

高速公路隧道照明机电系统节能优化对行车安全影响的研究

卢江南 郭粉丽

云南云交科智慧园区科创产业发展有限公司 云南 昆明 650000

【摘要】：高速公路隧道照明机电系统的节能优化对行车安全具有关键作用。传统照明系统因光源能效低、控制方式单一等问题，导致光污染、能源浪费及安全隐患。节能优化需从光源技术革新、智能控制系统开发及光环境动态调控三方面入手。LED光源凭借光谱纯净、调光灵活的优势，可减少眩光并提升视觉适应性；多模态感知智能控制系统能根据交通流、环境亮度实时调整照明参数，实现按需照明；动态光环境补偿技术通过洞外亮度监测与隧道内照明联动，可消除“黑洞效应”。这些优化措施不仅能降低能耗，还能通过改善照明均匀度、减少视觉干扰，显著提升驾驶员的视认能力与反应速度，为行车安全提供保障。

【关键词】：高速公路隧道；照明机电系统；节能优化；行车安全；光环境调控

DOI:10.12417/2811-0536.26.04.027

1 传统隧道照明系统的安全隐患与能效瓶颈

1.1 光源能效低下与光污染问题

传统调整公路的隧道照明往往十分依赖气体放电光湖，如高压钠灯、荧光灯等，这些光源存在一些明显的缺陷，如能效及光谱特性上。基于能效角度，这类光效普遍低于100lm/W，意味着每消耗1瓦特电能，产生的可见光通量不足100流明，电能转化为光能的比率不足30%，剩余70%以上能量以热能形式散失。这种低效能量转换不仅造成电力资源浪费，还会导致隧道内温度持续升高，加速灯具及配套设备老化，缩短设备使用寿命，增加长期运营成本。基于光谱成分角度，气体放电光源光谱复杂，包含大量非可见光波段，如红外线、紫外线等，这些非可见光无法被驾驶员有效利用，反而通过壁面反射形成漫射光污染。漫射光污染会降低路面与障碍物之间的对比度，使驾驶员难以清晰分辨道路边界、障碍物轮廓及交通标志，干扰视觉判断。某省高速公路隧道群调研数据显示，传统照明系统下，驾驶员视认距离较规范要求缩短，事故率较规范值高出一定比例，尤其在雨雾天气或夜间，光污染导致的视觉干扰更为突出，成为引发追尾、刮擦等事故的重要诱因，凸显光源能效与光污染对行车安全的双重威胁。

1.2 控制策略粗放与动态适应性缺失

现有隧道照明控制模式以分级调光或定时控制为主，缺乏对实时交通流、天气条件的动态响应能力。分级调光通常将隧道照明分为几个固定亮度等级，如入口段、中间段、出口段分别设置不同亮度，但无法根据交通流量变化实时调整。定时控制则根据预设时间表切换亮度，如高峰时段全亮、低谷时段半亮，但无法适应突发交通状况或天气突变。这种“一刀切”

的控制方式导致两种极端现象：交通低谷期，隧道内照明强度远超实际需求，造成能源浪费；交通高峰期，照明强度不足，驾驶员视认距离缩短，安全隐患显著增加。某市隧道照明能耗监测数据显示，传统控制系统下无效照明占比高，即实际照明强度超过需求的部分占比大，且因亮度突变引发的追尾事故占隧道事故总量的一定比例。亮度突变通常发生在分级调光切换时，如从高亮度等级突然降至低亮度等级，驾驶员眼睛需重新适应，导致短暂视觉盲区，增加事故风险。此外，隔盏关灯等简单控制手段造成路面亮度呈周期性分布，形成“斑马效应”，即路面明暗交替，加剧驾驶员视觉疲劳，降低注意力集中度，进一步威胁行车安全。



1.3 维护成本高昂与系统可靠性不足

传统的光源使用年限并不长，其维护成本也很高昂。如高压钠灯、荧光灯等气体放电光源平均寿命较短，需频繁更换。隧道空间狭小、通风条件差，灯具安装高度高、更换难度大，需使用专业设备及人员，导致单次更换成本高。例如，某省交通部门统计显示，隧道照明年度维护费用中，灯具更换占比高，且因更换作业需封闭车道，导致交通管制时间累计长，间接经济损失包括车辆延误、物流成本增加等，数额巨大。同时，传统控制系统缺乏故障自诊断与远程监控功能，一旦发生灯具损坏或线路故障，需人工巡检定位，耗

时耗力，且难以快速修复。例如，某隧道因灯具故障导致局部照明缺失，巡检人员花费长时间才定位故障点，期间该区域行车安全风险显著增加。高速公路隧道往往使用传统控制系统，主要是采用集中式控制架构，单点故障可能导致整个隧道照明瘫痪，系统可靠性不足。缺乏远程监控功能使运营单位无法实时掌握照明状态，无法在第一时间发现并处理潜在问题，会对行车安全造成严重威胁。

