

## 城市轨道交通智慧运维研究现状及展望

于秋波<sup>1</sup>, 魏秋实<sup>1</sup>, 冯培<sup>2</sup>, 梅天赐<sup>3</sup>, 申泽玺<sup>3</sup>, 刘斌<sup>4</sup>, 陈钉均<sup>3</sup>

(1. 天津轨道交通运营集团有限公司, 天津 300392; 2. 天津城市轨道交通咨询有限公司, 天津 300000;  
3. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 成都 610031; 4. 兰州交通大学 交通运输学院, 兰州 730070)

**摘要:**城市轨道交通是现代城市交通体系的重要支柱,其安全稳定运行对提升城市交通效率和改善居民生活质量具有至关重要的作用。传统的运维模式主要依赖人工经验,难以实现对设备状态的全面监测和精准评估,已无法满足轨道交通日益复杂的运维需求。智慧运维通过智能化手段有效弥补了传统运维的不足。从智慧运维系统构造出发,按专业分类对各子系统的功能进行详细分析,从智慧网络基础设施技术和具体应用技术两个方面梳理智慧运维的关键运维技术及其工程实践。最后从系统构造,运维模式及产业化发展的角度,对智慧运维的研究现状进行总结,探讨其未来的发展方向。

**关键词:**城市轨道交通;智慧运维;工程实践;运维技术

中图分类号: U279

文献标志码: A

## Current Research and Future Prospects of Intelligent Operation and Maintenance in Urban Rail Transit

YU Qiubo<sup>1</sup>, WEI Qiushi<sup>1</sup>, FENG Pei<sup>2</sup>, MEI Tianci<sup>3</sup>,  
SHEN Zexi<sup>3</sup>, LIU Bin<sup>4</sup>, CHEN Dingjun<sup>3</sup>

(1. Tianjin Rain Transit Operation Group Co., Ltd., Tianjin 300392, China;  
2. Tianjin Urban Rail Consulting Co., Ltd., Tianjin 300000, China;  
3. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;  
4. School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Urban rail transit is a critical component of modern urban transportation systems, and its safe and stable operation plays a vital role in enhancing transportation efficiency and improving residents' quality of life. Traditional operation and maintenance largely rely on manual expertise, making it challenging to achieve comprehensive monitoring and accurate assessment of equipment status, which is increasingly insufficient to meet the growing complexity of rail transit maintenance demands. Intelligent operation and maintenance effectively address these limitations by leveraging advanced technologies. Starting with the structure of the intelligent operation and maintenance system, the functions of each subsystem are analyzed in detail based on their respective domains. The key maintenance technologies and engineering practices of intelligent operation and maintenance are explored from two key aspects: smart network infrastructure and specific application technologies. Finally, the current research status of intelligent operation and maintenance is summarized from the perspectives of system structure, operation and maintenance models, and industrial development, followed by a discussion of its future development directions.

收稿日期: 2024-12-06

修回日期: 2025-03-10

基金项目: 国家重点研发计划课题(2022YFB4300502); 四川省科技创新人才项目(2024JDR0020); 广州市重点研发计划项目(202206030007)

第一作者: 于秋波(1985-), 男, 山东即墨人, 高级工程师, 主要研究方向为交通运输规划与管理。E-mail: yuqiubo2004@163.com

通讯作者: 刘斌(1976-), 男, 甘肃天水人, 副教授, 主要研究方向为铁路运输组织优化。E-mail: liubin0909@mail.lzjtu.cn

**Key words:** urban rail transit; intelligent operation and maintenance; engineering practice; maintenance technology

智慧运维最早由 Gartner 于 2016 年提出,它指的是将人工智能技术应用于运维领域,通过机器学习算法和大数据平台对传感器等采集设备获取的海量数据进行分析,并将分析结果提供给监控和运行平台,帮助用户做出决策。运维的发展过程分为 3 个阶段:1) 人工运维阶段。以人工巡检及定期维护为主,由现场人员依靠经验进行决策并通知维修人员进行手工维修。2) 自动化运维阶段。随着自动化技术和设备智能化的发展,实现数据采集和处理的自动化。3) 智慧运维阶段。通过数据分析和智能化技术实现高度自治,大幅度降低运维成本。此后,智慧运维开始在各行各业快速发展。

