

基于视觉与非视觉效应的 LED 温度光谱补偿研究

周湘艳, 李剑飞, 周晓明*

华南理工大学物理与光电学院亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510641

摘要 温度是影响光源稳定性的重要因素, 温度变化会引起光源参数的改变, 进而影响光源视觉与非视觉效应。基于三种光谱模型确定单通道光源的光谱参数与热沉温度的关系, 建立多 LED 混光光源的温度光谱模型, 并对 RGBY 四色 LED 混光光源(本文采用 D50 光源和 D65 光源)进行温度实验, 结果表明, 温度光谱模型中不同热沉温度下光源光谱与实测光谱基本一致, 两者光源参数最大相对误差不超过 6.15%, 验证了该模型的可靠性。针对温度引起的光源参数(照度、色温、生理节律因子)变化问题, 基于温度光谱模型采用差分进化算法实时确定脉宽调制控制系统中各通道的补偿权重, 根据热沉温度对权重的反馈实现光源参数补偿。本研究可应用到多 LED 混光光源的动态设计及光源温度稳定性控制当中。

关键词 视觉; 温度光谱模型; 视觉与非视觉效应; 多 LED 混光; 光谱补偿; 差分进化算法

中图分类号 Q682

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1933001

Research on LED Temperature Spectral Compensation Based on Visual and Non-Visual Effects

Zhou Xiangyan, Li Jianfei, Zhou Xiaoming*

State Key Laboratory of Subtropical Building Science, School of Physics, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China

Abstract Temperature is an important factor affecting the stability of the light source. Temperature changes will lead to changes in the parameters of the light source, which in turn influences the visual and non-visual effects of the light source. The relationship between the spectral parameters of the single-channel light source and the heatsink temperature is determined based on three models, and the temperature spectral model of the multi-LED light source is built. In addition, temperature experiments on the four-color (RGBY) LED light source (using D50 and D65 light sources) are conducted. The results show that the light source spectrums at different heatsink temperatures in the temperature spectral model are basically in line with measured spectrums. The maximum relative errors of the parameters of these two do not exceed 6.15%, which verifies the reliability of the model. For the changes in light source parameters (illuminance, correlated color temperature, and circadian action factor) caused by temperature, we use the temperature spectral model and differential evolution algorithm to determine the compensation weight of each channel in the pulse width modulation control system in real time. At the same time, the light source parameter compensation is realized based on the heatsink temperature feedback to the weight. This research can be applied to the dynamic design and the temperature stability control of multi-LED light sources.

Key words vision; temperature spectral model; visual and non-visual effects; multi-LED light; spectral compensation; differential evolution algorithm

OCIS codes 330.7326; 230.3670; 300.6170; 170.2945

收稿日期: 2021-02-22; 修回日期: 2021-03-18; 录用日期: 2021-04-16

基金项目: 亚热带建筑科学国家重点实验室开放项目(2020ZA05)

通信作者: *zhouxm@scut.edu.cn

1 引言

20 世纪 80 年代,有研究表明,夜间光照抑制人体内的褪黑素分泌,改变人体的生理节律^[1-2],人们开始意识到光照对人体的非视觉刺激。Berson 等^[3]在老鼠的视网膜上发现了第三种感光细胞,即本征感光视网膜神经节细胞(ipRGCs),奠定了非视觉效应的生理基础。为了更好地描述光源的非视觉效应,Berman 结合褪黑素抑制光谱曲线和光视效率曲线提出非视觉效应影响因子(C_{AF}), C_{AF} 与褪黑素抑制成正相关,因此很多研究采用 C_{AF} 值衡量非视觉效应的强弱^[4]。

随着发光二极管(LED)相关技术的迅速发展,LED 光源已被广泛应用于日常生活、工业生产以及科学研究等领域。相对于传统光源,LED 具有绿色环保、寿命长、效率高等优势。尤其是其可调的光谱特性和便捷的调光方式为满足人们对光源高光色品质和多样化的需求提供了更多可能^[5]。

目前兼顾视觉与非视觉的照明光源光谱设计研究已愈加深入^[6-7]。然而,自身发热及外界温度改变引起的光源内部温度变化会使其光谱功率分布(SPD)改变,LED 光源的视觉参数(照度、色温、显色指数等)和非视觉参数(C_{AF} 、蓝光因子等)也随之变化。以往的大多数研究^[8-11]集中在探索发光光谱特性(光谱峰值波长、辐射通量、半峰全宽、光功率值等)、LED 内阻及工作寿命与 LED 结温之间的变化关系,对于光源非视觉参数与温度间的关系,研究甚少。沈雪华等^[12]测试了温度、电流对白光 LED 光谱分布的影响,建立了光谱蓝白光预测模型,通过光谱蓝白比这一指数首次使温度与 C_{AF} 产生联系。随后,该团队^[13]进一步研究了温度、电流与冷白光和暖白光光源 C_{AF} 之间的关系,实现了除光源光谱外获取光源 C_{AF} 值的另一种方法,但该方法并没有研究温度对于光源 C_{AF} 值的影响及如何消除此影响。Llenas 等^[14]设计了一个闭环负反馈系统来消除温度对光源光谱的影响,由于闭环系统中需要用到微型光谱仪,价格昂贵,因此该方案难以实现广泛应用。

