

基于改进粒子群算法的地铁智慧照明系统节能优化

刘阳, 黄靖, 李金龙

(福建理工大学 电气与信息工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 地铁照明系统在运营中能耗较高, 传统控制方案难以兼顾节能与乘客舒适度。针对该问题, 提出了一种基于混合动态粒子群优化算法 (HDPSO) 的照明优化策略。首先, 利用 HDPSO 算法针对不同客流量条件计算照度与能耗, 并构建查询数据表; 随后结合长短期记忆网络基于历史数据预测未来时段的客流, 并将预测结果与实际客流数据加权融合并输入查表程序, 获取对应的照度与能耗; 最后, 通过 DIALux 建模仿真计算统一眩光值以评估乘客舒适度。实验结果表明, 该方法比固定照度方案降低能耗 16.53%, 比按时间段控制方案降低 11.60%, 且乘客舒适度更佳。

关键词: 地铁照明系统; HDPSO; 长短期记忆网络; DIALux 建模; 节能优化

中图分类号: TM923; TM615; TP18

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2026)03-0274-07

Energy-saving optimization of metro intelligent lighting system based on improved particle swarm optimization algorithm

LIU Yang, HUANG Jing, LI Jinlong

(School of Electrical and Information Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: During operation, metro lighting systems consume substantial energy, and conventional control strategies often struggle to balance energy efficiency with passenger comfort. To tackle this challenge, a lighting optimization strategy based on the hybrid dynamic particle swarm optimization (HDPSO) algorithm is proposed. First, the HDPSO algorithm is used to compute illumination and energy consumption under varying passenger flow conditions and to build a lookup table. Next, a long short-term memory (LSTM) network is used to predict the passenger flow in the future period based on historical data, and the predicted results are weighted and combined with actual data to serve as inputs for the lookup process, which then retrieves the corresponding illumination and energy consumption values. Finally, a DIALux modeling and simulation calculates the unified glare rating (UGR) to assess passenger comfort. Experimental results show that, this method reduces energy consumption by 16.53% compared with the fixed illumination scheme and 11.60% compared with the time-segmented control scheme, and it provides better passenger comfort.

Keywords: metro lighting system; HDPSO; LSTM; DIALux modeling; energy-saving optimization

随着地铁客流量的持续增长, 其照明系统能耗问题愈发突出^[1], 成为地铁节能优化的关键环节。已有研究针对地铁照明能耗优化展开多方面的探索。Lai 等^[2]以南昌地铁站为案例, 利用 DI-

ALux 软件优化站厅布局, 验证了合理灯光配置在满足功能需求的同时可以有效降低能耗; 靳雨航^[3]通过分析地铁照明系统各区域能耗特点, 设计并实施了分区控制、感应调光等智能节能策略,

收稿日期: 2025-03-18

基金项目: 福州市“揭榜挂帅”项目 (2024-ZD-009); 福州市科技重大项目 (2024FZZD0106)

第一作者简介: 刘阳 (2001—), 男, 浙江湖州人, 硕士研究生, 研究方向: 地铁配电系统节能优化。

通信作者: 黄靖 (1975—), 男, 上海人, 教授, 硕士, 研究方向: 电力电子系统及其控制。

有效降低了照明能耗。在控制优化方面,智能算法也得到广泛应用,Yang等^[4]基于粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)构建了自然光与人工光结合的照明模型,通过设定约束条件搜索最佳亮度组合,实现了在满足照明需求的前提下降低日常能耗。

PSO是一种典型的群智能优化方法,通过个体最优与全局最优信息引导粒子逼近最优解,但其易陷入局部最优且后期易出现振荡^[5]。为此,齐铨等^[6]通过构建分层精英引导的社会学习机制,结合混沌初始化和极值扰动策略,增强了PSO的全局搜索能力与稳定性;吴鹏等^[7]引入混沌运动及邻域搜索并动态调整信号周期以增强其全局搜索能力;罗泽霖等^[8]融合遗传算法(genetic algorithm, GA)提出了PSO-GA,综合两者优势提升优化性能;林焰等^[9]则采用改进了惯性权重的自适应调整机制,有效缓解早熟收敛问题。