在轨道交通领域,具体而言,城市轨道交通智慧运维是指(以下简称智慧运维)利用传感器,图像识别等技术对轨道交通运行产生的大量数据进行采集,通过物联网,5G 通信,云平台等智慧网络基础设施技术对采集数据进行收集、存储、传输和分析,并将运算结果传达至控制中心,最后基于数据挖掘人工智能等技术运用于自动巡检和设备健康管理等具体应用,从而实现轨道交通智慧运维中对人、物、作业规程的综合决策和智能化管理,减少了对人工依赖,大幅提高了运维效率。

随着城市轨道交通线网规模的不断增长,设备数量成倍增加,客流量爆炸式增长,部分城市的轨道交通日均客流量已超过 1 000 万人次,以计划修为主的运维策略下的城市轨道交通承载力<sup>[1]</sup>难以满足现代城市轨道交通高效、迅捷和智能化的发展需求。伴随着国家“十四五”智慧城市轨道交通战略<sup>[2]</sup>的推进,城市轨道交通运维开始朝着低成本、高安全、高效能、高品质、可持续的智慧化方向发展。在轨道交通数字化转型的推动下,如何保证运维智慧化是保证其安全稳定运营的重要一环。

## 1 智慧运维系统技术架构

### 1.1 系统总体框架

总结近年来智慧运维系统的应用研究情况,按照功能特性,智慧运维系统总体框架可分为感知分析层、中间应用层、可视化展示层三个部分,如图 1 所示。

1) 感知分析层。利用传感器等设备对包括信号系统、通信系统、车辆系统以及其他关键设备日常

运行数据进行采集,通过大数据、云平台等先进信息技术对数据进行存储、分析和传输,为后续应用层提供信息来源。

2) 中间应用层。依托先进的算法和模型,对轨道交通运行数据进行分析和挖掘,实现设备健康管理(prognostics and health management, PHM),包括对设备的寿命预测、故障预测及状态评估等技术以及智能巡检等其他具体应用,为轨道交通稳定运行提供技术保障。

3) 可视化展示层。综合应用层得到的信息,通过三维模型和可视化技术以用户友好的形式传递给运营人员。同时综合考虑维修成本和任务规划提供运维策略建议。

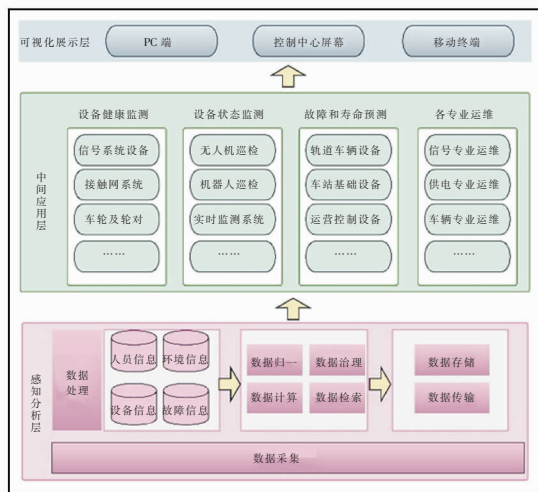


图 1 智慧运维系统总体框架

Fig. 1 Overall framework of intelligent operation and maintenance system

### 1.2 城市轨道交通专业系统

城市轨道交通从专业角度分为信号系统、通信系统、车辆系统、工务系统、供电系统、车站设施设备等于子系统<sup>[3]</sup>,以上海车辆智慧运维系统为例,其采用多维数据采集系统、智能运维专家系统、基础数据管理系统以及平台服务互通系统等四大板块进行设计,通过大数据技术实现对 95% 以上的车辆数据进行数字化分析<sup>[4]</sup>。各子系统的功能如图 2 所示。

各个子系统的集成与协作实现了实时数据共享、故障预警、设备健康管理、优化调度等功能,使运维不再依赖于人工定期检查,而是通过自动化、智能化的方式进行动态监测和预防性维护,提高了智慧

