

激光与光电子学进展

结合日光和占用的动态办公室照明系统设计

秦新景, 王志胜*, 张曼群, 冯悦, 徐松海

大连工业大学光子学研究所, 辽宁 大连 116034

摘要 一个舒适健康的办公室照明环境,不仅可以提高工作效率,还可以避免不舒适的光环境对身体造成伤害。但是大多数办公室在照明节能和照明舒适度方面仍然存在一些问题。为了解决这些问题,本文提出了一个将日光照度和占用情况作为输入、灯具的调光系数 $K(0 \leq K \leq 1)$ 作为输出的照明控制系统。该系统通过算法得出日光照度、占用情况、相邻灯具的照度分量与调光系数 K 之间的线性数学模型,采用 Matlab 最小二乘法求得每个灯具的最佳调光系数。采用 DIALux 软件验证照明系统下的办公室光环境,结果表明,在该系统控制下被占用的工作面照度均达到 500 lx,未占用的工作面照度均达到 300 lx,照度均匀度大于 0.7,解决了白天照度均匀度低的问题。在满足办公室光环境的基础上,该照明系统在白天和夜间的节能效率分别达到了 66% 和 14%。

关键词 光学设计与制造; 办公室照明环境; 照明系统; 调光系数; DIALux

中图分类号 O439 文献标志码 J

DOI: 10.3788/LOP222162

Combined Sunlight and Occupancy Dynamic Lighting System Design in Offices

Qin Xinjing, Wang Zhisheng*, Zhang Manqun, Feng Yue, Xu Songhai

Research Institute of Photonics, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, Liaoning, China

Abstract A comfortable and healthy lighting environment can improve people's work efficiency, and can avoid physical damages caused by an uncomfortable lighting environment. However, most offices still face problems with lighting-related energy saving and comfort. To resolve these problems, this study proposes a lighting control system that takes sunlight and occupancy as input and the dimming coefficient $K(0 \leq K \leq 1)$ of lamps as output. The system establishes a linear mathematical model among sunlight, occupancy, the illuminance component of adjacent lamps, and the dimming coefficient through an algorithm and uses the Matlab least squares method to obtain the optimal dimming coefficient of each lamp. The lighting design software DIALux was used to investigate the lighting environment under the control system. The results show that under the control of the system, the illuminance of the occupied and unoccupied working surfaces reaches 500 and 300 lx, respectively, and the uniformity of illuminance is greater than 0.7. Therefore, the control system solves the problem of low uniformity of illuminance in the daytime. In terms of satisfying the office lighting needs, the energy-saving efficiency of the control system in the daytime and nighttime reaches 66% and 14%, respectively.

Key words optical design and manufacturing; office lighting environment; lighting system; dimming coefficient; DIALux

1 引言

办公室人工照明环境是室内环境的重要组成部分,旨在满足生理、心理、美学等方面的要求^[1]。办公室照明环境的舒适度将直接影响到办公室工作人员的身心健康和办公效率。因此,智能照明在节能和满足用户需求方面的优势备受关注。

早在 20 年前, Lee 等^[2]提出了一种结合室外日光实现自动调光的日光控制系统。它不仅满足了工作面的照明要求,而且还节省了能源。2013 年,国外学者开发出基于自主分布式控制方法的智能照明照度传感器控制照明系统。利用红外通信技术,向临近的照明设备发送照明控制命令,在此基础上增加了占用传感器,提出了分布式无线控制系统。使用本地通信和迭

收稿日期: 2022-07-25; 修回日期: 2022-08-07; 录用日期: 2022-08-15; 网络首发日期: 2022-08-25

基金项目: 教育部 2021 年人文社会科学研究项目(21YJC740036)、大连市社科院(研究中心)2022 年度调研课题(2022dlsky107)

