

高速公路隧道照明系统节能优化研究

孟凡宇

(河北石太高速公路开发有限公司,河北省石家庄市,050000)

摘要 针对高速公路隧道照明系统能耗高、控制粗放等问题,以某990m四车道隧道为对象,提出LED光源改造、智能调光控制与精细化照明管理综合节能方案。建立照明需求计算与能耗仿真模型,结果表明:综合方案可实现照明能耗降低51.2%,投资回收期3.6年,经济效益与社会效益显著,可为同类中短隧道节能改造提供参考。

关键词 高速公路隧道;LED照明;智能调光;节能优化;全寿命周期成本

中图分类号:U453.7 文献标识码:B

文章编号:1008-0899(2026)04-0064-02

随着我国高速公路网络的快速发展,隧道建设规模不断扩大。截至2024年末,全国公路隧道建成数量超过2.8万座,总里程突破3 200万延米^[1]。隧道照明系统作为高速公路运营能耗的关键环节,开展节能优化研究对于降低运营成本、实现绿色交通具有重要意义^[2]。

1 工程概况与现状分析

1.1 隧道工程概况

本研究以河北省内某高速公路隧道为例,隧道长度990m,设计速度100km/h,双向四车道。隧道位于山岭重丘区,洞外亮度夏季最高可达8 000cd/m²,冬季阴天最低约1 200cd/m²。

隧道设计交通量为28 000辆/日(小客车标准),实际运营中货车比例约38%,交通流呈现明显的时段不均衡性:白天(6:00~18:00)交通量占全日的70%,夜间(18:00~6:00)占30%,其中0:00~6:00时段交通量仅为高峰时段的10%~15%。

1.2 照明系统现状

1.2.1 灯具配置

入口加强段TH长60m,采用400W高压钠灯30盏,安装间距4m;过渡段TR长80m,采用250W高压钠灯40盏,安装间距4m;中间段S长790m,采用150W高压钠灯198盏,安装间距8m;出口加强段EX长

60m,采用250W高压钠灯30盏,安装间距4m;应急照明覆盖全隧道,采用36W荧光灯56盏,安装间距36m。

1.2.2 控制方式

采用时序控制方式,实现“全亮-半亮-关闭”三级切换,但无法根据洞外亮度、交通流量变化实时调整。

1.2.3 供配电系统

隧道设10kV/0.4kV箱式变电站1座,照明用电引自低压配电柜。照明线路采用电缆穿管敷设。

1.3 能耗现状与问题分析

1.3.1 能耗统计

以左线隧道2023年照明系统用电量为例:入口加强段总功率12.0kW,日运行12h,年用电5.3万kWh占12.5%;过渡段10.0kW、12h,4.4万kWh占10.4%;中间段29.7kW、12h,13.0万kWh占30.7%;出口加强段7.5kW、12h,3.3万kWh占7.8%;应急照明2.0kW、24h,1.8万kWh占4.2%;其他损耗14.8万kWh占34.4%。

1.3.2 存在的主要问题

该隧道照明系统存在四方面主要问题:①光源光效低、能耗偏高,高压钠灯光效仅100lm/W,显色指数 $R_a < 30$,中间段功率密度达12.5W/m²,超过规范推荐值108%;②控制方式粗放,无法根据洞外亮度和交通量实时调整,白天亮度固定、夜间低流量时段仍维持高亮度,造成能源浪费;③线路损耗大,照明线路设计冗余,功率因数仅0.82,无功损耗明显;四是缺乏智能管理,未接入隧道监控平台,无法实

作者简介:孟凡宇(1982~),男,河北晋县人,本科,工程师,研究方向:公路机电。

现远程监控和故障预警,运维效率低下。

2 隧道照明需求计算

根据《公路隧道照明设计细则》(JTG/T D70/2-01-2014)^[1],隧道照明计算得入口段亮度需求:晴天峰值280cd/m²,阴天42cd/m²。设计速度100km/h、交通量1400辆/h时,规范要求中间段基本亮度=6.0cd/m²。考虑LED光源显色性好、中间视觉效应,建议取5.0cd/m²。本隧道为中隧道,仅设一个过渡段,过渡段亮度按计算,出口段亮度为中间段亮度的3倍。