运维整体运营效率、设备可靠性、系统安全性。

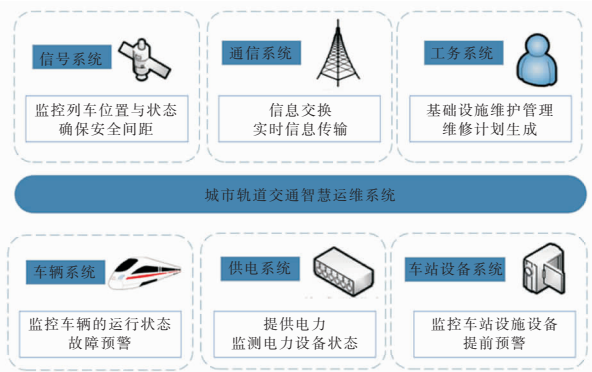


图 2 智慧运维子系统功能

Fig. 2 Functions of the smart operation and maintenance subsystem

## 2 智慧运维技术

智慧运维技术大体上可以分为两类,即智慧网络基础设施技术和工程实践运维技术两类。

### 2.1 智慧网络基础设施技术

轨道交通运行会产生大量数据,通过对数据进行采集,分析和利用,实现轨道交通运维数字化的优势,能够极大程度上提升运维工作效率。智慧网络基础设施技术主要由信息采集技术,物联网与 5G 通信技术以及大数据与云平台技术等组成。

#### 2.1.1 信息采集技术

信息采集是轨道交通进行运维管理的重要前提,采集的数据包括列车的运行状态,包括速度、位置、电力使用等,帮助确保列车运行安全。此外还包括轨道、车辆及其它关键基础设施的磨损和损坏情况的收集,从而为运维管理提供依据。传感器是信息采集的主要手段,也是运维技术的研究重点。光电传感器是目前应用较为广泛的传感器,其具有对射式、反射式和漫反射式三种类型<sup>[5]</sup>,在在列车屏蔽门、电机温度、车厢防火、隧道防灾等多个领域具有众多应用;由于每个站点、每条线路甚至整个路网都需要进行数据采集,单一类型的传感器难以应对繁杂的数据采集任务,多传感器融合的数据采集技术解决了这一难题<sup>[6]</sup>。此外,考虑到集成技术针对轨道交通多子系统、传感器种类繁多的优势,轨道交通多源数据采集平台对采集数据进行分类,并建立了统一的数据接口标准,提高了数据采集的效率<sup>[7]</sup>。

#### 2.1.2 物联网与 5G 技术

在轨道交通车地通信、车车通信、数据中心内部通信等过程中,信息传输的稳定性、时效性和数据安

全性至关重要。物联网和 5G 技术为城市轨道交通数据传输提供了坚实的技术基础。物联网利用射频识别技术、红外传感器、激光扫描仪和全球定位系统,将各种物品与网络连接,实现在智能化跟踪、定位、监控、管理和识别等方面的一种新型网络,实现设备和系统的全面连接,5G 通信技术是第五代移动通信技术,其提供了高速、低时延和高可靠性的通信保障。

在轨道交通智慧运维领域,由于物联网具备快速处理信息的能力,被广泛应用于安全智能管控系统<sup>[8]</sup>。身份加密和深度学习技术的发展更新了物联网技术框架,使管控系统更加安全化<sup>[9]</sup>。5G 通信技术主要应用于设备维护、安全保障、车地通信和防火预警等领域。其高速、低延迟的特性支持实时监控和数据传输,提升了维护效率<sup>[10]</sup>。5G 通信技术的高可靠性能和强大接入能力使得物联网的应用十分多样化,目前国内对 5G 与物联网的融合进行了研究,在大规模远程监控、数据智能采集、可视化管理以及空间定位与监管等方面有了一定的成果<sup>[11]</sup>。

