

# 基于非视觉效应的建筑室内 人工光环境动态调控方法

刘 阳<sup>1</sup>, 段中兴<sup>1,2</sup>, 赵明琪<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学 信息与控制工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 绿色建筑全国重点实验室, 陕西 西安 710055;  
3. 西安正中德信息科技有限公司, 陕西 西安 710061)

**摘要:** 以电子信息制造业中的封闭流水线车间作为研究对象, 提出了一种基于光非视觉效应及智能优化算法的动态调光方法。首先, 基于流水线车间这一建筑室内照明场景, 制定了相应动态调光策略, 在此基础上结合脉冲宽度调制技术的 LED 灯具及 DIALux 中的光照模拟, 建立了光照调控数学模型; 其次, 为提升蚁狮算法的寻优能力及鲁棒性, 提出了基于 PWLCM 混沌映射、Levy 飞行、萤火虫扰动及自适应混合变异机制的改进蚁狮算法, 并利用改进蚁狮算法求解光照调控数学模型, 实现了光照的最优控制; 最后, 设计了算法对比实验、光照调控准确度实验及光照模拟实验。实验证明, 改进蚁狮算法相较于其他算法寻优能力更强、稳定性更高; 动态调光方法可将照度误差控制在 5 lux 以内, 调光准确; 动态调光方法在节能的同时有利于缓解工人疲劳。

**关键词:** 光照动态调控; 人工光环境; 非视觉效应; 蚁狮算法

中图分类号: TU113.6

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)02-0301-10

## Dynamic control method for indoor green artificial light environment in buildings

LIU Yang<sup>1</sup>, DUAN Zhongxing<sup>1,2</sup>, ZHAO Mingqi<sup>3</sup>

(1. School of Information and Control Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;  
2. State Key Laboratory of Green Building(XAUAT), Xi'an 710055, China;  
3. Xi'an Zhengzhongde Information Technology Co., Ltd., Xi'an 710061, China)

**Abstract:** This article focuses on the closed assembly line workshop in the electronic information manufacturing industry and proposes a dynamic dimming method based on light non-visual effects and intelligent optimization algorithm to address the shortcomings of high energy consumption and low comfort in the artificial light environment of the workshop. Firstly, based on the interior lighting scene of the assembly line workshop, the corresponding dynamic dimming strategy is developed. On this basis, the mathematical model of light regulation is established by combining LED lamps with pulse width modulation technology and light simulation in DIALux. Secondly, in order to improve the optimization ability and robustness of the Antlion algorithm, an improved Antlion algorithm based on PWLCM chaotic mapping, Levy flight, firefly disturbance and adaptive hybrid mutation mechanism is proposed, and the improved Antlion algorithm is used to solve the mathematical model of light regulation and achieve the optimal control of light. Finally, the algorithm comparison experiment, illumination control accuracy experiment and illumination simulation experiment are designed. Experimental results show that the improved Antlion algorithm has stronger optimization ability and higher stability than other algorithms. The dynamic dimming method can control the illumination error within 5lux, and the dimming is accurate. The dynamic dimming method can save energy and alleviate worker fatigue at the same time.

**Key words:** light dynamic control; artificial light environment; non-visual effects; antlion optimizer

收稿日期: 2023-02-22

修回日期: 2024-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678470)

第一作者: 刘 阳(1996—), 男, 硕士生, 主要从事建筑光环境优化控制和智能建筑方面的研究。E-mail: 1786408569@qq.com

通信作者: 段中兴(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事建筑环境控制与节能和智能控制等方面的研究。

E-mail: zhx\_duan@163.com

随着科技的进步,人们对建筑照明的需求在满足基本居住和使用的基础上,正向着更高层次的节能、健康等方向发展。

根据国际能源署的数据,全球近20%的电力用于照明<sup>[1]</sup>。为降低照明能耗,众多学者正致力于研究照明智能控制。秦新景等<sup>[2]</sup>提出了一种运用最小二乘法的照明控制方案,该方案根据建筑内部空间的实际占用率以及自然光线的补充量调控灯具,从而满足工作面的光照需求。Chen Z等<sup>[3]</sup>提出了一种基于实时人流量监测的智能光照调控方法,该方法借助传感器实时捕捉并分析室内人群密度数据,进而调整灯具的输出,实现了光照强度与空间使用情况的匹配。Shen D等<sup>[4]</sup>提出了一种基于目标检测技术的光照调控技术,该技术通过测定人与灯具之间的实时距离,并据此智能调节灯具亮度,实现了光照的自动化调控。

除上述照明节能研究外,当前建筑室内人工光领域一大热门课题是基于光生物效应,探究如何科学合理地优化室内照明条件,以提升人类工作效率及生活质量。光生物效应是指人体受到光照后发生的生理及生化反应,分为视觉效应及非视觉效应<sup>[5]</sup>。视觉效应是光生物效应的基本表现形式,视网膜中的感光细胞吸收特定波长范围内的光子并转化为神经信号,使人眼能够感知周围环境;非视觉效应是指光线通过第三类感光细胞(ipRGCs)<sup>[6]</sup>刺激人体分泌褪黑素、皮质醇等激素,从而影响生理节律<sup>[7]</sup>、警觉性<sup>[8]</sup>、情绪<sup>[9]</sup>及睡眠质量<sup>[9]</sup>。非视觉效应可调节体温<sup>[10]</sup>、血压<sup>[11]</sup>、心率<sup>[11]</sup>等生理指标。在医学研究领域,基于非视觉效应的光疗法已应用于抑郁症<sup>[12]</sup>、创伤后应激障碍<sup>[13]</sup>等心理疾病的治疗。

本文基于非视觉效应相关理论,选择电子制造业工厂流水线车间作为研究对象,基于流水线工人的疲劳周期制定了相应的光照动态调控策略,通过改进蚁狮算法求解工厂车间光照调控数学模型,实现了满足光照动态调控策略的智能照明控制,在降低照明能耗的同时有利于缓解工人疲劳,提升其工作表现。

## 1 理论推导

### 1.1 工厂车间三维仿真模型

自2012年起,我国电子信息制造业的用工人数已达到了1 000万的数量级,并且企业数量稳步增长,行业发展迅速<sup>[14]</sup>。随着生产工艺的不断进步,部分工厂由于技术要求或者保密,其生产车

