

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.03.010

# 基于乘客密度的城市轨道交通 站台照明节能控制方法

毛建<sup>1</sup>, 张宁<sup>2</sup>, 章澜岚<sup>3</sup>, 王澳庆<sup>2</sup>, 刘家俊<sup>2</sup>, 张恒文<sup>4</sup>, 王浩<sup>3</sup>, 温龙辉<sup>2</sup>

(1. 南京轨道交通产业发展有限公司, 南京 210017; 2. 东南大学教育部智能运输系统研究中心, 南京 210018;  
3. 南京熊猫信息产业有限公司, 南京 210016; 4. 中车城市交通规划设计研究院有限公司, 南京 211800)

**摘要:** 当前城市轨道交通站台照明控制方法存在着控制方式简单、控制准确度低等问题, 导致能耗严重浪费, 也无法为乘客提供舒适的照明环境。根据城轨站台客流特点, 结合站台区域功能特征和乘客心理需求, 提出一种基于乘客密度的城轨站台照明节能控制方法。该方法首先通过分析城轨站台空间特征和乘客心理时间变化特点, 建立站台不同时段不同区域乘客密度和站台区域照度的函数关系, 然后建立以站台照明能耗最优为目标, 站台照度需求为约束, 灯具调光系数为控制变量的线性规划优化模型, 最后采用单纯形法对模型进行求解并进行实例分析。结果表明, 在小客流车站, 本文方法与目前常规控制方式相比, 在早高峰、晚高峰和平峰时段, 站台照明能耗降低分别达 27.68%、38.16%和 38.87%, 并保证区域照度在合理区间, 可以有效降低城轨站台照明能耗, 提高站台光环境舒适性。

**关键词:** 城轨站台; 照明节能; 乘客密度; 线性规划; 单纯形法

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2025)03-0071-08

## Energy-Saving Lighting Control Method for Urban Rail Transit Platforms Based on Passenger Density

MAO Jian<sup>1</sup>, ZHANG Ning<sup>2</sup>, ZHANG Lanlan<sup>3</sup>, WANG Aoqing<sup>2</sup>, LIU Jiajun<sup>2</sup>,  
ZHANG Hengwen<sup>4</sup>, WANG Hao<sup>3</sup>, WEN Longhui<sup>2</sup>

(1. Nanjing Rail Transit Industry Development Co., Ltd., Nanjing 210017; 2. Intelligent Transportation Systems Research Center, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210018; 3. Nanjing Panda Information Industry Co., Ltd., Nanjing 210016; 4. CRRC Urban Transit Planning and Design Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211800)

**Abstract:** Current lighting control methods for urban rail transit platforms suffer from simplistic control mechanisms and low accuracy, leading to significant energy waste and failure to provide passengers with a comfortable lighting environment. Based on the characteristics of passenger flow, zonal functional features, and psychological needs of passengers, this paper proposes an energy-efficient lighting control method for urban rail transit platforms using passenger density as the primary parameter. The method first establishes a functional relationship between passenger density in different zones and time periods and the required illuminance levels by analyzing the spatial characteristics of platforms and temporal variations in passenger psychology. Subsequently, a linear programming optimization model is developed with the goal of minimizing platform lighting energy consumption, subject to illuminance requirements, using luminaire dimming coefficients as control variables. The model is solved using the simplex method, and case studies are conducted. The results show that in low-passenger-flow stations, compared to

收稿日期: 2024-07-03 修回日期: 2025-02-27

第一作者: 毛建, 男, 硕士, 正高级工程师, 从事自动控制理论与控制工程工作, 792571648@qq.com

基金项目: 中国城市轨道交通协会重大专项(CAMET-KY-2022007); 国家重点研发计划资助项目(2020YFB1600701)

引用格式: 毛建, 张宁, 章澜岚, 等. 基于乘客密度的城市轨道交通站台照明节能控制方法[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(3): 71-78.

MAO Jian, ZHANG Ning, ZHANG Lanlan, et al. Energy-saving lighting control method for urban rail transit platforms based on passenger density[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(3): 71-78.

conventional control methods, the proposed method reduces platform lighting energy consumption by 27.68%, 38.16%, and 38.87% during morning peak, evening peak, and off-peak periods, respectively, while maintaining illuminance levels within the appropriate range. This method effectively reduces energy consumption and enhances the lighting comfort of urban rail transit platforms.

