

基于 LED 电流、温度光谱模型的照明系统研究

李剑飞, 周晓明

(华南理工大学物理与光电学院 亚热带建筑国家重点实验室, 广东 广州 510641)

摘要: 电流、温度的改变都会影响 LED 光谱分布, 从而影响光源的视觉和非视觉参数。文中从基于 LED 芯片发光材料中光子能级分布规律的光谱模型出发, 对 RGBY 四色 LED 建立电流、温度模型, 拟合的 R-square 可达到 0.99。在此基础上, 通过遗传算法对昼夜节律因子和辐射发光效率进行多目标优化, 在照度为 300 lx 时, 设计 8 组兼顾视觉参数 (显色指数和蓝光危害效率) 以及非视觉参数 (昼夜节律刺激) 的照明方案, 通过这些方案验证了该模型的可行性。接着, 探究两种非视觉参数和温度的关系, 结果表明昼夜节律因子均随温度的增加而升高, 但昼夜节律刺激却随温度的增加而减小。这种情况的原因是两种参数受照度的影响不同, 对照度补偿后, 发现两种非视觉参数均随温度的升高而增大, 二者呈现一定的正相关性。该研究从光源光谱的角度入手, 为 LED 照明光源设计中非视觉效应的考量提供参考依据。

关键词: 电流、温度光谱模型; 昼夜节律刺激; 遗传算法; 照明方案设计

中图分类号: Q682; TU113; TN383; **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210727

Research on lighting system based on LED current and temperature spectrum model

Li Jianfei, Zhou Xiaoming

(State Key Laboratory of Subtropical Architecture, School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Changes in current and temperature can affect the spectral distribution of the LED, which in turn affects the visual and non-visual parameters of the light source. In this paper, starting from the spectral model based on the distribution of photon energy levels in the LED chip luminescent material, the current and temperature model was established for the RGBY four-color LED. The R-square of the spectral fitting could reach 0.99. On this basis, the genetic algorithm (GA) was used to optimize the circadian rhythm factor and luminous efficiency with multiple objectives. When the illuminance was 300 lx, 8 sets of visual parameters (color rendering index and blue light hazard efficiency) and non-visual parameters (circadian rhythm stimulus) were designed to verify the feasibility of this model. Then, the relationship between two non visual parameters and temperature was explored. The results show that the circadian rhythm factors increased with the increase of temperature, but the circadian rhythm stimulus decreased with the increase of temperature. The reason for this situation was that the two parameters were differently affected by the illuminance. After compensating the illuminance of the light source, it was found that the two non-visual parameters both increased with the increase of temperature, and the

收稿日期: 2022-01-12; 修订日期: 2022-03-05

基金项目: 亚热带建筑科学国家重点实验室开放项目 (2020 ZA05)

作者简介: 李剑飞, 男, 硕士生, 主要从事非视觉光生物效应与健康照明方面的研究。

导师简介: 周晓明, 男, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事电磁场数值计算、人体理论剂量学及非视觉光生物效应方面的研究。

two showed a certain positive correlation. This research started from the perspective of the light source spectrum and provided a reference for the consideration of non-visual effects in the design of LED lighting sources.

Key words: current and temperature spectrum model; circadian rhythm stimulation; genetic algorithm; lighting scheme design

0 引言

2002 年, Berson 等^[1]发现了哺乳动物视网膜的第三类感光细胞(ipRGC),打破了人眼只存在视觉通路的观念,非视觉通道逐渐被大众熟悉。ipRGC 能参与调节人体光生物效应,包括激素分泌、昼夜节律和瞳孔大小等,光不仅影响着人体生理节律,在视觉工作、主观情绪等方面也存在影响。因此,照明质量的评价应由原来单一视觉评价过渡到视觉和非视觉的双重评价。目前对非视觉的评估尚未形成统一标准, Gall 等^[2]通过非视觉光谱响应曲线和明视觉光谱响应曲线,提出用昼夜节律因子 C_{AF} (Circadian Action Factor)表示非视觉效应的大小; Rea 等^[3]提出用昼夜节律刺激值 CS(Circadian Stimulus)和昼夜节律照度 CL_A (Circadian Light)描述非视觉效应的效果,此模型考虑了 S 型视锥细胞光谱灵敏度曲线以及人眼黑视素光谱灵敏度曲线的影响,昼夜节律刺激的阈值和饱和值分别为 0.1 和 0.7,昼夜节律照度是光源在 2856 K 黑体辐射体标准化之下的辐射照度值。

由于 LED 具有亮度大、可调节性强等特点,它的使用越来越广泛^[4]。为了设计满足生活工作需要的照明系统,需要兼顾视觉参数(显色性指数、辐射发光效率、蓝光危害效率)和非视觉参数(昼夜节律因子、昼夜节律刺激值)。郑莉莉等^[5]通过 RGB 照明系统,研究了昼夜节律因子和相关色温受各通道电流的影响,给出了昼夜节律因子、相关色温与电流之间的数学模型,并模拟了自然光在不同时段的光谱,不过该研究只探讨了电流对昼夜节律因子的影响,未涉及视觉参数。Jarboe 等^[6-7]评估了几种 LED 在办公室的使用效果,研究表明,白天时至少维持 2 h 超过 0.3 的 CS 值,有利于提高工作效率和警觉性,该研究着重分析了昼夜节律刺激参数,但缺少昼夜节律因子的分析。

文中以 LED 芯片发光材料中光子能级分布规律的光谱模型为基础,通过改变 LED 所处的电流、温度来模拟光谱,确定 RGBY 各通道光源的绝对光谱和电流、温度之间的关系。通过遗传算法进行视觉和非视觉参数的多目标优化,对辐射发光效率和昼夜节律因

