

文章编号: 1001-4632 (2026) 04-0258-15

引用格式: 李君, 王明哲, 张亚伟. 基于改进多目标优化的综合客运枢纽照明能效提升方法[J]. 中国铁道科学, 2026, 47(4): 258-272.

Citation: Li Jun, Wang Mingzhe, Zhang Yawei. Lighting energy efficiency improvement method of integrated passenger hubs based on improved multi-objective optimization[J]. China Railway Science, 2026, 47(4): 258-272.

基于改进多目标优化的综合客运枢纽 照明能效提升方法

李 君¹, 王明哲², 张亚伟²

(1. 北京经纬信息技术有限公司 客管及枢纽部, 北京 100081;
2. 中国铁道科学研究院集团有限公司 电子计算技术研究所, 北京 100081)

摘 要: 为破解综合客运枢纽高负荷时段照明能效低、场景适配差等核心瓶颈, 兼顾枢纽绿色运营与旅客舒适度需求, 提出 1 种改进多目标优化驱动的枢纽照明能效提升方法。首先, 以广州某大型综合客运枢纽为研究对象, 采集 2024—2025 年 12 类典型场景的 2 160 组有效样本, 通过最小二乘法揭示客流量与照明需求的非线性关联及阈值效应; 其次, 构建“时间-空间-负荷-事件”四维耦合模型, 针对原始 NSGA-III 在高维约束下搜索效率低的问题, 设计改进算法, 引入四维修正因子动态调整交叉变异策略, 以增强算法对时变需求的适应性, 并建立可行性法则与惩罚函数结合的约束处理机制, 改善 Pareto 前沿的多样性; 最后, 以能耗最小化、舒适度及设备寿命最大化为目标构建多目标适应度函数, 结合数字可寻址照明接口 (DALI) 协议搭建自适应闭环控制系统。结果表明: 当客流量超过设计容量 120% 时照明需求呈指数级增长; 与传统定时方案相比, 所提方法的日均能耗由 592.1 kWh 降至 228.7 kWh, 降幅达 61.37%, 旅客照明舒适度评分由 45.4 提升至 58.1, 增幅为 27.97%, 系统响应时延由 1.2 s 缩短至 0.38 s, 照明设备使用寿命延长 23.50%, 可稳定适配 $\pm 30\%$ 区间的客流动态波动; 相较于 PSO 和 GA 算法, 所提方法的综合优化指数分别提升 23.53% 和 16.67%, 灯具日均故障率由传统控制方案的 3.2 次 $\cdot d^{-1}$ 降至 0.8 次 $\cdot d^{-1}$, 降幅为 75%; 依托广州枢纽的实际运维数据验证, 改造后年节约电约 13.26 万 kWh, 综合节电率为 61.4%, 节省电费约 10.61 万元 $\cdot 年^{-1}$, 利旧改造静态投资回收期约 5.7 年, 旅客综合照明舒适度评分为 58.6 分, 与仿真预测值 58.1 分的偏差小于 1%。该方法能适配枢纽动态需求, 为同类交通枢纽照明智能化升级提供理论与技术支撑。

关键词: 综合客运枢纽; 照明能效优化; 多因素耦合建模; 改进 NSGA-III 算法; 自适应闭环控制

中图分类号: U291.73 **文献标识码:** A

doi: 10.3969/j.issn.1001-4632.2026.04.20

综合客运枢纽是城市交通网络核心节点, 照明系统作为枢纽运行必不可少的配套系统, 既是为旅客提供安全通行与优质体验的关键, 也是核心耗能单元^[1], 在高负荷时段能耗激增超 50%。我国多数枢纽照明采用定时控制模式, 存在低峰时段无效能耗占比高、暴雨天照度仅 180 lx (低于 TB 10089—2015《铁路照明设计规范》^[2]和 T/CET 411—2024《铁路场所 LED 照明技术规范》^[3]规定的 200 lx) 以

及功能区适配不足等问题, 智能化升级需求迫切。

现有研究已从多维度展开探索, 但核心局限较为突出。在枢纽照明优化方面, 早期研究多聚焦于建筑采光设计优化, 蒋涛等^[4]采用 Rhino/Grasshopper 平台结合遗传算法构建“采光强度-均匀度-眩光控制-太阳辐射”多目标优化方法; 路洲^[5]提出基于帕累托前沿优选解的设计方案, 但二者均未纳入舒适度、设备寿命等指标, 仅适用于设计阶段

收稿日期: 2026-02-08; 修订日期: 2026-08-04

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题 (K2024S007)

第一作者: 李 君 (1982—), 女, 山西太原人, 副研究员。E-mail: lj1335@163.com

通讯作者: 王明哲 (1979—), 男, 北京人, 研究员。E-mail: 13911405156@139.Com

静态优化。在节能控制策略层面,杨铁树^[6]提出时段平衡与区域平衡方法;李金冬等^[7]设计BAS能源管理系统;EREN等^[8]通过设备改造、自然光利用、人员行为引导的组合策略与多准则决策逻辑,构建照明能效评估体系;贺丰等^[9]设计“光感应-时间控制”智能系统;应滕勇^[10]提出日光-动态调光、高效LED灯具-线性调光、人流量感应控制3种大型公共场所照明能效提升方法。上述研究多从硬件设计和光源布局着手实现节能,仅聚焦节能、负荷平衡等单一核心目标,未纳入客流需求等关键服务指标,未建立照明参数与目标变量的精准量化关联模型,控制规则较为固定,难以适配动态场景。在多目标优化算法应用层面,胡康琦等^[11]和钟佳淋等^[12]面向联邦学习场景提出基于佳点集初始化和快速贪婪初始化的改进NSGA-III算法;孙钧^[13]提出光伏与智能LED灯具结合的低碳转型路径;张伯敏^[14]提出自然采光与人工照明协同理念;尹翠蛟等^[15]和刘虎等^[16]的研究虽涉及照明优化,但未形成“多因素建模-算法优化-闭环控制”一体化体系,也未量化照明参数与能耗、舒适度、设备寿命的关联关系。

综上,现有研究仍存在三大核心缺口:耦合机制模糊,多基于单因素驱动,难以解析多因素交叉作用;量化关联缺失,未建立照明参数与设备寿命、舒适度的精准模型^[17];算法与场景适配不足,未覆盖多区域协同及事件因子影响^[18]。针对上述局限,本文主要从4个层面体现核心创新:方法论层面,提出1种“多因素耦合建模-智能算法优化-闭环控制”的照明能效优化方法,而非仅描述系统实现;模型层面,构建“时间-空间-负荷-事件”,4维量化耦合体系,系统揭示多因素交叉作用机制;算法层面,针对原始NSGA-III算法在高维约束下搜索效率低的缺陷,提出2项具体改进,即引入四维修正因子动态调整策略,并设计可行性法则与惩罚函数结合的约束处理机制;应用层面,建立设备寿命多参数衰减模型,量化亮度波动、色温偏离等因素对寿命的协同影响,并搭建全链条量化闭环控制框架,为综合客运枢纽照明优化提供解决方案。

1 枢纽照明动态特征

1.1 运营特征与照明关联性

采集广州某客运枢纽高频率监测数据,其中关

键区域客流采样间隔为15 min·次⁻¹,照度采样间隔为5 min·次⁻¹。基于上述数据,采用最小二乘法构建客流量-照明需求量化模型。二者的非线性关联关系为

$$L_d = 18.2 + 2.3 \times 10^{-5}Q + 1.2 \times 10^{-9}Q^2 + \epsilon \quad (1)$$

式中: L_d 为照明需求,表示枢纽内关键区域平均照度值; Q 为客流量,指单位时间(15 min)内通过监测断面的旅客数量; ϵ 为随机误差项,表示未观测到的其他影响因素, $\epsilon \sim N(0, 1)$ 。

该模型调整后决定系数 R^2 为0.86,二次项显著性检验通过。进一步分析模型特征可发现,客流量-照明需求关系存在明显的阈值效应,阈值处的照明需求可表达为

$$L_d = 220\exp(0.12 \times 10^{-4}(Q - Q_{th})) + c \quad (2)$$

式中: c 为连续常数项,用于保证在客流量阈值处,指数增长模型与线性模型的照明需求取值连续; Q_{th} 为客流量阈值,表示枢纽照明需求由线性增长转向指数增长的临界客流,对应枢纽设计容量的120%,通过Bai-Perron拐点法确定,取值为60万人次·d⁻¹。

当客流量 Q 超过阈值 Q_{th} 时,二次项及指数项均表现为显著($p < 0.01$, p 为显著性检验概率值),此时式(2)中的指数项起主导作用,客流量每增加10万人次,照明需求提升18.7%;当 Q 未超过阈值时,照明需求与客流量的二次项系数不显著($p > 0.05$),对应的模型退化线性关系为

$$L_d = 0.0003Q + 40 \quad (3)$$

采用Pearson相关性分析开展变量关联性验证:亮度与能耗表现为强正相关($r = 0.89$, r 为Pearson相关系数);色温与舒适度呈倒U型关联,3 500~4 500 K为最优色温区间($r = 0.72$);亮度波动方差与设备寿命表现为强负相关($r = -0.76$)。

