

基于改进粒子群算法的分布式智能照明系统

方培鑫^{1,2}, 严虎³, 汪明^{1,2}, 赵千川³

(1. 山东建筑大学 信息与电气工程学院, 济南 250101;

2. 山东省智能建筑技术重点实验室, 济南 250101;

3. 清华大学 自动化系, 北京 100084)

摘要: 针对现有公共建筑照明系统存在的高成本、分布式与集中式控制结合能力不高、交互性不强等问题, 应用智能优化算法, 在分布式框架上实现区域协同照明控制; 通过采集窗户处照度信息, 预测透过窗户的自然光在工作面上产生的照度值, 当自然光不足需要人工光源补充时, 通过协同配合, 各区域利用改进粒子群算法计算出区域内最佳的灯具开度组合, 达到均匀照明, 实现舒适性与节能的最佳综合; 当照明需求改变时, 可以通过 WEB 端进行修改; 最后, 通过实际办公室模型在 DIALux evo 上进行仿真验证; 在不同照明需求和环境条件下, 实验结果表明相较于普通控制方式(全开全关), 该方法在节能和舒适度上具有良好的性能, 能有效控制工作面照度, 各工作面的最大照度误差都在 10% 之内, 控制方案切实可行, 具有实用价值。

关键词: 粒子群算法; 分布式系统; 智能照明; WEB 端应用; 建筑节能

Design of Distributed Intelligent Lighting System Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm

FANG Peixin^{1,2}, YAN Hu³, WANG Ming^{1,2}, ZHAO Qianchuan³

(1. School of Information and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. Key Laboratory of Intelligent Building Technology, Jinan 250101, China;

3. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Aiming at the problems of high cost, low combining ability of distributed and centralized control and weak interaction in the existing lighting system of public buildings, an intelligent optimization algorithm is used to realize the regional collaborative lighting control in the distributed framework. Through the illumination information acquisition of window, the illuminance value is predicted by the natural light through the window on the work. When the artificial light source is needed to supplement on the condition of the insufficient natural light, the improved particle swarm optimization algorithm is used to calculate the best combination of luminaries opening in each region through coordination, so as to achieve the uniform lighting and the best integration of comfort and energy saving. When the lighting requirements change, the comfort and energy saving can be modified by the WEB side. Finally, a real office model is used to simulate the verification on DIALux evo platform. Under the different lighting requirements and environmental conditions, the experimental results show that, compared with the common control method (all on and all off), the method has good performances in the energy saving and comfort, which can effectively control the illumination of working face. The maximum illumination error of each working face is within 10%. The control scheme is feasible and practical.

Keywords: particle swarm optimization; distributed system; intelligent lighting; the WEB client application; building energy efficiency

0 引言

随着中国经济、科技的快速发展, 我国建筑能耗占总体能耗比例迅速增加。公共建筑占建筑总能耗的 30% 以上, 其中大型公共建筑照明耗电量占总耗电量的 26.4%^[1]。同时, 人们对照明舒适度以及智能化的要求越来越高, 环保意识越来越强。因此降低照明能耗、提高照明系统智能化、人性化具有非常大的经济效益和需求。越来越多的学者就办公室节能减排问题进行研究, 灯具控制也已经从单灯、

群组手动开关控制逐渐发展为可根据环境及季节等变化的自适应智能控制, 用户还可以根据场景需求, 自行对照明系统进行调节。部分学者还在相关研究中应用智能算法, 实现均匀照明、防止眩光等智能化调节。

Y. Cheng 等人^[2]将灯具改造成具有检测、控制的智能灯具, 利用分布式网络控制照明实现能耗降低。F. Sun 等人^[3]在室内搭建了一个基于分布式的多智能体架构, 根据占有率及室内外光环境对灯具和百叶窗进行控制。

收稿日期: 2022-05-29; 修回日期: 2022-06-23。

作者简介: 方培鑫(1997-), 男, 广东揭阳人, 硕士研究生, 主要从事建筑设备智能化与能效管理方向的研究。

通讯作者: 汪明(1976-), 男, 安徽桐城人, 教授, 博士生导师, 主要从事建筑电气节能、仿生机器人方向的研究。

引用格式: 方培鑫, 严虎, 汪明, 等. 基于改进粒子群算法的分布式智能照明系统[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(12): 284-291.

A. Seyedolhosseini 等人^[4]提出一种利用神经网络来保持每个区域照度需求和均匀度满足要求的智能照明控制方法。G. Chiesa 等人^[5]提出了一个可根据季节变化结合动态遮阳系统控制自然光和人工光线平衡的物联网系统工作原型。许馨尹等人^[6]提出了一个照明系统, 该系统中每个灯具和工作面分别配备有照度传感器和智能单元向中央控制器提供工作面照度信息和个性化设定值, 并利用约束控制算法确定灯具的最佳调光值。王俊影等人^[7]利用无线自组网技术配合 WEB 页面实现了对灯光系统的 WEB 远程控制, 用户可利用联网计算机或移动终端即可随时随地地进行灯光远程控制。何乐等人^[8]通过照度传感器测量每个工作面上的实际照度, 使用粒子群算法对照明系统进行优化。敬舒奇^[9]通过计算自然光及各灯具在工作面上产生的照度值然后采用线性规划的方法对室内照明进行调光控制。M. Hajjaj 等人^[10]利用蓝牙技术 (BLE) 通信, 实现人员与智能照明系统交互, 使得人员可以改变工作面上的标准照度。