子取 Pareto 最优解集,设置照度为 300 lx,综合考量了昼夜节律刺激、蓝光危害效率、显色指数等指标,设计出 8 组适宜的照明系统,并探究 8 组方案非视觉参数与温度的关系。

1 电流、温度光谱模型

以往光谱拟合主要通过高斯函数或洛伦兹函数来实现,但拟合效果都不理想。高斯模型拟合尾部收敛较快的光谱效果不错,而洛伦兹模型更适合尾部收敛较慢的曲线拟合^[8]。蒋腾等^[9]通过双高斯模型^[10-11]探究电流对 RGB 参数的影响,随着驱动电流增加,红光光谱向长波方向移动,绿光和蓝光光谱产生蓝移,拟合参数在 0.9842 以上。尽管以上研究综合了高斯和洛伦兹模型的优势,但拟合的效果依旧欠佳。徐广强等^[12]采用光子在二维空间内联合态密度函数作为单色 LED 的光谱模型,实现了对目标光谱的匹配。以上研究分析了单一的非视觉参数和视觉参数的关系,未分析两种非视觉参数之间的关系。

光谱产生本质上是光源在不同波长时能量分布不同^[13]。基于 LED 芯片发光材料中光子能级分布规律,采用如下数学模型表征单色 LED 光谱:

$$S(\lambda) = \frac{A}{\left[1 + \exp\left(-\frac{\lambda - \lambda_{c1}}{\omega_1}\right)\right] \left[1 + \exp\left(\frac{\lambda - \lambda_{c2}}{\omega_2}\right)\right]} \quad (1)$$

式中: $S(\lambda)$ 表示光谱辐射强度; λ 表示波长; A 、 λ_{c1} 、 λ_{c2} 、 ω_1 、 ω_2 均为拟合参数。

利用 RGBY 四色光源来探究光源绝对光谱和电流、温度的关系。为防止外界光源对实验的影响,实验在密闭无光环境下进行,系统构建框图如图 1 所示。

光源驱动系统由微控制器、恒温加热台、驱动器、直流稳压电源(12 V)、直流降压模块(3.5 V)、RGBY 灯珠组成。通过驱动模块 DD313 来驱动电路,驱动电流为 350 mA。电流控制主要通过改变 PWM 通道占空比来实现,在每个通道串联一个 0.1 Ω 的电阻,通过蓝牙调节当前灯珠占空比进而改变电流,用万用表测量电阻的电压,这样就获得 LED 各通道电流值。建立光谱的电流模型时,将电流设置为 100 mA、200 mA 和 300 mA 获取数据。恒温加热台 V-0505 能

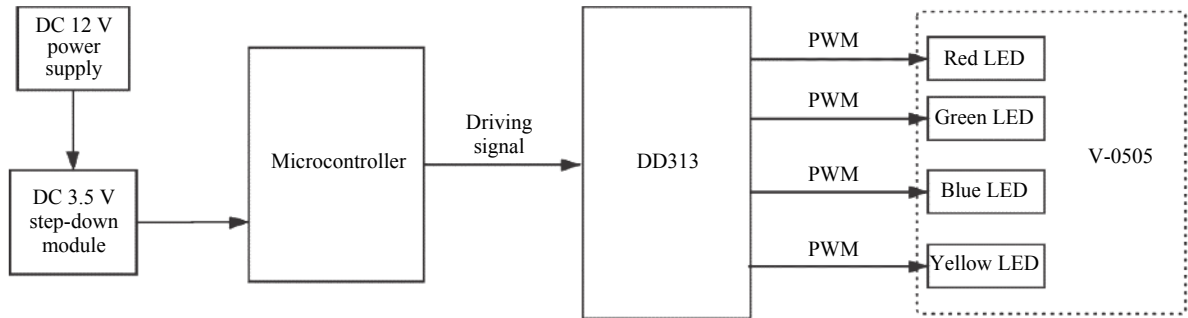


图 1 RGBY 四色 LED 系统框图

Fig.1 Block diagram of RGBY four-color LED system

灵活调节 LED 温度, 范围设置在 $30^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 内, 以 15° 为间隔递增。使用 SPIC-200 光谱照度计测得不同电流、温度下的光谱。RGBY 器件示意图以及数据测试实物图分别如图 2、图 3 所示。

利用 1 stoqt 软件对 RGBY 绝对光谱分别拟合, 以红灯在 30° 、 300 mA 下为例, 此时在 635 nm 处光功率率最大, $P_{max}(635)$ 为 $0.0552\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{nm}^{-1})^{-1}$, 光谱见图 4。

根据以上数据, 文中建立了光谱与电流、温度的二阶方程。拟合参数 A 、 λ_{c1} 、 λ_{c2} 、 ω_1 、 ω_2 与电流 I 和温度 T 之间的关系见公式 (2)~(6):