1.2 照明多维度需求

1.2.1 功能需求

为满足枢纽不同区域的照明使用要求,需对照度、亮度调节、色彩表现、开关响应等关键指标进行约束,结合已有研究成果,各区域具体功能需求如下:为保障高密度客流条件下的路径识别清晰度^[19-20],核心区域理想照度应为200~300 lx,且亮度调节灵敏度不低于0.5 lx·s⁻¹;为适配商业场景的视觉体验需求,商业区显色指数须不低于90,且色温调节步长不大于100 K;为保障基础通行安

全, 停车场等区域最低安全照度应不低于 50 lx, 且开关响应延迟不大于 0.5 s。

1.2.2 技术需求

LED光源显色指数 R_a 与舒适性呈正相关($r=0.68$), 其定义为光源对物体颜色还原能力的度量, 取值范围为0~100。当 $R_a \geq 80$ 时, 可满足90%以上旅客的视觉舒适需求。调光范围需覆盖10%~100%, 调光线性度 $\delta_L \leq 3\%$, δ_L 为实际光输出与调光指令间的最大相对偏差, 用于保障亮度调节的平滑性。RG0低蓝光等级为硬性安全指标, 蓝光危害加权辐亮度 L_B 应不大于 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, 适配母婴区、VIP区等特殊场景。能耗修正系数与色温存在量化关联, 对应的表达式为

$$P(T) = P_0 K_{\text{CCT}} \quad (4)$$

其中,

$$K_{\text{CCT}} = 1 + 0.2 \times 10^{-4} |T - 4000|$$

式中: T 为实际运行色温, K; $P(T)$ 为色温 T 对应的单灯功率, W; P_0 为基准色温(4 000 K)下的单灯功率, W; K_{CCT} 为色温修正系数。

1.3 照明需求动态特征

照明需求除受静态功能标准约束外, 还表现出显著的时间波动与空间联动特征^[21]。时间维度上, 高峰时段照度需在30 s内从基准值提升至75%以上, 平峰时段维持在50%~70%照度区间, 低谷时段降至15%以下。自然光照强度对照明需求的修正表达式为

$$L'_d = L_d \max \left(0.3, 1 - \frac{I_n}{I_n + 500} \right) \quad (5)$$

式中: L'_d 为修正后的照明需求; I_n 为自然光照强度; 500为饱和常数, 表示当 I_n 取值为500 lx时, 可减少约50%的人工照明需求。

在暴雨、大面积晚点等事件下, 需在1 min内触发应急调节, 照度提升至基准值的1.2倍。空间维度上, 各功能区因旅客流线形成照明需求耦合, 区域 i 与区域 j 间的联动权重 ω_{ij} 为

$$\omega_{ij} = c_{ij} / d_{ij} \quad (6)$$

式中: d_{ij} 为区域间物理距离; c_{ij} 为功能关联度^[22], 其取值范围为 $[0, 1]$ 。

2 多因素耦合机理与模型构建

2.1 多因素耦合作用机理

照明需求由客流量、自然光照、设备能效和旅客舒适度4类因素协同驱动, 形成“交通接驳-客流分布-照明需求-能耗变化”闭环。客流通过负荷因子调节需求强度; 自然光照与人工照明借助互补系数完成适配; 设备性能以衰减系数界定参数边界; 舒适度通过权重分配平衡能耗与体验^{[23][24]}。在此基础上, 通过时间的周期性和突发性、空间的布局关联和功能联动以及负荷的阈值触发和衰减适配来强化系统动态特性, 实现照明系统与实际场景的精准平衡, 其多因素耦合机理如图1所示。

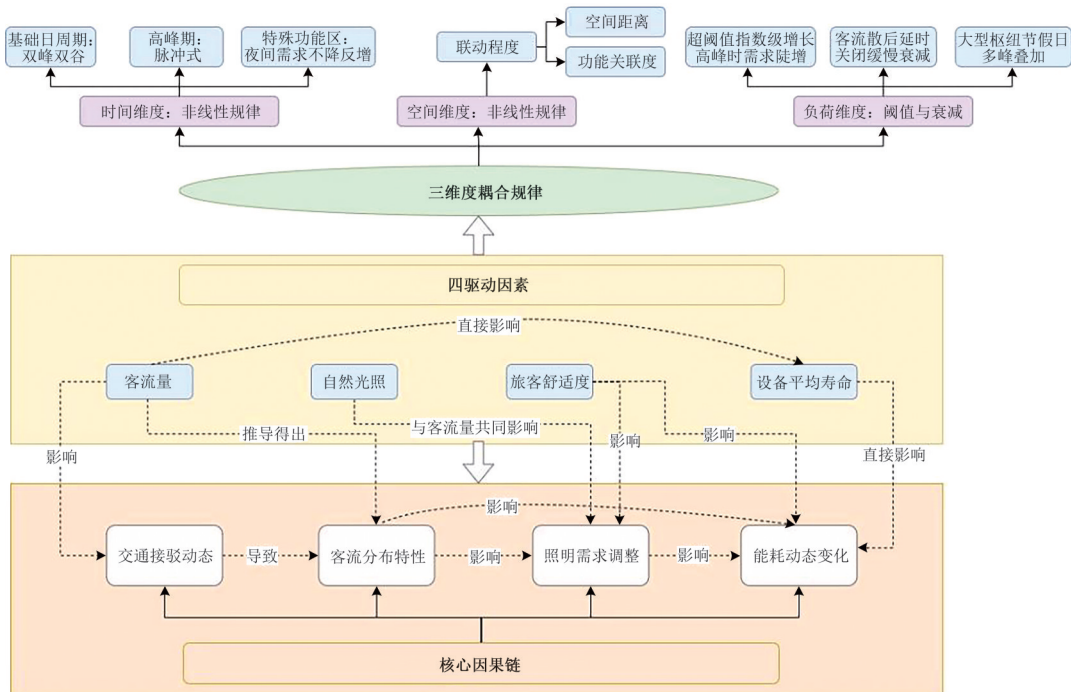


图1 多因素耦合机理

构建“四维驱动因子-照明参数-目标变量”3级量化耦合链,其中目标变量包含能耗、舒适度和设备寿命3类,各环节定量关系如下。

1) 四维驱动因子-照明参数环节

将时间、空间、负荷和事件4类驱动因子进行映射,可得

$$L_{iy} = L_{\text{base}} T_f S_f B_f E_f \quad (7)$$

式中: L_{iy} 为区域 i 时段 γ 的实际照度相对水平(归一化值),取值范围为 $[0, 1]$, 取值为1表示满亮度; L_{base} 为基准照度; T_f 为时间因子量化值,用于刻画昼夜和高峰波动,取值范围为 $[0.2, 1.0]$; S_f 为空间因子量化值,用于区分不同功能区,取值范围为 $[0.3, 1.5]$; B_f 为负荷因子量化值,反映客流量影响,取值范围为 $[0.5, 2.3]$; E_f 为事件因子量化值,用于应对突发事件,取值范围为 $[1.0 \sim 1.2]$ 。

2) 照明参数-能耗环节

亮度与色温共同决定单灯功率,区域总能耗 E 为

$$E = \sum_{i=1}^8 \sum_{\gamma=1}^6 N_{iy} P_{iy} t_{\gamma} (L_{iy}/100) K_{\text{CCT}} \quad (8)$$

式中: N_{iy} 为区域 i 时段 γ 的灯具数量; P_{iy} 为单灯功率; t_{γ} 为第 γ 个时段的时长。

3) 照明参数-舒适度环节

采用照度偏离和色温偏离加权得到旅客视觉舒适度 C 为

$$C = \sum_{i=1}^8 \omega_i (0.6 C_L + 0.4 C_T) \quad (9)$$

式中: ω_i 为区域 i 的权重; C_L 为亮度舒适度; C_T 为色温舒适度。

4) 照明参数-设备寿命环节

灯具实际寿命受亮度波动、色温偏离、平均亮度和启停次数共同影响,照明设备实际平均寿命 S_{avg} 为

$$S_{\text{avg}} = S_{\text{base}} \exp(-\alpha \text{Var}(L) - \beta |T - T_{\text{opt}}| - \zeta \frac{L_{\text{avg}}}{100} (1 - \delta N_{\text{start}})) \quad (10)$$

$$B_f = \begin{cases} 1 + 2.3 \times 10^{-5} \Delta Q(t) + 1.2 \times 10^{-9} [\Delta Q(t)^2] \exp(-(t - t_0)/\tau) & Q(t) \geq Q_{\text{th}} \\ 1 + 1.2 \times 10^{-5} (Q(t) - 1.2 Q_{\text{base}}) \exp(-(t - t_0)/\tau) & Q(t) < Q_{\text{th}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: Q_{base} 为枢纽基准客流量; $Q(t)$ 为 t 时刻对应的15 min断面客流量; $\Delta Q(t)$ 为 t 时刻客流量与基准偏差; τ 为延时效应衰减时间,取值为0.5 h。

事件因子为节假日、异常天气和大面积晚点这3类场景的调制因子,其量化值表达式为

$$E_f = 1 + 0.2 \eta_{\text{holiday}} + 0.3 \eta_{\text{weather}} + 0.5 \eta_{\text{late}} \quad (14)$$

