

重载铁路工务设备养护管理工作探究

张志鹏

国能新朔铁路有限责任公司大准铁路分公司 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘要：重载铁路以机车大轴重、长编组、高密度为特征，其工务设备在极端荷载下伤损发展迅速，养护难度远超普通线路。本文系统分析重载工务设备伤损规律与养护挑战，深入剖析计划修模式僵化、数据利用率低、多部门协调不畅及人才断层等突出问题，提出构建基于大数据的动态评价体系、推行“状态修+预防修”精准策略、推进智能化技术应用、强化队伍建设及优化资源配置等系统性优化方案。研究成果旨在推动重载铁路工务养护管理向精细化、智能化转型，提供理论参考与实践路径。

关键词：重载铁路；工务设备；养护管理

引言：重载铁路因运能大、成本低，已成为我国大宗货物运输的核心通道，大秦、朔黄等线路运量持续攀升。然而，随运营年限延长与轴重提高，钢轨磨耗、轨道几何劣化、道床病害及桥隧疲劳等问题日益突出，养护压力空前。当前状态修模式虽已推行，但在伤损精准识别、维修时机科学决策和资源高效配置等方面仍存在明显短板，距离真正意义上的“精准养护”尚有差距。本文立足重载运营实际，探究养护管理关键问题与优化路径，为保障铁路安全高效运营提供管理支撑。

1 重载铁路工务设备养护基础概述

1.1 重载铁路定义与运营特点

重载铁路指专用于大宗货物运输、牵引质量大且轴重高的铁路。国际重载协会定义标准包括牵引质量不低于 8000 吨、轴重不小于 27 吨或年通过总重不低于 2000 万吨公里每公里。我国重载铁路轴重普遍达 25 吨及以上，列车编组 2 至 3 公里，牵引质量常超 2 万吨，行车密度高且运输极度饱和。大秦铁路年通过总重长期维持 4.5 亿吨以上。高轴重、大运量、长编组、高密度的运营特征，使轨道结构承受荷载远超设计预期，动应力幅值显著增大，疲劳效应加速累积。同时，运输刚性约束大幅压缩养护天窗时间，线路维修作业窗口极为有限，给养护管理工作带来根本性挑战。

1.2 重载铁路工务核心设备组成

重载铁路工务设备是由多种设施构成的复杂系统，主要包括轨道结构、桥隧建筑物和路基排水设施三大类。轨道结构直接承受列车荷载，涵盖钢轨、轨枕、扣件系统和道床等关键部件。钢轨为核心承载导向元件，重载线路通常采用 75kg/m 或 60kg/m 重型钢轨；轨枕多

采用 III 型或 II 型混凝土枕；扣件选用弹条 II 型等高强度弹性扣件；道床由碎石道砟构成，起传递荷载、提供弹性和排水作用。桥隧建筑物包括桥梁墩台、梁体、隧道衬砌、涵洞等。路基排水设施及挡护结构、防护栅栏等附属设备同样不可或缺。

1.3 重载铁路工务养护管理内涵

重载铁路工务养护管理是以保障设备服役安全可靠为目标，围绕检查检测、状态评估、维修决策、作业实施和质量验收等全流程开展的计划、组织、指挥、协调与控制活动。技术维度上，要求准确把握各类设备伤损发展规律，设定检测周期与维修阈值，合理选用维修工艺^[1]。管理维度上，要求建立健全职责清晰的组织架构和高效协同的运行机制，优化资源配置，强化过程管控，实现养护工作制度化、规范化和精细化。区别于普通铁路，其核心矛盾集中在三方面：设备伤损加速劣化与固定维修周期的矛盾，要求维修策略更具弹性；巨大工作量与有限天窗时间的矛盾，要求作业组织更高效；海量检测数据与有限分析能力的矛盾，要求决策手段更智能。

2 重载铁路工务设备伤损特征与养护挑战

2.1 重载铁路的技术特征与运营环境

重载铁路核心技术特征为机车高轴重、大牵引质量和大年通过总重。国内主要线路轴重 25 吨，部分推进 27 吨乃至 30 吨升级，大秦铁路常态化开行 2 万吨级组合列车。轮轨间相互作用力急剧增大，轨道结构承受动态荷载达普通线路 1.5 至 2 倍。运营环境方面，重载铁路多分布于中西部和北部地区，常穿越山区、河谷及湿陷性黄土等复杂地质带，长大坡道和小半径曲线密集分布。高