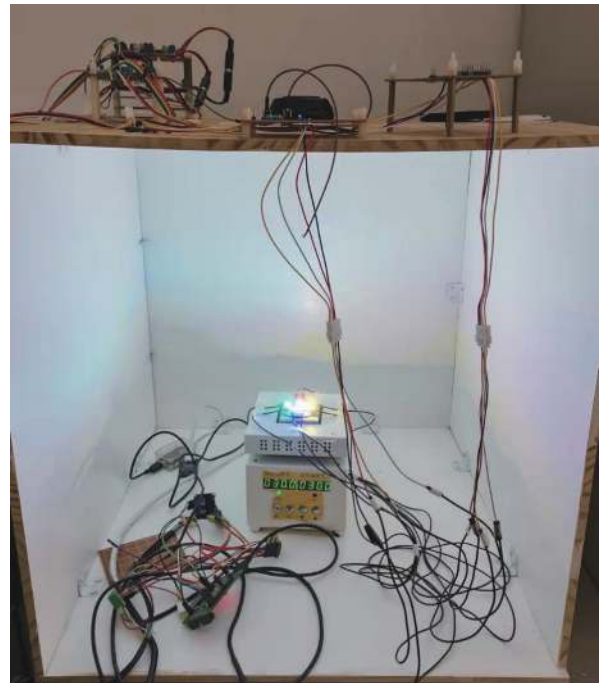


图 3 数据测试设备的照片

Fig.3 Photos of data testing equipment

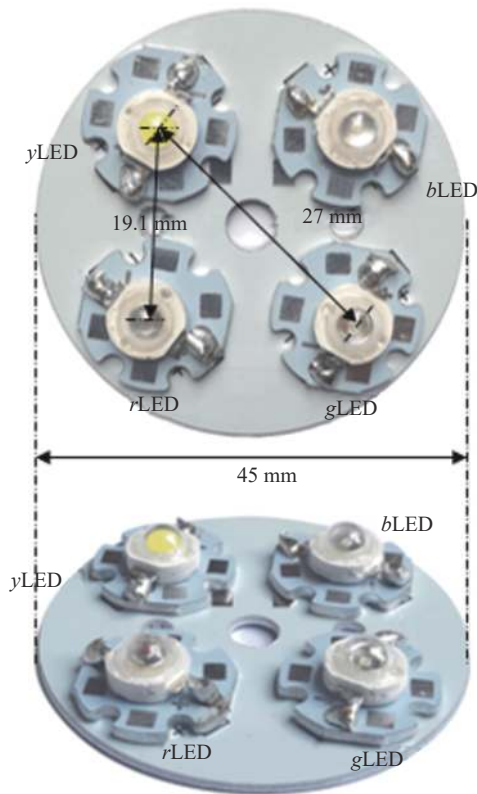


图 2 RGBY 器件示意图

Fig.2 Schematic diagram of RGBY device

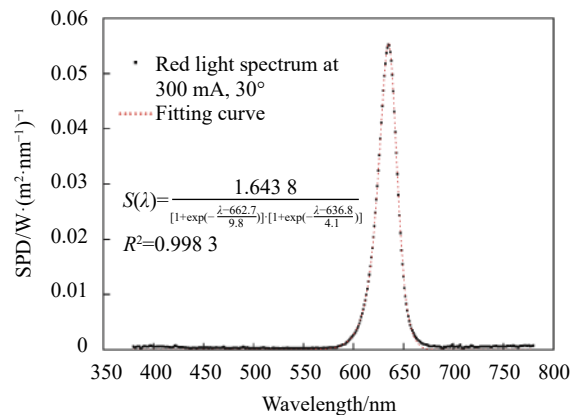


图 4 红光在 300 mA 、 30° 下的拟合效果

Fig.4 Fitting effect of red light at 300 mA and 30°

$$\begin{bmatrix} A_r \\ A_g \\ A_b \\ A_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6 \times 10^{-6} & 3 \times 10^{-5} & -10^{-5} \\ -3 \times 10^{-4} & -8 \times 10^{-4} & -5 \times 10^{-4} \\ -0.004 4 & 0.028 0 & -0.017 2 \\ -2 \times 10^{-9} & -7 \times 10^{-8} & -2 \times 10^{-7} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I^2 \\ T^2 \\ I \cdot T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.003 4 & -0.007 2 \\ 0.322 7 & -0.046 7 \\ 4.992 2 & -5.185 5 \\ 8 \times 10^{-5} & 10^{-5} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I \\ T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.429 6 \\ 7.799 0 \\ 135.503 8 \\ -0.000 5 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{c1r} \\ \lambda_{c1g} \\ \lambda_{c1b} \\ \lambda_{c1y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4 \times 10^{-5} & 7 \times 10^{-4} & 10^{-4} \\ 2 \times 10^{-5} & -4 \times 10^{-4} & 2 \times 10^{-4} \\ -6 \times 10^{-5} & 10^{-4} & 6 \times 10^{-5} \\ 9 \times 10^{-6} & 4 \times 10^{-4} & -3 \times 10^{-6} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I^2 \\ T^2 \\ I \cdot T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.034 2 & 0.128 0 \\ 0.008 8 & 0.313 3 \\ 0.030 3 & 0.031 4 \\ 0.001 1 & 0.011 6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I \\ T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 650.472 4 \\ 575.435 5 \\ 448.010 2 \\ 514.952 6 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{c2r} \\ \lambda_{c2g} \\ \lambda_{c2b} \\ \lambda_{c2y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4 \times 10^{-5} & 3 \times 10^{-5} & -7 \times 10^{-5} \\ 5 \times 10^{-6} & 9 \times 10^{-5} & 10^{-5} \\ 7 \times 10^{-6} & 2 \times 10^{-5} & 5 \times 10^{-6} \\ 10^{-5} & 8 \times 10^{-6} & -2 \times 10^{-5} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I^2 \\ T^2 \\ I \cdot T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.030 9 & 0.156 6 \\ 0.007 5 & 0.054 8 \\ 0.016 4 & 0.072 5 \\ 0.001 2 & 0.056 9 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I \\ T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 626.685 6 \\ 505.452 7 \\ 329.316 8 \\ 606.136 3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \omega_{1r} \\ \omega_{1g} \\ \omega_{1b} \\ \omega_{1y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10^{-5} & 5 \times 10^{-5} & -5 \times 10^{-6} \\ 7 \times 10^{-6} & 2 \times 10^{-5} & 5 \times 10^{-6} \\ 2 \times 10^{-7} & -8 \times 10^{-6} & 4 \times 10^{-6} \\ 7 \times 10^{-6} & 4 \times 10^{-5} & 2 \times 10^{-5} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I^2 \\ T^2 \\ I \cdot T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.007 0 & 0.026 6 \\ 0.001 1 & 0.031 1 \\ 0.000 9 & 0.009 6 \\ 0.000 2 & 0.025 7 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I \\ T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 7.816 6 \\ 9.160 6 \\ 4.291 6 \\ 8.398 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \omega_{2r} \\ \omega_{2g} \\ \omega_{2b} \\ \omega_{2y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4 \times 10^{-6} & -10^{-5} & -10^{-5} \\ 3 \times 10^{-6} & -2 \times 10^{-6} & -2 \times 10^{-6} \\ 10^{-6} & -2 \times 10^{-5} & -10^{-6} \\ 10^{-5} & 5 \times 10^{-5} & 10^{-5} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I^2 \\ T^2 \\ I \cdot T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.002 6 & 0.010 3 \\ 0.000 4 & 0.014 1 \\ 0.001 1 & 0.011 8 \\ 0.000 4 & 0.041 8 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I \\ T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3.463 6 \\ 6.068 5 \\ 10.114 7 \\ 37.009 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

