

基于改进模拟退火算法的建筑室内光环境优化

许彦杰¹, 刘雨婷¹, 杨玉萍¹, 段培永²

(1. 山东建筑大学 信息与电气工程学院;
2. 齐鲁工业大学, 山东 济南 250101)

摘要: 随着生活水平的日益提高,我国办公建筑的能源消耗占比逐年增加,环境资源可利用率逐年下降,极大降低了能源开发与利用潜力。照明作为办公建筑中最重要的能源使用服务之一,照明系统经常因照明控制系统与人员时空分布不同步等而造成办公建筑能源消耗与视觉舒适度不平衡等问题。分别面向(不)可调亮度灯具,结合日光与灯光的组合预测模型,提出了基于莱维飞行改进的模拟退火算法和基于人员分布的室内照明优化调度策略。对比实验结果表明,该策略在满足工作(环绕)区域照度均匀度和人员统一照度需求的前提下,搜索并得到了灯光辅助照明时室内全部照明设备的最优调光亮度组合(各灯具亮度调节量的优化决策值),从而实现低能耗、多时变、高效率的室内光环境照明系统运行优化。

关键词: 室内照明优化;改进的模拟退火优化算法;莱维飞行;照明控制系统;运行优化

DOI: 10.11907/rjdk.232312

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TP18

文献标识码: A

文章编号: 1672-7800(2025)005-0097-10



Optimization of Building Indoor Light Environment Based on Improved Simulated Annealing Algorithm

XU Yanjie¹, LIU Yuting¹, YANG Yuping¹, DUAN Peiyong²

(1. School of Information and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University;
2. Qilu University of Technology, Ji'nan 250101, China)

Abstract: With the increasing standard of living, China's office building energy consumption ratio increases year by year, the environmental resource availability decreases year by year, greatly reducing the potential for energy development and utilization. Given that lighting is one of the most crucial energy-use services in office buildings, it is frequently out of sync with staff distribution, lighting control system distribution in space and time, and other issues resulting from uneven levels of visual comfort and energy consumption in office buildings. This paper proposes a simulated annealing algorithm based on the improvement of Lévy flight and an optimized scheduling strategy for indoor lighting based on personnel distribution by combining the combination of daylight and light prediction model with (dis)adjustable luminance lamps respectively. The comparative experimental results show that this strategy searches for and obtains the optimal dimming and brightness combination of all indoor lighting equipment (optimization decision values for the brightness adjustment of each lamp) under the premise of meeting the uniform illumination of the work (surrounding) area and the unified illumination requirements of personnel, thereby achieving low energy consumption, multi temporal variability, and high efficiency optimization of indoor lighting environment lighting system operation.

Key Words: indoor lighting optimization; improved simulated annealing optimization algorithm; Levi's flight; lighting control system; operation optimization

收稿日期: 2024-04-30

扫描二维码阅读全文:

基金项目: 国家自然科学基金项目(62073201)

作者简介: 许彦杰(1998-), 男, 山东建筑大学信息与电气工程学院硕士研究生, 研究方向为建筑室内光环境建模与优化; 刘雨婷(1999-), 女, 山东建筑大学信息与电气工程学院硕士研究生, 研究方向为智能环境与网络化控制; 杨玉萍(1998-), 女, 山东建筑大学信息与电气工程学院硕士研究生, 研究方向为智能环境与网络化控制; 段培永(1968-), 男, 博士, 齐鲁工业大学教授、博士生导师, 研究方向为智能环境和网络化控制、离散优化和调度。本文通讯作者: 段培永。



0 引言

近年来,随着全球城市化进程的不断加快与生活质量的不断提高,建筑能源总消耗量急剧增长,环境资源利用率不断下降,大量资源浪费,能源的开发与利用潜力极大降低^[1]。为了响应国家提出的可持续发展战略,建设可持续建筑、降低能源消耗已经势在必行。相关资料表明,我国建筑能耗约占全社会总能耗的20%^[2],欧美国家建筑能耗约占社会总能耗的40%^[3]。根据中国建筑节能协会发布的《中国建筑能耗研究报告2020》,全国建筑全寿命周期能耗总量为21.14×109 tce,占全国能源总消费量的比例为45.8%。因而实现建筑领域碳中和、碳达峰具有十分重要的意义^[4],它是对中国绿色低碳计划^[5]和欧洲零能耗建筑战略的积极响应^[6]。

照明是建筑业中最常见的能源使用服务之一。欧盟国家的建筑照明系统所引起的能耗在建筑总能耗中占比为21.57%^[7]。人们的生活水平逐渐提高,其对于室内舒适度和建筑服务的要求也越来越高。随着人们在室内时间需求的逐渐延长,其所需要的照明时间也相应增加,这些因素都将进一步导致各种传统建筑运行总能耗的持续增加^[8]。为了提高电力能源有效利用率,研究更加绿色的照明系统尤为必要。照明系统的绿色主要表现为满足其节约性、节能性和舒适性这3个需求。因此,最大限度地平衡节约、节能和舒适需求,构建建筑室内高质量光环境尤其重要^[9]。在室内光环境中,自然光与人工照明的总照度值应该满足人员工作时段内能长期舒适看清视觉对象的要求。

通过对照明控制系统的研究与回顾发现,基于优化算法的控制技术在满足室内人员视觉舒适的同时,对照明设备的亮度进行合理调节,更容易实现照度均匀最大化、能耗最小化、成本最小化等目标。与其他技术相比,优化技术被广泛使用的比例高达51%^[10]。此外,部分研究人员认为,在照明控制中,LED灯具的调光水平与其输出功率成正比,运用粒子群优化算法^[11-13]、遗传算法^[14]和网格搜索^[15]等优化算法,通过寻找灯具调光水平的最优组合以实现办公室照明总能耗最小化。上述方法各有优劣,截至目前,还没有适合解决所有优化问题的元启发式算法,最有效的方式是算法应用创新和组合不同算法这两种策略。

模拟退火(Simulated Annealing, SA)算法^[16]最早于1953年被提出。1983年,Kirkpatrick等^[17]成功地将退火思想引入到组合优化领域。在计算机研究^[18]、任务安排^[19]、工程优化^[20]等领域,模拟退火算法已经得到了广泛的应用和发展。但随着其应用范围的逐渐扩大,模拟退火算法通过随机探索和接受劣解的方式,虽然可以跳出局部最优解,但是其搜索速度通常较慢。因此,模拟退火优化算法须通过混合其他方法实现局部改进和全局更新的多策略

融合方式以优化上述问题。

鉴于此,本文提出了一种基于莱维飞行改进的模拟退火优化调度方法。①在模拟退火算法的各阶段综合考虑上述优化机制的优势,并对基本模拟退火优化算法进行策略改进;②融合了起始点初始化、莱维飞行随机游走策略和混合变异策略,提出了基于莱维飞行的改进模拟退火优化算法;③克服了综合求解性能弱的缺陷,提高了算法稳定性和全局搜索能力,能够跳出局部最优“陷阱”,更能有效地得到全局最优解,从而使室内照明能耗最小化。