#### 2.1.3 云计算与大数据

大数据和云计算技术能够集中存储和管理整个轨道交通网络的大量数据,将数据分析和计算机软硬件架构进行整合,提供了强大的数据处理能力<sup>[12]</sup>。通过大数据和云计算技术,轨道交通运营商可以实时监测列车运行状态、基础设施健康状况和乘客流量趋势,进而优化调度策略和维护计划<sup>[13]</sup>。云计算的可扩展性和弹性计算能力,使得系统能够适应数据量的快速增长和复杂计算的需求,确保运维工作的连续性和高效性。借助大数据分析,运营商还可以实现风险预警、故障预测和智能决策支持,全面提升轨道交通系统的安全性和服务质量。

目前,云计算和大数据技术在轨道交通行业迅速兴起,国内许多较发达城市开始推进其在轨道运维中的应用。以深圳市为例,其应用示例如图 3 所示。深圳地铁通过云计算和大数据技术,构建了集成多源信息的综合平台与决策支持系统。通过统一采集和共享包括视频监控、地理信息、供电系统、机电设备运行等多种数据,形成了高效的云数据中心。这些数据经过深度挖掘与分析,为地铁运维提供决策依据。此外,深圳地铁的网络运营控制中心整合了全线路的基础信息、行车动态以及客流数据和天气因素,结合云数据中心的运维决策,从而实现了智慧化的监控与管理,提高了运维水平<sup>[14]</sup>。

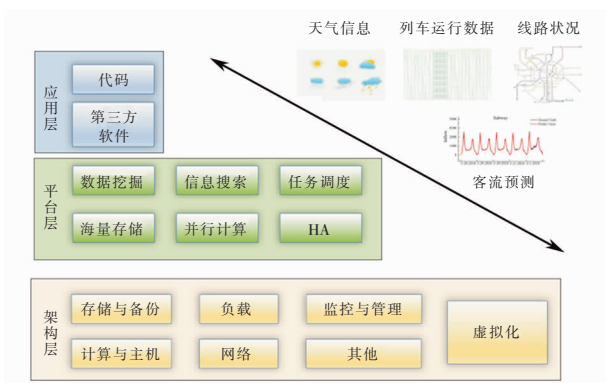


图3 深圳地铁云平台应用实例

Fig. 3 Application example of Shenzhen Metro cloud platform

## 2.2 工程实践运维技术

### 2.2.1 智慧巡检

智慧运维的核心在于将传统的故障修理转变为基于设备实时状态的预防性维护,从而提前识别潜在问题并进行干预,减少故障发生并提升系统整体的运行效率和可靠性,实时掌握设备的实时状态需要进行不断地巡检。由于轨道交通子系统繁多,不同子系统包含的设备不计其数,传统的人工巡检面临巨大压力,智慧巡检技术的引入能显著提升检测效率和准确性,同时降低运维成本。智慧巡检通过使用高精度传感器和数据分析技术,能够24小时实时监控轨道状态和设备健康,从而提高检测效率和准确性,及时发现并对故障进行诊断,降低运维成本。

机器人巡检技术最早于2018年应用于在北京地铁,其有效解决了地铁隧道环境复杂,人工巡检难度大的技术问题,预示着轨道交通运维进入了人工智能时代<sup>[15]</sup>。在此基础上,通过深度学习技术引入了多源图像识别技术,以南京地铁于2024年底研制的轨旁智能巡检机器人为例,其运作流程如图4所示,其通过主移动机器人平台和人工智能算法,精准定位并识别轨旁关键零部件的典型缺陷,从而降低巡检成本,提高巡检的准确率<sup>[16]</sup>。此外,由于城市轨道交通洞口、护坡以及高架桥等区域巡检时存在危险,智慧巡检引入了无人机智慧巡检方案<sup>[17]</sup>,该方案从外业采集数据和内业处理数据两个方面进行建设,克服了特殊危险区域的巡检难题。

### 2.2.2 设备健康管理

城市轨道交通主要包括有轨电车、地下铁道、轻轨交通等七大类<sup>[18]</sup>,不同分类下的轨道交通车辆结构、运行环境存在一定差异,但均包含相当多的关键设备,而这些关键设备的健康状态需要及时更新和