间多为封闭车间,无自然光补偿,完全依赖人工照明,能耗较高。在静态人工光环境下,工人无法通过自然光感知昼夜变化,且需长时间从事视觉高度紧张的流水线作业,导致昼夜节律紊乱、身心疲劳严重<sup>[15]</sup>。为改善上述情况,本文选取国内某电子厂流水线车间作为研究对象。该车间长20 m、宽20 m、高4 m;室内墙体、柱体与天花板均为白色;地板为防静电环氧地坪,面漆呈灰绿色,参照其实际的建筑形制及灯具布置在DI-Alux软件中建立车间三维仿真模型,如图1所示。



图1 工厂车间三维仿真模型

Fig. 1 3D simulation model of factory floor

由图1可知,该车间由4个流水线工作区及1个货物存放区组成。车间的灯具为各流水线工作台上所悬挂的管形灯具及天花板上的方形嵌入式灯具,方形嵌入式灯具内含两个同型号管形灯具。为实现工厂车间光照的分区动态调控,对车间区域进行了划分,见图2;对灯具进行了分组,见图3。

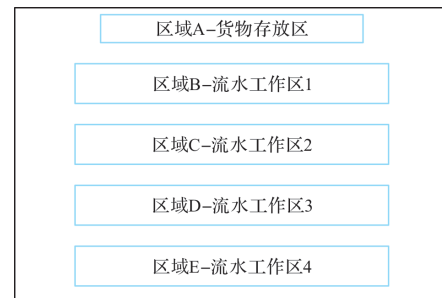


图2 工厂车间分区图

Fig. 2 Factory floor zoning plan

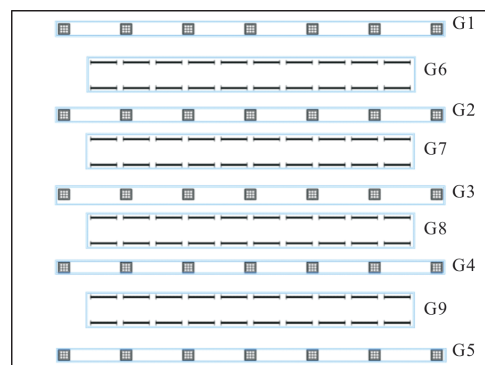


图3 工厂车间灯具分组图

Fig. 3 Grouping diagram of lamps in factory floor

如图2所示,工厂车间被划分为5个子区域,其中区域A为货物存放区,区域B~区域E为流水线工作区。

从图3可知,车间灯具被分为9组,其中G1~G5为在各子区域的边界处布置的方形嵌入式灯具,提供工厂车间的全局光照,G6~G9为各流水线工作台上所悬挂的灯具,为流水线工作面提供局部光照。

### 1.2 光非视觉效应计算模型

基于Brainard G C等<sup>[16]</sup>以及Thapan K等<sup>[17]</sup>关于人眼神经的研究成果,Rea等<sup>[18-19]</sup>构建并改进

了生理节律刺激值计算模型(Circadian Stimulus, CS)。该模型创新性地采用百分比形式量化光照对褪黑素分泌的抑制程度,从而评估不同光环境的非视觉效应,但由于其复杂的运算结构,不便于在实际照明设计中应用。为解决这一难题,Truong W等<sup>[20]</sup>提出了一种经过改良的CS计算模型,该模型显著简化了计算流程,易于实际应用。Truong W等规定,当人工光源的显色指数(Colour Rendering Index, CRI)大于80时,CS计算方法如式(1)所示。

$$CS = \begin{cases} 0.7 - \frac{0.7}{1 + \frac{3.65}{10^6} \cdot \left( \frac{(CCT_{ANSI}/[K])1.404}{1000} \cdot \frac{E}{[lx]} \right)^{1.1500}}, & CCT_{ANSI} > 3710K \\ 0.7 - \frac{0.7}{1 + \frac{3.40}{1000} \cdot \left( \frac{(CCT_{ANSI}/[K])0.783}{1000} \cdot \frac{E}{[lx]} \right)^{1.1012}}, & CCT_{ANSI} \leq 3710K \end{cases} \quad (1)$$

式中: $E$ 为照度; $CCT_{ANSI}$ 为基于ANSI标准<sup>[21]</sup>的基本标称色温,用于将人工光源的相关色温(Correlated Colour Temperature, CCT)标准化,以用于计算。 $CCT$ 值和 $CCT_{ANSI}$ 值的对应关系见表1。

表1  $CCT_{ANSI}$ 值和 $CCT$ 值对照表

Tab. 1 Comparison table of  $CCT_{ANSI}$  value and  $CCT$  value

$CCT_{ANSI}/K$	$CCT/K$	$CCT_{ANSI}/K$	$CCT/K$
2200	2136~2340	4000	3710~4260
2500	2340~2580	4500	4260~4746
2700	2580~2870	5000	4746~5312
3000	2870~3220	5700	5312~6022
3500	3220~3710	6500	6022~7042

如 $CCT$ 值不在表中,可以采用四舍五入的方式将其转换为最近的以100为整的 $CCT_{ANSI}$ 值。将CS值的计算结果乘以100%可得到人工光源对人体褪黑素分泌的抑制程度,百分比值越高,抑制程度越强。Figueiro M G等<sup>[22]</sup>的研究成果表明,在工作时间提供 $CS \geq 0.3$ 的人工照明可减少工作人员的困倦,增加其活力及警觉性。

### 1.3 光照动态调控策略

通过调研得知,研究对象车间实行白班8小时工作制,8:00~12:00及14:00~18:00为工作时间,12:00~14:00为休息时间,关闭车间所有灯具。文献[15]通过研究指出,在上述时间排程下工作的流水线工人,于9:00~10:00、11:00~12:00和16:00~16:30这三个时间段会出现明显的疲劳。为改善上述情况,为利用动

