 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i6.6042

Research on the Application and Optimization of Intelligent Maintenance and Overhaul Technology for Railway Signal Equipment

Biao Gao Liuyun Geng

Guoneng Huangda Railway Co., Ltd., Dongying, Shandong, 257000, China

Abstract

With the development of railway transportation, intelligent maintenance and repair technology applies IoT, big data, and artificial intelligence related technologies to the operation and maintenance of railway transportation signal equipment, which is of great significance for the operation and maintenance of railway transportation signal equipment. This article focuses on the intelligent maintenance and repair technology of railway signal equipment, and provides a brief analysis of its key technical principles, current usage status, fault analysis, and optimization of maintenance strategies. The results indicate that intelligent maintenance and repair technology for railway signal equipment has a positive effect on fault perception and prediction of intelligent maintenance and repair equipment, but there is still room for improvement in data collection, model application, and other aspects. By improving and perfecting the technical process of railway signal equipment maintenance, the transformation of railway signal equipment from passive maintenance to proactive preventive maintenance can be achieved, which plays an important role in maintaining railway transportation safety and reducing the operation and maintenance costs of railway transportation signal equipment.

Keywords

railway signal equipment; Intelligent maintenance and repair; fault diagnosis

铁路信号设备智能维护检修技术应用与优化研究

高彪 耿刘云

国能黄大铁路有限责任公司，中国 · 山东 东营 257000

摘 要

随着铁路运输的发展，智能维护检修技术将物联网、大数据、人工智能相关技术应用到铁路运输信号设备运行维护中，对铁路运输信号设备运行维护具有重要意义。本文以铁路信号设备智能维护检修技术为对象，对其关键技术原理、使用现状、故障分析、维保策略优化等方面的内容进行了简单分析。结果表明铁路信号设备智能维护检修技术对智能维护检修设备的故障感知、故障预测具有积极作用，但是对数据的收集、模型的应用等方面还有一定的提升空间。通过改进、完善铁路信号设备维护的技术过程，能够实现铁路信号设备从被动维修维护到主动预防性维修维护的转变，对于维护铁路运输安全、降低铁路运输信号设备运行维护成本具有重要作用。

关键词

铁路信号设备；智能维护检修；故障诊断

1 引言

铁路是现代交通的咽喉，铁路运输信号系统的稳定运行，是关乎列车行车安全和效率的关键所在。随着铁路运输高速化和高密度化的推进，铁路信号设备运行环境愈加恶劣，故障率增高，检修维护困难，传统的人工巡检检修模式的及时性差，资源浪费严重，无法满足铁路运输的可靠和效率需求。智能维护检修技术是运用物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术实时监测、检测、准确识别、诊断铁路信号设备运行状态和故障，通过在设备上安装传感器网络并采集数据，经过算法模型分析，变被动修为主动修。智能维护检修技术已经在铁路信号设备运维中逐步运用，但在数据采集、模型通用性、维护决策智慧化等方面存在诸多问题。深入研究智能维护检修技术的应用与优化，对推动铁路信号系统运维模式革新具有重要意义。

【作者简介】高彪（1990–），男，中国山西浑源人，本科，助理工程师，从事无人值守机械室智慧巡检和铁路信号设备智能维护检修研究。

2 铁路信号设备智能维护检修技术核心架构

2.1 数据采集与传输层

数据采集传输层是智能维护检修技术的感知层，主要是在沿线构建全方位设备状态感知网，由于铁路沿线信号设

备众多，包括信号机、转辙机、轨道电路设备等，根据各个设备的特点，设置不同的传感器，如在转辙机上设置振动传感器、电流传感器，检测设备磨损情况、电机工作情况；轨道电路上设置电压传感器，检测信号传输质量情况。由于沿线环境多变，因此对于传感器的可靠性及抗干扰性要求很高，一般采用工业级防护，在耐高温、耐高寒、电磁抗干扰等恶劣环境下运行。在数据传输网络层中需要考虑到实时性和稳定性问题，短时通信中，以以太网络为低时延、高带宽的通信技术，实现设备与边缘节点之间的数据通信；长时通信中以 4G/5G 为传输技术的无线通信技术弥补有线网络中存在的覆盖范围问题，实现数据远距离传输。在边缘节点中部署轻计算算法对原始数据进行实时性过滤提取并传输至云端中的有用信息，是本层中的重要创新点。部署安全加密算法，并通过身份认证保证数据的安全性和稳定性，避免数据被窃取、被攻击 [1]。