1 算法分析

1.1 基于DIALux evo的办公室光环境仿真模型

本文利用DIALux evo软件仿真设计了一个高度为3 m的12 m×7.2 m通用办公室模型,如图1所示。本文采取对称配置灯具的方式在天花板上安装灯具,灯具类型为:Elektroskandia LUNI 150 60° MO 4000K DALI GULD REFLEKTOR SVART DEKORRING E7469790 + E7469709 + E7469731型号。照明设备布局如图2所示,安装高度设置为距地面2.8 m,均采用直接照明的方式。其余环境配置如表1所示。



Fig. 1 Space three-dimensional drawing design

图1 空间三维图设计

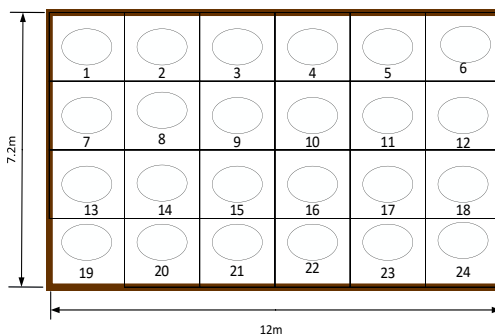


Fig. 2 Lighting layout

图2 灯具布局

Table 1 Environment configuration parameters

表1 环境配置参数

天花板、墙壁和 地板反射比	灯具 布局	灯具参数			
		功率/w	光通量/lm	色温/k	维护系数
0.7、0.5、0.2	4×6 对称配置	24	2 642	4 000	0.8

1.2 优化问题描述

照明控制系统是按照照明开关控制策略而设计,但在满级开灯情况下,系统能耗最大,并且照明设备满级开灯状态下会造成室内人员视觉不舒适。以上文所述的“智能照明办公室模型”为例,由于桌子之间没有高分区,每个人员位置点所获照度与多盏灯具可能会存在一定的耦合,使得第 $k(k \in [1, L])$ 个工作点的照度(目标值)等于 N 盏(不)可调光灯对其照度叠加和 $(E_{L'p_i, best})E_{LP_i, best}$,工作平面上灯具对任意 L 个人员位置的照度贡献为 $(E_{L'p_i, best})E_{LP_i, best}$,如式(1)和式(2)所示, $(E_{L'p_i, best})E_{LP_i, best}$ 是第 N 盏(不)可调光灯具对第 L 个人员位置的照度贡献; $(d_{L_i, best})d_{L_i, best}$ 是第 i 盏(不)可调光灯具当前的调光等级; $(V_{d_{L_i, best}})V_{d_{L_i, best}}$ 是第 i 盏(不)可调光灯具对应的调光状态,建筑室内灯光照度预测模型为 $(E_{L'p_i, best})E_{LP_i, best}$ 。日光照度预测模型为 E_{Dq_i} ,如式(3)所示, $f_M(x)$ 为人员位置点照度输出特征, n 为迭代次数, a 为节点, x 为输入样本空间。两者组合实现照明预测的方法可以表达为:根据照度标准值300 Lux和当前人员位置点得到的日光照度 E_{Dq_i} 进行差值计算,该差值为人员位置所需补光值 E_{sp_i} 。接着,利用照度预测模型 $(E_{L'p_i, best})E_{LP_i, best}$ 实现人员位置补光,将室内人员位置点的最终照度保持在[300 Lux, 550 Lux]范围内。因此,本文将人工照明与天然采光相结合,在合理并充分利用天然光的基础上,通过人工照明控制系统根据人员位置点对室内天然光照度不足进行照度补偿。

$$E_{L'p, best} = \begin{bmatrix} E_{L'p_1, best} \\ E_{L'p_2, best} \\ \vdots \\ E_{L'p_L, best} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{L'_1 p_1} & E_{L'_2 p_1} & \cdots & E_{L'_M p_1} \\ E_{L'_1 p_2} & E_{L'_2 p_2} & \cdots & E_{L'_M p_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{L'_1 p_L} & E_{L'_2 p_L} & \cdots & E_{L'_M p_L} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{d_{L'_1, best}} \\ V_{d_{L'_2, best}} \\ \vdots \\ V_{d_{L'_M, best}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$E_{LP, best} = \begin{bmatrix} E_{LP_1, best} \\ E_{LP_2, best} \\ \vdots \\ E_{LP_L, best} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{L_1 p_1} & E_{L_2 p_1} & \cdots & E_{L_M p_1} \\ E_{L_1 p_2} & E_{L_2 p_2} & \cdots & E_{L_M p_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{L_1 p_L} & E_{L_2 p_L} & \cdots & E_{L_M p_L} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{d_{L_1, best}} \\ V_{d_{L_2, best}} \\ \vdots \\ V_{d_{L_M, best}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$E_{Dq_i} = f_M(x) = f_0(x) + \sum_{n=1}^{n_{max}} \sum_{a=1}^{n_{total}} c_{na} I(x \in R_{na}) \quad (3)$$

1.3 建筑室内光环境智能调光优化调度策略

基于建筑室内人员分布的光环境优化调度控制策略侧重点在于:①结合当前室内人员位置点照度需求确定照明系统的开关状态;②根据室内人员需求确定各照明系统的调光等级和输出功率;③根据天然光对人员位置点照度动态影响确定如何控制照明系统的输出等级。最终,基于室内人员分布的照明控制系统运行优化策略框架如图3所示。

根据EN12464-1对于室内工作面照度均匀性的规范定义,本文将室内工作人员所处位置 $p_w(x_w, y_w)_{1 \leq w \leq L, 1 \leq$

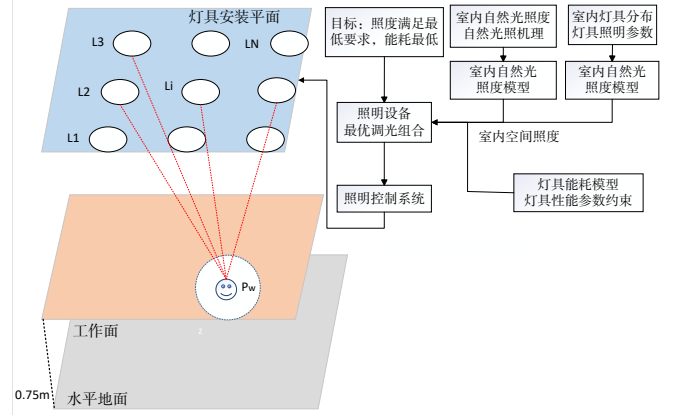


Fig. 3 Optimization strategy framework of indoor lighting system operation based on personnel distribution

图3 基于人员分布的室内照明系统运行优化策略框架

$w \leq L$ 设定为中心点,分别以半径 $r_{w_work} \leq 0.5$ m的工作区域和半径 $0.5 \text{ m} < r_{w_Surroundings} < 1$ m的环绕区域的照度均匀度为约束条件,从而在确保照明控制系统节能的前提下能够充分满足工作人员的视觉舒适度和工作人员位置点照度需求。本文分别面向不可调光灯具和可调光灯具设置优化调度算法的目标函数和约束条件。