态照明缓解工人疲劳、提升其工作表现,本文制定光照调控策略如下。

#### 1.3.1 照度调控策略

只有在适宜的照度下,工作人员才能有效辨认工作内容。参照建筑光照设计标准:GB 50034—2013<sup>[23]</sup>,区域A的照度标准值应为100 lx,区域B—区域E的照度标准值应为500 lx,在此基础上考虑10%的设计裕量,则区域A的照度应在100 lx~110 lx之间,区域B—区域E的照度应在500 lx~550 lx之间。长时间进行视觉工作的场所,光环境不能过于均匀<sup>[24]</sup>。为提升工作场景的活力感,利用归一化的思想提出了一个车间子区域照度随机生成方法。光照控制系统针对5个子区域生成 $[0, 1]$ 上的5个互不相同的随机数 $\omega_A, \omega_B, \dots, \omega_E$ ,以区域A为例,其照度设定值 $E_A^{\text{set}}$ 的计算方法见式(2)。

$$E_A^{\text{set}} = \text{round} \left[ E_A^{\text{lower}} + (E_A^{\text{upper}} - E_A^{\text{lower}}) \frac{\omega_A - \omega_{\min}}{\omega_{\max} - \omega_{\min}} \right] \quad (2)$$

通过式(2)进行计算,求得工厂车间子区域A~子区域E照度设定值分别为[108, 505, 548, 514, 530],四个流水线工作区照度各不相同,明暗交错,满足了设计目标。

#### 1.3.2 CCT动态调控策略

Li Y等<sup>[25]</sup>通过构建固定照度、动态CCT的光环境开展实验,观察此照明方式对人体的影响。实验表明,动态的CCT对困倦、积极情绪和任务表现均有显著的改善作用。

历经数百万年的演化历程,人类体内已形成了与自然光变化相适应的生物节律机制.相关研究表明,参照自然光动态调控人工光环境,有益于人体昼夜节律稳定及提升睡眠质量<sup>[26-27]</sup>.参照文献[28]中给出数据,绘制了8:00~18:00的自然光色温变化图,见图4.

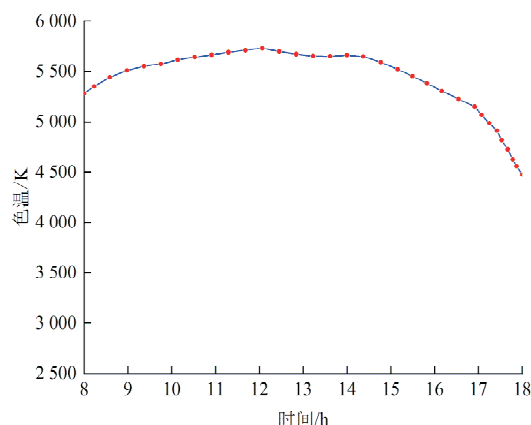


图4 自然光色温变化图

Fig. 4 Natural light color temperature variation diagram

由图4可知,自然光于8:00~12:00呈上升趋势,于12:00~14:30间存在轻微波动,于14:30~18:00呈下降趋势.基于文献[28]中的数据及文献[15]中给出的工人疲劳周期,本文制定了相应的CCT动态调控策略,见图5.

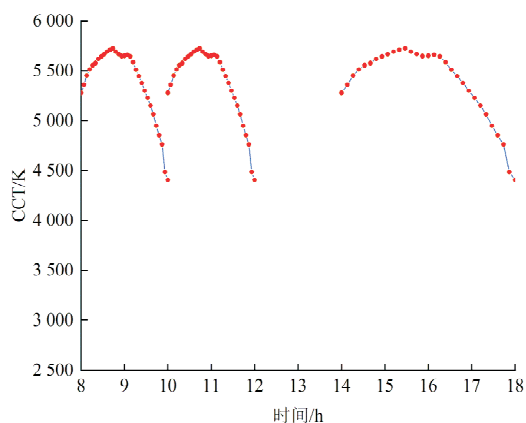


图5 CCT变化图

Fig. 5 CorrelatedColour Temperature variation diagram

由图5可知,CCT存在三个循环变化周期,分别为8:00~10:00、10:00~12:00、14:00~18:00,文献[29]表明,CCT的周期循环次数对人体无明显影响,在设计动态照明时应重点考虑高CCT带来的视疲劳.本文设计的CCT动态调控策略仅在工人疲劳期内给予其较高CCT的光照,避免工人长时间暴露于较高CCT(蓝光占比较高)的光环境下造成视疲劳<sup>[30]</sup>.在8:00~9:00、

10:00~11:00、14:00~16:00这三个工人疲劳累积的时段,CCT值逐渐上升,CS值也随之提高,人工光环境抑制工人褪黑素的分泌,减少困倦,提高活力及警觉性.

#### 1.4 光照调控数学模型

工厂车间原本安装的灯具,其光通量和CCT不可调节,为实现光照的动态调控,将工厂车间灯具更换为基于田会娟等人<sup>[31]</sup>提出的脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)技术的人造LED光源.人造LED光源的光通量调节范围为0~2100 lm, CCT调节范围为2900 K~7600 K, CRI的最小值为94.6,最大值为96,能够满足CS的计算要求及车间光照的调控需求.在光照调控的某一时段,光照控制系统根据此时刻的光照调控策略,动态地调整人工光源的调光系数及占空比,从而改变各子区域的照度及车间的CCT.

将LED光源PWM调光的一个周期设为单位时间,则光照系统单位时间内消耗的能耗 $Q$ 见式(3):

$$Q = \sum_{i=1}^9 [D_i^a(CCT)P_a + D_i^b(CCT)P_b + D_i^c(CCT)P_c] \times R_{in_i} \quad (3)$$

式中, $n_i$ 为第 $i$ 组灯具个数; $R_i$ 为第 $i$ 组灯具的调光系数,表示灯具的开启程度; $D_i^a(CCT)$ 、 $D_i^b(CCT)$ 、 $D_i^c(CCT)$ 为第 $i$ 组灯具的三通道占空比, $P_a$ 、 $P_b$ 、 $P_c$ 为三通道的额定功率.

