

基于非视觉和视觉效应的照明光谱重构研究

曾伟森, 郑锦泽, 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 提出了一种基于非视觉和视觉效应的光谱重构解决方案, 以实现健康照明的理念。建立了四通道光谱重构计算模型, 利用该模型根据生理节律因子、色品坐标和照度直接求解脉冲宽度调制的占空比。设计了一种可远程控制的光谱可重构的发光二极管光源, 用以实验验证。讨论了生理节律因子和显色性指数的可调谐性, 为相关参数的选择提供了理论指导。实验结果表明, 测量值与理论值之间的相对误差较小。此外, 计算模型能够指导同一色品坐标上的光谱重构, 以实现生理节律因子和显色性指数的调控。因此, 计算模型能良好地指导光谱重构。该研究为下一代健康照明光源的设计提供了有益参考。

关键词 视觉光学; 照明设计; 非视觉效应; 光谱重构; 健康照明

中图分类号 TU113

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1033001

Spectral Reconfiguration of Lighting Based on Nonvisual and Visual Effects

Zeng Weisen, Zheng Jinze, Zhou Xiaoming*

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

Abstract A spectral-reconfiguration solution based on nonvisual and visual effects is proposed to achieve healthy lighting. A four-channel spectrally reconfigurable calculation model that directly solves the duty cycle of pulse-width modulation according to the circadian-action factor, chromaticity coordinates, and illuminance is established. A remotely controllable and spectrally reconfigurable light-emitting-diode source is designed for experimental verification. The tunability of the circadian-action factor and color-rendering index is discussed, providing theoretical guidance for the selection of relevant parameters. Experimental results show that the relative error between the measured and theoretical values is small. Furthermore, the calculation model can guide spectral reconfiguration on the same chromaticity coordinate, achieving regulation of the circadian-action factor and color-rendering index. Therefore, the computational model can conduct spectral reconfiguration well. This study provides a useful reference for the design of healthy lighting sources for the next generation.

Key words visual optics; lighting design; nonvisual effects; spectral reconfiguration; healthy lighting

OCIS codes 330.7326; 170.2945

1 引 言

光是影响人体身心健康的一个重要因素。上世纪末, 研究发现, 夜间光照会抑制人体褪黑素分泌, 进而影响人体生理节律^[1-2]。2002 年, Berson 等^[3]发现了本征感光视网膜神经节细胞(ipRGC), 该发现表明除了视觉通道外, 人眼中还存在非视觉通道, 光通过非视觉通道参与调节人体的生理和心理功能。合理利用光的非视觉功效有助于提高夜

间轮班工作者的工作效率^[4], 改善睡眠质量, 缓解季节性情感障碍^[5]。因此, 照明设计时应同时兼顾视觉功效和非视觉功效, 健康照明的理念由此诞生。根据视觉功效和非视觉功效的具体要求, 动态重构光源的光谱, 可获得更为健康、舒适的照明光环境。

在传统的照明设计中, 常用的光源质量评价参数包括照度 E 、色品坐标 (x, y) 、相关色温 T_{cp} 和显色性指数 R_a 等^[6-7], 但这些参数无法用于评价非视觉功

收稿日期: 2019-02-22; 修回日期: 2019-04-10; 录用日期: 2019-06-21

基金项目: 广东省科技计划(2015A010103005)、亚热带建筑科学国家重点实验室开放项目(2018ZB20)

