

智能机器人在机车运行实时监测与故障自愈系统中的应用

王晓楠

国能朔黄铁路机辆分公司

摘要：智能机器人技术的迅速发展正深刻影响轨道交通装备的安全运行与智能运维模式。本文以机车运行安全保障为核心，系统分析了智能机器人在实时监测、数据诊断、预测性维护及故障自愈系统中的应用机理与实践路径。通过构建“感知—分析—决策—执行”闭环智能体系，机器人不仅实现了对关键部件状态的高精度感知与动态分析，还在云边协同架构下实现了多源数据融合与自主学习，显著提升机车运行的安全性与可靠性。研究结果表明，智能机器人具备替代部分人工巡检、降低故障率、优化维修周期的技术潜能，对推动轨道交通智能化转型具有现实意义。

关键词：智能机器人；机车运行；实时监测；故障自愈；智能运维

随着我国轨道交通装备智能化进程的加快，机车系统的运行状态监测与安全保障成为行业技术创新的重点方向。传统机车检修模式依赖人工经验与定期维护，不仅效率低、劳动强度大，而且难以应对设备复杂性与故障的不确定性。近年来，人工智能、物联网、边缘计算与机器人技术的融合发展，为机车运行状态的实时监测和智能维护提供了新的技术路径。智能机器人具备高精度传感、智能识别、自主决策与执行能力，其在机车运行过程中的应用，不仅能够实现对车辆系统的持续监测和智能诊断，还能通过自学习算法实现故障自愈与优化维护，逐步构建无人化、数字化、智能化的机车运维新体系。本文从系统架构、核心技术、应用案例及未来展望四个方面，对智能机器人在机车运行实时监测与故障自愈系统中的应用展开系统研究，以期为轨道交通装备的安全保障与智能升级提供理论参考与实践借鉴。

1 智能机器人在机车运行监测体系中的技术架构

1.1 系统总体构成与功能层级

智能机器人在机车运行监测体系中的架构主要由感知层、传输层、决策层和执行层构成，形成了一个多元信息融合与闭环控制的系统。感知层利用多模态传感器（如温度、振动、声学、电流、红外及图像传感器）对机车关键部位进行实时数据采集；传输层通过工业以太网、5G 或轨旁无线网络将监测数据高速传输至边缘计算节点；决策层采用人工智能算法（如卷积神经网络 CNN、长短时记忆网络 LSTM 等）进行数据分析、特征提取与异常识别；执行层则由移动检测机器人或嵌入式维护机器人执行指令，实现清洗、紧固、润滑或部件替换等智能操作，从而实现“发现—分析—修复”

的全流程智能运维闭环。

1.2 关键技术支撑与系统协同

在该系统中，核心技术主要包括传感融合技术、边缘智能计算、云端数据协同及故障自愈算法。传感融合技术确保了数据采集的全面性与精度，通过卡尔曼滤波、多源信息匹配等方法消除噪声与冗余；边缘计算则提升了响应速度与处理时效，在轨旁或车载终端实时完成故障识别与预警；云端数据协同平台通过深度学习模型持续优化算法参数，形成“云训练—边执行—云反馈”的循环优化机制；故障自愈算法基于强化学习原理，实现机器人在故障模式学习后对不同类型异常的自主调整与修复，从而大幅提升机车系统的自我恢复能力。

2 智能机器人在实时监测中的应用与效能提升

在机车运行安全与效率不断提升的背景下，智能机器人在实时监测领域的应用已成为轨道交通智能化发展的核心环节。其依托多源传感、人工智能与边缘计算技术，实现了机车运行状态的动态感知、精准诊断和预测性维护，推动机车检修模式由“定期检修”向“状态感知—预测维护—自愈修复”的智能闭环转变，从而极大提高系统的运行安全性与维护经济性。