2.2 数据处理与分析层

数据处理及分析层是智能维护检修技术的“大脑”，将采集的海量原始数据转化为设备状态数据，原始数据中存在大量噪声和无效数据，需要进行数据清洗、数据去噪、数据去归一化等操作处理。如通过中值滤波算法去除数据中任意振动，使用 Z-score 数据标准化统一数据大小，传统信号处理与深度学习提取数据特征，如傅里叶变换、小波分析等方法提取数据时频域特征，CNN 提取设备数据特征，自动学习寻找异常模式。其中设备健康度评估模型是这一层的主要研究成果，将物理模型与数据驱动模型相结合，将设备数据转换为设备健康度评估模型。如利用转辙机的历史数据和当前监测数据，通过长短时记忆模型（LSTM）评估当前转辙机的健康状况；此外，考虑到当前数据是实时的，因此要引入学习机制，实时更新数据，根据设备状态更新模型，保证健康度评估准确 [2]。

2.3 智能决策与执行层

智能决策与执行层是应用技术的最后输出，是制定维护策略并对策略进行高效执行。智能决策是基于运筹学模型的强化学习，根据设备健康状况、设备维护成本、运输策略等因素，给出不同设备的维护策略，如对高可靠性设备，依据风险大小，制定风险维护策略进行重点维护；对低价值设备，从成本、寿命等方面考虑。在执行层系统与铁路运维管理系统深度融合，在维护过程故障诊断、产生维护工单、安排检修人员、调度维护物料、监控维护工作进度等环节实现全自动化全可视化，决策系统人机交互，维护人员根据现场情况对系统给出的方案提出修改的意见，并将经验反馈到决策模型，在决策模型再次优化方案，形成“数据——决策——执行——优化”的执行闭环，引入数字孪生技术建立装备的模型，在虚拟环境预测维护方案的执行效果，提高决策的科学性和预测性。

3 铁路信号设备智能维护检修技术应用现状

3.1 故障诊断技术应用

智能故障诊断是智慧信号设备智能养修的重要应用之一。基于机器学习的故障诊断方法替代了部分基于经验判断的故障诊断方法，通过对故障历史数据、设备稳定运行数据等信息的学习训练，能够快速对设备故障类型和故障点进行定位。例如，构建基于（SVM）的转辙机故障诊断模型，通过电机的电流大小、电机转换时间长短等信息判断设备是否机械卡阻、电机故障等常见故障。复杂模式的故障诊断中，使用深度模型更为有效，可以通过数据信息自动提取的模式挖掘出人工难以提取的有效信息，提升故障诊断的准确性和实时性。

3.2 预测性维护实施

预测性维护把传统定期检修的模式给打破，按照设备实际运行状态来制定维护计划，通过建立起设备退化模型，再结合实时监测数据，对设备故障发生的时间与概率进行预测。例如，利用粒子滤波算法对轨道电路参数变化开展动态预测，能够提前发现轨道电路性能衰退的趋势，在故障发生之前安排好维护工作。预测性维护的实施有效减少了非必要的检修作业，降低了设备运维方面的成本，同时还提升了设备可用性和铁路运输安全性 [3]。

3.3 运维管理系统集成

智能维护检修技术结合铁路运维管理系统，完成设备运维检修全过程的信息智能化管理。从数据采集开始，到故障分析、维护实施，全程的信息智能化。运维管理系统对设备状况、维护进度等内容进行显示，方便维护管理人员进行参考。通过维护知识库的建立，对历次问题、处理经验等数据进行电子化管理，方便运维管理人员进行查阅、借鉴，提高运维管理效率。

4 铁路信号设备智能维护检修技术优化方向

4.1 数据融合与处理优化

对于智能维护检修铁路信号设备技术来说，数据的多源性和复杂性对其技术水平的影响非常大，在信号设备运行的过程中，当前获取的信号设备运行数据主要包括传感器数据、日常养护数据、气候环境数据、列车运行调度数据等，各类数据类型繁多，时间不同，地点分散，对于数据融合以及处理存在较大困扰。应该构建多层次的数据融合层次，提升数据融合能力。在感知层利用异构传感器协同部署与同步采集技术达成多源数据时空对齐，如把轨道电路电压数据和列车运行速度、载重数据做时间戳匹配来消除数据异步导致的分析误差；在传输层采用边缘计算和雾计算相结合的分布式处理模式，在靠近数据源的网络边缘完成初步的数据筛选与特征提取以减少数据冗余传输，并且引入语义解析技术把不同协议、格式的数据转换为统一语义表示来实现数据无缝对接 [4]。在数据统计处理方面，强化非结构化数据处理。铁

