轨道交通电力机车智能化运维分析

Qi Liu[1,2*], Ning Li[3], Haichuan Tang[1], Xuemei Jia[3]

[1]CRRC Academy, Beijing
[2]School of Software Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing
[3]CRRC Academy (Qingdao) Co., Ltd., Qingdao, Shandong

【摘要】轨道交通装备的运力压力和高技术含量使得安全控制问题具有潜在的灾难性，这些挑战对轨道交通运维领域的智能化发展提出了更高的要求，为行业带来了巨大的发展空间。本文从轨道交通机车智能运维检测和电力机车技术状态管理平台两个方面，阐述了智能运维的现状。通过对机车运行数据采集、智能监控维护系统架构、影响故障诊断和远程运维的关键因素、智能运维系统等方面的分析，总结了智能运维的现状。

【关键词】轨道交通；智能运维；电力机车

【收稿日期】2025 年 5 月 20 日 【出刊日期】2025 年 6 月 25 日 【DOI】10.12208/j.telm.20250005

An analysis of intelligent operation and maintenance for rail transit electric locomotives

Qi Liu[1,2], Ning Li[3], Haichuan Tang[1], Xuemei Jia[3]*

[1]CRRC Academy, Beijing
[2]School of Software Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing
[3]CRRC Academy (Qingdao) Co., Ltd., Qingdao, Shandong

【**Abstract**】The transportation capacity pressure and the high technological content of rail transit equipment make safety control problems potentially disastrous. These challenges elevate demands for the development of intelligent technology in the field of rail transit operation and maintenance, allowing significant room for growth and development in the industry. This paper reviews the current status of intelligent operation and maintenance by discussing the intelligent operation and maintenance detection of locomotives and the electric locomotive technology state management platform in rail transit. Through an analysis of locomotive operating data acquisition, the architecture of the intelligent monitoring and maintenance system, key factors affecting fault diagnosis and remote operation and maintenance, and intelligent operation and maintenance systems, this paper summarizes the current state of intelligent operation and maintenance.

【**Keywords**】Rail transit; Intelligent operation and maintenance; Electric locomotive

1 简介

轨道交通正处于快速发展阶段，建设速度惊人。这一趋势为轨道交通维护创造了巨大的机遇[1]。然而，轨道交通的安全监控和维护尚未实现信息技术和人工智能的全面融合。这部分是由于轨道交通建设的推进、列车保有量的增加以及电力机车应用的增加，导致轨旁设施数量激增。因此，这些设施内设施系统所采用的技术高度复杂且规模庞大，增加了维护的难度。另一方面，轨道交通以其安全、独立的运输方式而闻名。然而，轨道交通对运力的需求巨大，加上技术密集型设备，一旦控制失效，将带来灾难性的后果。这些挑战使得轨道交通维护的智能化技术亟待发展，同时也为轨道交通管理和维护行业创造了巨大的增长机会。轨道交通由多个子系统组成：基础设施、车辆服务、车站服务以及其他相互关联的系统。电力机车维护在所有系统中占有至关重

*通讯作者：Qi Liu
注：本文于 2023 年发表在 Engineering Advances 期刊 3 卷 3 期，为其授权翻译版本。

要的地位[2]。

轨道交通运营线路规模呈现逐步扩大的趋势，但与此同时，由于网络结构不断扩展，运维压力也日益增大。随着轨道交通网络规模的不断扩大，设施规模也随之增长，设施设备系统面临巨大压力，对监控和维护发展提出了新的要求。此外，智能时代的到来带来了变革，以大容量、长距离为主的智能电力机车将成为主力运载工具，这对车辆智能运维系统提出了更高的要求。车辆智能运维系统通常分为三个部分：车辆互联系统、轨旁车辆综合监控系统和列车运行轨迹系统。综上所述，轨道交通是典型的设备设施资源密集型环境，涉及专业众多。遵循科学完善的智能化运维标准，是保证电力机车高效正常的工作状态，实现轨道交通安全、无缝、高效运营的关键[3]。

2 轨道交通电力机车现状及智能运维

电力机车是目前轨道交通的主要动力设备，凭借其性能稳定可靠，在发车频率高、运营班次密集、牵引需求旺盛的线路上得到了广泛的应用和发展。然而，由于设备技术要求高、抗灾能力有限、投资需求大，电力机车的监控运维面临着严峻的挑战。智能监控运维的最终目标是确保轨道交通设备安全稳定运行，并最大限度地节约成本。精准应用和按需维护是智能运维的核心和关键环节。目前，我国电力机车管理主要采用传统方式，耗费大量人力物力，效率低下，难以准确、科学地评估电力机车的运行状态和使用情况，也难以对电力机车入役和服役期间的质量和状态进行有效监控。随着电力机车监控技术和信息技术的不断发展，为弥补传统基于磨损理论的预防性维修体系的不足，电力机车维护和运行正朝着数字化、网络化、智能化方向发展，具体而言，基于实际损耗评估方法的按需维护体系已成为趋势。