密度行车使线路基本全天候运转,天窗时间极为有限,通常每日仅 90 至 120 分钟,远不能满足养护需求。

2.2 主要工务设备伤损规律与机理分析

钢轨伤损最为典型,包括侧磨、波磨、压溃、核伤及焊缝缺陷。小半径曲线侧磨速率达每通过百万吨 0.3 至 0.5 毫米,寿命仅为普通线路三分之一至二分之一;波磨波深可迅速达 0.3 毫米以上,恶化轮轨接触;轮轨接触应力超 1500 兆帕,导致轨头塑性流动和疲劳裂纹扩展。轨道几何不平顺劣化加快,TQI 劣化周期缩短 40% 以上。扣件系统动态拔力大增,弹条断裂和扣件失效频发;道床脏污板结加快,3 至 5 年即需清筛。桥隧方面,桥梁跨中挠度增大,墩台沉降累积,隧道衬砌在风压与振动耦合作用下裂缝加速开展^[2]。

2.3 重载养护面临的特殊挑战

重载养护挑战可概括为“量、时、准”三维矛盾。“量”上,高运量使养护工作量指数增长,小半径曲线钢轨更换频率每年 1 至 2 次,为普通线路 3 至 5 倍,大机捣固、清筛等作业量远超常规。“时”上,天窗时间极为有限且多为临时安排,大型机械和人员在有限时间内完成任务难度极大,天窗兑现率低、延点风险高已成常态。“准”上,伤损发展规律复杂,多因素耦合作用使得精准把握维修时机尤为困难。此外,设备服役年限延长,高龄设备与重载运营矛盾日益突出。

3 重载铁路工务设备养护管理现状及问题分析

3.1 养护管理体制与制度建设现状

重载铁路工务养护实行分级管理模式。组织管理上,国铁线路实行五级管理,专用重载铁路实行三级管理。作业模式以“检养修”分开为核心,设备检查与养护维修职能分离。维修制度主要依据《普速铁路线路修理规则》及补充规定,实行以周期性维修为主、临时补修为辅的计划修模式。天窗制度设有固定“垂直天窗”或“V 型天窗”保障作业。各铁路局还建立了设备台账、伤损分级、验收评定、安全风险等配套制度。然而,既有管理体系多脱胎于普通客货共线铁路,未能充分考虑重载设备伤损的独特性和运输组织的高压态势,制度刚性有余而弹性不足,难以适应设备状态的快速变化。

3.2 现存主要问题剖析

管理体制层面,多部门协调不畅,结合部管理责任模糊,天窗综合利用效率低下。作业模式层面,计划预防修模式固化,维修周期缺乏动态调整机制,过剩与不足并存,天窗有效作业时间仅占 60% 至 70%。技术手段层面,检测数据形成信息孤岛,缺乏统一分析平台,数

据向决策转化效率低,趋势分析和预警能力不足。资源配置层面,大型养路机械数量不足且区域调配困难,关键设备供不应求,配件供应周期长。人员队伍层面,一线技术骨干断层严重,关键岗位人员老龄化,年轻员工培养周期长且流失率高,培训体系不健全。上述问题构成系统性障碍,亟待从多维度协同破解^[3]。

4 重载铁路工务设备养护管理优化策略

4.1 构建基于大数据的设备状态动态评价体系

应以钢轨探伤车、综合检测车、轨道检查仪、人工巡检等多源检测数据为输入,建立统一的数据采集、传输、存储和处理标准,打破各类检测系统间的数据孤岛,形成覆盖工务设备全寿命周期的数据资产。针对钢轨、道岔、扣件、道床、桥隧等不同设备类型,分别建立差异化的健康状态评估模型,综合考量伤损类型、伤损程度、劣化发展速率、设备服役年限和累计运量荷载等多维指标,将设备状态科学划分为优良、合格、注意、严重四个等级。动态评价体系的核心在于设备状态等级随每次检测数据更新而自动刷新,实现实时感知和动态预警。同时应建立劣化趋势预测模型,利用机器学习算法挖掘历史检测数据,预测各类设备未来状态走向,为维修计划编制提供前瞻性依据。该体系的建立将从根本上改变传统养护中“凭经验、靠感觉”的决策模式,推动养护管理向数据驱动型转变,实现设备状态从被动感知向主动预判的跨越。

4.2 推进机械化与数智化赋能精准维修

当前,“状态修+预防修”模式已在重载铁路工务养护中推行,初步实现由周期修向状态驱动精准维修的转变,但仍高度依赖人工复核与手持量具作业,决策精准度和时效性有待提升。未来应转向机械化、数智化深度赋能,实现病害识别、维修决策和作业实施的全链条智能化升级。病害识别方面,运用钢轨探伤车、综合检测车等高频检测数据,结合机器视觉和深度学习算法,自动判识钢轨擦伤、扣件失效等病害并分级。通过构建数字孪生模型,融合历史伤损与实时荷载数据,预测病害趋势并自动匹配维修方案,推动决策向数据智能驱动跃升。作业实施方面,大力推进大型养路机械精准化应用,针对钢轨打磨、道岔捣固等核心环节,以集成化装备替代人工作业,配备高精度定位与实时反馈系统,确保作业质量。机械化作业将压缩天窗人数、降低劳动强度,提升效率与产出,有力响应降本增效要求。

