基于物联网与大数据的地铁智能运维平台构建及故障预警研究

邵凡
郑州交通发展投资有限公司，中国 ·河南 郑州 450000

摘要：随着城市化进程的加快与轨道交通建设的持续推进，地铁系统已成为现代城市交通的核心支撑。然而，传统地铁运维依赖人工巡检与定期维护，存在数据分散、反应滞后、维护成本高等问题，无法满足高安全、高效率的运营需求。物联网（IoT）与大数据技术的融合为地铁运维提供了新的智能化路径。本文基于系统工程与数据管理理论，构建了一个集实时感知、数据分析、智能决策于一体的地铁智能运维平台。文章重点分析平台的体系结构、数据处理机制、故障预测模型与管理优化策略，并探讨了其在提高设备可靠性、降低维护成本及提升运行效率方面的应用前景。研究表明，基于物联网与大数据的智能运维系统能显著提升地铁设备健康监测水平，形成从“事后维修”向“预测性维护”的战略转型，为地铁行业数字化与智能化运维提供理论与技术支撑。

关键词：物联网；大数据；地铁运维；智能平台；故障预警；预测性维护

Research on the Construction of an Intelligent Subway Operation and Maintenance Platform and Fault Early Warning Based on IoT and Big Data

Shao Fan
Zhengzhou Transportation Development Investment Co., Ltd., China Henan Zhengzhou 450000

Abstract: With the acceleration of urbanisation and the continuous advancement of rail transit construction, metro systems have become a core support for modern urban transportation. However, traditional metro operation and maintenance rely on manual inspections and regular upkeep, which results in scattered data, delayed responses, and high maintenance costs, failing to meet the demands for high safety and efficiency. The integration of the Internet of Things (IoT) and big data technologies provides a new intelligent path for metro operation and maintenance. Based on system engineering and data management theories, this paper constructs a metro intelligent operation and maintenance platform that integrates real-time perception, data analysis, and intelligent decision-making. The article focuses on analysing the platform's architecture, data processing mechanisms, fault prediction models, and management optimisation strategies, and explores its potential in improving equipment reliability, reducing maintenance costs, and enhancing operational efficiency. The study indicates that an intelligent operation and maintenance system based on IoT and big data can significantly enhance metro equipment health monitoring, facilitating a strategic shift from "reactive maintenance" to "predictive maintenance," and providing theoretical and technical support for the digitalisation and intelligent operation of the metro industry.

Keywords: Internet of things; Big data; Subway operations and maintenance; Intelligent platform; Fault warning; Predictive maintenance

0 引言

地铁系统作为城市交通命脉，其运行安全与维护效率直接影响城市运行质量。随着轨道交通网络的迅速扩张，地铁设施设备数量激增、系统复杂度提升，使传统的运维模式难以应对日益增长的管理需求。传统模式以人工巡检和定期保养为主，缺乏实时数据支持，存在“发现延迟—响应滞后—成本上升”的典型问题。物联网技术通过多源传感器实现设备状态的实时监控，大数据技术则通过分析海量运行数据实现状态评估与趋势预测。两者结合，能够构建出自感知、自学习、自优化的智能运维体系。本文立足于管理科学与工程的系统思维，围绕地铁运维的智能化转型需求，系统探讨物联网与大数据融合下的地铁运维平台构建方法、核心算法与管理机制，为城市轨道交通安全、高效运行提供理论支持和技术框架。

ISSN：2661-3697(Print)；2661-3700(Online)

1 地铁运维系统的现状与智能化转型需求

1.1 传统地铁运维模式的特征与问题

传统地铁运维依赖人工巡检与经验判断，其主要特征是周期固定、响应被动、数据孤立。由于地铁设备系统庞杂，包含列车、信号、电力、通风、通信等多个子系统，人工检查不仅耗费大量人力物力，还难以实现实时监测。信息孤岛现象严重，不同部门间缺乏数据共享与联动机制。此种运维方式导致设备故障无法提前预警，往往在问题发生后才采取补救措施，增加了停运风险与维护成本。

1.2 地铁智能化运维的必要性

随着城市地铁线路的延伸与客流量的增长，系统运行安全与可靠性要求不断提高。智能化运维的核心是通过信息技术与自动化手段，构建数据驱动的维护体系，实现状态感知、风险评估与智能决策。物联网的普及使得传感器能够覆盖轨道、车辆、机电系统等关键节点，形成全方位的数据采集网络；大数据分析则可识别复杂运行规律，预测设备潜在风险，从而提前采取预防措施，实现“从故障维修到预测维护”的转变。

