

面向智能化升级的内燃机车检修标准体系优化研究

李 涛

天津枢纽环线铁路有限公司机务分公司 天津 300450

摘要: 随着新一轮科技革命和产业变革加速推进,铁路运输系统正经历由传统运维模式向智能化、数字化方向的深刻转型。作为铁路牵引动力的重要组成部分,内燃机车在中西部地区、支线铁路及应急保障等场景仍具有不可替代的作用。然而,当前内燃机车检修体系,尤其是小辅修(即日常保养与辅助性维修)环节,普遍存在标准滞后、流程粗放、数据孤岛等问题,难以适应智能化升级的发展需求。本文聚焦于内燃机车小辅修标准体系的优化路径,通过分析现有标准体系存在的结构性缺陷,结合物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术的应用潜力,提出以“状态感知—智能诊断—精准决策—闭环反馈”为核心的新型小辅修标准框架。研究成果可为内燃机车智能化运维体系建设提供理论支撑与实践指导。

关键词: 内燃机车; 小辅修; 标准体系; 智能化升级; 状态修; 数字孪生; 预测性维护

引言

内燃机车自20世纪中期起便是我国铁路干线及支线运输核心牵引装备,即便电力机车和动车组快速发展,在特殊场景下其仍不可或缺。传统内燃机车检修体系依《铁路机车检修规程》分大、中、小、辅修四级,小辅修保障日常运行安全,但现行小辅修标准以“计划修”为主,依赖固定周期与人工经验,存在检修冗余、漏检误判、资源浪费等问题。与此同时,物联网、边缘计算等智能技术迅猛发展,为机车运维模式转变提供技术支撑,国家规划也要求构建基于状态监测的智能检修体系。在此背景下,优化现有小辅修标准体系适配智能化升级需求成为关键课题。本研究聚焦其智能化重构,理论层面可突破传统检修范式,丰富轨道交通智能运维理论体系;技术层面能推动前沿技术嵌入,提升标准技术含量与前瞻性;实践层面可降低检修成本、提高机车可用率,为铁路企业降本增效与安全运营提供可推广方案。

1 内燃机车小辅修标准体系现状与问题分析

1.1 现行标准体系概述

目前,我国内燃机车小辅修主要依据《铁路内燃机车检修规程》(TB/TXXXX系列)及各铁路局实施细则执行。其核心特征体现为周期固定、项目清单化、人工主导和纸质记录。检修内容以预设项目清单形式呈现,涵盖柴油机、空压机、制动系统、走行部等关键部件的检查与维护。整个过程高度依赖检修人员的经验判断,缺乏量化依据和客观标准。此外,检修数据多以纸质工单形式留存,难以实现跨部门共享、历史追溯与深度挖掘,制约了检修决策的科学性与系统性。

1.2 主要问题识别

通过对多个机务段的实地调研与数据分析发现,现行小辅修标准体系在智能化时代背景下暴露出一系列深层次问题。首先,标准制定年代较早,未能充分吸纳近二十年来传感器技术、远程监控系统 and 人工智能诊断等新兴技术成果,导致大量车载智能设备采集的实时数据无法有效纳入检修决策流程,形成“有数据无应用”的尴尬局面。其次,固定周期的“一刀切”检修模式忽视了机车个体差异与运行环境多样性。例如,同型号机车在高原低氧、高寒或重载条件下运行时,其关键部件如柴油机、增压器的磨损速率显著高于平原轻载工况,但现行标准却未对此进行差异化处理,造成部分机车“过度修”而浪费资源,另一些则因“欠修”而埋下安全隐患^[1]。第三,数据孤岛现象严重。车载监测系统(如LKJ、6A系统)、地面检测设备、人工巡检记录等数据分散在不同信息系统中,格式不一、接口封闭,缺乏统一的数据标准与共享机制,难以支撑对机车健康状态的综合评估与精准预测。第四,标准修订机制僵化。一旦发布,标准往往需5至10年才进行一次系统性修订,无法根据新出现的故障模式、新材料应用或一线运维经验进行快速迭代更新,导致标准与实际脱节。最后,检修质量评价主观性强。当前质检多依赖目视检查或简单功能测试,缺乏基于性能退化曲线、剩余使用寿命等量化指标的客观评价体系,难以真实反映检修效果。

