

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)03-0084-05

# 基于近红外光谱技术与粒子群优化方法的配方原料替换

张翼鹏<sup>1</sup>, 姜慧<sup>2</sup>, 凌军<sup>1</sup>, 颜克亮<sup>1</sup>, 杨乾栩<sup>1</sup>

(1. 云南中烟工业有限责任公司, 云南昆明 650231; 2. 大连达硕信息技术有限公司, 辽宁大连 116023)

**摘要:** 针对传统配方中原料替换依赖专家经验、效率低、缺乏科学约束, 且不适应数字化时代要求的问题, 融合粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法的全局优化优势与近红外光谱的快速分析能力, 建立科学智能的配方替换方法, 确保替换后配方与原配方下的产品质量一致性与稳定性。基于近红外光谱相似性原则, 构建融合光谱信息散度、欧式距离与 Pearson 相似度的目标函数, 采用 PSO 算法解决配方替换组合优化问题。采用 13 个高斯函数模拟 2 000 个原料光谱, 设计 10 000 个配方组合开展模拟替换实验, 迭代寻优获取最优方案; 选取 12 个实际烟叶配方进行智能推荐, 归一化光谱数据优化相似度计算, 通过专家评吸验证一致性。结果表明, 模拟实验中, 81.82% 的推荐配方与原配方差异性小于 0.000 5, 所有结果差异均小于 0.01; 实际配方验证中, 83.33% 的方案在专家评吸与光谱相似性分析中保持一致。该方法显著提升配方替换效率, 保障替换后配方质量, 为配方科学化管理提供重要技术支撑, 可广泛应用于烟草、制药等多个领域。

**关键词:** 配方原料替换; 近红外技术; 粒子群优化; 配方优化; 产品质量

**中图分类号:** TP18; TP274+.52

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1003-7241(2026)03-0084-05

## Raw materials substitution in formulations based on near-infrared spectroscopy technology and particle swarm optimization method

ZHANG Yipeng<sup>1</sup>, JIANG Hui<sup>2</sup>, LING Jun<sup>1</sup>, YAN Kelian<sup>1</sup>, YANG Qianxu<sup>1</sup>

(1. R &amp; D Center of China Tobacco Yunnan Industrial Co., Ltd., Kunming 650231, Yunnan, China;

2. Dalian ChemDataSolution Information Technology Co., Ltd., Dalian 116023, Liaoning, China)

**Abstract:** To address the issues of traditional raw material replacement in formulations, such as over-reliance on expert experience, low efficiency, lack of scientific constraints, and incompatibility with the demands of the digital era. It integrates the global optimization capability of the particle swarm optimization (PSO) algorithm with the rapid analysis performance of near-infrared (NIR) spectroscopy in this work. The aim is to establish a scientific and intelligent formulation method and ensures the consistency and stability of product quality between the replaced and original formulations. On the basis of the principle of NIR spectral similarity, an objective function integrating spectral information divergence (SID), Euclidean distance, and Pearson similarity is constructed to achieve the goal. The PSO algorithm is employed to solve the combinatorial optimization problem in formulation replacement. Thirteen Gaussian functions are used to simulate 2 000 raw material spectra, and 10 000 formulation combinations are designed for simulated substitution experiments to obtain optimal schemes through iterative optimization. Twelve actual tobacco leaf formulations are selected for intelligent substitution recommendation. The spectral data are normalized to optimize similarity calculation, and expert sensory evaluation is conducted to verify the consistency of the substitution schemes. In the simulated experiments, 81.82% of the PSO-recommended formulations exhibits a difference of less than 0.000 5 from the original ones with all differences below 0.01, which meets the requirement of spectral similarity. In the validation step of actual formulations, 83.33% of the schemes shows consistency between expert sensory evaluation results and spectral similarity analysis. It significantly improves the efficiency of formulation replacement and effectively guarantees the quality stability of the formulations. This provides crucial technical support for the scientific management of formulations in industrial production, and can be widely applied in tobacco, pharmaceuticals, and other related fields.

