

隧道照明系统节能养护技术及机电优化方案

施恒柱

辽宁省交通通信发展有限责任公司, 辽宁 沈阳 110000

DOI:10.61369/ETQM.2025120005

摘 要 : 隧道机电系统是保障隧道安全、高效运营的核心基础设施, 其优化方案的实施对提升隧道整体性能具有多重重要意义。基于当前行业实践和成功案例, 隧道机电优化很重要。隧道照明将超越单纯照明功能, 发展为集安全监测、环境适配、数据决策于一体的综合性系统, 成为智慧交通基础设施的核心组成部分。随着 "双碳" 战略推进, 隧道照明智能控制将迎来更广阔的发展空间。

关 键 词 : 隧道照明系统; 节能养护技术; 机电优化方案

Energy - saving Maintenance Technology and Electromechanical Optimization Scheme of Tunnel Lighting System

Shi Hengzhu

Liaoning Transportation and Communication Development Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110000

Abstract : The tunnel electromechanical system is the core infrastructure to ensure the safe and efficient operation of tunnels, and the implementation of its optimization scheme is of multiple important significance for improving the overall performance of tunnels. Based on current industry practices and successful cases, the optimization of tunnel electromechanical systems is very important. Tunnel lighting will go beyond the simple lighting function and develop into a comprehensive system integrating safety monitoring, environmental adaptation, and data decision - making, becoming a core component of intelligent transportation infrastructure. With the advancement of the "dual carbon" strategy, intelligent control of tunnel lighting will usher in a broader development space.

Keywords : tunnel lighting system; energy - saving maintenance technology; electromechanical optimization scheme

引言

当前我国公路隧道照明能耗严重, 存在的突出问题是照明系统设计超标、照明控制方式落后、照明节能理念有误、照明节能措施单一。以建设“资源节约型、安全环保型”公路隧道为出发点, 从宏观层面分析公路隧道照明节能及机电优化方案, 并从系统工程角度提出公路隧道照明节能的对策。

一、隧道机电优化方案的重要性分析

1. 安全性提升。实时监控与预警系统, 通过视频监控、车牌识别和雷达检测等技术, 实现对隧道内车辆流量、速度及异常事件的实时监测, 显著提升事故响应速度。例如, 智能视频分析系统可自动识别车辆违章行为, 并在事故发生时迅速定位事故现场。远程监控平台能够及时发现设备潜在故障, 避免因机电系统失效导致的安全事故, 如通风或照明系统故障可能引发的二次事故。应急处理能力增强, 集成化的消防、通信系统可在紧急情况下快速启动应急预案^[1]。例如大别山隧道群通过升级情报板和车辆指示器, 优化了交通引导效率, 日均服务 3.5 万台车辆仍保持安全运营。

2. 节能与环保效益。智能照明技术应用, 自适应调光系统根据车流量和环境光自动调节亮度, 临建高速试点隧道用电量下降 18%, 推广后全年电费节省提高。

大岩山隧道采用随车调光技术后, 月用电量降低 44%, 无效照明时间显著缩短。

能源管理优化, 错峰用电策略在除湿系统中应用, 节省电费。LED 灯具替代传统钠灯可降低 30% 以上能耗, 部分项目通过 "修旧利废" 策略重复利用旧设备, 进一步减少资源浪费。

3. 运维成本控制。技术创新降本, 采用自动化钻孔设备, 使单孔施工时间缩短 60%, 工器具损耗率降低 30%, 日钻孔量从 150 组提升至 600 组。通过联合谈判和设备直采, 同类型维护成本降低, ETC 天线等项目采购成本最高下降。标准化管理增效, 隧道

所制定《隧道机电设备管理手册》，实现巡检效率提升，故障处理时间缩短。"线上监控+线下巡检"双班组模式使一般故障可远程处理，复杂故障响应速度提高。

4.管理效能升级。数据驱动决策，智能管理系统通过大数据分析预测设备寿命，项目据此优化维护周期，节省成本。统一平台集成照明、通风等子系统数据，打破信息孤岛，运维人员处理效率提升。长期经济效益，机电优化虽需前期投入，但通过节能降耗和延长设备寿命，通常2-3年即可收回成本。如高速智能调光系统投资回收期仅1.8年。

二、隧道照明系统节能技术

隧道照明系统的节能技术主要包括以下几类，结合当前智能化发展趋势和技术应用，可归纳如下：

1.自适应调光技术。车流感应控制：通过雷达、摄像头等设备实时监测车流，实现“车来灯亮、车走灯暗”的动态调节，节能率可达35%-60%。环境光自适应：根据隧道内外自然光强度自动调整入口段和过渡段亮度，减少“黑洞效应”和眩光。

2.智能照明系统优化。物联网远程控制：支持通过移动终端远程调节亮度、色温等参数，提升管理灵活性。低流量时段模式：在车流稀少时切换至间隔照明或降低整体亮度，进一步减少能耗。