通信作者: *wangzs@dipu.edu.cn

代算法来协调调光级别,以满足本地照度要求并最大限度地降低总体能耗^[3]。2015年,王猛等^[4]制定了基于天然采光的办公照明总体控制策略,使天然采光与人工照明补光可以有机结合。采用基于分层多规则集结构的模糊控制策略实现自然采光。当自然采光不能满足室内光环境的舒适度时,采用脉冲宽度调制(PWM)调光控制方式,实现对LED灯具的补光控制,满足工作面的照度要求。2017年,Kumar等^[5]提出使用 ZigBee 和 Wi-Fi 通信协议来控制办公室的照明环境。照明系统可以在三种不同的模式下运行:手动、自动和混合模式,并且具有无线控制,以满足用户的个性化需求。近年来,在节能的基础上,办公照明更倾向于满足用户的舒适需求。研究中提出的照明控制系统可以根据自然光和用户需求调整照明。这种控制策略可以进行实时自动调光,减少灯具的使用时间,节约能源^[6]。虽然上述文献提出了各种办公照明控制方法,但这些控制系统下的办公照明环境是否达标尚不清楚,缺乏光学研究。合理利用日光可以提高工作面的照度、节约能源。然而,由于办公室内日光分布不均匀,照明均匀度降低,给工作人员带来视觉疲劳,甚至导致近视。因此,合理地采用日光是本文研究的重点。本文首先介绍了办公室光环境的设计要点及研究条件,以 GB-50034 建筑采光设计标准为基础提出研究的目标值。然后介绍了系统的组成以及传感器的空间分布,并提出了日光照度、占用情况、相邻灯具的照度分量与调光系数之间的线性数学模型。最后采用 DIALux 软件对系统控制下的光环境进行验证,在满足光环境标准的基础上,研究了节能问题。

2 光环境研究背景

人工照明和日光系数是办公室照明设计的两个重要因素。人工照明方面,照度、色温、照度均匀度最容易被使用者感觉到和有意识地分辨,可以直接指导办公室照明的设计和检测^[7]。对于日光系数而言,阴天模型对于照度均匀度和天然眩光是有利的。另一方面,采用阴天模型时,建筑各朝向、各个时刻的眩光指数对办公人员的影响较小^[8-9]。因此本文只在晴天模型下进行研究。

在办公室照明设计的过程中,办公室照明环境必须符合照明标准。本文中的所有照明设计均基于 GB-50034《建筑采光设计标准》进行研究^[10]。该标准指出,当工作面的照度为 500 lx 时,周围的照度需要达到 300 lx。因此结合本文研究方向,被占用的工作面照度值需达到 500 lx,未被占用的工作面照度值需达到 300 lx。办公室的照度均匀度是工作面最小照度与平均照度之比,数值上不小于 0.7,照明功率密度(LPD)小于 6 W/m²。将上述指标作为本文研究的目标值,LPD 值(ρ_{LPD})由下式给出:

$$\rho_{LPD} = \frac{P_M}{S}, \quad (1)$$

式中: P_M 为照明灯具总功率; S 为办公室面积。

中国根据日光辐射强度化分了五个地区等级^[11]。本文主要对第三级别地区的办公室光环境进行研究,该地区全年日照时数为 2200~3000 h,年辐射量在 1390~1630 kW·h/m²。大连属于第三级别地区,因此选取大连地区的办公室作为研究对象。采用 DIALux 软件对办公室建模,其三维视图如图 1 所示,仿真模拟等均以此为实验环境。



图 1 办公室 DIALux 仿真图

Fig. 1 DIALux simulation diagram of office

办公室中各项参数的属性如表 1 所示。

表 1 办公区域属性
Table 1 Office area attributes

Parameter	Description	Value
Office space	Length	5.0 m
	Width	8.0 m
	Height	3.4 m
Window	Height	1.8 m
	Width	1.5 m
Lamp	Installation height	3.1 m
	θ	3600 lm
	P	32.5 W
	T_c	5000 K
Desk	Number	6
	Length	2.0 m
	Width	1.6 m
	Height	1.0 m

通过对评价实验的办公室光环境设计研究,色温为 5000 K、光照大于 300 lx 时的照明环境最为舒适^[12-14]。为了提高办公照明的舒适度,选用的实验灯具应满足以上研究提供的参数。办公选用的灯具为三雄极光的办公嵌入式 LED 节能灯。灯具参数见表 1,配光曲线如图 2 所示。

