

# 激光与光电子学进展

## 基于节律因子的视觉显示终端作业空间光环境 动态调控方法

朱绵虎<sup>1</sup>, 段中兴<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>西安建筑科技大学信息与控制工程学院, 陕西 西安 710055;

<sup>2</sup>西部绿色建筑国家重点实验室, 陕西 西安 710055

**摘要** 为了营造一个健康舒适节能的视觉显示终端(VDT)作业光环境,提出基于节律因子和群智能算法的动态照明调控方法。首先根据VDT作业空间的作业情况和补偿关系建立照明模型;再结合光照需求、人工光源和自然光源之间的补偿关系和节律因子,建立动态光照调控模型;之后提出结合粒子群算法和萤火虫算法优势的混合算法,并引入精英粒子思想对混合算法进行改进;将某时段的照明需求、自然光源补偿量和作业区分布情况作为照明优化模型的输入,并利用改进算法求解人工光源的光通量。将改进算法与其他算法进行对比实验,改进算法的寻优能力和稳定性明显优于其他相关算法;实验证明基于动态调控方法优化的VDT作业空间光环境,视觉效果更好,并具备较大的节能潜力。

**关键词** 光学设计与制造; 视觉显示终端作业; 节律因子; 照明; 动态调控方法; 混合粒子群萤火虫算法

中图分类号 TU113;TN383

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1322001

## Dynamic Regulation of Light Environment in Visual Display Terminal Workspace Based on Rhythm Factor

Zhu Mianhu<sup>1</sup>, Duan Zhongxing<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>College of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology,  
Xi'an 710055, Shaanxi, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an 710055, Shaanxi, China

**Abstract** A dynamic lighting regulation method is proposed based on a rhythm factor and swarm intelligence algorithm to create a healthy, comfortable, and energy-saving visual display terminal(VDT) light operational environment. First, the lighting model is established according to the operational situation and compensation relation of the VDT workspace. The dynamic illuminance regulation model is established by combining the light demand, the compensation relationship between artificial and natural light sources, and rhythm factor. Then, a hybrid algorithm combining the advantages of particle swarm optimization and the firefly algorithm is proposed, and the idea of elite particles is introduced to improve the hybrid algorithm. Furthermore, the illuminance demand for a certain period, compensation amount of the natural light source, and operational area distribution are applied as the input of the illuminance optimization model. Afterward, the improved algorithm is used to solve the light flux of the artificial light source. The improved algorithm is compared with other algorithms. Consequently, its optimization ability and stability are evidently superior to those of other related algorithms. Experiments demonstrate that the optimized VDT operational space light environment based on the dynamic regulation method has a better visual effect and greater energy savings potential.

**Key words** optical design and fabrication; visual display terminal work; rhythm factor; lighting; dynamic control method; hybrid particle swarm firefly algorithm

### 1 引言

视觉显示终端(VDT)作业是指利用计算机系统

的视觉显示终端和个人电脑进行数据、文字、图像等信息处理工作的总称。相比传统作业方式,VDT作业对作业空间光环境的需求更为敏感,不合理的光照环境

收稿日期: 2021-06-17; 修回日期: 2021-07-14; 录用日期: 2021-08-05

基金项目: 国家自然科学基金(51678470)

通信作者: \*zhx\_duan@163.com

会对 VDT 作业者的工作效率和身心健康产生多重负面影响<sup>[1]</sup>。光环境对 VDT 作业者的影响因子按效果可分为视觉因素和非视觉因素两个方面:视觉因素包括照度水平和亮度分布、亮度比、色温、光线颜色、炫光干扰等<sup>[2]</sup>;非视觉因素包括生物节律、睡眠质量、情绪表达、反应能力、工作效率<sup>[3-7]</sup>等。在 VDT 显示设备使用量大幅提高的同时,传统照明方法无法满足 VDT 作业的照明需求<sup>[8]</sup>;并且由于不合理的照明行为,进一步增加了作业人员的疲劳感,造成了大量的能源浪费。

近年来,随着 LED 照明技术的快速发展,色衰低、寿命长、显色性好、可调控的 LED 灯得到了广泛应用,许多学者围绕 LED 照明的智能化调控和个性化光照环境营造开展了大量研究,取得了大量研究成果<sup>[9-10]</sup>。许馨尹等<sup>[11]</sup>结合日光和用户个性化需求对照明能耗进行优化,该方法虽然能降低部分能耗,但对光照分布并未起到较好的优化效果。李震等<sup>[12]</sup>通过机器视觉技术实时检测室内人群密度,并据此对相关设备进行启停控制,具有一定的节能优势,但该方法作用范围小且不够灵活。Sun 等<sup>[13]</sup>采用群智能算法计算灯具调光参数,舒适效果和节能效果较传统方法均有所提高。Vaz 等<sup>[14]</sup>提出了一种分布式照明系统控制框架,该框架通过计算机通信技术对室内多个照明智能体同步调节,高效利用自然光源从而减少电能消耗,同时优化室内光源分布。Yu 等<sup>[15]</sup>通过实验证明了 VDT 作业时环境亮度和屏幕亮度对比舒适度也有较大影响,并确定了不同环境亮度下屏幕亮度的舒适范围。

2002 年,由于非视觉感知细胞的发现确认了人类存在非视觉通道,并证实了不合理的照明光环境可导致低效的工作状态和睡眠质量的下降,甚至会引起昼夜节律紊乱、抑郁情绪以及严重疾病风险增高等健康问题<sup>[16]</sup>。为此,本文提出一套基于节律因子、群智能算法的 VDT 作业空间光环境调控方法,首先基于节律因子制定符合 VDT 作业舒适性和高效性的动态照明方案,该方案实时引导调整空间内照明参数;之后结合工作区分布、人工光源和自然光源之间的耦合关系及约束关系,建立室内光环境数学模型;再结合粒子群算法收敛速度快和萤火虫算法局部搜索能力强的特点,提出混合粒子群萤火虫算法,并引入精英思想对算法进行改进;最后将空间内各工作区的光照需求、使用情况和自然光源补偿情况作为调光模型的输入,利用改进算法对模型求解,得到 VDT 作业空间内人工光源的最优光通量。