式中: η_{holiday} 为节假日因子; η_{weather} 为异常天气因

式中: S_{base} 为标称寿命,即在25℃环境、恒定色温4 000 K、无频繁开关、70%亮度的标准工况下,LED灯具的出厂额定寿命,取值为50 000 h; $\text{Var}(L)$ 为亮度波动方差; T_{opt} 为最优色温,可使寿命损耗最小,取值为4 000 K; L_{avg} 为日均亮度; N_{start} 为日均启停次数; α 为亮度波动衰减系数,取值为0.003; β 为色温偏离衰减系数,取值为0.000 1; ζ 为平均亮度衰减系数; δ 为启停损耗系数。

2.2 多因素耦合照明需求模型

模型基于“时间-空间-负荷-事件”四维因果链架构,分别构建各因子的量化关系式。

时间因子通过日周期函数、脉冲函数及夜间补偿函数捕捉客流昼夜规律与高峰突发客流,用于修正不同时刻的照明需求,其量化值表达式为

$$T_f = f_{\text{day}}(t) + f_{\text{pulse}}(t) + f_{\text{night}}(t) \quad (11)$$

其中,

$$f_{\text{day}}(t) = 0.6 + 0.4 \sin(\pi(t - 7)/12)$$

$$f_{\text{pulse}}(t) = 1 + 0.8 \exp(-(t - t_0)^2/2)$$

$$f_{\text{night}}(t) = 1.2$$

式中: f_{day} 为日周期函数,用于模拟昼夜节律; f_{pulse} 为脉冲函数,用于早高峰和晚高峰突发客流的瞬时照明补偿; t_0 为高峰起始时刻,早高峰和晚高峰分别为7:30和17:30; f_{night} 为夜间补偿函数,在22:00~次日5:00取值为1,其余时段取值为0^[25]。

空间因子依据功能分区设定基础照明,引入联动系数实现区域耦合,其量化值表达式为

$$S_f = L_{d,i,j} = L_{\text{base},i} \left(1 + \sum_{j \neq i} \omega_{ij} \frac{L_{\text{need},j}}{L_{\text{base},j}} \right) \quad (12)$$

式中: $L_{d,i,j}$ 为区域 i 时段 j 照明需求; $L_{\text{base},i}$ 和 $L_{\text{base},j}$ 分别为区域 i 和区域 j 的基础照明需求; ω_{ij} 为区域间联动权重; $L_{\text{need},j}$ 为区域 j 实际照明需求。

负荷因子采用非线性分段函数,以阈值 Q_{th} 为界,其量化值表达式为

子; η_{late} 为晚点因子。

各因子经乘积耦合后,可预测综合照明需求,其表达式为

$$L(t,i) = L_{\text{base}} (T_f \psi_T) (S_f \psi_S) (B_f \psi_B) (E_f \psi_E) \quad (15)$$

式中: $L(t,i)$ 为 t 时刻区域 i 的综合照明需求; ψ_T , ψ_S , ψ_B 和 ψ_E 分别为各因子量化值对应权重,经熵权法确定其取值依次为0.2, 0.25, 0.35和0.2。

关键参数通过卡尔曼滤波实时校准^[26]。四维因果链的完整耦合关系如图2所示。图中描述了时间、空间、负荷和事件维度内部要素及相互之间的正负影响关系，各维度相互作用耦合生成综合照明需求。

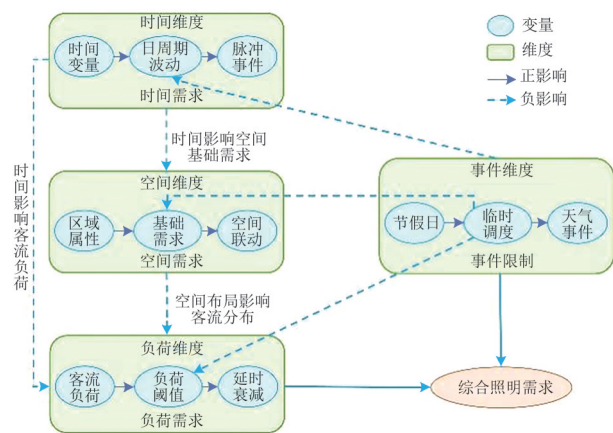


图2 四维因果链交叉耦合因果关系

3 改进NSGA-III驱动的枢纽照明自适应闭环控制

3.1 改进NSGA-III算法完整框架

3.1.1 原始NSGA-III算法的局限性及改进策略

原始NSGA-III算法在处理高维多目标优化问题时，主要依赖参考点机制维持种群多样性，然而，若直接应用于枢纽照明动态优化则存在以下局限：一是搜索策略静态化，交叉和变异概率固定，无法适应照明系统“时间-空间-负荷-事件”4维因素的时变特性；二是约束处理能力弱，对安全、节能、舒适度等多类刚性约束的处理方式单一，易导致大量不可行解，降低收敛效率。针对上述问题做出具体改进。

1) 四维修正因子驱动的自适应遗传算子

为增强算法对不同场景的适应性，设计四维修正因子向量 Θ ，其表达式为

$$\Theta = (\theta_T, \theta_S, \theta_L, \theta_E) \quad (16)$$

式中： θ_T 为时间维度修正因子，可根据当前时刻与历史同期客流偏差动态调整交叉变异强度； θ_S 为空间维度修正因子，反映不同功能区的照明需求差异； θ_L 为负荷维度修正因子，可在客流量超阈值场景下增强搜索多样性； θ_E 为事件修正因子，用于突发事件工况下加快算法收敛。

基于此，将交叉概率 p_c 和变异概率 p_m 动态调整为

$$p_c = p_c^{\text{base}} (1 + \theta_T \Delta f_T + \theta_S \Delta f_S + \theta_L \Delta f_L + \theta_E \Delta f_E) \quad (17)$$

$$p_m = p_m^{\text{base}} / (1 + \theta_T \Delta f_T + \theta_S \Delta f_S + \theta_L \Delta f_L + \theta_E \Delta f_E) \quad (18)$$

式中： p_c^{base} 为基准交叉概率^[27]，取值为0.9； p_m^{base} 为基准变异概率^[28]，取值为0.1； Δf_T 、 Δf_S 、 Δf_L 和 Δf_E 分别为各因子当前值与历史平均值的偏差率。

该设计可实现参数自适应调节：在高负荷或突发事件工况下，增大交叉概率 p_c 以加速探索最优解，同时减小变异概率 p_m 以保护优良基因；反之在平稳期则加强局部搜索，从而实现搜索策略的自适应切换。

2) 双层约束处理机制

设计可行性法则与惩罚函数结合的约束处理机制，该机制在进化初期容忍少量轻度违约以维持多样性，在后期则严格约束，确保收敛至可行Pareto最优前沿。其中，第一层采用可行性法则，对于违反安全、节能、舒适等硬性约束的解，直接赋予无穷大适应度将其淘汰；第二层针对设备寿命、启停次数等软约束，设计动态惩罚函数 $F_{\text{penalty}}(x)$ ，其表达式为

$$F_{\text{penalty}}(x) = f(x) + \sum_{k=1}^K \lambda_k [\max(0, g_k(x))]^2 \quad (19)$$

式中： $f(x)$ 为原始目标函数值； $g_k(x)$ 为第 k 个约束条件； λ_k 为惩罚系数，其初始值为1 000，若可行解比例低于10%，则自动减半。

3.1.2 四维参数编码量化映射

区域划分方案见表1。将枢纽划分为8个独立可控区域，主要分为A类交通核心区、B类商业区和C类配套区3种类型，对照度参数进行编码，得到取值范围为 $[0, 1]$ （0表示关闭，1表示满亮度）的8维实数向量。运营周期划分为6个特征时段：T1为清晨准备期；T2为早高峰；T3为日间平峰；T4为晚高峰；T5为夜间运营期；T6为深夜节能期。每个时段包含照度基因、色温基因和开关基因3类基因。照度基因取值范围为 $[0, 100]$ ，将该基因值除以100后，与基准照度 L_{base} 相乘，可得到实际照度；色温基因分为2 700、3 000、4 000和5 000 K四档，以100 K步长做离散量化，关联能耗修正系数 k_{T_g} ；开关基因采用二进制编码，0表示关闭，1表示开启，关联启停损耗系数。将实时客流量转化为负荷敏感度参数，当客流超设计容量

表1 区域划分方案

区域名称	区域分类	功能描述	典型亮度系数范围
出发大厅	A类	旅客安检、候车核心区,高显色性照明	0.75~0.95
站台层	A类	列车到发区域,照明与列车时刻联动	0.65~0.80
到达大厅	A类	旅客集散,接驳引导区,均匀照明	0.70~0.85
地铁换乘区	A类	枢纽与地铁衔接通道,人流量大且集中	0.75~0.90
长途汽车客运站	C类	长途候车与检票区,照明时段匹配班次表	0.70~0.85
公交/出租接驳区	C类	露天或半露天区域,考虑自然光补偿	0.45~0.65
社会车辆停车场	C类	地下停车场为主,保障基础安全照明	0.25~0.45
商业区	B类	餐饮零售等区域,照明配合商业策略	0.55~0.80