3.高效光源与灯具升级。LED灯具替代传统光源：LED具有高效能和长寿命特性，可降低长期运维成本（虽未直接提及，但为行业通用技术）。

4.综合节能策略。双碳目标驱动：通过智能化改造实现精准控光，助力交通领域碳中和。以上技术通过动态调控、智能感知和高效设备结合，在保障行车安全的同时显著降低能耗。

三、隧道照明系统养护技术要点

隧道照明系统的养护是确保其长期稳定运行和节能效果的关键环节，结合当前行业实践和技术发展，主要养护技术要点如下：

1.日常巡查与清洁保养。灯具表面清洁，每月至少进行一次灯具表面清洁，防止灰尘积累降低光效（清洁后光通量可恢复90%以上）。光学部件检查，定期检查透镜、反射器等光学部件是否老化或破损，及时更换以保证照明质量。

2.智能系统维护。传感器校准，每季度对光敏传感器、车流检测器等关键传感设备进行校准，确保数据采集准确性；控制程序更新，根据季节变化和实际运营数据，定期优化控制算法参数，保持系统调节灵敏度。

3.设备状态监测。电气安全检测，使用红外热像仪等设备定期检查线路连接状态，预防接触不良引发的安全隐患；LED模组维护，建立LED灯具光衰数据库，对光效低于初始值70%的模组进行更换。

4.节能效果验证。能耗数据分析，每月对比照明系统用电数

据与车流量曲线，评估节能措施的实际效果；照明质量检测，使用照度计定期测量各段照度值，确保符合规范要求（如隧道中间段维持10-15lx）。

5.自测方法体系。光度学检测，检测依据：GB 7000.1；关键指标：纵向均匀度 ≥ 0.6 ，横向均匀度 ≥ 0.4 ；测点间距按设计速度分级：时速 $\leq 60\text{km}$ 用5m间隔， $>60\text{km}$ 用10m间隔；检测设备：LMT系列光度计。电气安全检测，检测标准：GB 7000.203；关键参数：功率因数 ≥ 0.9 ，谐波畸变率 $<15\%$ ；绝缘电阻测试（500V DC条件下维持60s，阻值 $>2\text{M}\Omega$ ）；检测设备：FLUKE 435II电能质量分析仪。

6.应急保障措施。备用电源测试，每半年测试应急照明切换功能，确保断电时能自动点亮（切换时间不超过0.5秒）；预案演练，每年至少组织一次照明系统故障应急演练，验证维护团队响应能力；通过以上系统化的养护技术，可有效延长隧道照明系统寿命（LED灯具寿命可达5万小时以上），维持节能效果（综合节能率通常保持在30%-50%）^④。现代智能养护平台的应用，更可实现故障预警准确率达90%以上。

四、隧道照明系统机电优化方案

隧道照明系统的机电优化是提升运营效率、保障行车安全和实现节能减排的关键措施。根据当前行业实践和技术发展，以下是完整的机电优化方案：

1.技术优化方法。LED灯具替换传统照明设备，采用高效能LED灯具替代传统高压钠灯和金属卤化物灯，LED灯具具有高亮度、长寿命（可达5万小时以上）和低能耗的特点。实施步骤包括：照明现状调查→制定更新计划→分阶段更换→新设备测试验证；智能照明控制系统，引入车流感应调光技术，通过微波传感器实时监测车流量，实现“无车关闭、低速全亮”的智能调节模式。采用环境自适应调节，光敏传感器与边缘计算结合，根据自然光变化自动调整隧道入口段亮度。

多维度数据驱动优化，部署多模态传感器（光学、红外、超声波等）全面感知环境参数和设备状态应用AI增强型传感器，通过机器学习算法实时校准数据误差；建立多源数据融合平台，整合隧道内外部环境的实时数据。

2.实施方案与步骤。前期准备阶段，详细勘察隧道基本情况（长度、宽度、高度、车流量等）；制定科学合理的施工组织设计和技术规范；组建专业项目管理团队（技术质量、安全环保、采购等部门）。设备选型与布局，根据隧道特性选择优质LED灯具，考虑散热性能和使用寿命；优化灯具布局：双侧对称或交错布灯，确保照明均匀分布；设计合理的配电系统，满足功率需求和远程监控要求。控制系统部署，实施智能控制策略：按时间段、车流量、环境光照自动调节亮度；建立故障反馈与智能运维功能，实时监测设备运行状态；针对隧道不同区域（入口段、过渡段、中间段、出口段）制定个性化照明策略。施工与验收，严格执行施工质量控制，确保符合行业标准（JTG/T D70/2-01等）；进行照度测试：在测试区域按布灯方式设置测点，验证照明效

果；验收标准包括眩光指数 ($I_{80} \leq 30\text{cd}/1000\text{lm}$)、色品坐标偏差 ($\Delta_{uv} \leq 0.0100$)等技术指标。