路信号设备运行过程中产生日志文件、故障文件等非结构化数据信息，数据信息中蕴藏大量隐性知识，通过利用 NLP 对文本数据信息分词、实体分析、情感分析，挖掘信息，提取价值信息，转化为结构化数据，将设备结构、故障原因、经验知识等通过知识图谱建立知识图谱，将数据、知识有机地连接起来，为故障分析及维护提供更全面的服务。此外，数据保护和隐私保护也是优化提升的目标，随着铁路信号系统智能化水平的提升，数据易被泄露。要建立全生命期数据安全壁垒，数据采集过程使用同态加密算法进行加密，数据保管过程利用区块链技术建立账本，确保数据不被损坏。此外，按照最小必要原则，赋予不同的用户访问权限，保证数据安全性和可用性。

4.2 智能诊断模型改进

现有智能诊断模型存在模型泛化性不强，面对小样本故障，适应能力不足等问题。为了提升模型性能，需要在算法创新、模型构建、模型训练方法等方面进行创新。算法中强化迁移学习与元学习。铁路线路信号机数量庞大，不同线路、不同设备的信号机数据差异也大，迁移学习方法能够将在一个设备上训练好的模型迁移至其它相似设备上，大量节省了新设备的模型训练数据和信息消耗；元学习方法可通过对多个任务共性进行学习，使模型具备快速学习适应新任务的能力，解决小样本的故障诊断问题，如少数的信号机故障利用元学习方法从少数的故障信号样本中学习到共性特征，快速准确地诊断故障信号。在模型架构优化方面，构建混合智能诊断模型。单一的深度学习模型难以处理复杂故障场景，将深度学习模型与传统机器学习算法、专家系统相结合，发挥各自优势，如将卷积神经网络 (CNN) 与贝叶斯网络结合，通过 CNN 提取数据特征，利用贝叶斯网络的规则推理实现故障原因追溯；基于注意力机制和 GNN，提升模型对于关键特征的理解能力，增强模型对于复杂设备之间关系的认知能力。健全诊断准确性保障机制模型训练是诊断准确性保障的关键环节之一。建立数据动态训练机制，根据设备运行工况的变化，及时调整模型训练数据，确保模型对设备退化、环境条件等具有适应性训练。建立模型性能评估评价体系，在精度、召回率等指标基础上，引入故障诊断时效性、误报率等业务指标，实现模型综合评估及优化。

4.3 维护决策智能化升级

维护决策是否智能化决定了铁路信号设备维修养护经济可靠的程度。维护决策系统缺乏动态性、多目标协调优化，需进一步技术创新。一是构建动态维护决策模型。由于铁路运输是一个动态的维护决策问题（例如行车计划变更、设备负荷变化、天气情况变化等），以基于强学习的动态决策模型为框架，将以设备状态、行车方案、维护能力等环境状态作为决策变量、维护方案为动作变量，与环境交互不断学习最优的动作序列。比如在恶劣天气情况下动态调整维护优先级，保障关键设备的正常运行 [5]。二是丰富数字孪生技术。构建铁路信号设备孪生体，输入驱动实时映射孪生体，在孪生模型上，开展仿真，在虚拟状态下模拟虚拟设备维修方案对设备、运输效率的影响，评估维修方案的可行性与风险。结合 VR/AR，为运维人员提供全息虚拟决策场景，提升维修决策的直观性准确率。三是完善维护决策的人机协作。智能决策系统给出科学的维护方案，但现场运维人员的经验和判断也很重要。建立人机界面，运维人员可以对系统给出的方案进行修改和反馈，将人工经验以知识的形式反馈到模型中，形成“机器决策 + 人工校正”的人机协作模式，使维护决策更加灵活、适用。

5 结语

铁路信号设备智能维护检修技术通过将先进的信息技术应用于设备检修过程中，为铁路信号系统维护开辟了崭新的局面。从数据采集到智能化决策的完善技术体系，实现铁路信号设备设备状态的实时监测，故障诊断和维护决策的智能化制定，虽然当前取得了一定的成果，但在数据融合效率，模型选择，决策智能化等方面仍存在进一步优化和完善的空间。物联网，人工智能等未来技术的持续发展，将会推动铁路信号设备智能维护检修技术朝着更加高速、高效、高智能的方向迈进，数据融合技术的创新，诊断模型的优化，维护决策系统的完善将带来铁路信号设备管理的全面智能化，为铁路安全、高效运行提供保障，助力铁路行业高位发展。

参考文献

[1] 赵荣华.铁路信号设备故障检修决策支持系统实现分析[J].数字通信世界,2020,(05):139.

[2] 王守伟.铁路信号设备故障诊断方法研究[J].信息记录材料,2024,25(10):213-215.

[3] 马建文.铁路信号设备故障检修决策支持系统实现分析[J].科技创新与应用,2020,(03):84-86.

[4] 周玉合.铁路信号设备的维护与安全措施分析[J].集成电路应用,2024,41(04):110-111.

[5] 王云锋.铁路信号设备安装及施工安全风险管理要点探析[J].设备监理,2024,(05):26-29.