本研究中,首先确定单通道光源光谱参数与热沉温度的函数关系,建立多 LED 混光光源的温度光谱模型;并通过 D50 与 D65 两种光源对该模型进行可行性验证与分析。其次,基于光谱温度模型采用差分进化算法(DE)对光谱进行优化,确定稳定光源参数需要的脉冲宽度调制(PWM)控制系统中各通道的权重,从而实现温度与权重的反馈。在实际应

用中,只需在光源内部安装一个温度探测器,即可根据实时温度迅速调整光源的各通道权重,进而消除温度对 LED 光源参数的影响。此方案的适用对象是基于 PWM 调光的多 LED 混光光源,该研究对多 LED 混光光源的动态设计及智能健康照明理念的实现具有实际意义。

2 温度光谱模型的建立与验证

温度光谱模型,即引入温度这一自变量形成的光谱模型,给定温度即可确定光源的光谱功率分布。对于单色 LED 光源,很多文章都研究过它的光谱模型,其中以高斯模型为主。然而仅采用高斯模型拟合单色 LED 光源光谱拟合效果不佳。本文分别通过高斯模型、高斯-洛伦兹模型及 S 型-高斯模型拟合不同的 LED 光源光谱^[15]。

高斯模型、高斯-洛伦兹模型及 S 型-高斯模型分别表示为

$$P(\lambda) = \frac{A_G}{\Delta\lambda \sqrt{\frac{\pi}{4\ln 2}}} \exp\left[-\frac{4\ln 2(\lambda - \lambda_p)^2}{\Delta\lambda^2}\right], \quad (1)$$

$$P(\lambda) = \begin{cases} \frac{A_G}{\Delta\lambda \sqrt{\frac{\pi}{4\ln 2}}} \exp\left[-\frac{4\ln 2(\lambda - \lambda_p)^2}{\Delta\lambda^2}\right], & \lambda \leq \lambda_p \\ \frac{2A_L}{\pi} \frac{\Delta\lambda}{4(\lambda - \lambda_p)^2 + \Delta\lambda^2}, & \lambda > \lambda_p \end{cases}, \quad (2)$$

$$P(\lambda) = \begin{cases} \frac{a}{1 + \exp[-k(\lambda - \lambda_1)]}, \\ \frac{A_G}{2\Delta\lambda_2 \sqrt{\frac{\pi}{4\ln 2}}} \exp\left[-\frac{4\ln 2(\lambda - \lambda_p)^2}{(\Delta\lambda_2)^2}\right], \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $P(\lambda)$ 为波长 λ 处的光谱能量值; λ_p 为光谱曲线的峰值波长; $\Delta\lambda$ 为光谱曲线峰值的一半处对应的波长宽度,又称半宽度。光谱能量峰值一半处所对应的波长为 λ_1 和 λ_2 , $\Delta\lambda_1$ 、 $\Delta\lambda_2$ 分别为左半宽度和右半宽度,即 $\Delta\lambda_1 = \lambda_p - \lambda_1$, $\Delta\lambda_2 = \lambda_2 - \lambda_p$ 。(1)式中的 A_G 是曲线的积分面积,即光谱的积分能量,亦即光谱功率。(2)式的高斯-洛伦兹模型的光谱功率 A 为

$$\begin{cases} A = \frac{A_G + A_L}{2} \\ \frac{A_G}{\Delta\lambda \sqrt{\frac{\pi}{4\ln 2}}} = \frac{2A_L}{\pi \cdot \Delta\lambda} \end{cases}. \quad (4)$$

(3)式的 S 型-高斯模型中, $k = \frac{4.595}{\Delta\lambda_1}$, 其光谱功率 A 为

$$\begin{cases} A = A_s + \frac{A_G}{2} = a \ln\{1 + \exp[k(\lambda_p - \lambda_1)]\} + \frac{A_G}{2} \\ 0.99a = \frac{A_G}{2\Delta\lambda_2 \sqrt{\frac{\pi}{4\ln 2}}} \end{cases} \quad (5)$$

根据光谱拟合效果, 不同的 LED 光源采用以上三种不同的模型拟合。多 LED 混光光源的光谱可表示为

$$P(\lambda, T) = \sum_i d_i \cdot P_i(\lambda, T), \quad (6)$$

式中: $P_i(\lambda, T)$ 指光源 i 的温度光谱分布; d_i 代表光源 i 在混合光源中所占的权重。

考虑到三基色混光光源显色性的不足, 本文在三基色 RGB 的基础上加入黄光 LED 组成四色 LED 混光光源。首先搭建 RGBY 四色 LED 的光源驱动系统和恒温控制系统, 主要由微控制器模块、光源驱动模块、RGBY LED 光源、恒温加热台 V-0505 和 SPIC-200 光谱色彩照度计组成, RGBY LED 光源驱动系统框图和实验测试平台示意图分别如图 1 和图 2 所示。

