铁路信号系统的智能监测技术运用

王 荣
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 010300

摘 要：铁路信号系统是保障列车行车安全、提升运输效能的关键基础设施，设备布设范围大、故障隐患隐蔽，依靠传统人工巡检和定期检修方式，已经难以适配当前运维工作需要。本文针对铁路信号系统智能监测技术开展研究，梳理信号设备监测对象与业务需求，探讨融合物联网、大数据、人工智能、数字孪生技术的智能监测架构与核心手段，并结合道岔、轨道电路、信号机等典型场景分析技术应用成效。该技术能够实现设备状态实时感知、故障提前预警与全周期健康管控，有效提高运维效率与安全水平，为铁路信号由计划修向状态修转变提供技术支撑。

关键词：铁路信号系统；智能监测；故障诊断；物联网；大数据

引言：随着我国铁路网规模持续扩大与列车运行速度不断提升，铁路信号系统承担的安全保障压力日益增大。信号设备长期处于室外复杂环境中，受温度、湿度、振动等因素影响，故障率较高，一旦发生故障，轻则影响列车正常运行，重则危及行车安全。传统信号设备维护主要依赖人工巡检与定期维修，存在巡检周期长、故障发现滞后、维修资源浪费等问题，难以适应铁路高密度、高速度运行需求。本文旨在系统探讨智能监测技术在铁路信号系统中的运用，分析其技术架构、关键方法与典型应用，以期为铁路信号系统运维现代化提供参考。

1 铁路信号系统监测需求分析

1.1 铁路信号系统组成与监测对象

铁路信号系统主要由联锁系统、闭塞系统、列车运行控制系统、信号机、道岔转辙机、轨道电路等设备组成。其中，道岔转辙机、轨道电路、信号机是故障率最高的室外设备，也是智能监测的重点对象。

道岔转辙机监测对象包括：转辙机动作电流、动作时间、转换力、锁闭状态、表示电压等。轨道电路监测对象包括：轨道电路电压、电流、相位角、绝缘电阻、分路灵敏度等。信号机监测对象包括：灯泡电流、灯丝状态、主副灯丝切换、点灯电压等。此外，联锁系统、闭塞系统等室内设备需监测：系统运行状态、通信质量、电源质量、板卡温度等。

1.2 传统监测方式存在的问题

传统信号设备监测主要依赖信号集中监测系统（CSM），该系统可采集部分电气参数，但存在以下不足：一是监测参数有限，多数设备仅监测电压、电流等基本电气量，缺乏机械特性、环境参数等监测；二是故障诊断依赖阈值报警，只能发现已发生的故障，难以实现故障早期预警；三是数据分析能力弱，海量监测数据未被有效利用，难以挖掘设备劣化趋势；四是各子系统监测独立，缺乏统一平台，信息孤岛现象突出。

1.3 智能监测技术需求

针对上述问题，铁路信号系统智能监测需满足以下需求：一是多参数感知，除电气参数外，还需监测机械振动、温度、湿度、图像等参数；二是实时性，监测数据采集与传输需满足实时性要求，尤其对于道岔转换等关键动作；三是智能诊断，基于大数据与人工智能实现故障早期预警与精准定位；四是平台化，构建统一监测平台，实现多源数据融合与共享；五是预测性维护，基于设备健康状态评估，实现从计划修向状态修转型[1]。

2 智能监测技术架构与关键技术

2.1 智能监测技术架构

铁路信号系统智能监测技术架构可分为感知层、传输层、平台层和应用层四个层次。感知层负责数据采集，包括各类传感器、采集板卡、摄像头等。针对道岔转辙机，安装电流传感器、振动传感器、温度传感器、位移传感器等；针对轨道电路，安装电压电流采集模块、绝缘电阻监测模块等；针对信号机，安装灯丝电流采集模块、图像采集摄像头等。传输层负责数据传输，采用有线与无线相结合的方式。室内设备采用工业以太网传输，室外设备采用4G/5G、LoRa、NB-IoT等无线传输方式，解决室外布线困难问题。平台层负责数据存储、处理与分析，包括数据采集服务器、数据库、大数据处理平台、人工智能算法平台等。平台层采用云计算架构，支持海量监测数据存储与并行计算。应用层负责业务功能实现，包括实时监测、故障报警、故障诊断、健康评估、维修决策等。应用层面向电务维修人员、调度人员、管理人员等不同角色，提供差异化功能。

