

人工智能在高速公路机电系统维护维修中的应用

李逮奚

(四川营达高速公路有限公司, 四川 达州 635000)

摘要 在高速公路机电系统的维护维修工作正加速向智能化方向发展的背景下, 本文以人工智能技术赋能运维为主线, 围绕预测性维护与维修决策两大核心环节展开研究。在预测性维护层面, 重点阐述设备运行状态智能监测、故障趋势预测等核心应用场景。在维修决策层面, 深入分析维修方案智能生成与运维资源智能调度的实现路径。工程实践表明, 人工智能技术的应用可进一步增强系统运行可靠性, 提升维修资源配置精准度, 为高速公路机电系统的高质量运维提供有力支撑。

关键词 人工智能; 高速公路机电系统; 维护维修

中图分类号: U418.7; TP18

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.011

0 引言

根据《中国高速公路智能化行业发展趋势与投资规划建议报告 2024-2030 年》, 全国高速公路通车里程已达 19.3 万千米, 稳居全球第一, 机电系统设备保有量持续攀升, 全国超 4 000 千米公路已完成智能化改造, 改造覆盖率稳步提升。在此背景下, 行业可进一步融合人工智能技术, 对振动、温度等多源运行数据开展关联分析, 实现机电设备健康状态的实时动态评估。

1 高速公路机电系统维护维修概述

高速公路机电系统维护维修涵盖沿线及隧道内监控等机电设施的定期检测、故障诊断、预防性养护以及应急抢修, 是最大程度保障设备正常运行的系统性工程。该系统主要有监控系统、通信系统等六大板块:

(1) 监控系统, 负责交通流信息采集, 实现路网运行状态实时感知; (2) 通信系统, 为各子系统提供数据传输通道, 保障信息交互畅通; (3) 收费系统, 承担通行费征收与数据清算, 维持运营秩序; (4) 供配电系统, 为全线设备提供电力保障, 保证不间断运行; (5) 照明系统, 满足主线及隧道内的行车视觉需求; (6) 隧道机电系统则集成通风、消防及紧急呼叫功能, 应对特殊工况下的安全需求。根据交通运输部发布《数字交通“十四五”发展规划》, 将智慧高速与基础设施数字化列为重点发展方向, 为高速公路机电系统运维模式的智能化转型划定清晰蓝图。

2 人工智能在机电系统预测性维护中的应用

2.1 预测性维护的核心目标

预测性维护的核心目标是持续监测设备运行状态, 提前识别潜在故障并优化维护计划, 实现运维资源合理调配以及提升设备的可靠性。人工智能技术在其中发挥关键作用, 利用深度学习、机器学习及多源数据融合方法, 能够对振动、温度等监测信号进行高维特征提取, 量化设备退化趋势并揭示隐性故障规律。预测性维护旨在将传统基于时间或使用周期的被动维护模式转化为主动决策模式, 让运维策略能够依据设备实际状态动态调整。核心目标还有降低计划外停机风险、延长设备剩余使用寿命及提高系统冗余, 并借助数据驱动模型提供可解释性决策支持。人工智能赋能下的预测性维护不但聚焦故障预测, 还强调多维性能指标的同步监控、运行模式自适应分析以及异常事件的提前预警。

2.2 人工智能在高速公路机电系统维护中的技术基础

1. 设备运行状态智能监测。设备运行状态的智能监测依托合理的传感器布设, 精准采集振动幅值、温度梯度等关键参数, 从而保证运维数据能够真实反映高速公路现场工况, 并提高后续人工智能预测分析的准确性, 同时提前识别设备异常征兆, 为精准维护提供决策依据。监测盲区减少之后, 状态评估就有了可

作者简介: 李逮奚 (1995-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 高速公路机电管理。

靠的数据基础,高速公路运维决策得以从被动应对转向主动干预,维护策略由定期检修向预测性维护转变。同时,人工智能监测体系带来的价值不止于此,还能降低人工巡检频次并提升数据采集的连续性,进而提高高速公路全线设备的感知覆盖密度,为维护资源配置优化提供数据支撑^[1]。在技术部署过程中,需要遴选监测点,合理布置振动传感器在轴承座径向与轴向位置、温度传感器在绕组端部及散热通道间距、电流互感器在进线柜的接线相序,并依照通信协议完成测点配置,保证数据采集的规范性。系统上电后,边缘单元按设定频率同步采集信号,振动采样率不低于2560 Hz,温流采样间隔1秒。数据经放大、滤波及A/D转换后上传边缘节点。特征提取阶段,振动信号经傅里叶变换得频谱、包络谱提取调制边带,温度数据按窗口计算均值判别温升,电流数据经小波去噪提取基波。