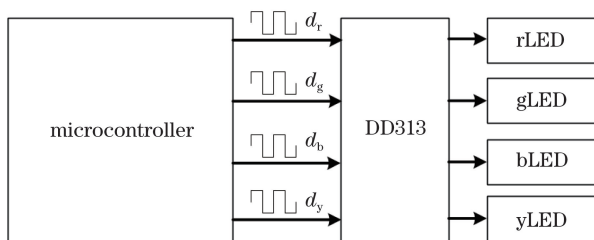


图 1 RGBY LED 驱动系统框图

Fig. 1 Drive system block diagram of RGBY LED

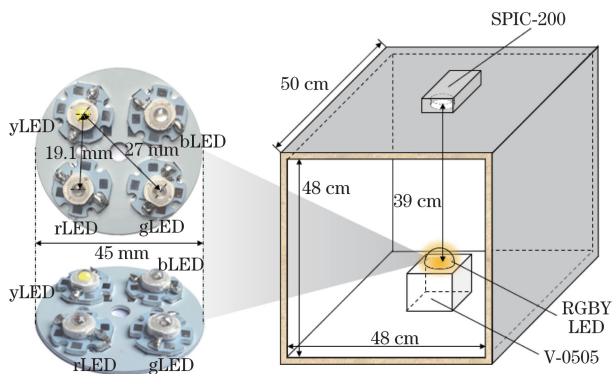


图 2 实验测试平台示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental test platform

微控制器输出相互独立的四通道 PWM 控制信

号到 DD313 驱动模块, 由驱动模块根据四路占空比信号输出电流分别驱动四种光源 RGBY, 实现 LED 混合光源输出。驱动模块输出电流设置为 350 mA, 精度为 ± 20 mA。PWM 调光补偿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冲的宽度 (也称占空比) 来调整输出的有效电流, 从而调节光源参数。相对于模拟调光、可控硅调光等, PWM 调光具备更快的响应速度, 更高的控制精度及更强的可控性。

恒温加热台 V-0505 的作用是控制 LED 热沉温度稳定在实验所需温度, 温度范围为 $30 \sim 120$ $^{\circ}\text{C}$, 步进为 10 $^{\circ}\text{C}$, 误差不超过 ± 0.2 $^{\circ}\text{C}$ 。在此说明后文中的温度即热沉温度, 初始温度为 30 $^{\circ}\text{C}$ 。光源光谱功率分布采用 SPIC-200 光谱色彩照度计测量。

通过改变光源所占权重, 令某一 LED 光源权重为 1, 其他三个 LED 光源权重为 0, 同时改变温度, 测得四组单通道 LED 光源在 $30 \sim 120$ $^{\circ}\text{C}$ 步进 10 $^{\circ}\text{C}$ 的十组光谱功率分布曲线, 选取三个温度 (30 $^{\circ}\text{C}$ 、 80 $^{\circ}\text{C}$ 、 120 $^{\circ}\text{C}$) 下的单通道 LED 光源光谱曲线如图 3 所示。

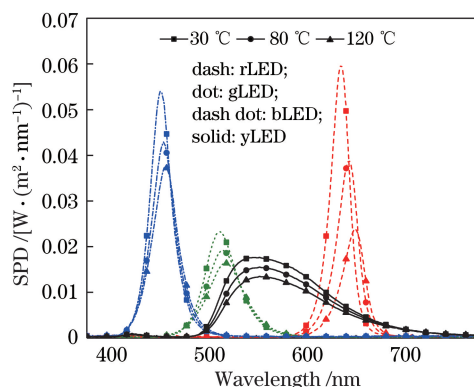


图 3 30 $^{\circ}\text{C}$ 、 80 $^{\circ}\text{C}$ 和 120 $^{\circ}\text{C}$ 下的四色 LED 光源光谱功率分布图

Fig. 3 SPD curves of four-color LED light source at 30 $^{\circ}\text{C}$, 80 $^{\circ}\text{C}$, and 120 $^{\circ}\text{C}$

从图 3 中可见, 温度对于测试的四种光源的光谱峰强度、半峰全宽及峰值波长均有一定的影响, 随着温度的升高, 单色 LED 光源的光谱峰强度有很大的衰减, 同时光谱向长波 (即红光) 偏移。光谱峰强度衰减是由于温度升高, 硅胶内部的热应力加大, 导致硅胶折射率降低, 使得发光效率降低及光通量衰减; 波长红移的原因是温度升高产生的热效应引起带隙收缩^[16]。而且从图中可以看出, 温度对于红色 LED 的影响程度大于其他三种 LED。

对于以上四种不同的 LED 光源, 本文分别采用三种不同的光谱模型进行拟合。每种光源都由三种

光谱模型拟合,其平均拟合优度(\bar{R}^2)如表 1 所示。

表 1 四色 LED 光源的高斯模型、高斯-洛伦兹模型、S 型-高斯模型的拟合优度

Table 1 \bar{R}^2 value of Gaussian model, Gaussian-Lorentz model, and S-Gaussian model of four-color LED