地铁照明优化的核心在于为不同时间段确定最优照度,而客流的时序变化是实现该目标的重要依据。由于客流量具有明显的时间依赖性和周期性,仅依赖历史统计或实时数据难以准确捕捉其趋势,从而影响优化效果^[10]。为此,本研究引入长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)进行客流预测,以提供更精确的优化输入。LSTM能够有效地捕捉和记忆长期依赖关系^[11],而地铁客流量数据本质上就是一种典型的时间序列数据,正适于借助LSTM进行建模与预测^[12]。

综上,本研究提出一种结合混合动态粒子群算法(hybrid dynamic particle swarm optimization, HDPSO)与LSTM的地铁照明优化策略,利用HDPSO求解不同客流水平下的最优照度与能耗,并采用LSTM预测客流,将预测与实际数据加权融合后查询映射表以获取指标以期在降低能耗的同时兼顾提升乘客舒适度。

1 混合动态粒子群算法设计

1.1 照度设计

本研究用到的地铁站内工作面照度计算方法为利用系数法^[13]。因灯具发光后部分光被自身及周围物体吸收,剩余光经过多次反射最终照射到工作面上,故平均照度如式(1)所示。

$$E = U \cdot \varphi \cdot N \cdot \frac{K}{A} \quad (1)$$

式中, E 表示工作面平均照度; ϕ 为灯具光通量; N 代表所需灯具数量; K 为维护系数(一般取0.7); A 是工作面面积; U 为利用系数,实际应用中可通过灯具利用系数表选择并计算。

不同的照明环境会影响人的情绪和舒适度^[14],因此,引入统一眩光值(unified glare rating, UGR)来量化眩光强度^[15],客观反映视觉舒适度。较低的UGR意味着较少眩光和更舒适的视觉体验;而较高的UGR则容易引发眩光不适,影响工作效率和视觉健康,如式(2)所示。

$$\text{UGR} = 8 \log_{10} \left(\frac{0.25 \sum_i \frac{L_i^2 \Omega_i}{x_i^2}}{L_b^{1.6}} \right) L_b \quad (2)$$

式中, L_i 为第*i*个灯具(或光源)在观察方向上的亮度, cd/m^2 ; Ω_i 为其对应的视在立体角, sr ; x_i 是用于修正不同位置眩光影响的位置指数; L_b 为背景亮度, cd/m^2 ,即灯具背景或周围环境的平均亮度。

1.2 约束条件

地铁站实际客流量通常低于理论最大值。依据《建筑照明设计标准》GB 50034-2024^[16]及城市轨道交通照明标准(GB/T 16275-2008),地铁站照度一般要求在75 lx至200 lx之间(站厅200 lx,楼梯、自动扶梯及站台均150 lx)。本研究参考该标准,为智能照明系统设定照度上下限分别为250 lx和150 lx,约束条件如式(3)所示。

$$\text{s.t.} \begin{cases} Q_{\min} \leq Q \leq Q_{\max} \\ 150 \leq E \leq 250 \\ P_{\min} \leq P \leq P_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中, Q 为客流量, Q_{\max} 和 Q_{\min} 分别表示其上下限; P 为灯具功率, P_{\max} 和 P_{\min} 分别为其上下限。

1.3 目标函数

1.3.1 照度偏差

照度偏差项:采用平方误差度量实际照度与基于客流量动态调整得到的最优照度之间的差异,误差越小,照度精度越高。

1.3.2 能耗

能耗项:目标是优化灯具能耗以实现最小化。通常,光效在一定时间范围内是相对稳定的。为简化模型,假设照度与能耗呈线性关系。

1.3.3 客流量和功率的耦合关系

客流量和功率的耦合关系:通过标准化处理

建立人流量与功率的线性耦合关系,反映客流量增加时允许更高功率消耗。

目标函数越小,代表照度更精准、能耗更合理,并且对人流量的响应更合理,整体表现越好。最终的目标函数如式(4)所示。

$$\min_{Q,P} F(Q,P) = \alpha \left(\frac{E_{\text{req}}(Q) - f(P)}{E_{\text{req}}(Q)} \right)^2 + \beta \frac{P}{P_{\text{max}}} + \gamma \frac{Q}{Q_{\text{max}}} \cdot \frac{P}{P_{\text{max}}} \quad (4)$$

式中, α 为照度控制权重,取0.5; β 为能耗控制权重,取0.4; γ 为耦合项权重,取0.1; $f(P)$ 表示照度与能耗之间的线性关系; $E_{\text{req}}(Q)$ 是客流量 Q 变化下所需要的照度值,动态目标可以用线性模型表示,如式(5)所示。

$$E_{\text{req}}(Q) = E_{\text{min}} + (E_{\text{max}} - E_{\text{min}}) \frac{Q}{Q_{\text{max}}} \quad (5)$$