1.3.1 面向不可调光灯具的智能优化调度算法目标函数与约束条件

针对不可调光灯具设计了智能优化调度策略,避免出现照明灯具长明,并且能在一定程度上降低建筑室内的照明能耗。不可调光灯具的照明状态 $d_{L_i, best}$ 一般设置为开($d_{L_i, best} = 1$)或者关($d_{L_i, best} = 0$)两种状态。在这种不可调光照明系统模式下,室内人员位置点 $p_w(x_w, y_w)$ 的照度矩阵可以表示为 $E_{L'p, best} = [E_{L'_1 p_1, best} \ E_{L'_2 p_1, best} \ \cdots \ E_{L'_M p_1, best}]^T$,故针对不可调光灯具的智能优化调度算法只考虑照度需要,设置目标函数和约束条件如式(4)一式(7)所示。

目标函数:

$$\text{Min } P_{L'p, best} = \sum_{i=1}^M P_{L'_1, best} + P_{L'_2, best} + \cdots + P_{L'_M, best} \quad (4)$$

约束条件:

$$\begin{bmatrix} P_{L'_1, best} \\ P_{L'_2, best} \\ \vdots \\ P_{L'_M, best} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{L'_1, best} & d_{L'_2, best} & \cdots & d_{L'_M, best} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{d_{L'_1, best}} \\ P_{d_{L'_2, best}} \\ \vdots \\ P_{d_{L'_M, best}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} P_{d_{L'_1, best}=0} & P_{d_{L'_1, best}=1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0w & 24w \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$E_{STP_{min}} \leq E_{L'p, best} + E_{Dp} \leq E_{STP_{max}} \quad (7)$$

其中, $P_{L'p, best}$ 是不可调光灯具优化调度的目标函数; $d_{L_i, best}$ 是不可调光灯具 L_i' 对应的最优灯具组合; $P_{L'_i, best}$ 是不可调光灯具 L_i' 在优化调度最优灯具组合下的输出功率; $E_{L'p, best}$ 和 E_{Dq} 分别是灯具和自然光对室内人员位置点的照度贡献; E_{STP} 是EN12464规定的办公室工作面高度的标准

照度。

1.3.2 面向可分段调光灯具的智能优化调度算法目标函数与约束条件

根据可分等级调光灯具的照明状态,本文分别设置了可分段调光等级 $d_{L_i,best}$ 和室内灯具的智能优化调度模型。该模型清晰描述了办公室内的 N 盏灯具对工作面高度上室内任意人员位置点 p_w 实现的照度补光以及搜索到的最佳亮度灯具组合,可分段调光灯具的目标函数和约束条件可以表示为如式(8)一式(14)所示。

目标函数:

$$\text{Min } P_{Lbest} = \sum_{i=1}^M P_{L_1,best} + P_{L_2,best} + \dots + P_{L_M,best} \quad (8)$$

约束条件:

$$\begin{bmatrix} P_{L_1,best} \\ P_{L_2,best} \\ \vdots \\ P_{L_M,best} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{L_1,best} & d_{L_2,best} & \dots & d_{L_M,best} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{d_{L_1,best}} \\ P_{d_{L_2,best}} \\ \vdots \\ P_{d_{L_M,best}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

灯具的调光功率:

$$P_{d_{L_i,best}} = 24 \times d_{L_i,best} \times \frac{1}{4} \quad (10)$$

$$D_{L_i,min} \leq d_{L_i,best} \leq D_{L_i,max} \quad (11)$$

其中, R 表示距离人员位置 0.5 m 的圆周半径,该圆周区域即为人员所在位置的工作区域。

$$U_{0_work} = \frac{E_{wLDp_{min}}}{E_{wLDp_{max}}} \Big|_{R=0.5} \in [0.7, 1] \quad (12)$$

$$U_{0_Surroundings} = \frac{E_{sLDp_{min}}}{E_{sLDp_{max}}} \in [0.5, 1] \quad (13)$$

$$E_{STp_{min}} \leq E_{Lp_{best}} + E_{Dp} \leq E_{STp_{max}} \quad (14)$$

其中, P_{Lbest} 是针对可分等级调光灯具智能优化调度的照明总功率; $d_{L_i,best}$ 是可调等级灯具对应的最佳亮度灯具组合; $P_{d_{L_i,best}}$ 是可调光灯具在最佳灯具组合下对应的输出功率; E_{LDp} 是室内人员位置点在自然光叠加室内灯光获得的总照度值; $E_{wLDp_{min}}$ 和 $E_{wLDp_{max}}$ 分别是室内人员在工作区域内的最小照度值和平均照度值; $E_{sLDp_{min}}$ 和 $E_{sLDp_{max}}$ 分别是室内人员在环绕区域内的最小照度值和平均照度值; U_{0_work} 和 $U_{0_Surroundings}$ 分别是室内人员在工作区域内和环绕区域内的照度均匀度。

1.4 基于莱维飞行和混合变异算子改进的模拟退火优化算法

模拟退火算法(SA)是根据给定函数利用概率方式获取近似全局最优解的启发式算法,为了克服对整体解空间认知的不足,以及搜寻效率和所求解性能的限制,本文对模拟退火算法加以改进。首先,针对模拟退火算法对高维度问题收敛速度慢、处理效率低的问题,提出了一种初始化策略,利用初始反向操作,选择更好的初始解,使得算法的多样性得到明显提升;其次,在产生新解的阶段引入了

基于莱维飞行的随机游走策略,通过局部搜索使得个体位置灵活变化,有利于提高算法全局寻优能力;最后,增设了一种将高斯变异与柯西变异相结合的混合变异策略,通过对个体进行混合变异,从而跳出局部最优。因此,本文提出了一种基于莱维飞行改进的模拟退火算法。

1.4.1 模拟退火优化算法

模拟退火算法(SA)借鉴固体的退火原理,是一种模拟金属缓慢降温的优化方法,当固体温度很高时,内能相对较大,固体的内部粒子快速无序运动,在温度缓慢降低的过程中,固体的内能逐渐减小,粒子排列逐渐趋于有序,最终,当固体达到常温状态时,内能达到最小,此时粒子排列状态最为稳定。模拟退火算法便是基于这样的原理设计而成。

模拟退火算法从某一较高的温度开始,该温度称为初始温度,随着温度参数的不断降低,算法中的解趋于稳定,但这样的稳定解可能是一个局部最优解,此时模拟退火算法会以一定的概率跳出局部最优解,寻找目标函数的全局最优解。模拟退火算法的主要思想是:在搜索区间随机游走,然后利用 Metropolis 抽样准则,使随机游走逐渐收敛于局部最优解。而温度是 Metropolis 算法的重要参数,决定了随机游过程收敛的快慢。在某个温度下,固体分子从一个状态转移到另一个状态时,如果新状态的内能小,无条件接受;如果新状态的内能大,则以一定的概率接受它,如式(15)所示。马尔科夫链的长度 L 为任意温度的迭代次数算法在 L 内持续进行“产生新解—判断—接受/舍弃”的迭代过程,对应着固体在某一恒定温度下趋于热平衡的过程。一般选取 $L=100N$, N 为问题的规模。控制参数 T 的终止值 T_f (停止准则)的最终温度通常是 0, 但会消耗许多模拟时间。当温度趋近于 0, 其周围状态几乎一样, 设置一个可接受的温度即可 ($T>0.001$)。

$$p = \begin{cases} 1 & \text{if } E(x_{new}) < E(x_{old}) \\ \exp\left(-\frac{E(x_{new}) - E(x_{old})}{T}\right) & \text{if } E(x_{new}) \geq E(x_{old}) \end{cases} \quad (15)$$