然而, 以往采用分布式架构的智能照明大多是使用照度传感器测量工作面照度然后逐一对灯具进行控制, 虽然能够保证每个工作面照度值都满足要求, 但是这种方法的投入成本大而且照度传感器安装位置又带来较大问题。另外, 将灯具改造成智能灯具, 一个灯具负责照亮一个工位, 并没有考虑到灯具之间可以通过相互配合而达到更好的照明以及节能效果。最后, 传统的智能照明系统都是自动调节, 人员不能干涉, 如果出现智能照明效果不佳或有其他照明需求等问题时, 使用人员无法修改照度值或者对照明系统进行调节。

为了解决以上问题, 本文提出一种基于改进粒子群算法的分布式智能照明系统。本系统具有减少布线、节约成本、易扩展和能够通过 WEB 端对照明系统进行调整的优势, 通过建立最小能耗优化函数, 使用智能优化算法根据环境和照度需求优化计算并控制每个灯具的开度, 实现单区域均匀照明, 多区协同照明, 在保证光照度的需求下, 达到更高效、更节能、更舒适、更智能的目的。

1 分布式控制架构设计

传统的建筑自动化系统架构是从工业控制领域继承来的, 这种架构可以在工业领域取得成功, 然而, 在建筑的许多实际应用效果中却普遍并不尽如人意^[11], 这是因为工业生产线固定, 其控制稳定, 而建筑领域的控制则存在变化大且快的问题。这使得传统建筑智能化系统维护运行水平不高, 甚至有些系统在投运 2~5 年后就恢复到手动运行管理状态^[12]。为解决这类问题, 使建筑真正实现智能化, 国家重点研发计划资助了“新型建筑智能化系统平台技术”项目研究, 该项目提出了一种全新的扁平化、无中心的系统架构。该平台包含大量的计算节点 (CPN, computing processing node), 每个 CPN 节点包含 1 个处理器、1 个存储器、6 个网络接口, 网口用于 CPN 节点间的通信, CPN

只与邻居节点通信, 通过与邻居的层层交互, 可以获取全局的信息, 从而构成一个扁平化、无中心的测控与计算平台。该平台并行式的网状架构, 不会因局部故障而瘫痪, 高鲁棒性使得系统更加安全稳定^[13]。这种智能节点可以通过有线或者无线的方式与邻居进行通信, 可将计算工作分布到各节点, 解决了大规模集中式控制对中央控制器有较高要求的问题。此外, 应用分布式群智能系统不仅能提高智能机电设备的通用性、简化了建筑智能化系统的设计工作, 而且还实现了系统设备的即插即用功能、建筑系统状态的协同感知和各设备之间的协同控制。

因此, 本文提出的应用于办公室的分布式智能照明系统, CPN 网络拓扑连接关系和办公室建筑示意图如图 1 所示。

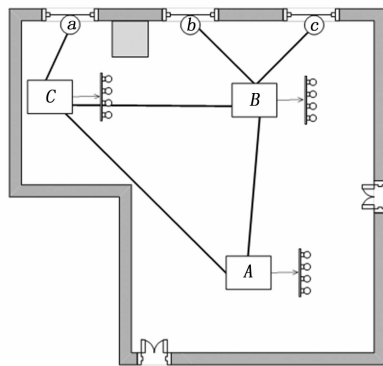


图 1 CPN 拓扑与办公室示意图

其中, A、B、C 节点为照明控制节点, a、b、c 为照度测量节点。照度测量节点通过照度传感器测量自然光照度值, 计算出通过窗户进入室内的自然光在各工作面上产生的照度值, 然后将数值传送给邻近区域的照明控制节点, 而照明控制节点根据照度测量节点的计算值并与邻居区域协同配合, 应用智能优化算法计算出最佳调光系数后控制区域内的灯具照明。本系统中各节点之间都是通过 WIFI 无线网络进行通信的。对于更多区域的办公场所, 只需按要求加入照明控制节点和照度测量节点并修改拓扑文件即可。

2 粒子群算法优化照明控制

2.1 人工光源照度获取

使用光照传感器可以很容易得到工作面的照度值, 但是这将会提高成本且其安装位置的不同又将带来众多问题^[14]。如果将光照度传感器安装在工作面上, 可以准确获取工作面照度值, 但其容易受到办公文件的遮挡; 如果将其放置在墙面较低位置又容易受到人员走动的影响, 势必影响检测质量^[15]; 如果将其安装在天花板上, 可能会因环境或者光线衰减等原因而不能准确测得工作面处的照度值。由于安装灯具后其位置固定不变, 因此, 为了能够较精确得到工作面处的光照度值, 本文采用逐点算法^[16]计算光照度值。逐点算法是利用照度叠加原理进行计算的。

2.1.1 照度叠加原理

照度叠加原理是指工作面上某点的光照度值为各点光源在该点产生的光照度值之和, 如式 (1) 所示:

$$E = \sum_{i=1}^n E_i \quad (1)$$

式中, E 表示工作面某点的实际照度值, E_i 表示第 i 个光源在该点产生的照度值。

2.1.2 获取工作面照度值

根据照度平方反比定律, 我们可以把灯具视为点光源, 通过式 (2) 来计算各灯具在工作面处产生的照度值。

$$E_T = \frac{I_T \cos\alpha}{d^2} = \frac{I_T (\cos\alpha)^3}{h^2} \quad (2)$$

式中, E_T 为 T 点处的照度值, α 为被测点 T 入射光线与工作面法线的夹角, I_T 为点光源在 α 角方向的光强, h 为点光源的垂直高度, d 为点光源 A 与被测点 T 之间的直线距离。然而, 由于空间布局和灯具配光曲线等差异, 在实际应用中, 这样计算并不准确甚至误差非常大。所以本文采用如下方法获取各灯具在各工作面上产生的照度值:

- 1) 关闭所有灯具, 开启单个灯具;
- 2) 测量各工作面上照度值;

按照 1)、2) 步骤依次遍历区域内所有灯具, 即可得到各灯具在各工作面上产生的照度照度值。

另外, 由于邻近区域之间的照明互有影响, 所以在控制照明时还应考虑邻近区域在各工作面上产生的照度值。其测量方法与测量各灯具在工作面产生的照度值类似:

- 1) 关闭所有灯具, 开启单个邻近区域所有灯具;
- 2) 测量区域内各工作面上的照度值;

按照 1)、2) 步骤依次遍历所有邻近区域, 即可得到邻近区域在各工作面上产生的照度值。

2.2 自然光照度值获取

关于自然光照度值的测量, 钟源宇^[17]提出两种模型: 太阳光散射模型和太阳光直射模型。

太阳散射光线通过宽为 Y , 高为 H 的窗户照射到房间中, 此时可将整个窗户看成是一个由无数个辐射强度为 I , 辐射亮度在各个方向都均匀的点光源组成的朗伯辐射体。其中 Y_w 为窗户到最近墙面的距离, h 为窗户下沿到地面的高度, z_0 为工作面距地面的高度。

整个窗户作为一个朗伯辐射体在被测点 T 处产生的光照度值为:

$$E_r = \iint_{\substack{y \leq Y_w + Y, z \leq h + H \\ y \geq Y_w, z \geq h}} \frac{E_d \cdot (z - z_0) \cdot \sqrt{x_0^2 + (y - y_0)^2}}{\pi \cdot (x_0^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2)^2} dydz \quad (3)$$

式中, E_d 为窗户处的光照度值, (x_0, y_0, z_0) 为被测点 T 的空间坐标值。

太阳直射模型比较复杂, 除把窗户视为一个朗伯辐射体在工作面产生的光照度 E_r 外, 还需要考虑太阳光通过窗户直接照射到室内形成的光斑。将光斑看作是另一个朗伯辐射体。因此, 整个光斑作为一个朗伯辐射体在被测点 T

处产生的光照度值为:

$$E_{sd} = \iint_{\substack{y \leq \Delta y + Y/2, x \leq d_i \\ y \geq \Delta y - Y/2, x \geq d_i}} \frac{\mu \cdot E_d \cdot z_0 \cdot \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}}{\pi \cdot (x_0^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2)^2} dydz \quad (4)$$

式中, μ 为反射比, Δy 为太阳直射进室内的光区域中心相对于窗户中心在 Y 轴方向的偏移量, 其计算如式 (5) 所示:

$$\Delta y = x \cdot \tan\alpha \quad (5)$$

式中, x 为光斑与窗户两条平行边之间的距离, α 为当地太阳方位角和该建筑物法线与地球南方向夹角之差。

虽然通过以上两种模型可以算出自然光通过窗户在工作面上产生的照度值, 但计算量较大, 且需要在线获取当地太阳方位角。

由光学知识可知, 光照强度 I 定义如下式:

$$I = \lim_{\Delta\Omega \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta\Omega} \quad (6)$$

式中, Ω 表示立体角, P 表示辐射能量。

光照度 E 定义如下:

$$E = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (7)$$

式中, A 表示被照射面积。

设窗户 C 点在 t_1 时刻的光照强度为 I_{c1} , 光照度为 E_{c1} , 辐射能量为 ΔP_1 , t_2 时刻光照强度为 I_{c2} , 辐射能量为 ΔP_2 , 光照度为 E_{c2} , 由式 (6) 及式 (7) 有:

$$\frac{I_{c1}}{I_{c2}} = \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \frac{E_{c1}}{E_{c2}} = k \quad (8)$$

式中, k 为常数。

设 t_1 时刻自然光通过窗户 C 点在工作面 T 产生的光照度为 E_{T1} , 窗户光照强度为 I_{c1} , t_2 时刻自然光通过窗户 C 点在工作面 T 产生的光照度为 E_{T2} , 窗户光照强度为 I_{c2} , 则由式 (2) 可得:

$$\frac{E_{T1}}{E_{T2}} = \frac{I_{c1} (\cos\alpha)^3 / h^2}{I_{c2} (\cos\alpha)^3 / h^2} = \frac{I_{c1}}{I_{c2}} \quad (9)$$

由式 (8) 和式 (9) 可得:

$$\frac{E_{T1}}{E_{T2}} = \frac{E_{c1}}{E_{c2}} = k \quad (10)$$

因此, 如果需要计算 t_2 时刻自然光在工作面上产生的光照度值 E_{T2} , 只需测量在 t_1 时刻窗户光照度值 E_{c1} 和工作面光照度值 E_{T2} , 以及 t_2 时刻窗户处光照度值 E_{c2} 即可。

为验证式 (10) 的正确性, 测量不同时刻工作面以及窗户处光照度值如表 1 所示。

其中, 误差比绝对值计算公式如下:

$$\text{误差比绝对值} = \frac{|\text{预测照度值} - \text{实际照度值}|}{\text{实际照度值}} \quad (11)$$

太阳光直接照射在窗户上和不直接照射在窗户上时其照度比常数 k 会发生改变。因此在计算工作面处照度值时需要根据窗户处是否受到太阳光直射选取参考照度值。经实验测量, 当太阳光直接照射时, 其照度值将大于 15 000 lx。通过表中数据对比, 使用式 (10) 计算的照度值与实际照度值平

