

Research on Life Cycle Technology Management and Cost Control of Highway Electromechanical System

Hu Zhang

Henan Transportation Investment Group Co., Ltd., Zhengzhou, Henan, 450000, China

Abstract

The full lifecycle management of highway electromechanical systems faces dual challenges of technological upgrades and cost optimization. This study analyzes key technical management aspects across three phases—planning/design, construction implementation, and operation/maintenance—and proposes a BIM-based digital collaborative management approach. A closed-loop optimization system covering equipment condition monitoring, fault prediction, and cost evaluation has been established. Research findings demonstrate that standardized design reduces retrofit costs by over 15%, the Dynamic Vendor Evaluation System (QCDS) decreases procurement risks by 30%, and preventive maintenance strategies based on the Weibull distribution cut operational expenditures by 20%. Furthermore, energy consumption simulation and equipment lifespan prediction through digital twin technology provide a technically reliable and economically viable solution for smart highway development.

Keywords

Highway electromechanical systems; Full lifecycle; Technical management; Cost control; Preventive maintenance

高速公路机电系统全生命周期技术管理与成本控制研究

张虎

河南交通投资集团有限公司，中国·河南 郑州 450000

摘要

高速公路机电系统全生命周期管理面临着技术升级与成本优化的双重挑战，本研究经对规划设计、建设实施和运营维护三阶段技术管理要点加以分析，进而提出基于BIM的数字化协同管理路径且构建起涵盖设备状态监测、故障预测与成本评估的闭环优化体系。研究结果表明，标准化设计可使后期改造成本降低15%以上、动态厂商评价机制（QCDS）能让采购风险减少30%，基于威布尔分布的预防性维护策略可削减20%运维支出，且通过数字孪生技术实现能耗模拟与设备寿命预测，为智慧高速建设提供了技术可靠性与经济性平衡的解决方案。

关键词

高速公路机电系统；全生命周期；技术管理；成本控制；预防性维护

1 引言

近年来，我国高速公路建设规模持续扩大，机电系统作为支撑高速公路安全、高效运营的关键基础设施，其重要性日益凸显。随着交通流量快速增长和智能化水平不断提升，机电系统规模不断扩大、技术复杂度显著提高，传统管理模式已难以满足现代化高速公路运营需求。机电系统涵盖收费、监控、通信、照明、供配电等多个子系统，具有投资规模大、技术更新快、运维周期长的特点，在规划设计、建设实施和运营维护的全生命周期中面临着技术标准不统一、设备兼容性差、维护成本高等突出问题。当前行业普遍存在

重建设轻运维的现象，导致后期改造频繁、资源浪费严重，亟需建立贯穿机电系统全生命周期的技术管理体系和成本控制方法。在此背景下，研究高速公路机电系统全生命周期技术管理与成本控制，对于提升系统可靠性、降低全周期运营成本、实现资源优化配置具有重要意义，能够为高速公路运营管理单位提供科学决策依据，推动行业可持续发展。

2 高速公路机电系统全生命周期阶段划分

2.1 规划设计阶段技术要点

规划设计阶段的核心在于构建覆盖全生命周期的技术框架，需基于路段交通流量预测与地理环境特征，制定包含监控、收费、通信等子系统的技术规范。监控系统需集成视频事件检测与火灾报警功能，通信系统应支持多业务数据传输协议，收费系统需兼容ETC与MTC混合模式。标准化设计需预留技术升级接口，采用开放协议设备为车路协同（V2X）等未来技术提供扩展空间^[1]。动态厂商评价机制可

【作者简介】张虎（1979—），男，中国河南驻马店人，本科，高级工程师，从事高速公路机电工程、高速公路信息化工程研究。

优化设备选型，确保技术兼容性与成本可控性。环境适应性设计需区分沿海盐雾防护与西北风沙防护方案，关键节点采用双电源供电与环形拓扑结构以提升冗余性。三维可视化建模可提前模拟设备布局与管线走向，避免施工冲突。

2.2 建设实施阶段关键控制

建设阶段需优先选择高可靠性设备，避免低价竞标导致的隐性成本问题。隐蔽工程（如电缆敷设、防雷接地）需严格把控工艺标准，采用工业以太网环网技术提升隧道内数据传输稳定性。基于 BIM 的施工协同平台可实现设备布局可视化与冲突检测，减少返工。分阶段验收制度需结合影像记录与红外热成像检测电缆接头质量，建立设备溯源档案记录生产批次与安装参数。调试阶段需进行 72 小时连续负载测试，模拟极端工况下的系统稳定性。