式中, E_{max} 和 E_{min} 分别表示照度的上下限。

1.4 粒子群算法

PSO算法中每个粒子分别通过式(6)和式(7)更新各自的速度和位置。

$$v_i(t+1) = \omega \cdot v_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (p\text{Best}_i - x_i(t)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (g\text{Best} - x_i(t)) \quad (6)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (7)$$

式中, v_i 为粒子 i 的速度; x_i 为粒子 i 的位置; ω 为惯性权重,用以平衡全局与局部搜索; c_1 、 c_2 为加速因子,控制粒子向个体和种群最优解靠近的速度; r_1 、 r_2 为 $[0, 1]$ 的随机数,增加搜索的随机性; $p\text{Best}_i$ 为第 i 个粒子的个体最优位置; $g\text{Best}$ 为全局最优位置。

1.5 改进粒子群算法

1.5.1 动态惯性权重

传统PSO中的固定惯性权重 ω 难以根据搜索动态调整:过大可能跳过全局最优,过小则易陷入局部最优。为提升全局搜索能力,本研究提出了一种多阶段动态惯性权重调整策略(初期(0%~30%迭代),采用指数递减加高斯扰动,增强全局搜索、防止过早收敛;中期(30%~70%迭代),使用非线性余弦衰减并引入贝塔分布扰动,实现全局与局部搜索平衡;后期(70%~100%迭代),恢复指数衰减,并用均匀分布扰动精细优化局部解。该策略能有效提升PSO的全局搜索能力,避免过早陷入局部最优。改进的惯性权重 ω_i 如式(8)所示。

$$\omega_i = \begin{cases} \omega_{\text{min}} + (\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}) \cdot e^{-\frac{t}{t_{\text{max}}}} + \sigma \cdot N(0, 1), & t < 0.3t_{\text{max}} \\ \omega_{\text{min}} + (\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}) \cdot \cos\left(\frac{\pi t}{2t_{\text{max}}}\right) + \sigma \cdot \text{betarnd}(p, q), & 0.3t_{\text{max}} \leq t < 0.7t_{\text{max}} \\ \omega_{\text{min}} + (\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}) \cdot e^{-\frac{t}{t_{\text{max}}}} + \sigma \cdot \text{rand}(0, 1), & t \geq 0.7t_{\text{max}} \end{cases} \quad (8)$$

式中, t_{max} 为最大迭代次数; t 为当前迭代次数; σ 为惯性调整因子,取0.1;betarnd为贝塔分布随机数生成器,其中, $p=1$, $q=3$; ω_{max} 为最大惯性权重,取0.9; ω_{min} 为最小惯性权重,取0.4。

引入动态惯性权重修改后的速度更新公式如式(9)所示。

$$v_i(t+1) = \omega_i \cdot v_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (p\text{Best}_i - x_i(t)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (g\text{Best} - x_i(t)) \quad (9)$$

式中, ω_i 为动态惯性权重。

1.5.2 分组策略与交叉变异

根据适应度排序,选取种群前 $\theta\%$ 的粒子作为精英,并直接保留至下一代,确保最优解不被遗忘;劣势粒子则采用带随机扰动的特殊速度更新规则,如式(9)、式(10)所示。

$$v_i(t+1) = \omega_i \cdot v_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (p\text{Best}_i - x_i(t)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (g\text{Best} - x_i(t)) + \eta \quad (10)$$

$$\eta \sim N(0, \sigma^2) \quad (11)$$

式中,随机变量 η 是一个服从均值为0,方差为 σ^2 的高斯分布,通过随机扰动跳出局部最优,增强全局探索能力。

此外,对于劣势粒子进行交叉操作,从精英粒子中随机选取两个父代,使用单点交叉生成新粒子,如式(12)所示。

$$x_i^{\text{new}}(j) = \begin{cases} x_p^{(1)}(j), & \text{if } j \leq j_c \\ x_p^{(2)}(j), & \text{if } j > j_c \end{cases} \quad (12)$$

式中, $x_p^{(1)}$ 和 $x_p^{(2)}$ 为父代粒子的位置; j_c 为随机生成的交叉点; $x_i^{\text{new}}(j)$ 表示第 i 个新粒子的第 j 个维度位置。