**Keywords:** raw materials substitution; near-Infrared technology; particle swarm optimization; formulation optimization; product quality

原料配方的替换与维护, 在工业生产的众多领域中, 都是一个极具普遍性和挑战性的问题。传统配方替换与

维护往往依靠专家经验, 这种方式非常费时、费力, 在诸多场景中难以实现, 且无法满足大数据与人工智能时代的科

收稿日期: 2024-07-23; 录用日期: 2024-09-27

基金项目: 云南省技术创新人才培养对象项目 (202405AD350020); 云南中烟工业有限责任公司科技项目 (2022CP02)

作者简介: 张翼鹏 (1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事卷烟调香研究工作。

通信作者: 杨乾栩 (1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 卷烟产品开发。

引用本文: 张翼鹏, 姜慧, 凌军, 颜克亮, 等. 基于近红外光谱技术与粒子群优化方法的配方原料替换 [J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(3): 84-88.

(ZHANG Yipeng, JIANG Hui, LING Jun, et al. Raw materials substitution in formulations based on near-infrared spectroscopy technology and particle swarm optimization method [J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(3): 84-88.)

学化与数字化要求。

近红外光谱分析技术凭借其高效、无须前处理、无污染、非破坏性以及多组分同时定量分析等优势<sup>[1-4]</sup>,已在医疗、饲料、食品、石油化工、烟草等领域获得了广泛应用<sup>[5-12]</sup>。而粒子群优化算法是进化计算的一个分支,一种模拟自然界生物活动的随机搜索算法,模拟了自然界鸟群捕食的过程,通过群体中的协作寻找目标问题的全局最优解<sup>[13-17]</sup>。

近年来,结合近红外光谱数据与智能优化算法、相似度分析、关联规则等方法,配方维护方面的研究与应用取得了持续进展。但这些研究较少涉及条件约束的配方原料替换与维护,从而限制了配方维护工作中先验知识的使用,降低了配方维护的可用性与可靠性。因此,本研究基于近红外光谱的相似性原则,利用粒子群优化算法解决配方维护中原料替换的组合优化问题,以期实现配方中原料替换的科学化与智能化,亦为其他类似问题提供借鉴。

### 1 粒子群优化的配方原料替换

在配方原料替换与维护的过程中,利用粒子群优化算法对被替换的原料进行组合优化,辅助配方替换与维护,粒子群算法进行原料配方组合优化的具体流程如图 1 所示。

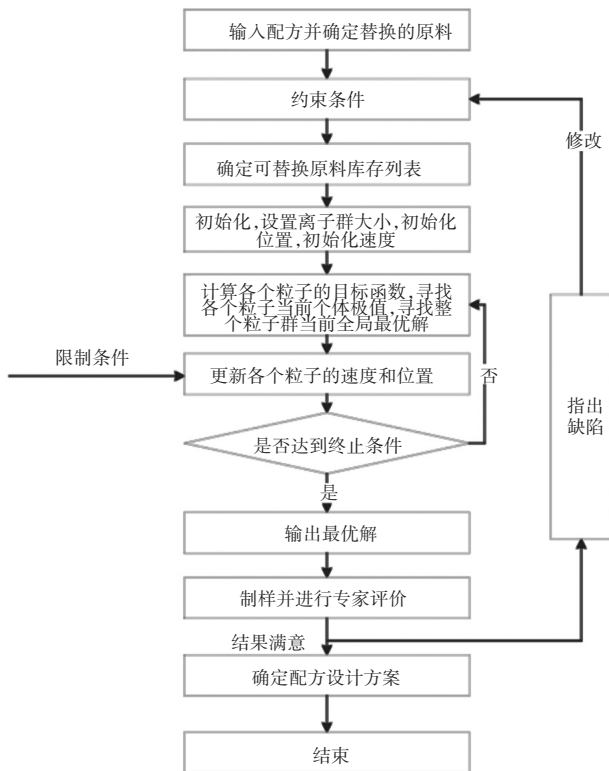


图 1 粒子群优化流程图

Fig. 1 PSO flow chart

一般地,在原料配方设计中,每个配方由  $m$  个原料组成,每个原料使用近红外光谱进行表达,  $m$  个原料的百分比含量之和为 100%,设定配方中需要被替换的原料个数为  $n$  个,替换原料比例为 PER。同时设定每个原料比例范围为 0~10%,原料库存中的候选搜索个数为  $D$ 。设置粒