1.3 智能化转型的技术基础

智能运维的实现依赖三大技术支撑：物联网的实时感知能力、大数据的分析与学习能力、人工智能的预测与优化能力。三者形成“感知—计算—决策”闭环体系。管理科学中的系统优化理论为平台建设提供了方法论支持，使地铁运维能够在资源配置与风险控制之间实现动态平衡。

2 基于物联网的地铁智能运维平台架构设计

2.1 系统架构总体设计

地铁智能运维平台以物联网为底层数据支撑，结合云计算与人工智能算法形成分层体系。整体结构分为感知层、传输层、平台层和应用层。感知层部署多种类型传感器，用于采集温度、振动、电流、湿度等运行数据；传输层通过5G专网或工业以太网实现高速低延迟数据传输；平台层依托云计算中心完成数据处理与模型计算；应用层则面向运维人员提供状态监测、健康评估和故障预警等服务，实现可视化决策支持。

2.2 传感器网络与数据采集体系

物联网的核心在于多源信息融合。地铁智能运维平台需在关键部位设置高精度传感器阵列，例如车辆车轴安装加速度传感器监测振动信号，轨道区域设置温度与应变传感器检测结构应力变化，信号系统部署电压与电流传感器监控通信设备运行状态。这些数据通过边缘计算节点进行初步过滤与压缩，减少传输冗余并提高实时性。

3 大数据驱动的地铁设备状态分析与健康评估

3.1 数据预处理与特征提取方法

地铁运维数据来源复杂，包含结构监测、环境参数、能耗信息等多类型数据。为确保分析精度，必须进行数据清洗、缺失值补全与异常检测。通过主成分分析提取关键特征变量，剔除冗余数据，建立统一的多维特征矩阵。此步骤不仅提高模型计算效率，也为机器学习算法提供高质量输入。

3.2 设备健康状态评估模型构建。

地铁设备健康状态的评估可采用数据驱动与模型驱动相结合的方法。数据驱动模型基于大量历史样本，利用网络技术实现状态分类与故障识别；模型驱动方法基于物理机理，通过热力学与力学方程描述设备退化过程。二者融合后形成复合健康评估体系，可动态计算设备健康指数（HI），反映当前状态与未来退化趋势。

3.3 运行状态的动态监控与可视化管理

为实现数据与管理的直观联动，平台应提供动态可视化界面，将设备状态以热力图、趋势图等形式展示。管理人员可实时查看关键部件的健康指数变化，并通过阈值控制实现风险等级自动识别。当系统检测到异常信号时，平台会发出预警提示并自动生成维修建议，实现智能辅助决策。

4 地铁故障预警机制与智能决策模型研究

4.1 故障识别机制与异常检测算法

地铁设备的故障特征往往具有复杂性和隐蔽性，单一参数分析难以全面反映设备的真实运行状态。通过多传感器数据融合技术，可在温度、振动、电流、噪声等多维信号之间建立关联，形成更加全面的状态描述。在数据分析阶段，可对运行数据进行特征分群，识别隐藏在正常模式中的潜在异常趋势。为了进一步提升识别精度，系统引入深度编码对多维特征进行非线性降维与重构分析，通过计算重构误差并设置动态阈值，实时判断设备运行状态。当误差超出阈值时，系统自动触发故障预警，并记录异常数据以供后续分析。该方法融合了统计特征提取与深度学习算法优势，实现了从多源数据感知到智能识别的闭环流程，显著提升地铁设备故障检测的及时性与准确性，为智能运维提供坚实的数据支持。

4.2 时间序列预测与趋势分析

地铁设备在长期运行过程中产生大量具有时间依赖性的动态数据，这些数据反映了设备性能的变化趋势与潜在

的风险信号。通过引入长短期记忆网络和深度学习模型，可对运行数据的时间序列进行建模，捕捉温度、振动、能耗等多维特征间的非线性关联，实现对未来状态的精准预测。模型在训练过程中不断优化参数权重，以提高对异常波动的敏感度和预测的稳定性。结合概率统计分析，可进一步构建风险指数函数，对系统健康状况进行量化评估。当风险指数超过设定阈值时，平台自动触发维护任务，生成预警信息并推送至运维中心，形成快速响应机制。该方法实现了“提前发现、提前干预”的预测性维护目标，使地铁设备管理从被动维修转向主动防控，有效降低突发故障概率，提升运维体系的安全性与可靠性。