## 2 调控模型

### 2.1 基于节律因子的光照动态调控模型

人类生活在 24 h 的明暗周期中,通过体内的生物钟来适应外界的昼夜变化,每天不断重置明暗环境下的生活模式。当外在因素破坏了明暗周期与人体活动的协调同步时,就会出现昼夜节律的中断或失调,导致

睡眠质量和工作效率的降低以及一些负面的心理情绪。

人体内的生物钟位于大脑下丘脑区的视交叉上核(SCN),主要通过控制皮质醇和褪黑素两种激素的分泌来维持人体正常的作业休息模式。其中皮质醇是一种促醒激素,适当提高皮质醇浓度有利于提升工作效率,但持续较高的浓度水平会导致精神疲惫。正常在早晨时段人内皮质醇浓度由于光照的刺激会逐渐上升并达到最高水平,在接下来的白天时段内逐渐下降直到夜间达到最低。褪黑素则是一种促眠激素,可减少入眠时间以及提高睡眠质量,一般褪黑素在日间保持较低的含量以减少睡意,而在夜间时候上升以使人入睡,因此维持生理节律平衡是促进人体健康的重要保证。但生理节律的光刺激并非只有负面的影响,早在 20 世纪以前,研究发现光源具有治疗和减缓睡眠障碍和抑郁情绪等相关疾病的作用,而光疗法的有效性很大程度上来自于光的生理节律刺激<sup>[17]</sup>。

日节律代表的是自然光源的周期变化,与人类在长期适应自然过程中产生的内源性节律协同相关,基于该协同作用营造的光环境,具备良好的健康性能<sup>[18]</sup>。由于节律因子的影响,不同的光照环境还会给用户带来不同的视觉效果,比如低色温较为温馨,适合休息小憩、阅读等低机敏性行为,但过低则会导致困倦感;高色温能提升用户的思考能力和反应能力,适合进行复杂计算、思考等工作,但过高会带来冷峻感且更易疲劳<sup>[19-20]</sup>。

基于节律因子的动态照明调控思想为:在一日之中,照明系统在节律协同作用下与自然光源和用户生物钟的变化保持同步,通过群智能算法进行计算使得人工光源、自然光源与用户需求保持匹配,从而营造一个舒适、节能、高效的 VDT 作业光环境。自然光源在一天之间保持不断变化的趋势,同时 VDT 用户在一天之内存在睡眠、工作、休息等多种行为模式,这些行为均在较长时间内持续进行,不同行为对照明系统的舒适度、机敏性、睡眠质量等非视觉因素有着不同需求,在基于节律协同的动态调控方法中,人工光源的两个主要参数照度和色温根据用户的作业行为和与自然光源的协同作用实时调整。

自然光源的辐射在不同时段差异过大,且会由于过大的辐射量损害人类身体健康,不适合将其光照参数直接作用于动态调控模型,因此将自然光源的变化映射到动态调控模型的舒适范围内,从而实现作业环境光照在舒适范围内进行同步调整,照度和色温的动态调整规则如式(1)、式(2)所示:

$$E^{\text{art}} = E_{\min}^{\text{art}} + \frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \cdot (E_{\max}^{\text{art}} - E_{\min}^{\text{art}}), \quad (1)$$

式中: $E^{\text{art}}$ 为映射后的照度值; $E_{\min}^{\text{art}}$ 和 $E_{\max}^{\text{art}}$ 表示照度舒适范围的最小和最大值; $E$ 为自然光源照度的某个实时值; $E_{\min}$ 和 $E_{\max}$ 为自然光源在某一天之间照度的最

小和最大值。

$$T_c^{art} = T_{c_{min}^{art}} + \frac{T_c - T_{c_{min}}}{T_{c_{max}} - T_{c_{min}}} \cdot (T_{c_{max}^{art}} - T_{c_{min}^{art}}), \quad (2)$$

式中:  $T_c^{art}$  为映射后的色温值;  $T_{c_{min}^{art}}$  和  $T_{c_{max}^{art}}$  表示色温舒适范围的最小和最大值;  $T_c$  为自然光源色温的某个实时值;  $T_{c_{min}}$  和  $T_{c_{max}}$  为自然光源在某一天之间色温的最小和最大值。

以西安地区某实验楼照明系统为例, 该作业空间的上午 8:00~12:00、下午 14:00~18:00 为工作状态, 此时间按照动态调整规则调节该空间照度和色温,

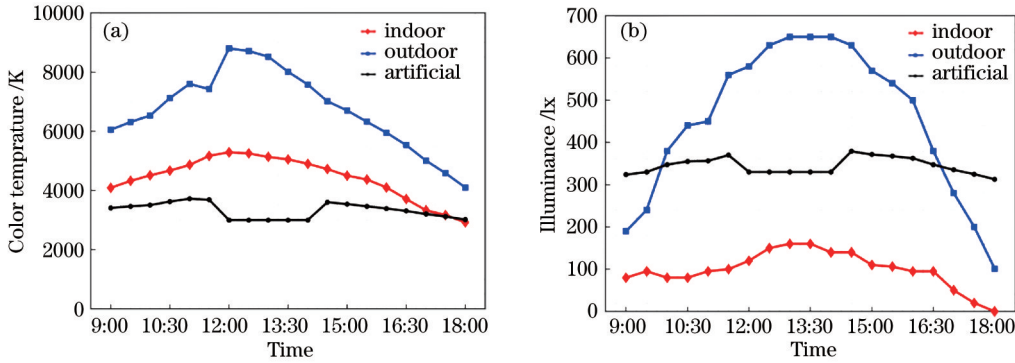


图1 动态照明调控模型参数变化图。(a)色温变化;(b)照度变化

Fig. 1 Parameter variation diagram of dynamic lighting regulation model. (a) Variation of color temperature; (b) variation of illuminance

