨道电路信号传输错误率增加 50%~80%, 干扰列车调度, 严重时甚至导致区域性运输中断, 造成巨大经济损失。

## 三、重载铁路线路维护养护优化途径

### (一) 增强线路承载力

为了应对重载铁路严苛的运行条件, 升级轨道结构材质与优化路基基础设计是增强线路承载力的核心路径。在轨道结构方面采用强度等级达 1000MPa 的淬火钢轨替换普通钢轨, 其抗疲劳性能提升 50%, 可有效抵御列车车轮高频碾压, 减缓钢轨磨耗与裂纹扩展; 以弹性模量 40GPa、抗冲击韧性为混凝土轨枕 4 倍的玄武岩纤维增强复合材料轨枕, 降低轨道应力集中, 延长整体使用寿命。路基设计上运用三维地质建模、高密度电法勘探等技术精准掌握地质信息, 针对湿陷性黄土、膨胀土路段, 采用 CFG 桩复合地基与土工格室加固技术, 将地基承载力提升至 280kPa 以上, 控制不均匀沉降; 构建“渗-排-堵”立体排水体系, 通过边坡植被混凝土防护、仰斜排水孔及路基内复合排水板, 保障路基干燥稳定。两者协同作用, 为轨道结构提供坚实支撑, 显著提升重载铁路线路的承载性能。

### (二) 采用精细化维护养护手段

依托大数据与人工智能技术构建的重载铁路线路全生命周期数字化管理平台, 通过深度挖掘运量、轴重分布及轨道实时状态等多源数据, 实现养护方案的精准定制与先进工

艺的高效应用。针对日均通行超 100 列、轴重 30 吨以上的繁忙区段，平台基于数据分析提前预测钢轨磨损趋势，将打磨周期从 12 个月缩短至 8 个月，并依钢轨磨耗特征定制打磨参数；对曲线半径小于 500m 的弯道，利用图像识别技术将轨枕锚固检查频率提升至每月一次，确保轨道几何尺寸达标<sup>[1]</sup>。同时，积极应用前沿养护工艺，采用激光诱导冲击强化与数控铣磨复合技术，先以高能激光脉冲增强钢轨疲劳强度，再基于三维扫描数据精准铣磨，使轨面粗糙度降至 Ra0.6，轮轨接触应力降低 20%–30%；在道岔养护中，超声导波与电磁超声联合探伤技术实现对尖轨、辙叉等部件 360° 检测，能识别 1mm 以下微裂纹，检测效率提升 3–5 倍。这种“数据驱动决策、技术赋能养护”的模式，既实现“一区一策”的精细化养护，又通过先进工艺及时消除病害隐患，显著提升养护资源利用效率与线路运行安全性。

### （三）给予薄弱环节维护养护高度重视

为强化重载铁路薄弱环节的安全管控，通过部署智能感知终端与实施一体化整治策略构建双重防护体系。在钢轨接头、道岔转辙区、小半径曲线等关键部位，以 50cm 间隔嵌入光纤光栅应变传感器，凭借微米级分辨率实时监测列车通过时的应力变化，同时在道岔尖轨与辙叉处安装激光位移监测仪，每秒采集 100 组数据追踪部件位移；借助 5G-MEC 网络实现数据毫秒级传输至智能运维平台，经深度学习算法分析，当钢轨接头应力连续 3 次超 580MPa、道岔尖轨位移波动超  $\pm 1.5\text{mm}$  时，系统即刻触发预警并推送处置工单。针对病害高发区域，推行“诊断–治理–巩固”策略：钢轨接头采用 8.8 级防松螺栓与弹性复合垫板，抗剪强度提升 40%；小半径曲线区段优化轨枕间距至 560mm 并加装轨撑防爬器，轨道横向刚度增强 35%。同时，运用区块链技术建立全生命周期数字档案，结合贝叶斯模型预测病害趋势，如提前 6–8 个月预判钢轨接头疲劳寿命，实现养护资源精准投放。这种“监测预警+靶向治理”的数字化运维模式，使关键区域病害复发率降低 65% 以上，切实保障线路安全稳定运行。

### （四）引入自动化监测系统

为了实现重载铁路线路全方位、实时化监测，要构建以

物联网为核心的智能感知体系，在具体实施中，应在钢轨轨腰、轨枕底部及道床关键部位，分别植入分布式光纤应变传感器、压电式振动传感器和 MEMS 温湿度传感器。其中，运用布里渊光时域反射技术的分布式光纤传感器，以米级分辨率精准捕捉钢轨受力变化；10kHz 采样频率的压电式振动传感器实时还原列车运行动态响应；测温精度  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 、测湿精度  $\pm 3\%\text{RH}$  的温湿度传感器监测环境影响。这些传感器通过 5G 切片网络与边缘计算节点互联，将数据快速汇聚至云端数据中心。依托大数据分析平台与深度学习算法，采用卷积神经网络（CNN）提取钢轨振动波形特征，结合长短时记忆网络（LSTM）分析应力时序数据，构建轨道结构健康度评价模型，可提前 3–6 个月预判钢轨断裂风险；利用支持向量机（SVM）算法分类道床振动频谱，精准定位密度下降区域。当模型预测病害风险超阈值，系统自动生成预警报告推送至运维管理平台，指导预防性维护工作，以数据驱动的预测预警机制，推动线路养护从被动维修向主动预防转变，大幅提升养护前瞻性与有效性。

### 结束语：

综上所述，在国家物流运输体系中，重载铁路凭借大运量、低成本的优势，成为支撑经济发展的核心运力。然而，线路的科学养护是维系其安全高效运转的根基。从革新轨道材质与优化路基设计强化承载性能，到依托大数据定制养护策略、应用前沿技术实现精准作业；从构建关键区域智能监测网络实时捕捉病害隐患，到利用算法模型预测预警并实施靶向治理，一整套养护体系正在形成。这一体系不仅显著降低线路故障发生率、提升列车运行效率，更通过成本控制与收益增长实现经济效益的突破。未来，随着数字孪生、绿色建材等创新成果的深度应用，重载铁路养护将迈向智能化、集约化、可持续的新征程，持续为国家物流运输大动脉注入强劲动力，筑牢经济高质量发展的交通基石。

### 参考文献

- [1]迟晓阳.重载铁路轨道机械维护大数据平台的设计[J].数字技术与应用, 2024, 42(7): 11–13.
- [2]魏祎.专用线铁路线路病害整治及养护维修研究[J].石家庄铁路职业技术学院学报, 2024, 23(1): 7–9, 15.
- [3]贾军.大机作业方式对重载线路轨道结构状态和安全性影响[J].工程建设与设计, 2024(9): 117–121.
- [4]杜鑫, 吴伟龙.既有重载铁路道岔小型机械清筛施工技术[J].中国科技信息, 2023(6): 47–49.
- [5]郭秀伟.重载铁路工务线路维修养护工作的探讨[J].现代工程项目管理, 2024, 3(9).

作者简介：赵剑（1987.11–）男，河北石家庄人，大学本科，助理工程师，研究方向：铁路工务专业。