由图 2 可知,灯具在空间上不同方向的发光强度是不同的,通常用纵坐标来表示照明灯具的光强分布。

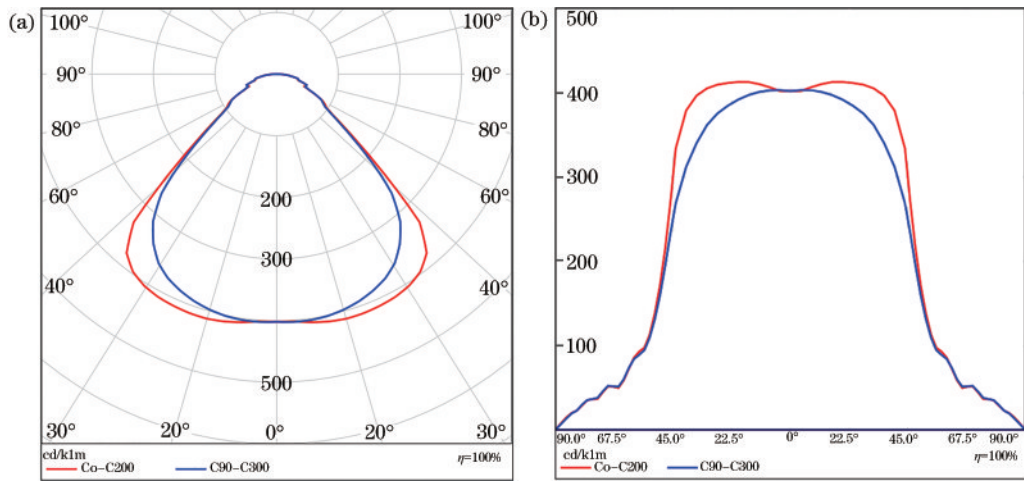


图 2 灯具配光曲线图。(a) 极坐标配光曲线；(b) 直角坐标配光曲线

Fig. 2 Light distribution curve of lamps. (a) Polar coordinate light distribution curve; (b) rectangular coordinate light distribution curve

3 动态调光照明数学模型设计

现有的办公照明系统通过开关或遥控器控制灯光的开或关,照明设计并未从完全人性化的角度进行^[15]。最佳照明驱动的目标是双重的:最大限度地减少整体照明能源的使用,并为每个办公人员提供令其满意的工作照明。本节提出了动态优化调光的数学模型,根据日光和占用情况计算出一组灯具的最佳调光系数组合,从而达到节能的目的,同时满足用户的舒适度需求。

3.1 系统组成

智能照明控制是实现舒适节能的室内照明环境的有效措施^[16]。本文的智能照明系统由 STM32 控制器、光敏传感器、占用传感器、ZigBee 无线通信模块、电子镇流器、LED 照明模块等组成。占用传感器安装在天花板上,用于测量工作面是否被占用,光敏传感器安装于被测表面,用于测量各个桌面照度。STM32 控制器接收光敏传感器和占用传感器采集的数据进行处理,将检测到的数据作为调光数学模型的参数,通过下文提出的数学模型得到每盏灯的调光系数 K 。调光信号通过 ZigBee 无线网络传输到电子镇流器,对灯具进行调节。传感器的分布情况如图 3 所示。