2 节能优化技术体系构建与行车安全提升机制

2.1 光谱工程：LED光源的视觉适应性优化

高速公路隧道照明节能优化技术过程中，大多引入了LED光源，因其具备独特优势，如光谱纯净，可灵活调光等。传统的气体放电光源光谱成分较复杂，涵盖了许多非可见光波段，容易形成光污染，对驾驶员视觉判断造成干扰。而引入LED光源，则可借助光谱定制技术，让红外红、紫外线等非可见光成分迅速消除，只保留对驾驶员视觉感知有益的可见光波段，这样则可从源头上降低光污染。色温可调特性也让LED光源的应用场景得到了拓展，其可依照高速公路隧道不同区段的视觉需求，来对光谱分布作动态调整。例如，入口段是驾驶员刚进入隧道后，从先前明亮的环境进入了隧道幽暗环境的过渡区域，则可采用高色温（如5000K-6500K）光源对日光进行模拟。其光谱成分与自然光十分接近，可将视网膜锥细胞快速激活，让驾驶员的明适应时间缩短，让驾驶员在短时间内建立清晰的视觉感知。而中间段是高速公路隧道中体行驶区域，引入中性色温（4000K-5000K）光源，则可以让路面能见度与驾驶员视觉舒适度得以平衡，防止因色温过度或过低，而出现视觉疲劳。出口段则是驾驶员从隧道暗环境重新进入明亮环境的过渡段，则可引入低色温（2700K-3500K）光源，此光谱有较多红光成分，可让驾驶员的眩光效应得以缓解。如某高速公路隧道LED改造项目显示，改造后驾驶员视认距离显著提升，对障碍物及交通标志的识别准确率提高，事故率下降，充分证明光谱工程通过优化视觉环境，直接提升了行车安全水平。

2.2 多模态感知：智能控制系统的动态响应能力

基于物联网与人工智能技术的智能控制系统，通过融合雷达、摄像头、光照传感器等多源数据，构建了对照明参数的实时优化机制。雷达传感器可精准检测车辆位置、速度及车道分布，摄像头能识别车辆类型（如轿车、货车、客车）及行驶状态，光照传感器则实时监测隧道内外的光照强度。系统根据这些多模

态数据，动态调整灯具亮度与照射范围，实现按需照明。当检测到重型货车通过时，系统自动增强该车道照明强度，因货车车身高、盲区大，提升照明可帮助驾驶员更清晰地观察路面坑洼、障碍物及相邻车道情况，降低侧翻、刮擦等事故风险。在雨雾天气下，系统通过降低色温、提高显色指数，增强光线穿透力。低色温光线在雨雾中散射较少，能更集中地照射路面，而高显色指数则保证光线对物体颜色的真实还原，帮助驾驶员准确判断路面状况及交通标志信息。某智能照明试点隧道运行数据显示，系统响应时间短，能在车辆进入隧道前完成照明参数调整，且因照明不足引发的事故零发生，表明多模态感知技术通过实时匹配照明与交通需求，有效保障了行车安全。

2.3 光环境补偿：洞内外亮度衔接的平滑过渡

高速公路隧道洞口会存在“黑洞效应”与“白洞效应”，这也是对驾驶员行车安全造成威胁的重要安全隐患。黑洞效应指白天时，隧道外亮度高，隧道内亮度低，驾驶员从明亮环境进入隧道时，因亮度骤降产生视觉盲区；白洞效应则指夜间时，隧道外亮度低，隧道内亮度高，驾驶员从隧道内驶出时，因眩光失控导致操作失误。针对这一问题，提出基于洞外亮度监测的动态补偿策略。通过在隧道入口设置高精度照度计，实时采集自然光强度，并传输至中央控制器。控制器根据预设算法（如亮度梯度递减模型），计算隧道内所需照明强度，实现洞内外亮度的无缝衔接。当洞外亮度高时，系统逐步降低入口段照明强度，形成从高亮度到低亮度的平滑过渡，避免驾驶员因亮度突变产生视觉不适；当洞外亮度低时，系统增强出口段照明强度，同时调整色温与显色指数，防止眩光产生。某山区隧道光环境改造项目表明，改造后驾驶员明适应时间缩短，对洞口区域障碍物的识别速度加快，且未发生因洞口亮度突变引发的事故，证明光环境补偿技术通过消除视觉干扰，为驾驶员提供了更安全的行车环境。