## 2.2 光照优化模型

离散化后动态照明模型在任意时刻对应一组照明参数, 该参数包括照度、色温、人工光源光通量、室内工作区使用情况、自然光源对工作区照度值的增益量等。将公共作业空间划分为若干个工作区, 各工作区均能获得来自任意人工光源设备和自然光源一定量的照度增益。各工作区存在使用中和未使用两种状态: 使用中的工作区在各时段其最低照度需要高于该时刻设定值以满足光照需求, 色温保持在设定值; 未使用工作区的照度值高于一个最低限度值, 该值是为了防止相邻工作区产生过大照度差。若某 VDT 作业空间被划分为  $N$  个工作区, 且该空间内存在  $M$  个 LED 光源补充光负荷, 则第  $n$  个工作区在  $t$  时刻的照度值计算方式为

$$y_n(t) = \sum_{m=1}^M A_{m,n} \cdot x_m(t) + s_n(t), \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

式中:  $y_n(t)$  表示第  $n$  个工作区在  $t$  时刻的照度值;  $A_{m,n}(t)$  表示第  $m$  个 LED 光源光通量对第  $n$  个工作区照度的增益系数, 该系数经验证为常数;  $x_m(t)$  为第  $m$  个 LED 光源在  $t$  时刻的光通量;  $s_n(t)$  为  $t$  时刻自然光源对第  $n$  个工作区照度的增益量。

人工光源选用基于脉冲宽度调制 (PWM) 法调节的 LED 混光照明光源, 该光源光通量可在 0~20000 lm 内进行无级别调节, 色温可在 2000~6000 K 内进行无级别调节。若不考虑光源设备固有功耗及温度变化引起的光效变化, 该照明系统的 LED 光源能耗可由各 LED 光源光通量之和体现<sup>[21]</sup>, 为方便叙述, 下文中照

明系统能耗大小均以 LED 光源总光通量大小表征。若该空间在  $t$  时刻存在  $N^{run}$  个工作区处于使用状态时, 则有  $N - N^{run}$  个工作区处在未使用状态, 根据动态照明调整规则设定该时刻的照度需求为  $y_{set}$ , 色温设定为  $c_{set}$ , 该照明系统在  $t$  时刻满足以下条件:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_1(t) = \sum_{m=1}^M A_{1,m} \cdot x_m(t) + s_1(t) \geq y_{set} \\ \dots \\ y_{N^{run}}(t) = \sum_{m=1}^M A_{M,m} \cdot x_m(t) + s_M(t) \geq y_{set} \\ y_{N - N^{run}}(t) = \sum_{m=1}^M A_{M,m} \cdot x_m(t) + s_M(t) \geq y_{limit} \\ \dots \\ y_N(t) = \sum_{m=1}^M A_{M,m} \cdot x_m(t) + s_M(t) \geq y_{limit} \\ c_i(t) = c_{set} \end{array} \right., \quad (4)$$

式中:  $c_i(t)$  为  $t$  时刻下的光环境色温;  $y_{limit}$  为未使用工作区的最低限制照度。在满足照明要求的情况下, 需完成以下两个目标:

- 1) 在满足照明要求的情况下, 尽量减少能量的使用;
- 2) 在减少能量使用的同时, 尽可能使得光照分布效果更好, 使得视觉效果更舒适。

将上述目标表征为

$$F_{t,le} = \Phi_{total} + V_{run}, \quad (5)$$



式中:  $\Phi_{\text{total}}$  表示照明系统 LED 光源的总光通量;  $V_{\text{run}}$  表示空间各使用中工作区照度值的方差, 该值越小, 各使用中工作区的照度差异越小, 光照分布效果越好。

由此, 动态调控问题即转化为在约束条件式(4)下寻找  $F_{i,\text{le}}$  极值的问题。

### 3 分析与讨论

粒子群算法(PSO)是一种基于群体智能的全局随机搜索算法, 其收敛速度快、全局搜索能力强, 对于线性和非线性的问题都有较强的全局搜索能力, 解决多约束优化问题时也有较好性能, 但 PSO 存在局部搜索能力较弱的问题。在萤火虫算法(FA)中, 每个萤火虫的位置代表了一个待求问题的可行解, 萤火虫的亮度表示该位置的适应度, 在解空间内, 每个萤火虫通过向亮度比自己高的萤火虫飞行来搜寻更优的位置, 萤火虫算法的核心思想就是在当前最优解的邻域范围内搜索比当前最优解更优的解, 因此在局部范围内有极强的搜索能力。

Aydilek<sup>[22]</sup>提出了一种利用 FA 对 PSO 进行改进的算法, 该算法在保持 PSO 搜索速度快、全局搜索能力强的同时, 提升了 PSO 的局部搜索能力。本文借鉴此方法的思路, 对 PSO 进行改进, 并引入基于目标适

应度的精英粒子思想, 提出混合粒子群萤火虫算法(HPSFA)。

式(5)的优化目标函数由两个线性无关的子函数组成, 为了更好地与 HPSFA 的计算规则匹配, 将目标函数改写为

$$F_{\text{fit}} = F_{\text{obj}} + k_{s,\text{ad}} \cdot i_{\text{dis}}, \quad (6)$$

式中:  $F_{\text{fit}}$  为粒子适应度值;  $F_{\text{obj}}$  为粒子目标值;  $i_{\text{dis}}$  为约束条件, 分别对应照明系统中人工光源的总光通量和光照分布效果;  $k_{s,\text{ad}}$  为一自适应的惩罚系数。

HPSFA 的算法步骤如下:

1) 设置基本参数, 包括惯性因子  $\omega$ 、学习系数  $c_1$ 、 $c_2$ , 位置上下限  $X_{\text{max}}$  和  $X_{\text{min}}$ 、速度上下限  $V_{\text{max}}$  和  $V_{\text{min}}$ 、种群数量  $N_{\text{pop}}$ 、粒子维度  $D_{\text{pop}}$ 、最大迭代次数  $I_{\text{max}}$  等参数。

2) 随机初始化粒子群位置  $\mathbf{x}$ 、速度  $\mathbf{v}$ , 均为  $N_{\text{pop}}$  个  $D_{\text{pop}}$  维度列向量。

3) 计算当前代粒子位置对应的适应度, 更新全局最优值和局部最优值。

4) 筛选精英粒子, 满足约束条件式(4)的成为精英粒子, 精英粒子信息保存完整, 并按照规则在搜索空间自由飞行扩大搜索空间; 非精英粒子的信息被抑制, 在精英粒子的引导下受限飞行, 并向精英粒子靠近, 飞行规则如式(7)所示:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_i^{\text{elite}}(t+1) &= \omega \cdot \mathbf{v}_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot [\mathbf{p}_i^{\text{best}} - \mathbf{x}_i(t)] + c_2 \cdot r_2 \cdot [\mathbf{g}_i^{\text{best}} - \mathbf{x}_i(t)], \\ \mathbf{v}_i^{-\text{elite}}(t+1) &= \omega \cdot \mathbf{v}_i(t) + c_2 \cdot r_2 \cdot [\mathbf{g}_i^{\text{best}} - \mathbf{x}_i(t)], \mathbf{x}_i(t+1) = \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{v}_i(t+1), \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{v}_i(t)$  为第  $i$  个粒子在第  $t$  次迭代中的位置;  $\mathbf{x}_i(t)$  为第  $i$  个粒子在第  $t$  次迭代中的速度; elite 表示精英粒子,  $-\text{elite}$  表示非精英粒子;  $\mathbf{p}_i^{\text{best}}$  表示第  $i$  个粒子的历史最优值;  $\mathbf{g}_i^{\text{best}}$  表示第  $i$  个粒子的全局最优值;  $r_1, r_2$  为  $[0, 1]$  之间的随机数。式中的惯性权重因子采用线性递减方式, 递减方式如下:

$$\omega_{i,\text{ter}} = \omega_s - \frac{(\omega_s - \omega_e) \cdot i_{\text{ter}}}{I_{\text{max}}}, \quad (8)$$

式中:  $\omega_{i,\text{ter}}$  表示第  $i_{\text{ter}}$  轮迭代的惯性系数;  $\omega_s, \omega_e$  表示惯性系数的最大值和最小值。

5) 局部搜索, 若在本轮迭代中某个位置产生了比上一代更好的适应度值, 则在此位置及其邻域范围内有可能存在更好的位置, 因此按照式(9)开始局部搜索更好位置, 若局部搜索未产生更优解, 则转入全局搜索。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i(t+1) &= \mathbf{x}_i(t) + \beta_0 \cdot \exp(-r_{i,j}^2) \cdot [\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{g}_{i-1}^{\text{best}}] + \\ &\alpha \cdot e, \mathbf{v}_i(t+1) = \mathbf{x}_i(t+1) - \mathbf{x}_i(t), \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $\beta_0$  表示初始吸引度;  $r_{i,j}$  表示第  $i$  个粒子与第  $j$  个粒子之间的距离;  $\alpha$  表示步长;  $e$  为一个服从高斯分布的随机数。

6) 判断粒子的位置和速度是否越限, 若位置越限

则将此粒子位置按照式(10)重新映射到本轮迭代的最优位置附近, 若速度越限, 则将速度映射到速度限度值。

$$\mathbf{x}_i(t+1) = \mathbf{x}_i(t) + \alpha \cdot e. \quad (10)$$

7) 迭代次数增加一次, 判断此时是否达到最大迭代次数, 若达到最大迭代次数则迭代结束, 否则返回步骤3)。

8) 输出最佳位置及其对应的适应度值。

该算法解决问题流程图如图2所示。

## 4 实验

### 4.1 实验案例

为了验证 VDT 作业空间光照动态调控模型和改进算法的实际效果, 以西安某高校研究生实验室为例, 该实验室位于某研究生实验楼 3 楼, 长 14 m、宽 7.2 m, 运行时间为早晨 8:00 到夜间 22:00, 由于该实验室所在楼层存在其他建筑物遮挡, 自然光源较为匮乏。该实验室靠窗一侧和远离窗一侧各分布 8 个 0.8 m 高的水平 VDT 工作区, 且该空间的工作区使用数量存在随机性。在该空间存在 18 盏 LED 光源均匀分布补充光源, 空间内 VDT 设备屏幕工作时亮度均处于 150~300 cd/m<sup>2</sup> 之间。