2.2 关键技术

2.2.1 物联网感知技术

物联网感知技术是智能监测的基础。针对铁路信号设备特点，需解决多方面技术问题。道岔转辙机内部空间狭小，传感器需小型化、集成化，以适应安装环境。室外设备取电困难，需采用低功耗设计与电池供电，保障长期稳定运行。传感器还需适应-40℃~70℃温度范围、高湿度、强振动等恶劣环境，确保监测连续性与可靠性。

2.2.2 大数据处理技术

铁路信号系统监测数据具有体量大、类型多、增长快等特点。大数据处理技术需解决数据采集与清洗问题，剔除无效数据与噪声，提高数据质量。数据存储方面，采用时序数据库与关系数据库相结合，兼顾时序数据高效写入与关系数据灵活查询。数据挖掘方面，采用聚类分析、关联分析、趋势分析等方法，挖掘设备劣化规律，为故障预警提供依据[2]。

2.2.3 人工智能故障诊断技术

人工智能故障诊断技术是智能监测的核心。常用方法包括基于神经网络的故障诊断，采用BP神经网络、卷积神经网络、循环神经网络等，实现故障模式识别。基于支持向量机的故障诊断适用于小样本故障分类。基于专家系统的故障诊断将专家经验转化为规则库，实现故障推理。基于深度学习的故障预测采用长短期记忆网络（LSTM）等，预测设备剩余寿命。

2.2.4 数字孪生技术

数字孪生技术通过构建信号设备虚拟模型，实现物理设备与虚拟模型的实时映射。该技术可用于设备状态可视化，直观展示设备运行状态。可用于故障模拟与推演，在虚拟环境中模拟故障发展过程，分析故障影响范围。还可用于维修方案验证，在虚拟环境中验证维修方案可行性，降低现场试验风险与成本。

3 智能监测技术在典型信号设备中的运用

3.1 道岔转辙机智能监测

道岔转辙机是铁路信号系统故障率最高的设备之一。智能监测方案在转辙机内部安装电流传感器、振动传感器、温度传感器、位移传感器，采集动作电流曲线、振动信号、温度、转换位移等参数。分析动作电流曲线可判断转辙机转换力、摩擦力、锁闭状态是否正常；分析振动信号可判断齿轮、轴承等机械部件是否磨损；分析温度可判断电机是否过热。基于人工智能的故障诊断模型能够识别卡阻、锁闭不良、表示杆断裂等常见故障。现场运用显示，该系统可提前预警故障，准确率达到较高水平，有效减少道岔故障导致的列车晚点，为电务维修人员争取了充足的处置时间，显著提升道岔设备的运用可靠性。

3.2 轨道电路智能监测

轨道电路故障直接影响行车安全，是铁路信号系统的重要监测对象。监测方案在轨道电路发送端与接收端安装电压电流采集模块，实时采集电压、电流、相位角等参数；在绝缘节处安装绝缘电阻监测模块，监测绝缘电阻变化。通过分析电压电流变化趋势，可判断道床电阻变化、绝缘节破损、分路不良等故障。依托大数据分析建立轨道电路健康状态评估模型，实现故障早期预警。现场运用显示，该系统可提前发现绝缘节破损等隐患，避免了多起潜在故障，有效降低了轨道电路故障对行车安全的影响，为轨道电路的预防性维护提供了科学依据[3]。

3.3 信号机智能监测

信号机是铁路信号系统的视觉信号设备，其故障直接影响司机瞭望。监测方案在信号机灯丝回路安装电流采集模块，实时监测灯丝电流；在信号机前方安装摄像头，采集信号机显示图像。分析灯丝电流可判断灯丝老化、断丝等故障；借助图像识别技术可判断信号机显示是否正确、亮度是否达标。基于深度学习的图像识别模型能够识别红灯不亮、绿灯亮度不足等显示异常。现场运用显示，该系统可及时发现灯丝老化隐患，避免了信号机故障导致的险性事件，有效保障了列车运行的安全性与可靠性，为信号机状态修提供了技术支撑。

3.4 联锁系统智能监测

联锁系统是铁路信号系统的核心，其可靠性直接影响行车安全。监测方案在联锁系统各板卡安装温度传感器、电压传感器，监测板卡温度、电源电压；在通信接口安装通信质量监测模块，监测通信误码率、通信延迟等。分析板卡温度与电源电压变化可判断板卡老化、电源异常等故障；分析通信质量可判断通信干扰、接口故障等。基于专家系统的故障诊断模型可实现联锁系统故障快速定位。现场运用显示，该系统可快速定位故障板卡，显著缩短故障处理时间，有效提升了联锁系统的可用性与维护效率，为联锁系统安全稳定运行提供了有力保障。另外，监测数据可纳入联锁系统健康档案，为设备状态修提供依据，推动联锁系统运维从计划修向状态修转变。