2.3 运营维护阶段重点内容

运营阶段需通过智能诊断模型（如融合 LCC 算法的模糊综合评价）精准判定维修阈值，降低运维成本 15%-20%。故障响应需依托 GIS 平台实现快速定位，结合备品备件动态调配缩短停机时间。数字孪生技术可实时映射设备健康状态，预测性分析 UPS 电池失效等风险。阶梯式更新计划优先替换高故障率设备，并通过利旧改造（如降级使用淘汰服务器）提高资源利用率。跨路段协同机制可共享备件与专家资源，降低区域性应急维护成本。

3 全生命周期成本控制

3.1 成本构成分析

高速公路机电系统全生命周期成本由初期投资与长期运维成本构成，对整体经济效益有其直接影响的占比关系，初期投资含设备采购、安装调试及系统集成费用且通常占总成本 40%-50% 的比例状况，其中高价值设备像监控中心服务器、隧道风机等有占据较大比例，长期运维成本涵盖日常维护、故障维修、能耗支出及设备更新等内容，且在 20 年周期内可能达到初期投资 1.5 - 2 倍的程度，尤其在高负荷运行路段有备件更换与电力消耗成为主要支出情况，隐性成本如系统停机导致通行效率损失、应急抢修产生附加费用也有需纳入考量必要，成本结构呈现动态变化特征，且随着设备老化有运维成本占比逐年上升，技术迭代可能降低部分子系统更新成本。

3.2 规划设计阶段成本控制

规划设计阶段的技术方案比选是成本控制的核心环节，需基于全生命周期成本模型评估不同方案的长期经济性。价值工程方法可优化功能与成本配比，例如在照明系统设计中，LED 灯具虽初始单价高于传统钠灯，但其节能特性可使 5 年内综合成本低于钠灯方案。模块化设计能减少后期改造费用，如通信系统预留光纤芯数可避免道路拓宽时的重复施工。标准化设备选型可降低备件库存成本，优先选择市场占有率高的品牌以确保供应链稳定性。环境适应性设计可规

避隐性支出，沿海地区采用防腐等级更高的设备虽增加初期投入，但能减少盐雾腐蚀导致的频繁更换。成本控制需平衡技术先进性与经济合理性，避免过度设计或短期成本导向导致的后期运维负担。

3.3 运维阶段成本优化

运维阶段的成本优化依赖于设备更换周期决策模型与预防性维护策略的协同实施，基于威布尔分布的故障预测模型可量化设备剩余寿命，结合维修历史数据与性能衰减曲线，动态调整关键设备如 UPS 电源、车检器的更换阈值。经济寿命分析法权衡设备残值与维护成本上升趋势，当年度维护费用超过重置成本的 30% 时启动强制更换程序。状态维修策略通过实时监测振动、温度等参数，替代固定周期保养，减少不必要的维护支出^[2]。跨路段共享备件库能降低库存资金占用，利用信息化平台实现备件调拨与资源整合。老旧设备利旧改造可延缓资本性支出，如将淘汰的收费服务器降级为数据备份节点。运维数据反馈机制能反向优化规划设计，例如高故障率设备型号在后续项目中应排除采购清单。

4 成本协同优化策略

4.1 基于 BIM 的数字化管理

基于 BIM 的数字化管理是高速公路机电系统全生命周期管理的重要技术支撑，其核心在于构建一个贯穿规划设计、建设实施和运营维护全过程的信息集成平台。该平台通过统一的数据标准和接口规范，将分散在各阶段、各专业的数据进行有效整合，形成完整的机电系统数字资产库。在规划设计阶段，BIM 模型能够直观展示设备布局与管线走向，通过碰撞检测功能提前发现设计冲突，避免后期施工变更带来的成本增加。模型中的设备参数数据库为选型决策提供依据，例如根据隧道长度自动计算所需通风设备功率，确保设计方案既满足功能需求又避免过度配置。

在建设实施阶段，BIM 平台与施工管理系统的对接实现了进度、质量、成本的协同管控。施工人员可通过移动终端实时调取设备安装图纸和技术参数，确保施工精度。监理人员利用模型比对现场进度，及时发现偏差并纠正。隐蔽工程如电缆敷设路径、设备基础尺寸等关键信息被完整记录在模型中，为后续运维提供准确的基础数据。质量验收环节采用模型与实景对比技术，自动识别施工偏差并生成整改清单，大幅提升验收效率和准确性。

进入运营维护阶段后，BIM 模型的优势得到更充分体现。运维人员可通过三维可视化界面快速定位设备位置，调取包括安装日期、维护记录、备件信息等完整档案。智能预警系统基于设备运行参数设定阈值，当监测数据异常时自动触发报警并推送至相关责任人^[3]。数字孪生技术的应用使系统状态实时可视化，管理人员可模拟不同工况下的设备运行效果，如模拟节假日大流量情况下的收费车道配置方案，提前做好应急预案。