* E-mail: zhouxm@scut.edu.cn

效。为此,Gall 等^[8]提出了生理节律因子(C_{AF})评价模型,并成为光源光谱设计的关键指标之一,被广泛应用于健康照明的光谱设计研究当中。视觉参数和非视觉参数的选择需要综合考虑时间和应用场景等诸多因素^[5-7],静态光谱难以满足所有应用需求,因此需要动态光谱调控技术作为补充。研究表明,在不改变色品坐标和照度的情况下,调节光源的光谱可改变人体的非视觉响应^[9-10]。光谱重构可通过按比例混合不同的光谱来实现。双色温发光二极管(LED)混光法实现了照明光谱的动态调节,但色品坐标的可调范围小,白光的显色性指数不高^[11]。红/绿/蓝(RGB) LED 混光法提高了色品坐标的可调范围,但难以保持高显色性指数特性^[7]。红/绿/蓝/白(RGBW) LED 混光法在保持了宽范围色品坐标调节特性的同时,显著提高了显色性指数的可控性。该混光法根据设定的光源参数,采用脉冲宽度调制(PWM)控制混光比例,可灵活地重构照明光谱。此外,在 LED 灯珠数量相同的情况下,RGBW 光源的价格要略低于 RGB 光源。因此,在需要兼顾视觉功效和非视觉功效的动态调光应用中,RGBW LED 混光法具有良好的应用前景。基于该混光法,田会娟等^[11]实现了光源相关色温的调节。Wu 等^[7]提出了一种多功能室内光源解决方案。上述研究以 PWM 占空比作为步进值,采用搜索法来优化显色性指数或生理节律因子,随着 PWM 精度的提高,搜索难度也随之增大。

本文提出一种基于非视觉效应和视觉效应的光谱重构计算模型。该模型根据设定的照度、色品坐标和生理节律因子可直接求解出所需占空比,占空比调节精度可达 0.1%,避免了复杂的搜索过程。此外,根据计算模型的约束关系可求得生理节律因子的可调谐范围,以及生理节律因子与显色性指数的关系,这些可作为相关色温、生理节律因子和显色性指数的选择依据。搭建实验平台和 RGBW LED 混光系统,用以验证计算模型的有效性。通过此模型,照明光谱可根据视觉评价参数和非视觉评价参数来重构,进而获得视觉效果良好且有益健康的照明光环境。

2 光谱重构理论基础

色品坐标、相关色温、照度和显色性指数是光谱重构中的重要指标。因为相关色温与色品坐标的映射关系不唯一,所以在光谱重构过程中,相关色温的

调节最终落实到色品坐标的调控上。此外,显色性指数的计算过程复杂,不适合作为优先调控的参数。综合以上因素考虑,采用国际照明委员会(CIE) 1931 色品坐标和照度作为光谱重构的视觉参数,并采用文献^[8]提出的生理节律因子作为光谱重构的非视觉参数,其表达式为

$$C_{AF} = \frac{\int C(\lambda)P(\lambda)d\lambda}{\int V(\lambda)P(\lambda)d\lambda} = \frac{Y_C}{Y} = \frac{Y_C}{E/683}, \quad (1)$$

式中: λ 为可见光波长,取值范围为 380~780 nm; $C(\lambda)$ 为非视觉光谱灵敏度函数; $V(\lambda)$ 为明视觉光谱灵敏度函数; $P(\lambda)$ 为光源的绝对光谱分布(SPD); Y 为 CIE 1931 色度系统中的 Y 刺激值, E 为照度,且 $E=683Y$; Y_C 为非视觉效应刺激值。在照度相同的情况下,生理节律因子越大,刺激值 Y_C 越大,非视觉效应越强,反之刺激值 Y_C 越小,非视觉效应越弱。

理想情况下,单光源的绝对光谱分布幅值与 PWM 占空比呈线性关系。根据光谱线性叠加原理,结合(1)式,推导出 n 个已知光谱分布光源混光后的生理节律因子表达式,即

$$D_1 C_1 y_1 C_{AF1} + D_2 C_2 y_2 C_{AF2} + \dots + D_n C_n y_n C_{AFn} = C_{AFm} E_m / 683, \quad (2)$$

式中: $D_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为第 i 种光源对应的占空比; $C_i = Y_i / y_i$ 为第 i 种光源在满占空比情况下工作的三刺激值之和; C_{AFi} 为第 i 种光源的生理节律因子; (x_i, y_i) 为第 i 种光源对应的色品坐标; E_m 为目标照度; C_{AFm} 为目标生理节律因子。

根据 CIE 1931 色品坐标计算方法和光的混色原理^[12],可得 n 个已知光谱分布光源的混色方程组为

$$\begin{cases} D_1 C_1 x_1 + D_2 C_2 x_2 + \dots + D_n C_n x_n = \frac{x_m}{y_m} \frac{E_m}{683} \\ D_1 C_1 y_1 + D_2 C_2 y_2 + \dots + D_n C_n y_n = \frac{E_m}{683} \\ D_1 C_1 + D_2 C_2 + \dots + D_n C_n = \frac{1}{y_m} \frac{E_m}{683} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: (x_m, y_m) 为目标色品坐标。