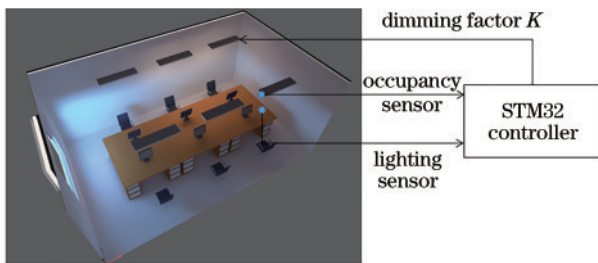


图 3 控制系统在办公室中分布图

Fig. 3 Distribution map of control system in office

3.2 建立数学模型

光照叠加原理是本文研究的基础,办公室工作面

各点的照度是直接入射到该点的光与从其他表面反射回来的光的累积。工作面上目标点的照度合成原理如图 4 所示。

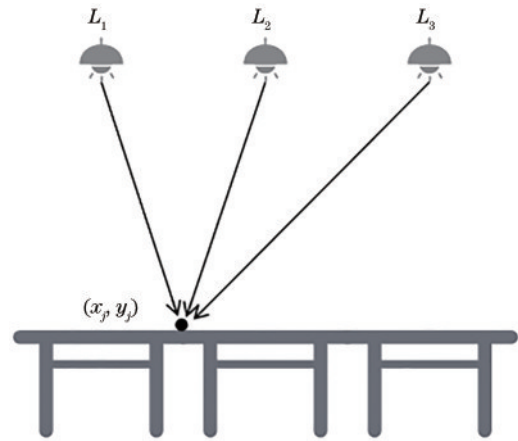


图 4 光照叠加示意图

Fig. 4 Schematic diagram of lighting overlay

假设办公室内分布有 m 个可调光灯,工作面有一点 Q ,其照度由下式得:

$$E_Q = \sum_{i=1}^m E_{iQ} \quad (2)$$

该数学模型以日光照度和办公室占用情况作为影响因素。分别从白天和夜间两种模式下进行讨论。白天工作面的照度由日光和室内照明叠加,夜间工作面的照度只由室内照明构成。在白天由于日光的影响,靠近窗户的工作面照度高,远离窗户的工作面照度低,导致办公室照度均匀度低,增加办公人员的视觉负担。因此需要研究日光照度、占用情况与工作面目标照度的映射关系。

假设工作面被占用时的预期照度 $E_e = 500 \text{ lx}$,未被占用的预期照度 $E_u = 300 \text{ lx}$ 。需要考虑日光因素,所以不能直接将上述两个指标作为工作面的目标值。则日光照度、占用情况与工作面目标照度的映射关系分别为

$$S_o = E_{all} \times \frac{E_o}{E_n}, \quad (3)$$

$$S_u = E_{all} \times \frac{E_u}{E_n}, \quad (4)$$

式中： S_o 为被占用的工作面目标照度； S_u 为未被占用的工作面目标照度； E_{all} 为办公室的平均照度； E_n 为光

敏传感器测量各工作面照度。

接下来需要研究目标照度和调光系数之间的关系，工作面的目标照度是相邻灯具照度的累积，那么照度目标值与相邻灯具的照度分量的模型如下所示：

$$\sum_{j=1}^n S(x_j, y_j) = \sum_{j=1}^n K_i E_i(x_j, y_j) (1 \leq i \leq m), \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_1(x_1, y_1)K_1 + E_2(x_1, y_1)K_2 + \dots + E_m(x_1, y_1)K_m = S(x_1, y_1) \\ E_1(x_2, y_2)K_1 + E_2(x_2, y_2)K_2 + \dots + E_m(x_2, y_2)K_m = S(x_2, y_2) \\ \dots \\ E_1(x_n, y_n)K_1 + E_2(x_n, y_n)K_2 + \dots + E_m(x_n, y_n)K_m = S(x_n, y_n) \\ 0 \leq K_1, K_2, \dots, K_m \leq 1 \end{array} \right\}, \quad (6)$$

式中： $S(x_j, y_j)$ 表示 (x_j, y_j) 点的目标照度值； K_i 为第*i*盏灯的调光系数 $0 \leq K_i \leq 1$ ； $E_i(x_j, y_j)$ 是第*i*盏灯在 (x_j, y_j) 点产生的照度。

该算法不需要单独考虑日光的照度，根据式(3)和式(4)可知，光敏传感器视野内的照度越大，则工作面的目标照度就越小，进而调光系数越小。因此在任何天气条件、任何地理位置，日光照度仅由光敏传感器检测得出。

