

机电设备预防性维护在高速公路运营中的实践与改进

王彩华 朱成成

河南交通投资集团有限公司洛阳分公司 河南 洛阳 471000

摘要：随着我国高速公路网络的持续扩展和智能化水平的不断提升，支撑其高效、安全运行的机电系统日益复杂。机电设备作为高速公路“神经中枢”和“感知末梢”，其可靠性直接关系到路网通行效率、应急响应能力及公众出行体验。传统的“事后维修”模式已难以满足现代高速公路对高可用性和低运维成本的要求。本文深入分析当前预防性维护实践中存在的主要问题，结合国内外先进经验，提出以数据驱动、智能诊断与全生命周期管理为核心的预防性维护体系优化路径，并通过案例验证其可行性与效益。研究表明，构建融合物联网、大数据分析与人工智能技术的智能预防性维护平台，可显著提升设备可靠性、降低运维成本、延长设备寿命，为智慧高速建设提供坚实保障。

关键词：高速公路；机电设备；预防性维护；智能运维；全生命周期管理；可靠性

引言

截至2024年底，我国高速公路总里程已突破18万公里，稳居世界第一。伴随“交通强国”战略的深入推进，高速公路正从“规模扩张”向“质量提升”转型，智慧化、绿色化、安全化成为核心发展方向。在此背景下，覆盖收费、通信、监控、供配电、照明、隧道通风与消防等子系统的机电设备，构成了高速公路运营的“数字底座”。这些设备7×24小时不间断运行，一旦发生故障，轻则导致局部路段拥堵、收费异常，重则引发安全事故、中断交通，造成巨大的经济损失和社会影响。长期以来，高速公路机电设备的维护多采用“被动响应式”策略，即“坏了才修”。这种模式存在响应滞后、修复周期长、成本不可控等弊端。近年来，行业逐步引入预防性维护（Preventive Maintenance, PM）理念，通过定期检查、测试、更换易损件等方式，在故障发生前进行干预。然而，受限于技术手段、管理机制和人员素质等因素，现有PM实践仍存在诸多不足，如维护计划僵化、资源浪费严重、预测精度不高、缺乏闭环反馈等。因此，如何将先进的信息技术与传统运维经验深度融合，构建一套科学、高效、智能的预防性维护体系，已成为提升高速公路运营管理的关键课题。本文旨在系统探讨机电设备预防性维护的现状、挑战与优化路径，为行业实践提供理论参考与实施指南。

1 当前预防性维护实践中的主要问题

尽管预防性维护理念已被广泛接受，但在实际落地过程中仍面临诸多挑战：

1.1 维护策略“一刀切”，缺乏针对性

目前，多数高速公路运营单位在制定维护计划时，仍主要依赖设备厂商提供的通用维护手册，采用固定周

期（如每季度或每半年）进行巡检与保养。这种“时间驱动型”策略忽视了设备实际运行工况、使用强度、地理环境及历史表现的差异性。例如，位于沿海高湿高盐地区的摄像机，其电路板腐蚀速度远高于内陆干燥地区；山区隧道内的风机因频繁启停，其轴承磨损也更为严重^[1]。然而，现行维护制度往往对所有同类设备执行相同的维护频次与内容，导致部分设备“过度维护”而浪费资源，另一些设备则因“维护不足”而提前失效。这种缺乏差异化、动态化的维护策略，难以真正实现“防患于未然”的目标。

1.2 数据采集与利用不足

虽然部分路段已在关键设备上部署了状态监测传感器，但数据采集的广度与深度仍显不足。更严重的是，各子系统之间普遍存在“数据孤岛”现象——收费系统的运行日志、监控系统的视频质量指标、供配电系统的电流电压数据等，往往分散在不同平台，格式不一、接口封闭，难以实现跨系统关联分析。同时，大量历史故障记录、维修工单、备件更换信息等宝贵数据未被有效结构化存储与挖掘，无法用于识别设备劣化规律或构建故障预测模型。数据价值的沉睡，使得预防性维护仍停留在经验判断层面，缺乏科学依据。

1.3 依赖人工经验，智能化水平低

当前的维护决策高度依赖一线工程师的个人经验与主观判断。巡检过程多采用纸质记录或简单的电子表格，不仅效率低下，还容易出现漏检、误判等问题。即便部分单位引入了告警系统，也多基于静态阈值触发，如“温度超过60℃即报警”，这种方式无法区分正常波动与真实故障，导致误报率高、有效预警少。更关键的是，现有系统普遍缺乏对设备健康状态的量化评估能