4 智能监测技术运用效果分析

4.1 故障发现及时性提升

传统监测方式依赖阈值报警，只能在故障发生后发现。智能监测技术基于趋势分析与人工智能诊断，可实

现故障早期预警。某铁路局应用实践表明，智能监测系统可提前1~7天预警道岔转辙机故障，提前3~15天预警轨道电路故障，提前1~3天预警信号机故障，为维修人员争取了充足的处置时间。

4.2 维修效率提升

传统维修方式依赖人工巡检，巡检周期长，故障定位慢。智能监测技术可实现设备状态实时感知与故障精准定位。某铁路局应用实践表明，智能监测系统可将故障定位时间由平均30分钟缩短至5分钟以内，维修效率提升约80%。同时，基于健康状态评估的预测性维护，可减少不必要的定期维修，降低维修成本约20%。

4.3 安全水平提升

智能监测技术可实时监测信号设备状态，及时发现安全隐患，避免故障导致的行车事故。传统监测方式受限于监测参数少、报警阈值单一，难以发现设备潜在隐患，部分故障在发生前无明显征兆，给行车安全带来风险。智能监测系统通过多参数融合分析与人工智能诊断，能够识别设备早期异常状态，在故障萌芽阶段发出预警。应用实践表明，智能监测系统应用后，信号设备故障率下降约35%，因信号故障导致的列车晚点减少约40%，行车安全水平显著提升。信号设备是保障列车运行安全的核心，其可靠性直接关系到旅客生命财产安全，智能监测技术的运用为铁路行车安全提供了更加坚实的技术保障。

4.4 运维模式转型

智能监测技术推动铁路信号运维模式从计划修向状态修转型。传统计划修按固定周期进行维修，存在过度维修与维修不足并存问题。状态修基于设备健康状态评估，按需维修，可优化维修资源配置。应用实践表明，状态修模式下维修工作量减少约25%，维修资源利用率提升约30%。运维模式的转型不仅降低了运维成本，更提高了维修的针对性与有效性，是铁路信号运维现代化的重要方向。

5 面临的挑战与发展趋势

5.1 面临的挑战

铁路信号系统智能监测技术运用仍面临多方面挑战。室外恶劣环境下传感器易损坏，影响监测连续性，传感器可靠性问题亟待解决。监测数据存在噪声、缺失、异常等问题，数据质量直接影响诊断准确性。不同线路、不同型号设备故障模式差异大，人工智能模型泛化能力不足，模型迁移困难。智能监测系统接入网络后，面临网络攻击风险，网络安全问题不容忽视。此外，智能监测技术标准尚不完善，各厂家设备接口不统一，标准规范问题制约了技术的推广应用[4]。

5.2 发展趋势

未来，铁路信号系统智能监测技术将朝多个方向发展。多源数据融合成为重要趋势，将电气参数、机械参数、环境参数、图像等多源数据融合，可提高诊断准确性。边缘计算将部分数据处理与分析功能下沉至边缘节点，有助于提高实时性。5G技术利用其高带宽、低延迟特性，可实现监测数据高速传输。数字孪生技术深度应用，构建信号系统数字孪生体，可支撑全生命周期管理。区块链技术利用其不可篡改特性，能够保障监测数据安全可信。上述方向的持续推进，将进一步提升铁路信号系统智能监测技术水平。

结束语

本文围绕铁路信号系统智能监测技术运用展开研究，分析了信号设备监测需求、技术架构与关键技术，并探讨了典型设备的运用效果。研究表明，智能监测需满足多参数感知、实时诊断与预测性维护等需求，其架构涵盖感知、传输、平台与应用四个层次，关键技术涉及物联网、大数据、人工智能与数字孪生等。该技术在道岔转辙机、轨道电路、信号机及联锁系统中运用效果显著，可提升故障发现及时性、维修效率与安全水平，推动运维模式向状态修转型。未来仍需突破传感器可靠性、数据质量与模型泛化等瓶颈，并向多源融合、边缘计算与5G应用等方向发展。

参考文献

[1]李坤.铁路信号系统的智能监测技术运用[J].数字通信世界，2026(3)：181-183.

[2]王林涛,樊星,李鹏飞,等.铁路信号系统的智能监测技术运用分析[J].中国设备工程,2024(18):13-15.

[3]冯占武.基于智能感知的铁路信号系统施工质量监测技术研究[J].现代工程科技,2025,4(10):129-132.

[4]兰晓凤.试论安全智能检测技术在铁路信号系统中的应用[J].现代工业经济和信息化,2022,12(4):281-282.