管理,以免造成安全隐患。PHM旨在监测设备的运行状态,实时分析其性能数据,以预测未来的维护需求和潜在故障,为运维提供重要的参考信息。PHM的研究主要包括PHM系统架构和利用算法设计提高效率两方面<sup>[19]</sup>。

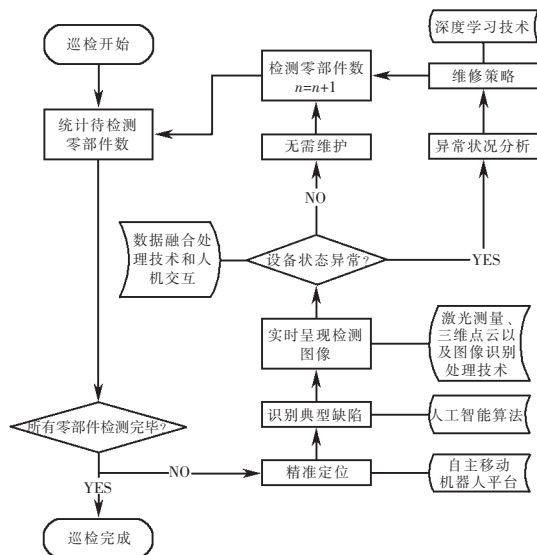


图4 南京地铁轨旁智能巡检机器人工作流程图

Fig. 4 Work flowchart of Nanjing Metro trackside intelligent inspection robot

由于轨道交通设备众多,存在巨大的运维需求,国内外对于智慧运维系统的研究已经取得了诸多成果。总体来说,PHM系统技术框架包括PHM对象层、数据处理层、信息处理层和决策层4个部分<sup>[20]</sup>,体系结构可以划分为集中式、分布式和分层式,其中集中式适用于小型简单设备,分布式结构可应用于大型复杂系统但子系统之间的分析结果集成性不高,适用于工作时间较短的复杂系统,分层式结构融合了上述两种结构,兼具两种结构的优点,适用于结构复杂且需长时间工作的系统,例如天津轨道6号线的接触网安全在线监测系统采用分层式结构,对状态感知、设备管理、业务管控三种功能需求进行融合处理,在2023年9月—2024年2月期间系统的检测精度达到95%以上,证明了分层式结构在复杂环境下长时间工作的适用性<sup>[21]</sup>。

通过算法设计实现轨道交通设备状态监测管理也是研究热点之一,先进的传感技术收集设备的实时数据通过算法进行分析处理,不仅可以预测设备潜在的故障,还能优化维护计划,从而大幅提升轨道交通设备的运行效率和安全性。现阶段主要包括数学分析算法、仿真模拟算法以及机器学习算法三大类,不同算法的分类及具体应用实例如表1所列。

表 1 PHM 算法  
Tab.1 PHM algorithm

算法分类	算法名称	评估/预测内容
数学分析算法 <sup>[22-24]</sup>	变权模糊综合评判方法	地铁转辙机健康状态的评估
	层次分析法	
	专家评分加权	地面 ATP 健康度评估
	层次分析法、领域粗糙集理论	轨道电气设备健康状态评估
仿真模拟算法 <sup>[25-27]</sup>	Maxwell 仿真软件	电抗器等发热设备寿命分析
	LCU 箱体仿真模型	LCU 寿命分析
	电容老化动态仿真模型	宽频域下电解电容机型寿命预测
机器学习算法 <sup>[28-32]</sup>	谱聚类算法	轨道电路故障分析
	HoltWinters 模型、GM 模型	接触线故障预测
	离散时间贝叶斯网络	轴向变量柱塞泵故障预测
	模糊 RBF 神经网络算法	高压断路器设备故障预测
	SVM、BP 神经网络	车载设备寿命预测

综上所述,数学分析算法给轨道交通设备健康状态提供了精确的计算和预测方法,算法经过严格的数据统计可以为运维决策提供坚实的理论支撑,部分算法依赖专家主观权重打分,预设的数学模型难以适应环境变化和新的运营条件,存在一定的局限性;仿真分析算法通过虚拟环境测试各种假设的故障和异常条件,提供了寿命预测的全新思路,目前仿真往往简化了现实中部分物理和化学的复杂过程,存在很大的优化空间。