子群参数,初始种群数为  $N$ ,以及迭代次数。

#### 1) 初始化

初始种群数为  $N$ ,即  $N$  个粒子组成一个群落。

#### 2) 确定目标函数

基于相关性计算方法构建目标函数,评价粒子,迭代寻找与目标光谱最相似的组合,即量化评价替换前  $n$  个原料的光谱与替换后原料的光谱的相似性与差异性,具体差异性分析方法,如下式所示。

$$SS(X, Y) = SID(X, Y) \times \text{Euclidean}(X, Y) \times (1 - \text{Pearson}(X, Y)) \quad (1)$$

其中, SID 表达光谱信息散度,  $SID(X, Y) = D(X \| Y) + D(Y \| X)$ , 根据光谱间的相对熵评价光谱差异性, Euclidean 为欧式距离, Pearson 为光谱相似性。基于此,寻找初始最优解,即寻找个体极值,找到各个粒子的当前个体极值位置,以及寻找全局极值,找到整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置。

#### 3) 更新速度和位置

$$v_{ij}(t + 1) = v_{ij} + c_1 r_1(t) [p_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_2(t) [p_{gj}(t) - x_{ij}(t)] \quad (2)$$

$$x_{ij}(t + 1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t + 1) \quad (3)$$

其中,  $t$  为迭代次数,  $c_1$  和  $c_2$  为学习因子,即加速常数使粒子具有自我总结和向群体中优秀个体学习的能力从而向最优点靠近,  $r_1$  和  $r_2$  是  $[0, 1]$  内的随机数可增加粒子飞行的随机性,以操持群体的多样性,  $j = 1, 2, \dots, N$ ,  $v_{ij}$  是粒子的速度,  $v_{ij} \in [-v_{\max}, v_{\max}]$ ,  $v_{\max}, v_{\min}$  是常数。

#### 4) 迭代终止条件,寻找到全局最优解

在处理原料替换中的组合优化问题时,每个粒子对应搜索空间的一个潜在方案,在进化过程中基于适应度函数进行选择 and 记录,粒子之间分享速度信息,并调节运动速度,寻找最佳位置。同时由于粒子具有记忆性,因此在算法迭代结束时,不仅可以得到最优值,还可以得到次优解。

#### 5) 专家评价确定原料配方最终方案

迭代寻找与目标光谱最相似的组合,作为最终推荐结果。然后根据这些结果配制样品进行光谱检测和专家评价,利用专家评价结果和配方光谱相似性进行验证。若是结果不一致,则根据专家经验调整原料约束条件再优化智能推荐算法,直到专家评价结果与光谱相似性结果达到一致性,并确定最终的原料替换方案。

与此同时,本研究采用模拟光谱分析的方法,通过模拟一系列的原料光谱,采用上述基于粒子群优化策略的方法,验证分析方法的可靠性与有效性。

## 2 实验

### 2.1 模拟光谱

本文采用多个高斯函数对近红外光谱曲线进行拟合,如式(10)所示。

$$\text{NIR} = \sum_{i=1}^n A_i \times \exp\left(-\frac{(x - B_i)^2}{2C_i^2}\right) \quad (4)$$

式中,  $n$  为高斯函数的个数,  $A_i$  为峰高, 峰位置为  $B_i$ , 峰宽为  $C_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。

初次拟合光谱采用 8 个高斯函数进行拟合, 拟合结果显示峰数量少, 需要继续增加峰数量。图 2 为 8 个与 13 个高斯函数进行拟合的结果, 其中, 实线表示原始光谱, 虚线表示模拟的光谱。结果表明, 在使用 13 个高斯函数进行光谱拟合时达到了良好的近红外数据效果。因此, 使用

13 个高斯函数对光谱进行模拟, 然后采用正交实验设计方法模拟近红外光谱, 主要采用 13 个高斯函数中的峰高和峰位进行设计, 正交表的水平是因素中的不同取值, 即峰高为 10 个水平, 峰位为 4 个水平, 然后进行正交实验设计, 共计得到 200 个组合结果, 每个组合结果同时采用随机数扰动 10 次, 得到模拟光谱结果, 共模拟得到 2 000 个原料光谱结果。