表 1 不同时刻窗户以及各工作面照度值

参考照度值	窗户照度值 /lx	实际照度值 /lx	预测照度值 /lx	误差比绝对值 /%
窗户照度值: 7327	7 767	2 228	2 195	1.4
	7 977	2 279	2 254	1.1
	8 417	2 395	2 379	0.6
	8 935	2 456	2 525	2.8
工作面照 度值:2071	9 012	2 600	2 652	4.3
	9 386	2 542	2 547	2.0
	11 023	3 240	3 115	3.8
	12 957	3 445	3 662	6.3
窗户照度值: 15792	16 847	3 890	3 815	1.9
	17 596	3 960	3 985	0.6
	18 459	3 945	4 181	5.9
	19 655	4 281	4 451	4.0
工作面照 度值:3577	20 248	4 370	4 586	5.0
	21 012	4 641	4 759	2.6
	22 148	5 168	5 016	2.9
	23 626	5 355	5 351	0.1

均误差比绝对值为 2.5%, 最大误差比绝对值小于 10%, 因此通过此方法计算工作面照度值基本正确反映此时实际照度水平。

2.3 调光控制

由于需要控制大量灯具, 同时考虑照明对人体健康和安全性的重要性, 智能照明系统将会非常复杂。如果沿用传统照明的用电方式: 开关控制或者常规 PID 控制, 那么照明回路将会因更加复杂且存在多变量、非线性因素而难以达到理想效果。一般来说, 系统控制越精确, 其成本越高, 但性能不会一直随成本成比例增加。虽然闭环控制具有完美的跟踪控制性能, 能够节省了更多的能源, 但这是牺牲视觉感受换来的^[18]。综合考虑性能、成本以及线路复杂度, 本系统将采用开环控制方式, 在分布式无线节点上应用智能优化算法对灯具进行优化控制。

2.3.1 粒子群算法

粒子群算法 (PSO, particle swarm optimization) 由 Kennedy 和 Eberhart 在 1995 年提出的, 该算法模拟鸟群飞行觅食的行为, 是一种基于群体的优化方法。粒子群算法是通过个体间的协作和竞争, 从而实现对复杂空间中最优解的搜索^[19]。与传统进化算法相比, 粒子群算法保留了基于种群的全局搜索策略, 采用的速度-位移模型, 操作简单, 避免了复杂的遗传操作, 其特有的记忆能力可以动态跟踪当前的搜索情况而相对应地调整搜索策略。粒子群算法的流程如图 2 所示。

2.3.2 粒子群算法的数学模型^[20]

设在一个 n 维解空间内进行搜索, 粒子 i 的信息用两个 n 维向量表示: 第 i 个粒子的位置可表示为: $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})^T$, 速度可表示为: $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})^T$, 当粒子本身最优解和全局最优解找到后, 粒子即可根据一下公式 (12)、(13) 更新自己的速度和位置:

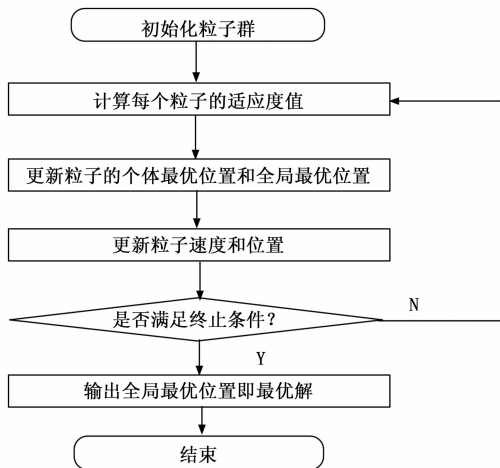


图 2 粒子群算法流程图

$$v_{id}(t+1) = \omega v_{id}(t) + c_1 * r_1 * (p_{id} - x_{id}(t)) + c_2 * r_2 * (g_{id} - x_{id}(t)) \quad (12)$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \quad (13)$$

其中: $v_{id}(t+1)$ 和 $x_{id}(t+1)$ 表示第 i 个粒子在 $t+1$ 次迭代中第 d 维上的速度和位置, ω 为惯性权重, c_1 、 c_2 分别称为认知学习因子和社会学习因子, c_1 主要为了调节粒子向自身的最好位置飞行的步长, c_2 是为了调节粒子向全局最好位置飞行的步长, r_1 、 r_2 为 0-1 的随机数, p_{id} 为粒子本身最优解, g_{id} 为粒子全局最优解。

虽然粒子群算法具有容易收敛的优点, 但其容易收敛到局部最优值, 为克服此问题, 本文采用改进的粒子群算法即自适应随机惯性权重粒子群算法。设粒子数为 n , f_i 为第 i 个粒子的适应度值, f_{avg} 为粒子群当前的平均适应度值, σ^2 为粒子群的群体适应度方差, 则:

$$\sigma^2 = \sum_i^n \left(\frac{f_i - f_{avg}}{f} \right)^2 \quad (14)$$

式中,

$$f = \begin{cases} \max\{|f_i - f_{avg}|\}, & \max\{|f_i - f_{avg}|\} > 1 \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

自适应随机惯性权重计算公式:

$$\omega = \begin{cases} 0.5 + rand()/2, & \sigma^2 \geq \sigma_c \\ 0.4 + rand()/2, & \sigma^2 < \sigma_c \end{cases} \quad (16)$$