以上拟合参数 R-square 均大于 0.95, 拟合效果较好。根据公式 (6) 可知, 当给出单色 LED 所处的电流、温度值时, 可以计算出公式 (1) 中的拟合参数, 以红光为例, 其电流和温度的综合影响模型如公式

(7) 所示, 同理可以得出绿光、蓝光和黄光的光谱功率分布。这样就可以计算出当前光源系统的光谱功率分布, 进而得出光源的视觉和非视觉参数。

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{1r} = 1 + \exp \left(\frac{\lambda - [-4 \times 10^{-5} \quad 7 \times 10^{-4} \quad 10^{-4}] \cdot \begin{bmatrix} I^2 \\ T^2 \\ I \cdot T \end{bmatrix} - [0.034 2 \quad 0.1280] \cdot \begin{bmatrix} I \\ T \end{bmatrix} - 650.472 4}{[-10^{-5} \quad 5 \times 10^{-5} \quad -5 \times 10^{-6}] \cdot \begin{bmatrix} I^2 \\ T^2 \\ I \cdot T \end{bmatrix} + [0.007 0 \quad 0.026 6] \cdot \begin{bmatrix} I \\ T \end{bmatrix} + 7.816 6} \right) \\ A_r = [6 \times 10^{-6} \quad 3 \times 10^{-5} \quad -10^{-5}] \cdot \begin{bmatrix} I^2 \\ T^2 \\ I \cdot T \end{bmatrix} + [0.003 4 - 0.007 2] \cdot \begin{bmatrix} I \\ T \end{bmatrix} + 0.429 6 \\ f_{2r} = 1 + \exp \left(\frac{\lambda - [-4 \times 10^{-5} \quad 3 \times 10^{-5} \quad -7 \times 10^{-5}] \cdot \begin{bmatrix} I^2 \\ T^2 \\ I \cdot T \end{bmatrix} - [0.030 9 \quad 0.156 6] \cdot \begin{bmatrix} I \\ T \end{bmatrix} - 626.685 6}{[-4 \times 10^{-6} \quad -10^{-5} \quad -10^{-5}] \cdot \begin{bmatrix} I^2 \\ T^2 \\ I \cdot T \end{bmatrix} + [0.002 6 \quad 0.010 3] \cdot \begin{bmatrix} I \\ T \end{bmatrix} + 3.463 6} \right) \\ S_r(\lambda) = \frac{A_r}{f_{1r} \cdot f_{2r}} \end{array} \right. \quad (7)$$

2 照明系统设计及模型验证

2.1 照明系统设计

视觉参数包括^[14-15]辐射发光效率 LER、蓝光危害效率 η_B 、显色指数 R_a 、相关色温 CCT 和照度 E , 非视觉参数包括昼夜节律因子 C_{AF} 、昼夜节律刺激 CS。昼夜节律因子 C_{AF} 的计算见公式 (8):

$$C_{AF} = \frac{\int_{380}^{780} P(\lambda, I, T) \cdot C(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} P(\lambda, I, T) \cdot V(\lambda) d\lambda} \quad (8)$$

式中: $P(\lambda, I, T)$ 为光源在电流 I 、温度 T 下光谱功率的叠加; $C(\lambda)$ 为非视觉光谱响应曲线; $V(\lambda)$ 为明视觉光谱响应曲线。昼夜节律刺激 CS 值可由公式 (9) 来计算:

$$CL_A = \begin{cases} 1548 \left[\int M_{C_\lambda} E_\lambda d\lambda + \left(a_{b-y} \left(\int \frac{S_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda - k \int \frac{V_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda \right) - a_{rod} \left(1 - e^{-\frac{\int V'_\lambda E_\lambda d\lambda}{RodSat}} \right) \right) \right] I \\ \text{if } \int \frac{S_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda - k \int \frac{V_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda \geq 0 \\ 1548 \int M_{C_\lambda} E_\lambda d\lambda \text{ if } \int \frac{S_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda - k \int \frac{V_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda < 0 \end{cases}$$

$$CS = 0.7 - \frac{0.7}{1 + \left(\frac{CL_A}{355.7} \right)^{1.1026}} \quad (9)$$