注:各区域典型亮度系数范围依据TB 10089—2015《铁路照明设计规范》推荐照度值及现场实测数据经归一化后确定,出发大厅等核心区最高照度300 lx对应系数0.95,停车场最低安全照度50 lx对应系数0.25,表中范围为可调区间。

的80%时触发照度指数级调节。通过动态调制因子调整各维度基因权重,最终形成“照度+色温+开关”的144维(8区域×6时段×3参数)染色体编码,用以表征照明控制策略。

3.1.3 目标函数与约束条件

1) 目标函数

(1) 能耗目标。引入时间维度区域能效系数与负荷维度客流-能效弹性系数(客流量超设计容量80%时触发)建立动态能耗计算模型,目标函数 F_1 为

$$F_1 = \min \left(\sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^6 \frac{L_{d,i,j} \theta_i N_{iy} P_{ij} t_j K_{CCT,ij}}{100\ 000} \right) \quad (20)$$

式中: θ_i 为区域*i*的综合能效系数,综合表征该区域灯具的光效和配光效率; P_{ij} 为单灯额定功率,取值为0.036 kW; t_j 为时段*j*的时长; $K_{CCT,ij}$ 为区域*i*中时段*j*的色温修正系数。

(2) 舒适度目标。以确保旅客视觉体验为核心,引入空间权重、区域动态照度和事件修正系数,目标函数 F_2 为

$$F_2 = \max \left[\sum_{i=1}^8 \omega_i \left(0.6 \exp \left(-\frac{(L_{d,i,j} - L_{ideal,i})^2}{2\sigma_L^2} \right) + 0.4 \exp \left(-\frac{(T_{i,j} - T_{ideal,i})^2}{2\sigma_T^2} \right) \right) \right] \quad (21)$$

式中: $L_{ideal,i}$ 和 $T_{ideal,i}$ 分别为区域*i*的理想亮度和色温; σ_L 和 σ_T 分别为舒适度和色温的容忍偏差,突发事件场景下压缩至常规值的70%。

区域权重 ω_i 采用层次分析法确定,该权重在A类、B类和C类区域的取值分别为1.5, 1.0和0.8。通过向10位枢纽运营管理部门工作人员发放问卷,构造“交通核心区-商业区-配套区”重要性

判断矩阵,特征向量归一化后得到3类区域权重,一致性比率为0.04,满足一致性检验要求(一致性比率小于0.1)。

(3) 设备寿命目标。为量化照明调控对灯具损耗的影响,构建寿命衰减模型,目标函数 F_3 为

$$F_3 = \max \left[S_{base} \exp(-\beta_1 \text{Var}(L_{d,i,j}) - \beta_2 |T_{i,j} - T_{opt}| - \beta_3 S_{ij}) \right] \quad (22)$$

式中: β_1 、 β_2 和 β_3 为衰减系数; $\text{Var}(L_{d,i,j})$ 为照明需求波动方差,表征灯具在单位时间内亮度变化的剧烈程度; S_{ij} 为日均启停次数,表征灯具开、关状态之间的切换频次。

2) 约束条件

在算法中嵌入四维约束边界,分别从照明安全、节能效益、人员舒适度和设备寿命4个维度构建约束体系,明确各类约束的类型、量化阈值及惩罚机制。

(1) 安全约束:A类核心区照度不低于200 lx;B类商业区照度不低于150 lx;C类停车场照度不低于50 lx。相应惩罚机制为照度每低于阈值10 lx,能耗目标函数值增加15%,优先保障通行安全。

(2) 节能约束:枢纽照明系统日均能耗不超过300 kWh·d⁻¹;单区域单时段能耗占比方面,A类区域不超过40%,B类区域不超过30%,C类区域不超过30%。相应惩罚机制为能耗占比每超出阈值5%,舒适度目标函数值降低8%,避免过度节能现象。

(3) 舒适度约束:旅客视觉舒适度不低于50分;单位时段色温波动不超过5 000 K;每分钟亮度变化率不超过20%。相应惩罚机制为色温每超出阈值100 K,舒适度目标函数值降低5%,确保

照明参数平滑调整。

(4) 设备寿命约束：日均启停次数每时段不超过3次；照明需求波动方差不超过20。相应惩罚机制为每多1次启停，设备寿命目标函数值衰减10%，以此延长灯具使用寿命。

3) 惩罚机制的试验分析与验证

为验证上述惩罚机制的有效性，设计对比仿真试验。在保持其他参数不变的前提下，分别测试“无惩罚”“弱惩罚”“标准惩罚（所提机制）”3种模式下算法的性能。试验结果如下。

(1) 阈值设定的数据支撑：基于对广州枢纽2个月内运行数据的统计分析，95.6%的安全约束违规事件表现为照度低于设定值10~30 lx，据此确定10 lx为安全约束的惩罚梯度；在舒适度约束的违规事件中，82.3%的事件源于色温瞬时波动超过300 K，据此选取100 K为步长设定惩罚机制。该阈值粒度可覆盖绝大多数实际违规场景。

(2) 惩罚机制效果：标准惩罚模式下，最终解集中约束违规率仅为1.2%，远低于无惩罚模式的18.7%和弱惩罚模式的7.6%。同时，标准惩罚模式下Pareto前沿的解集覆盖率比弱惩罚模式高15.3%，说明适当的惩罚强度有效剔除了不可行解，并引导搜索向可行域边界收敛。具体而言，对于“照度每低于阈值10 lx，能耗目标增加15%”这一惩罚机制，算法在优化能耗的过程中会优先考虑将照度提升至安全阈值以上，而非通过降低照度来牺牲安全换取节能效果。实测出发大厅夜间照度可稳定维持在210 lx以上，无违规记录。

3.2 自适应闭环控制机制

“数据感知-模型优化-动态调控-反馈迭代”自适应闭环控制机制如图3所示。该机制分为离线策略生成、在线部署与实施反馈3个阶段，可实现照明系统与枢纽动态运营的精准协同，各阶段具体工作过程如下。

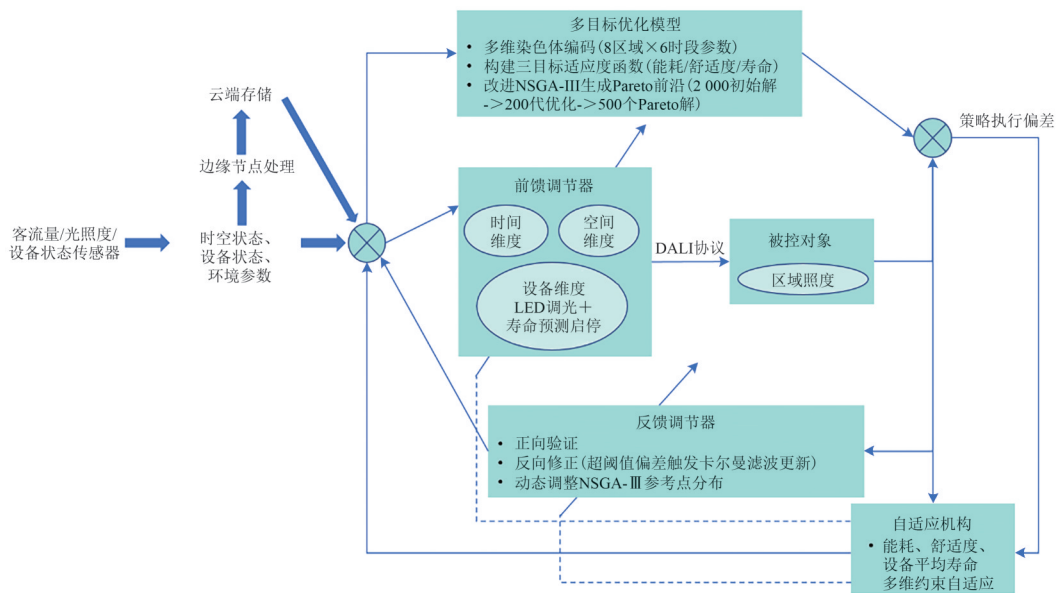


图3 自适应闭环控制机制

离线策略生成阶段主要负责在线部署前的预训练工作，采用改进NSGA-III算法，基于历史样本数据生成Pareto最优策略集。种群初始化采用拉丁超立方采样（2 000个样本）与历史最优解扰动（扰动比例为50%）相结合的策略；遗传进化采用模拟二进制交叉（交叉概率为0.9）及多项式变异（变异概率为0.1），经200代迭代后筛选500个非支配解构成Pareto前沿。策略输出须满足能耗不超过300 kWh·d⁻¹、舒适度不低于50分、设备寿命不小于30 000 h的硬性约束。

在线部署与实施反馈阶段实时采集客流量、自

然光照度、温湿度、能耗和旅客停留时长等数据，经5G边缘计算模块预处理后（处理延迟不超50 ms）上传云端，依据当前时段与客流密度从Pareto策略集中匹配最优控制参数，经由数字可寻址照明接口（Digital Addressable Lighting Interface, DALI）协议下发执行，亮度调节误差不超过5%，色温调节误差不超过100 K，开关响应延迟不超过0.38 s。设定能耗和照度偏差阈值为10%，舒适度偏差阈值为5分，寿命预测偏差阈值为5%。任意指标超过上述阈值后通过反馈调节器触发卡尔曼滤波在线校准（更新步长为0.05，周期不超过5 min），同