2. 机电设备故障趋势预测。机电设备故障趋势预测环节利用有效的特征提取,量化推演高速公路机电设备健康度衰减速率。基于推演结果,人工智能系统在故障发生前能够准确判定维护介入的最佳时间窗口,从而将高速公路维护响应的触发节点置于主动干预阶段。这一时序前移有效压缩设备从异常萌生到功能丧失之间的处置真空期,进而显著降低突发性停机的实际发生概率。趋势研判前置后,高速公路维修计划编排便有了量化依据,养护资源得以从事后调度转向事前部署。同时,人工智能预测能力还能延长关键部件在役周期,并压缩非计划停机时长。在技术实现层面,需先完成历史数据清洗,逐一校核振动烈度等特征参量的时序完整性,按设备类型与故障模式建立标准化退化样本库。特征工程从时域频域与时频域三个维度展开。时域提取均方根值峰值因子以及峭度指标,频域计算边带能量比和谐波畸变率,时频域通过小波包分解获取各频带能量熵。人工智能模型构建会针对不同退化特性选择差异化架构^[2]。针对轴承类部件采用卷积神经网络提取频谱特征并通过长短时记忆网络捕捉时序依赖,经双支路融合后输出退化曲线。针对电子类器件采用门控循环单元网络对缓变参数建模,以此预测失效时间节点,为维护决策提供量化支撑。

3. 机电系统整体运行健康度动态评估。机电系统整体运行健康度动态评估,为高速公路维护管理掌控系统级运行态势提供依据,并为维护资源的宏观科学配置奠定基础。健全的指标体系与合理的人工智能评估模型能够量化监控、通信、收费、供配电及隧道机电各子系统间的相互影响。整体健康度量化后,全线设备维护优先级便有了统一标尺,维护计划从分散处

置转向统筹编排,同时支撑高速公路路网级维护策略滚动优化。在人工智能评估模型构建层面,指标赋权采用层次分析法与熵权法结合的组合赋权策略,前者依据专家经验确定相对重要性标度,后者基于数据离散程度修正客观权重,二者融合得综合权重。进入系统级聚合阶段,采用加权求和模型自底向上逐层计算,由单指标健康分值与权重得单设备健康度,再聚合得子系统健康指数,最终综合各子系统指数与关联系数生成高速公路全线整体健康度评分。子系统关联系数反映故障跨系统传导强度——监控与通信系统关联系数取0.8以上,照明系统则低于0.2。评估结果按评分区间划分健康、关注、预警三级,以绿黄橙三色标识推送高速公路维护管理中心,提供宏观态势到微观指标的穿透式决策支持。

3 人工智能在维修决策中的应用

3.1 维修决策的智能化转型需求

维修决策的智能化转型,意味着高速公路机电系统运维从“发现故障再安排”向“预判需求早调度”演进,决策依据由经验主导向数据驱动转变,设备获得恰逢其时的维修介入,同步提升可用率与高速公路路网通行保障能力^[3]。人工智能的引入让故障诊断结论直接关联维修策略生成,备件需求自动推算,多工种协同维修效率持续改善。设备健康度评估结果是启动维修决策的首要输入,健康指数降至关注阈值时人工智能系统自动生成预维修工单,维修类型按劣化紧迫程度划分为计划性保养、预见性更换及应急抢修三级。以高速公路通信系统交换机为例,光模块接收功率较出厂值衰减超3 dBm时纳入计划保养,衰减达6 dBm时建议预见更换。从时机优化视角审视,维修决策介入应在功能尚处正常区间、性能指标已显退化迹象时择机执行。高速公路收费车道栏杆机电机启动电流较基线上升20%即为最佳维修窗口,既可规避突发停摆,又能将通行影响降至最低。维修方案生成综合故障类型、备件库存、维修窗口及人员技能四维约束,人工智能知识图谱将历史案例与设备手册关联匹配最优维修处置方案。涉及高速公路行车安全的维修任务需同步编制交通组织方案并报调度中心审批。

3.2 人工智能在高速公路机电系统维修中的技术基础

1. 故障类型智能诊断。故障类型智能诊断环节,决定了高速公路维修决策能否精准锁定故障根因,以及后续维修方案生成与资源调度的准确程度。特征辨识清晰加上人工智能推理链路完整,就能区分机械磨损、电气老化等不同故障类型,因此可以控制误判率。