本文基于 RGBW 四通道 LED 系统开展照明光谱重构研究,四通道混光方程组是 n 通道混光方程组的特例,根据(2)式和(3)式可得光谱重构计算模型的矩阵表达式为

$$\begin{bmatrix} C_r & C_g & C_b & C_w \\ C_r x_r & C_g x_g & C_b x_b & C_w x_w \\ C_r y_r & C_g y_g & C_b y_b & C_w y_w \\ C_r y_r C_{AFr} & C_g y_g C_{AFg} & C_b y_b C_{AFb} & C_w y_w C_{AFw} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} D_r \\ D_g \\ D_b \\ D_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_m / (683 y_m) \\ (E_m x_m) / (683 y_m) \\ E_m / 683 \\ (E_m C_{AFm}) / 683 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中:下标 r, g, b, w 分别表示红光,绿光,蓝光,白光 LED 通道; $D_k (k=r, g, b, w)$ 为第 k 种光源对应的占空比; $C_k = Y_k / y_k$ 为第 k 种光源在满占空比情况下工作的三刺激值之和; C_{AFk} 为第 k 种光源的生理节律因子; (x_k, y_k) 为第 k 种光源对应的色品坐标。

(4)式可简写为 $AD=T$,其中 A 为基光谱参数矩阵, D 为占空比矩阵, T 为目标参数矩阵。根据基光谱求得参数矩阵 A ,将给定的目标参数组成矩阵 T ,采用(4)式即可求得所需的占空比矩阵 D ,进而通过 PWM 重构光谱。由此可知,在给定色品坐标和照度的条件下,占空比取决于生理节律因子值,这表明生理节律因子具有可调谐性,调谐范围受基光谱约束,可通过占空比的调节范围求得。

照明终端广泛采用相关色温和色偏差值 (D_{uv}) 来描述光源色度特性。美国国家标准学会(ANSI)在荧光灯色度的基础上,制定了固态照明产品的色度规范(ANSI C78.377)^[13],并成为国际主流的 LED 色度标准。ANSI C78.377 在 CIE 1931 XYZ 色度图上,将固态照明光源的色度划分为 10 个四边形区域,每一个区域规定一个标称色温。随色温升高,ANSI 四边形中心点轨迹从普朗克轨迹逐渐过渡到日光轨迹。本文采用 ANSI 四边形中心点轨迹作为光谱重构轨迹,运用拟合的方法得到该轨迹上相关色温与色品坐标的关系式,即

$$x_m = -4.51 \frac{10^5}{T_{cpm}^2} + 917.8 \frac{1}{T_{cpm}} + 0.1807, \quad (5)$$

$$y_m = -2.31x_m^2 + 2.34x_m - 0.1769, \quad (6)$$

式中: T_{cpm} 为目标色温。

采用(4)式~(6)式建立了色温、色品坐标、照度和生理节律因子值与占空比的关系,为研究 LED 照明光谱重构提供了参考。

3 实验验证

3.1 实验测试系统

夜间室内照明是影响人体生理节律的重要因

素,也是健康照明的主要应用场景。为了模拟真实的室内照明环境,实验测试均在一个 $45 \text{ cm} \times 45 \text{ cm} \times 44 \text{ cm}$ 的长方体空间进行,如图 1 所示。RGBW LED 光源安装在长方体顶部中央,其正下方为实验测试点。光环境测量仪器采用杭州远方 SPIC-200 光谱色彩照度计。将光谱色彩照度计放置于实验测试点上,其测量传感器到光源发光面的距离约为 38 cm 。