**Keywords:** urban rail transit platforms; energy-saving lighting; passenger density; linear programming; simplex method

随着城轨的快速发展,其能耗问题日益突出,乘客对乘车舒适度的要求也越来越高<sup>[1]</sup>。此外,由于城轨车站几乎完全封闭,主要依靠人工照明系统提供光照,导致人工照明系统需要长时间、高强度运行,产生巨大的电能消耗。有研究表明,城轨照明系统占城轨车站系统总设备负荷的14.2%~16.1%<sup>[2]</sup>。与此同时,城轨车站照明环境也对乘客舒适度有着重要影响<sup>[3]</sup>。站台是乘客聚集程度较高、乘客密度变化较大的空间,具有一定的照明节能空间。但目前城轨站台照明控制方法存在着控制方式简单、控制准确率低等问题<sup>[4]</sup>,不仅导致能耗的严重浪费,也无法为乘客提供舒适的照明环境,因此改善城轨站台照明控制方法对于降低照明系统能耗、提升照明环境舒适性具有重要意义。

近年来,随着LED的发展,其被各城市城轨广泛应用。LED光源具有照明质量好、能耗低、可智能调控等优点<sup>[5]</sup>。目前国内济南、南京、深圳等城市部分车站已采用LED智能调控光源,取得了良好的节能效果。据统计,LED智能调控光源可节约20%~30%的电能<sup>[6]</sup>。与此同时,针对照明节能控制方法,国内外学者也进行了深入研究。CASALS等<sup>[7]</sup>使用K-means聚类方法对城轨车站客流数据进行聚类分析,并根据车站客流量对照明系统进行统一调控;Lai等<sup>[2]</sup>提出了一种结合BECH能源分析软件和DIALux软件的照明系统智能模型,以实现城轨站厅的自动调光;JIN等<sup>[8]</sup>对人员存在情况进行预测建模,以实现预测调光。冯冬青等<sup>[9]</sup>提出了考虑自然光变化的室内智能照明控制方法;VIANI<sup>[10]</sup>提出了一种基于使用者行为位置信息的自适应照明控制系统;许馨尹等<sup>[11]</sup>提出了一种考虑自然光 and 用户光照需求的照明控制方法;段中兴等<sup>[12]</sup>提出了一种考虑城轨光环境照度和色温的照明控制方法;汤尧等<sup>[13]</sup>根据城轨车站的空间特征,设计了一种

基于人群密度的照明动态控制方法。

然而,现有研究大多仅从节能的角度出发进行研究,没有充分考虑乘客心理因素,也没有充分考虑城轨站台空间特征。针对以上问题,本文充分考虑城轨站台空间特征和乘客心理,提出一种基于乘客密度的照明控制方法,在满足节能性要求的同时,提高乘客的舒适性。

## 1 城轨站台照明需求分析

### 1.1 照度等级确定

目前国内针对城轨站台空间的照明要求主要以《城市轨道交通照明》(GB/T 16275—2008)规定的标准值(即照度最低值)作为参考,进行下限约束<sup>[4]</sup>。而国内部分城轨站存在照度过高现象,造成过度照明<sup>[13]</sup>。过度照明有悖于城轨绿色发展的原则,且会造成能源浪费、乘客视觉疲劳等问题。因此,本文增加照度上限值,用以避免过度照明。照度下限值主要与乘客基本需求和安全性相关,照度上限值主要与乘客舒适度和节能性相关。

国内城轨车站站台两侧候车区域平均照度值范围为183~316 lx,站台中间区域为135~280 lx,楼梯区域为102~189 lx<sup>[3]</sup>。而在GB/T 16275—2008标准中,将站内楼梯/自动扶梯的照度标准值设定为150 lx,站台(地下)标准值设定为150 lx。经综合考虑,本文参照标准照度梯度设定,以50 lx为梯度,将照度等级分为5级,分别为150、200、250、300和350 lx。此外,考虑到照度均匀度的要求,同一区域内的照度上下限值不应相差100 lx以上。

### 1.2 站台区域功能需求

站台区域功能具有差异性,导致其照明需求有所不同。本文根据区域功能,将站台划分为候车区、走行区和楼梯区3个区域,如图1所示。其中,绿色区域是候车区,黄色区域是走行区,红色区域是楼梯区。

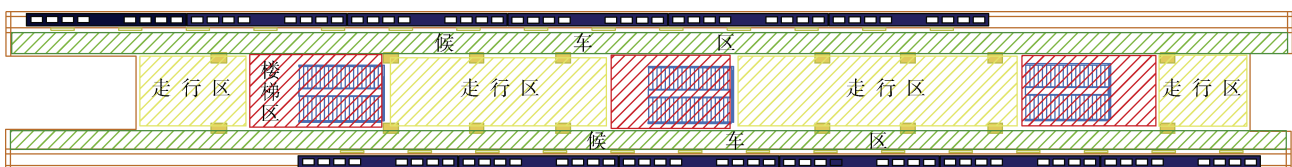


图1 城轨站台区域划分

Figure 1 Division of urban rail transit platform areas

下面将分析站台区域功能需求, 确定区域照度限值。参照标准, 本文将各调光区域下限值均设为 150 lx, 并进一步针对每个区域的特征讨论上限值。

1) 候车区为上下行站台门前的乘客候车区域。乘客在该区域进行上下车、候车等行为, 该区域具有乘客拥挤度大、逗留时间长、舒适性需求大等特征。因此, 该区域照度需满足乘客候车舒适度, 并考虑乘客上下车安全。故将该区域照度上限值确定为 250 lx。