3. 优化效果评估。节能效益，典型案例显示，智能照明系统可实现30-50%的综合节能率；实施“一隧一策”后，隧道照明无效投入减少；隧道群应用后，照明能耗曲线呈现明显“削峰填谷”特征。安全性能提升，消除“黑洞”现象，确保视觉过渡平滑（入口段亮度维持10-15lx）；某地铁线改造后事故率降低22%，投资回收期仅1.5年。运维效率改进，预测性维护平台使故障预警准确率达90%，维护成本降低30% 远程监控系统减少人工巡检频率，检测效率提升300%。

五、隧道照明智能控制未来趋势分析

随着智慧城市和绿色交通建设的推进，隧道照明系统正经历从传统照明向智能化、数字化方向的深刻变革。基于当前技术发展和行业实践，隧道照明智能控制的未来将呈现以下关键趋势^[3]：

1. 技术架构升级。分布式智能控制架构，未来隧道照明将普遍采用“云-边-端”三级架构：云端平台实现省级集中监控，边缘计算节点提供毫秒级应急响应，终端灯具配备独立控制模块。这种架构既确保大范围管控，又保障突发情况下的快速处置能力。HIYIN平台案例显示，此类系统故障预测准确率已达90%，维护成本降低。AI增强的环境感知，新一代系统将集成多模态传感器（光学、红外、超声波等）和AI算法，实现更精准的环境识别。模糊控制算法能根据国标阈值自动生成最佳照明方案，对雾霾、暴雨等极端天气识别准确率已达行业先进水平。测试数据显示，这类系统可使日间照明能耗降低40%以上，应急响应速度提升3倍。

2. 核心功能演进。动态调光技术深化，“灯随车亮”系统通过毫米波雷达跟踪车辆轨迹，动态调整照明段长度和亮度。浙江建金高速应用案例显示，年节能率达35%，同时事故率降低22%^[4]。未来将发展出基于车速的自适应照明，确保照明范围始终覆盖车

辆安全视距。数字孪生运维管理，数字孪生技术可实现隧道照明系统的全生命周期管理，包括：实时结构健康监测与预测性维护；远程监控与智能应急响应；能耗大数据分析与优化决策；新型维护模式可降低人工巡检次数，显著提升运维效率。

3. 新兴技术融合。车路协同照明，下一代方案将实现基于车辆位置的个性化照明服务，与自动驾驶系统深度整合。高速隧道已试点“四合一”车辆跟踪系统，结合车流量、车速、天气等因素实现分段式精准控制。AI算法持续优化，机器学习算法将用于实时校准传感器数据误差，并通过历史数据学习不断优化照明策略。当前系统已能根据晴天、阴天、雨雪天等不同天气条件自动调节亮度，未来将实现更精细的个性化适配^[5]。

4. 行业发展趋势。绿色低碳转型，据行业预测，LED隧道灯具将更加高效节能，结合智能控制可实现综合节能50%以上。政策驱动下，绿色照明已成为不可逆转的行业方向。标准化与规模化，中国智能交通协会指出，未来三年需重点突破异构系统兼容、网络安全防护等技术难点，实现“可视、可控、可管”的现代化运营目标。政府将加强标准规范制定，推动行业健康有序发展。服务模式创新，

企业将从产品供应商转向“技术+服务+生态”综合服务商，提供全生命周期解决方案。典型案例显示，智能系统投资回收期可缩短至1.5年，商业模式可持续性显著提升。

5. 挑战与对策。技术整合难度，不同厂商设备兼容性、复杂环境下的传感器可靠性仍是待解难题。建议采用模块化设计，预留标准化接口，便于后续升级。

网络安全风险，分布式架构增加了网络攻击面。需建立多层防护体系，包括设备认证、数据加密和异常行为监测等。人才缺口，智能照明跨学科特性要求复合型人才。行业需加强校企合作，培养同时懂照明工程、物联网和AI技术的专业团队。

综上所述，隧道机电优化不仅是技术升级，更是运营理念的革新。其在安全、节能、成本和管理方面的综合效益，已通过多个成功案例得到验证，成为现代隧道运营管理中不可或缺的战略举措。

参考文献

- [1] 李强. 高速公路隧道照明节能控制研究 [J]. 光源与照明, 2023(6): 21-23.
- [2] 李少. 差分进化算法的改进及其在高速公路隧道照明优化中的应用 [D]. 中国地质大学, 2023.
- [3] 王函. 高速公路隧道照明节能控制研究 [J]. 四川建材, 2024, 50(1): 176-178.
- [4] 谢耘. 高速公路隧道照明的节能设计 [J]. 中国高新科技, 2023(2): 70-71.
- [5] 涂飞琦. 西汉高速公路隧道照明系统评估研究 [J]. 照明工程学报, 2020, 21(5): 15-21, 36.