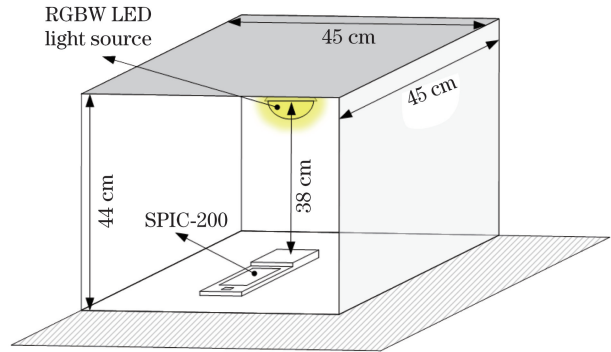


图 1 实验测试平台示意图

Fig. 1 Diagram of experimental test platform

RGBW LED 光源系统由 12 V 直流稳压电源(DC 12 V)、3.3 V 直流转换器(DC-DC 3.3 V)、蓝牙模块、微控制器模块、LED 驱动器和 RGBW LED 灯串组成,如图 2 所示。采用 Cree XLamp XP-E 系列灯珠构成 3×4 LED 阵列作为实验光源,每一个通道由三个相同灯珠串联而成,并由 DD313 驱动,驱动电流设置为 350 mA ,精度为 $\pm 20 \text{ mA}$ 。DD313 可实现 $0 \sim 100\%$ 的 PWM 占空比调节范围,在 PWM 频率为 1 kHz 情况下,有效调节精度仍可达 0.1% ,保证了照明光谱重构的调节范围和精度。为降低 LED 节温对光谱重构的影响,LED 灯珠焊接

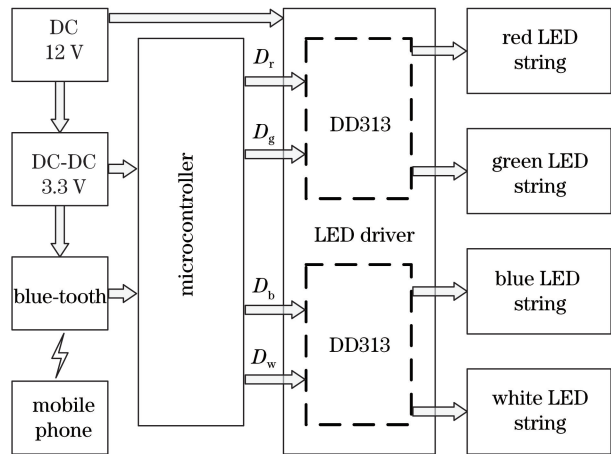


图 2 RGBW LED 系统框图

Fig. 2 RGBW LED system block diagram

在铝基板上,并将铝基板用硅酮导热胶固定在散热器上。蓝牙模块用于传输占空比数据,微控制器模块用于输出频率为 1 kHz,占空比精度为 0.1%的脉冲。

室温下,分别将每一通道的占空比设置为 100%,在测试点测得每一通道的绝对光谱分布,如图 3 所示。求得的基光谱参数矩阵 A 的相关参数如表 1 所示。

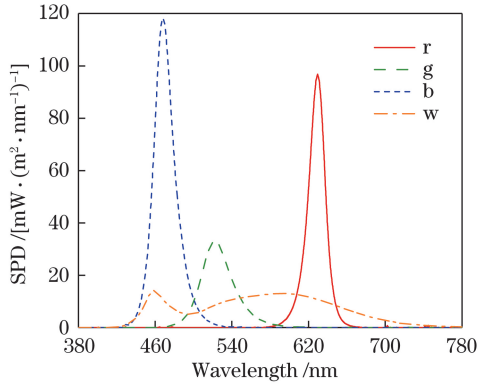


图 3 RGBW LED 系统各通道的绝对光谱分布
Fig. 3 Absolute spectral distribution of each channel of RGBW LED system

表 1 RGBW LED 各通道相关参数

Table 1 Related parameters of each channel of RGBW LED system

Channel	(x_k, y_k)	C_k	C_{AFk}	T_{cp} / K
r	(0.6934, 0.3061)	2.1656	0.0014	—
g	(0.1831, 0.7223)	1.4067	0.0445	—
b	(0.1242, 0.0789)	4.7508	7.8207	—
w	(0.3803, 0.3784)	3.0248	0.5517	4023