2) 走行区为乘客行走区域, 乘客一般不在此停留, 需保证基本的照明需求, 并兼顾节能性, 因此将该区域照度上限值确定为 200 lx。

3) 楼梯区为乘客行走区域, 乘客一般不在此停留, 需保证基本的照明需求, 并兼顾节能性, 因此将其上限值确定为 200 lx。

### 1.3 乘客心理需求

城轨站台的照明环境影响乘客的舒适性。在站台不同区域, 乘客具有不同的心理需求。针对该特点, 对候车区、走行区和楼梯区限值做进一步讨论。

1) 候车区具有乘客交织度高、停留时间长的特点, 且乘客需要排队上下车, 因此对安全性和舒适性都有较高要求。高照度有利于保证乘客安全, 提升乘客的候车体验。因此, 候车区照度值具有高下限、高上限的特点。

2) 走行区为乘客行走区域, 一般不在此停留, 也无安全性需求, 故主要考虑节能性, 其照度具有低下限、低上限的特点。

3) 楼梯区是乘客需要注意安全的区域, 具有安全心理需求和节能性需求, 其照度具有高下限、低上限的特点。

以下分析将遵循各区域照度限值的特点进行设计。根据照明相关研究, 合理的高照度环境有利于提高人的满意度, 给人以清醒的体验感<sup>[15]</sup>。从满足乘客舒适性出发, 适当提高站台光环境照度可以提升乘客体验。但高照度会增加照明系统能耗, 故设计合理的照明控制方法可以兼顾节能性和舒适性。本文针对乘客群体特征设计符合其心理需求的照明控制方法, 以提高乘客的乘车体验。

本文根据客流特征将全天分为 3 个时段, 分别为早高峰、晚高峰和平峰, 见表 1。下面将对 3 个时段乘客的不同心理需求进行分析, 并遵循前文所述区域特点, 将 3 个时段的照明等级分为低等级、中等级和

高等级, 每个等级以 50 lx 为梯度。

表 1 照明时段划分

Table 1 Division of lighting periods

客流场景	时段
早高峰	7:00—9:00, 17:00—19:00
晚高峰	17:00—19:00
平峰	6:00—7:00, 9:00—17:00, 19:00—24:00

在平峰时段, 城轨站内乘客密度较低, 乘客出行目的以旅游、购物等为主, 乘客状态较好。因此从节能的角度出发, 该时段照明遵循站台区域功能需求的照度设定, 采用低等级照明, 如表 2 所示。

表 2 站台区域平峰时段照度限值

Table 2 Illuminance limits during off-peak periods

站台区域	照度下限值/lx	照度上限值/lx
候车区	150	250
走行区	150	200
楼梯区	150	200

在晚高峰时段, 站内乘客以上班族和学生为主<sup>[16]</sup>, 乘客具有疲惫、劳累的心理特征。且由于晚高峰乘客密度大, 站内环境拥挤, 会增加乘客烦躁、不安的体验感。所以, 照明应当能使乘客产生放松和安逸的感觉。因此, 晚高峰时段主要采用中等级照度(见表 3)。

表 3 站台区域晚高峰时段照度限值

Table 3 Illuminance limits during evening peak periods

站台区域	照度下限值/lx	照度上限值/lx
候车区	200	300
走行区	150	250
楼梯区	200	250

在早高峰时段, 乘客以上班族和学生为主<sup>[16]</sup>, 乘客具有昏睡、需要提高觉醒度的特点。此外, 在早高峰时段, 乘客密度大、拥挤度高、安全感低。所以, 照明应当能起到振奋乘客精神、提升乘客安全的作用。因此, 早高峰时段应采用高等级照度(见表 4)。

表 4 站台区域早高峰时段照度限值

Table 4 Illuminance limits during morning peak periods

站台区域	照度下限值/lx	照度上限值/lx
候车区	250	350
走行区	200	300
楼梯区	250	300

### 1.4 站台照明需求模型

研究表明<sup>[17]</sup>, 当车站内乘客密度较大时, 乘客将更容易产生烦躁、慌乱、从众等情绪, 并且一旦发生紧急事件, 容易发生安全事故。为车站提供高照度的光环境有利于提升乘客觉醒度, 安抚乘客情绪, 从而提升乘客舒适性, 降低安全风险。故而, 城轨站台光环境的照度应该与乘客密度呈正相关。

此外, 乘客密度应存在与照度对应的限值, 即在乘客密度较低时, 将照度定为下限值; 在乘客密度较高时, 将照度定为上限值。对于如何确定乘客密度的界限, 本文参考《中国行进行人服务水平等级分级标准建议表》(见表 5)<sup>[18]</sup>, A 服务等级为较低的乘客密度, 照度设定为下限值; F 服务等级为较高的乘客密度, 照度设定上限值。在中间部分, 照度与乘客密度的关系函数则为:

$$E = E_{\min} + \frac{E_{\max} - E_{\min}}{D_{s,F} - D_{s,A}} \times (D_p - D_{s,A}) \quad (1)$$