式中： CL_A 为生理节律光照，1548是归一化常数； E_λ 为光谱辐照度分布； S_λ 为S型视锥细胞光谱灵敏度曲线； mp_λ 是黄斑色素透射率曲线； V_λ 和 V'_λ 分别代表明视觉以及暗视觉的光谱响应曲线； $RodSat$ 、 k 、 a_{b-y} 和 a_{rod} 为常数，分别为 6.5 W/m^2 、0.2616、0.7 和 3.3。

辐射发光效率 LER 和照度 E 的计算如下：

$$LER = \frac{K_m \int_{380}^{780} P(\lambda, I, T) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} P(\lambda, I, T) d\lambda} \quad (10)$$

$$E = K_m \int_{380}^{780} P(\lambda, I, T) V(\lambda) d\lambda \quad (11)$$

式中： K_m 表示光源最大光通量，为 683 lm/W 。

为了设计既有较高 C_{AF} 又有较高 LER 的照明系统，需对两参数折衷处理。根据国际照明委员会 CIE 对办公室环境的参数要求，照度设为 300 lx ，显色指数 R_a 大于 90。考虑到现实环境因素会阻碍 CS 传递到人眼，将 CS 值设置为 0.3~0.4 之间，蓝光危害效率 η_B 控制在 0.3 以下，在 2500~8000 K 色温下寻求满足上述条件的照明方案。采用遗传算法对 C_{AF} 和 LER 进行多目标优化，为了消除量纲的影响，把 C_{AF} 和 LER 归一化处理，通过 Matlab 仿真得出 C_{AF} 在限制下最大值和最小值分别为 1.1647 和 0.1963；LER 最大值和最小值分别为 368 lm/W 和 265 lm/W 。优化的方程如下，以四路占空比大小作为未知量 D_r, D_g, D_b, D_y ：

$$\begin{cases} f(1) = \text{Max} \left(\frac{C_{AF}(D_r, D_g, D_b, D_y) - 0.1963}{1.1647 - 0.1963} \right) \\ f(2) = \text{Max} \left(\frac{LER(D_r, D_g, D_b, D_y) - 265}{368 - 265} \right) \\ \text{s.t. } \eta_B(D_r, D_g, D_b, D_y) \leq 0.3; \\ R_a(D_r, D_g, D_b, D_y) \geq 90; \\ 0.3 \leq CS(D_r, D_g, D_b, D_y) \leq 0.4; \\ E(D_r, D_g, D_b, D_y) = 300 \end{cases} \quad (12)$$

求 C_{AF} 和 LER 的 Pareto 解集时，最优前端个体系数 ParetoFraction 取 0.08，种群大小 PopulationSize 取 100，最大遗传代数 Generations 设置为 500 代，停止代数 StallGenLimit 为 500 代，适应度函数偏差 TolFun 设为 $1e^{-100}$ ，得到的 8 个照明系统方案如表 1 所示。

由表 1 可知，照度为 300 lx 时，照明方案的色温分布在 2855~7628 K，节律刺激值 CS 随色温的变化曲线如图 5 所示，CS 在 2800~3500 K、4000~8000 K 时随色温增加而变大，在 3500~4000 K 呈现急剧下降的趋势，这是因为 CL_A 和色温有公式 (9) 的关系，而 CS 和 CL_A 呈正相关。要想维持 CS 值在 0.3~0.4 之间，色温的可选空间较大。

表 1 8 组最优解方案的参数计算值

Tab.1 Calculated values of the parameters of the eight groups of optimal solutions

No.	CCT/K	C_{AF}	CS	LER/ $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$	R_a	η_B
1	2855	0.2223	0.3008	360	90	0.0483
2	3131	0.2514	0.3107	355	90	0.1005
3	3532	0.3063	0.3306	347	90	0.1432
4	4000	0.3896	0.3016	340	91	0.1648
5	4986	0.5783	0.3344	326	91	0.2097
6	5932	0.7603	0.3661	304	91	0.2305
7	6661	0.8641	0.3897	283	92	0.2482
8	7628	1.0192	0.3986	278	92	0.2837

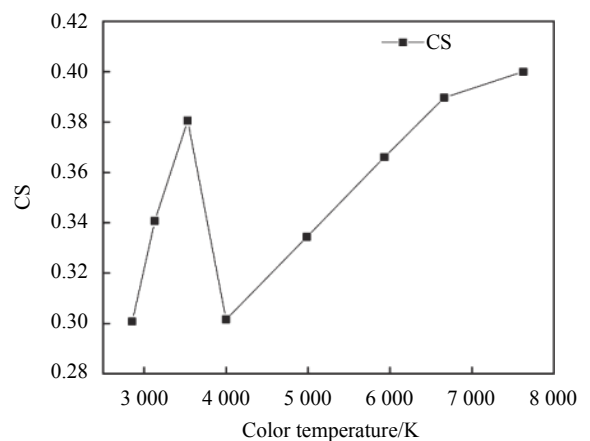


图 5 不同色温下各方案的 CS 值

Fig.5 CS value of each scheme under different color temperature

2.2 电流、温度光谱模型验证

为验证该光谱模型的准确性，测试这 8 种方案下各路电流值 (见表 2)，再改变灯珠温度，将各方案实测

值和模型值进行比较。8 种方案是按照色温的大小来排列的,即按照昼夜节律因子 C_{AF} 的大小排列,方案 8 的色温最高,即方案 8 对人体的非视觉效应影响最大。由于是在 2500~8000 K 色温内的寻优,所以这 8 种方案可以代表限制条件下的最佳方案。

