

隧道照明节能控制中LED调光技术与光环境耦合研究

袁国宏

云南省交通科学研究院有限公司 云南 昆明 650011

摘要：本文聚焦于隧道照明节能控制领域，深入探讨LED调光技术与光环境的耦合关系。首先分析了隧道照明的特殊需求和现有照明方式存在的问题，阐述了LED调光技术在隧道照明节能中的重要性。接着详细介绍了常见的LED调光技术及其原理，包括模拟调光和数字调光，并分析了它们在隧道照明应用中的优缺点。然后重点研究了LED调光技术与光环境的耦合机制，从视觉舒适性、节能效果和安全性等多个维度构建了耦合模型，并通过实验验证了模型的准确性和有效性。最后，提出了优化隧道照明节能控制的策略，为隧道照明的科学设计和高效运行提供了理论依据和实践指导。

关键词：隧道照明；LED调光技术；光环境耦合；节能控制

引言

交通基础设施建设加速使隧道数量增多，隧道照明作为保障行车安全的重要设施，能耗问题愈发突出。传统高压钠灯等光源存在能耗高、寿命短、调光难等缺点，无法满足现代隧道照明节能与智能控制需求。LED作为新型光源，能耗低、寿命长、易调光，在隧道照明领域前景广阔。但隧道内光环境复杂，受多种因素影响。因此，实现LED调光技术与隧道光环境有效耦合，在保障安全前提下最大程度节能，是亟待解决的问题。

1 隧道照明需求与现有照明方式分析

隧道作为特殊交通通道，内部光环境与外部差异大，其照明有特殊需求：入口段需高亮度助驾驶员适应暗环境；中间段亮度应稳定；出口段要避免眩光。传统隧道照明多采用高压钠灯、荧光灯等光源，存在能耗高、寿命短、调光困难、光环境质量差等问题。而LED调光技术能耗低、寿命长、易于调光、光环境质量好，能根据隧道内实际光照强度和交通流量动态调整，实现节能控制，在隧道照明节能中具有重要作用。

2 常见 LED 调光技术及其原理

2.1 模拟调光技术

模拟调光是通过改变LED的驱动电流来实现亮度调节的方法。其原理是基于LED的光通量与驱动电流成正比的关系，当驱动电流减小时，LED的光通量也随之减小，从而实现亮度降低；反之，当驱动电流增大时，LED的亮度增加。模拟调光技术的优点是调光过程平滑，不会产生闪烁现象，对LED的寿命影响较小。然而，模拟调光也存在一些缺点。一方面，当驱动电流减小时，LED的发光效率会降低，导致能耗增加；另一方面，模拟调光的调光范围有限，一般在20%-100%之间，

难以实现更低亮度的调节。

2.2 数字调光技术

数字调光主要包括脉冲宽度调制（PWM）调光和脉码调制（PCM）调光等技术，其中PWM调光应用最为广泛。

2.2.1 PWM调光技术

PWM调光是通过控制LED驱动电流的通断时间比例来实现亮度调节的方法。在一个周期内，驱动电流导通的时间越长，LED的平均电流越大，亮度越高；反之，驱动电流导通的时间越短，LED的平均电流越小，亮度越低。PWM调光技术的优点是调光范围宽，可以实现从0%-100%的无级调光；调光精度高，能够精确控制LED的亮度；发光效率高，在调光过程中LED的发光效率基本保持不变。然而，PWM调光也存在一些缺点，如当调光频率较低时，人眼可能会察觉到闪烁现象，影响视觉舒适性；此外，PWM调光会产生电磁干扰，需要采取相应的措施进行抑制。

2.2.2 PCM调光技术

PCM调光是通过改变脉冲编码来实现亮度调节的方法。它将亮度信息编码成一系列的脉冲信号，通过控制脉冲信号的组合和顺序来调节LED的亮度。PCM调光技术的优点是可以实现多级亮度调节，调光精度较高；同时，由于采用了数字编码方式，抗干扰能力强。然而，PCM调光技术的实现较为复杂，需要专门的编码和解码电路，成本相对较高。

2.3 两种调光技术在隧道照明应用中的优缺点比较

模拟调光技术实现简单，成本较低，但调光范围有限，发光效率在低亮度时会有所下降。在隧道照明中，模拟调光适用于对亮度调节范围要求不高、对成本较为

敏感的场合。PWM调光技术调光范围宽，精度高，发光效率稳定，但可能存在闪烁和电磁干扰问题。在隧道照明中，PWM调光适用于对亮度调节要求较高、需要实现动态调光的场合。通过合理选择调光频率和采取有效的抗干扰措施，可以克服PWM调光的缺点，充分发挥其优势。