Model	rLED	gLED	bLED	yLED
Gaussian model	0.986	0.982	0.983	0.796
Gaussian-Lorentz model	0.968	0.991	0.987	0.747
S-Gaussian model	0.962	0.970	0.965	0.992

平均拟合优度 \bar{R}^2 指温度为 30~120 °C、步进 10 °C 下的拟合优度平均值,越接近 1,表示拟合效果越好。根据表 1 数据,本文中的红色 LED 光源光谱由高斯模型[(1)式]拟合,蓝色和绿色 LED 光源光谱由高斯-洛伦兹模型[(2)式]拟合,黄色 LED 光源采用 S 型-高斯模型[(3)式]进行光谱拟合。拟合结果表示为

$$\begin{bmatrix} A_{Gr} \\ \lambda_{pr} \\ \Delta\lambda_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.007987 \\ 0.1607 \\ 0.0475 \end{bmatrix} \cdot T + \begin{bmatrix} 1.6364 \\ 630.16 \\ 20.396 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} A_{Gg} \\ A_{Lg} \\ \lambda_{pg} \\ \Delta\lambda_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0019 \\ -0.0029 \\ 0.0612 \\ 0.0592 \end{bmatrix} \cdot T + \begin{bmatrix} 0.9771 \\ 1.4423 \\ 511.74 \\ 36.064 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} A_{Gb} \\ A_{Lb} \\ \lambda_{pb} \\ \Delta\lambda_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3 \times 10^{-8} & 10^{-5} & -0.0012 & 0.0499 \\ -5 \times 10^{-8} & 2 \times 10^{-5} & -0.0017 & 0.0725 \\ -2 \times 10^{-8} & 3 \times 10^{-5} & -0.0061 & 0.478 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0616 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T^4 \\ T^3 \\ T^2 \\ T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.7188 \\ 1.0794 \\ 443.77 \\ 22.682 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} A_{Gy} \\ a_y \\ k_y \\ \lambda_{1y} \\ \lambda_{py} \\ \Delta\lambda_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0064 \\ -5 \times 10^{-5} \\ 0.0002 \\ 0.0468 \\ 0 \\ 0.022 \end{bmatrix} \cdot T + \begin{bmatrix} 2.9652 \\ 0.0193 \\ 0.1103 \\ 511.85 \\ 553.2 \\ 72.68 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中:下标 r、g、b、y 的参数分别对应红光、绿光、蓝光和黄光的拟合光谱参数;拟合系数 R^2 均大于 0.95,拟合效果很好。

结合(1)~(3)式和(6)~(10)式,同时给定混光光源的占空比 d_r 、 d_g 、 d_b 和 d_y ,即可确定由以上四个 LED 光源组成的混合光源温度光谱模型。

本文将通过 D50 光源和 D65 光源验证上述温度光谱模型的可行性。D50 光源(相关色温为 5000 K)是一种发光体颜色偏暖色调的光源,根据 ISO3664:2000^[17],D50 是真正意义上的观察颜色的标准色温。D65 光源(相关色温为 6500 K)是一种发光体颜色偏冷色调的光源,在欧美国家 D65 光源逐步被 D50 光源取而代之,但在中国,D65 仍是目前大量使用的标准色温之一。改变不同通道的占空比,使得 $d_r:d_g:d_b:d_y=0.372:0.393:0.386:0.572$,得到 LED 混光光源 D50;将占空比设置为 $d_r:d_g:d_b:d_y=0.371:0.564:0.570:0.582$,得到 LED 混光光源 D65。根据温度光谱模型计算得到两种光源的模型光谱,同时通过实验测试测得实际光谱。这里分别选取 D50 光源和 D65 光源在三组温度 30 °C、80 °C 和 120 °C 下的光谱数据如图 4 所示,模型计算得到的光谱曲线与实测光谱曲线基本一致。

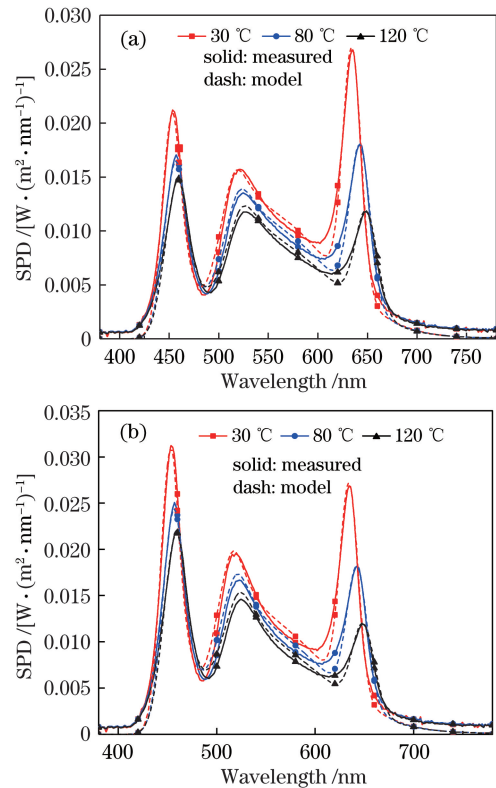


图 4 30 °C、80 °C 和 120 °C 下的实测光谱与模型光谱曲线图。
(a) D50 光源;(b) D65 光源

Fig. 4 Measured SPD curves and model SPD curves of LED at 30 °C, 80 °C, and 120 °C. (a) D50 light source; (b) D65 light source