3.3 数学模型模拟计算

通过DIALux模拟实际场景，办公室有6个可以调光的LED，对应6个工作面。工作面F1~F6的分布如图5所示，F1~F6对应的灯具编号为Q1~Q6。

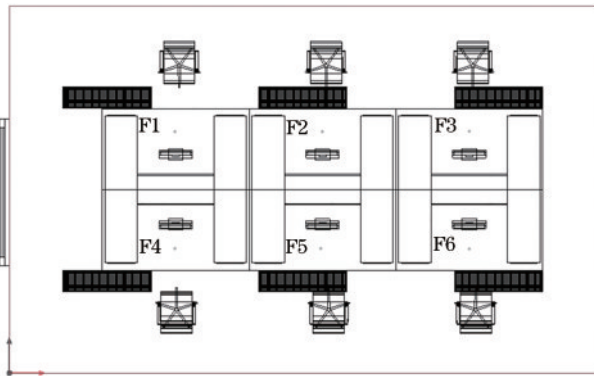


图5 测试点及灯具分布图
Fig. 5 Distribution of test points and lamps

在白天模式下，选取当地 12:00-13:00 时间段且为晴天时进行实验。因为这一时间段太阳高度较高，靠窗和远离窗户的工作面的日光照度差别大，因此照度均匀度很低，具有研究意义。假设F1、F6工作面未被占用，即 $E_{u1}=E_{u6}=300 \text{ lx}$ ， $E_{o2}=E_{o3}=E_{o4}=E_{o5}=500 \text{ lx}$ 。在没有使用任何控制系统下，办公室所有灯全部打开。对办公室的6个工作面的照度进行测量，其值如表2所示。

从表2中可以得出各个工作面的照度 E_n ，平均照度 $E_{all}=738 \text{ lx}$ ，照度均匀度只有0.61。因此在没有使用控制系统的情况下，照度均匀度没有达到照明标准，

表2 各测试点日光照度分布

Table 2 Sunlight illuminance distribution of each test point

Time	12:00-13:00		
Date	2022-07-08		
Test point	F1	F2	F3
Value /lx	939	685	581
Test point	F4	F5	F6
Value /lx	829	673	572

并且F1和F6在没有占用下的照度仍达到500 lx，增加了照明能耗。根据式(3)和式(4)求出6个工作面的目标照度为

$$S_n = \begin{bmatrix} 243 \\ 513 \\ 588 \\ 441 \\ 529 \\ 389 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

为了实现个性化的优选照度分布，核心部分需确定每个灯具的调光系数。根据表3中各灯具的照度分量，可以得到关于 $E_i(x_j, y_j)$ 的系数矩阵：

$$E_i(x_j, y_j) = \begin{bmatrix} 709 & 513 & 442 & 504 & 460 & 440 \\ 237 & 479 & 253 & 211 & 259 & 216 \\ 127 & 191 & 432 & 126 & 146 & 197 \\ 415 & 381 & 363 & 642 & 438 & 364 \\ 191 & 227 & 195 & 217 & 468 & 235 \\ 119 & 138 & 177 & 120 & 184 & 425 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

将上述值代入数学模型式(6)可得

$$\begin{bmatrix} 243 \\ 513 \\ 588 \\ 441 \\ 529 \\ 389 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 709 & 513 & 442 & 504 & 460 & 440 \\ 237 & 479 & 253 & 211 & 259 & 216 \\ 127 & 191 & 432 & 126 & 146 & 197 \\ 415 & 381 & 363 & 642 & 438 & 364 \\ 191 & 227 & 195 & 217 & 468 & 235 \\ 119 & 138 & 177 & 120 & 184 & 425 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \\ K_5 \\ K_6 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

由式(9)可以看出，桌面的目标照度值与调光系数和相邻灯具的照度分量呈线性关系。最小二乘法是求解线

性函数的最优方法之一,因此结合 Matlab 软件采用最小二乘法得到方程的最优解,则调光系数 $K=[0, 0.42, 0.87, 0, 0.58, 0.16]$ 。

表 3 白天测试点 F1 和 F3 灯具的照度分量

Table 3 Luminance components of lamps at test points F1 and F3 during daytime unit: lx

Lamp test	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
F1	709	513	442	504	460	440
F2	237	479	253	211	259	216
F3	127	191	432	126	146	197
F4	415	381	363	642	438	364
F5	191	227	195	217	468	235
F6	119	138	177	120	184	425

夜间办公室的照明环境不会受到日光的影响,光敏传感器采集的照度值相对变小。测量方法和白天模式下相同,仍取 F1 和 F6 这两个未被占用测试点。未使用任何控制系统下,办公室所有灯具打开且亮度调到最大,工作面照度数据如表 4 所示。