GA的变异策略能生成原始种群中未曾出现的基因模板,从而丰富种群多样性,帮助个体跳出局部最优并增强全局搜索能力。因此,对非精英粒子的功率维度 P 采用随机扰动和随机变异策略,生成具有差异化特性的粒子,如式(13)所示。

$$P_i^{new} = P_{min} + (P_{max} - P_{min}) \cdot rand() \quad (13)$$

式中,rand 会随机生成的[0,1]的数。

最后,将精英粒子与新生成的子代合并,形成下一代种群。

综上,HDPSO 是在 PSO 的基础上增加了动态惯性权重策略、分组策略以及 GA 中的交叉变异策略其算法流程如图 1 所示。

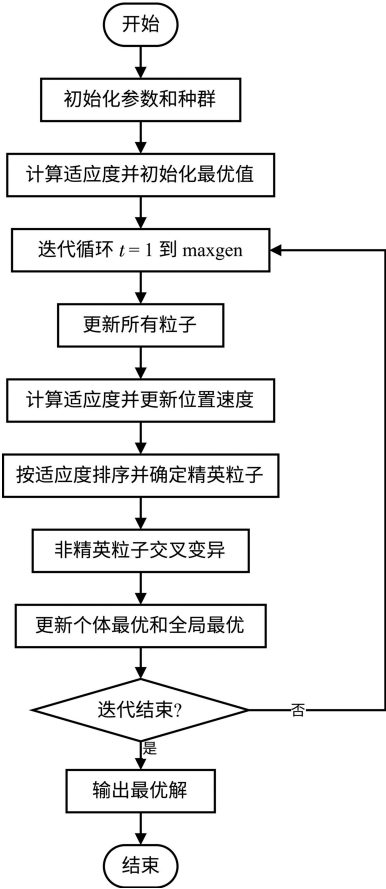


图 1 HDPSO 算法流程图

Fig.1 HDPSO algorithm flowchart

2 仿真实验分析

实验环境为 Intel(R) Core(TM) i5-9300H CPU@ 2.40 GHz、8 GB 内存,软件按版本为 MATLAB R2023a。初始化粒子数设为 $M = 30$,最大迭代次数为 $maxgen = 50$ 。

参数配置如下:PSO 与 PSO-GA 算法均采用惯性权重 0.5;线性递减惯性权重粒子群算法(linearly decreasing inertia weight particle swarm optimization, LDIW-PSO)的惯性权重由 0.9 线性递减至 0.4;HDPSO 算法参数设定为 $c_1 = c_2 = 0.5, \omega_{max} = 0.9, \omega_{min} = 0.4, \sigma = 0.5$,以及 betarnd 函数中 $p = 1, q = 3$ 。

由图 2 可见,在客流量为 500 人的条件下,HDPSO 在 10 至 15 次迭代内迅速降低适应度并保持稳定,表明其收敛速度快且能迅速找到最优解;而其他算法在速度和精度上均略显不足,充分体现了 HDPSO 改进策略的优势和合理性。

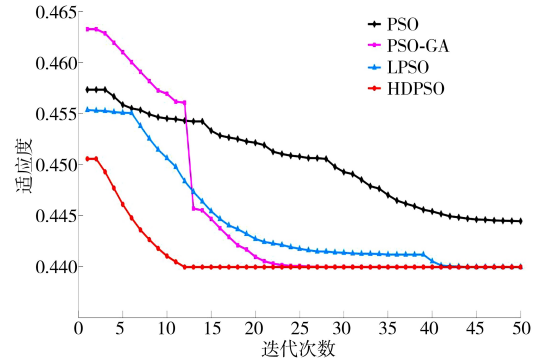


图 2 不同算法适应度进化过程对比

Fig.2 Comparison of fitness evolution process of different algorithms

在不同客流量条件下,各算法独立运行 20 次,统计目标函数适应度均值(见表 1)。结果反映出 HDPSO 算法照度求解更精准、能耗与客流量响应更合理,整体表现更好;而其他算法虽然偶尔会计算出全局最优解,但稳定性不足,易陷入局部最优。