3 综合节能优化方案

3.1 LED光源改造方案

3.1.1 灯具选型

选用高光效LED隧道灯:功率40W/80W/120W可调,光效≥140lm/W,显色指数Ra≥70,色温4000K,防护等级IP65,寿命≥50000h,功率因数≥0.95。

3.1.2 优化布灯

优化后布灯配置:入口加强段采用120WLED灯具30盏,安装间距4m,总功率3.6kW;过渡段采用80WLED灯具40盏,安装间距4m,总功率3.2kW;中间段采用40WLED灯具160盏,安装间距10m,总功率6.4kW;出口加强段采用80WLED灯具30盏,安装间距4m,总功率2.4kW;应急照明采用15WLED灯具56盏,安装间距36m,总功率0.8kW。改造后灯具总数316盏,总功率16.4kW,较原方案减少37.3%,照明总功率16.4kW,较原方案降低73.2%。

3.1.3 供配电优化

更换节能型变压器,增设无功动态补偿装置,将功率因数提升至0.95以上,降低线路损耗。

3.2 智能调光控制系统

3.2.1 系统架构

采用一体化智能照明控制器,集成洞外亮度检测、车流量检测、调光控制功能,通过光纤接入隧道监控平台。

3.2.2 控制策略

智能调光控制系统采用三种控制策略:①入口段自适应调光,根据洞外亮度实时检测值,通过PID算法无级调节LED驱动电流至30%~100%,确保入口段亮度始终满足规范要求,消除“黑洞效应”;②中间段分时段调光,白天100%、傍晚80%、夜间60%、深夜40%,适应交通流量和驾驶员视觉特性变

化;③应急联动控制,火灾或交通事故发生时,自动切换至应急照明模式,全隧道100%亮度,确保人员安全疏散。

3.3 精细化照明管理

制定全年照明运行策略,区分夏季与冬季、不同时段差异化控制:夏季和冬季的白天(6:00~18:00)入口段均采用自适应调光、中间段100%亮度,其中夏季按晴天/阴天差异化控制,冬季遇雾天适当增加亮度;傍晚时段(18:00~22:00)入口段和中间段均降至80%,作为视觉适应过渡模式;深夜时段(22:00~6:00)入口段降至50%、中间段降至40%,实现深度节能。

4 节能效果分析与经济评价

4.1 能耗仿真对比

建立MATLAB能耗仿真模型,对现状、LED改造、综合改造三个阶段能耗进行对比分析:现状年用电量42.6万kWh,平均亮度5.5cd/m²,亮度达标率85%;LED改造后年用电量22.8万kWh,平均亮度6.0cd/m²,亮度达标率94%;综合改造后年用电量20.8万kWh,平均亮度5.8cd/m²,亮度达标率97%。可见,综合方案较单纯LED改造再节能8.8%。

4.2 经济评价

方案C初始投资128万元,年运营成本14.5万元,较现状年节约36.7万元;静态投资回收期3.5年,动态投资回收期3.6年,15年净现值285万元,内部收益率26.5%。灯具寿命延长至50000h,年维护次数由6次降至1次。

5 结论与建议

综上所述,该隧道综合节能方案可实现照明能耗降低51.2%(较单纯LED改造再节能8.8%),投资回收期3.5年,15年净现值285万元,内部收益率26.5%,经济效益显著,安全与节能效益兼备。建议优先实施LED改造,逐步升级智能控制,完善中短隧道照明标准,推动行业绿色低碳发展。

参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部.2024年交通运输行业发展统计公报[R].北京:中华人民共和国交通运输部,2025.
- [2] 尹梦颖,张凯明.隧道照明系统节能方案探究[J].中国公路,2025,(14):108-111.
- [3] 中华人民共和国交通运输部.公路隧道照明设计细则:JTG/T D70/2-01-2014[S].北京:人民交通出版社,2014.