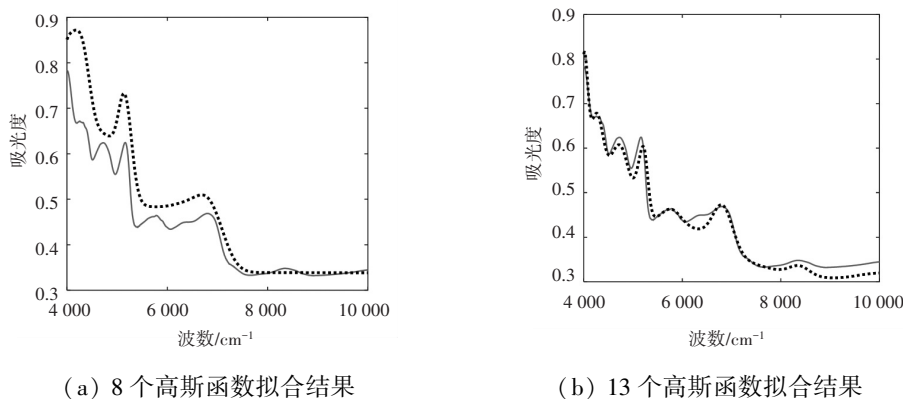


图 2 多个高斯函数模拟光谱图

Fig. 2 Simulated spectrum of multiple gaussian functions

## 2.2 光谱采集

### 2.2.1 实验条件

采用热电 Antaris II 近红外光谱仪, 在相同的实验环境下, 收集不同产地、不同品种、不同部位的烟叶原料样本 106 个 (其中 79% 的烟叶原料样本来源于云南, 其他 21%

的烟叶原料样本来源于安徽、福建、贵州、四川、湖南、湖北、山西、四川、延安、内蒙古等 13 个产地), 采集烟叶原料样本的近红外光谱数据, 样品的制样方法, 以及具体的实验条件, 如下表所示。

表 1 近红外光谱采集制样规范与实验条件

Tab. 1 Sample preparation specifications and experimental conditions for Near-Infrared spectroscopy acquisition

实验操作	实验条件	操作过程
样本制备	水分调节	40 °C 烘箱持续烘干, 调整样本水分至 6% ~ 8%
	粉碎	粉碎机粉碎样品, 过 0.250 mm (60 目) 筛网
	混匀	使用混匀机搅拌充分混合粉末, 确保样品均匀一致
实验条件	扫描范围	4 000 ~ 10 000 $\text{cm}^{-1}$
	分辨率	8 $\text{cm}^{-1}$
	扫描次数	64 次
环境参数	环境温度	25 ~ 28 °C
	相对湿度	60% ~ 65%

### 2.2.2 配方混配

如上所述, 使用模拟的 2 000 个光谱数据, 依据历史卷烟叶组配方使用的原料情况, 设计模拟配方包含 33 个原料的模拟配方, 并随机选取原料样品进行混配, 随机配方生成后作为初始配方, 随机 1 000 个初始叶组配方, 替换初始配方中的 2、4、6 个原料。

与此同时, 使用实验收集的 106 个实际烟叶原料进行混配, 进行包含不同烟叶原料数量的配方模拟, 模拟配方中的原料采用随机抽样的方式选择, 配置包含 6、10、20、30 个烟叶原料数量的配方, 每种配方随机 3 次, 共得到 12 个模拟配方, 将这 12 个配方作为初始配方, 随机选定初始

配方中的 6 个原料作为替换原料, 得到 12 个初始配方, 以及 12 个替换原料组合。

## 3 结果与讨论

利用粒子群优化算法和光谱相似性原则, 对由多个原料组成的被替代目标进行智能化寻优。同时, 为了在计算光谱相似性时发现光谱微小光程引起的光谱变化, 对光谱数据进行归一化处理, 将光谱数据映射到  $[0, 1]$  后计算光谱相似度, 然后得到与目标原料组合最接近的替代原料组合。在寻优过程中逐步更新迭代目标函数值, 最终接近最优解, 粒子群算法经过多次迭代优化得到最优解的过程,