式中, $rand()$ 为 0-1 的随机数, σ_c 为常数。

这种方法计算的随机惯性权重可以使粒子的历史速度对当前速度的影响的随机的, 也使得惯性权重将随群体适应度方差自适应地调整, 既可以使全局搜索和局部搜索较好地协调, 而且还可以增加粒子的多样性。

2.3.3 照明控制策略

不同区域之间存在相互影响, 具有较强耦合性, 但由于各区域之间距离相对较远且可能被其他物品遮挡, 如图 3 所示。经实验测量, 如表 2~4 所示, 邻近区域在区域内各工作面上产生的照度值不大。以邻近区域对工作面照度贡献值最大 (邻近区域在 B 区工作面上产生的照度值) 为例,

由实验计算，B 区要在各工作面上产生该照度（表 3）的开度比（各调光系数之和与总灯具数之比）约为 8%，这是 A、C 区开度比为 100% 时在 B 区工作面上产生的照度值。当 A、C 区标准照度为 300 lx 时，A、C 区开度比均约为 40%，即 B 区要在各工作面上产生该照度的开度比为 6.4%，所以在多区域照明（标准照度为 300 lx）时，B 区实际开度比应比单 B 区域开度比小 6.4%，此开度比差与表 3 数据乘积的最大值为 5.12 lx，相较于标准照度（300 lx），可忽略不计，因此加入邻近区域照度贡献值后灯具开度比变化不大，可近似用单区开度比作为实际开度比。故本系统用邻近区域灯具单区开度比与开度比为 100% 时在工作面产生照度值相乘作为实际邻近区域对区域内工作面照度的贡献值。

表 2 邻近区域在 A 区各工作面产生的照度 lx

	工作面 1	工作面 2	工作面 3	工作面 4	工作面 5	工作面 6	工作面 7	工作面 8
B 区	28.9	29.2	37.9	38.5	50.2	51.2	57.1	54.6
C 区	9.20	9.73	11.4	12.4	13.5	15.7	12.5	16.0

表 3 邻近区域在 B 区各工作面产生的照度 lx

	工作面 1	工作面 2	工作面 3	工作面 4	工作面 5	工作面 6	工作面 7	工作面 8
A 区	52.6	47.5	80.0	76.9	40.8	39.5	29.2	29.2
C 区	34.2	59.2	37.8	69.6	36.6	67.5	31.9	57.7

表 4 邻近区域在 C 区各工作面产生的照度 lx

	工作面 1	工作面 2	工作面 3	工作面 4
A 区	21.6	24.3	12.6	18.7
B 区	55.8	67.5	49.7	61.7



图 3 办公室 3D 仿真示意图

根据粒子群算法的基本原理，设某区域内有 D 个照明设备，每个设备的调光系数为 k_i ($0 \leq k_i \leq 1$)，有 N 个工作面，区域内第 i 个光源在第 j 个工作面产生的照度值为 E_{ij} ，有 p 个窗户，自然光通过第 s 个窗户在第 j 个工作面上产生的照度值为 E_{sj} ，有 m 个邻近区域，第 l 个邻近区域灯具开度比为 q_l ，第 l 个邻近区域灯具开度比为 100% 时在第 j 个

工作面上产生的照度值为 E_{lj} ，第 j 个工作面的目标光照度为 E_{aj} 。由于 LED 灯的功耗与灯具光通量具有一定的线性关系，而灯具光通量则由调光系数控制，所以本文使用调光系数的总和表示能耗函数，则控制区域内粒子的适应度函数和约束条件如式 (17)、(18) 所示：

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^D k_i \tag{17}$$

$$s. t. \begin{cases} \sum_{i=1}^D k_i * E_{ij} + \sum_{s=1}^p E_{sj} + \sum_{l=1}^m q_l * E_{lj} = E_{aj} \\ 0 \leq k_i \leq 1 \end{cases} \tag{18}$$

图 4 为照明系统控制图，本系统采用开环控制，根据自然光和各工作面的光照度需求以及邻近区域灯具在各工作面上产生的照度值作为约束条件，将 PSO 优化后的调光系数作为占空比，使用 PWM 技术通过调光设备进行调光。因为 LED 灯具的平均电流与 PWM 脉冲的占空比呈线性正比关系，而且 PWM 应用简单、调光效果好、调光精度高、调光范围大，所以本文采用 PWM 技术进行调光。为避免调光过程中产生肉眼可见的灯光闪烁现象，进行 PWM 调光时，其频率应高于 100 Hz。但其频率也不能太高，否则 LED 调光电源周围的电感和输出电容容易产生人耳听得到的噪声。

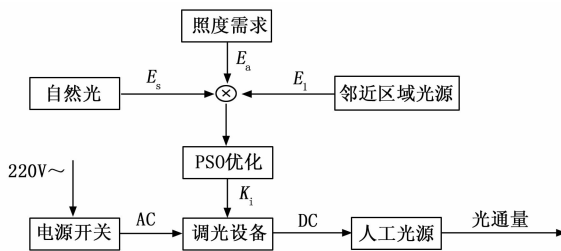


图 4 照明系统控制图

图 5 为整个智能照明系统程序流程图。首先判断是否开启照明，如果是，则进行照明控制，否则结束；接着判断是否为照明节点，如果是，则获取目标照度值，根据各灯具在工作面上产生的照度分值计算单区域灯具开度比，否则测量通过窗户照射入房间的自然光照度值并计算自然光在各工作面上产生的照度分值；然后所有节点进行同步通信，测量节点将自然光在各工作面上产生的照度分值发送给相邻区域的照明节点，照明节点将单区域灯具开度比发送给邻近区域的照明节点；各照明节点在收到邻近节点发送的信息后，结合自然光在工作面上产生的照度分值、邻近区域灯具开度比进行 PSO 优化计算区域灯具开度；最后通过调光设备对灯具进行调光控制。