2 智能化升级对小辅修标准体系的新要求

面向智能化升级,小辅修标准体系必须实现从静态规范向动态智能的根本性转变。这一转变并非简单地增加技术条款,而是对标准理念、结构与内容的系统性重塑。首先,标准应具备鲜明的数据驱动性,明确多源异

构数据（包括振动、温度、油液成分、电流波形、视频图像等）的采集频率、精度要求、数据格式及融合规则，为后续的状态评估与决策提供高质量输入。其次，标准需转向状态导向性，将检修触发条件从传统的“时间/里程”阈值转变为基于机车健康状态的动态阈值，例如当关键部件的剩余使用寿命低于安全裕度或故障概率超过预设风险水平时，才启动相应检修任务。第三，标准应强化流程协同性，覆盖从车载实时监测、地面智能分析、检修任务生成到现场执行与效果验证的全链条，实现车地信息无缝对接、人机高效协同。第四，标准架构必须具备良好的可扩展性，采用模块化设计理念，便于未来灵活接入新型传感器、先进算法或创新检修工艺，避免因技术迭代而导致标准整体失效。最后，标准体系应建立闭环反馈机制，将每次检修的实际效果、故障复现情况、部件更换记录等反馈数据用于模型优化与标准修订，形成“执行—评估—修正”的持续改进循环，确保标准始终与技术发展和运维实践同步演进。

3 面向智能化的小辅修标准体系优化框架

基于上述分析，本文提出“四层一体”的优化框架，旨在构建一个技术先进、结构清晰、可落地实施的智能化小辅修标准体系。

3.1 感知执行层：构建全域感知网络

感知执行层是整个标准体系的物理基础，其核心任务是实现对内燃机车关键部件运行状态的全面、实时、精准感知。为此，应在柴油机缸体、增压器轴承、牵引电机端盖、齿轮箱壳体等高风险部位部署高精度、高可靠性的微型传感器，如MEMS加速度计用于振动监测、红外热像仪用于温度场分布捕捉、在线油液光谱仪用于磨损颗粒分析。同时，依托5G通信与北斗定位技术，构建低延时、高带宽的车地数据传输通道，确保海量监测数据能够实时回传至地面分析平台^[2]。在现场作业环节，推广增强现实（AR）辅助检修终端，将标准作业步骤以三维可视化方式叠加于实际设备之上，引导检修人员按规范操作，并通过内置摄像头与AI算法自动校验操作合规性，大幅降低人为失误风险。

3.2 数据融合层：建立统一数据标准

数据融合层承担着将原始感知数据转化为可用知识的关键职能。该层首要任务是制定《内燃机车小辅修数据采集与接口规范》，对各类数据的命名规则、物理单位、采样频率、时间戳格式等进行统一定义，打破不同系统间的数据壁垒。在此基础上，构建覆盖全生命周期的机车健康知识图谱，将历史故障案例库、维修工单记录、部件物料清单（BOM）、技术手册等非结构化与半结构

化信息进行语义关联，形成支持智能推理的知识底座。考虑到数据安全与隐私保护需求，可引入联邦学习技术，在不交换原始数据的前提下，实现跨机务段、跨路局的模型协同训练，提升故障预测模型的泛化能力与鲁棒性。

3.3 智能决策层：开发状态修核心算法

智能决策层是标准体系的“大脑”，负责将融合后的数据转化为具体的检修策略。该层的核心是开发一系列面向关键系统的状态评估与故障预测算法。例如，针对柴油机这一核心动力源，可构建基于LSTM-GAN混合模型的缸压异常预测模块，利用长短期记忆网络捕捉时序依赖性，结合生成对抗网络增强小样本故障数据的表征能力；对于走行部这类多部件耦合系统，则可采用图神经网络（GNN）建模各轴承、齿轮间的振动传递关系，识别早期微弱损伤信号。在此基础上，设计多目标优化模型，综合考虑检修成本、机车停时、安全风险等多个维度，自动生成最优检修方案，并动态调整任务优先级与资源配置。

3.4 标准输出层：重构标准文档体系

标准输出层是智能化成果最终落地的载体。传统以静态项目清单为主的检修规程，应升级为动态、个性化的“任务包”生成机制。系统根据每台机车的实时健康评分与预测结果，自动推送差异化的检修项，实现“一车一策”^[3]。同时，引入“数字工单”概念，将检修任务、标准步骤、所需工具、验收标准等信息集成于电子工单中，并通过二维码或RFID标签与具体部件绑定，实现检修过程全程可追溯、可审计。在质量评价方面，摒弃主观判断，建立以“关键部件性能恢复率”“重复故障间隔时间（MTBR）”“预测准确率”等为核心的量化指标体系，使检修效果评估更加客观、科学。