表 1 目标函数仿真结果对比

Tab.1 Comparison of objective function simulation results

客流量/人	算法	最优值	最大值	平均值
200	PSO	0.370	0.379	0.376
	PSO-GA	0.353	0.372	0.360
	LDIW-PSO	0.353	0.383	0.366
	HDPSO	0.353	0.353	0.353
500	PSO	0.445	0.457	0.451
	PSO-GA	0.440	0.445	0.442
	LDIW-PSO	0.440	0.446	0.444
	HDPSO	0.440	0.441	0.440
900	PSO	0.589	0.592	0.590
	PSO-GA	0.566	0.566	0.566
	LDIW-PSO	0.575	0.579	0.576
	HDPSO	0.566	0.566	0.566

综上,HDPSO 在求解基于客流量的地铁照明

系统能耗优化问题时,寻优精度和收敛速度方面都有一定的提升,从对比结果看,HDPSO 算法的求解性能都优于其他 3 种算法。

3 客流量预测

在地铁照明优化中,客流量是影响照度需求的重要因素。完全依赖闸机或红外传感器数据会因检测延迟和波动导致调整滞后,从而影响乘客舒适度和能耗控制。例如,客流骤增时照度提升不及时会降低乘客体验;而客流骤减时仍保持高亮则造成能源浪费。为此,本研究采用 LSTM 预测短时客流,提前调整照度,提升系统智能化和稳定性。

实验数据取自福州市地铁 2 号线某站 2023 年 9 月 1 日至 12 月 30 日(每日 6:30—23:10,每 10 min 记录一次,共 101 时段),图 3 展示了该站工作日与非工作日的预测结果,为减少训练随机误差,进行了 3 次重复实验,其平均预测性能见表 2。

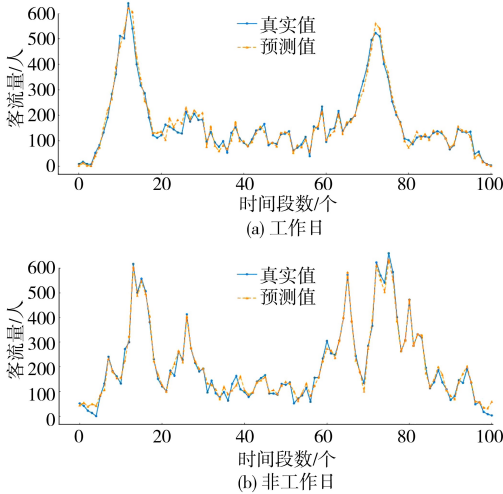


图 3 客流量预测值与实测值

Fig.3 Predicted and actual passenger flow values

从图 3 可见,工作日客流高峰相对集中呈双峰分布,而非工作日则较为分散,这主要反映了市民出行时间的差异。为客观评价模型预测性能,采用平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MRE)和均方根误差(RMSE) 3 个指标,如式(14)~式(16)所示。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (14)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \quad (15)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (16)$$

式中, y_i 为第 i 个样本的实际值; \hat{y}_i 为第 i 个样本的预测值; n 为样本总数。

从表 2 可见,LSTM 模型整体表现较好,各项指标均处于合理范围,能较准确捕捉客流趋势;但误差波动显示,在某些时段预测能力略受数据波动或突发事件影响,仍有优化空间。总体而言,LSTM 在客流预测中有较好的准确性和稳定性。

表 2 LSTM 预测性能

Tab.2 LSTM prediction performance

试验编号	MAE	MRE/%	RMSE
1	16.68	15.42	20.59
2	16.09	15.15	20.41
3	15.49	14.98	20.22
平均值	16.08	15.18	20.40

基于此,将当前检测的客流与 LSTM 预测的未来客流加权融合,实现精准照明调节,提前响应客流变化,避免调整滞后导致能耗浪费。加权公式如式(17)所示。

$$Q_{\text{fused}} = \lambda \cdot Q_{\text{detected}} + (1-\lambda) \cdot Q_{\text{predicted}} \quad (17)$$

式中, Q_{fused} 为加权融合后的客流量; Q_{detected} 为当前检测客流量; $Q_{\text{predicted}}$ 为 LSTM 预测的客流量; λ 为融合加权系数。

本研究采用相等权重($\lambda=0.5$)融合当前检测与 LSTM 预测数据,并通过与传统照度策略对比评估 LSTM 在节能中的贡献。

4 优化效果对比分析

4.1 能耗对比分析

传统地铁照明控制策略主要采用两种方案方案 1 固定 200 lx 的照度,低客流时浪费能源;方案 2 虽根据时段调节,但存在高峰时过高、低客流时不足的问题,既浪费能源又影响乘客舒适度。两种方案均缺乏动态调控,无法根据实际客流优化能耗与照度。本研究对工作日与非工作日的数据进行了对比,如图 4(a)与图 4(b)所示。