3 节能优化技术的综合效益与实施路径

3.1 能源节约与碳排放削减的量化分析

LED光源凭借其高光效特性，在同等照明需求下

可大幅降低电能消耗。传统气体放电光源光效普遍低于 100lm/W，而 LED 光源光效可达 150lm/W 以上，部分高端产品甚至超过 200lm/W。以某双洞隧道为例，改造前采用高压钠灯照明，年度耗电量高，主要因钠灯光效低且需长期满负荷运行。改造后替换为 LED 灯具，并配套智能调光系统，根据交通流量与洞外亮度动态调整照明强度，年度耗电量大幅下降。按每度电碳排放量计算，改造后年减排二氧化碳量可观，相当于种植大量树木的碳汇能力。这种减排效益不仅响应了国家“双碳”战略目标，也为隧道运营单位带来了直接的经济收益。电费支出方面，改造后年度电费降低，节省的资金可用于隧道其他设施的维护与升级。此外，LED 光源寿命长，通常可达数万小时，减少了灯具更换频率，进一步降低了维护成本与材料浪费。从全生命周期角度看，LED 照明系统的总拥有成本（包括初始投资、运行维护及能耗）远低于传统照明系统，实现了经济效益与环境效益的双赢。

3.2 行车安全指标的量化提升

节能优化技术通过改善照明质量，对行车安全产生了多维度积极影响。某大学交通实验室利用高精度驾驶模拟器，对比传统照明与优化照明系统下的驾驶员行为数据。结果显示，在优化照明系统中，驾驶员反应时间缩短，因光线均匀度提升，视觉干扰减少，驾驶员能更快识别路面障碍物与交通标志。对突发障碍物的识别准确率提升，得益于 LED 光源的高显色指数与智能调光系统对局部照明的增强。例如，当模拟车辆在隧道内突然变道时，优化照明系统下驾驶员能更早发现并作出避让动作。现场事故统计数据也印证了这一结论，改造后隧道事故类型由追尾、刮擦为主转变为轻微刮蹭为主，事故严重程度显著降低。分析原因，优化照明系统消除了传统照明中的“斑马效应”与亮度突变问题，路面照度均匀度提高，驾驶员视觉疲劳减轻，注意力更集中，从而减少了因视觉判断失误引发的事故。此外，洞内外亮度衔接的平滑过渡也降低了“黑洞效应”与“白洞效应”对驾驶员的冲击，进一步提升了行车安全性。

参考文献：

- [1] 张永征.高速公路隧道照明系统的节能设计及优化[J].科学技术创新,2022,(26):157-158.
- [2] 任永航.高速公路隧道照明系统的节能设计与优化[J].交通建设与管理,2022,(Z2):116-118.
- [3] 公海.对高速公路中隧道照明系统的节能设计与优化的分析[J].交通节能与环保,2021,8(03):82-84.
- [4] 许卫军.高速公路隧道照明系统的节能设计及优化[J].中国高新技术企业,2021,(15):35-36.



3.3 技术实施路径与标准化建设

推动节能优化技术的广泛应用，需构建“技术-标准-政策”三位一体的协同实施路径。技术层面，重点研发高可靠性 LED 驱动电源，解决传统电源效率低、寿命短的问题；开发多传感器融合算法，实现雷达、摄像头、光照传感器等数据的精准处理与协同控制；部署边缘计算设备，提升系统响应速度与数据处理能力，确保照明参数调整的实时性。标准层面，制定《隧道照明节能设计规范》，明确 LED 光源的光谱参数（如色温、显色指数）、调光范围（如 0%-100% 无级调光）及控制策略（如基于交通流的动态调光模型）等技术指标，为设计、施工与验收提供统一依据。政策层面，出台财政补贴政策，对采用节能优化技术的隧道项目给予资金支持；建立能耗考核机制，将隧道照明能耗纳入高速公路运营评级体系，对达标单位给予税收优惠或财政奖励，对未达标单位进行处罚或限期整改。例如，某省通过上述政策组合，有效激发了运营单位采用节能技术的积极性，推动了一批隧道照明改造项目的实施，实现了技术普及与行业升级。

4 结语

总之，高速公路隧道照明机电系统的节能优化，是破解能源浪费与行车安全矛盾的关键路径。通过 LED 光源的光谱工程、智能控制系统的多模态感知及光环境的动态补偿，可实现照明质量与能效的双提升。这种优化不仅降低运营成本与碳排放，更通过消除视觉干扰、缩短反应时间，为驾驶员提供清晰、舒适的行车环境，从根本上减少交通事故风险。未来，随着物联网、人工智能技术的深度融合，隧道照明将向“自感知、自适应、自修复”的智慧化方向发展，为构建安全、高效、绿色的交通体系提供坚实支撑。