时动态调整NSGA-III参考点分布,完成“采集-优化-反馈-修正”闭环运行。

3.3 系统架构与物理部署

为实现上述闭环控制,搭建适配综合客运枢纽照明场景的控制系统,该系统架构如图4所示。系统自上而下分为感知层、边缘层、平台层、应用层。感知层负责部署传感器与DALI智能灯具,完成现场数据采集与终端执行,经DALI总线、Modbus等协议将原始数据上传至边缘层;边缘层依托多台边缘网关实现数据清洗、本地缓存与现场策略执行;平台层集成整套算法优化模块与数据库,完成策略求解、参数校准及数据持久化,并将控制策略下发至边缘层;应用层基于HTTP/WebSocket和MQTT协议提供远程调控、报警推送及运维可视化看板,面向运维人员实现业务监控管理。

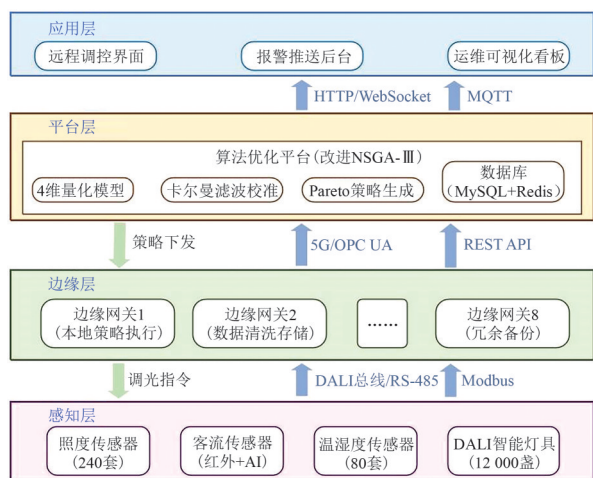


图4 系统架构

枢纽设备部署示意图如图5所示。传感器按照30 m间隔布设于客流通道、候车区、出入口等关键位置。8台边缘计算网关就近部署于各楼层配电间或弱电竖井内: F3高架候车层A、B区配电间各部署1台; F1到达层及F2站台层各部署1台; 剩余4台部署于B1、B2地下层。DALI主干线由主控制器引出,经竖井至各层网关;分支线从网关引出至各灯具组,单回路灯具数量不超过40盏。

4 实证研究与效果评估

4.1 实证方案

以广州某枢纽为研究对象,配置1.2万盏LED灯具,单灯额定功率为36 W,灯具能效为0.85,设

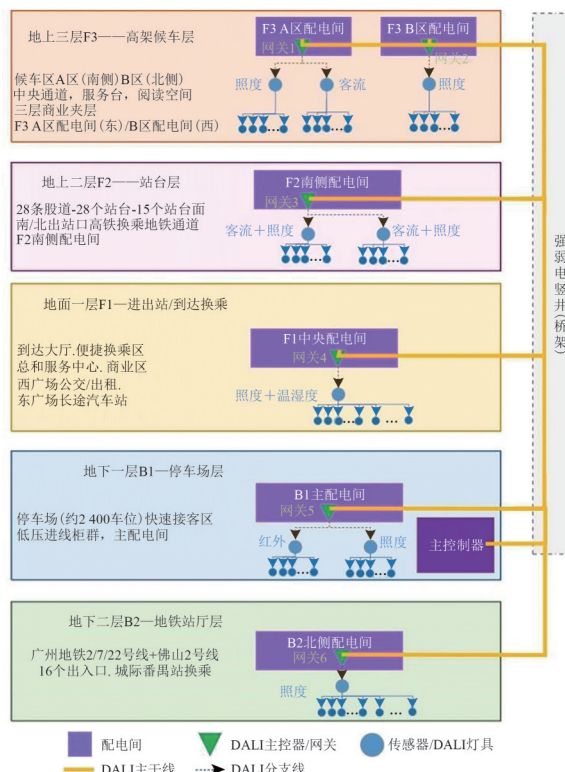


图5 枢纽设备部署示意图

计日客流容量为50万人次。各功能区域基础参数为: A类核心区域(出发大厅、站台层等)基础照度为200 lx,理想色温为3 500~4 500 K; B类区域(商业区)基础照度为150 lx,理想色温为4 000~5 000 K; C类区域(停车场、公交接驳区等)基础照度为80 lx,理想色温为2 700~3 500 K。通过“硬件实时监测+软件仿真补全”的方式采集2024年3月—2025年4月的2 160组有效样本,采用SPSS补全缺失数据。

4.2 仿真验证

4.2.1 量化关联仿真验证

采用控制变量法开展仿真,挖掘照明关键参数之间的普适量化关联规律,各组量化拟合结果如下。

1) 照度-能耗量化关联

固定色温为4 000 K,当照度百分比从30% (低负荷)增至100% (满负荷)时,能耗线性增长,拟合关系式为

$$E = 2.1L + 26.6 \quad R^2 = 0.91, p < 0.001 \quad (23)$$

式中: L 为平均照度百分比,为所有区域亮度的算术平均值,照度百分比每提升10%,能耗平均增加8.3%。

2) 色温-舒适度量化关联

固定照度百分比为70%,当色温从2 700 K增至

6 500 K 时,通过视觉舒适度问卷(信度系数 $\alpha=0.86$)与光照传感器数据加权计算得到舒适度得分,舒适度整体呈倒U型分布,二次拟合关系式为

$$C=-0.000\,015(T_c-4\,300)^2+58.7$$
$$R^2=0.96,p<0.001 \quad (24)$$

关键拟合常数如下:最佳舒适度色温为4 300 K;对应舒适度峰值得分为58.7分;二次曲率系数取值为 $-0.000\,015\text{分}\cdot\text{K}^{-2}$,负值表明舒适度随色温偏离先升后降,呈倒U型分布。

3) 照度波动-设备寿命量化关联

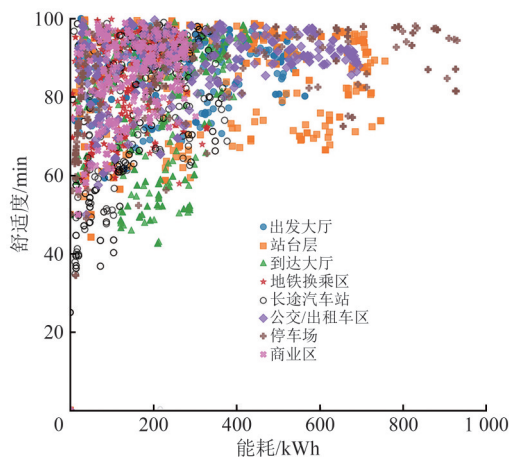
固定照度百分比为70%且色温为4 000 K,通过模拟不同时段亮度调节频率,使照度波动方差从5(平峰稳定工况)增至50(高峰频繁调节工况),则设备寿命由48 920 h指数衰减至32 150 h,拟合关系式为

$$S_{\text{avg}}=55\,000\exp(-0.015\text{Var}(L)^2)$$
$$R^2=0.94,p<0.001 \quad (25)$$

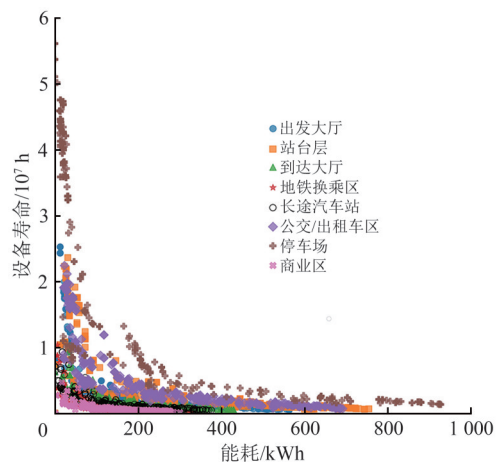
关键拟合常数如下:基准寿命为55 000 h;照度波动方差 $\text{Var}(L)$ 取值范围为5~20,对应平峰到高峰调节频率;照度波动衰减系数为 -0.015 ,由最小二乘法拟合得到,表示波动方差每增加1%,寿命相对缩短约1.5%。

4.2.2 Pareto 最优解集分布与权衡关系

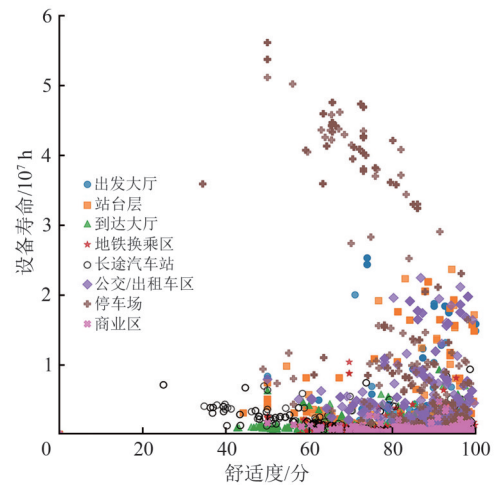
多目标组合优化下枢纽不同区域 Pareto 最优解关系如图6所示。由图6可知:能耗与舒适度呈强负相关($r=-0.87$),核心区策略集中于高能耗-高舒适度区域,辅助区则与之相反;能耗与设备寿命呈倒U型关系,能耗过低或过高能耗均会导致寿命缩短;舒适度与寿命呈弱负相关($r=-0.32$),LED 线性调光技术可缓解二者间15%~20%的矛盾。