2.1 电力机车智能检测

电力机车主要由三个部分组成：电气系统、机械系统和空气管路系统，包括电气设备、线路、行走装置、车体以及用于各种设备的供气系统。这些部件使电力机车具有高牵引力、低自重、高速度、高效率和环保等特点。电力机车的安全运行也依赖于电网和沿线运行的电力轨道提供的电力，从而为电气化铁路系统的建设、先进电力机车的研发以及设备运行维护提供高科技和资金支持。因此，对电力机车进行有效、精确和安全的监控，尤其是通过智能机器进行监控，对于确保电力机车可靠运行并获得定期维护支持至关重要。电力机车智能综合监控系统与预防性维护互联监控系统的建设性融合，有助于保持电力机车性能的稳定，并管理和分析电力机车关键部件的运行情况。该系统还能对潜在事故进行预警和分级预警，并保持车辆智能运行，确保车辆始终安全稳定运行[4]。

在电力机车智能监控系统建设中，电力机车智能监控运维研究旨在通过科学的监控体系对系统进行分析评估，实现智能化运维管理的目标。该监控系统包括：主线动态综合监控系统，直接安装于运营线路，满足运营动态监控需求，监控关键运行状态和数据，有效降低事故风险；进线综合监控系统，直接置于运营线路入口处，根据电力机车设备的具体运行状态进行系统全面的监控管理，确保进线全面监控，保障轨道交通安全运营；以及包含移动式轮轴超声波探伤仪、段内智能巡检机器人等设备的段内纵深监控系统。

在电力机车智能监控系统背景下，轨道交通技术已逐步由高速发展阶段迈向深度智能化新技术发展阶段。全自动化运维服务的兴起，也对提升智能监控维护能力提出了针对性的需求。此阶段需建立以下技术基础：大规模工业数据的智能采集、定位和监控；可视化控制和远程监控的物联网技术；解决数据共享问题的边缘计算和云计算技术；以及对交通信号、系统和设备运行过程中产生的大量数据进行采集、分析、追溯和故障诊断的人工智能和大数据技术。

2.2 电力机车技术状态管理平台

鉴于电力机车技术高度集成、结构复杂的特点，有效管理电力机车及其部件在产品设计、运行维护等全生命周期内的技术状态与信息至关重要[5]。构建技术状态与管理大数据分析平台，可以对电力机车全生命周期各阶段的技术状态信息进行关联分析，实现机车制造、维护、使用数据集成。通过对大数据进行深度分析，构建自主研发的、覆盖全价值链的综合信息管理系统，为企业运维大规模数据挖掘提供基础数据库。

电力机车技术状态管理平台的建设重点是构建

电力机车全生命周期（如图 1 所示）管理与追溯信息系统。该平台整合了产品设计、生产、运行、维护等环节的信息系统，并连接相关产品的数字信息平台，形成电力机车及其部件全生命周期的追溯体系，建立信息共享平台，实现电力机车及其部件全生命周期的质量跟踪与分析。在产品设计开发阶段，识别电力机车全生命周期的主要管理部件。通过积累产品信息，跟踪典型部件、电力机车及系统的生产数据，开展全生命周期信息的监督和数据分析，及时发现并解决设计、生产、监控、运行维护等各个环节中存在的问题。电力机车技术状态管理平台的建立，使设计部门能够发挥独特的技术资源优势，进一步提升智能运维服务质量[6]。

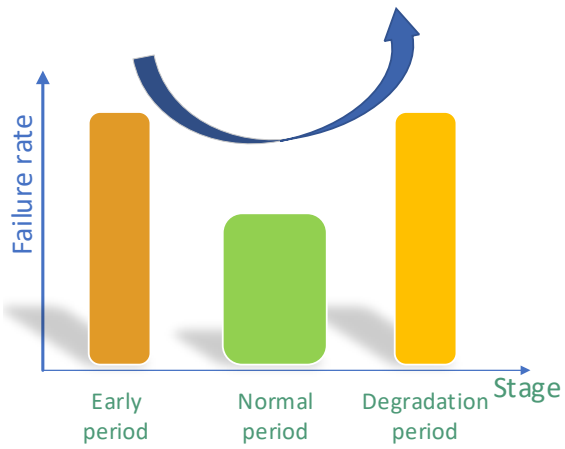

图 1　轨道交通电力机车全生命周期

2.3 电力机车监测、诊断与维护的智能化应用

电力机车数据复杂多面，需要专业知识，且与业务运营紧密相关，故障性质也多种多样。传统的监控和维护管理模式已无法满足现代技术对项目运营成本、产品制造周期和生产服务质量等需求。实施智能电力机车监控、诊断和维护应用，可以通过综合利用数据和精准管理产品检测，实时监控生产状况并实现高效的资源管理[7]。该自动化系统将构建在现有数据系统的基础上，利用数字化产品和大数据集成，突破信息壁垒，减少电力机车检测中特有的不稳定因素，实现检测系统的数字化、网络化和智能化，从而提高产品质量风险的事前预防和事中追溯能力，提升产品质量检测的可靠性和效率。

电力机车运行数据通过车载终端采集，并通过各种通信方式传输到地面。采集的数据包括电力机车运行信息、关键设备部件状态及事件信息，例如当前位置、速度、环境温度、转速、功率、电压、故障报警等数据。采集的数据会及时传输给相关人员，指导运行维护人员及时发现和处理故障，从而保障电力机车的安全运行。