故障类型明确之后,高速公路维修策略的匹配便有了可靠依据,处置方向得以从模糊排查转向精准定位。同时,人工智能诊断还能缩短高速公路机电设备故障平均维修时长,并降低对高技能人才的维修经验依赖。在技术实现层面,故障特征库的构建需先完成故障类型的映射标注,将振动信号异常等征兆与对应故障类型建立映射关系。特征库按高速公路设备类别分层组织,监控设备涵盖视频丢失、图像卡顿等典型故障模式,通信设备主要有光功率衰减等常见问题,收费设备纳入栏杆不抬杆等高频故障类型。人工智能诊断推理采用贝叶斯网络构建故障树与症状的因果关联模型,网络节点表示故障原因,有向边表示因果传导概率。进入诊断执行阶段,人工智能系统接收前端监测模块输出的异常特征参量,沿贝叶斯网络自底向上逐层推理,计算各候选故障类型的后验概率并排序输出。以高速公路收费车道栏杆机不抬杆为例,可能原因涉及电机卡滞、控制器死机、地感线圈失效三类,其先验概率分别基于历史维修统计数据设定,条件概率则反映各故障类型触发特定征兆的似然程度。诊断结论同步推送至高速公路维修策略生成模块。

2. 维修方案智能生成。维修方案智能生成环节,决定了诊断结论能否转化为可执行的现场作业指导,以及高速公路机电设备维修质量与效率的最终水准。方案要素齐备加上人工智能工艺匹配精准,就能明确维修步骤等,作业盲区随之受控。方案标准化之后,高速公路不同班组执行同一任务的作业一致性便有了可靠保障,维修质量会从依赖个人经验转向依托规范流程。同时,人工智能智能生成能力带来的价值不止于此,还能压缩方案编制时长并优化备件领用精准度,进而缩短高速公路机电设备离线时间^[4]。具体而言,维修知识库的结构化构建,将设备技术手册、历史维修工单记录及检修规程中的文本信息抽取为故障类型、维修工序、备件清单、工具列表及注意事项五类实体,并建立实体间的关联关系。知识库按高速公路设备类型分层存储,每类设备对应一套标准化维修工序模板。进入方案生成阶段,人工智能系统接收故障诊断模块输出的故障类型与置信度,在知识库中检索匹配度最高的维修工序模板,经规则引擎校验后生成初步方案。这里需要指出,维修工序模板的匹配精度并非仅由关键词重合度决定,而是受故障描述的语义完整性与知识库覆盖度共同影响。以高速公路通信系统交换机光模块更换为例,若仅匹配“光功率异常”这一表层现象,维修方案可能遗漏光纤端面清洁这一前置步骤,而引入诊断置信度与故障根因的关联约束后,工序完整性可由 75% 提升

至 95% 以上。因此,将人工智能语义匹配与逻辑约束相结合,可视为维修方案精度与生成效率的优化平衡点。

3. 运维资源智能调度。人工智能调度算法合理加上约束建模完整,就能统筹高速公路维修工单优先级、班组技能匹配等多元要素,维修资源闲置随之受控^[5]。调度指令下达后,各要素协同效率便有了可靠保障,高速公路运维响应从被动应对转向主动统筹。同时,人工智能智能调度还能压缩维修车辆空驶里程,降低单次维修综合成本。高速公路运维人员先完成资源台账数字化纳管,将维修班组技能标签、维修车辆实时定位、备件库存余量及工具分布统一接入人工智能调度平台。调度建模采用多目标优化框架,目标函数兼顾维修响应时效与调度成本,约束覆盖资质匹配。人工智能系统接收维修资源需求清单后,采用改进遗传算法搜索近似最优派工序列。这里需要指出,维修派工序列优化效果并非仅由算法收敛速度决定,而是受编码方式影响。以高速公路跨路段维修调度为例,若仅以距离最近为准则,高技能维修班组可能被低难度任务占用;引入技能匹配度加权后,紧急维修工单响应时长可由 45 分钟压缩至 28 分钟以内。因此,将时效性与维修资源稀缺度统一纳入目标函数,可视为人工智能调度效率与维修资源效益的优化平衡点。调度结果推送至高速公路维修班组终端,维修执行进度实时回传形成闭环。

4 结束语

人工智能技术为高速公路机电系统维护维修提供了智能决策的全新技术路径,助力运维管理向数据驱动方向持续演进。未来,将进一步研发自适应决策模型,提高系统在复杂工况下的泛化能力,同时开展不同路网规模与设备类型的适配研究,推动智能决策技术在高速公路行业的规模化落地,为交通基础设施数字化运维提供技术参考。

参考文献:

- [1] 陈志勇. 人工智能技术在高速公路机电系统维护维修中的应用研究[J]. 智能制造研究与应用, 2025, 01(01): 25-27.
- [2] 钱国森. 高速公路机电系统智能化升级的关键技术研究[J]. 汽车周刊, 2025(08): 219-221.
- [3] 蒋锦泉. 高速公路机电系统智能化升级研究[J]. 通讯世界, 2025, 32(04): 109-111.
- [4] 沈子腾. 智能箱在高速公路机电系统智慧运维中的应用[J]. 中国交通信息化, 2024(09): 141-143.
- [5] 郑星. 人工智能在高速公路机电系统维护维修中的应用[J]. 运输经理世界, 2024(16): 150-152.