根据自然光源对室内照度的增益量和空间内工作

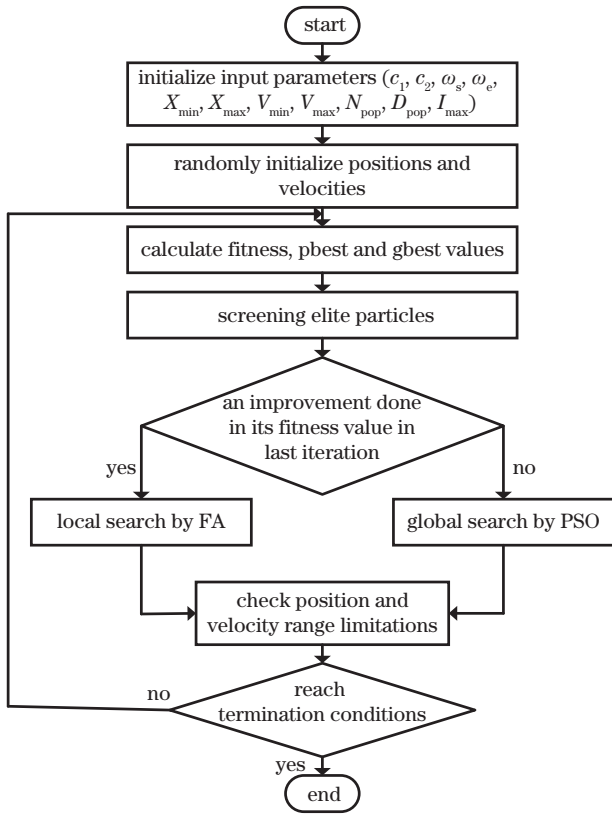


图 2 混合粒子群萤火虫算法流程图

Fig. 2 Flowchart of hybrid particle swarm firefly algorithm

区的使用情况分 3 个案例进行实验: 案例 1 验证算法对于夜间工况的计算能力, 该案例无自然光源, 并针对使用中工作区的数量进行 3 次实验; 案例 2 验证算法对于日间工况的计算能力, 由于建筑结构的原因, 自然光源对室内各个区域的增益效果不同, 靠窗侧接受自然光源增益较多, 远离窗侧接受自然光源增益较少, 因此在案例 2 中结合建筑结构因素, 设定靠窗侧的 8 个工作区自然光源照度增益量为 200 lx, 远离窗侧的 8 个工作区自然光源照度增益量为 100 lx, 并针对使用中工作区的数量进行 3 次实验; 案例 3 验证算法对于工作区全部使用工况的计算能力, 根据自然光源照度增益量进行 3 次实验: 第 1 次无自然光源; 第 2 次实验设定靠窗侧自然光源照度增益量为 200 lx、远离窗侧增益量为 100 lx; 第 3 次实验设定靠窗侧自然光源照度增益量为

300 lx、远离窗侧增益量为 200 lx, 详细案例分组情况如表 1 所示。

表 1 案例分组  
Table 1 Case grouping

Case	Test	Running workspace	Natural source /lx	Color temperature setting /K
Case1	1	4	0	4000
	2	8	0	4000
	3	16	0	4000
Case2	4	4	200, 100	4000
	5	8	200, 100	4000
	6	16	200, 100	4000
	7	16	0	4000
Case3	8	16	200, 100	4000
	9	16	300, 200	4000

在实验中, 根据相关国家标准<sup>[23]</sup>和舒适照明理论的相关成果<sup>[24-26]</sup>, 设定动态调控模型中照度舒适范围的最小值和最大值为 300 lx 和 400 lx, 色温舒适范围的最小值和最大值为 3000 K 和 4000 K。由于色温在动态规则中被固定在各时刻的设定值, 因此各次实验均在同一色温(4000 K)下进行以增加实验准确性; 照度是目标函数寻优计算中的重要变量, 为了提升算法的说服力, 所有实验在该照度调控范围下限(300 lx)和上限(400 lx)处各进行一次, 若算法在两极限处寻优能力保持一致, 则表明算法在整个调控范围内具备相同的寻优能力。

#### 4.2 结果分析

案例 1 实验中, 先将基本粒子群算法和萤火虫算法应用于各次实验以确定群智能算法对夜间工况问题求解的可行性, 为了进一步验证改进算法的有效性, 将 HPSFA 和另一种自适应粒子群算法(APSO)也进行对比, 实验数据包括 LED 光源总光通量、光照分布效果, 详细数据如表 2 所示。

表 2 结果首先验证了群算法解决案例问题的可行性, 所有算法中, 改进后的 HPSFA 寻优能力最强, 数据在具备较好节能效果的同时, 也取得了较好的光照分布效果, APSO 相比未改进的 PSO 和 FA 也略有

表 2 案例 1 实验结果分析

Table 2 Analysis of experimental results in case 1

Illuminance set /lx	Test	PSO		FA		APSO		HPSFA	
		$\Phi_{total}$ /lm	$V_{run}$	$\Phi_{total}$ /lm	$V_{run}$	$\Phi_{total}$ /lm	$V_{run}$	$\Phi_{total}$ /lm	$V_{run}$
300	1	45392	0.30	45192	2.15	44710	0.04	<b>44133</b>	<b>0.00</b>
	2	46946	2.69	46977	20.97	<b>43499</b>	<b>2.22</b>	43900	10.00
	3	50632	19.02	49590	23.04	51037	<b>18.14</b>	<b>49731</b>	26.52
400	1	55822	1.37	56176	7.42	56851	<b>0.00</b>	<b>54609</b>	0.11
	2	62367	<b>0.46</b>	58862	31.50	58604	11.58	<b>53784</b>	12.13
	3	68963	32.95	67685	73.73	68587	<b>23.01</b>	<b>66550</b>	38.74

优势。

案例 2 实验中,先将基本粒子群算法和萤火虫算法应用于各次实验以确定群智能算法对日间工况问题

求解的可行性,为了进一步验证改进算法的有效性,将 HPSFA 和 APSO 也进行对比,实验数据包括 LED 光源总光通量、光照分布效果,详细数据如表 3 所示。

表 3 案例 2 实验结果分析

Table 3 Analysis of experimental results in case2

Illuminance set /lx	Test	PSO		FA		APSO		HPSFA	
		$\Phi_{total}$ /lm	$V_{run}$	$\Phi_{total}$ /lm	$V_{run}$	$\Phi_{total}$ /lm	$V_{run}$	$\Phi_{total}$ /lm	$V_{run}$
300	4	20802	0.90	20441	16.98	<b>20011</b>	<b>0.30</b>	21832	0.58
	5	22282	6.65	21455	7.55	19622	8.49	<b>18257</b>	<b>1.64</b>
	6	25570	8.74	25127	16.47	<b>24891</b>	<b>7.02</b>	25687	8.58
400	4	29938	0.97	30903	17.12	30278	0.01	<b>26938</b>	<b>0.01</b>
	5	39915	20.54	36969	17.54	34329	2.23	<b>30315</b>	<b>2.19</b>
	6	42003	17.44	41740	33.96	42096	15.20	<b>41334</b>	<b>13.24</b>