根据模型光谱数据与实测光谱数据可以计算得到光源的视觉参数[照度 E 、相关色温(CCT)、色品坐标(u' , v')、显色指数 R_a]和非视觉参数(生理节律因子 C_{AF})的模型值与实测值。其中,节律因子

C_{AF} 的计算公式为

$$C_{AF-T} = \frac{\int_{380}^{780} P(\lambda, T)C(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} P(\lambda, T)V(\lambda) d\lambda}, \quad (11)$$

式中： C_{AF-T} 是光源在温度 T 下的生理节律因子； $P(\lambda, T)$ 是光源在温度 T 下的光谱功率分布； $C(\lambda)$ 是由 Gall 等^[18] 提出的标准化昼夜效率函数(峰值在 450 nm 附近)； $V(\lambda)$ 是标准化的光谱发光效率函数(峰值在 555 nm 附近)。

CIE1976 UCS 的色品坐标表示为 (u', v') ，可由 CIE 1931 色品坐标 (x, y) 计算得到。两个颜色 (u'_1, v'_1) 和 (u'_2, v'_2) 的色品差可近似用它们在 CIE

1976 UCS 色品图上的欧氏距离来表示。色品差 $\Delta u'v'$ 主要用于表征光源等自发光体的颜色差异，在此表示模型光谱与实测光谱的色品差。

$$\begin{cases} u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \\ v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3} \end{cases}, \quad (12)$$

$$\Delta u'v' = \sqrt{(u'_1 - u'_2)^2 + (v'_1 - v'_2)^2}. \quad (13)$$

将参数(CCT、 E 、 R_a 和 C_{AF})的模型理论值与实测值作绝对差,其与实测值的比值,即相对误差。选取 30~120 °C 中的最大相对误差及最大色品差记录在表 2 中。

表 2 D50 光源与 D65 光源参数的模型值与实测值对比

Table 2 Comparison of model and experimental values of D50 and D65 light source parameters

Multi-LED	CCT /%	E /%	R_a /%	$\Delta u'v'$	C_{AF} /%
D50	3.75(60 °C)	3.05(120 °C)	4.70(50 °C)	0.0107(110 °C)	5.58(110 °C)
D65	4.55(120 °C)	4.43(120 °C)	6.15(50 °C)	0.0119(110 °C)	6.08(110 °C)

如表 2 所示,对于 D50 光源与 D65 光源,该模型计算的理论光谱与实测光谱参数差距较小,各参数的最大相对误差不超过 6.15%,且模型计算得到的色品坐标与实测光源非常接近,色品差最大不超过 0.0119,模型光谱的色度性能基本符合 ANSI C78.377 标准^[19]。因此该温度光谱模型具有可靠性。

3 基于视觉与非视觉效应的光谱补偿

3.1 光谱补偿的必要性

照明环境对人体健康有着潜在的影响。目前,基于视觉与非视觉效应的 LED 照明研究与设计已成为照明行业研究的趋势,人因照明、健康照明是照明研究的目标。健康照明的影响范畴,实质上从满足视觉作业需求,拓展到工作效率、情绪调节、睡眠质量、环境认知、节律修复等多个方面。因此照明设计应该更加个性化、多元化、人性化、智能化,满足人们复杂多样的照明需求。根据不同的应用场景满足相应需求,调整照明参数,提出适用于不同照明场景的健康照明方案,是目前很多学者和相关从业者正在研究的。而在照明方案研究过程中,温度对于 LED 健康照明系统视觉与非视觉方面的影响如何消除有待解决。

从图 3 中可以看出温度对于单通道光源光谱的影响很大,那么随着温度的改变,混合光源的视觉与非视觉参数也有一定的变化。如 D50 光源和 D65 光源,其视觉参数和非视觉参数随温度变化如图 5 所示。