表 4 夜间测试点照度分布

Table 4 Luminance distribution of test points at night

Time	20:00-21:00		
Date	2022-07-08		
Test point	F1	F2	F3
Value /lx	518	571	538
Test point	F4	F5	F6
Value /lx	516	561	534

如表 4 所示,各个工作面的照度均达到 500 lx 以上,照度均匀度为 0.8, $E_{all}=533$ lx。则各工作面的目标照度可由式(3)和式(4)算出,相邻灯具的照度分量如表 5 所示。

表 5 夜间各测试点灯具照度分布

Table 5 Luminance distribution of lamps at each test point at night unit: lx

Lamp test	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
F1	275	86	18	21	25	17
F2	90	271	83	27	17	28
F3	18	84	280	15	27	23
F4	21	26	15	279	85	18
F5	31	17	27	93	275	86
F6	15	28	23	18	88	285
Total	450	512	446	453	517	457

根据调光数学模型式(6),将上述数据转换为矩阵:

$$\begin{bmatrix} 308 \\ 467 \\ 495 \\ 516 \\ 475 \\ 299 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 275 & 86 & 18 & 21 & 25 & 17 \\ 90 & 271 & 83 & 27 & 17 & 28 \\ 18 & 84 & 280 & 15 & 27 & 23 \\ 21 & 26 & 15 & 279 & 85 & 18 \\ 31 & 17 & 27 & 93 & 275 & 86 \\ 15 & 28 & 23 & 18 & 88 & 285 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \\ K_5 \\ K_6 \end{bmatrix} \quad (10)$$

同样根据最小二乘法,用 Matlab 软件求 K 的最优解,得到 $K=[0.59, 1, 1, 1, 1, 0.55]$ 。

4 模拟

在模拟过程中,需要验证办公室内 6 个工作面的照度是否达到要求,即被占用的工作面的照度 $E_o=500$ lx,未被占用的工作面照度 $E_u=300$ lx,照度均匀度不小于 0.7。在满足光环境标准的基础上,再验证最佳调光系数下的能耗。在本节中,DIALux 软件提供了评估控制系统性能数值^[17]。将获得的调光系数 K 应用于 LED,将不同的调光系数 K 乘以光通量 $\theta=3600$ lm 以获得新的光通量。

4.1 光环境模拟

在白天模式下,数学模型计算出调光系数 $K=[0, 0.42, 0.87, 0, 0.58, 0.16]$,那么每盏灯的光通量变为 $[0, 1512, 3132, 0, 2088, 576]$ 。在这种调光模式下,办公室 6 个工作面的照度分布如图 6 所示。

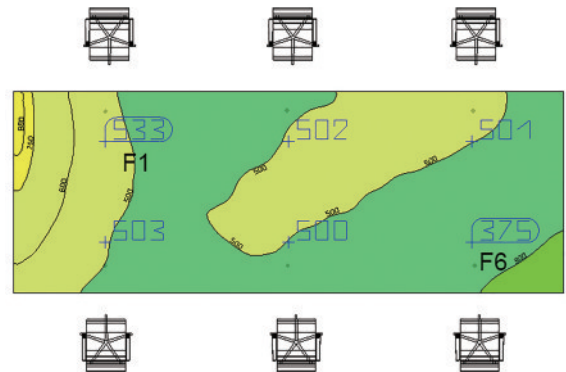


图 6 办公室白天照度分布图

Fig. 6 Luminance distribution map of office during daytime

图 6 中, F1 和 F6 这两点的照度分别为 533 lx 和 375 lx。其他被占用的工作面的照度均超过 500 lx,照度均匀度为 0.77,满足上文提出的目标值。

在夜间模式下,通过数学模型计算出 $K=[0.59, 1, 1, 1, 1, 0.55]$ 。那么每盏灯的光通量变成 $[2124, 3600, 3600, 3600, 1980]$ 。在这种调光模式下,办公室 6 个工作面的照度分布如图 7 所示。

图 7 中, F1 和 F6 的照度均达到 300 lx,其他被占用的工作面照度均高于 500 lx,照度均匀度为 0.78,上述指标均达到了办公室光环境的目标值。