表 2 各方案下的实测四路电流值

Tab.2 Measured four current values under each scheme

No.	I_r /mA	I_g /mA	I_b /mA	I_y /mA
1	227	28	7	324
2	183	48	12	317
3	140	83	26	309
4	119	136	54	301
5	71	169	113	231
6	63	170	178	233
7	64	174	204	218
8	73	106	238	212

由于目前常用的照明光源为 D50 和 D65,而方案 5 和方案 7 的色温分别最接近 D50 和 D65,以方案 5 和方案 7 为例,分析实测光谱和模型光谱的拟合情况,如图 6 所示。

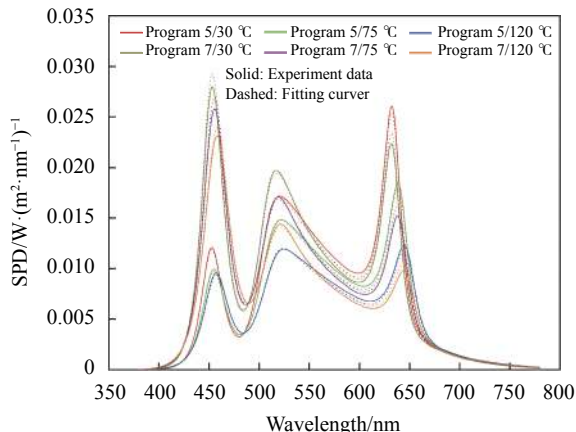


图 6 实测光谱和模型光谱的比较

Fig.6 Comparison of measured spectrum and model spectrum

从拟合效果看,两个方案均能准确反映实际光谱。为了更精确地体现模型和实测光谱的差距,表 3 计算了 8 种方案各参数指标的误差,并标明了最大误差时的温度。由于 SPIC-200 可以直接测出相关色温 CCT、显色指数 R_a 、照度 E ,但辐射发光效率 LER、昼夜节律因子 C_{AF} 等参数无法直接测出,对于无法直接测得的参数,通过 SPIC-200 测量出实际的光谱,再根据公式 (10) 计算得出。

表 3 各方案参数的实测值和模型值对比

Tab.3 Comparison of measured values and model values of the parameters of each scheme

No.	CCT/K	C_{AF}	CS	LER/lm·W ⁻¹	R_a	η_B
1	3.84% (45 °C)	2.98% (75 °C)	3.07% (120 °C)	5.03% (105 °C)	4.81% (105 °C)	2.91% (120 °C)
2	4.94% (90 °C)	3.61% (90 °C)	2.16% (105 °C)	4.78% (60 °C)	3.26% (120 °C)	4.18% (65 °C)
3	4.56% (105 °C)	3.98% (45 °C)	3.89% (105 °C)	5.21% (120 °C)	3.96% (60 °C)	5.06% (105 °C)
4	2.57% (75 °C)	3.85% (60 °C)	5.08% (90 °C)	6.89% (120 °C)	4.68% (75 °C)	5.68% (120 °C)
5	5.66% (120 °C)	5.76% (90 °C)	4.93% (105 °C)	5.82% (60 °C)	4.98% (105 °C)	4.82% (90 °C)
6	3.89% (105 °C)	2.68% (75 °C)	5.31% (60 °C)	4.78% (60 °C)	5.96% (75 °C)	5.41% (90 °C)
7	6.94% (120 °C)	5.33% (30 °C)	2.85% (75 °C)	6.74% (90 °C)	6.12% (105 °C)	3.56% (45 °C)
8	6.57% (30 °C)	7.06% (120 °C)	5.97% (105 °C)	5.87% (60 °C)	5.96% (30 °C)	6.78% (90 °C)

表 3 中,模型和实测参数的绝对误差最大为 7.06%,说明该模型能较好拟合实际光谱。初始照度为 300 lx,但随着 LED 温度的升高, E 逐渐衰减。图 7 给出了照度 E 和温度 T 的拟合曲线,两者呈线性负相关, R^2 为 0.9869。不同方案参数的最大误差值有差别,影响参数误差的因素为 LED 的结温差、热耦合效应等。驱动 LED 芯片时,连续波电流会使 LED 因热效应进而结温上升,影响实验结果,在实验中采用脉冲电流驱动 LED 发光,并且仅在测量光谱的一瞬间

闭合开关,最大限度减小 LED 的结温差对实验数据的影响。由于四路 LED 芯片之间最小的距离为 19 mm 左右,热耦合效应很微弱,对实验影响极小。

整个实验的温度调节是通过恒温加热平台 V-0505 实现的,尽管将温度从 30°~120°进行了等分,但温度随时间的变化并非均匀的,因此需要考虑梯度温度的影响。该实验的温度仅受时间影响,所以在一维状态下,梯度温度可看成是温度的变化率。经过测量可知,温度从 30°升到 120°需要 18 min,以 1 min 为间隔,