将所有灯具的调光系数调整为1,在DIALux中进行光照模拟,得到了9组LED灯具分别为区域A提供的照度,记为 $E_{A1}$ ,  $E_{A2}$ , ...,  $E_{A9}$ ,则区域A的最大照度 $E_A^{\max}$ 为这9组灯具提供的照度值和.其余子区域类同,由此得式(4).

$$E_{base} \cdot V = E_{area}^{\max} \quad (4)$$

式中: $E_{base}$ 表示9组灯具分别为区域A~区域E提供的照度值构成的 $(5 \times 9)$ 维矩阵, $V$ 为 $(9 \times 1)$ 维单位列向量, $E_{area}^{\max}$ 为灯具满光通量状态下各子区域最大照度值构成的 $(5 \times 1)$ 维列向量.某一时刻,工厂车间子区域A~子区域E的照度设定值为 $E_{area}^{\text{set}} = (E_A^{\text{set}}, E_B^{\text{set}}, \dots, E_E^{\text{set}})^T$ ,当灯具组1~灯具组9的调光系数为 $R = (R_1, R_2, \dots, R_9)^T$ 时,满足各子区域的照度需求,结合式(4)建立不等式约束为:

$$E_{base} \cdot R \geq E_{area}^{\text{set}} \quad (5)$$

综上所述,光照调控数学模型的目标函数和约束条件如下.

$$\begin{aligned} & \min Q \\ & \text{s. t } E_{base} \cdot R \geq E_{area}^{\text{set}} \\ & CCT = CCT_{\text{set}} \\ & 0 \leq R_i \leq 1, i = 1, \dots, 9 \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $CCT_{set}$  为当前车间的  $CCT$  设定值。

## 2 改进蚁狮算法

智能优化算法具有效率高及适应性强等优点,在建筑科学与工程领域得到广泛应用<sup>[32-34]</sup>。本文选择蚁狮算法(Ant Lion Optimizer, ALO)<sup>[35]</sup>来优化光照调控数学模型。在满足光照动态调控策略的前提下,求得最优调光系数,寻找光照能耗的相对最小值。

### 2.1 标准蚁狮算法

ALO由Mirjalili S于2015年提出,相较于粒子群算法、遗传算法等常用算法,其寻优能力更强<sup>[35]</sup>。ALO的基本思想为

#### (1) 蚂蚁的随机漫步

ALO依靠随机漫步来模拟蚂蚁觅食的行为,如式(7)和(8)所示。

$$S(t) = [0, \text{csum}(2r(t_1) - 1), \dots, \text{csum}, (2r(t_n) - 1)] \quad (7)$$

$$r(t) = \begin{cases} 1, & \text{randnum} > 0.5 \\ 0, & \text{randnum} \leq 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $S(t)$  为蚂蚁随机漫步的步数集;  $\text{csum}$  为累加和;  $t$  为目前的迭代次数;  $n$  为算法最大迭代次数;  $\text{randnum}$  为 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数。

#### (2) 蚁狮构造陷阱影响蚂蚁随机游走

蚁狮通过构建陷阱来捕猎蚂蚁。蚂蚁随机漫步时,受陷阱影响,需要通过式(9)将蚂蚁的位置归一化,才能确保蚂蚁在陷阱的范围内随机漫步。

$$M_i^t = \frac{(M_i^t - a_i) \times (d_i^t - c_i^t)}{(b_i - a_i)} + c_i^t \quad (9)$$

式中:  $M_i^t$  为第  $t$  次迭代时第  $i$  只蚂蚁围绕蚁狮随机游走后的位置;  $b_i, a_i$  分别为第  $i$  只蚂蚁随机游走的最大值和最小值;  $d_i^t, c_i^t$  分别为第  $i$  只蚂蚁在第  $t$  次迭代时落入的蚁狮陷阱的上界和下界,公式见式(10)~(12)。

$$d_i^t = AL_j^t + \frac{ub}{I} \quad (10)$$

$$c_i^t = AL_j^t + \frac{lb}{I} \quad (11)$$

$$I = 10^e K \quad (12)$$

式中:  $AL_j^t$  为第  $t$  次迭代时第  $j$  只蚁狮的位置;  $ub, lb$  为算法解空间的上界和下界;  $I$  为一自适应系数,会随着迭代次数的增加而增加;  $K$  为当前迭代次数和最大迭代次数的比值,当  $K > 0.1$  时,  $e = 2$ ;  $K > 0.5$  时,  $e = 3$ ;  $K > 0.75$  时,  $e = 4$ ;  $K > 0.9$  时,  $e = 5$ ;  $K > 0.95$  时,  $e = 6$ 。

#### (3) 蚂蚁位置更新

蚂蚁通过围绕着蚁狮随机漫步来更新自己的

位置,如式(13)所示。

$$A_i^t = \frac{R_A^t + R_E^t}{2} \quad (13)$$

式中:  $R_A^t, R_E^t$  分别为迭代次数为  $t$  时,受轮盘赌蚁狮、适应度值最优的蚁狮(精英个体)的影响蚂蚁随机漫步后的位置。

#### (4) 蚁狮捕食蚂蚁

如果蚂蚁更新位置后的适应度比蚁狮好,蚁狮会吃掉蚂蚁从而取代蚂蚁的位置。ALO通过式(14)来模拟此过程。

$$AL_j^t = A_i^t \text{ if } f(A_i^t) > f(AL_j^t) \quad (14)$$

在蚁狮更新自己的位置后,算法会重新寻找精英蚁狮,在下次迭代时影响蚂蚁位置的更新。

### 2.2 改进蚁狮算法

在优化本文提出的带有复杂约束的光照调控数学模型时,标准 ALO 算法存在寻优能力不强、收敛速度较慢等缺点。为了克服这些问题,探究更低能耗的光照控制方式,本文提出了改进蚁狮算法(Improved Ant Lion Optimizer, IALO)。算法改进策略包括:

#### (1) PWLCM 混沌映射种群初始化策略

标准 ALO 算法通过随机分布初始化种群,造成种群分布不均。若初始种群均匀分布于目标函数的解空间,可提升算法的收敛速度及寻优能力。故本文采用具有较强随机性及遍历性的 PWLCM 混沌映射<sup>[36]</sup>来初始化种群,其表达式如下。

$$x_{t+1} = g(x_t, p) = \begin{cases} \frac{x_t}{p}, & 0 \leq x_t < p \\ \frac{x_t - p}{0.5 - p}, & p \leq x_t < 0.5 \\ g(1 - x_t, p), & 0.5 \leq x_t < 1 \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $p$  为控制参数,  $p \in (0, 0.5)$ ;  $x_t$  为 $(0, 1)$ 间的随机数。