(a) 能耗与舒适度组合



(b) 能耗与设备寿命组合



(c) 舒适度与设备寿命组合

图6 多目标组合优化下枢纽不同区域 Pareto 最优解关系

3类极端策略的量化指标对比见表2。由表2可知:能耗、舒适度与寿命三者为强互斥关系,最低能耗策略的能耗为95.99 kWh,但舒适度仅为45.42分,设备寿命仅为3 293 h;最高舒适度策略的舒适度可达91.04分,对应能耗却飙升至1 281.54 kWh;最长寿命策略的设备寿命为12 706.11 h,而舒适度仍不足50分。以上说明采用单一固定策略无法兼顾上述3项目标,须依场景动态权衡,也进一步验证了多目标优化的必要性。

表2 3类极端优化目标对应指标

极端优化目标	能耗/kWh	舒适度/分	设备平均寿命/h
最低能耗	95.99	45.42	3 293.51
最高舒适度	1 281.54	91.04	3 428.75
最长设备平均寿命	398.88	47.99	12 706.11

注:舒适度由热舒适度(基于ASHRAE标度进行百分制转换,±3对应0分,0对应100分)、温湿度指数THI(按预设阈值分段映射至百分制)按对应权重(专家评价法)组合计算,满分100分。

4.2.3 数据一致性验证与多目标均衡分析

采用仿真模型、实地监测和跨区域复测相结合的三级验证体系开展数据一致性验证。仿真模型输出与实地监测结果的平均偏差不大于 2.5%。典型区域中,出发大厅能耗仿真值为 228.7 kWh·d⁻¹,实测值为 225.3 kWh·d⁻¹,二者相对偏差仅为 1.5%,表明仿真计算与现场实测具备较好的数据一致性。

最优解集对应的分区域、分时段控制策略如图 7 所示。各时段划分规则及核心参数阈值见表 3。由图 7 和表 3 可得到如下结论。

(1) 交通核心区照明峰谷变化与客流变化保持同步,高峰时段照度百分比不低于 75%,色温为 4 500~5 500 K,低谷时段照度百分比为 25%~30%;配套区呈现反周期运行特征,低客流时段依靠 72% 的高关闭率实现节能,高峰阶段维持基础

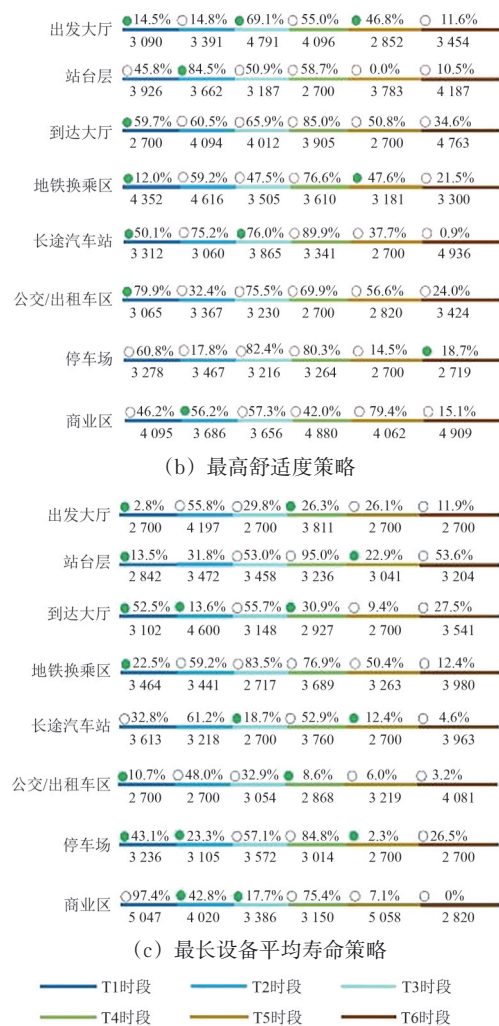
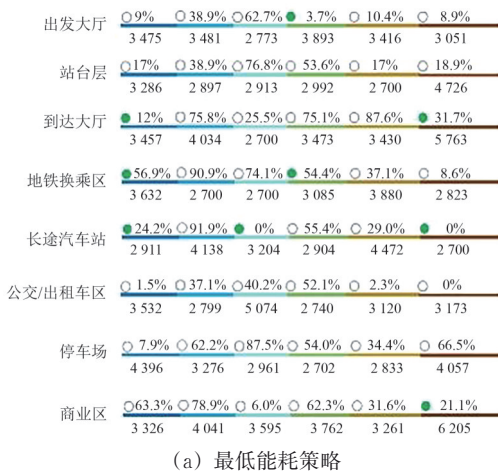


图 7 广州某枢纽不同优化目标的智能照明策略
注：照度为相对满亮度的百分比；时间轴下方数据为色温，单位 K；开关状态用圆点表示，空心表示关闭、实心表示开启。

表 3 时间划分标准和核心参数边界

时段	时间段	优化目标	核心控制参数边界	区域差异化适配
T1	05:00~07:00	最低能耗	照度百分比不超过 25%， 色温不超过 3 500 K, 关闭率不小于 60%	A 类:照度百分比为 15%~25%、色温 3 000~3 500 K B/C 类:照度百分比不超过 15%、部分区域关闭
T2	07:00~09:30	最高舒适度	照度百分比不小于 75%， 色温 4 500~5 500 K, 无启停	A 类:照度百分比为 75%~90%、色温 4 500~5 500 K B 类:照度百分比为 70%~80%、色温 4 000~5 000 K C 类:照度百分比为 50%~60%、色温 3 500~4 500 K
T3	09:30~17:00	能耗-舒适度- 寿命均衡	照度百分比 50%~70%，色温动态调节， 启停次数不超过 2 次·时段 ⁻¹	A 类:照度百分比为 60%~70% B 类:照度百分比为 55%~65%、显色指数不小于 90% C 类:照度百分比为 50%~60%、配合自然光补偿
T4	17:00~20:00	最高舒适度	照度百分比不小于 80%， 色温 5 000~6 000 K, 无启停	A 类:照度百分比为 80%~90%、色温 5 000~6 000 K B 类:照度百分比为 75%~85%、色温 4 500~5 500 K C 类:照度百分比为 60%~70%、色温 4 000~5 000 K
T5	20:00~23:00	最长设备寿命	照度百分比 30%~50%，色温不超过 3 800 K， 启停次数不超过 1 次·h ⁻¹	A 类:照度百分比为 30%~40%、色温 3 000~3 500 K B 类:照度百分比为 35%~45%、错峰休眠率 63% C 类:照度百分比为 25%~35%、非必要区域关闭
T6	23:00~05:00	最低能耗	照度百分比不超过 15%，仅关键区域运行， 关闭率不小于 72%	A 类:照度百分比为 10%~15% B 类:照度百分比不超过 10%、90% 区域关闭

照度水平。

(2) 最低能耗策略的主要特征为非核心区高关闭率(T6达72%)以及整体平均照度为38.2%;最高舒适度策略维持高照度(不低于75%)与最优色温(3 500 K~4 500 K)动态调节;均衡策略借助照度标准差约束与错峰启停机制,在3项目标间实现权衡;最长寿命策略则于低客流时段(T5)主动降低关键区域照度(不高于30%),切换至低色温(低于3 000 K),以此减缓光源光衰。

4.2.4 普适性与多场景适配验证

为开展跨枢纽普适性验证,选取深圳北站、武汉站作为仿真算例,结果表明,能耗预测误差不大于5.8%,舒适度预测误差不大于3.5分,综合优化效果提升16.2%~18.7%。

为验证模型对不同地域与极端工况的适应能力,补充北京南站进行仿真验证,重点评估在北方冬季及极端雨雪天气下的模型表现。在冬季低温适配方面,模拟-10℃极端低温条件,基于所提策略将色温动态上调至4 500 K(南方夏季为3 500 K),照度基准值上调12%以补偿低温下LED光效衰减。结果显示,设备寿命衰减率控制在6.3%(优于传统策略的15.8%),灯具故障率由无优化条件下的2.4次·d⁻¹降至1.1次·d⁻¹。在极端雨雪天气适配方面,设定连续24 h暴雪场景(自然光照度小于200 lx),事件因子取1.0触发应急模式。模型将核心区照度提升至额定值的1.3倍,色温固定为5 000 K。结果显示,策略响应延迟为0.48 s,设备故障率上升至1.3次·d⁻¹,但仍在可

接受范围内,设备寿命较正常工况缩短12.5%。表明所提能效优化方法不仅适用于南方温暖气候,通过参数调整同样可有效应对北方寒冷及极端雨雪天气,具有良好的跨地域适应性。