其中,  $E$  为站台某区域所需照度值;  $D_p$  表示该区域的乘客密度;  $E_{\min}$  为该区域照度下限值,  $E_{\max}$  为该区域照度上限值, 其具体数值参照表 2~4 确定;  $D_{s,A}$  为服务水平为 A 级边界时的乘客密度, 即 0.2 人/m<sup>2</sup>;  $D_{s,F}$  为服务水平为 F 级边界时的乘客密度, 即 2.5 人/m<sup>2</sup>。

表 5 中国行进行人服务水平等级分级标准建议表

Table 5 Recommended standards for levels of service in Chinese pedestrian facilities

服务水平 分级	密度/ (人/m <sup>2</sup> )	行人空间占有 量/(m <sup>2</sup> /人)	行人流量/ [人/(min·m)]	速度/ (m/s)
A	<0.20	>5.0	25	1.1~1.5
B	0.20~0.28	3.5~5.0	32	0.9~1.1
C	0.28~0.5	2.0~3.5	45	0.8~0.9
D	0.50~0.83	1.2~2.0	62	0.7~0.8
E	0.83~2.50	0.4~1.2	90	0.5~0.7
F	>2.50	<0.4	波动	<0.5

由此, 可以得到照度需求与乘客密度的关系函数, 见公式(2), 函数曲线图如图 2 所示。

$$E = \begin{cases} E_{\min}, D_p \leq D_{s,A} \\ E_{\min} + \frac{E_{\max} - E_{\min}}{D_{s,F} - D_{s,A}} \times (D_p - D_{s,A}), D_{s,A} < D_p < D_{s,F} \\ E_{\max}, D_p \geq D_{s,F} \end{cases} \quad (2)$$

## 2 城轨站台照明控制方法

### 2.1 照明基本理论

每个区域的照度值遵循照度叠加原理<sup>[12]</sup>, 即区域

的照度值等于多盏灯具对该工作面产生的照度的总和, 如图 3 所示。图中 A 区域的照度等于灯具 L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub> 和 L<sub>3</sub> 在 A 区域产生照度的总和, 根据该原理可以得到灯具产生照度和区域照度之间的关系。

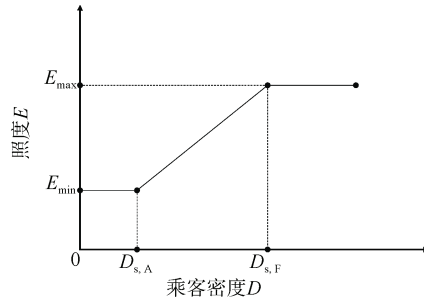


图 2 照度和乘客密度曲线

Figure 2 Illuminance and passenger density curve

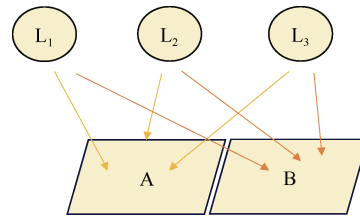


图 3 照度叠加原理示意

Figure 3 Schematic Diagram of the principle of illuminance superposition

本文参考 DIALux 软件, 利用调光系数  $\beta$  对灯具进行照度调节。调光系数是光源实际光通量与最大光通量之比 ( $0 \leq \beta \leq 1$ ), 不能直接用于调光。脉宽调制 (pulse width modulation, PWM) 调光信号的占空比  $D$  指在 1 个脉冲周期内, 高电平状态持续的时间与整个脉冲周期的比例, 这个比例通常用来调节灯光的亮度。一般情况, 设光源实际光通量  $\Phi$  与 PWM 信号占空比  $D$  之间有  $\Phi = f(D)$ , 根据调光系数  $\beta$  的定义  $\Phi = \beta \Phi_{\max}$ , 则  $D = f^{-1}(\beta \Phi_{\max})$ <sup>[19]</sup>。对于所选光源, 其光通量  $\Phi$  与占空比  $D$  为线性关系; 光通量  $\Phi$  与调光系数  $\beta$  亦为线性关系, 因此相同光通量  $\Phi$  对应的  $D$  与  $\beta$  相等, 如图 4 所示。

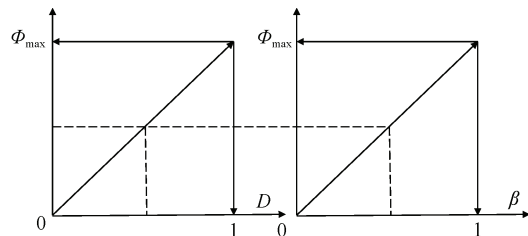


图 4 调光系数  $\beta$  与占空比  $D$  的关系

Figure 4 Relationship between the dimming coefficient ( $\beta$ ) and the duty cycle ( $D$ )