控制温度 T 的衰减函数如式(16)所示,其中 a 取 0.98, 可以快速收敛到较好的解。当温度较高时,有助于跳出局部最优解并探索全局最优解的可能性,提高算法效率。在退火过程中,随着温度的降低,算法会逐渐减少对较差解的接受程度,更加集中地搜索较好的解,减少计算资源消耗。

$$t(k+1) = at(k) \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (16)$$

1.4.2 非线性自适应反向初始化策略

改进模拟退火算法的创新之一是在起始点的初始化状态进行改进,起始点初始化方法对模拟退火优化算法的迭代运行结果会产生较大影响,好的起始点初始水平有利于优化算法迭代过程,使之快速收敛至全局最优附近区域^[21]。针对模拟退火算法随机生成的初始解水平较低而

导致可行解范围增大、搜索时间变长的情况,本文从初始解在搜索空间的分布情况入手,提出了一种自适应精英反向初始化方法。其中,本文的创新点之一为整个起始点初始化均采用自适应精英方法生成,具体表示如式(17)和式(18)所示。

$$w = \mu + \sigma \times N(0, 1) \quad (17)$$

$$\bar{X}_i = r_3 \times (1 - w) \times (L + U - X_i) + r_3 \times w \times (2 \times R - X_i) \quad (18)$$

式中, ω 表示自适应惯性权重; $N(0, 1)$ 表示标准正态分布的随机数; $X_s (s \in n_{stu})$ 表示当前起始点位置, L 和 U 分别表示可行解的最大/小值, $r_3 = rand(0, 1)$, R 表示可行解的平均值。

经过自适应精英反向优化后,分别计算相应起始点的适应度值,按照式(19)选择适应度值较优的值作为起始点。

$$X_s = \begin{cases} \bar{X}_s, & f(\bar{X}_s) < f(X_s) \\ X_s, & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

1.4.3 莱维飞行

改进模拟退火算法的另一个创新点是在模拟退火算法中加入莱维飞行,提高系统新状态的评价函数值。莱维飞行经常应用于自然界中动物的移动过程,在未知环境里以最高搜索效率完成当前任务。在游走过程中,它通常伴随着小概率长距离游走和大概率短距离游走,从而提高算法全局寻优能力^[22]。高效进行全局寻优可以更好地提高系统新状态的评价函数值,故通过引入莱维飞行的变异策略,以增强所产生新解的评价函数值。

$$Levy(s) \sim |s|^{-1-\beta} \quad 0 < \beta < 2 \quad (20)$$

$$new X_u = X_u + r \otimes Levy(s) \quad (21)$$

其中, $r = rand(0, 1)$, $\otimes$ 表示点乘运算, $Levy(s)$ 表示莱维飞行服从随机步长为 s 的莱维分布。由于服从莱维分布的随机数较难获取,Kalita^[23]采用Mantegna提出的算法进行计算,其方程如式(22)、式(23)所示。

$$s = \frac{\mu}{|v_0|^{\frac{1}{\beta}}} \quad (22)$$

$$\sigma_\mu = \left(\frac{\Gamma(1+\beta) \sin \frac{\pi\beta}{2}}{\Gamma\left(\frac{1+\beta}{2}\right) \beta^{*} 2^{(\beta-1)/2}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (23)$$

其中, μ 和 v_0 服从正态分布, $\mu \sim N(0, \sigma_\mu^2)$, $v_0 \sim N(0, 1)$ 。 Γ 为伽马函数。为简化计算, β 通常取为1.5,计算得到 $\sigma_\mu = 0.6966$ 。 β 控制了莱维分布的形状,它决定了莱维分布的尾部重尾程度。当 β 取较小的值时,莱维分布的尾部较重,存在更大的跳跃步长;当 β 取较大的值时,莱维分布的尾部较轻,存在较小的跳跃步长;当 β 取1.5时,莱维分布的尾部形状较合适,能够在搜索过程中实现较好的探索和利用平衡。

1.4.4 混合变异提高全局搜索能力

变异算法是优化算法常用的一种个体更新手段,常见的高斯变异和柯西变异分别可以赋予算法更好的局部搜索能力与较强的全局探索能力,增加搜索空间,有利于算法跳出局部最优解。由于单一的变异算法很难同时具备上述两种搜索能力,故将高斯变异和柯西变异相结合,利用高斯-柯西混合变异实现在不同的阶段进行变异,高斯柯西混合变异结合了高斯变异和柯西变异两种策略的优势,在模拟退火算法中平衡全局搜索和局部搜索的需求。高斯变异通常用于提供全局搜索的随机性,有助于算法跳出局部最优解,柯西变异则提供了更强烈的局部搜索能力,对于一些局部结构较为复杂的区域更具有效性,混合两者可以在搜索过程中平衡全局和局部的需求,使算法更全面地探索搜索空间。综上所述,更新过程的前期主要侧重柯西变异,后期更侧重高斯变异。更新公式如式(24)所示。

$$x_{new}^{(i)} = \omega_1 \cdot x_{current}^{(i)} + \omega_2 \cdot Mutation_1^{(i)} + \omega_3 \cdot Mutation_2^{(i)} \quad (24)$$

其中, $x_{new}^{(i)}$ 是新解的第 i 维度的值, $x_{current}^{(i)}$ 是当前解的第 i 维度的值, $Mutation_1^{(i)}$ 是第一种变异操作高斯变异生成的第 i 维度的值, $Mutation_2^{(i)}$ 是第二种变异操作柯西变异生成的第 i 维度的值。 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 是相应的权重,它们的和为1,用来控制不同变异操作的贡献程度。

综合上述改进方法,本文提出了一种混合优化技术改进的模拟退火算法,通过改进算法初始化方法、增强新解产生策略以提高模拟退火算法的性能。不同阶段的改进可以增加模拟退火迅速收敛至全局最优的机会。

算法1 基于莱维飞行改进模拟退火优化算法

输入:日光预测模型输入特征;室内灯具的具体位置坐标点;人员分布位置坐标点。

输出:最优灯具组合中各灯具的调光等级及对应的总功率。

1. 初始化:设定初始温度 T (足够大),采用起始点初始化方法进行起始点初始化,具体表示为式(17)和式(18),设定初始解状态 $x(0)$,设定每个 T 值的迭代次数 L ,设置 x 更新函数,最优解 $best$ 和最优解目标函数 $f(best)$;

2. 随机生成一个解 x ,重复步骤3-7;

3. 计算出一个新的参数 $x(i) = g(x(i-1))$;

4. 计算目标函数增量 $\Delta pop = pop(x(i)) - pop(x(i-1))$;

5. 引入莱维飞行的变异策略,如式(20)以增强所产生新解的评价函数值。根据Metropolis算法选择是否接受新的解 $x(i)$,如不接受,则 $x(i) = x(i-1)$;

6. 如果 $pop(x(i)) < pop(best)$, $best = x(i)$;