#### (2) Levy 飞行策略

Levy 飞行是表现为短距与长距交错移动的随机漫步,引入 Levy 飞行机制,目的是提升算法的全局搜索能力<sup>[37]</sup>。标准 ALO 算法中精英蚁狮会影响所有蚂蚁的位置更新。若精英蚁狮陷入局部最优,算法寻优将会陷入停滞。为提升算法全局寻优能力,对精英蚁狮采取 Levy 飞行策略,位置更新方程如式(16)所示。

$$L(AL_e) = AL_e + \alpha \oplus Levy \quad (16)$$

式中:  $L(AL_e)$  为经过 Levy 飞行后精英蚁狮的位置;  $AL_e$  为精英蚁狮的原位置;  $\oplus$  为点乘;  $\alpha$  为步长控制因子;  $Levy$  为飞行步长,如式(17)所示。

$$Levy \approx \frac{\mu}{\nu^{1/\beta}} \quad (17)$$

式中:  $\beta = 1.5$ ;  $\mu$  及  $\nu$  为  $[0, 1]$  上服从正态分布的随机数。

### (3) 萤火虫扰动策略

萤火虫算法(Firefly Algorithm, FA)中, 萤火虫的亮度与它的适应度正相关, 高亮度萤火虫能吸引种群中的其他萤火虫<sup>[38]</sup>。FA 的核心思想就是将算法中的其他个体吸引到精英个体的周围来搜索更优解。在智能优化算法中采用萤火虫扰动策略, 可提升算法的局部开发能力, ALO 算法中蚁狮  $AL_i$  被精英蚁狮  $AL_e$  吸引向其移动的位置更新方程如式(18)所示。

$$F(AL_i) = AL_i + \gamma \cdot [AL_e - AL_i] + \eta \cdot rand \quad (18)$$

$$\begin{cases} L(AL_e) = AL_e + \alpha \oplus Levy, & \text{if } Fitness_i = Fitness_{i-1} \\ F(AL_i) = AL_i + \gamma \cdot [AL_e - AL_i] + \eta \cdot rand, & \text{if } Fitness_i < Fitness_{i-1} \end{cases} \quad (20)$$

IALO 算法流程图, 如图 6 所示。

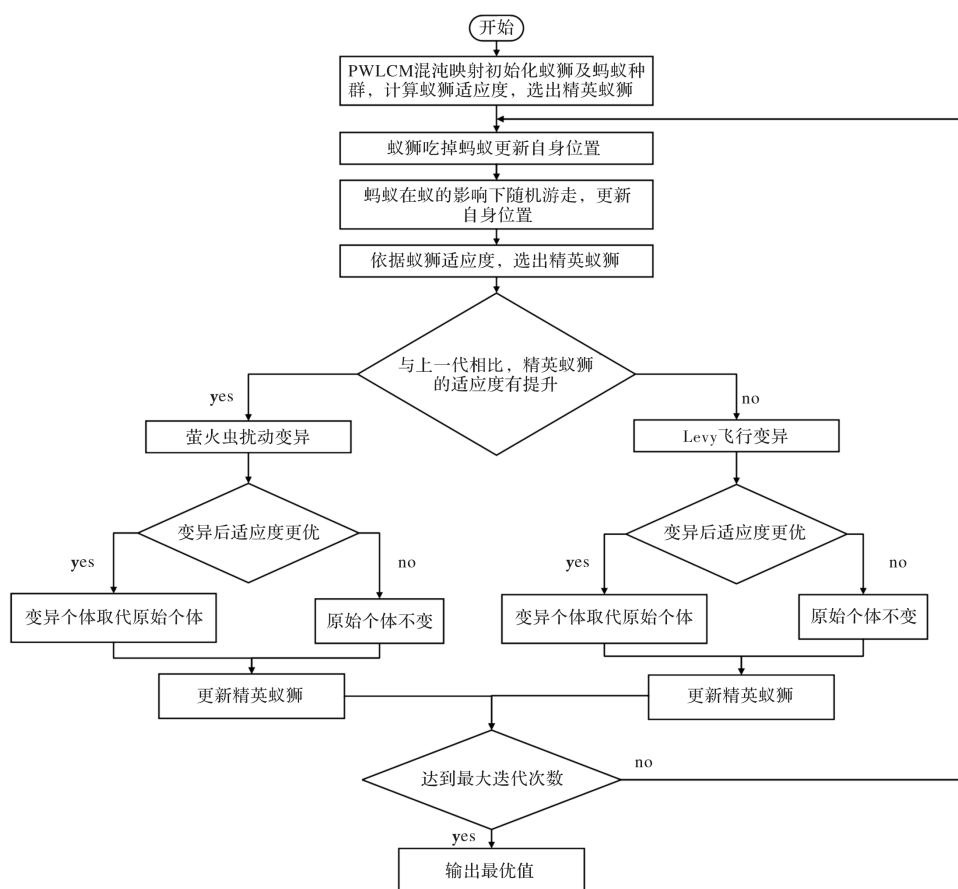


图 6 IALO 流程图

Fig. 6 Flow chart of IALO

由图 6 可知, IALO 的步骤如下:

(1) 设定算法中蚁狮和蚂蚁的种群数量  $Num_{AL}$ 、 $Num_A$ , 最大迭代次数  $T$ , 蚁狮和蚂蚁

式中:  $F(AL_i)$  为经过萤火虫扰动后蚁狮的位置;  $\eta$  为步长控制因子;  $rand$  为  $[-0.5, 0.5]$  上服从均匀分布的随机数,  $\gamma$  为吸引度, 计算方法如式(19)所示。

$$\gamma = \gamma_0 \cdot e^{-\varphi \cdot r_{i,e}^2} \quad (19)$$

式中:  $\gamma_0$  为最大吸引力;  $\varphi$  为光强吸收系数;  $r_{i,e}$  为蚁狮  $AL_i$  与精英蚁狮  $AL_e$  之间的距离。

### (4) 自适应混合变异机制

为了平衡算法的全局搜索与局部开发能力, 将本代精英蚁狮适应度值和上一代精英蚁狮适应度值进行比较, 若本代优于上一代, 则对蚁狮种群进行萤火虫扰动策略, 以改善算法的局部开发能力; 若本代相较于上一代没有提升, 则对精英蚁狮采取 Levy 飞行策略, 以改善算法的全局搜索能力, 自适应混合变异机制的数学表达如式(20)所示。

的种群的搜索范围  $lb$ 、 $ub$ 。利用 PWLCM 混沌映射来初始化算法, 计算蚁狮适应度, 选出适应度最小的蚁狮作为精英蚁狮;



(2)蚂蚁围绕轮盘赌蚁狮及精英蚁狮随机游走,根据式(13)更新蚂蚁位置;

(3)计算蚂蚁种群的适应度,根据式(14)更新蚁狮的位置,选择最小适应度的蚁狮为精英蚁狮;