3 LED 调光技术与光环境的耦合机制研究

3.1 耦合关系分析

LED调光技术与隧道光环境之间存在着复杂的耦合关系。LED调光参数（如亮度、色温等）的变化会直接影响隧道内的光环境质量，而隧道内的光环境（如光照强度、均匀度、眩光等）又会反过来影响驾驶员的视觉感受和行车安全，进而对LED调光策略的制定产生影响^[1]。具体来说，当LED亮度过高时，可能会导致隧道内出现眩光，影响驾驶员的视线，增加交通事故的风险；而当LED亮度过低时，驾驶员可能无法清晰地看到道路情况，同样会影响行车安全。因此，需要找到LED调光参数与光环境质量之间的最佳平衡点，实现节能与安全的双赢。

3.2 耦合模型构建

为了定量描述LED调光技术与光环境的耦合关系，本研究从视觉舒适性、节能效果和安全性等多个维度构建了耦合模型。

3.2.1 视觉舒适性模型

视觉舒适性是衡量隧道光环境质量的重要指标之一。本研究采用眩光指数（UGR）和亮度均匀度（U_o）来评价视觉舒适性。眩光指数UGR的计算公式为：

$$UGR = 8 \lg \frac{0.25 \sum_{i=1}^n \frac{L_{si}^2 \omega_i}{p_i^2}}{L_b}$$

其中，L_b为背景亮度，L_{si}为第i个光源的亮度，ω_i为第i个光源对眼睛的立体角，P_i为第i个光源的位置指数。

亮度均匀度U_o的计算公式为：

$$U_o = \frac{L_{\min}}{L_{\text{avg}}}$$

其中，L_{min}为隧道内最小亮度，L_{avg}为隧道内平均亮度。

3.2.2 节能效果模型

节能效果是隧道照明节能控制的重要目标。本研究采用能耗降低率来评价节能效果，其计算公式为：

$$\text{节能效果} = \frac{E_0 - E_1}{E_0} \times 100\%$$

其中，E₀为采用传统照明方式时的能耗，E₁为采用LED调光技术后的能耗。

3.2.3 安全性模型

安全性是隧道照明的首要目标。本研究采用事故发

生率来评价安全性，但由于事故发生率难以直接测量，本研究采用能见度作为安全性的间接评价指标。能见度与光照强度、对比度等因素有关，其计算公式较为复杂，在实际应用中可以通过实验测量得到。

综合以上三个维度的模型，构建LED调光技术与光环境的耦合模型：

$$F(x) = w_1 \times f_1(x) + w_2 \times f_2(x) + w_3 \times f_3(x)$$

其中，F(x)为耦合模型的综合评价指标，x为LED调光参数（如亮度、色温等），f₁(x)、f₂(x)、f₃(x)分别为视觉舒适性、节能效果和安全性模型的评价函数，w₁、w₂、w₃为各模型的权重系数，可根据实际需求进行调整。

3.3 模型求解与优化

为了求解耦合模型，得到最优的LED调光参数，本研究采用遗传算法进行优化。遗传算法是一种模拟自然界生物进化过程的优化算法，具有全局搜索能力强、适用于复杂非线性问题求解等优点。