## 2.2 站台照明控制方法模型

在达到站台的照明需求的基础上,为最小化照明系统能耗,假设将站台按照区域类型划分为  $K$  个子区域,将所有灯具划分为  $M$  个灯组,灯组  $m$  内包含  $l_m$  个相同的 LED 灯具,具有统一的调光系数。以图 5 为例,4 个区域 A、B、C、D 的照度均由轨行区公共广告灯箱和 1~6 共 7 个灯组提供。每个灯组内具有数量不同的相同灯具。

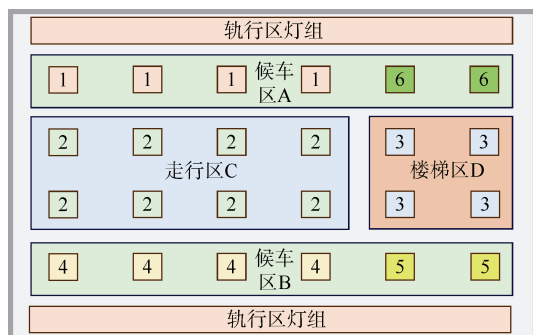


图 5 区域划分和灯具分组示意  
Figure 5 Schematic of area division and luminaire grouping

根据照度叠加原理,区域  $k$  的照度计算公式如下:

$$E_k = \beta_0 \alpha_{k0} + \beta_1 \alpha_{k1} + \dots + \beta_M \alpha_{kM} \quad (3)$$

式中,  $E_k$  是区域  $k$  的照度值;  $\beta_M$  是灯组  $M$  的调光系数;  $\alpha_{kM}$  是灯组  $M$  在满负载条件下为区域  $k$  提供的照度值;  $\beta_0$  表示区域外灯具(主要为轨行区广告灯箱)的调光系数,取值为 1;  $\alpha_{k0}$  是区域外灯具对区域  $k$  提供的照度值。

由于线性假设适用于 LED 灯具<sup>[20]</sup>,灯具的功耗可近似与调光系数成正比。因此使整个照明系统的功耗最小化相当于使所有 LED 灯具调光系数和最小化,由此得到目标函数如下:

$$f = \min \sum_{j=1}^m l_m \beta_m \quad (4)$$

式中,  $\beta_m$  为第  $m$  个灯组的调光系数,已知调光系数取值在 0~1 范围内,故结合区域照度需求可得约束条件为:

$$s.t. \begin{cases} \alpha\beta \leq E \\ 0 \leq \beta_m \leq 1, m \in \{0, 1, \dots, M\} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $E$  是站台各区域的期望照度值向量,为  $[E_1, E_2, \dots, E_K]^T$ ;  $\beta$  是各灯组的调光系数向量,为  $[\beta_0, \beta_1, \dots,$

$\beta_M]^T$ ;  $\alpha$  是灯组照度贡献矩阵,为  $\begin{bmatrix} \alpha_{10} & \dots & \alpha_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{K0} & \dots & \alpha_{KM} \end{bmatrix}$ 。

$\alpha$  受站台尺寸、空间高度、建筑表面反光参数、灯具种类数量等因素影响,本文通过 DIALux 软件仿真获得  $\alpha$  值。

综上,该问题是一个线性规划问题,控制变量  $\beta$  上下均有界,为等式约束。故本文采用单纯形法求解该模型<sup>[21]</sup>。

## 3 实例分析

为验证站台照明控制策略的有效性,本文使用 DIALux 软件建立城轨站台仿真,利用其灯具计算功能获得  $\alpha$  值,并验证模型效果。需要说明的是,本文选用了节能空间较大的小客流车站进行案例分析。

### 3.1 站台仿真

为获取  $\alpha$  值,本文对城轨站台建筑进行调研,并在 DIALux 中建立站台仿真模型。相关调研数据见表 6。

表 6 站台建筑形制和建筑材料调研数据  
Table 6 Survey data on platform architectural form and building materials

建筑形制及材料	参数
长×宽×高	80 m×10 m×5.5 m
灯具与站台立面高度差	3.0 m
屏蔽门高度	2.0 m
天花板材料	反射度 30%、反射涂层 5%
站台平面地表涂层材料	反射度 70%、反射涂层 8%
站台建筑立面外表涂层材料	反射度 76%、反射涂层 12%
屏蔽门材料	反射度 10%、投射度 80%、折射率 1.5
轨行区内表面涂层材料	反射度 15%、反射涂层 0%