(4)将此代的最优适应度与上代对比,若没有提升,认为算法陷入局部最优,根据式(16)对精英蚁狮进行 Levy 飞行策略;若有提升,根据式(18)对蚁狮种群采取萤火虫扰动策略;

(5)采用基于贪婪的更新策略,进行 Levy 飞行策略后,将更新后的个体与原来的个体相对比,保留适应度值更优的个体;采取萤火虫扰动策略后同理;

(6)重复步骤(2)~(5),直到达到最大迭代次数  $T$ ,输出此时精英蚁狮的适应度值,即相对最优解。

3 实验结果及数据分析

为验证 IALO 的性能及本文提出的动态调光方法的准确性,设计了算法对比实验和光照控制准确度实验。在实验中,控制实验条件,将车间的

CCT 值固定为 5 000 K,只改变照度值,设计了四组照明场景,每组场景对应车间五个子区域的照度需求,具体信息如表 2 所示。

表 2 光照场景设定表

Tab. 2 Lighting scene setting table

实验	照明场景	子区域照度设定值/lx				
		A	B	C	D	E
1	最大照度	110	550	550	550	550
2	最小照度	100	500	500	500	500
3	随机照度 1	105	525	545	535	515
4	随机照度 2	104	527	532	519	543

3.1 算法对比实验

将 IALO 算法与标准 ALO、融合莱维飞行与黄金正弦的蚁狮算法(LGSALO)<sup>[39]</sup>和基于柯西变异的蚁狮优化算法(CALO)<sup>[40]</sup>进行对比分析。每个算法的最大迭代次数设定为 200,种群数量设定为 30。为避免实验偶然性的影响,将每个算法对各个光照场景重复试验 30 次,记录实验结果,求得 30 次实验中适应度最优值及适应度标准差,见表 3。

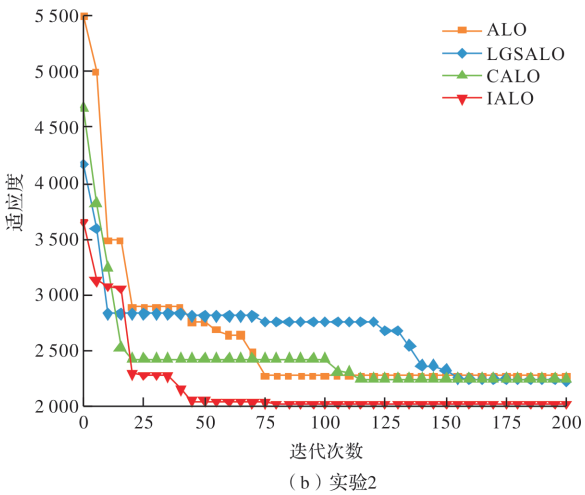
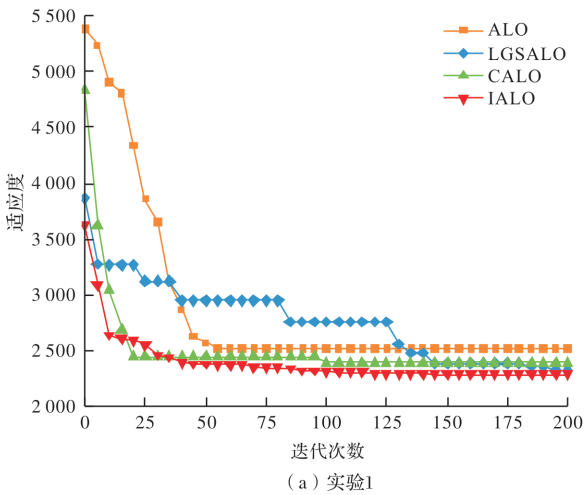
表 3 算法运行结果表

Tab. 3 Result table of algorithm running

实验	ALO		LGSALO		CALO		IALO	
	最优值	标准差	最优值	标准差	最优值	标准差	最优值	标准差
1	2 517.53	93.69	2 320.73	50.65	2 389.03	39.17	2 280.15	10.97
2	2 270.14	103.72	2 219.59	33.22	2 241.69	28.03	2 018.71	14.25
3	2 453.57	87.19	2 282.28	40.38	2 383.61	32.32	2 178.38	11.50
4	2 496.93	81.49	2 256.67	42.95	2 426.68	25.73	2 162.82	15.05

根据表 3 中的实验结果,可知 IALO 算法在四组实验中的适应度最优值和标准差均优于其他三种算法,这说明 IALO 具有更强的寻优能力和稳定性。与改进前的 ALO 算法相比,IALO 在四组实

验中的寻优能力分别提高了 9.42%、11.07%、11.21%和 13.38%。同时,为比较各算法的初始种群质量及收敛速度,选择各算法的最优适应度变化曲线进行展示,见图 7。