电力机车监控诊断与维护智能化应用系统包含智能装备层、智能传感控制层、决策层、实施层等多个层面。该系统能够实现生产设备的实时监控和智能互联，实现统一的协同监控、调度和运行管理；能够提高数据采集和应用的时效性和准确性，实现信息的实时采集、监控和传输；能够及时实施生产指导策略和重大事件响应，提高响应速度，有效优化生产指导；能够感知各子系统之间的资源配置，为生产计划的有效实施提供必要的资源保障，并支持生产管理人员自主制定战略目标。

基于既定的工作流程，建立了电力机车故障诊断与远程运维的故障管理数据库。该数据库涵盖故障模型、重要部件故障产生过程及结果、系统属性异常、报警状态以及故障树与故障模型的关联关系。此外，利用知识图谱对异常模型进行分析，并基于正常和异常数据进行特征学习，研究相应的分类特征，明确故障与事件之间的关联。在此基础上，建立了故障机理模型，用于故障分析。

实现电力机车运行维护的智能化应用，需要考虑几个关键因素。首先，在数据采集过程中，必须在整个机车试验过程中收集关键部件的技术状态信息。然后，应利用大数据和数据挖掘技术对这些信息进行分析和研究，洞察关键部件的警示信号、风险、技术问题和状态[8]。其次，应利用企业服务总线技术集成企业网络系统中的各种制造资源，并在企业系统内交换信息流。此外，还必须建立一个能够基于大数据处理形成智能服务的企业资源协同管理云平台，以实现与不同区域或外部企业的有效网络化协同。还应整合各种软硬件资源，优化资源配置。这种方法有助于为铁路产品设计、开发、制造管理、运营维护和信息服务提供智能决策支持，实现网络化的资源协同管理。

3 轨道交通智能运维展望

轨道交通行业是设备设施投入大、监测维护投入大的行业，涉及专业领域多，设备设施数量多，规范化、智能化的运维管理是保障轨道交通设施安全、稳定、高效、经济运行的关键。然而，轨道交通运维

面临诸多挑战，例如运维部门信息化水平参差不齐，线路和系统管理不规范，运维管理系统缺乏统一标准，车辆与地面数据传输安全完整性措施不足，不同轨道交通专业部门各自建设运维管理系统，难以实现设备数据的互联互通等，这些问题阻碍了多学科关联分析的支持。

现代轨道交通的发展对电力机车运行的可靠性、稳定性、可维护性和安全性提出了更高的要求。智能化运维系统融合人工智能检测与控制、云计算、大数据分析等先进技术，能够高效分析海量运维信息，进行深度数据挖掘和人工智能计算，实现基础设施的全生命周期管控，实现运维自动化。未来电力机车智能运维系统将重点提升运行安全性、车辆稳定性、检测有效性和运维质量，在保障车辆安全高效运行的同时，减少人力投入和管理成本。在轨道交通智能运维快速发展的背景下，在各个阶段及早应用和实施智能运维，能够保障轨道交通智能运维技术的自主研发和制造。在轨道交通大系统下形成高效的系统架构，将有助于抓住新技术和管理新机遇，有效提升智能运维水平。

参考文献

[1] Lawrence, M., Bullock, R., & Liu, Z. (2019). China's high-speed rail development. World Bank Publications.

[2] Altıntaş, O., Aksoy, M., Ünal, E., Akgöl, O., & Karaaslan, M. (2019). Artificial neural network approach for locomotive maintenance by monitoring dielectric properties of engine lubricant. Measurement, 145, 678-686.

[3] Argyropoulou, K., Iliopoulou, C., & Kepaptsoglou, K. (2019). Model for corrective maintenance scheduling of rail transit networks: Application to athens metro. Journal of Infrastructure Systems, 25(1), 04018035.

[4] Kou, L. (2022). A review of research on detection and evaluation of the rail surface defects. Acta Polytech. Hung, 19, 167-186.

[5] Zheng, X., Yuan, J., & Qu, K. (2021). Research on Optimal Configuration of High Speed Railway Energy Storage System Considering Full Life Cycle. In The Proceedings of the 9th Frontier Academic Forum of Electrical Engineering: Volume I (pp. 569-579). Springer Singapore.

[6] Pastukhov, K., Istomin, S., & Yrasov, O. (2023). Development of On-Board Systems of Predictive Diagnostics of Electric Rolling Stock Traction Motor. In A. Guda (Ed.), Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles (pp. 147-156). Springer International Publishing.

[7] Kutovoj, Y., Kyrylenko, Y., Obruch, I., & Kunchenko, T. (2021). Application of Intelligent Control Systems in Electric Drives of Rail Vehicles. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), 709-713.

[8] Tretyakov, E., Solovyov, D., & Kudinov, M. (2023). The Improvement of On-Board Systems for Predictive Technical Diagnostics of Mainline Electric Freight Locomotives Based on Digital Models. In A. Guda (Ed.), Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles (pp. 193-202). Springer International Publishing.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

OPEN ACCESS