机器学习算法是用于 PHM 最为广泛的算法,由于具备复杂模式识别及多维数据融合等优点,在健康评估、寿命预测、故障预测等方面均表现出良好的性能。由于机器学习算法对数据的高度需求及可解释性问题,在某些情况下需要与数学分析算法和仿真分析算法进行结合,从而提高算法的准确性和泛化能力。

### 3 智慧运维研究展望

近年来,我国城市轨道交通迅速发展,运营里程和客运量屡创新高,成为城市交通体系的重要组成部分。然而,随着线路的增加和设备的复杂化,运维过程中设备故障频发、运维效率不足等问题日益显现。针对城市轨道交通的智慧运维研究应运而生。尽管众多科研机构和企业智慧运维领域取得了初步成果,但智慧运维在实际应用中仍面临诸多挑战,相关技术体系的完善和系统的应用价值的提升有待进一步深入研究。

1) 系统需求和技术一体化研究。目前针对轨道交通智慧运维系统的研究,无论是整体系统还是从专业出发的各子系统,均集中于宏观的系统整体架构层面,缺乏与智慧运维技术发展进行有机结合

的研究。随着轨道交通环境和运维需求的不断变化,智慧运维系统需要具备良好的适应能力。因此,如何将系统需求分析与技术发展同步考虑,设计出模块化、可扩展的系统架构,便于后续技术升级和功能扩展是智慧运维系统的一大研究方向。

2) 机检机修运维模式研究。在机器人、无人机巡检等智能巡检过程中,在机器检测出故障后通知人工进行维修,即机检人修模式。相较于人工维修,机器维修不仅可以承担高风险检修任务,还减少了普通维修工作对维修人员的依赖。此外,经济效益也是“机检机修”模式的一个重要优势。在减少人工开支的同时,“机检机修”这种基于数据驱动的检修策略可以通过提前预测维护需求,避免过早或过晚的维护活动,实现长久的成本节约。因此,从“机检人修”到“机检机修”的过渡,是接下来智慧运维亟待研究的问题。

3) 智慧运维产业化发展研究。在智慧运维的工程实践中,针对经济效益的研究往往停留在减少人工成本的层面,缺乏整体的定量分析,通过明确智慧运维的经济效益,将有助于轨道交通企业及相关研究机构加速智慧运维的研发和应用。此外,由于智慧运维本身的技术实施难题,在工程实践中存在一定的局限性,应当推动技术的创新与发展,使得智慧运维能够更广泛地应用于不同场景并持续优化。智慧运维产业化研究可以技术方面的拓展和经济效益的提升,在未来是智慧运维的研究重点。

### 4 结论

智慧运维作为智慧城轨的核心内容,对建设交通强国具有重要意义。首先对智慧运维系统架构进

行梳理和总结,按专业对子系统进行分析;然后针对智慧运维的实际应用技术进行综述和分析;最后对研究现状进行总结,探讨智慧运维在系统需求和技术一体化研究、机检机修运维模式以及产业化发展等方面进行展望,可为未来智慧运维的发展提供借鉴与参考。