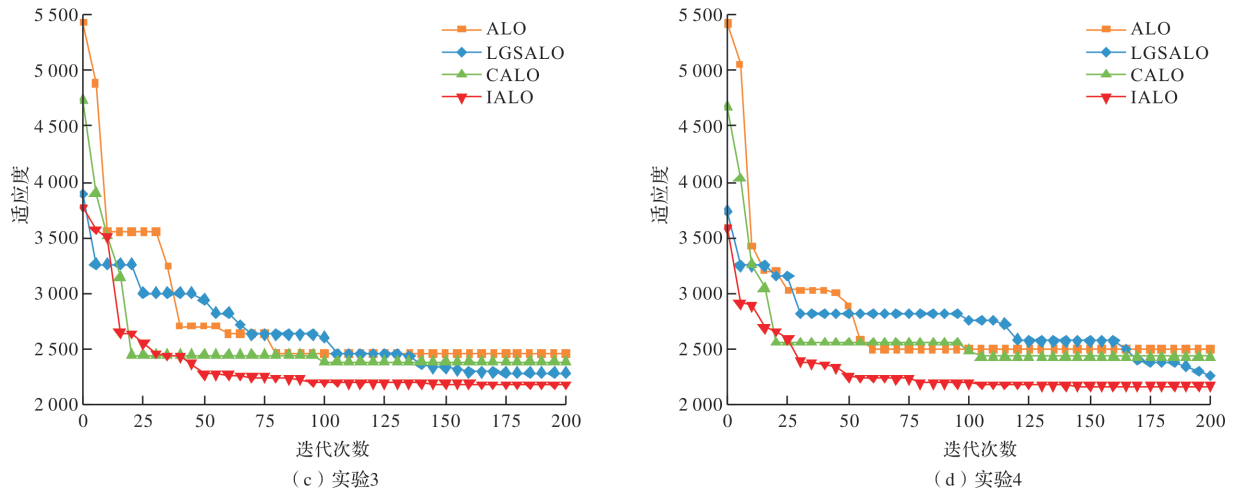


图 7 最优适应度变化曲线

Fig. 7 Optimal fitness change curve

根据图 7 可知 IALO 的初始种群质量最优, 寻优能力最强, 同 ALO 相比, IALO 的收敛速度明显提高, 迭代 50 次左右即可收敛到最优解附近. 虽然 LGSALO 也具有较强的寻优能力, 但其收敛速度相比 IALO 较慢; 虽然 CALO 收敛速度较快, 但其寻优能力相比 IALO 较弱. 算法对比实验证明, PWLCM 混沌映射改善了算法初始种群质量, 从而加快算法的收敛速度; 自适应混合

变异机制能动态地改变算法的变异策略, 从而增强算法的寻优能力. 综合收敛速度、寻优能力及稳定性, IALO 表现最优. 相较于其他算法, 通过 IALO 求解光照调控数学模型, 能够进一步降低照明能耗.

### 3.2 光照控制准确度实验

利用 IALO 求解光照调控数学模型, 分别求出 4 组实验下 9 组灯具的最优调光系数, 见表 4.

表 4 灯具组最优调光系数表

Tab. 4 Table of optimal dimming coefficient of lamp group

实验	灯具组最优调光系数								
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9
1	0.46	0.38	0.35	0.34	0.23	0.90	0.82	0.80	0.95
2	0.42	0.34	0.32	0.31	0.21	0.81	0.75	0.73	0.86
3	0.45	0.37	0.34	0.32	0.22	0.84	0.82	0.79	0.88
4	0.44	0.36	0.34	0.33	0.22	0.84	0.82	0.77	0.91

将表 4 中的最优调光系数输入在 DIALux 中建立的工厂车间光照模型, 进行光照模拟, 对比照度模拟值与照度设定值, 求得照度误差, 见表 5. 以此判断光照动态调控方法的准确性.

由表 5 可知, 照度误差的最大值为 5lux, 最

小值为 0lux, 该结果表明, 通过本文提出的光照动态调控方法求解光照调控数学模型所得的最优调光系数可实现较低误差的精确调光, 本文所提出的方法具有一定的可行性.

表 5 照度设定值与照度模拟值对比表

Tab. 5 Comparison table of illuminance set values and simulated illuminance values

区域	实验 1 照度/lx			实验 2 照度/lx			实验 3 照度/lx			实验 4 照度/lx		
	设定值	模拟值	误差值	设定值	模拟值	误差值	设定值	模拟值	误差值	设定值	模拟值	误差值
A	110	111	1	100	102	2	105	105	0	104	105	1
B	550	552	2	500	503	3	525	529	4	527	529	2
C	550	552	2	500	500	0	545	550	5	532	537	5
D	550	554	4	500	502	2	535	538	3	519	522	3
E	550	553	3	500	501	1	515	517	2	543	548	5



3.3 光照模拟实验

基于照度调控策略,求得工厂车间子区域 A—子区域 E 照度设定值分别为[104, 500, 525, 550, 512],对工厂车间进行光照模拟,求得部分时间节点车间各子区域的 CS 值及单位时间能耗,见表 6。

由于智能优化算法具有随机性,相同参数的计算结果存在一定的误差,无法完全一致。本文研究对象车间实际的照明方式为工作时间开启全

部灯具,午休时关闭全部灯具,车间实际安装的灯具光通量为 2 100 lm,额定功率为 23 W,单位时间能耗为 3 450 J,从表 6 中的数据可知,本文提出的光照动态调控方法相较于车间实际照明方式更节能,可降低企业的运营成本。任意时刻,车间 4 个流水线工作区光照的 CS 值均大于 0.3,且随着疲劳的累积呈上升趋势,可减少工人困倦,增加其活力及警觉性,从而提升工作表现。

表 6 部分时刻车间各子区域 CS 值及单位时间能耗表

Tab. 6 Table of CS values and lighting energy consumption in sub regions at certain times

时间	CCT/K	CCT <sub>ANSI</sub> /K	车间各子区域 CS 值	单位时间能耗/J
8: 00	5 278	5 000	[0.142, 0.425, 0.434, 0.443, 0.429]	2 125.82
9: 00	5 650	5 700	[0.167, 0.459, 0.468, 0.476, 0.463]	2 230.69
10: 00	5 278	5 000	[0.142, 0.425, 0.434, 0.443, 0.429]	1 979.89
(周期变换)	4 407	4 500	[0.123, 0.396, 0.406, 0.415, 0.401]	2 102.05
11: 00	5 650	5 700	[0.167, 0.459, 0.468, 0.476, 0.463]	2 208.64
12: 00	4 407	4 500	[0.123, 0.396, 0.406, 0.415, 0.401]	2 007.88
午休				
14: 00	5 278	5 000	[0.142, 0.425, 0.434, 0.443, 0.429]	2 156.48
16: 00	5 650	5 700	[0.167, 0.459, 0.468, 0.476, 0.463]	2 235.75
18: 00	4 407	4 500	[0.123, 0.396, 0.406, 0.415, 0.401]	1 953.13

4 结论

(1)基于 PWLCM 混沌映射、Levy 飞行、萤火虫扰动及自适应混合变异机制的改进蚁狮算法,相较于蚁狮算法、融合莱维飞行和黄金正弦的蚁狮算法及基于柯西变异的蚁狮优化算法,收敛速度更快,寻优能力更强,稳定性更高;

(2)根据实验结果,本文提出的光照动态调控方法调光准确,在节能的同时利于工作表现;

(3)本文提出的光照动态调控方法对光非视觉效应相关研究理论的应用进行了探索,可为缺乏自然光补偿、人员流动性不强且长时间工作的建筑室内照明场景提供一定参考;

(4)光非视觉效应是目前照明领域尚在探索的问题,涉及复杂的工况,并非一成不变,多数研究结果仅为建议,尚未形成具有普适性的标准。未来,为实现更加节能且健康的建筑室内光环境,提升人类福祉,需要多学科学者的共同努力。

参考文献 References

[1] ONUBOGU N O, CHONG K K, TAN M H. Review of active and passive daylighting technologies for sustainable building[J]. International Journal of Photoenergy, 2021, 2021: 1-29.