3 WEB 端控制

与 APP 相比，WEB 端控制可以突破软件运行的硬件限制，任何设备的浏览器只要符合相关标准，WEB 应用程序都可以在上面运行，可为用户省去软件下载和安装的过程，另外，一个 WEB 应用程序还可供多个用户同时访问。因此，本文使用 WEB 应用技术实现了用户根据实际需求对照

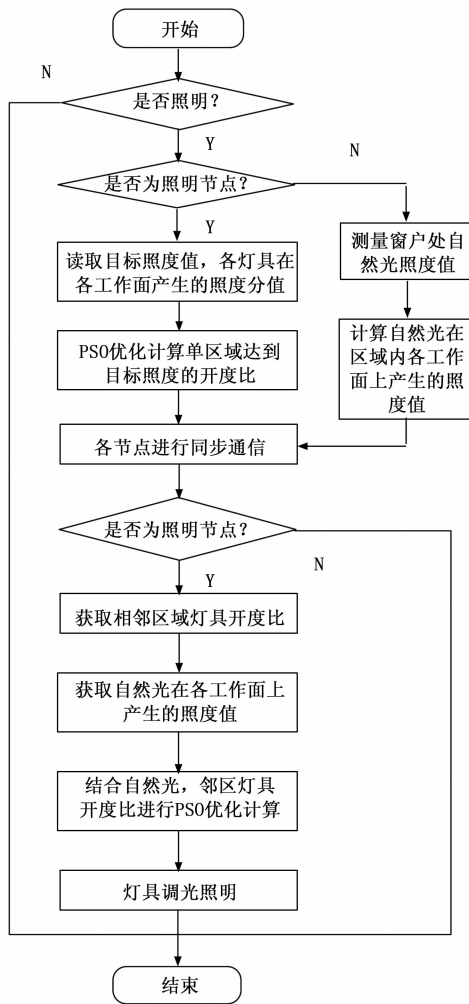


图 5 照明系统程序流程图

明系统进行调节。根据 GB50034—2013 办公建筑照明标准^[21]，如表 5 所示，所以本系统有 3 个区域目标照度设置值：300 lx、500 lx、750 lx 可供用户调节。照明系统 WEB 端面界面如图 8 所示。

表 5 办公建筑照明标准

房间或场所	参考平面及其高度/m	照度标准值/lx
普通办公室	0.75 水平面	300
高档办公室	0.75 水平面	500
会议室	0.75 水平面	300
视频会议室	0.75 水平面	750
设计室	实际工作面	500

在这个区域内的用户只需接入局域网，打开浏览器，输入地址：https://localhost:8020，即可访问到页面。其中 localhost 为对应节点的 IP 地址，8020 为 python 脚本中侦听的端口号。

4 实验结果

以“7”形办公场所为例，具体地点为（北纬 36°40′



图 6 照明系统 web 端面界面图

31”，东经 117°10′56”）某科研教学楼，该办公室窗户一面为北面，无阳光直射，利用 DIALux evo 软件进行仿真。

使用 python 语言进行灯具开度预测及控制，认知学习因子 c_1 和社会学习因子 c_2 均为 0.6，初始化粒子数 $M=200$ ， $\sigma_c=0.2$ ，最大迭代次数 $K=1\ 000$ 。照度误差公式如下：

$$\text{照度误差} = \frac{|\text{实际照度值} - \text{目标照度值}|}{\text{目标照度值}} \quad (19)$$

4.1 单区域单目标照度

如图 7 和图 8 所示，其中图 8 为不同单区域照明伪色图，当整个办公室只有一个区域进行照明且工作面目标照度值为 300 lx 时，其工作面的照度值都比较均匀且在 300 lx 左右，最大照度误差为 5%，A、B、C 区域灯具开度比分别为 39.4%、41.1%、41.0%。

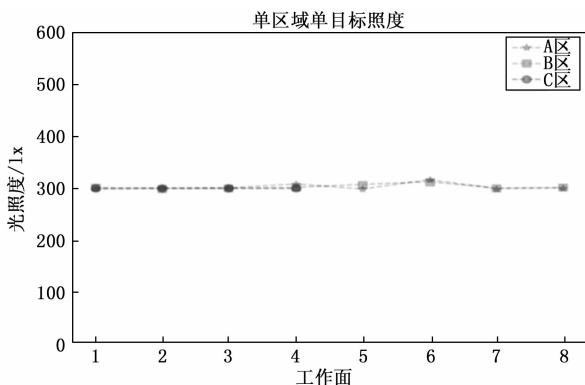


图 7 单区域单目标照度

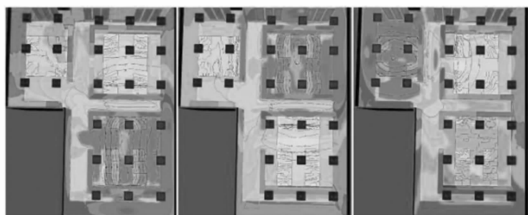


图 8 单区域单目标照度伪色图

4.2 多区域单目标照度

如图 9 及图 10 所示，当整个办公室全部区域进行照明且工作面目标照度值为 300 lx 时，其工作面的照度值都比较均匀且在 300 lx 左右。最大照度误差为 5.6%，A、B、C 区域灯具开度比分别为 35.7%、35.2%、36.8%。