7. 如果满足终止条件(T 足够小或者目标函数 $pop(best)$ 达到指标),输出最优解 $best$,结束;否则,更新温度 T ,转到b。

1.4.5 基于改进模拟退火算法面向最优灯具组合的搜索策略原理

建筑室内最佳灯具组合的搜索策略是:通过模拟退火方法搜索最优组合灯具的调光水平 $d_{L'best}$ =

$\begin{bmatrix} d_{L_1'best} & d_{L_2'best} & \cdots & d_{L_N'best} \end{bmatrix}$ 或 $d_{Lbest} = \begin{bmatrix} d_{L_1best} & d_{L_2best} & \cdots & d_{L_Nbest} \end{bmatrix}$ 、建筑室内照明灯具的输出总功率 P_{Lbest} ，然后将搜索到的最佳调光水平 d_{Lbest} ($d_{L'best}$) 反馈至建筑室内智能照明控制系统各灯具的控制开度，通过准确

控制建筑室内相应灯具的调光水平从而降低照明系统的电能消耗量。此外，室内照明系统能耗优化调度运用模拟退火算法实现灯具补光的最佳亮度组合搜索流程如图4所示。

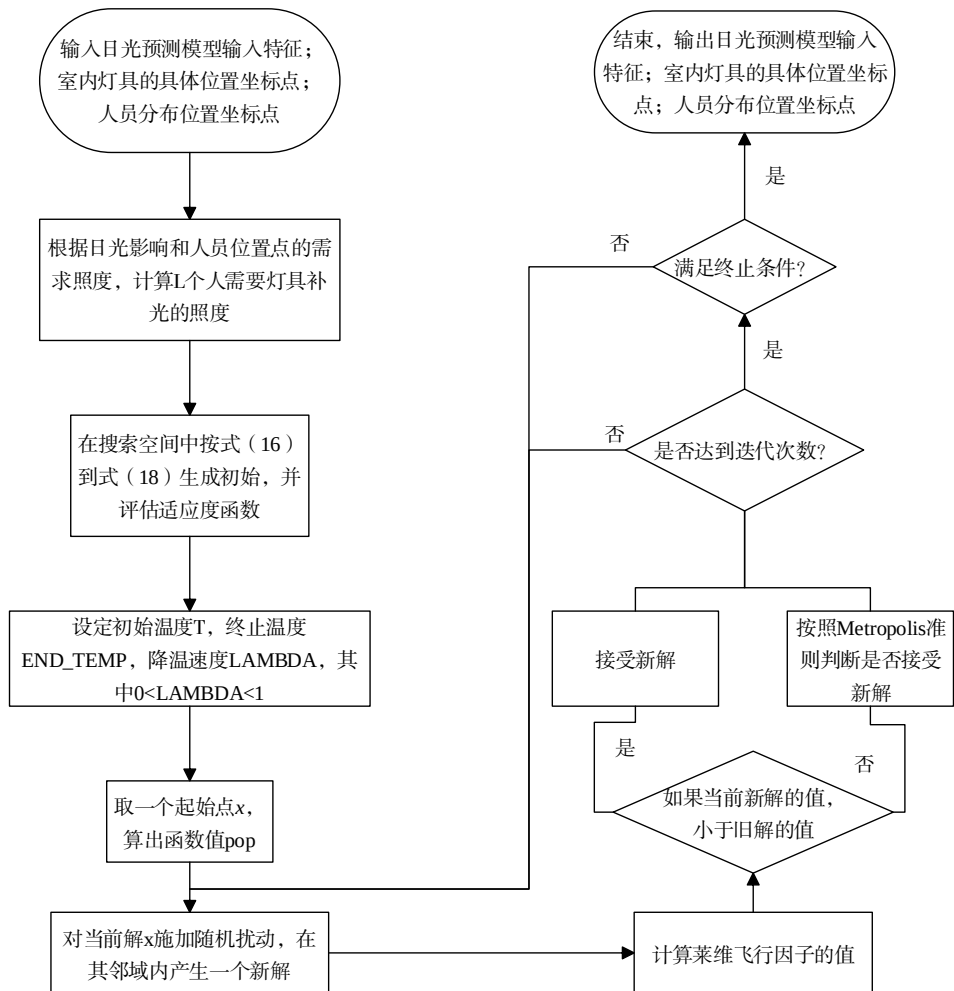


Fig. 4 Optimal brightness combination search procedure

图4 最佳亮度组合搜索过程

2 仿真实验与结果分析

为了验证上文提出的建筑室内光环境智能调光优化调度策略的性能,通过仿真实验设计了2023年7月23日和2024年1月13日(雾天)8:00–11:00和13:00–17:00等工作时间段内每小时对应的行走中、办公、准备离开等不同情景下的建筑室内人员位置点分布情况,如图5所示,为之后完成建筑室内灯光亮度优化调节工作提供必要条件。图5中虚线椭圆区域内的工作人员只依靠自然光就能满足工作人员的正常照度需求,无须额外灯具补光,这一现象主要表现为随着自然光入射角度的变化,工作时段内靠近窗子的人员位置处;而虚线椭圆外部的工作人员与之相反,表示其获取的日光贡献不足以满足人员照度标准需求,需要利用人工照明进行补光。因此,最终确定各

时间点待补光人员数量分别为7、8、4、7、5、7、7、4。本文相关工作是在AMD Ryzen 5 4500U的配置上使用Python 3.8和DIALux Evo照明设计软件而实现,所用数据集为自采数据。

2.1 不同情景下的灯具开启情况分析

本文共设置了5种不同的照明情景用于对比实验:①在“日光+不可调光灯具”条件下的长明状态,即不考虑任何因素仍开启全部灯具;②在“日光+不可调光灯具”条件下不考虑人员舒适度,利用模拟退火算法实现基于人员分布的局部照明;③在“日光+不可调光灯具”条件下不考虑人员舒适度,利用改进的模拟退火算法实现基于人员分布的局部照明;④在“日光+可调光灯具”条件下不考虑人员舒适度,结合改进的模拟退火算法实现基于人员分布的局部照明;⑤在“日光+可调光灯具”条件下,综合考虑人员分布情况和工作区域、环绕区域的照度均匀度等因素,利

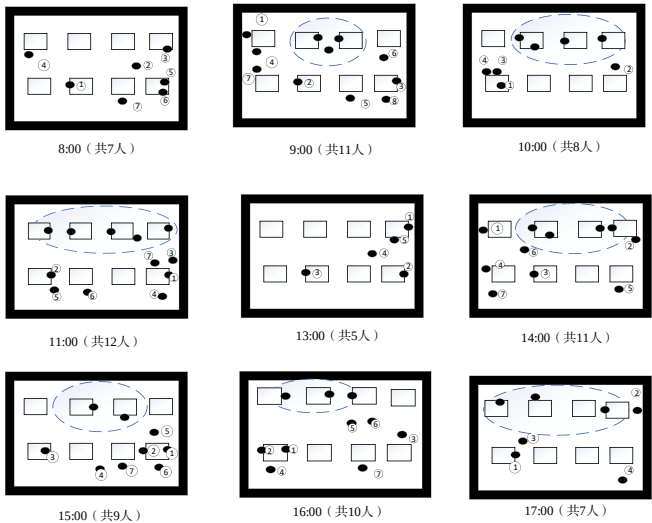


Fig. 5 The distribution of people during office hours

图5 办公室工作时段内人员分布情况

用改进的模拟退火算法实现局部照明。

在上述 5 种照明实验环境中,9 个整时刻点待开启照明的灯具情况如表 2、表 3 所示。

Table 2 Number of indoor lighting fixtures opened at different times
(1)