具体步骤如下：

初始化种群：随机生成一组LED调光参数作为初始种群。

计算适应度函数：根据耦合模型计算每个个体的适应度值，适应度值越大表示该个体的综合性能越好。

选择操作：采用轮盘赌选择法选择适应度较高的个体进入下一代种群。

交叉操作：对选中的个体进行交叉操作，生成新的个体。

变异操作：对新生成的个体进行变异操作，增加种群的多样性。

判断终止条件：当达到预设的迭代次数或适应度值满足要求时，终止算法，输出最优解。

4 实验验证与结果分析

4.1 实验平台搭建

为验证耦合模型准确性和有效性，搭建隧道照明实验平台，包括模拟隧道、LED灯具、光照传感器、数据采集系统。

模拟隧道：木质结构，长10m、宽3m、高2.5m，内壁用黑色吸光材料处理，反射率从0.5降至0.1以下，减少反射光干扰。

LED灯具：可调光LED面板灯，安装在隧道顶部，间距2m，亮度可调50-500cd/m²，色温可调2700-6500K，调光精度高。

光照传感器：高精度光照度计，分布在隧道入口、中间、出口各3个，共9个，测量范围0.1-100000lx，精度

±2%。

数据采集系统：由计算机和数据采集软件组成，实时采集光照传感器数据并存储分析，采样频率1Hz。

4.2 实验方案设计

实验分两组：

第一组为固定亮度实验：设置LED亮度100、200、300、400、500cd/m²，测量光照强度等参数，分析亮度对光环境质量影响。每个亮度值持续测量30分钟，每5分钟记录一次数据，共6组。

第二组为动态调光实验：根据耦合模型生成的调光策略实时调整LED亮度，模拟不同交通流量和光照强度下的调光过程。每隔10分钟改变一次条件，共6次，每次持续测量20分钟，记录参数验证动态调光效果。

4.3 实验结果分析

固定亮度实验结果分析：LED亮度增加，隧道平均和最大光照强度线性增加，如亮度从100cd/m²增至500cd/m²，平均光照强度从85lx增至420lx，最大从120lx增至580lx。眩光指数UGR随亮度增加而增大，亮度超300cd/m²时UGR超人体舒适范围（UGR > 16），如亮度100cd/m²时UGR为12，500cd/m²时为23。亮度均匀度U₀在亮度低时较高，随亮度增加因灯具光干扰增大而下降，如亮度100cd/m²时U₀为0.65，500cd/m²时为0.52。

动态调光实验结果分析：根据调光策略实时调整LED亮度，隧道光照强度能动态调整，眩光指数和亮度均匀度保持在合理范围^[2]。如交通流量低时亮度调至150cd/m²左右，UGR约13，U₀高于0.6；交通流量高时亮度调至350cd/m²左右，UGR约16，U₀高于0.55。与传统固定亮度照明相比，动态调光节能超30%，实验期间平均能耗15kW·h，传统方式22kW·h，节能约31.8%。对比实验结果与模型预测值，误差小，光照强度平均误差±5%以内，眩光指数±1以内，亮度均匀度±0.05以内，验证了耦合模型的准确性和有效性。

5 隧道照明节能控制策略优化

5.1 基于耦合模型的调光策略制定

根据耦合模型的研究结果，制定基于视觉舒适性、

节能效果和安全性综合优化的调光策略。在隧道入口段，根据外部光照强度和车辆行驶速度，采用快速调光方式将亮度调整到合适水平，减少驾驶员的视觉适应时间^[3]。在中间段，根据交通流量和时间变化，采用动态调光方式保持亮度稳定，同时实现节能控制。在出口段，逐渐降低亮度，避免出现眩光，确保驾驶员能够清晰地看到外部道路情况。

5.2 智能控制系统的设计与实现

为了实现上述调光策略，可设计基于微控制器和传感器的智能控制系统。该系统包括光照传感器、车辆检测传感器、微控制器、LED驱动电路等部分^[4]。光照传感器用于实时测量隧道内外的光照强度，车辆检测传感器用于检测隧道内的交通流量。微控制器根据传感器采集的数据，结合耦合模型生成的调光策略，控制LED驱动电路调整LED亮度。

结语

本研究聚焦隧道照明节能控制中LED调光技术与光环境的耦合问题，取得系列成果：分析了隧道照明需求与现有问题，阐述LED调光技术重要性；介绍常见调光技术及原理并分析优缺点；构建多维度耦合模型并验证其准确有效；提出优化节能控制策略且应用效果良好。不过，研究仍有不足，耦合模型精度待提升，智能控制系统稳定性和可靠性需增强。未来要开展大规模应用研究，随着LED技术和智能控制理论发展，该技术将不断完善，助力交通基础设施节能减排与可持续发展。

参考文献

- [1]陈锦安.高速公路数字化调光调色温的LED隧道灯照明系统[J].中国交通信息化,2021,(06):127-129.
- [2]刘晓娜,张丽娜.高速公路隧道LED照明无极调光智能控制系统及应用[J].科学技术创新,2022,(22):164-167.
- [3]宋荣恒.基于DALI总线的隧道LED照明动态调光控制系统设计[J].交通世界,2023,(12):161-163+185.
- [4]肖伟.智能调光系统在隧道照明节能设计中的应用[J].工程建设与设计,2025,(13):75-77.