如图 3 所示。G1~G7 表示相似度值的划分区间,具体 G1 表示相似度 $[0, 0.000 5)$ 区间, G2 表示相似度 $[0.000 5, 0.001)$ 区间, G3 表示相似度 $(0.001, 0.001 5)$ 区间, G4  $[0.001 5, 0.002)$ 区间, G5 表示相似度 $[0.002, 0.002 5)$ 区间, G6 表示相似度 $[0.002 5, 0.003)$ 区间, G7 表示相似度 $[0.003, 0.01)$ 区间。

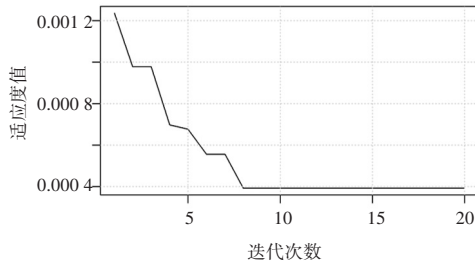


图 3 目标函数适应度迭代曲线

Fig. 3 Objective function fitness iteration curve

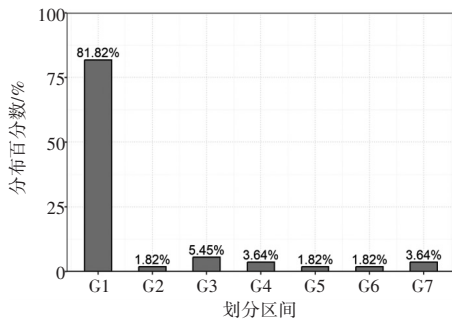


图 4 目标函数值分布结果

Fig. 4 Objective function value distribution

寻优过程中经过 8 次迭代后光谱相似度达到最佳,当前原料组合,即为最佳原料替代组合。针对实际烟叶原料的光谱数据进行粒子群寻优,依据上述寻优过程进行寻优,搜索空间根据实际原料库存进行更改,得到每个实际原料配方的推荐配方。通过上述粒子群寻优方式,对 1 000 个初始配方原料组合分别寻优(10 000 个替换组合),根据目标函数得到 10 000 组推荐的替换组结果,寻优结果中替换部分光谱在替换前与替换后的光谱差异性小于 0.01,满足光谱相似性原则,10 000 组推荐结果中目标函数值分布如图 4 所示。

图 4 是 10 000 个需要替换的配方组合经过粒子群推荐得到的配方推荐结果,在粒子群算法中寻找到的最优配方与原配方的差异度值基本小于 0.000 5 占比 81.82%,并且所有寻优结果与原配方的差异性均小于 0.01,说明粒子群方法可以得到满足要求的配方结果。

基于模拟的光谱数据和目标原料的替换寻优结果,验证粒子群寻优方式非常适合解决配方替换中的组合优化问题,同时对实际卷烟原料的叶组配方进行配方推荐,使用 12 个由不同实际原料数目组成的初始叶组配方进行配方推荐,对配方中的 6 个原料进行推荐替换,推荐前后配方差异度变化如表 2 所示。

上述结果中目标函数差异度值均小于 0.01,同时对推荐的配方进行混配后检测实际光谱,计算初始配方和推荐配方之间的实际光谱差异度,差异度结果均小于 0.04,整体配方替换满足光谱相似性替换要求,这表明粒子群寻优方法非常适合解决配方替换中的组合优化问题。

表 2 12 个实际叶组配方原料替换前后光谱差异度评价结果

Tab. 2 Spectral difference evaluation of 12 leaf group formulations before and after raw material replacement

序号	替换前配方原料数量	替换的原料数量	目标函数差异度结果	实际检测光谱配方替换前和替换后差异度
1	6	6	0.001 5	0.016 4
2	6	6	0.000 6	0.009 0
3	6	6	0.001 7	0.022 0
4	10	6	0.000 3	0.012 1
5	10	6	0.001 7	0.005 5
6	10	6	0.002 5	0.022 5
7	20	6	0.000 6	0.012 1
8	20	6	0.000 2	0.019 6
9	20	6	0.000 2	0.010 6
10	30	6	0.000 4	0.013 9
11	30	6	0.000 3	0.007 8
12	30	6	0.000 4	0.007 6