通过红外线测温仪来测量实验平台的实时温度,绘制出温度随时间的变化曲线见图 8。

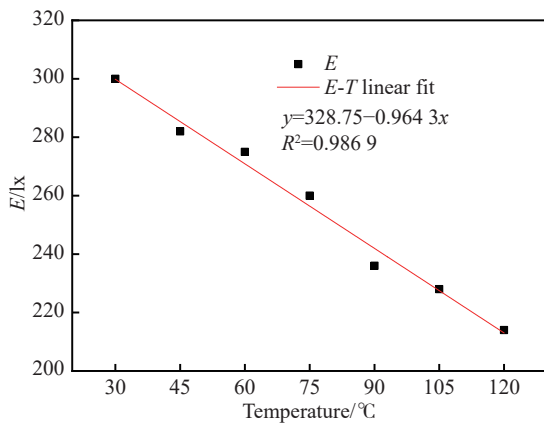


图 7 照度 E 与温度 T 的直线拟合曲线

Fig.7 Straight-line fitting curve of illuminance E and temperature T

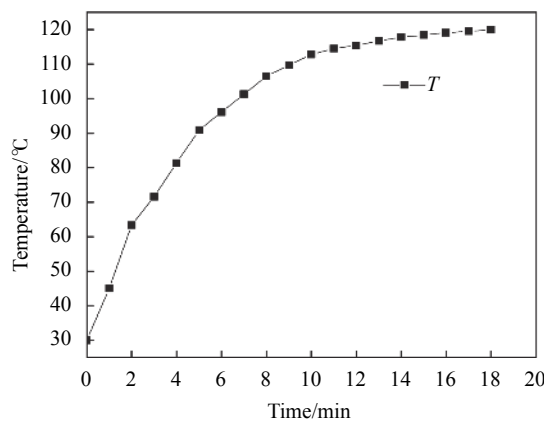


图 8 温度随时间的变化曲线

Fig.8 Temperature curve with time

由图 8 可以看出,加热过程中,温度的变化率逐渐衰减,12 min 之后,温度几乎平稳。说明在刚开始时,光源的非视觉参数变化速率较快,随着温度的逐渐平稳,非视觉参数也增加到最大,趋于平稳。

以方案 1、5、8 为例,两种非视觉参数随温度的变化见图 9,可以看出:温度升高, C_{AF} 值逐渐增加,CS 值逐渐减小。当从 30 °C 上升到 120 °C 时,方案 1 的 C_{AF} 从 0.2223 增至 0.2459,CS 从 0.3008 减至 0.2597;方案 5 的 C_{AF} 由 0.5783 上升到 0.6701,CS 从 0.3344 减少到 0.2998;方案 8 的 C_{AF} 值由 1.0192 上升到 1.0902,CS 从 0.3986 减少到 0.3657。

随着温度变化,蓝光占比逐渐增加,非视觉效应增强,但 C_{AF} 和 CS 的计算受照度影响不同,说明二者

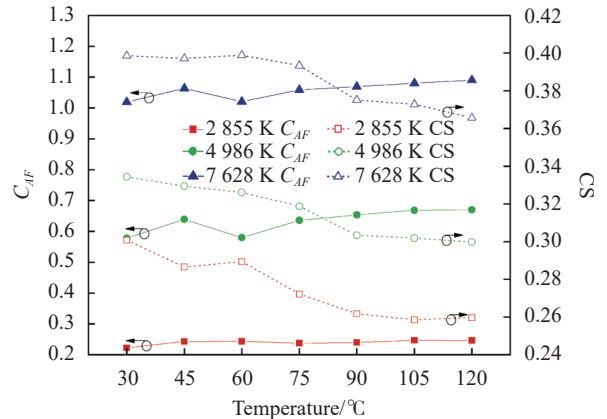


图 9 方案 1、5、8 非视觉参数的随温度的变化曲线

Fig.9 Variation curve of non-visual parameter with temperature for scheme 1, 5, 8

在描述非视觉效应时存在一些差异。为消除照度的影响,对光谱进行照度补偿,使照度恒定在 300 lx,通过电流、温度模型计算当前光谱分布,补偿公式如下:

$$\begin{cases} f = \text{Min} \left[k_1 \cdot \sum_{380}^{780} (P_{I,T}(\lambda) - P_{I_0,T_0}(\lambda))^2 + k_2 \cdot (C_{AF,I,T} - C_{AF,I_0,T_0})^2 + \right. \\ \left. k_3 \cdot (CS_{I,T} - CS_{I_0,T_0})^2 + k_4 \cdot (x_{I,T} - x_{I_0,T_0})^2 + k_5 \cdot (y_{I,T} - y_{I_0,T_0})^2 \right] \\ \text{s.t. } D_i \in [0, 1] \quad i = r, g, b, y \\ E(D_r, D_g, D_b, D_y) = 300 \text{ lx} \end{cases} \quad (13)$$

式中: D_r, D_g, D_b, D_y 为温度 T 下补偿占空比; $P_{I,T}(\lambda), P_{I_0,T_0}(\lambda)$ 指电流 I 、温度 T 和初始电流 I_0 ; 温度 T_0 下光源的光谱; $C_{AF,I,T}, C_{AF,I_0,T_0}$ 为电流 I 、温度 T 和初始电流 I_0 , 温度 T_0 下昼夜节律因子; $CS_{I,T}, CS_{I_0,T_0}$ 为电流 I 、温度 T 和初始电流 I_0 , 温度 T_0 下昼夜节律刺激; $(x_{I,T}, y_{I,T}), (x_{I_0,T_0}, y_{I_0,T_0})$ 为电流 I 、温度 T 和初始电流 I_0 , 温度 T_0 下的色坐标; k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 为各项的权重。昼夜节律因子 C_{AF} 和昼夜节律刺激 CS 作为两种衡量光的非视觉效应的变量,理应随温度的变化呈现相同的趋势。但在补偿前发现二者随温度的变化趋势截然相反,是因温度升高后有物理量的变化,导致二者趋势不同。经分析发现照度受温度的影响很大,于是决定用 PWM 调光补偿照度,其采用高频率的周期数字脉冲驱动光源,通过改变周期脉冲内有效电平脉宽的宽度来调整输出的有效电流,从而调节光源参数。PWM 调光补偿的响应速度更快,光源控制精度更高,可控性更强,是照明调光领域中的优选方式。补偿后照度始终维持在 300 lx,其余的光源参数尽可能地接近补偿前,从