在 DIALux 软件中建立的站台三维仿真模型如图 6 和图 7 所示,图 6 中相邻且颜色相同的灯具为一组。

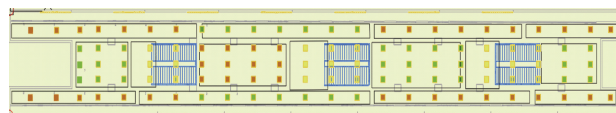


图 6 全区仿真建模平面

Figure 6 Floor plan of simulation modeling for the entire area

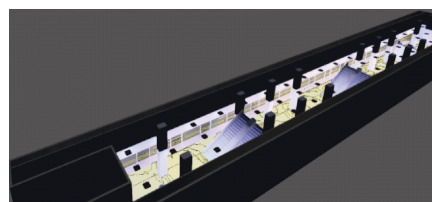


图 7 全区仿真建模三维图

Figure 7 3D Simulation modeling of the entire area

然后进行灯具选型布置、区域划分和灯具分组。站台区域划分和灯具布置如图6所示,共划分成15个区域,包括8个候车区,3个楼梯区和4个走行区。灯具共分为13组,每个灯组内包含灯具数量见表7。

表7 灯组内灯具数量

Table 7 Number of luminaires per luminaire group

灯组编号	灯具数量/个
4, 13	6
1, 2, 5, 6	7
3, 8, 12	9
9, 10	10
7, 11	12

站台每侧轨行区均匀分布8个广告灯箱,每组灯箱采用4个功率为84W、光通量为4140lm的灯源替代每个广告箱,共64个;站台公共区采用功率为40W,光通量为2120lm的LED灯源,灯源间距为3m×

1.5m,共111个。

最后,依次计算每个灯组在满负载条件下对各区域的照度贡献值,以确定 $\alpha$ 值。

### 3.2 结果分析

本文选取该城轨车站2024年4月10日07:00—09:00,13:00—16:00和17:00—19:00共3个时段的客流数据验证3种模式的照明控制策略模型的效果。通过仿真模拟获得站台该日乘客密度变化数据,以10min为时间间隔,进行照明系统动态调控,将调控结果与目前常规控制方式(优化前)进行对比,分析策略有效性。其中,目前常规控制方式指的是早晚高峰100%开度,平峰时段50%开度。

以晚高峰时段17:00—19:00为例,验证策略有效性。表8是站台不同时刻各区域乘客密度值。表9是按照照度计算式(2)得到的不同时刻各区域的照度值及优化前各区域照度值。

表8 不同时刻各区域乘客密度

Table 8 Passenger density in different areas at various times

人/m<sup>2</sup>

调光时刻	候车区1	候车区2	...	候车区8	楼梯区10	...	走行区9	...	走行区15
17:00	2.47	1.48	...	2.45	1.97	...	1.25	...	1.51
17:10	1.39	2.04	...	1.08	1.05	...	2.33	...	1.05
17:20	2.28	1.43	...	1.54	1.23	...	1.27	...	2.81
17:30	1.79	1.58	...	2.22	1.64	...	2.33	...	2.00
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
18:40	2.56	2.56	...	1.10	2.20	...	2.41	...	1.31
18:50	1.63	2.73	...	1.94	1.68	...	1.89	...	2.37
19:00	2.58	2.00	...	2.58	1.25	...	1.74	...	2.28

表9 不同时刻各区域照度值

Table 9 Illuminance values in different areas at various times

lx

	调光时刻	候车区1	候车区2	...	候车区8	楼梯区10	...	走行区9	...	走行区15
优化后	17:00	299	256	...	298	239	...	196	...	207
	17:10	252	280	...	238	218	...	243	...	187
	17:20	290	253	...	258	222	...	197	...	250
	17:30	269	260	...	288	231	...	242	...	228
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	18:40	300	300	...	239	243	...	246	...	198
	18:50	262	253	...	276	232	...	224	...	244
	19:00	300	278	...	300	223	...	217	...	241
优化前	—	349	390	...	368	290	...	369	...	394

经过单纯形法求解线性规划方程后,得到17:00—19:00时段内调光时刻的各灯组调光系数(优化前均为1)以及能耗优化结果,如表10和图8所示。

从图8中可以看出,优化后,该时段内能耗大幅

降低,降低能耗达38.16%。

经计算,07:00—09:00时段的优化结果如图9所示,优化后,降低能耗达27.68%。13:00—16:00时段的优化结果如图10所示,优化后,降低能耗达38.87%。

表 10 不同时刻各灯组调光系数  
Table 10 Dimming coefficient values of each lamp group at different times

调光时刻	各灯组调光系数								
	灯组 1	灯组 2	...	灯组 6	灯组 7	...	灯组 10	...	灯组 13
17:00	0.94	0.51	...	0.53	0.92	...	0.33	...	0.40
17:10	0.68	0.64	...	0.59	0.38	...	0.53	...	0.61
17:20	0.86	0.46	...	0.67	0.53	...	0.40	...	0.42
17:30	0.77	0.51	...	0.76	0.26	...	0.53	...	0.52
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
18:40	0.95	0.73	...	0.66	0.38	...	0.69	...	0.60
18:50	0.68	0.45	...	0.49	0.51	...	0.61	...	0.51
19:00	0.91	0.59	...	0.32	0.57	...	0.56	...	0.31