总结上述模拟结果,该控制系统下白天和夜间的照度均匀性分别为 0.77 和 0.78,并且照度值均达到目

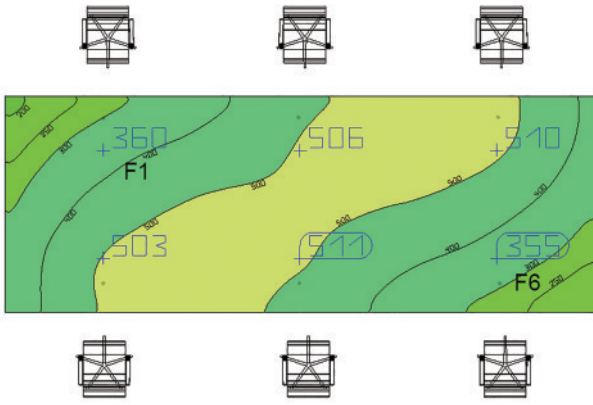


图 7 办公室夜间照度分布图

Fig. 7 Luminance distribution map of office at night

标值。而未使用任何控制系统下,白天照度均匀度仅为 0.61,因此该控制系统解决了白天照度均匀度低的问题。

4.2 节能估算

LPD 值是表示照明能耗的重要指标,不使用调光系统时,不受日光和占用的影响,6 盏灯的总额定功率为

$$P = 6 \times 32.5 = 195 \text{ W}. \quad (11)$$

根据式(1)得出,未使用任何控制系统的 LPD 值为 6 W/m^2 。当使用调光系统时,根据日光和占用情况的变化实时调光。则照明功耗由下式给出:

$$P_i = (K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K_6) \times 32.5. \quad (12)$$

在白天模式下, $K = [0, 0.42, 0.87, 0, 0.58, 0.16]$, 代入式(12)得

$$P_1 = (0 + 0.42 + 0.87 + 0 + 0.58 + 0.16) \times 32.5 = 65.98 \text{ W}.$$

同理,在黑夜情况下,将 $K = [0.59, 1, 1, 1, 1, 0.55]$ 代入式(12)得

$$P_2 = (0.59 + 1 + 1 + 1 + 1 + 0.55) \times 32.5 = 167.05 \text{ W}.$$

因此,白天和夜间的 LPD 值分别为 1.65 W/m^2 和 4.18 W/m^2 ,通过对比 LPD 值可以看出,该系统比未使用控制时具有一定的节能效果。在这两种特殊情况下,节能效率由下式获得:

$$\begin{cases} \eta = \frac{P - P_i}{P} \\ \eta_1 = \frac{P - P_1}{P} = \frac{195 - 65.98}{195} \approx 0.66, \\ \eta_2 = \frac{P - P_2}{P} = \frac{195 - 167.05}{195} \approx 0.14 \end{cases} \quad (13)$$

式中: P 为 6 盏灯的总额定功率; P_1 为调光数学模型白天条件下 6 盏灯的总额定功率; P_2 为夜间条件下 6 盏灯的总额定功率; η_1 、 η_2 为两种情况下的节能效率。

在本节的研究中,通过 LPD 值可以直观地看出,本文提出的数学模型具有一定的节能效果,白天和夜

间的节能效率分别达到 66% 和 14%,因此该优化数学模型是可行的。

5 结 论

本文以 GB-50034 文件为办公照明标准,规定了办公室照度、照度均匀度、LPD 指标阈值。提出了基于日光和占用情况的动态优化照明数学模型,结合人工智能形成办公智能照明系统。该系统由 STM32 控制器、ZigBee 无线通信模块、占用传感器模块、光敏传感器模块、电子镇流器、LED 照明模块等组成。运用 Matlab 最小二乘法计算出每盏灯的最佳调光系数,并通过 ZigBee 无线通信技术控制电子镇流器对每盏灯进行调光。在控制系统调光下,被占用工作面照度均达到 500 lx ,未被占用的工作面照度均高于 300 lx ,照度均匀度高于 0.7,解决了白天照度均匀度低的问题。LPD 值分别为 1.65 W/m^2 和 4.18 W/m^2 ,均小于规定值 6 W/m^2 。在满足办公照明标准的基础上,调光系统在白天和夜间的节能效率分别为 66% 和 14%。因此,本文提出的智能照明控制系统既能满足用户的舒适度要求,又能节约能源。