由于引进自然光源增益,案例 2 的约束条件比案例 1 复杂,算法的搜索空间被压缩,表 3 的结果首先验证了群智能算法解决案例问题的可行性。在对比实验中,HPSFA 的寻优能力更好,4 次取得最佳节能效果,4 次取得最佳光照分布效果,表明 HPSFA 抗干扰能力比 PSO、FA 和 APSO 更好,在复杂搜索空间下具有更好的寻优能力。

案例 3 实验中,先是将基本粒子群算法和萤火虫算法应用于各次实验求解以确定群智能算法对工作区全部使用工况问题求解的可行性,为了进一步验证改进算法的有效性,将 HPSFA 和 APSO 也进行对比,实验数据包括 LED 光源总光通量、光照分布效果,详细数据如表 4 所示。

表 4 案例 3 实验结果分析

Table 4 Analysis of experimental results in case3

Illuminance set /lx	Test	PSO		FA		APSO		HPSFA	
		$\Phi_{total}$ /lm	$V_{run}$	$\Phi_{total}$ /lm	$V_{run}$	$\Phi_{total}$ /lm	$V_{run}$	$\Phi_{total}$ /lm	$V_{run}$
300	7	52637	<b>15.82</b>	52545	19.46	51665	26.46	<b>48780</b>	26.04
	8	25300	<b>6.35</b>	24744	57.12	25709	10.39	<b>24014</b>	10.36
	9	10801	7.05	10879	8.17	10845	8.13	<b>10823</b>	<b>7.05</b>
400	7	69562	30.44	68691	28.77	69063	28.65	<b>66530</b>	<b>22.21</b>
	8	42758	16.37	41572	33.03	41284	<b>11.26</b>	<b>40381</b>	13.98
	9	26938	17.97	25410	17.13	25717	7.63	<b>25166</b>	<b>6.91</b>

案例 3 由于各工作区均处于使用状态,约束条件更多,进一步复杂化了算法的搜索空间。表 4 的结果首先验证了群智能算法解决案例问题的可行性。在对比实验中,HPSFA 6 次取得最佳节能效果,同时 3 次取得最佳光照分布效果,这进一步证明了 HPSFA 的抗干扰能力更好,对复杂问题的优化能力更强。

光源总光通量、光照分布、各工作区实际照度值( $E$ )、各 LED 光源光通量( $\Phi$ )等,详细数据如表 5、表 6 所示。

为了验证方法在实际运用中的有效性,对某场景进行对比实验,该场景下所有工作区处于使用状态且无自然光源增益,为了与前文实验保持一致,所有实验依然在同一色温(4000 K)下进行,在照度调控范围下限(300 lx)和上限(400 lx)处各进行一组实验,以验证算法的综合寻优能力。先是将基本粒子群算法和萤火虫算法应用于各次实验求解以确定群智能算法解决此问题的可行性,为了进一步验证改进算法的有效性,将 HPSFA 和 APSO 也进行对比,为了与传统静态照明方式进行对比,将基于最低照度值的静态照明法(Tradition)也进行对比实验,实验数据包括系统 LED

从表 5 中可以看出,群智能算法的节能效果和光照分布效果均优于传统静态照明方法。在群智能算法中,HPSFA 的节能效果最好,APSO 的节能效果优于未改进的 PSO 和 FA,但是比 HPSFA 的差,FA 的节能效果比 PSO 好。群智能算法下的光照分布优化效果 PSO 最好,HPSFA 也保持了较好的光照分布优化效果,综合节能效果和光照分布效果来看,HPSFA 具备最好的效果。

在表 6 中,群智能算法的照明优化效果也明显优于传统静态照明方法。在群智能算法中,HPSFA 的节能效果最好,FA 的节能效果优于 PSO 及改进后的 APSO,但是比 HPSFA 的差,改进后的 PSO 的节能效果比未改进的 PSO 好。群智能算法下 HPSFA 的光照分布优化效果最好,综合节能效果和光照分布效果两

表 5 照度为 300 lx 时的详细照明参数

Table 5 Detailed lighting parameters at illuminance of 300 lx

Effect	PSO		FA		APSO		HPSFA		Tradition	
$\Phi_{total} / \text{lm}$	52637		52545		51665		48780		56160	
$V_{run}$	15.82		19.46		26.46		26.04		253.00	
Illuminance of each workspace and luminous flux of each lighting equipment	$E / \text{lx}$	$\Phi / \text{lm}$	$E / \text{lx}$	$\Phi / \text{lm}$	$E / \text{lx}$	$\Phi / \text{lm}$	$E / \text{x}$	$\Phi / \text{lm}$	$E / \text{lx}$	$\Phi / \text{lm}$
	302	4550	300	1804	303	4569	300	1601	300	3120
	306	1274	300	5362	301	1366	300	5793	301	3120
	306	4306	312	2125	302	4118	309	1865	324	3120
	311	2449	310	4910	309	0	308	0	325	3120
	300	2433	300	0	302	6687	301	7063	333	3120
	302	2642	300	4306	302	1064	300	763	334	3120
	307	2236	303	4301	314	0	300	0	351	3120
	306	3091	304	0	300	6795	302	5854	352	3120
	313	2211	309	4016	310	0	313	492	343	3120
	311	1898	307	3962	313	2577	313	0	343	3120
	301	4459	300	1364	300	3105	300	7403	331	3120
	300	2115	300	3573	300	2984	300	804	329	3120
	305	2431	306	882	311	4787	304	4386	337	3120
	310	3060	308	5399	307	0	312	0	337	3120
	304	3635	300	1504	300	4041	303	4036	313	3120
	305	4531	300	2514	302	3824	300	0	313	3120
				1151		3906		1964		7826
			4164		2596		3779		744	3120