力，无法回答“这台设备还能用多久”“下次故障最可能发生在哪个部件”等核心问题。这种低智能化的运维模式，难以适应未来大规模、高复杂度机电系统的管理需求。

1.4 全生命周期管理缺失

在设备管理实践中，普遍存在“重建设、轻运维”的倾向。设备从采购、安装、调试到投入运行，再到最终报废，整个生命周期缺乏统一的数据管理平台。运维阶段无法便捷获取设备的设计参数、出厂测试报告、质保期限、历次维修详情等关键信息，导致维护方案制定缺乏依据。例如，某型号UPS电源的电池设计寿命为5年，但若无系统记录，运维人员可能在其服役第6年仍未更换，埋下断电风险。此外，备件库存管理也因缺乏预测支持而显得粗放，要么库存积压占用资金，要么紧急缺货延误抢修，反映出全生命周期视角的严重缺失。

1.5 人员技能与组织协同不足

一线维护人员多具备电气、机械等传统工科背景，但对数据分析、人工智能工具、物联网平台操作等新技能掌握不足，难以胜任智能化运维任务。与此同时，运维部门与前期的设计、采购、施工等部门之间缺乏有效协同机制^[2]。例如，设计阶段未充分考虑设备的可维护性（如预留检修空间、采用标准化接口），采购阶段片面追求低价而忽视设备可靠性指标，施工阶段未按规范布线导致后期排查困难。这种“建管养”脱节的现象，使得许多运维难题其实在项目初期就已埋下伏笔，仅靠后期维护难以根本解决。

2 预防性维护体系的优化路径

针对上述问题，本文提出构建“以数据为核心、以智能为引擎、以全生命周期为视角”的新一代预防性维护体系。

2.1 构建统一的设备健康状态感知网络

要实现精准预防性维护，首先需建立覆盖全路网的设备健康状态感知网络。这要求在关键机电设备上加装振动、温度、电流、湿度等多维度传感器，实现运行状态的实时在线监测。同时，必须打破各子系统间的数据壁垒，采用OPCUA、MQTT等标准化通信协议，将分散的数据汇聚至统一平台。在此基础上，可在前端部署边缘计算节点，对原始数据进行滤波、压缩与初步特征提取，既减轻中心平台负担，又提升本地响应速度。通过“端-边-云”协同架构，形成一张动态、透明、可追溯的设备健康感知网，为后续智能分析奠定数据基础。

2.2 建立基于大数据的设备健康评估与预测模型

在数据汇聚的基础上，应深度融合设备运行数据、

环境参数、历史维修记录及厂家技术文档，构建设备的数字孪生体。借助机器学习技术，可对设备健康状态进行量化评估：通过聚类算法识别不同健康等级的设备群体，利用LSTM等时间序列模型预测关键部件的剩余使用寿命，运用随机森林等分类模型挖掘潜在故障模式^[3]。更重要的是，这些模型应能根据设备实时状态动态调整维护策略，自动生成个性化维护工单，实现从“定期维护”向“按需维护”的转变。这种数据驱动的预测性维护，不仅能提前干预潜在故障，还能优化资源配置，避免无效作业。

2.3 推行全生命周期资产管理（EAM）

预防性维护的有效实施离不开全生命周期资产管理理念的支撑。应为每台设备建立唯一身份标识（ID），并关联其技术规格、供应商信息、安装位置、保修条款等元数据，形成完整的设备主数据。在此基础上，将预防性维护流程全面嵌入企业资产管理系统（EAM），实现从计划制定、任务派发、现场执行、结果验收到效果评价的闭环管理。同时，基于故障预测结果与设备地理分布，可动态优化备件库存策略，实现“精准储备、就近调拨”，既保障应急响应能力，又降低库存成本。全生命周期管理不仅提升了运维效率，也为设备更新改造、供应商评价等高层决策提供了数据支持。

2.4 强化组织保障与能力建设

技术升级必须辅以组织与人才的同步转型。一方面，应建立跨部门协同机制，推动“设计—采购—施工—运维”一体化管理。在项目前期，运维团队应参与设备选型评审，重点关注可维护性、接口开放性与可靠性指标；在建设阶段，应严格监督施工质量，确保为后期运维创造良好条件^[4]。另一方面，需加强对一线人员的技能培训，重点培养其数据分析、智能平台操作与故障诊断能力，打造一支懂设备、会数据、能决策的复合型运维队伍。此外，绩效考核体系也应相应调整，将设备可用率、平均故障间隔时间（MTBF）、预防性维护执行率等指标纳入KPI，引导运维工作向前瞻性、预防性方向转变。