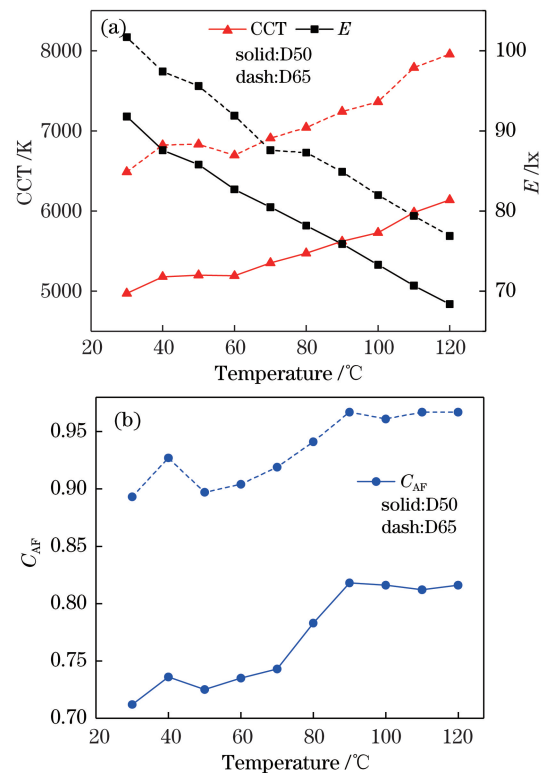


图 5 D50 光源和 D65 光源的参数温度变化。

(a) CCT 和 E ; (b) C_{AF}

Fig. 5 Temperatures-parameters change of D50 and D65 light source. (a) CCT and E ; (b) C_{AF}

从图 5 中可以看出,随着温度的升高,光源相关色温逐渐升高,照度基本呈线性衰减, C_{AF} 值略增加,在温度达到 90 °C 后趋于平稳。温度从 30 °C 上

升到 120 °C, D50 光源的照度由 91.8 lx 衰减到 68.4 lx, 下降了 25.4%, 相关色温由 4974 K 升高至 6140 K, 上升 23.5%, C_{AF} 值由原来的 0.712 上升到 0.816, 上升 14.9%; D65 光源照度从 101.7 lx 衰减到 76.9 lx, 下降了 24.4%, 相关色温从 6488 K 上升到 7957 K, 上升了 22.6%, C_{AF} 值由原来的 0.893 到 0.967, 上升了 8.3%。

照度的衰减, 影响照明视觉效果, 同时光源的非视觉功效减弱; C_{AF} 值增大, 即非视觉效应增强, 此光源在工作场景下将提高工作效率, 在休息场景中会降低休息质量。若相关色温增大, 则光源非视觉效应随之增强^[20], 光源色调改变, 对人体心理状态产生一定影响。光源参数的变化直接影响到人眼的视觉与非视觉效应。因此, 我们基于 DE 算法和温度光谱模型对光源光谱进行优化, 从而稳定光源参数, 削弱温度对 LED 光源视觉与非视觉方面的影响。

3.2 针对光源参数的光谱补偿

在此研究中, 优化目的在于通过改变四通道占空比稳定光源参数, 因此该问题可表述为

$$\begin{aligned} \min f(d_r, d_g, d_b, d_y) = & k_1 \sum_{380}^{780} [P_T(\lambda) - P_{T_0}(\lambda)]^2 + k_2 (C_{AF-T} - C_{AF-T_0})^2 + \\ & k_3 (E_T - E_{T_0})^2 + k_4 (x_T - x_{T_0})^2 + k_5 (y_T - y_{T_0})^2, \\ \text{s. t. } d_i \in [0, 2], i = r, g, b, y, \end{aligned} \quad (14)$$

式中: d_r, d_g, d_b, d_y 是温度 T 下四通道的补偿占空比, 补偿光谱以稳定各参数; $P_T(\lambda), P_{T_0}(\lambda)$ 为温度 T 和初始温度 T_0 下 RGBY 四色 LED 混光光源的光谱功率分布函数, 由 (6) 式求得; $C_{AF-T}/E_T, C_{AF-T_0}/E_{T_0}$ 分别表示温度 T 和初始温度 T_0 下光源的 C_{AF} /照度值; $(x_T, y_T), (x_{T_0}, y_{T_0})$ 分别是温度 T

和初始温度 T_0 下光源的色坐标; k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 表示式中各项的权重。

本研究采用 DE 算法求解该问题。差分进化算法是一种多目标(连续变量)优化算法, 用于求解多维空间中整体最优解。该算法结构简单易于执行, 控制参数少且有较强的搜索能力, 对于求解补偿占空比是很好的解决算法。对于 D50 光源与 D65 光源, 通过 DE 算法求得不同温度下的补偿占空比(每通道的满占空比为 1, 此时通道电流为 350 mA), 选取部分温度下的光源补偿占空比展示在表 3 中。

表 3 基于 DE 算法的 D50 和 D65 光源补偿占空比计算结果

Table 3 Compensated duty cycle calculation results of D50 and D65 light sources based on DE algorithm

LED	Duty cycle	30 °C	50 °C	70 °C	90 °C	110 °C
D50	d_r	0.372	0.433	0.486	0.531	0.569
	d_g	0.393	0.358	0.291	0.204	0.111
	d_b	0.386	0.422	0.466	0.515	0.565
	d_y	0.572	0.631	0.714	0.818	0.936
D65	d_r	0.371	0.442	0.510	0.572	0.626
	d_g	0.564	0.546	0.491	0.410	0.316
	d_b	0.571	0.615	0.670	0.732	0.798
	d_y	0.582	0.632	0.708	0.808	0.927

值得说明的是, DE 算法运行平均时间为 1.8267 s, 耗时短, 可及时给出计算结果, 在实际应用中具有可行性。图 6(a) 和 (b) 分别是选取 30 °C、80 °C 和 120 °C 下的 D50 光源和 D65 光源补偿前后的温度光谱功率分布曲线。30 °C 作为初始温度, 此温度下的光源参数是补偿的目标参数, 由此通过 DE 算法得到的补偿占空比与原占空比相等, 因此图 6 中 30 °C 补偿前后的光源光谱功率分布曲线重