通过模拟光谱和实际光谱对粒子群寻优算法进行检验,经过测试在种群数为 100,迭代 20 次时可以得到最优解,使用实际烟叶原料数据进行配方混配,固定部分原料后,通过粒子群寻优算法进行推荐,算法表现良好,整体推荐结果目标函数差异度值均小于 0.01,同时经过实际光谱检测验证,实际光谱替换前后光谱差异度值均小于 0.04,光谱差异度上满足替换要求,最后通过专家评吸验证,经过评吸验证结果,其中有 83.33%的专家评吸结果和光谱相似性结果保持一致,整体推荐结果可以满足要求。

## 4 结论

通过近红外光谱数据可以发现不同样本间的微弱差异,而粒子群优化算法作为一种群体智能优化算法,结合基于近红外光谱数据的配方原料替换优化,显然具有非常显著的优势。本研究在模拟数据的基础上,构建符合配方原料替换的策略与流程,达到快速、智能、准确发现可替换原料的目标。在此基础上,以烟叶原料替换作为实例,验证分析本研究所提出方法的可靠性与可行性,并通过人工

呼吸的方法进行验证,获得了满意的结果。基于粒子群寻优的方式进行原料替换,极大地节省了人工成本,提高了劳动效率,增加了分析结果的科学性。特别是,本研究所提出的方法,同样可以在基于近红外分析的众多配方原料替换与维护等场景中得到非常广泛的应用,比如制药、食品、饲料与农业生产。

## 参考文献

- [1]唐佳代,赵益梅,冉光耀,等. 光谱技术在白酒质量控制中的研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(4):506-514.
- [2]罗琪,虞先国,张贵宇,等. 近红外光谱技术结合 iPLS\_SPA 波段筛选在黄酒酒精度预测模型中的应用[J]. 现代食品科技, 2023, 39(4):311-317.
- [3]王巧,熊丰,王游游,等. 红外光谱结合化学计量学鉴别西红花的产地[J]. 化学试剂, 2023, 45(3):112-119.
- [4]郭志永,汪义程,童一洋,等. 近红外光谱用于注射用曲克芦丁质量控制研究[J]. 分析科学学报, 2024, 40(1):20-28.
- [5]彭金龙,张辉,毛严根. 红外光谱技术在黄酒行业中的应用研究进展[J]. 酿酒科技, 2023(11):99-104.
- [6]苑柯岩,王嵘,王翔翔,等. 基于 6 mm 检测皿近红外测量光谱 iPLS 模型识别复原原乳参伪水解动物蛋白的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(10):3143-3147.
- [7]孟琪,赵鹏,宦克为,等. 近红外无创血糖浓度的 Label Sensitivity 算法和支持向量机回归[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(3):617-624.
- [8]章明,樊艳凤,沈啸,等. 近红外光谱技术快速鉴别碱水浸泡鸡肉的研究[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2024, 45(1):101-105.
- [9]胡锡敏,尹禄,杨钦晨,等. 基于近红外高光谱成像技术的塑料分类(特邀)[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(2):460-472.
- [10]孙晓荣,张晨光,刘翠玲,等. 近红外光谱技术对小麦粉品质定量快速检测[J]. 食品科技, 2023, 48(11):246-252.
- [11]曹子佳,张鹏,冷俊岭,等. 基于改进粒子群优化算法与小波分析的医疗设备故障信号处理模型[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(9):59-63,83.
- [12]刘斌,赖泓霖,潘强,等. 基于粒子群优化算法的泛微网规划模型设计[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(11):146-150.
- [13]王琦标,何余锴,罗雨诗,等. 基于卷积神经网络和近红外光谱的酒酸度分析方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(12):3726-3731.
- [14]李鹏飞,刘威,张子煜,等. 混合粒子群算法计算数控加工逼近误差研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(4):37-41.
- [15]赵红梅,肖明,白宇,等. 面向用户偏好的动态网页数据交互式查询算法[J]. 吉林大学学报(理学版), 2024, 62(2):417-422.
- [16]蒋凌云,魏庆来,张峰华,等. 基于改进粒子群优化算法的 PID 控制器参数整定[J]. 控制工程, 2024, 31(3):470-477.
- [17]宋百玲,董刘伟,胡思远,等. 粒子群优化变论域模糊 PID 的永磁同步电机矢量控制策略[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(3):64-73.