3.2 生理节律因子和显色性指数的调谐范围

由(4)式可知,给定色品坐标,生理节律因子调谐范围与照度值有关。对于本实验测试系统,计算结果表明,当照度小于 800 lx 时,生理节律因子调

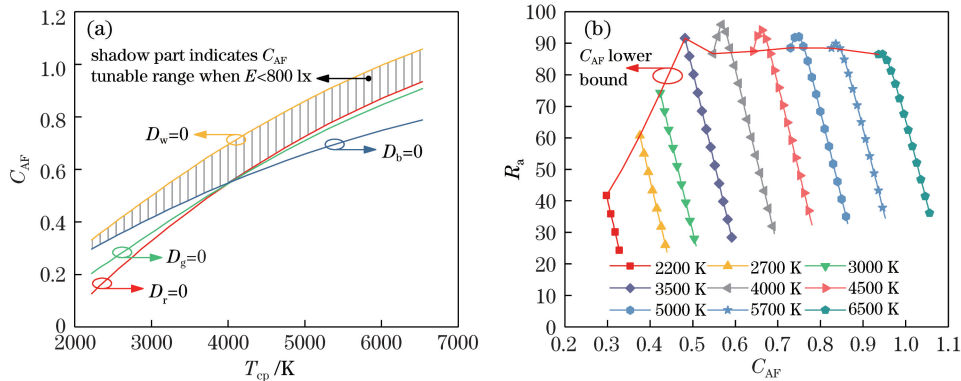


图 4 可调谐性分析曲线。(a) C_{AF} 可调谐范围;(b) R_a 可调谐范围

Fig. 4 Tunability analysis curves. (a) Tunable range of C_{AF} ; (b) tunable range of R_a

谐范围取决于约束条件 $D_k \geq 0, k \in \{r, g, b, w\}$ 。本实验设置的照度值不超过 300 lx,由此求得生理节律因子在 ANSI 四边形中心点轨迹上的调谐范围如图 4(a) 所示。调谐范围的边界由 $D_k = 0$ 计算得到,其下边界在红光、绿光、蓝光 LED 通道占空比为 0 的情况下共同确定,上边界在白光 LED W 通道占空比为 0 的情况下确定。同一色品坐标上,生理节律因子调谐范围有限。因此,必要时需要通过改变相关色温来达到所需的生理节律因子值。

对于同一光谱,视觉参数和非视觉参数相互约束。保持色品坐标和照度不变,改变生理节律因子,光源显色性指数随之改变,如图 4(b) 所示。当相关色温小于等于 3500 K 时,显色性指数随生理节律因子值的增大而减少。当相关色温大于 3500 K 时,显色性指数随生理节律因子值的增大先增大后减小。由图 4(b) 可知,沿着生理节律因子调谐范围的下边界重构光谱时,光源的显色性较优。此外,通过调节生理节律因子优化光源显色性指数,可避免复杂的搜索过程。

3.3 结果及分析

沿 ANSI 四边形中心点轨迹和生理节律因子调谐范围的下边界进行光谱重构实验,实验结果如图 5 所示。由图 5(a)、(b) 和 (c) 可知,视觉参数与非视觉参数的实测值与设定值基本重合,这说明本文提出的光谱重构计算模型能较好地指导光谱重构设计。表 2 给出了有关参数的目标值与测量值之间的最大误差值。对比照度不同的三组实验的最大误差值可知,相关色温最大容差为 41 K,最大的色偏差值为 0.0041,均达到 ANSI C78.377 规定的 LED 色度标准。照度、生理节律因子和显色性指数的最大相对误差分别为 3.5%、5.2% 和 5.6%。实验过程中,环境温度、测试点和测量仪器的摆放位置均保持