### 参考文献:

- [1] 李小静,张金伟,李子文.城市交通承载力系统动力学评估及多情景预测[J].兰州交通大学学报,2024,43(4):17-27.
- [2] 国务院关于印发“十四五”现代综合交通运输体系发展规划的通知[J].中华人民共和国国务院公报,2022(4):8-28.
- [3] 牛涛,张辉.城市轨道交通智能运维系统方案研究[J].铁道运输与经济,2022,44(4):99-105.
- [4] 郭泽阔,张艳兵,王璐.基于物联网技术的智慧运维在地铁车辆段的应用[J].都市快轨交通,2019,32(3):19-24,38.
- [5] 邓嘉.光电传感器在轨道交通中的运用与分析[J].科技创新与应用,2018(34):178-179.
- [6] 陈宁宁.基于多传感器融合的城市轨道交通列车定位方法研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2023.
- [7] 蔡宇晶.城市轨道交通数据采集平台的研究与实现[D].北京:中国铁道科学研究院,2016.
- [8] 郭泽阔,张艳兵,王璐.基于物联网技术的智慧运维在地铁车辆段的应用[J].都市快轨交通,2019,32(3):19-24,38.
- [9] ZHOU Z L, GAURAV A, GUPTA B B, et al. A fine-grained access control and security approach for intelligent vehicular transport in 6G communication system [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(7): 9726-9735.
- [10] 赵晓南.5G通信技术在城市轨道交通中的应用[J].大众标准化,2024(7):149-151.
- [11] 凌力.5G与物联网融合在城市轨道交通运维中的探究[J].铁道建筑技术,2018(6):18-22.
- [12] 苑永祥,蹇波,唐松铨,等.轨道车辆智能运维技术发展及应用现状[J].电力机车与城轨车辆,2023,46(1):12-22.
- [13] 王瑞锋.基于智能检测监测与大数据技术的城市轨道交通智能运维管理[J].现代城市轨道交通,2021(11):85-89.
- [14] 刘微,张铭,刘阳学.基于云平台的城市轨道交通数据中心应用[J].铁路计算机应用,2016,25(9):72-74,78.
- [15] 隧道建设(中英文)编辑部.隧道智能巡检机器人问世地铁运维进入AI时代[J].隧道建设(中英文),2018,38(6):1028.
- [16] 于子良,黄志辉,杨珏,等.轨道隧道巡检现状及智能检测机器人发展趋势[J].机车电传动,2020(6):137-142.
- [17] 彭辉,张群慧,杨灿.深度学习技术在列车故障自动巡检中的应用[J].湖南邮电职业技术学院学报,2024,23(2):11-14,33.
- [18] 田耕耘.基于PHM技术的城市轨道交通车辆牵引系统智能运维研究[D].北京:北京交通大学,2022.
- [19] ZIO E. Prognostics and health management (PHM): where are we and where do we (need to) go in theory and practice [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2022, 218: 108-119.
- [20] 江忻坤,宋冬利.轨道交通健康管理关键技术研究综述[J].中国铁路,2022(3):16-22.
- [21] 于秋波,倪国政,王志锐.城轨交通接触网安全在线监测系统[J].中国铁路,2024(3):50-56.
- [22] 余婷,张亚东,江磊,等.基于实时监测数据与变权模糊综合评判的地铁转辙机健康状态评估[J].铁道标准设计,2023,67(8):179-184,191.
- [23] 赖治平,高宁,鲁怀科.城市轨道交通列车运行控制系统智能运维系统研究[J].城市轨道交通研究,2023,26(2):46-50.
- [24] 高锋阳,王文祥,张浩然,等.基于状态和风险评估的无接触网城轨车辆电气系统运维策略[J].中国铁道科学,2022,43(4):148-156.
- [25] 张耀匀,刘晔,于龙洋,等.高压供电系统电气散热器寿命周期预测仿真[J].计算机仿真,2019,36(8):449-453,475.
- [26] 姜杉,崔伟.地铁车辆LCU热设计及仿真研究[J].电工技术,2024(4):117-120,124.
- [27] 姚知洋,金庆忍,郭敏.宽频域纹波环境下电解电容寿命模型建立及老化速率分析[J].电力电容器与无功补偿,2022,43(1):75-81.
- [28] 姚新文,侯通,郑启明,等.基于谱聚类的轨道电路故障文本主题聚类研究[J].兰州交通大学学报,2024,43(1):64-72.
- [29] 向智莉,高仕斌.基于时间组合的高速铁路接触线故障强度预测方法[J].电气化铁道,2020,31(5):50-54.
- [30] 李新宠.基于离散时间贝叶斯网络的轴向变量柱塞泵可靠性分析[D].秦皇岛:燕山大学,2016.
- [31] 乔维德.基于RBF神经网络的高压断路器机构故障诊断[J].电气传动自动化,2021,43(3):22-26.
- [32] 石锡尧.列控车载设备故障间隔时间统计分布建模及预测方法研究[D].北京:北京交通大学,2019.