(上接第 31 页)

位和数量。通过能耗监测平台的展示,可以直观地观察到实际应用中节能效果,并对比分析节能前后的差异,进一步验证了本文方法在实际场景中的实用性。

## 3 结论

本文提出基于物联网技术的高层建筑室内外照明设备自适应节能优化控制方法,并通过实验验证本文方法应用 ZigBee 控制网络的通信性能、计算不同位置照明设备照度的准确度、本文方法应用后照明设备的节能效果和用电量变化情况以及本文方法的实用性。实验结果表明, ZigBee 控制网络的通信性能较好,能够稳定、准确传输数据,具有抗干扰性;本文方法可精准计算不同位置的照明设备的照度;本文方法应用后 B 处照明设备节能效果较好;可为高层建筑各层节约用电量近 150 KWh;应用本文方法可以通过优化控制变量和预测照度,根据实际需求和条件灵活调整照明设备的功率及亮度档位,进一步验证了本文方法在实际场景中具有实用性。

## 参考文献

- [1]刘明,侯作勋,高原. 高可靠性空间照明设备的设计和实现[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2022, 27(3):105-110.
- [2]杨再薇,田琦. 基于能耗优化的多高层建筑形态规划模型仿真[J]. 计算机仿真, 2020, 37(5):403-407.
- [3]李双. 基于建筑结构在室内外空间设计中的推演[J]. 建筑科学, 2020, 36(1):153.
- [4]郭敬,张玉杰. 基于遗传模拟退火算法的室内照明节能控制方法研究[J]. 应用光学, 2022, 43(5):879-885.
- [5]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.
- [6]安军. 基于无线网络的楼宇照明节能自动控制系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(5):43-47.
- [7]李卓,曹校勇,李弘博,等. 基于 LoRa 物联网的公路隧道按需照明控制系统[J]. 公路, 2022, 67(5):298-302.
- [8]周锦荣,邹力伟,周志森,等. 基于物联网技术的大功率 LED 路灯监测控制系统[J]. 电子器件, 2021, 44(5):1240-1247.
- [9]刘勃妮,肖军,刘洲洲,等. 智能太阳能 LED 路灯控制系统的研究[J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(1):27-29.
- [10]陈江. 基于物联网技术的传感器网络样本数据定向挖掘方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(10):104-107,143.
- [11]艾精文,党晓婧,吕启深,等. 基于物联网的具有全景功能的全维度设备状态监测系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16):122-128.
- [12]施亚虎,石海龙,崔莉. EasiDARM:基于分布式的物联网设备自适应注册方法[J]. 计算机研究与发展, 2019, 56(3):453-466.
- [13]张州. 基于 ZigBee 和 Wifi 的注塑机信息控制网络设计[J]. 合成树脂及塑料, 2019, 36(5):95-98.
- [14]张蓝苻. 基于茶文化时代下 ZigBee 无线通信技术的应用研究[J]. 福建茶叶, 2021, 43(1):209-211.
- [15]崔跃君,杨甲明,顾新桥,等. 基于物联网技术的电网物资供应优化模型建立[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(1):108-111.
- [16]刘玲. 基于 FFT 算法的物联网终端网络自适应节点部署方法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2019, 14(8):791-797.
- [17]尹静,徐晓林,熊小华. 基于 EWIPM 的物联网节点信息传输优化仿真[J]. 计算机仿真, 2021, 38(12):312-315, 396.
- [18]何奉禄,陈佳琦,李钦豪,等. 智能电网中的物联网技术应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3):58-69.
- [19]赵婉芳,韩勇. 基于调度器的物联网设备能耗优化策略[J]. 电信科学, 2019, 35(3):84-90.