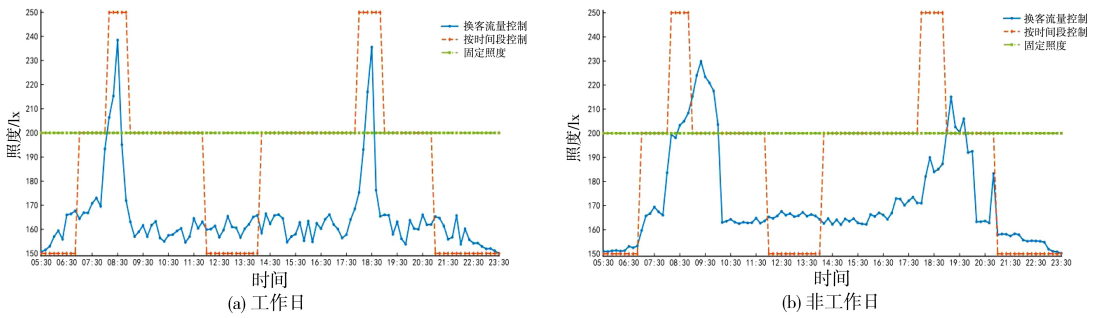


图 4 照度控制策略对比

Fig.4 Comparison of illumination control strategies

通过对比 3 种方案在工作日与非工作日的表现,可以得出:固定照度与按时间段控制方案都无法根据客流实时调节照度,导致低客流时仍维持高照度,造成能源浪费。相比之下,本研究提出的基于客流动态调控策略既满足照明需求,又有效降低能耗,表现出最佳的节能效果。表 3 基于某

站点数据与理论计算,展示了 3 种方案的能耗对比。可见,在相同客流条件下,优化后的照度控制系统有效降低了能耗。具体而言,基于客流量控制照度方案可使年能耗较固定照度方案降低约 16.53%,较时间段控制方案降低约 11.60%。

表 3 3 种方案能耗对比

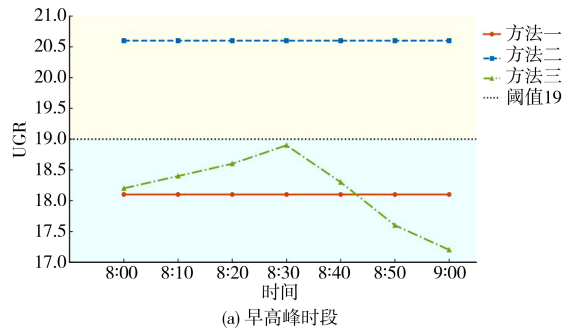
Tab.3 Comparison of energy consumption among three schemes

对比维度	方案 1 能耗/kWh	方案 2 能耗/kWh	方案 3 能耗/kWh	相较于方案 1 的节能率/%	相较于方案 2 的节能率/%
日能耗	153.19	144.65	126.16	17.64	12.78
年能耗	55 914.35	52 797.25	4 6670.49	16.53	11.60

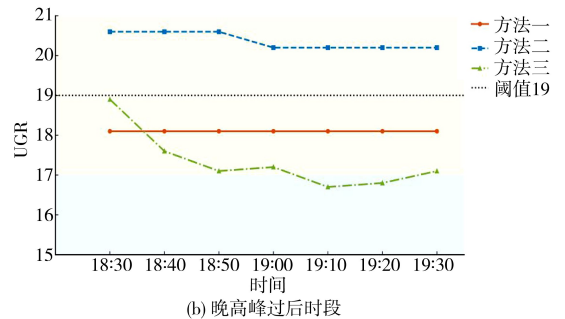
4.2 乘客舒适度对比分析

本研究采用 200 mm×1200 mm LED 面板灯(功率 21.5 W、光效 130 lm/W、色温 4 000 K)在 DIALux 中进行仿真。为验证不同方案下乘客的视觉体验,选取不同时段(10 min 节点)模拟 3 种照明方案的照度分布,记录实际照度和统一眩光值(unified glare rating, UGR)。其中 UGR 计算面设置为 0.5 m×0.5 m,布置于地铁站楼梯口附近,高度取人眼平均高度 1.5 m(详见图 5)。