而得到合理的补偿方案。补偿后的非视觉参数随温度的变化趋势如图 10 所示。

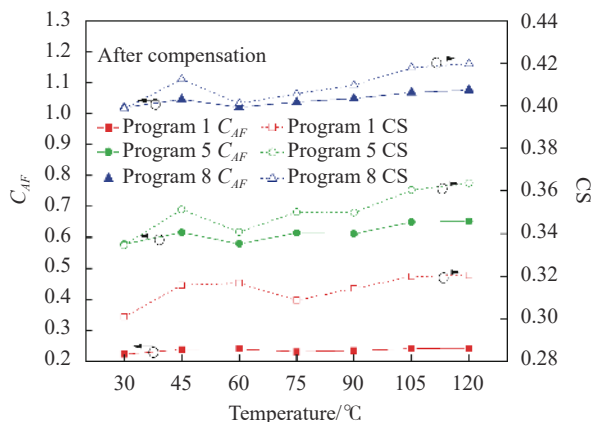


图 10 补偿后方案 1、5、8 非视觉参数的随温度的变化曲线

Fig.10 Temperature-dependent variation curve of non-visual parameters of schemes 1, 5, and 8 after compensation

补偿后,随着温度升高, C_{AF} 的增大趋势略微减缓,CS 由下降变为上升。方案 1 的 C_{AF} 从 0.2223 逐渐增加到 0.2405,CS 的值从 0.3008 增到 0.3204;方案 5 的 C_{AF} 从 0.5783 增加到 0.6522,CS 的值从 0.3344 增加到 0.3637;方案 8 的 C_{AF} 从 0.5783 逐渐增加到 0.6522,CS 的值从 0.3344 增加到 0.3637。 C_{AF} 和 CS 均随温度升高而增大,且二者表现出一定的正相关性。

3 结 论

文中基于 LED 芯片发光材料中光子能级分布的规律,提出了光谱的电流、温度模型。通过该模型可以根据 LED 当前的电流、温度参数,模拟光源的实际光谱。在综合考虑非视觉参数和视觉参数的条件下,设计出 8 种符合照明要求的照明方案,并针对各个方案验证了电流、温度模型的可靠性。同时比较各方案下,昼夜节律因子和昼夜节律刺激随温度的变化趋势,发现昼夜节律因子随温度的升高而增大,但昼夜节律刺激随温度增加而减小,照度随温度的增大而线性衰减。补偿照度后,两种非视觉参数的值均随温度的升高而增大,且二者表现出一定的正相关性,这表明随着温度的升高,人体的非视觉效应的确在逐渐增强。该研究为 LED 照明光源设计中非视觉效应的考量提供了一定参考依据。

参考文献:

[1] Berson D M, Dunn F A, Takao M. Phototransduction by retinal

ganglion cells that set the circadian clock [J]. *Science*, 2002, 295: 1070-1073.

[2] Gall D, Bieske K. Definition and measurement of circadian radiometric quantities[C]/Vienna: Commission internationale de l'éclairage, 2004: 129-132.

[3] Rea M S, Figueiro M G. Light as a circadian stimulus for architectural lighting [J]. *Lighting Research & Technology*, 2018, 50(4): 497-510.

[4] Lv M, Zhang L, Zhang Y, et al. Strategies for improving the stability of quantum dots light-emitting diodes [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(1): 117-134. (in Chinese)

[5] Zheng L L, Guo Z Q, Yan W, et al. Investigation on the circadian action factor of RGB white LEDs [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37(11): 1384-1389. (in Chinese)

[6] Jarboe C, Snyder J, Figueiro M G. The effectiveness of light-emitting diode lighting for providing circadian stimulus in office spaces while minimizing energy use [J]. *Lighting Research & Technology*, 2020, 52(2): 167-188.

[7] Figueiro M G, Steverson B, Heerwagen J, et al. The impact of daytime light exposures on sleep and mood in office workers [J]. *Sleep Health*, 2017, 3(3): 204-215.

[8] Chen F, Yuan Y L, Zheng X B, et al. Design of spectral tunable LED light source [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(11): 2060-2064. (in Chinese)

[9] Jiang T, Zhuo N Z, Xie L Y, et al. Research and simulation of RGB LED spectrums based on currents and double Gaussian model [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2020, 31(1): 22-26. (in Chinese)

[10] Ma L, Lu W, Jiang P, et al. Research on Gm-APD 3 D range image preprocessing method based on double Gaussian variance optimization [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S2): 20200388. (in Chinese)

[11] Wang B H, Song S L, Cao X, et al. Processing and application of multispectral lidar waveform data [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S2): 20200368. (in Chinese)

[12] Xu G Q, Yu H M, Zhang J H, et al. Solar spectrum matching based on white LED compensated with monochromatic LEDs [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, 38(8): 1117-1124. (in Chinese)

[13] Badgutdinov M L, Yunovich A É. Emission spectra of InGaN/AlGaIn/GaN quantum well heterostructures: Model of the two-dimensional joint density of states [J]. *Semiconductors*, 2008, 42(4): 429-438.

[14] Wang Y S, Zhou X J, Li Q Y, et al. Blue-blocking optical thin films with controllable cutoff slope [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 544-551. (in Chinese)

[15] Chen G, Liu Y, Yang H C, et al. Adaptive brightness correction of dim-lightening color images [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(8): 1999-2007. (in Chinese)