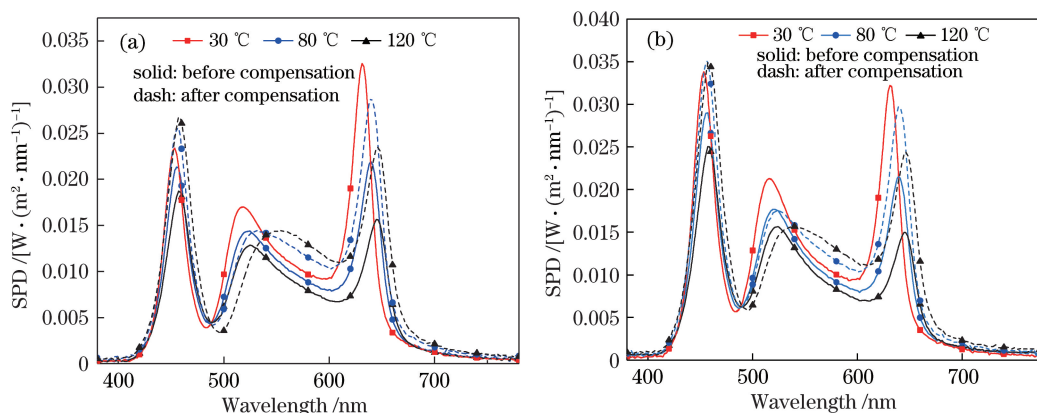


图 6 补偿前后的光源光谱分布。(a) D50 光源; (b) D65 光源

Fig. 6 Spectral power distributions of light source before and after compensation.

(a) D50 light source; (b) D65 light source

合。由于稳定视觉与非视觉参数是本研究主要目标,补偿前后光谱是否一致不作为补偿效果评价指标。若混光通道更多,各通道光源的峰值波长更加多种,那么补偿前后光谱将更为一致,参数的补偿效果会更好^[21]。光谱补偿前后的光源参数绝对差值比 $|\delta\%|$ 如图 7 所示, $|\delta\%|$ 表示光源的某参数在升温后与初始温度的变化率。

实验数据表明,升温后 D50 光源/D65 光源补偿后的相关色温与初始温度光源相关色温的最大绝对差不超过 271 K/347 K,两者非常接近;补偿

后的照度最大绝对差不超过 2.2 lx/2.6 lx,照度损耗很小;同时 C_{AF} 值也得到了-定的补偿,由原来的相差 0.106/0.074 减少到 0.073/0.06。相较于图 5,图 7 中 120 °C 下的 D50 光源/D65 光源照度 $|\delta\%|$ 值由 25.4%/24.4%补偿至 2.7%/2.6%,相关色温 $|\delta\%|$ 值由 23.5%/22.6%补偿至 5.4%/5.4%, C_{AF} 值 $|\delta\%|$ 由 14.9%/8.3%补偿至 10.3%/6.7%。据以上数据,基于温度光谱模型和 DE 算法进行的优化补偿方案是有效且可行的。

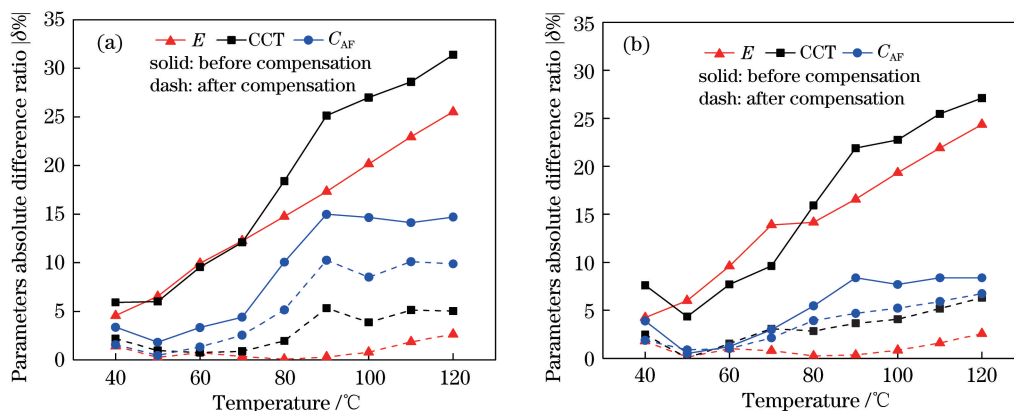


图 7 补偿前后的光源参数绝对差值比。(a) D50 光源;(b) D65 光源

Fig. 7 Parameters absolute difference ratio of light source before and after compensation.