人眼可接受 UGR 的阈值为 19^[17]。图 5(a)显示,早高峰时固定照度方案 UGR 较低且稳定;而方案 2 因高峰照度设置较高,UGR 始终在 20.6 左右,超出阈值;而本研究所提方案 UGR 动态变化且始终低于 19。图 5(b)反映晚高峰后情况,只有固定照度方案和所提方案满足视觉舒适要求,后者的 UGR 更低。综上,本研究所提方案在满足视觉需求的同时,最大限度降低眩光,提升了乘客舒适度。



(a) 早高峰时段



(b) 晚高峰过后时段

图 5 UGR 值对比

Fig.5 Comparison of UGR values

5 结束语

本研究提出了一种基于 HDPSO 的地铁智能照明控制方法,实现了基于客流量动态调整照明策略,相较于固定照度方案能节省 16.53% 的能耗,相较于按时间段调控方案能节省 11.60% 的能

耗。所提方案有效降低能耗的同时兼顾了乘客的舒适度,能让 UGR 维持在较低的水平。然而,目前的研究主要针对整体站点的照明优化,未区分站台、站厅、通道等区域。下一步工作将拓展当前照明控制策略,构建更精细的自适应区域照明控制模型,进一步提升能效与舒适度。

参考文献:

- [1] 王福文,梁帅文,冯爱军.2023 年我国城市轨道交通数据统计与发展分析[J].隧道建设(中英文),2024,44(2):393-400.
- [2] LAI X D, DAI M Y, RAMEEZDEEN R, et al. Energy saving based lighting system optimization and smart control solutions for rail transportation: evidence from China[J]. Results in Engineering, 2020, 5: 100096.
- [3] 靳雨航.地铁智能照明系统能耗分析及节能优化策略[J].光源与照明,2025,(1):22-24.
- [4] YANG P, CHUN J F. Study on modified particle swarm optimization for indoor lighting control[J]. Journal of Computational Methods in Sciences & Engineering, 2018:1-9.
- [5] 陈洪芳,吴欢,王子帅,等.基于改进粒子群算法的三坐标测量机最佳测量区域评价方法[J].仪器仪表学报,2024,45(11):197-205.
- [6] 齐铖,谢军伟,王雪,等.基于精英引导的社会学习粒子群优化算法[J].西北工业大学学报,2024,42(5):948-958.
- [7] 吴鹏,叶宝林,吴维敏,等.基于改进混沌粒子群算法的交通信号控制[J].计量学报,2024,45(12):1876-1884.
- [8] 罗泽霖,孟景辉,罗依梦,等.基于 PSO-GA 的 ZPW-2000A 型轨道电路调谐区性能感知方法[J].铁道学报,2024,46(8):89-95.
- [9] 林焰,辛登月,卞璇屹,等.改进自适应惯性权重粒子群算法及其在核动力管道布置中的应用[J].中国舰船研究,2023,18(3):1-12,25.
- [10] 连连,穆雅伟,宗学军,等.基于改进粒子群优化算法优化 LSTM-AM 的公交客流量预测[J].控制工程,2025,32(2):216-225.
- [11] ZHAO L X, JIN H, ZOU X T, et al. Short-term passenger flow forecasting for rail transit considering chaos theory and improved EMD-PSO-LSTM-Combined Optimization[J]. Journal of Advanced Transportation, 2023: 9524966.
- [12] DONG N, LI T Z, LIU T H, et al. A method for short-term passenger flow prediction in urban rail transit based on deep learning[J]. Multimedia Tools and Applications, 2023, 83(22):61621-61643.
- [13] 傅军栋,陈晴,邱运霞,等.基于光能传递方法的室内光环境模拟[J].激光与光电子学进展,2019,56(11):182-188.
- [14] ZHANG X, QIAO Y D, WANG H Y, et al. Lighting environmental assessment in enclosed spaces based on emotional model[J]. The Science of the Total Environment, 2023, 870: 161933.
- [15] 万相锋.基于多因素数据耦合的动态眩光评价方法研究[D].西安:西安理工大学,2024.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑照明设计标准:GB 50034-2024[S].北京:中国计划出版社,2024.
- [17] 付金池,陈登凯,张献,等.基于 DIALux 的飞机客舱照明设计方法[J].西北工业大学学报,2024,42(1):53-61.

(责任编辑:方素华)