[2] 秦新景,王志胜,张曼群,等. 结合日光和占用的动态

办公照明系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(15): 1522003.

QIN Xinjing, WANG Zhisheng, ZHANG Manqun, et al. Combined with daylight and occupancy dynamic lighting system design[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(15): 1522003.

[3] CHEN Z, SIVAPARTHIPAN C B, MUTHU B A. IoT based smart and intelligent smart city energy optimization[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 49: 101724.

[4] SHEN D, NING C, WANG Y, et al. Smart lighting control system based on fusion of monocular depth estimation and multi-object detection [J]. Energy and Buildings, 2022: 112485.

[5] VETTER C, PATTISON P M, HOUSER K, et al. A review of human physiological responses to light: implications for the development of integrative lighting solutions[J]. Leukos, 2022, 18(3): 387-414.

[6] HATTAR S, LIAO H W, TAKAO M, et al. Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity[J]. Science, 2002, 295(5557): 1065-1070.

[7] WAHL S, ENGELHARDT M, SCHAUPP P, et al. The inner clock—Blue light sets the human rhythm [J]. Journal of Biophotonics, 2019, 12(12): e201900102.

[8] KOMPIER M E, SMOLDERS K C H J, VAN MARKEN L W D, et al. Effects of light transitions on

- measures of alertness, arousal and comfort[J]. *Physiology & Behavior*, 2020, 223: 112999.
- [9] SIRAJI M A, SPITSCHAN M, KALAVALLY V, et al. Light exposure behaviors predict mood, memory and sleep quality[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 12425.
- [10] LOK R, WOELDERS T, VAN Koningsveld M J, et al. Bright light decreases peripheral skin temperature in healthy men: a forced desynchrony study under dim and bright light (II) [J]. *Journal of Biological Rhythms*, 2022, 37(4): 417-428.
- [11] TANG L, ZHANG X, ZHOU X, et al. Study of heart rate and blood pressure subject to pulsed LED lighting[J]. *Leukos*, 2022, 18(2): 145-153.
- [12] TAO L, JIANG R, ZHANG K, et al. Light therapy in non-seasonal depression: An update meta-analysis [J]. *Psychiatry Research*, 2020, 291: 113247.
- [13] IFDIL I, FADLI R P, AMALIANITA B, et al. Effectiveness of Ifdil perceptual light therapy in reducing post-traumatic stress disorder of Lombok's earthquake victims[J]. *Konselor*, 2022, 11(4): 161-168.
- [14] 冯瑜满, 梁育填. 中国电子信息制造业时空格局演化及影响因素[J]. *热带地理*, 2022, 42(12): 1980-1992. FENG Yuman, LIANG Yutian. The spatiotemporal evolution and influencing factors of electronic information manufacturing industry in China[J]. *Tropical Geography*, 42 (12): 1980-1992.
- [15] 张璐. 全人工恒定光环境下流水线工人的疲劳周期研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016: 59-60. ZHANG Lu. Study on fatigue of pipeline workers under the condition of total artificial constant light [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016: 59-60.
- [16] BRAINARD G C, Hanifin J P, Greeson J M, et al. Action spectrum for melatonin regulation in humans; evidence for a novel circadian photoreceptor[J]. *Journal of Neuroscience*, 2001, 21(16): 6405-6412.
- [17] THAPAN K, ARENDT J, SKENE D J. An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans[J]. *The Journal of physiology*, 2001, 535(1): 261-267.
- [18] REA M S, FIGUEIRO M G, BULLOUGH J D, et al. A model of phototransduction by the human circadian system [J]. *Brain Research Reviews*, 2005, 50(2): 213-228.
- [19] REA M S, FIGUEIRO M G, BIERMAN A, et al. Modelling the spectral sensitivity of the human circadian system [J]. *Lighting Research & Technology*, 2012, 44(4): 386-396.
- [20] TRUONG W, ZANDI B, TRINH V Q, et al. Circadian metric-Computation of circadian stimulus using illuminance, correlated colour temperature and colour rendering index [J]. *Building and Environment*, 2020, 184: 107146.
- [21] BAKER A. ANSI C78. 377-201x revision: New nominal CCTs smaller quadrangles and circles [J]. [s. n.] [s. l.] 2014:.
- [22] FIGUEIRO M G, KALSHER M, STEVERSON B C, et al. Circadian-effective light and its impact on alertness in office workers[J]. *Lighting Research & Technology*, 2019, 51(2): 171-183.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑光照设计标准: GB 50034—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the Peoples Republic of China. Standard for lighting design of buildings: GB 50034—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [24] 刘加平. 建筑物理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 309-310. LIU Jiaping. Architectural physics[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2009: 309-310.
- [25] LI Y, FANG W, GUO B, et al. Diurnal effects of dynamic lighting on alertness, cognition, and mood of mentally fatigued individuals in a daylight deprived environment [J]. *Lighting Research & Technology*, 2022: 14771535221138589.
- [26] NIE J, ZHOU T, CHEN Z, et al. Investigation on entraining and enhancing human circadian rhythm in closed environments using daylight-like LED mixed lighting[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 732: 139334.
- [27] WANG T, LI J, WANG Y, et al. Active interventions of dynamic lighting on human circadian rhythm and sleep quality in confined spaces[J]. *Building and Environment*, 2022, 226: 109766.
- [28] 聂靖昕, 陈志忠, 党卫民, 等. 动态光环境的构建及其在密闭环境和医院的应用[J]. *照明工程学报*, 2023, 34(4): 23-30. NIE Jingxin, CHEN Zhizhong, DANG Weimin, et al. Building up dynamic light environments and their applications in enclosed space and hospital[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2023, 34(4): 23-30.
- [29] YE M, ZHENG S Q, WANG M L, et al. The effect of dynamic correlated colour temperature changes on alertness and performance[J]. *Lighting Research & Technology*, 2018, 50(7): 1070-1081.
- [30] MUNSAMY A J, MOODLEY M, KHAN Z, et al. Evidence on the effects of digital blue light on the eye: A scoping review[J]. *African Vision and Eye Health*, 2022, 81(1): 1-9.

(下转第 316 页)