表 6 照度为 400 lx 时的详细照明参数

Table 6 Detailed lighting parameters at illuminance of 400 lx

Effect	PSO		FA		APSO		HPSFA		Tradition	
$\Phi_{total} / \text{lm}$	69562		68691		69063		66530		75060	
$V_{run}$	30.44		28.77		28.65		22.21		453.00	
Illuminance of each workspace and luminous flux of each lighting equipment	$E / \text{lx}$	$\Phi / \text{lm}$	$E / \text{lx}$	$\Phi / \text{lm}$	$E / \text{lx}$	$\Phi / \text{lm}$	$E / \text{lx}$	$\Phi / \text{lm}$	$E / \text{lx}$	$\Phi / \text{lm}$
	403	3411	401	1844	402	3803	401	5016	400	4170
	403	5797	401	8134	400	5133	400	3317	402	4170
	412	3539	412	2343	412	3830	408	4740	433	4170
	414	3029	412	4048	412	3474	409	1791	434	4170
	402	4847	400	3360	400	4342	400	6721	445	4170
	403	3313	400	3998	400	3587	400	2404	446	4170
	409	2494	407	2552	405	3370	404	1865	469	4170
	408	4955	405	4807	405	3448	404	5660	471	4170
	412	2593	411	2650	411	3273	409	1997	459	4170
	418	5655	412	3641	414	2998	410	1138	459	4170
	401	1075	400	4022	400	5053	400	7605	442	4170
	402	5410	400	3723	400	3310	400	1889	439	4170
	415	3519	411	2418	411	3313	411	769	450	4170
	409	4092	441	5592	412	4176	410	8029	450	4170
	403	3414	401	2785	403	3419	400	1526	419	4170
	402	4249	402	5628	403	4473	401	4025	418	4170
				3918		1882		3668		4214
			4248		5262		4392		3996	4170



方面性能来看, HPSFA 显然更加优秀。

实际性能验证实验算法的迭代曲线如图 3 所示, HPSFA 的寻优能力最强, 迭代曲线连续出现阶梯下降和平滑下降两种递减模式, 结合算法原理可知, 阶梯下降处于全局寻优时, 平滑下降处于局部寻优时, 为保持

较低的计算时间, 这里迭代次数设置为 500 次, 若进一步增加迭代计算时间, HPSFA 的潜力能得到进一步提升。PSO 的收敛速度最快, 但也易陷入局部最优解, 从而放弃对更好位置的搜索, 以至于不能得到更好的结果; APSO 的下降最为平滑, 但寻优能力差于 HPSFA。

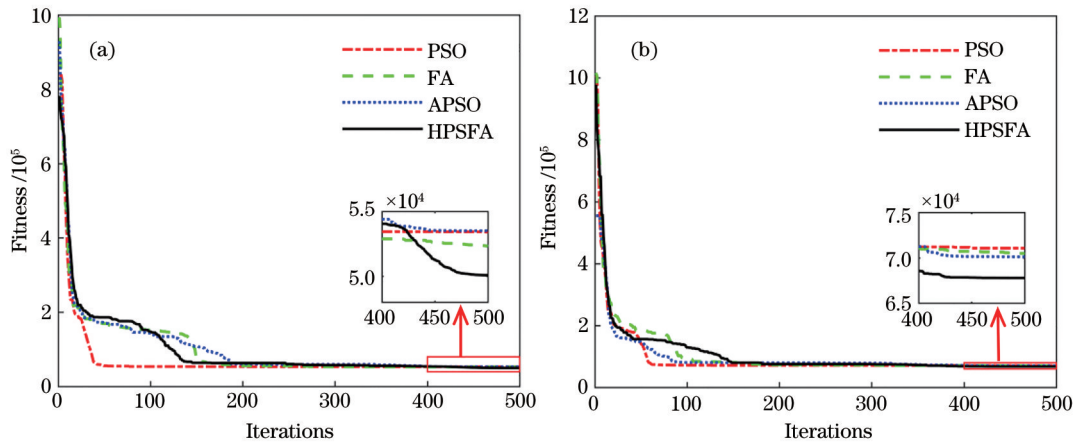


图 3 各算法的收敛结果。(a) 设定照度为 300 lx; (b) 设定照度为 400 lx

Fig. 3 Convergence results of different algorithms. (a) Set illuminance to 300 lx; (b) set illuminance to 400 lx

## 5 结 论

实验证明, 提出的动态照明模型能大幅提高 VDT 用户的舒适性和满意度, 并具有一定的实际应用价值; 提出的 HPSFA 节能效果较传统方法至少提升 13%, 相比其他算法也具有 2% 的提升, 该节能效果在工作区未全部使用和存在自然光源增益时效果更突出, 说明 HPSFA 对于自然光源的利用率更高, 虽然在照明系统中增设硬件设备和计算设备引起成本增加和能耗增加, 但性价比仍远高于传统照明控制方法, 并且目前已出现了大量可部署此算法的智能灯具控制系统; 此算法中各使用工作区的照度差始终保持在 20 lx 以内, 光照分布效果远优于传统静态照明方法。此外, 非视觉参数对视觉效果存在广泛的影响, 今后的研究可以结合其他的非视觉参数, 有望提出更为个性化的动态照明方案。