4.3 多区域多目标照度

如图 11 及图 12 所示，当整个办公室全部区域进行照明

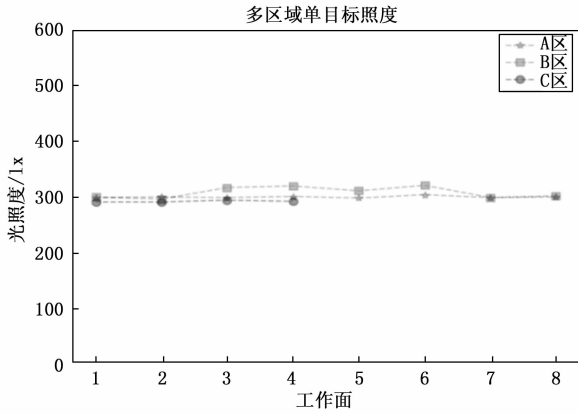


图 9 多区域单目标照度

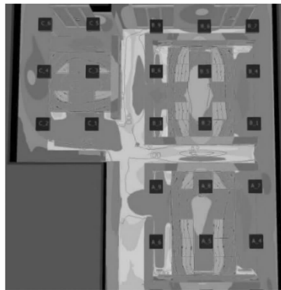


图 10 多区域单目标照度伪色图

且 B、C 区工作面目标照度值为 500 lx，A 区工作面目标照度值为 300 lx 时，其工作面的照度值都比较均匀，最大照度误差为 6.3%，A、B、C 区域灯具开度比分别为 31.5%、68.1%、71.3%。

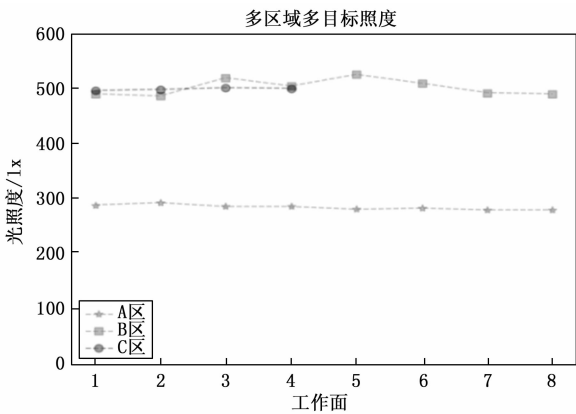


图 11 多区域多目标照度

4.4 结合自然光多区域多目标照度

如图 13 和图 14 所示，当整个办公室全部区域进行照明且 B、C 区工作面目标照度值为 500 lx，A 区工作面目标照度值为 300 lx 时，其工作面的照度值都比较均匀，最大照度误差为 9.6%，A、B、C 区域灯具开度比分别为 31.6%、47.2%、41.2%。在相同目标照度值下，B 区开度比从 68.1% 下降到 47.2%，C 区开度比从 71.3% 下降到 41.2%，可见结合自然光之后的灯具开度比大幅降低。而 A 区距离

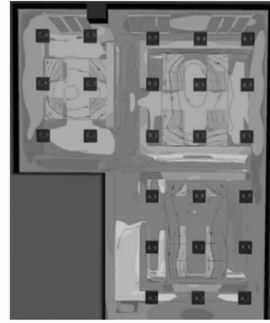


图 12 多区域多目标照度伪色图

窗户较远且有书柜阻挡，自然光对其影响几乎没有，所以开度比变化不大。

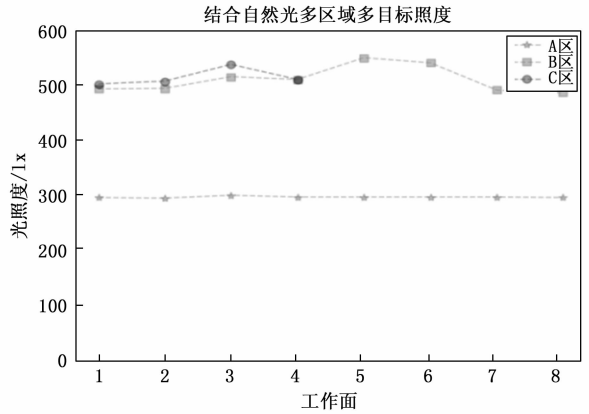


图 13 结合自然光多区域多目标照度

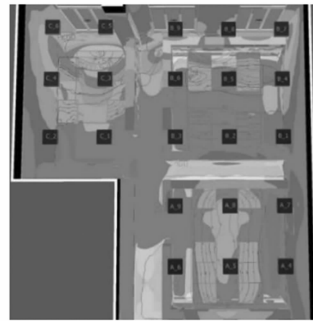


图 14 结合自然光多区域多目标照度伪色图

由实验结果可知，在满足照度需求的条件下，本系统在单区域、多区域的控制效果达到预期状态，各伪色图中各等照度线均匀分布在各工作面上。虽然工作面的照度值有所波动，但最大误差都在 10% 之内。另外，相比于普通控制方式（灯具全开，其开度比为 100%），具有非常可观的节能效果，能有效减少照明能耗。