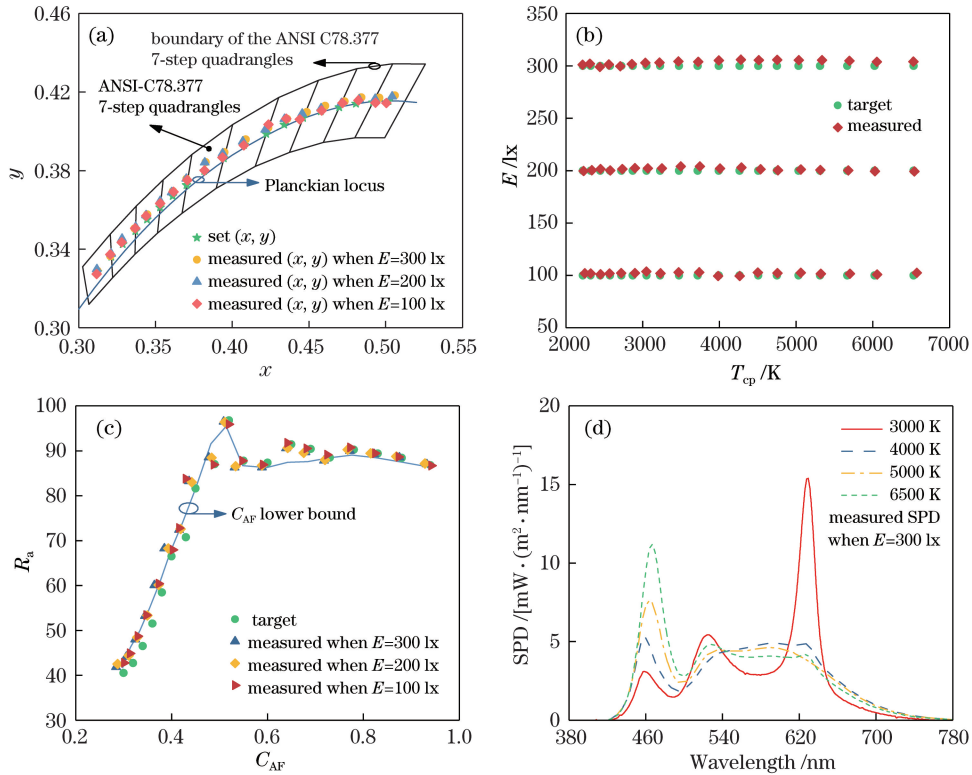


图 5 实验结果。(a) 色品坐标目标值和测量值;(b) T_{cp} 和 E 的目标值和测量值;
(c) C_{AF} 和 R_a 的目标值和测量值;(d) 部分实测光谱

Fig. 5 Experimental results. (a) Target and measured values of chromaticity coordinate; (b) target and measured values of T_{cp} and E ; (c) target and measured values of C_{AF} and R_a ; (d) partially measured spectra

表 2 有关参数的目标值与测量值之间的最大误差

Table 2 Maximum error between the target and measured values of the relevant parameters

E /lx	ΔT_{cp} /K	D_{uv}	Relative error of E /%	Relative error of C_{AF} /%	Relative error of R_a /%
100	41	0.0036	3.5	4.6	5.6
200	30	0.0041	2.0	4.3	4.9
300	29	0.0034	2.0	5.2	3.3

不变,驱动电流误差、测量传感器误差和占空比舍入误差是最主要的误差来源。图 5(d)所示为部分实测的光谱。

同一色品坐标上, C_{AF} 在一定范围内可调谐。根据图 4(b)所示 C_{AF} 与 R_a 的约束关系,以 C_{AF} 最小为原则,分别求得显色性指数为 70、80 和 90 三种情况下的 C_{AF} 轨迹,将照度设置为 300 lx 进行实验,实验结果如图 6 所示。可以看出,对于色品坐标相同的点, $R_a=70$ 时,生理节律因子最大, $R_a=90$ 时,生理节律因子最小,而 $R_a=80$ 时,生理节律因子介于前两者之间。本实验实现了对同一色品坐标上的生理节律因子和显色性指数的调控,进一步验证了计算模型的有效性。图 6(b)所示为部分实测光谱。不同的应用场合中,对同一色品坐标上生理节律因

子和显色性指数的调控是必要的。例如,夜间卧室照明要求生理节律因子最小化,以降低非视觉效应对睡眠的影响,可采用图 6(a)中 $R_a=90$ 的曲线作为照明设计参考曲线。夜间办公室照明要求在保持较高显色性指数的前提下提高生理节律因子,以提高工作效率,可采用图 6(a)中 $R_a=80$ 的曲线作为照明设计参考曲线。

4 结 论

非视觉效应是实现健康照明的关键因素,光谱可重构的 LED 光源是实现健康照明和智能照明的硬件基础。根据光谱的线性叠加原理,本文提出了四通道光谱重构计算模型,该模型建立了 PWM 占空比与色品坐标、生理节律因子、照度的函数关系,