表 2 不同时段室内照明灯具开启数量(1)		(盏)									
日期	情景	8:00	9:00	10:00	11:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	
7月23日	情景一	24	24	24	24	24	24	24	24	24	
	情景二	15	12	16	18	9	12	13	10	7	
	情景三	8	13	10	7	16	5	14	17	10	
	情景四	6	16	12	16	15	14	10	14	12	
	情景五	14	10	4	12	5	13	12	10	12	

Table 3 Number of indoor lighting fixtures opened at different times
(2)

表 3 不同时段室内照明灯具开启数量(2)		(盏)									
日期	情景	8:00	9:00	10:00	11:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	
7月23日	情景一	24	24	24	24	24	24	24	24	24	
	情景二	17	12	15	18	11	12	12	9	10	
	情景三	10	12	11	9	16	6	14	16	10	
	情景四	8	16	13	15	15	16	12	13	14	
	情景五	13	11	5	10	6	15	15	15	14	

可以看出,在办公时间范围内(除 12 点)使用辅助照明较多。在不同的天气情况下,情景一不考虑灯具可调光和室内人员视觉舒适需求对应的开灯数量最多,其余 4 个情景均考虑了室内人员分布情况,灯具开启数量相比情景一明显下降。情景二、三采用相同的不可调光模式,照明灯具非开即关,比较模拟退火和改进的模拟退火两种算法的优化结果可以看出,改进的模拟退火算法开启灯具更少。情景四、五是在可调光模式下搜索灯具组合,与情景一、二、三相比,在不同的天气情况下这两个情景下的平均灯具开启数量更少,比情景一、二、三节能率更高,这为未来实现智能照明提供了依据。此外,还针对求解出的最优亮度组合,对上述照明情景当天的照明用能及节能率进行分析,结果如表 4、表 5 和图 6、图 7 所示。

分析,结果如表 4、表 5 和图 6、图 7 所示。

Table 4 Comparison of lighting system energy use in different scenarios(1)

表 4 不同情景下的照明系统用能情况对比(1)		(w)									
日期	情景	8:00	9:00	10:00	11:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	
7月23日	情景一	576	576	576	576	576	576	576	576	576	
	情景二	480	364	528	536	340	388	404	384	216	
	情景三	464	436	412	496	428	472	552	476	208	
	情景四	212	316	208	232	228	344	328	264	284	
	情景五	304	208	200	260	244	304	272	240	284	

Table 5 Comparison of lighting system energy use in different scenarios(2)

表 5 不同情景下的照明系统用能情况对比(2)		(w)									
日期	情景	8:00	9:00	10:00	11:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	
1月13日	情景一	576	576	576	576	576	576	576	576	576	
	情景二	488	340	548	540	356	396	428	388	220	
	情景三	464	440	436	488	404	476	560	490	212	
	情景四	216	324	232	236	224	348	304	268	292	
	情景五	308	216	204	256	248	308	260	248	280	

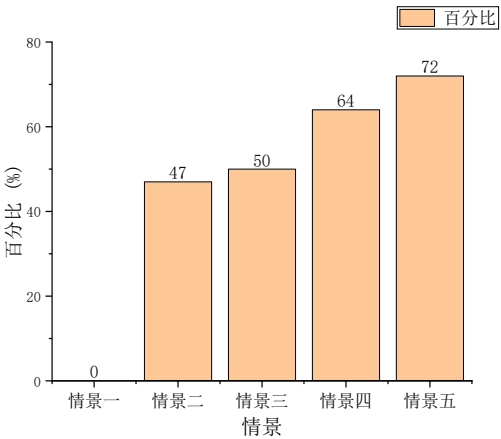


Fig. 6 Comparison of energy saving rate of lighting system under five scenarios in one day on July 23, 2023

图6 2023年7月23日一天内5个情景下照明系统节能率比较

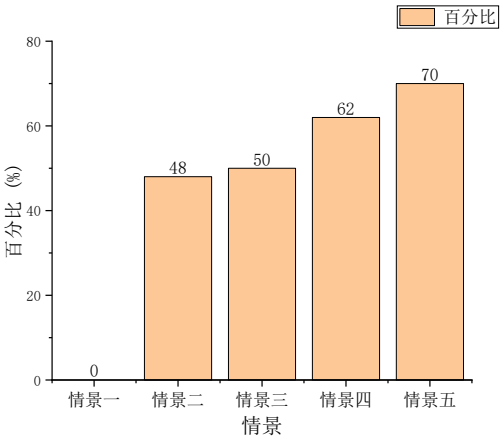


Fig. 7 Comparison of energy saving rate of lighting system under five scenarios in one day on January 13, 2024

图7 2024年1月13日一天内5个情景下照明系统节能率比较

通过表4、表5和图6、图7可知,与模拟退火算法在照明优化调度任务中得到的结果相比,改进的模拟退火优化算法提高了照明系统的节能率。不可调光模式下的照明系统在节能方面与可调光灯具相比缺乏优势,能耗量增加近20%(根据文献[24-25]对结合天然采光的人工照明系统能耗计算公式得到)。其中,情景四和情景五相比,情景四并未考虑人员视觉舒适性问题,仅满足了人员位置点的照度需求;情景五综合考虑了灯具可调光、人员视觉舒适及人员分布等因素,利用改进的模拟退火算法最终搜索到了灯具最佳亮度组合,该情景下的照明系统节能率达70%。

2.2 不同时间粒度属性下的人员位置照度及视觉舒适性结果分析

本文针对情景五验证了2023年7月23日基于人员分布的建筑室内光环境智能调光优化调度策略的性能。不同时间粒度属性下搜索到的最佳灯具组合 $d_{L,best}$,如表6所示。此外,还分别对比了室内灯具调光状态为上述最佳亮度组合时,室内每个人员位置坐标点的总照度值(见图8)和人员所在工作(环绕)区域的照度均匀度(见表7)。

Table 6 The optimal lighting combination searched by the optimal scheduling strategy of indoor illumination based on personnel distribution

表6 基于人员分布的室内照度优化调度策略搜索到的最优灯具组合

人员分布情况	最优调光灯具组合 $d_{L,best}$
8:00 (共7人)	[000000101313232131102033]
9:00 (共11人)	[210002210201031021103231]
10:00 (共8人)	[002111020030330222010000]
11:00 (共12人)	[000013000021022012031033]
13:00 (共5人)	[000002201021210323030012]
14:00 (共11人)	[210001010002230122332232]
15:00 (共9人)	[000101120010222013312230]
16:00 (共10人)	[001012101112112020312320]
17:00 (共7人)	[000001010200220212031001]

从表6可以看出,建筑室内的24盏照明灯具中,大多数照明设备处于调光等级的中间状态,处于调光等级最大开度的灯具占比相对较少,处于调光等级关闭状态的灯具占比居中。仿真实验结果表明,满足工作人员所在位置的照度需求并不需要打开所有灯具,智能照明控制系统采用可调光照明设备可以实现节能最大化,有效避免传统照明