进一步开展多季节场景适配验证,夏季将色温下调至3 500 K,寿命损失从8.3%降至3.2%;冬季动态提升亮度,能耗较传统策略降低12.4%。全年平均能耗为228.7 kWh·d⁻¹,舒适度为58.1分,设备平均寿命为4 151.1 h,与传统策略相比,可实现有效节能,设备寿命延长23.5%,季节能耗差异控制在11.2%以内。策略切换规则如下:若连续3日的日均气温不低于30℃,则启动夏季模式(色温为3 500 K,亮度步长为3%);若连续3日自然光照度不高于1 200 lx且日均气温不高于10℃,则启动冬季模式(亮度基准值上调10%,自然光修正系数阈值为0.25);春秋季节维持均衡策略,按需微调参数。

4.2.5 对比验证

相同环境、参数与约束条件下不同方案的指标对比结果见表4。由表4可知,与粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法和遗传算法(Genetic Algorithm, GA)相比,本文方法的综合优化指数分别提升23.53%和16.67%。其优势源于2项改进:四维修正因子使搜索策略随场景自适应切换,避免了PSO在高客流时段过度牺牲舒适度的倾向;双层约束处理机制引导种群向可行域边界收敛,改善了GA在高维约束下收敛慢、高负荷能耗偏高的问题。

表4 不同方案指标对比结果

方案名称	综合能耗/(kWh·d ⁻¹)	舒适度/分	故障率/(次·d ⁻¹)	设备平均寿命/h	策略响应延迟/s	综合优化指数
经验调度策略	592.1	45.4	3.2	3 361.1	1.20	1.0
PSO算法	285.3	54.2	2.8	3 890.5	0.50	1.7
GA	312.6	56.8	1.2	3 950.2	0.80	1.8
本文方法	228.7	58.1	0.8	4 151.1	0.38	2.1

注:综合优化指数以传统策略为基准,综合能耗、舒适度、寿命、故障率等指标加权计算,各指标权重由熵权法确定。

4.3 实际运维效果与经济性

4.3.1 工程实施背景与现场条件

广州某综合客运枢纽为地下3层结构,原有照明系统建于2015年,采用定时开关控制,灯具为传统荧光灯及早期LED灯(光效不大于80 lm·W⁻¹),无调光功能。改造前实测存在三大问题:①照度不均,核心区夜间照度仅180 lx,低于标准200 lx;②能耗高,日均照明能耗为592.1 kWh;③故障率

高,灯具月均故障为3.2次·d⁻¹。

改造工程于2025年4月—6月实施,利用既有线路,保留原有灯壳,仅更换为DALI智能驱动及LED光源模组,综合能效(含驱动损耗)为0.85。新增照度/客流传感器240套、边缘计算网关8台。现场平均环境温度为15℃~35℃,相对湿度为60%~85%,部分区域存在电梯、变频设备等电磁干扰,已采取屏蔽措施。改造期间不影响枢纽正常运营。

4.3.2 运维优缺点

该照明优化系统具备多方面运维优势：①故障率显著降低，灯具月平均故障率由改造前的 $3.2\text{次}\cdot\text{d}^{-1}$ 降至 $0.8\text{次}\cdot\text{d}^{-1}$ ，降幅为75%，核心A类区域连续6个月零故障；②维护响应效率提升，自动故障报警推送使平均定位时间由2.5 h缩短至0.3 h；③调光平滑性获认可，照度调节步长不超5%，无肉眼可察觉频闪。

同时系统在试运行阶段也暴露出若干有待完善之处：项目初期调试复杂，首月试运行出现3次因客流预测偏差导致的照度不足事件，该问题已通过人工干预完成处置；受传感器积灰影响，有3个区域自然光补偿失效，已增加季度清洁计划；在大面积晚点等突发事件场景下，应急切换耗时65 s，略高于目标值60 s，经阈值优化后该指标已达标。

4.3.3 用户反馈

本次问卷调查得到旅客有效问卷275份，有效回收率为82.7%；得到运营人员有效问卷28份，有效回收率为80%。问卷采用Likert 5级量表，评分转换为百分制进行分析。结果表明：旅客综合照明舒适度评分为58.6分，其中“无明显眩光”项得分最高，为3.8分（5分制），“色温舒适度”得分次之，为3.7分（5分制）；运营人员对系统易用性评分为4.1分（5分制），主要建议为“简化手动调控界面”。将旅客实测综合舒适度与仿真预测值58.12分相比，偏差仅0.48分，验证了模型准确性。

4.3.4 投资与节电收益

本次枢纽照明系统智能化改造的总投资涵盖硬件设备投入与软件施工服务费用两大板块。硬件设备主要包含照明控制与感知终端、边缘计算设备，其中1.2万盏DALI控制器及LED模组合计投入102万元，240套照度、客流、红外一体化传感器投入15.6万元，8台边缘计算网关投入9.6万元；软件及配套服务费用包含智能算法平台开发部署费用25万元、现场施工安装与系统调试费用12万元，项目整体静态总投资约164.2万元。

基于2025年6月—2026年3月的实际运行监测数据，该智能照明改造方案具备显著的节能与经济效益。日均能耗由改造前592.1 kWh降至228.7 kWh，降幅为61.4%，折算年节约13.26万kWh，节约电费约10.61万元（按当地商业电价计）。同时，优化调控策略有效延长了照明设备使用寿命，每年可节约设备运维成本10.08万元，叠加碳减排附加收益后，本次利旧改造方案的静态投资回收期

约为5.7年，工程经济可行性良好。

4.3.5 存在的不足与改进方向

尽管系统整体表现优于预期，但实测中仍存在部分短板。在春运高峰等客流量超设计容量150%的极端场景下，照度追踪滞后约12 s，需引入客流预测模块进行预调节；部分旅客反映高色温（5 000 K以上）在夜间显“冷峻”，舒适性不足，后续将在低客流夜间时段（T5和T6时段）将色温控制在4 000 K以内。上述反馈已纳入下一版算法迭代中。

4.3.6 现场实施要点

改造实施过程中，经单灯回路测试、分区联动测试、全系统集成验证3个阶段调试，对模型关键参数进行了工程校准：换乘通道的空间联动权重 w_{ij} 由初设0.90调至0.75以抑制照度超调；延时衰减系数 τ 由0.6 h调至0.5 h以匹配实测客流消散曲线；单条DALI总线挂载灯具数由64盏优化至不超过40盏；通信延迟由1.2 s降至0.38 s。上述校准表明，模型参数需结合现场条件迭代整定，而非直接套用默认值。

5 结 语

围绕综合客运枢纽高负荷时段照明能效优化难题，提出1种改进多目标优化驱动的枢纽照明能效提升方法。构建“时间-空间-负荷-事件”四维量化耦合模型，揭示客流量超过设计容量120%时照明需求呈指数级增长的规律。针对NSGA-III算法在高维约束下搜索效率低、种群多样性易丢失的问题，引入四维修正因子实现遗传算子自适应调节，并设计可行性法则与动态惩罚函数结合的约束处理机制，显著提升了Pareto前沿的分布性与收敛性。与PSO、GA算法相比，改进后算法的综合优化指数分别提升23.53%和16.67%。经深圳北站、武汉站和北京南站跨场景验证，该方法在能耗、舒适度、设备寿命及故障率4方面均显著改善，且复杂工况下鲁棒性良好。工程实测表明，系统年节约13.26万kWh，利旧改造投资回收期约5.7年，旅客综合照明舒适度评分达58.6分，与仿真预测值的偏差小于1%，验证了该方法的工程适用性与经济价值。

本文尚未覆盖高海拔特殊场景，大型活动等突发客流下的照明适配参数缺少单独精细化优化，模型在极端条件下的泛化能力有待增强。未来工作重

点为:补充高海拔、大型赛事等特殊场景样本,提升模型自适应能力与参数鲁棒性;融合数字孪生技术,构建枢纽照明系统虚实映射平台,实现全生命周期能效预测与动态闭环调控;引入光伏储能等分