参 考 文 献

- [1] 许馨尹,李淑娴. 开放式办公室新型照明技术研究[J]. 建筑电气, 2020, 39(6): 60-64.
Xu X Y, Li S X. Research on new lighting technology for open-plan offices[J]. Building Electricity, 2020, 39(6): 60-64.
- [2] Lee E S, DiBartolomeo D L, Selkowitz S E. Thermal and daylighting performance of an automated Venetian blind and lighting system in a full-scale private office[J]. Energy and Buildings, 1998, 29(1): 47-63.
- [3] Caicedo D, Pandharipande A. Distributed illumination control with local sensing and actuation in networked lighting systems[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(3): 1092-1104.
- [4] 王猛. 基于天然采光的办公照明节能控制系统设计与研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
Wang M. Energy saving office lighting control system design and research based on natural lighting[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.
- [5] Kumar A, Kar P, Warriar R, et al. Implementation of smart LED lighting and efficient data management system for buildings[J]. Energy Procedia, 2017, 143: 173-178.
- [6] Ma J M, Wei D, Jing S Q, et al. Optimization control method for office lighting[C]//2020 Chinese Automation Congress (CAC), November 6-8, 2020, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2020: 7359-7364.
- [7] 傅军栋,陈晴,邱运霞,等. 基于光能传递方法的室内光环境模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(11): 111502.
Fu J D, Chen Q, Qiu Y X, et al. Indoor light environment simulation based on light energy transfer

- method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(11): 111502.
- [8] 刘刚, 刘梦柳, 雒琛, 等. 基于评价实验的办公室光环境舒适度研究[J]. *照明工程学报*, 2017, 28(6): 48-51, 69.
- Liu G, Liu M L, Luo C, et al. Study of light environment comfort in office based on evaluation experiment[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2017, 28(6): 48-51, 69.
- [9] 张恒, 乔卫东, 王嘉明, 等. 视野范围变化对动态眩光评价的影响分析[J]. *光学学报*, 2021, 41(17): 1733001.
- Zhang H, Qiao W D, Wang J M, et al. Analysis of influence of change in field of view on dynamic glare evaluation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(17): 1733001.
- [10] 中国建筑科学研究院有限公司. 《建筑照明设计标准》GB 50034-2013 获准局部修订[J]. *中国照明电器*, 2019(1): 28.
- China Academy of Building Research. "Architectural Lighting Design Standard" GB 50034-2013 was partially revised[J]. *China Light & Lighting*, 2019(1): 28.
- [11] 杨晓彤, 张国玉, 张健, 等. 用于太阳直接辐射测量的自由曲面反射镜优化设计方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(9): 0922001.
- Yang X T, Zhang G Y, Zhang J, et al. Optimization design method of freeform reflector for direct solar radiation measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(9): 0922001.
- [12] Bian Y, Luo T. Investigation of visual comfort metrics from subjective responses in China: a study in offices with daylight[J]. *Building and Environment*, 2017, 123: 661-671.
- [13] 蔡珍红, 胡英奎, 张青文. LED在办公室照明中的应用探讨[J]. *土木建筑与环境工程*, 2011, 33(S2): 55-57.
- Cai Z H, Hu Y K, Zhang Q W. Application of LEDs in office lighting[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2011, 33(S2): 55-57.
- [14] Davoodi A, Johansson P, Aries M. The use of lighting simulation in the evidence-based design process: a case study approach using visual comfort analysis in offices[J]. *Building Simulation*, 2019, 13: 141-153.
- [15] Wang X, Linnartz J P. Intelligent illuminance control in a dimmable LED lighting system[J]. *Lighting Research and Technology*, 2016, 49(5): 603-617.
- [16] Xiao J, Li J T. Design and implementation of intelligent temperature and humidity monitoring system based on ZigBee and WiFi[J]. *Procedia Computer Science*, 2020, 166: 419-422.
- [17] 陈超泉, 吴逢铁. 低眩光篮球场节能照明光学设计与优化[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(11): 1122004.
- Chen C Q, Wu F T. Optical design and optimization of energy-saving lighting for low-glare basketball courts[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(11): 1122004.