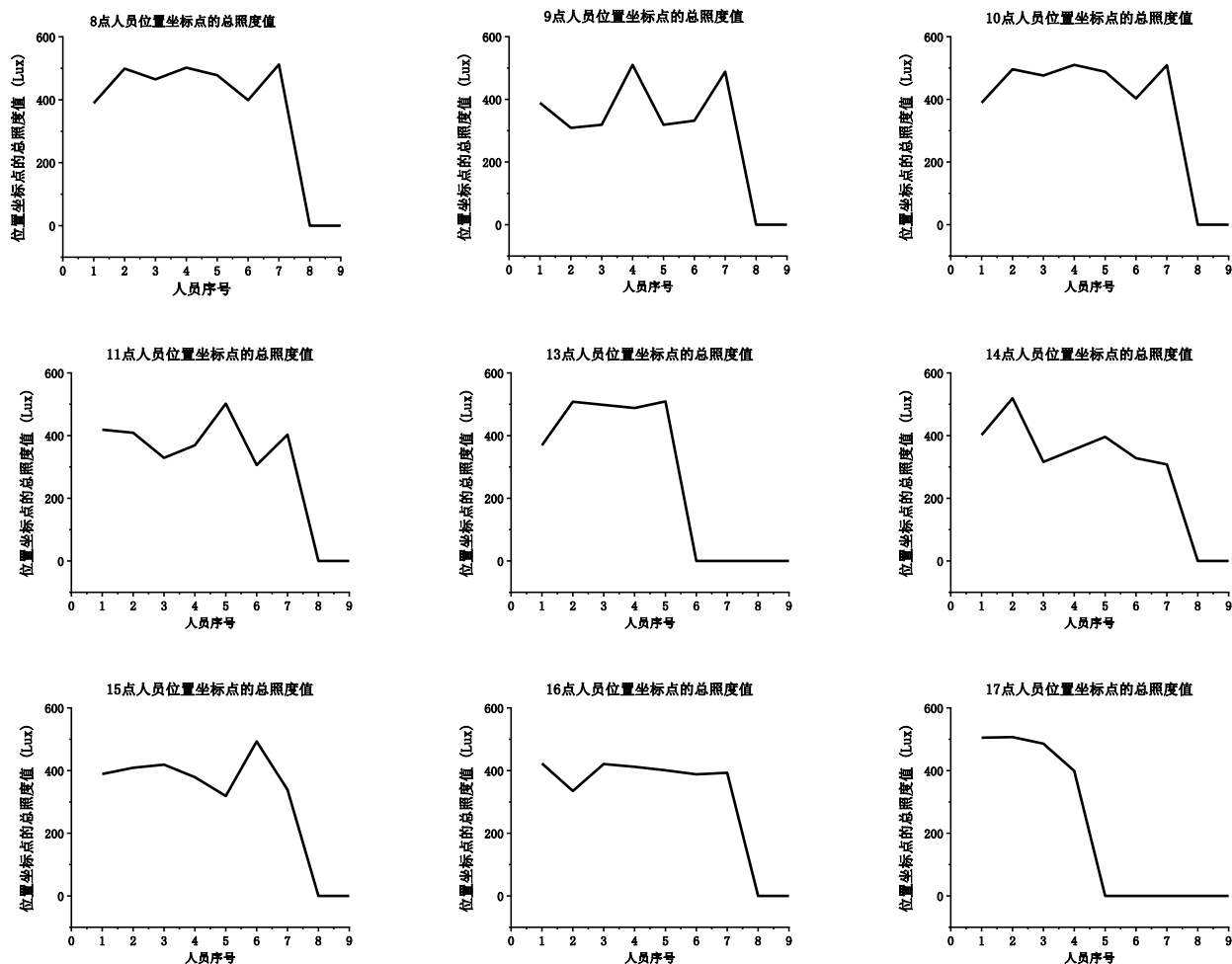


Fig. 8 The total illumination value of each person's position coordinate point under the optimal lighting combination

图8 最优灯具组合下每个人员位置坐标点的总照度值(E_{LDp})

设备的长明现象。

图 8 展示了针对各整小时数内灯具最优亮度组合下各室内工作人员位置点得到的总照度值。实验结果表明,所有室内工作人员所在位置点自然光叠加灯光的总照度贡献均处于本文设定的照度阈值范围内,即在[300 Lux, 550 Lux]照度范围内,符合 EN12464-1 照度标准。

结合对工作区域照度均匀度阈值设定的表述和对工作人员视觉环境舒适性的分析,表 7 描述了工作人员所在位置点环绕区域的照度均匀度和所处工作区域的照度均匀度。从上述均匀度数据可以得出,在情景五中使用基于人员分布的建筑室内光环境智能调光优化调度策略后,室内工作人员所在工作区域的照度均匀度均大于等于 0.7,所在环绕区域的照度均匀度均大于等于 0.5,这一结论符合本文设定的预期值。

因此,本文提出的基于人员分布的室内光环境优化调度策略可以很好地搜索到满足室内工作人员所在工作区域照度均匀度均大于或等于 0.7(或 0.5)的灯具最佳亮度组合,在一定程度上协调了自然光的利用率、照明功耗、可调光灯具与照明控制系统相结合以及人员位置分布与人员视觉的相对舒适性。

Table 7 Illuminance uniformity in the working area and surrounding area of each person under the optimal lighting combination

表 7 最优灯具组合下每个人员所处工作区域和环绕区域的照度均匀度

	时刻	1	2	3	4	5	6	7	8
工作区域 的照度均 匀度	8:00	0.88	0.89	0.91	0.82	0.82	0.65	0.93	—
	9:00	0.78	0.92	0.83	0.79	0.85	0.88	0.81	0.7
	10:00	0.80	0.78	0.79	0.81	—	—	—	—
	11:00	0.81	0.82	0.79	0.72	0.77	0.87	0.93	—
	13:00	0.77	0.92	0.89	0.87	0.85	—	—	—
	14:00	0.81	0.81	0.98	0.74	0.75	0.9	0.8	—
	15:00	0.94	0.73	0.91	0.86	0.9	0.82	0.81	—
	16:00	0.75	0.86	0.92	0.8	0.84	0.96	0.82	—
环绕区域 的照度均 匀度	17:00	0.87	0.88	0.89	0.81	—	—	—	—
	8:00	0.92	0.89	0.88	0.57	0.83	0.62	0.9	—
	9:00	0.75	0.94	0.77	0.76	0.6	0.76	0.7	0.53
	10:00	0.84	0.68	0.75	0.69	—	—	—	—
	11:00	0.55	0.77	0.68	0.57	0.52	0.67	0.85	—
	13:00	0.69	0.91	0.87	0.77	0.76	—	—	—
	14:00	0.68	0.56	0.89	0.63	0.64	0.84	0.59	—
	15:00	0.86	0.68	0.81	0.78	0.87	0.74	0.68	—
	16:00	0.58	0.88	0.79	0.62	0.84	0.93	0.57	—
	17:00	0.81	0.65	0.82	0.56	—	—	—	—

3 结语

本文首先介绍了照明优化问题,为之后建筑室内照明能耗优化工作奠定了基础;其次,面向不可调与可调灯具验证了智能调光优化调度策略的性能,并且考虑了人员分布与室内工作人员偏好的不确定性;再次,设计了一种改进的模拟退火算法并将其应用于优化问题;重点研究将改进的模拟退火算法应用于照明建筑室内智能照明系统的