5 结束语

为解决现有大型公共建筑照明系统存在的高成本、灯具之间无配合、使用人员无法干涉照明问题，本文结合分布式架构和智能优化算法，提出一种基于粒子群算法的分

布式智能照明系统, 以解决办公室照明优化控制节能问题。借助 DIALux evo 考虑了建筑结构等工作面照度的影响, 结合传感器对建筑内部照度数据的采集, 实现了根据感知自然光与调节人工光源动态地对室内光照度的控制, 通过仿真实验, 验证了本系统的有效性和可行性。本系统实现了建筑照明的智能化, 提升建筑资源的利用率, 对促进绿色建筑的发展具有重要意义。随着互联网技术、机器学习技术、神经网络控制等发展, 未来城市正不断迈向智慧城市, 而智能照明作为未来城市重要组成部分之一, 也将向智慧照明逐渐发展, 从而变得更有学习能力, 更具智慧化、人性化。

参考文献:

- [1] 李林涛, 陈昭文, 曹越, 等. 大型办公建筑运行能耗特点统计分析 [J]. 建设科技, 2022 (Z1): 31-35.
- [2] CHENG Y, FANG C, YUAN J, et al. Design and application of a smart lighting system based on distributed wireless sensor networks [J]. Applied Sciences, 2020, 10 (23): 8545.
- [3] SUN F, YU J. Indoor intelligent lighting control method based on distributed multi-agent framework [J]. Optik, 2020, 213: 164816.
- [4] SEYEDOLHOSSEINI A, MASOUMI N, MODARRESSI M, et al. Daylight adaptive smart indoor lighting control method using artificial neural networks [J]. Journal of Building Engineering, 2020, 29: 101141.
- [5] CHIESA G, DI VITA D, GHADIRZADEH A, et al. A fuzzy-logic IoT lighting and shading control system for smart buildings [J]. Automation in construction, 2020, 120: 103397.
- [6] 许馨尹, 李淑娟, 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.
- [7] 王俊影, 李扬, 李伟明, 等. 基于无线自组网的灯光照明控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (6): 70-75.
- [8] 何乐, 郭家虎, 陈晨, 等. 采用权重粒子群算法的照明控制 [J]. 重庆工商大学学报 (自然科学版), 2020, 37 (1): 14-18.
- [9] 敬舒奇. 基于云平台的智能照明系统设计与研发 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
- [10] HAJJAJ M, MIKI M, SHIMOHARA K. The effect of utilizing distributed intelligent lighting system for energy consumption in the office [J]. Applied Sciences, 2020, 10 (6): 2004.
- [11] 姜子炎, 代允闯, 江亿. 群智能建筑自动化系统 [J]. 暖通空调, 2019, 49 (11): 2-17.
- [12] 李维时, 陈琪, 潘云刚. 新型群智能建筑控制管理系统平台的探索 [J]. 智能建筑电气技术, 2020, 14 (1): 5-8.
- [13] 刘夕广, 谢立强, 杨启亮, 等. 消防系统在群智能建筑平台下的仿真实验研究 [J]. 建筑科学, 2020, 36 (4): 149-154.
- [14] WAGIMAN K R, ABDULLAH M N, HASSAN M Y, et al. A review on sensing-based strategies of interior lighting control system and their performance in commercial buildings [J]. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 2019, 16 (1): 208-215.
- [15] 谭宝, 刘建群. 智能建筑中分布式照明控制系统的设计与实现 [J]. 自动化与仪表, 2017, 32 (10): 57-62.
- [16] 李淑娟. 公共建筑照明系统节能分析及评价方法研究 [D]. 苏州: 苏州科技大学, 2020.
- [17] 钟源宇. 根据自然光照自动调节室内照明的方法及实现 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [18] PANDHARIPANDE A, CAICEDO D. Smart indoor lighting systems with luminaire-based sensing: A review of lighting control approaches [J]. Energy & Buildings, 2015, 104: 369-377.
- [19] 徐治户. 基于粒子群优化算法的 LED 光照均匀性研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [20] 许国根, 赵后随, 黄智勇. 最优化方法及其 MATLAB 实现 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2018.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 《建筑照明设计标准》(GB50034-2013) [S]. 北京: 中国建筑出版社, 2013.
- [22] 张尉, 何康. 空管二次雷达 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- [23] 鲍雪. 复杂气流干扰环境下的无人直升机导航关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [24] 吴扬, 王春媛, 林连雷. 虚拟试验综合风场环境的建模与应用 [J]. 沈阳师范大学学报: 自然科学版, 2013, 31 (3): 384-390.
- [25] KARLGAARD C D, KUTTY P, Schoenenberger M. Coupled inertial navigation and flush air data sensing algorithm for atmosphere estimation [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2017, 54 (1): 128-140.
- [26] WHITMORE S, COBLEIGH B, HAERING, JR E. Design and calibration of the X-33 flush airdata sensing (FADS) system [C] //36th AIAA aerospace sciences meeting and exhibit, 1998: 201.
- [27] 肖地波. 嵌入式大气数据传感系统算法及其关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [28] 赵磊. 导弹气动/大气参数一体化在线辨识与预示方法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
- [29] DESKOS G, DEL CARRE A, PALACIOS R. Assessment of low-altitude atmospheric turbulence models for aircraft aerelasticity [J]. Journal of Fluids and Structures, 2020, 95: 102981.
- [30] JIANG S, QIU Q, YUAN S, et al. Stochastic resonance for a bistable system with multiplicative noise and additive recycled noise [J]. Indian Journal of Physics, 2022: 1-7.
- [31] 陆辰, 李荣冰, 刘建业, 等. 融合惯导与飞控系统信息的飞行大气全参数估计算法 [J]. 控制与决策, 2017, 32 (2): 363-367.