(a) D50 light source; (b) D65 light source

4 结 论

本文提出了温度光谱模型,可以预测不同热沉温度下多 LED 混光光源的光谱功率分布,并通过 RGBY 四色 LED 混光系统来验证温度光谱模型的有效性和可靠性;在此基础上,以差分进化算法为方法,稳定光源参数(照度、CCT、 C_{AF})为目标,进行光谱优化,消除温度对 LED 光源视觉效应与非视觉效应的影响。实验数据表明,LED 混光光源参数得到很好的补偿。以往的大多数研究仅针对温度变化导致的光通量、色温等视觉参数的变化,本文研究光源非视觉参数与温度的关系并进行补偿。本文研究方案可推广到实际应用中,在多 LED 混光光源内部安装一个温度感应计,根据 LED 芯片热沉温度的变化改变 PWM 调光系统中各通道的权重,实现光源视觉参数与非视觉参数的可控性和稳定性。本研究为智能健康照明系统的实现与完善提供了一定的参考依据。

参 考 文 献

[1] McIntyre I M, Norman T R, Burrows G D, et al.

Human melatonin suppression by light is intensity dependent[J]. *Journal of Pineal Research*, 1989, 6 (2): 149-156.

- [2] Shanahan T L, Czeisler C A. Light exposure induces equivalent phase shifts of the endogenous circadian rhythms of circulating plasma melatonin and core body temperature in men[J]. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 1991, 73(2): 227-235.
- [3] 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.
- [4] Berman S M. A new retinal photoreceptor should affect lighting practice [J]. *Lighting Research & Technology*, 2008, 40(4): 373-376.
- [5] Shur M, Žukauskas A. Light emitting diodes: toward smart lighting [J]. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, 2011, 20(2): 229-245.
- [6] Lee A T L, Chen H T, Tan S C, et al. Precise dimming and color control of LED systems based on color mixing [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(1): 65-80.
- [7] Zheng L L, Wu T Z, Lu Y J, et al. Spectral optimization of three-primary LEDs by considering

- the circadian action factor[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(6): 1-9.
- [8] Liu L M, Zheng X D. Measurements of LEDs spectral characteristics and junction temperature[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(5): 1069-1073.
刘立明, 郑晓东. LED 结温与光谱特性关系的测量[J]. *光子学报*, 2009, 38(5): 1069-1073.
- [9] Wen Y M, Zhao X M, Li P, et al. Modification of light emitting diode's normalized spectrum model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0130001.
文玉梅, 赵学梅, 李平, 等. 发光二极管归一化光谱模型的修正[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0130001.
- [10] Zhang X, Chen T, Jin C F, et al. Design and development of portable light source and power meter system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(21): 212301.
张翔, 陈涛, 金操帆, 等. 便携式光源、光功率计系统开发与设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(21): 212301.
- [11] Lan X Y, Yang X, Su S C, et al. Effects of current and temperature stress on reliability of LED bulbs[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(8): 082301.
蓝栩砚, 杨欣, 宿世臣, 等. 电流和温度应力对 LED 球泡灯可靠性的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(8): 082301.
- [12] Shen X H, Chen H T, Chen C H, et al. Spectral characteristics and circadian action factor of white LEDs[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(12): 1514-1522.
沈雪华, 陈焕庭, 陈赐海, 等. 白光 LED 光谱特性及司辰节律因子[J]. *发光学报*, 2019, 40(12): 1514-1522.
- [13] Shen X H, Chen H T, Shi W R, et al. Electrical and thermal effects of tunable LED systems on lighting and non-visual biological characteristics[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(3): 1-13.
- [14] Llenas A, Carreras J. Arbitrary spectral matching using multi-LED lighting systems[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(3): 035105.
- [15] Chen J X. Precise modeling and its application of phosphor coating for white LED based on bidirectional scattering distribution function[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017: 64-70.
陈家晓. 基于双向散射分布函数的白光 LED 荧光涂层精确建模及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2017: 64-70.
- [16] Ding T P, Guo W L, Cui B F, et al. The effect of temperature on the PL spectra of high power LED[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(6): 1450-1453.
丁天平, 郭伟玲, 崔碧峰, 等. 温度对功率 LED 光谱特性的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(6): 1450-1453.
- [17] ISO 3664(2009). Graphic technology and photography-viewing conditions: ISO 3664—2009[S]. Geneva: International Organization of Standard, 2009.
- [18] Gall D, Bieske K. Definition and measurement of circadian radiometric quantities[C]//2004 CIE Symposium on Light and Health: Non-Visual Effects, September 30-October 2, 2004, Vienna, Austria. Wien: Commission internationale de l'éclairage, 2004: 129-132.
- [19] American National Standards Institute. Specifications for chromaticity of solid-state lighting (SSL) products: ANSI C78. 377—2015[S]. Rosslyn: National Electrical Manufacturers Association, 2015.
- [20] Yang C P, Fang W Q, Han C W, et al. Variation of non-visual biological effect of LED lighting with color temperature[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(24): 243301.
杨超普, 方文卿, 韩昌万, 等. LED 照明的非视觉生物效应随色温变化研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(24): 243301.
- [21] Chew I, Kalavally V, Tan C P, et al. A spectrally tunable smart LED lighting system with closed-loop control[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(11): 4452-4459.