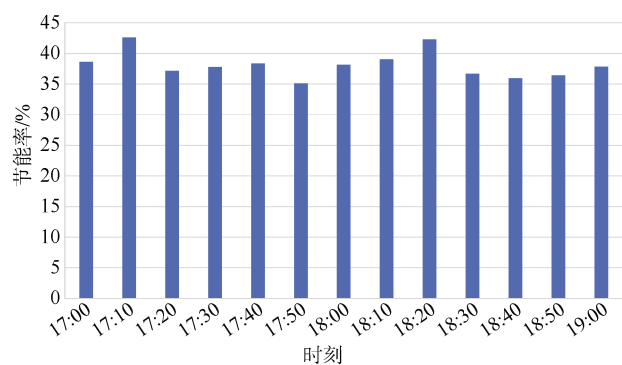


图 8 17:00—19:00 时段内能耗优化结果

Figure 8 Energy optimization results during 17:00-19:00 period

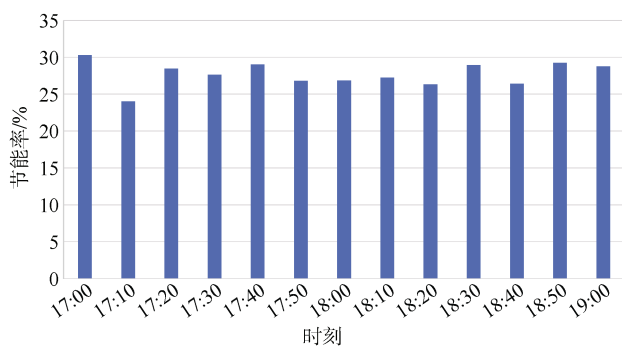


图 9 07:00—09:00 时段内能耗优化结果

Figure 9 Energy optimization results during 07:00-09:00 period

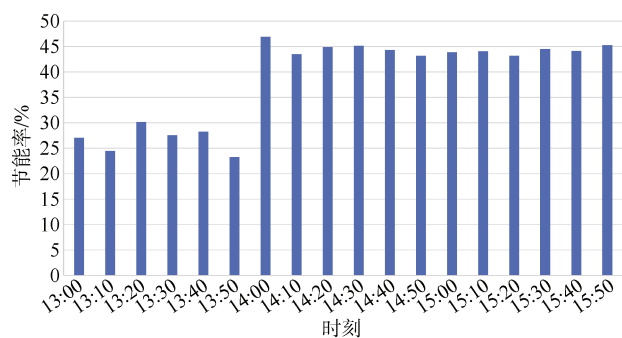


图 10 13:00—16:00 时段内能耗优化结果

Figure 10 Energy optimization results during 13:00-16:00 period

由此可以看出，本文照明控制方法不仅可以优化照明环境，使照度值设定在合理的区间内，提高乘客舒适度，还可以根据乘客密度动态调控灯具，降低照明能耗，其在小客流城轨车站中具有良好的节能效果。

#### 4 结论

本文提出的城轨站台照明节能控制方法在充分考虑站台照明功能需求和乘客心理需求的基础上，对站台灯具调光系数进行优化，保证了城轨站台照明的节能性和舒适性。主要结论如下：

1) 提出考虑站台区域功能和乘客心理需求的区域照度计算方法。本文将站台划分为候车区、走行区、楼梯区，根据早高峰、晚高峰、平峰时段的客流密度与乘客心理，建立乘客密度与照度的线性函数，精准反映区域照明需求。

2) 以小客流城轨车站为案例，验证模型的节能性和舒适性。选取 07:00—09:00、13:00—16:00 和 17:00—19:00 共 3 个时段的数据验证模型节能效果，其节能率分别为 27.68%、38.87%和 38.16%，表现出良好的节能效果。同时，各区域照度被控制在合理区间(如早高峰候车区 250~350 lx)，避免过度照明，提升高密度时段乘客安全感与舒适性，实现节能与光环境质量的平衡。

#### 参考文献

[1] 陈光, 张宁, 陈晖, 等. 城市轨道交通服务水平评价体系研究[J]. 都市快轨交通, 2008, 21(6): 5-10.  
CHEN Guang, ZHANG Ning, CHEN Hui, et al. The evaluation system of LOS for urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2008, 21(6): 5-10.

[2] LAI Xiaodong, DAI Mengyun, RAMEEZDEEN R. Energy saving based lighting system optimization and smart control solutions for rail transportation: Evidence from China[J].