电量消耗变化情况。对比实验结果表明,本文设定的 5 个室内照明场景,通过建筑室内光环境智能调光优化调度策略可以充分利用自然光源,分别满足室内任意人员所在位置的照度需求、工作区域和环绕区域的照度均匀度以及最佳灯具亮度组合,最终实现基于人员分布的室内光环境优化调度策略,通过调控室内人工照明,从而达到室内人员视觉舒适且照明节能的效果。

目前,模拟退火优化算法的变体层出不穷,考虑到智能照明控制系统需要对人员位置照度需求作出快速变化,后续工作可通过提高算法收敛速度改进模拟退火优化算法,以便能够更快、更准确地实现最优亮度组合。本文研究主要是基于光学仿真平台,未来需结合实际照明控制系统研究光环境优化调度,从而进一步探讨在仿真环境和实际环境中优化策略结果分析的一致性。此外,还将进一步总结各类典型灯具的照度分布情况,形成照度分布模型库,并基于此模型库重新建立改进灯具布置与人员位置信息的连接模型。

参考文献:

[1] DING Y, LYU J. Pilot problems and suggestions of public building energy consumption and energy efficiency disclosure system[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2021, 51(8): 70-77.
丁勇,吕婕. 公共建筑能耗与能效披露制度试点问题与建议[J]. 暖通空调, 2021, 51(8): 70-77.

[2] SHANKAR A, VIJAYAKUMAR K, BABU B C. Energy saving potential through artificial lighting system in PV integrated smart buildings[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 43: 103080.

[3] BIANCHI C, ZHANG L, GOLDWASSER D, et al. Modeling occupancy-driven building loads for large and diversified building stocks through the use of parametric schedules[J]. Applied Energy, 2020, 276(2): 115470.

[4] SUN Y, ZHANG C, ZHAO Y, et al. A systematic review on thermal environment and thermal comfort studies in Chinese residential buildings[J]. Energy and buildings, 2023, 291(7): 113134.

[5] BACHANEK K H, TUNDYS B, WISNIEWSKI T, et al. Intelligent street lighting in a smart city concepts—a direction to energy saving in cities: an overview and case study[J]. Energies, 2021, 14(11): 3018.

[6] XIE M J, HOU J H, SHAN F, et al. Design strategy analysis of near-zero energy buildings in European green campuses: a case study of LUCIA building in University of Valladolid, Spain[J]. Central China Architecture, 2022, 40(7): 34-38.
谢孟举,侯俊豪,单峰,等. 欧洲绿色校园近零能耗建筑设计策略分析——以西班牙巴利亚多利德大学露西亚楼(LUCIA)为例[J]. 华中建筑, 2022, 40(7): 34-38.

[7] PANG W Q, HE N, LI X M, et al. Study on adaptive control method of data fusion in indoor environment[J]. Control Theory and Application, 2020, 37(3): 610-619.
庞维庆,何宁,李秀梅,等. 室内环境的数据融合自适应调控方法研究[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(3): 610-619.

[8] SHI C C, TAN L B. Study on the influence of building light environment on work efficiency [J]. Building Technology Development, 2019, 46(17):

- 101-102.
史偲岑, 谭良斌. 建筑光环境对工作效率的影响研究[J]. 建筑技术开发, 2019, 46(17): 101-102.
- [9] YUAN M. Study on evaluation index of health performance of office building for enterprise's own use[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021.
袁梦. 企业自用型办公建筑健康性能评价指标研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- [10] WANGIMAN K R, ABDULLAH M N, HASSAN M Y, et al. Lighting system control techniques in commercial buildings: current trends and future directions[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 31: 101342.
- [11] LIAO C, LEE S, CHIOU Y, et al. Power consumption minimization by distributive particle swarm optimization for luminance control and its parallel implementations[J]. Expert Systems with Applications: An International Journal, 2018, 96: 479-491.
- [12] JI X C. Data-driven modeling and optimal scheduling of indoor building light environment[D]. Ji'nan: Shandong Jianzhu University, 2023.
冀心成. 数据驱动的建筑室内光环境建模与优化调度[D]. 济南: 山东建筑大学, 2023.
- [13] MADIAS E N D, KONTAXIS P A, TOPALIS F V. Application of multi-objective genetic algorithms to interior lighting optimization[J]. Energy & Buildings, 2016, 125: 66-74.
- [14] NIE L S, LUO D W. Optimization of port lighting control system based on improved genetic algorithm[J]. Communication Power Technology, 2020, 37(6): 26-27.
聂乐顺, 罗大为. 基于改进遗传算法的港口照明控制系统优化[J]. 通信电源技术, 2020, 37(6): 26-27.
- [15] MANDAL P, DEY D, ROY B. Indoor lighting optimization: a comparative study between grid search optimization and particle swarm optimization[J]. Journal of Optics, 2019, 48(2): 429-411.
- [16] GE X L, WANG W X, LI S Y. Intelligent algorithms and applications [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2017.
葛显龙, 王伟鑫, 李顺勇. 智能算法及应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2017.
- [17] KIRKPATRICK S, GELATT JR C D, VECCHI M P. Optimization by simulated annealing[J]. Science, 1983, 220: 671-680.
- [18] ZHANG W X, WANG S H, WEI B, et al. Intelligent test optimization based on simulated annealing algorithm[J]. Cyber Integration of Military and Civilian, 2022(Z3): 31-38.
张卫祥, 王泗宏, 魏波, 等. 基于模拟退火算法的智能测试优化[J]. 网信军民融合, 2022(Z3): 31-38.
- [19] LIU G C, MA Y S. Research on location selection and task assignment of urban logistics UAV distribution center[J]. Flight Mechanics, 2023, 41(3): 88-94.
刘光才, 马寅松. 城市物流无人机配送中心选址及任务分配研究[J]. 飞行力学, 2023, 41(3): 88-94.
- [20] LU Y K, WANG N. Sea and air cooperative search and rescue optimization model and improved simulated annealing algorithm[J]. Computer Simulation, 2019, 36(8): 399-403.
卢毅可, 王诺. 海空协同搜救优化模型及其改进模拟退火算法[J]. 计算机仿真, 2019, 36(8): 399-403.
- [21] HAUPT R L, HAUPT S E. Practical genetic algorithms [M]. Hoboken: Wiley InterScience, 1997.
- [22] MA W, ZHU X. Sparrow search algorithm based on Levy flight disturbance strategy[J]. Journal of Applied Science, 2022, 40(1): 116-130.
马卫, 朱娴. 基于莱维飞行扰动策略的麻雀搜索算法[J]. 应用科学学报, 2022, 40(1): 116-130.
- [23] KALITA K, GHADAI R K, CHAKRABORTY S. A comparative study on multi-objective pareto optimization of WEDM process using nature-inspired metaheuristic algorithms[J]. IJIDeM: International Journal on Interactive Design and Manufacturing, 2023, 17(2): 499-516.
- [24] LUO X C. Design and research of smart home monitoring system based on ZigBee wireless sensor network[J]. Computer Knowledge and Technology, 2023, 19(6): 79-81.
罗学成. 基于 ZigBee 无线传感网络的智能家居监控系统的设计研究[J]. 电脑知识与技术, 2023, 19(6): 79-81.
- [25] LUO Z, SUN C, DONG Q, et al. Key control variables affecting interior visual comfort for automated louver control in open-plan office—a study using machine learning [J]. Building and Environment, 2022, 207: 108565.

(责任编辑: 孙娟)