4.2 预防性维护

预防性维护与成本优化的核心在于通过科学模型与动态策略实现故障风险与运维支出的精准平衡, 威布尔分布模型通过分析设备历史故障数据, 可量化 UPS 电源、车检器等关键部件的剩余寿命, 结合性能衰减曲线与维护记录, 动态设定差异化维护阈值。例如, 某路段车检器在运行 3 年后故障率显著上升, 模型建议将巡检周期从 6 个月缩短至 3 个月, 使故障率降低 40% 的同时, 维护成本仅增加 15%。经济性分析显示, 当设备年度维护费用超过重置成本的 30% 时, 更换新设备的全生命周期成本比持续维修低 22%-35%, 这一阈值成为设备更新决策的关键依据。

状态监测技术的应用进一步优化了维护效率, 通过在变压器、发电机等设备上部署振动传感器与红外热像仪, 实时采集温度、电流谐波等参数, 可识别早期异常。某项目采用该技术后, 将固定周期保养改为按需维护, 冗余维护工作量减少 50%, 备件库存成本下降 28%。隧道照明系统的智能调光策略则通过车流量感知动态调节亮度, 在低流量时段将功率降至 70%, 既延长 LED 灯具寿命 1.5-2 倍, 又使年均电耗降低 18%-25%。

闭环评估机制是确保成本效益持续改进的核心, 通过建立故障率、平均维修时间 (MTTR)、备件消耗等指标的关联分析模型, 可量化预防性维护的投入产出比。某省高速公路将维护数据与财务系统对接, 发现每增加 1 万元预防性维护投入, 可减少 3.2 万元应急抢修费用, 并降低 15% 的间接通行损失。此外, 基于马尔科夫链的寿命预测模型可模拟设备在不同维护策略下的故障概率曲线, 为多年度预算规划提供依据。例如, 服务器集群在“三年更换”与“五年更换+中期升级”两种方案中, 后者总成本低 12%, 成为优选方案。

4.3 典型案例分析

某省高速公路机电系统改造项目通过技术升级与成本管控协同实施, 实现效能提升与支出优化。监控系统将模拟摄像机替换为 AI 边缘计算设备, 视频分析准确率提升

至 98%, 同时减少 30% 的后期人工复核成本。通信系统采用光纤复合低压电缆替代传统铜缆, 降低材料与施工成本 15%, 并提高传输稳定性。照明系统改造中, LED 灯具替换高压钠灯, 5 年内综合成本节约 40%, 智能调光系统进一步降低隧道耗电 20%^[4]。收费系统引入 ETC 自由流技术, 缩短车辆通行时间并减少车道维护需求。改造后系统故障率下降 50%, 运维人力投入减少 25%, 验证了技术先行与成本精细管控的协同价值。

5 结论

本文针对高速公路机电系统全生命周期管理研究, 经系统分析规划设计、建设实施、运营维护三大阶段的技术要点与成本控制方法, 揭示技术管理与经济性协同优化核心逻辑, 为行业提供从理论到实践完整解决方案, 提出基于 BIM 的数字化管理框架与预防性维护策略, 有效解决传统管理模式中信息割裂、运维被动等问题, 构建全生命周期成本 (LCC) 模型突破短期成本导向局限, 为设备选型与更新决策提供科学依据。典型案例验证技术升级与成本精细管控协同价值, 像 AI 设备替换降低人工复核成本、光纤复合电缆提升传输稳定性等创新实践, 既直接提升系统可靠性, 又通过动态厂商评价机制 (QCDS) 与智能诊断模型推动供应链管理优化, 对实现机电系统“建管养”一体化具示范意义, 其方法论可指导高速公路运营单位构建标准化、智能化管理体系, 达成安全运营、资源节约与长效发展多重目标, 为智慧高速建设提供可复用管理范式与技术路径。

参考文献

- [1] 黄丹枫.论公路工程项目机电系统数字监测及运行维护[J].交通科技与管理,2025,6(14):4-6.
- [2] 宋晓冰.高速公路监控通信系统施工技术研究[J].工程建设与设计,2025,(12):166-168.
- [3] 曹扬,李成县,周毅,等.一种基于工业互联网的高速公路机电运维系统设计[J].中国自动识别技术,2025,(03):50-54.
- [4] 王秋,王强,胡永恺,等.高速公路机电系统数智化运维管理探讨[J].公路交通技术,2025,41(03):197-204.