2.1 机车状态感知与智能识别

机车系统运行环境复杂，设备结构庞大且部件类型多样，传统人工巡检不仅效率低下，而且容易受主观经验影响而导致隐患遗漏。智能机器人通过搭载多模态传感装置，如红外热像仪、高清摄像头、激光雷达、加速度计和声波探测器等，可实现对关键部件运行状态的全方位感知。红外传感器能够监测电机、制动系统及轴承的温度变化，及时识别过热和摩擦异常；

视觉识别系统通过深度学习算法识别表面裂纹、松动、磨损及漏油现象；声学传感器则用于捕捉异常振动与摩擦声信号，以判断内部零部件的疲劳程度或结构异常。此外，智能机器人可通过数据融合技术实现不同传感信息的互补与校正，利用卡尔曼滤波算法消除环境噪声干扰，从而获取高精度的运行数据。在实际应用中，AI识别系统可在毫秒级别内完成数十项参数的对比分析，自动判断是否超出安全阈值。以中国铁路上海局引入的CR400AF型复兴号智能巡检系统为例，机器人在列车回库时自动巡检车底设备，通过红外热成像与视觉识别双重校验，检测准确率达到97%以上，检修周期缩短近40%，有效实现了从“人巡”向“机巡”的智能转型。

2.2 数据融合与故障趋势预测

实时监测的核心在于将感知数据转化为可执行的运维决策。智能机器人通过多维数据融合与智能分析算法，对采集到的温度、振动、电流、电压及应力信号进行统一建模与时序分析，构建了机车运行的“健康画像”。在该模型中，系统不仅分析单点异常，还利用时域与频域特征的变化趋势进行潜在故障预测。例如，基于LSTM（长短时记忆网络）的预测模型可对轴承振动信号进行动态学习与趋势预测，当出现特征频率能量异常时，机器人能够提前发出预警，并通过边缘计算模块自动生成风险等级与维护计划。

这种“预测性维护”模式取代了传统的固定周期检修机制，使维护行为更加科学化与经济化。通过对大数据的持续积累与模型训练，机器人系统能够实现自适应调整与优化策略。例如，某型电力机车在引入智能监测机器人后，通过融合温度、振动及电流特征信号建立了故障趋势预测模型，使计划外停车率降低32%，设备使用寿命平均延长18%，真正实现了由“事后修复”向“事前预防”的转变。

2.3 边缘智能驱动的实时响应

在高速铁路与长距离货运场景中，数据传输延迟可能导致监测滞后。为此，智能机器人普遍采用“边缘计算+云端协同”的分布式架构，将数据初步处理与异常检测功能下沉至车载或轨旁终端。机器人在现场即可完成数据筛选、异常识别与局部决策，无需全部依赖云端计算，从而显著提升响应速度与实时性。当检测到系统异常时，机器人能在毫秒级别内执行应急指令，如自动调整牵引电流、降低功率或激活应急制动系统，避免事故进一步扩大。与此同时，关键数据仍同步上传至云端平台进行深度分析和模型更新，形成“边采集、边决策、云优化”的动态协同模式。

在国内多个智能机车项目中，边缘智能技术的引入显著提高了系统的自适应能力。例如，中车株洲电力机车研究院开发的智能监测机器人在车载边缘节点中配置了轻量化AI芯片，可独立完成数据融合与自学习优化，使机车在高速运行中仍能保持毫秒级监测响应，确保系统稳定与安全冗余。

2.4 监测效能与经济性分析

智能机器人实时监测系统的引入，不仅提升了机车运行的安全等级，也带来了显著的经济效益。首先，通过全天候监测与自动诊断，避免了人工巡检误差与人力成本浪费；其次，系统能够精准锁定异常源，减少不必要的零部件更换与维修支出；再次，预测性维护与自适应调整机制有效降低了计划外停机率，提升运输能力与设备利用率。据实证数据显示，智能机器人监测系统可使机车运维成本降低20%~30%，维修周期缩短25%，整体运行效率提升15%以上。