## 参 考 文 献

- [1] Ranasinghe P, Wathurapatha W S, Perera Y S, et al. Computer vision syndrome among computer office workers in a developing country: an evaluation of prevalence and risk factors[J]. BMC Research Notes, 2016, 9: 150.
- [2] 英)Peter Tregenza, 英)Michael Wilson. 建筑采光和照明设计[M]. 胡素芳, 译. 北京: 电子工业出版社, 2014. Tregenza P, Wilson M. Daylighting: architecture and lighting design[M]. Hu S F, Transl. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2014.
- [3] Lin C J, Feng W Y, Chao C J, et al. Effects of VDT workstation lighting conditions on operator visual workload[J]. Industrial Health, 2008, 46(2): 105-111.
- [4] Abboushi B, Elzeyadi I, van den Wymelenberg K, et al. Assessing the visual comfort, visual interest of sunlight patterns, and view quality under different window conditions in an open-plan office[J]. The Journal of the Illuminating Engineering Society, 2021, 17(4): 321-337.
- [5] Yang W, Jeon J Y. Effects of correlated colour temperature of LED light on visual sensation, perception, and cognitive performance in a classroom lighting environment[J]. Sustainability, 2020, 12(10): 4051.
- [6] 田会娟, 关涛, 蔡敏鹏, 等. 基于瞳孔直径的 VDT 视觉舒适度评价方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(15): 153301. Tian H J, Guan T, Cai M P, et al. Evaluation model of VDT visual comfort based on pupil diameter[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(15): 153301.
- [7] 周湘艳, 李剑飞, 周晓明. 基于视觉与非视觉效应的 LED 温度光谱补偿研究[J]. 光学学报, 2021, 41(19): 1933001. Zhou X Y, Li J F, Zhou X M. Research on LED temperature spectral compensation based on visual and non-visual effects[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(19): 1933001.
- [8] 顾力刚, 韩福荣. VDT 作业视觉环境管理研究[J]. 管理评论, 2004, 16(9): 8-13, 63. Gu L G, Han F R. Study on visual environment management of VDT work[J]. Management Review, 2004, 16(9): 8-13, 63.
- [9] 史晨阳, 林燕丹. 机器视觉中均匀照明成像的 LED 环形阵列设计方法[J]. 光学学报, 2020, 40(20): 2011003. Shi C Y, Lin Y D. LEDs ring array light design method for uniform illumination imaging in machine vision[J].



- Acta Optica Sinica, 2020, 40(20): 2011003.
- [10] 李晋闯, 刘志强, 魏同波, 等. 中国半导体照明发展综述[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0116002.  
Li J M, Liu Z Q, Wei T B, et al. Development summary of semiconductor lighting in China[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0116002.
- [11] 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.  
Xu X Y, Li S X, Fu B C. Research on an energy-saving lighting control method based on daylight and user requirements[J]. Building Science, 2019, 35(10): 150-156.
- [12] 李震, 李骈臻, 邹绍源, 等. 基于机器视觉技术的教室照明节能控制系统[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(4): 1648-1652.  
Li Z, Li P Z, Zou S Y, et al. Classroom lightening energy-saving control system based on machine vision techniques[J]. Computer Engineering and Design, 2012, 33(4): 1648-1652.
- [13] Sun B S, Zhang Q L, Cao S. Development and implementation of a self-optimizable smart lighting system based on learning context in classroom[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(4): 1217.
- [14] Vaz N A, Inanici M. Syncing with the sky: daylight-driven circadian lighting design[J]. Journal of the Illuminating Engineering Society, 2020, 17(3): 1-19.
- [15] Yu H, Akita T. Influence of ambient-tablet PC luminance ratio on legibility and visual fatigue during long-term reading in low lighting environment[J]. Displays, 2020, 62: 101943.
- [16] Berson D M, Dunn F A, Takao M. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock[J]. Science, 2002, 295(5557): 1070-1073.
- [17] van Someren E J W, Kessler A, Mirmiran M, et al. Indirect bright light improves circadian rest-activity rhythm disturbances in demented patients[J]. Biological Psychiatry, 1997, 41(9): 955-963.
- [18] 王世博, 陈滨, 李莉莉, 等. 基于节律协同办公建筑室内光环境健康性能分析[J]. 建筑科学, 2018, 34(2): 118-123.  
Wang S B, Chen B, Li L L, et al. Health performance analysis of indoor light environment in office buildings based on rhythm synchronization[J]. Building Science, 2018, 34(2): 118-123.
- [19] 徐明伟, 金龙哲, 田兴华, 等. 受限空间不同照度环境下 VDT 作业视觉疲劳[J]. 工程科学学报, 2020, 42(12): 1605-1612.  
Xu M W, Jin L Z, Tian X H, et al. Visual fatigue of VDT operation under different illumination conditions in confined space[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(12): 1605-1612.
- [20] Konstantzos I, Sadeghi S A, Kim M, et al. The effect of lighting environment on task performance in buildings—a review[J]. Energy and Buildings, 2020, 226: 110394.
- [21] 田会娟, 胡阳, 陈陶, 等. 基于 PWM 调光的高显色性白光 LED 混光优化方法[J]. 发光学报, 2019, 40(12): 1538-1545.  
Tian H J, Hu Y, Chen T, et al. Optimization dimming method of mixed light for white light emitting diode with high color rendering index based on pulse width modulation[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2019, 40(12): 1538-1545.
- [22] Aydilek İ B. A hybrid firefly and particle swarm optimization algorithm for computationally expensive numerical problems[J]. Applied Soft Computing, 2018, 66: 232-249.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑照明设计标准: 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 People's Republic of China. Standard for lighting design of buildings: GB 50034—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [24] 郭春丽, 黄敏, 习永惠, 等. LED 原色光谱对颜色匹配精度的影响分析[J]. 光学学报, 2020, 40(16): 1633001.  
Yang C P, Fang W Q, Han C W, et al. Influence of LED primary colors on color matching accuracy[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(16): 1633001.
- [25] Chang P C, Chou S Y, Shieh K K. Reading performance and visual fatigue when using electronic paper displays in long-duration reading tasks under various lighting conditions[J]. Displays, 2013, 34(3): 208-214.
- [26] Ru T T, de Kort Y A W, Smolders K C H J, et al. Non-image forming effects of illuminance and correlated color temperature of office light on alertness, mood, and performance across cognitive domains[J]. Building and Environment, 2019, 149: 253-263.