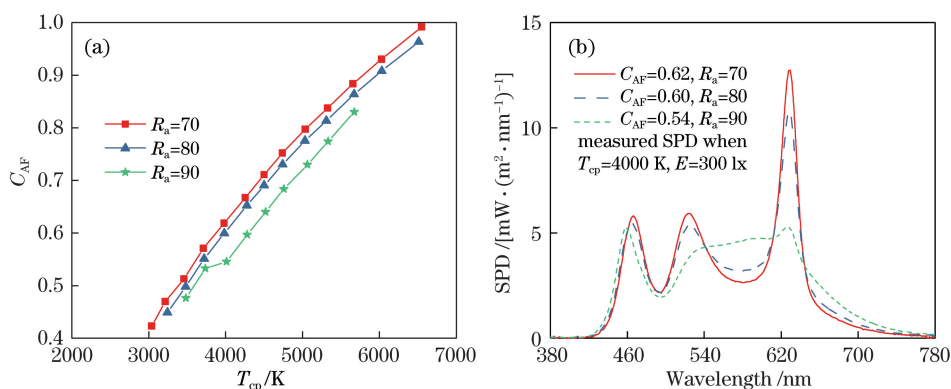


图 6 C_{AF} 和 R_a 调控的实验结果。(a) 不同 R_a 下 C_{AF} 与 T_{cp} 关系曲线;(b) 部分实测光谱

Fig. 6 Experimental results of regulation of C_{AF} and R_a . (a) Relationship between C_{AF} and T_{cp} under different R_a ; (b) partially measured spectra

可直接根据上述参数求解 PWM 占空比。采用 RGBW LED 制作光谱可重构的光源系统,并基于此系统得到生理节律因子的调谐范围和显色性指数的调谐范围。在模拟的室内照明环境中对计算模型进行实验验证,实验结果表明,在降低生理节律因子前提下,实现了相关色温在 2200~6500 K 范围内、照度在 100~300 lx 范围内的光谱重构,且重构光谱的色度性能达到 ANSI C78.377 标准。此外,在色品坐标相同的前提下,实现了生理节律因子和显色性指数的调控。

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] Kraneburg A, Franke S, Methling R, *et al.* Effect of color temperature on melatonin production for illumination of working environments[J]. *Applied Ergonomics*, 2017, 58: 446-453.
- [5] van Bommel W J M. Non-visual biological effect of lighting and the practical meaning for lighting for work[J]. *Applied Ergonomics*, 2006, 37(4): 461-466.
- [6] Dai Q, Shan Q F, Lam H, *et al.* Circadian-effect engineering of solid-state lighting spectra for beneficial and tunable lighting[J]. *Optics Express*, 2016, 24(18): 20049-20059.
- [7] Wu T Z, Lin Y, Zhu H H, *et al.* Multi-function indoor light sources based on light-emitting diodes-a solution for healthy lighting[J]. *Optics Express*, 2016, 24(21): 24401-24412.
- [8] 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. [S.l.: s.n.], 2004: 129-132.
- [9] Rahman S A, St Hilaire M A, Lockley S W. The effects of spectral tuning of evening ambient light on melatonin suppression, alertness and sleep[J]. *Physiology & Behavior*, 2017, 177: 221-229.
- [10] Souman J L, Borra T, de Goijer I, *et al.* Spectral tuning of white light allows for strong reduction in melatonin suppression without changing illumination level or color temperature [J]. *Journal of Biological Rhythms*, 2018, 33(4): 420-431.
- [11] Tian H J, Liu J X, Hong Z, *et al.* Dimming method for R/G/B/WW light emitting diode based on four channels' pulse width modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0423002. 田会娟, 柳建新, 洪振, 等. 基于脉冲宽度调制的 R/G/B/WW 4 色发光二极管调光调色方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0423002.
- [12] Jin W Q, Hu W J. Photometry, radiometry, colorimetry and measurement [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006: 96-107. 金伟其, 胡威捷. 辐射度 光度与色度及其测量 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 96-107.
- [13] American National Standards Institute. Specifications for chromaticity of solid-state lighting (SSL) products: ANSI C78.377[S]. Rosslyn: National Electrical Manufacturers Association, 2015.