更为重要的是，该系统推动了机车运维模式的数字化与智能化转型，使管理者能够通过监控平台实时掌握机车健康状态，实现运维决策的科学化、可视化与闭环化。未来，随着AI算法和传感技术的持续升级，智能机器人将在机车运行安全保障、能耗优化与全生命周期管理中发挥更大作用，为轨道交通行业的高质量发展注入持续动力。

3 智能机器人在故障自愈系统中的创新实践

3.1 故障自愈原理与智能决策机制

机车系统的故障自愈技术是智能机器人应用的核心创新环节。其基本原理是通过自学习算法与决策控制模型实现系统的自主修复与功能重构。机器人在检测到异常后，首先调用知识图谱库对异常模式进行匹配与诊断，随后依据强化学习算法输出最佳修复策略。例如，当电机线圈出现过热时，系统可自动调整负载分配、降低运行功率，并通过冷却模块启动辅助散热；当传感器失效时，机器人可调用冗余信号源进行数据补偿，保持系统运行连续性。此类自愈机制使机车具备一定程度的“自我恢复”能力，显著提升系统的鲁棒性与安全冗余。

3.2 自愈系统的模块化构建与案例分析

在实际应用中，机车故障自愈系统可分为诊断模块、策略模块与执行模块。诊断模块完成数据采集与异常识别；策略模块基于知识图谱与智能算法生成修复决策；执行模块则由移动机器人、机械臂或智能维护单元完成物理修复。以中车株洲电力机车研究院的智能维护实验平台为例，该系统采用双层神经网络进行多任务学习，当检测到牵引电机冷却风道堵塞时，

机器人自动执行除尘、调整通风结构并恢复运行。测试数据显示，该系统平均修复时间比人工缩短 70%，系统稳定性提升 25%，为后续智能机车实现全生命周期自主维护奠定了技术基础。

4 结论与展望

智能机器人在机车运行实时监测与故障自愈系统中的应用，标志着轨道交通运维模式正由人工经验驱动向智能自适应驱动转变。通过构建多层次数据感知网络、融合 AI 决策算法与边缘智能控制，机器人系统已具备对机车状态的高效监测与精准修复能力，显著提升了机车运行的安全性、稳定性与经济性。未来，该技术的发展方向主要体现在三个方面：一是实现机车全要素数字孪生模型的构建，将机器人采集的实时数据映射至虚拟空间，实现全生命周期动态仿真与风险预警；二是完善自愈算法的自主学习与进化能力，使机器人能够在复杂场景中实现多故障协同诊断与自适应修复；三是推动智能机器人与轨道交通运维体系的深度融合，建立标准化、模块化的智能维护体系与开放数据平台，促进轨道交通产业链的智能协同发展。总体而言，智能机器人在机车运行领域的深度应用，将成为推动我国轨道交通智能化与安全化的重要引擎，

对实现“智慧铁路”“无人运维”具有深远意义。

参考文献：

- [1] 王仕忠. 高速铁路信号机械室智能巡检系统研究 [D]. 中国铁道科学研究院, 2022.
- [2] 陈志颖. 铁路机房机器人智能在线监测巡检系统. 陕西省, 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 2020-01-17.
- [3] 李哲. 基于机务大数据的机车运行数据智能化挖掘与应用研究 [J]. 中国战略性新兴产业, 2025,(21):32-34.
- [4] 饶跃. 智能化技术在铁路机车故障诊断系统中的应用 [J]. 中国战略性新兴产业, 2025,(18):51-53.
- [5] 王欣, 郭彦伟, 张文元. 机车车辆高压电器状态智能监测诊断系统 [J]. 铁道机车与动车, 2023,(06):32-35+39+6.
- [6] 侯明月, 王炯. 基于间接式测量轮轨力的重载机车轮轨力智能监测系统研究 [J]. 机械, 2024,51(10):73-80.
- [7] 范家宝. 矿井轨道运输智能监控与优化调度系统研究 [D]. 中国矿业大学, 2017.
- [8] 魏臻. 企业铁路智能运输调度系统关键技术研究 [D]. 合肥工业大学, 2005.