3 实践案例：某省级高速公路集团智能预防性维护平台建设

3.1 项目背景

该集团管辖高速公路里程超5000公里，机电设备总量逾10万台套。原有运维模式年均故障处理量超2万起，平均修复时间（MTTR）达4.5小时，运维成本居高不下。面对日益增长的路网规模与公众对出行体验的更高期待，集团决定启动智能预防性维护平台建设项目，以

期从根本上提升机电系统可靠性。

3.2 实施方案

项目采用“云-边-端”三级架构：在设备端部署智能传感器与边缘网关，实现状态数据本地采集与预处理；在区域中心建设边缘数据中心，负责数据汇聚与初步分析；在集团总部搭建云端AI平台，集成健康评估、故障预测、工单调度等核心功能。平台上线后，可实时展示设备健康度看板，提前3至7天发出故障预警（准确率达85%以上），并自动生成维护工单推送至工程师移动端APP。同时，系统根据预测结果与设备分布，智能推荐备件库存方案，支持跨路段调拨。试点选取3条典型路段，覆盖收费、监控、供配电三大系统，以验证方案的普适性与有效性。

3.3 应用成效（运行一年后）

平台运行一年后，成效显著：关键设备的平均故障间隔时间（MTBF）从180天提升至320天，重大故障率下降62%；尽管预防性维护投入增加15%，但因减少了紧急抢修、设备提前报废及交通延误损失，总运维成本反而下降28%；平均修复时间（MTTR）缩短至1.8小时，巡检人力节省30%。更重要的是，设备全生命周期数据实现可追溯，为后续设备更新、供应商选择提供了有力支撑。该案例充分证明，智能预防性维护不仅是技术革新，更是管理理念与运营模式的系统性升级。

4 未来展望与挑战

尽管智能预防性维护前景广阔，但仍面临若干挑战。首先是数据安全与隐私保护问题，海量设备数据的采集、传输与存储必须严格遵守《网络安全法》《数据安全法》等法规要求，防止敏感信息泄露。其次是行业标准体系缺失，设备接口、数据格式、健康评估方法缺乏统一规范，制约了不同系统间的互联互通。此外，初期投入较大，包括传感器部署、平台开发、人员培训等，对中小运营主体构成资金压力。最后，AI模型的泛化能力有限，不同品牌、型号设备的故障特征差异显著，通

用模型难以直接迁移，需大量标注数据进行训练。

未来发展方向包括：深化数字孪生技术应用，构建高保真度的机电系统虚拟模型，支持远程诊断与仿真演练；探索预测性维护（PdM）向自主维护演进，结合强化学习等技术，使系统具备自我修复能力；推动行业标准制定，联合设备厂商、科研机构与主管部门，建立统一的智能运维标准体系；探索“运维即服务”（MaaS）商业模式，由专业第三方提供全托管式智能运维服务，降低用户门槛，促进行业整体水平提升。

5 结语

机电设备是高速公路安全、高效、智能运行的核心支撑。传统的被动维修模式已难以为继，向数据驱动、智能决策的预防性维护转型势在必行。本文系统分析了当前实践中存在的策略僵化、数据割裂、智能不足等问题，提出了构建以设备健康状态感知、大数据预测分析、全生命周期管理为核心的优化路径，并通过实际案例验证了其有效性。未来的高速公路运维，将不再是简单的“修机器”，而是基于数据洞察的“健康管理”。唯有拥抱新技术、重构新流程、培育新人才，才能真正实现“少停机、低成本、高可靠”的运维目标，为人民群众提供更加安全、便捷、舒适的出行服务，助力交通强国战略高质量落地。

参考文献

- [1]徐俊炜.高速公路交通机电设备的维护措施分析[C]//广西大学广西县域经济发展研究院.2025年第二届工程技术数智赋能县域经济城乡融合发展学术交流会论文集.路安通智(杭州)科技有限公司;:2025:261-262.
- [2]樊润萍.高速公路机电设备维护及管理优化研究[J].建筑机械,2025,(02):38-41.
- [3]周亮.高速公路机电设备的维护与管理[J].汽车画刊,2025,(01):203-205.
- [4]杨朋成.基于高速公路机电设备的维护管理研究[J].中国设备工程,2024,(01):37-39.