4.3 推进工务养护数字化与智能化技术应用

首先建立工务设备全寿命电子档案系统,为每根钢

轨、每组道岔、每座桥梁隧道建立唯一数字身份标识,记录从出厂到更换的全过程信息,为状态评估和维修决策提供数据基础。其次应用 GIS 和北斗高精度定位,实现工务设备精确定位和可视化展示,便于快速定位和精准施策。再次探索 AI 技术在检测数据分析中的应用,开发钢轨伤损智能识别系统,利用深度学习算法自动识别探伤数据中的伤损信号,降低漏检率和误判率;开发轨道几何波形智能分析系统,自动识别周期性不平顺和局部突变^[4]。无人机搭载高清相机和激光雷达可用于高陡边坡、隧道进出口等人工难以到达区域巡检,爬行人器人可用于隧道衬砌和桥梁底部近距离检测。数字化智能化技术的应用将大幅提升养护管理效率和决策科学性,是重载铁路工务养护现代化的重要方向。

4.4 强化专业化队伍建设与作业标准化管理

当前队伍建设面临的核心矛盾在于数据分析型人才的系统性缺失——既懂工务业务又具备数据分析能力的复合型人才严重匮乏,已成为制约机械化、数智化转型的关键瓶颈。为此应构建“业务+数据”双轨制培养路径,在传统工务培训模块中嵌入数据采集、清洗、分析和可视化表达等课程内容,重点培育一线人员利用探伤车及综合检测车数据识别伤损演化的能力,逐步补齐复合型人才短板。同步应强化“人机协同”能力建设——智能检测装备虽已逐步推广,但钢轨伤损复核、道岔状态人工巡检、路基病害现场研判等传统手工检查技能仍是年轻一代人员必须掌握的基本功。培训体系应坚持人工巡检与仪器检测相结合的原则,在新员工入职培训和在岗技能提升中系统设置手工检查标准化实训科目,确保一线人员在熟练运用智能装备的同时具备独立研判和现场复核能力,实现人与装备的高效协同。全面推行标准化作业流程,针对每类养护作业制定详细标准作业程序,明确作业前准备、过程控制、质量检验各环节具体要求。建立作业质量可追溯制度,详细记录每项作业的人员、时间、机具、参数和验收结果,形成完整的质量责任闭环。

4.5 优化养护资源配置与应急保障机制

养护资源的科学配置和高效的应急保障机制是养护管理体系有效运转的物质基础和安全底线。在现有委托管理模式基础上进一步优化协作机制——大型养路机械

维修由内部专业单位承担,需建立年度计划对接和月度协调制度,明确委托方与被委托方在天窗安排、作业方案、质量验收等环节的职责界面,确保大机作业与日常养护有效衔接。同时依据各站区运量分布和设备伤损速率,合理设定钢轨、道岔、扣件等关键配件站区级安全库存标准,建立区域性应急调剂通道,缩短供应周期。依托站区(车间级)管理架构,建立覆盖车务、电务、工务的一体化应急联动机制,明确各专业在信息报告、资源调配、抢修作业和恢复通车各环节的协同流程。在各站区工务班组设置应急物资储备点,按标准配备钢轨急救器、无孔夹板、液压起道器等必备机具,定期检查更新。针对断轨、胀轨跑道、水害断道等典型突发事件完善应急预案,每季度组织实战化演练,检验预案可操作性和多专业协同响应能力,提升一线班组首轮应急处置水平。在汛期、防断期、春运等特殊时期,加密关键区段检查频次,实行重点盯控制度,将安全风险控制在萌芽状态。

结束语

重载铁路工务设备养护管理是一项系统工程,本文从伤损特征分析、现状问题诊断到优化策略提出,形成了较为完整的研究链条。然而,受数据获取条件限制,部分量化分析尚不够深入,后续研究可结合具体线路的长期检测数据开展实证验证。随着重载铁路向机车更高轴重、更大运量方向发展,虽然当前钢轨全生命周期管理系统已初步建立,但在数据贯通度、伤损预测准确性和决策支持能力方面仍有较大提升空间,亟需依托数字孪生、人工智能等前沿技术持续迭代优化,真正实现工务设备全生命周期智能化管理,这应是未来研究和实践攻坚的核心方向。

参考文献

- [1] 代春平. 基于数字模型的重载铁路工务设备全寿命周期管理[J]. 铁道建筑, 2022, 62(8):37-41.
- [2] 段培勇. 基于移动 GIS 的重载铁路工务设备智能巡检终端设计与应用[J]. 铁道建筑, 2022, 62(8):42-45.
- [3] 杨志宝. 浅论重载铁路线路常见病害原因及养护维修[J]. 中国设备工程, 2021(23): 199-200.
- [4] 常浩, 李锋, 蔺伟, 等. 重载铁路电务设备智能运维技术研究[J]. 铁道运输与经济, 2023, 45(11):30-38.