4.3 智能决策与自适应优化机制

基于大数据的地铁智能运维决策系统通过对历史运维案例与维修结果的深度学习，实现算法参数的持续优化与策略的自适应调整。系统以多目标优化模型为核心，将“安全性最大化、成本最小化、时间最短化”设定为综合目标函数，利用智能计算方法，寻求最优的维护路径与任务调度方案。通过引入实时状态感知机制，系统能够根据设备运行参数的变化动态调整维护计划，实现决策的灵活性与前瞻性。决策引擎在运算过程中对资源分配、任务优先级和风险因素进行综合评估，确保运维过程的高效与可靠。该系统的建立使地铁运维由经验驱动转向数据驱动，显著提升资源配置效率与风险防控能力，为实现智能化、科学化、可持续的城市轨道交通运维体系奠定了技术基础与管理保障。

5 地铁智能运维平台的管理实施与发展路径

5.1 平台建设的系统化管理思路

地铁智能运维平台的建设是一个涉及多部门、多系统协同的复杂工程，需要在顶层设计阶段确立清晰的数据标准与信息接口规范，以确保系统的兼容性与数据流通的高效性。通过建立统一的运维数据中心，可实现车辆、信号、电力、通风等关键系统间的数据共享与互操作，打破传统运维模式下的信息孤岛。数据中心作为核心枢纽，承担监测、分析与指令分发的多重职能，使各业务系统在统一框架下实现信息联动与协同决策。为适应这一体系，应对现有运维流程进行再造，明确各部门的职责分层与数据管理权限，构建以“数据驱动、协同运维”为核心的组织结构。该模式不仅能提升系统的响应速度与运行效率，还能强化管理透明度，使运维工作从经验决策转向科学决策，推动地铁智能化管理体系的可持续发展与精细化运营。

5.2 运维体系的闭环反馈机制

借鉴 MES 系统的过程管控理念，地铁智能运维平台应构建“监测—分析—决策—执行—反馈”的循环机制，实现运维全过程的动态优化与自我进化。系统通过多源传感器网络对设备运行状态进行实时监测，采集温度、电压、振动等关键数据，经由平台算法模型进行综合分析后生成具体的维护任务。执行单元依据决策指令完成检修、校准或更换操作，相关结果再反馈至模型库进行参数修正与算法迭代，使系统具备自学习与持续优化能力。该闭环机制实现了从数据采集到智能决策的全链路管理，使运维平台能够在实践中不断提升诊断精度与响应速度。通过持续的反馈优化，系统能有效降低设备故障率与维护成本，保持运行的长期稳定性与高可靠性。该模式为地铁智能运维的科学化与精细化管理提供了坚实的技术支撑与方法论基础。

5.3 未来智能化发展趋势

随着 5G 通信、边缘计算和人工智能技术的快速融合，地铁智能运维正迈向更高层次的自主智能阶段。未来的运维平台将依托数字孪生技术，构建虚拟地铁系统，与现实设备实现实时同步运行。通过虚拟仿真与风险推演，系统能够动态监测设备运行状态，预测潜在隐患，并在问题发生前进行策略调整，从而实现“未故障先预警”的智能维护模式。AI 算法的引入将推动跨系统的协同管理，使信号系统、供电系统和车辆监测模块在同一平台上实现信息互通与决策联动。随着算法自学习能力的提升，地铁运维将进一步从预测性维护演进为“自愈式运维”，即系统能够自动识别、评估并修正故障，减少人工干预。该模式的成熟将推动地铁行业向智能化、透明化和高可靠性方向发展，为城市轨道交通的安全与高效运行提供持久的技术动力。

6 结语

本文以物联网与大数据技术为基础，对地铁智能运维平台的体系构建与故障预警机制进行了系统研究。研究发现，物联网技术能够通过传感网络实现设备运行状态的实时感知，为地铁设施提供连续、精准的数据支撑；大数据分析则为复杂系统的故障诊断、健康评估与趋势预测提供了可靠的理论与算法基础。二者的融合使运维工作从被动维修转向主动管理，实现数据驱动下的智能化决策。通过多源传感网络、数据分析模型与智能算法的协同应用，地铁运维平台可实现对关键设备的动态监控与风险预警，提升系统运行的安全性与效率。研究还指出，未来应重点推进算法融合与跨系统数据协同，完善信息安全防护体系，构建具备自学习与自优化功能的智能运维生态。该模式将

为城市轨道交通的安全运营与可持续发展提供坚实的技术支撑。

参考文献：

[1] 张晓辉，李鹏. 基于物联网的地铁运维信息化平台研究[J]. 城市轨道交通研究，2023, 26(3): 45-52.

[2] 王凯，陈志明. 大数据技术在轨道交通智能运维中的应用分析[J]. 铁道科学与工程学报，2022, 39(5): 81-89.

[3] 刘媛，赵磊. 基于人工智能的地铁设备故障诊断与预测研究[J]. 管理科学与工程，2024, 41(2): 67-76.

作者简介：邵凡（1988.08-），女，汉族，河南省郑州市人，助理工程师，研究方向：城市轨道交通。