布式低碳能源,研究光-储-照多能流协同优化策略,拓展低碳运行边界;探索多枢纽群控与需求响应机制,为智慧客运枢纽的绿色、高效照明提供更全面的理论与技术支撑。

参 考 文 献

- [1] GB/T 51402—2021 城市客运交通枢纽设计标准[S].
GB/T 51402—2021 Standard for design of urban passenger transfer hub[S].
- [2] TB 10089—2015 铁路照明设计规范[S].
TB 10089—2015 Code for design of railway lighting[S].
- [3] T/CET 411—2024 铁路场所LED照明技术规范[S].
T/CET 411—2024 Technical specification for LED lighting in railway places[S].
- [4] 蒋涛,路洲.高架铁路客运站平天窗的多目标优化[J].华南理工大学学报(自然科学版),2022,50(7):13-24.
Jiang Tao, Lu Zhou. Multi-objective optimization of flat skylights in the elevated railway station[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(7): 13-24.
- [5] 路洲.广东地区高架式铁路客运站平天窗多目标优化设计研究[D].广州:华南理工大学,2021.
Lu Zhou. Study on multi-objective optimization design of flat skylight of elevated railway passenger station in Guangdong[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [6] 杨铁树.照明负荷平衡设计与安全节能[J].灯与照明,2014,38(3):11-13.
Yang Tieshu. Load balancing design and safety energy-saving of lighting[J]. Light & Lighting, 2014, 38(3): 11-13.
- [7] 李金冬,张苏,韩松,等.基于BAS的京张高铁站房能源管理系统研究[J].铁道标准设计,2020,64(1):176-179.
Li Jindong, Zhang Su, Han Song, et al. Researches on BAS-based energy management system (EMS) of stations on Beijing-Zhangjiakou High-Speed Railway[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(1): 176-179.
- [8] Uyan E, Atlar M, Ölçer A I. Improving the energy efficiency of lighting systems for a marine equipment manufacturing plant through retrofitting, daylighting, and behavior change[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 413: 137216.
- [9] 贺丰,吴亮亮,邵骏,等.航站楼照明系统中LED光源的能效优化研究[J].光源与照明,2024(4):26-28.
He Feng, Wu Liangliang, Shao Jun, et al. Research on energy efficiency optimization of LED light sources in terminal building lighting systems[J]. Lamps & Lighting, 2024(4): 26-28.
- [10] 应滕勇.大型公共场所照明系统能效提升方法与智能化管理策略研究[J].中国照明电器,2025(9):115-118.
Ying Tengyong. Research on energy efficiency improvement methods and intelligent management strategies for lighting systems in large public places[J]. China Light & Lighting, 2025(9): 115-118.
- [11] 胡康琦,马武彬,戴超凡,等.一种基于改进NSGA-III的联邦学习进化多目标优化算法[J].计算机科学,2025,52(3):152-160.
Hu Kangqi, Ma Wubin, Dai Chaofan, et al. Federated learning evolutionary multi-objective optimization algorithm based on improved NSGA-III[J]. Computer Science, 2025, 52(3): 152-160.
- [12] 钟佳淋,吴亚辉,邓苏,等.基于改进NSGA-III的多目标联邦学习进化算法[J].计算机科学,2023,50(4):333-342.
Zhong Jialin, Wu Yahui, Deng Su, et al. Multi-objective federated learning evolutionary algorithm based on improved NSGA-III[J]. Computer Science, 2023, 50(4): 333-342.
- [13] 孙钧.面向低碳经济城市地下空间/轨交地铁的节能减排与环保问题[J].隧道建设,2011,31(6):643-647.
Sun Jun. Energy saving, carbon emission reduction and environment protection in underground space/rail transit works in urban area[J]. Tunnel Construction, 2011, 31(6): 643-647.
- [14] 张伯敏.高铁客站照明技术的运用及节能降耗的思考[J].上海铁道科技,2013(1):99-100.
Zhang Bomin. Thoughts on the application of lighting technology and energy saving in high-speed railway stations[J]. Shanghai Railway Science & Technology, 2013(1): 99-100.
- [15] 尹翠蛟,刘建顺.基于优化算法的室内照明布局与能效提升研究[J].中国照明电器,2025(7):172-174.
Yin Cuijiao, Liu Jianshun. Research on indoor lighting layout and energy efficiency improvement based on optimisation

- algorithm[J]. *China Light & Lighting*, 2025(7): 172-174.
- [16] 刘虎,郑红娟,孙季泽. 高铁站综合能源能效评价方法构建[J]. *机电工程技术*, 2023, 52(10): 275-280, 284.
Liu Hu, Zheng Hongjuan, Sun Jize, et al. Construction of comprehensive energy efficiency evaluation method for high-speed rail stations[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2023, 52(10): 275-280, 284.
- [17] 杨天军. 基于气候分区的公路客运场站能耗及能效等级研究[J]. *公路交通科技*, 2018(7): 128-135.
Yang Tianjun. Study on energy consumption and energy efficiency level of highway passenger stations based on climatic divisions[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2018(7): 128-135.
- [18] 王青元,冯晓云,朱金陵等. 考虑再生制动能量利用的高速列车节能最优控制仿真研究[J]. *中国铁道科学*, 2015, 36(1): 96-103.
Wang Qingyuan, Feng Xiaoyun, Zhu Jinlin, et al. Simulation study on optimal energy-efficient control of high speed train considering regenerative brake energy[J]. *China Railway Science*, 2015, 36(1): 96-103.
- [19] Qi Ying, Li Qishui, Huang Zhaoyuan, et al. Dual-domain low-light image enhancement with hierarchical illumination guidance[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2026, 332: 114835.
- [20] 张永阳,张文斌,陈堃,等. 交通枢纽能耗自适应监测与控制系统研究[J]. *智能城市*, 2023, 9(2): 66-69.
Zhang Yongyang, Zhang Wenbin, Chen Kun, et al. Research on adaptive monitoring and control system for energy consumption in transportation hubs[J]. *Intelligent City*, 2023, 9(2): 66-69.
- [21] Kaur L, Kaur R. Energy-efficient smart architecture for fog-based WSN using NSGA-III and improved layer-wise clustering for enhanced building evacuation safety[J]. *Annals of Operations Research*, 2024: 1-24.
- [22] Larsen J L S, Hawtton K, Silverman M, et al. Ambivalence and suicidal behavior at railway stations: a scoping review[J]. *Archives of Suicide Research: Official Journal of the International Academy for Suicide Research*, 2025: 1-20.
- [23] 谢婉云. 基于行车安全考虑的立交枢纽照明设计优化研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2025.
Xie Wanyun. Study on lighting design optimization of interchange based on traffic safety[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2025.
- [24] 史海旗. 基于DALI协议的地铁枢纽站地下空间自动照明系统设计[J]. *微型电脑应用*, 2024, 40(11): 285-288.
Shi Haiqi. Design of automatic lighting system for underground space of subway hub station based on DALI protocol[J]. *Microcomputer Applications*, 2024, 40(11): 285-288.
- [25] Khan A M, Tariq M A, Alam Z, et al. Optimizing energy efficiency through building orientation and building information modelling (BIM) in diverse terrains: a case study in Pakistan[J]. *Energy*, 2024, 311: 133307.
- [26] Liao Ruixuan, Zhang Yiming, Wang Hao, et al. Multi-objective optimisation of surveillance camera placement for bridge-ship collision early-warning using an improved non-dominated sorting genetic algorithm[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2024, 69(Part B): 103918.
- [27] Deb K, Agrawal S, Pratap A, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [28] Deb K, Jain H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, Part I: solving problems with box constraints[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2014, 18(4): 577-601.

Lighting energy efficiency improvement method of integrated passenger hubs based on improved multi-objective optimization

Li Jun¹, Wang Mingzhe², Zhang Yawei²

(1. Passenger Transport and Hub Management Department, Beijing Jingwei Information Technology Co., Ltd.,
Beijing 100081, China;

2. Institute of Computing Technology, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: To address the core bottlenecks such as low lighting energy efficiency and poor scenario adaptability

in integrated passenger hubs during high-load periods, while balancing the dual requirements of green operation and passenger comfort, a lighting energy efficiency improvement method in hubs driven by improved multi-objective optimization is proposed. First, taking a large integrated passenger hub in Guangzhou as the research object, 2 160 valid samples covering 12 typical scenarios from 2024 to 2025 are collected. The least squares method is employed to reveal the nonlinear correlation and threshold effect between passenger flow and lighting demand. Second, a “time-space-load-event” four-dimensional coupling model is constructed. To address the low search efficiency of the original NSGA-III under high-dimensional constraints, an improved algorithm is designed, in which a four-dimensional correction factor is introduced to dynamically adjust crossover and mutation strategies, thereby enhancing the algorithm’s adaptability to time-varying demand. Additionally, a constraint handling mechanism combining feasibility rules and penalty functions is established to improve the diversity of the Pareto front. Finally, a multi-objective fitness function is built with the objectives of minimizing energy consumption, maximizing comfort, and maximizing equipment service life, and an adaptive closed-loop control system is implemented in conjunction with the Digital Addressable Lighting Interface (DALI) protocol. The results show that lighting demand grows exponentially when passenger flow exceeds 120% of the designed capacity. Compared with the traditional timed control scheme, the proposed method reduces the average daily energy consumption from 592.1 kWh to 228.7 kWh (a reduction of 61.37%), increases the passenger lighting comfort score from 45.4 to 58.1 (an improvement of 27.97%), and shortens the system response delay from 1.2 s to 0.38 s. Furthermore, it extends the lighting equipment service life by 23.50%, and stably adapts to passenger flow fluctuations within $\pm 30\%$. Compared with PSO and GA algorithms, the comprehensive optimization index of the proposed method is improved by 23.53% and 16.67%, respectively, and the average daily lamp failure rate is reduced from $3.2 \text{ times} \cdot \text{d}^{-1}$ under the traditional control scheme to $0.8 \text{ times} \cdot \text{d}^{-1}$, with a decrease of 75%. Validated by actual operation and maintenance data from the Guangzhou hub, the retrofit achieves annual electricity savings of approximately 132 600 kWh, with an overall electricity saving rate of 61.4%, corresponding to an annual electricity costs of approximately 106 100 CNY $\cdot \text{yr}^{-1}$. The static payback period for the retrofit using existing luminaire housings is about 5.7 years, and the integrated passenger lighting comfort score reaches 58.6, with a deviation of less than 1% from the simulation prediction of 58.1. The proposed method can effectively adapt to the dynamic demands of hubs, providing theoretical and technical support for the intelligent upgrading of lighting systems in similar transportation hubs.

Key words: Integrated passenger hub; Lighting energy efficiency optimization; Multi-factor coupling modeling; Improved NSGA-III algorithm; Adaptive closed-loop control

(责任编辑 杨婧婕)