- Results in engineering, 2020, 5: 100096.
- [3] 王立雄, 王楚尧, 于娟, 等. 城市轨道交通车站照明环境调研与分析[J]. 照明工程学报, 2022, 33(2): 169-176. WANG Lixiong, WANG Chuyao, YU Juan, et al. A field research of urban rail transit station lighting[J]. China illuminating engineering journal, 2022, 33(2): 169-176.
- [4] 王帆. 基于边缘计算的人流分布检测及照明节能控制方法研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2023. WANG Fan. Study on detection of people flow distribution and lighting energy-saving control method based on edge computing[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2023.
- [5] 李家旭, 向东, 阙帆, 等. 基于直流配电与控制的城市轨道交通照明设计与应用[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(3): 153-159. LI Jiaxu, XIANG Dong, QUE Fan, et al. Design and application of urban rail transit lighting based on DC power distribution and control[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(3): 153-159.
- [6] 谢昌富. “双碳”驱动下深圳地铁供电系统低碳节能技术应用与实践[J]. 智慧轨道交通, 2024, 61(4): 63-68. XIE Changfu. Application and practice of the low-carbon energy-saving technology for the power supply system of Shenzhen metro driven by the dual carbon goals[J]. Intelligent rail transit, 2024, 61(4): 63-68.
- [7] Casals M, Gangolells M, Forcada N, et al. A breakdown of energy consumption in an underground station[J]. Energy and buildings, 2014, 78: 89-97.
- [8] JIN Yuan, YAN Da, ZHANG Xingxing, et al. A data-driven model predictive control for lighting system based on historical occupancy in an office building: Methodology development[J]. Building simulation, 2021, 14(1): 219-235.
- [9] 冯冬青, 潘磊. 基于改进粒子群算法的智能照明控制策略研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(3): 14-17. FENG Dongqing, PAN Lei. The research on the control strategy of intelligent lighting based on improved particle swarm algorithm[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2013, 34(3): 14-17.
- [10] VIANI F, POLO A, GAROFALO P, et al. Evolutionary optimization applied to wireless smart lighting in energy-efficient museums[J]. IEEE sensors journal, 2017, 17(5): 1213-1214.
- [11] 许馨尹, 李淑娴, 付保川. 基于日光和用户需求的照明节能控制方法研究[J]. 建筑科学, 2019, 35(10): 150-156. XU Xinyin, LI Shuxian, FU Baochuan. Research on an energy-saving lighting control method based on daylight and user requirements[J]. Building science, 2019, 35(10): 150-156.
- [12] 段中兴, 李继斌. 地铁站台光照动态调控方法[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(4): 166-176. DUAN Zhongxing, LI Jibin. Dynamic controlling method of lighting in subway platform[J]. China railway science, 2021, 42(4): 166-176.
- [13] 汤尧, 刘莹, 杜玉川, 等. 地铁车站公共区域照明动态调光控制研究[J]. 现代城市轨道交通, 2023(9): 100-106. Tang Y, Liu Y, Du YC, et al. Study on dynamic dimming control of public area lighting in subway stations[J]. Modern Urban Rail Transit, 2023(9): 100-106.
- [14] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 城市轨道交通照明: GB/T 16275—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Urban rail transit lighting: GB/T 16275—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [15] 陈晓东, 张昕, 董娴, 等. 地下工程办公空间中照度和色温对主观评价和工作效率的影响的初步探究[J]. 照明工程学报, 2021, 32(6): 155-163. CHEN Xiaodong, ZHANG Xin, DONG Xian, et al. Exploring the effects of illuminance and CCT on self-reported satisfactions and working performances in underground working space: a pilot investigation in an office without daylight[J]. China illuminating engineering journal, 2021, 32(6): 155-163.
- [16] 台宝灿. 城市地铁乘客安全素质抽样调查分析及对策研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012. TAI Baocan. Research on sampling survey and countermeasure of passenger safety quality in urban subway[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012.
- [17] 陈志洲, 李倩. 基于乘客心理的城市轨道交通大客流应急疏散策略研究[J]. 交通企业管理, 2022, 37(2): 91-93. CHEN Zhizhou, LI Qian. Study on emergency evacuation strategy of mass passenger flow in urban rail transit based on passenger psychology[J]. Transportation enterprise management, 2022, 37(2): 91-93.
- [18] 胡明伟, 黄文柯. 行人交通仿真方法与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016. HU Mingwei, HUANG Wenke. Pedestrian traffic simulation methods and technologies[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.
- [19] 郭旭. 多灯协作的光环境控制策略研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2016. GUO Xu. Research on lighting environment control strategy of multi-lamp cooperation[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2016.
- [20] 孙富康. 分段线性驱动 HV-LED 灯具的照度变化特征[J]. 照明工程学报, 2018, 29(3): 78-81. SUN Fukang. Illumination change characteristics of HV-LED lamp based on segmented linear driver[J]. China illuminating engineering journal, 2018, 29(3): 78-81.
- [21] 鲁恩伯杰. 线性与非线性规划引论[M]. 夏尊铨等译. 北京: 科学出版社, 1980.

(编辑: 王艳菊)