4 关键技术实现：基于多源数据融合的故障预测模型

为支撑标准体系优化，本文重点研发了面向柴油机系统的故障预测模型。该模型以多源异构数据为基础，通过精细化特征工程与先进机器学习算法，实现对潜在故障的早期预警。

4.1 数据来源与预处理

模型的数据来源广泛，包括车载6A系统中的柴油机监控子系统、独立部署的油液在线监测仪、红外热成像设备以及检修人员通过移动APP录入的巡检文本记录。在数据预处理阶段，首先对原始信号进行去噪、对齐与缺失值填补；随后，通过领域专家知识与信号处理技术，提取包括缸压波动率、排气温度梯度、润滑油中铁谱浓度、曲轴转速谐波分量等在内的42维高维特征。故障标签的构建以业务目标为导向，定义为“在未来30天内是

否发生功率下降超过10%或启动失败”等严重影响运行安全的事件，确保模型输出具有明确的工程指导意义。

4.2 模型架构

为充分利用不同类型数据的优势，模型采用Stacking集成学习框架。基学习器分别针对不同数据模态进行优化：XGBoost用于处理结构化的数值特征，1D卷积神经网络（1D-CNN）擅长捕捉振动信号中的局部时序模式，而Transformer则有效解析巡检文本中的语义信息。这些基模型的输出被作为新特征输入至一个轻量级的多层感知机（MLP）元学习器中，最终输出机车在未来窗口期内发生故障的概率。当该概率连续两个监测周期超过0.7的阈值时，系统将自动触发“重点检查”指令，并将其纳入下一次小辅修的任务包中，实现从预测到执行的无缝衔接。

5 标准体系优化的保障机制

为确保优化后的标准体系能够稳定、长效运行，必须建立全方位的保障机制。在组织层面，应成立由机务、电务、科研院校及设备厂商共同参与的“智能检修标准工作组”，统筹协调标准制定、技术验证与推广应用^[4]。在制度层面，需将智能检修的核心要求纳入《铁路机车运用管理规则》等上位规章的修订内容，明确数据权属、责任边界、考核指标与激励机制，为标准落地提供制度支撑。在技术层面，应加快建设铁路专用的工业互联网平台，提供统一的算力调度、算法仓库、安全防护与数据治理能力，夯实智能化基础设施。在人才层面，亟需开展“智能检修工程师”认证培训体系，培养一批既精通机车构造与原理，又掌握数据分析与AI应用的复合型人才，为标准体系的持续演进提供智力保障。

6 结语

本文针对内燃机车小辅修标准体系在智能化转型中的不适应性，提出了以数据驱动、状态导向为核心的优化框架。研究表明，传统“计划修”模式已难以满足高质量运维需求，向“状态修+预测修”转型是必然趋势；构建“感知—融合—决策—执行”闭环的标准体系，是实现智能化检修的关键路径；多源数据融合与AI模型的嵌入，可显著提升故障预警能力与检修决策科学性；而标准优化的成功落地，离不开组织、制度、技术、人才等多维保障机制的协同支撑。展望未来，内燃机车虽非铁路牵引动力的主流发展方向，但其智能化检修的探索经验具有重要的迁移价值。后续研究可进一步拓展至基于数字孪生的全生命周期检修仿真，实现虚拟空间对物理检修过程的精准映射与优化；亦可探索跨车型（内燃/电力/混合动力）的通用检修标准框架，提升标准体系的普适性与兼容性；此外，区块链技术在检修数据可信存证、责任追溯等方面的应用潜力也值得深入挖掘。通过持续创新与实践，内燃机车的智能化检修不仅能够延长其服役价值，更能为中国铁路迈向“智慧运维”新时代提供坚实支撑。

参考文献

- [1]袁崇仁.创新内燃机车检修模式探索与实践[J].工程技术研究,2020,5(01):255-256.
- [2]王世伟.内燃机车检修模式改革应对措施及探讨[J].内燃机与配件,2019,(02):118-119.
- [3]荣沛,靖玉利,郭宣召.基于安全可靠性的内燃机车预防检修典型故障案例分析[J].冶金设备管理与维修,2025,43(03):14-18+21.
- [4]程亮.创新内燃机车检修模式的探索与实践[J].神华科技,2019,17(05):79-82.