

基于红/绿/蓝/青/黄/暖白 6 色 LED 的白光光谱优化方法

田会娟^{1,2*}, 胡阳^{1,2}, 陈陶^{1,2}, 柳建新⁴, 蔡敏鹏^{2,3}, 关涛^{2,3}

¹天津工业大学电子与信息工程学院, 天津 300387;

²大功率半导体照明应运系统教育部工程研究中心, 天津 300387;

³天津工业大学电气工程与自动化学院天津市市电工电能新技术重点实验室, 天津 300387;

⁴天津成科传动机电技术股份有限公司 300384

摘要 提出了一种基于脉冲宽度调制(PWM)的红/绿/蓝/青/黄/暖白(R/G/B/C/Y/WW)6色发光二极管(LED)的白光光谱优化方法。该方法根据光谱叠加性原理,采用1931 CIE-XYZ三刺激值建立了G+WW, B+C, R+Y各混合光源色坐标与光通量贡献率 $\rho_{G+WW}(r_1)$, $\rho_{B+C}(r_2)$, $\rho_{R+Y}(r_3)$ 的函数关系,在不同光通量百分比 r_1, r_2, r_3 下,通过优化遍历范围计算得到相关色温为2700, 4000, 5500, 7000 K时合成白光的最优显色指数 R_a 为96.4, 97.0, 97.3, 97.4,并采用R/G/B/C/Y/WW 6色LED进行实验验证。结果表明:R/G/B/C/Y/WW LED模块可实现相关色温在2700~7000 K范围内的白光调节。当光通量设定为500 lm时,相关色温的最大相对误差为1.96%,一般显色指数 R_a 最大相对误差为1.24%,发光效率可达146.81~152.40 $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

关键词 光学器件; 脉冲宽度调制; 发光二极管; 显色指数

中图分类号 TN312.8

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0823001

Spectral Optimization of a Mixed White Light-Emitting Diode (LED) Cluster Comprising a Red/Green/Blue/Cyan/Yellow/Warm White LED

Tian Huijuan^{1,2*}, Hu Yang^{1,2}, Chen Tao^{1,2}, Liu Jianxin⁴, Cai Minpeng^{2,3}, Guan Tao^{2,3}

¹School of Electronics and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin, 300387, China;

²Engineering Research Center of Ministry of Education on High Power Solid State Lighting Application System, Tianjin, 300387, China;

³Tianjin Key Laboratory of Advanced Electrical Engineering and Energy Technology, School of Electrical Engineering & Automation, Tiangong University, Tianjin, 300387, China;

⁴Tianjin Chengke Transmission Electromechanical Technology Co., Ltd., Tianjin, 300384, China

Abstract In this paper, a spectral optimization method for a mixed white light-emitting diode (LED) cluster comprising a red/green/blue/cyan/yellow/warm white (R/G/B/C/Y/WW) LED based on pulse width modulation (PWM) is proposed. Following the principle of the spectral combination of multicolor LEDs, the proposed method adopts the 1931 CIE-XYZ tristimulus value to determine the relationship between the color coordinates and the contribution ratio $\rho_{G+WW}(r_1)$, $\rho_{B+C}(r_2)$, $\rho_{R+Y}(r_3)$ for each component, i. e., G + WW, B + C, and R + Y, respectively. Using an optimized traversal range under different flux contribution ratios, i. e., r_1, r_2 , and r_3 , a maximum color rendering index (R_a) of 96.4, 97.0, 97.3, and 97.4 is attainable when the correlation color temperatures (T_c) of the synthesized white LED cluster are 2700, 4000, 5500, and 7000 K, respectively. Furthermore, experimental verification was conducted with R/G/B/C/Y/WW LEDs. Results show that an R/G/B/C/Y/WW LED module can realize tunable white light in a wide range of T_c (2700–7000 K). When the luminance flux is set to 500 lm, the maximum relative errors of T_c and R_a are 1.96% and 1.24%, respectively, and the luminous efficiency varies in the range 146.81–152.40 $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$.

收稿日期: 2019-10-22; 修回日期: 2019-12-08; 录用日期: 2019-12-31

基金项目: 国家自然科学基金(61504095)、天津市科技支撑重点计划项目(18YFZCNC01160)

* E-mail: tianhjgx@126.com

Key words optical device; pulse width modulation; light-emitting diode; color rendering index

OCIS codes 230.0250; 230.3670; 250.4745; 220.2945

1 引 言

随着 LED 技术的日渐成熟,模拟与太阳光谱相近的全光谱 LED 成为近几年的研究热点^[1-3]。吴铭等^[4]提出一种白光 LED 所用的全光谱发射荧光粉及其制备的方法。由于荧光粉能量的损失不可避免,有研究者采用多芯片 LED 来达到高光效和高显色性。郭自泉等^[5]模拟了在相关色温为 3000 K 时 3 基色合成白光 LED 光谱的优化方法,得到的最大显色指数为 92.6。湛江波等^[6]基于 Ohno 模型用蓝光 LED 激发绿橙双色荧光粉获得暖白光,与红、青、蓝 3 种 LED 光源混合,实现了相关色温在 2700~6500 K 范围内可调的高显色性白光 LED 模拟。田会娟等^[7]提出了一种基于脉冲宽度调制(PWM)的 R/G/B/WW 4 色 LED 调光调色模型,该模型可实现相关色温在 2900~7600 K 范围内,一般显色指数在 94.1~96.0 范围内的白光调节。金宇章等^[8]提出了一种 3 通道 6 色 LED 白光合成方法,实现的显色指数大于 85,相关色温在 2000~10000 K 范围内可调。

本文提出了一种基于 PWM 的红/绿/蓝/青/黄/暖白(R/G/B/C/Y/WW)6 色发光二极管(LED)的白光光谱优化方法。因多色混合白光光源相对光谱功率分布(SPD)符合线性叠加原理,故该方法根据光谱叠加性原理,采用 1931 CIE-XYZ 三刺激值建立各混合光源色坐标与光通量贡献率的函数关系,通过遍历算法计算了不同相关色温下合成白光的最优显色指数,并设计开发了 R/G/B/C/Y/WW 6 色 LED PWM 调光系统,建立了混合光的光通量与占空比的函数关系,最后采用该系统对上述方法进行了实验验证。

2 理论计算

在智能照明领域,PWM 调光可以很好地与数字控制技术结合,实现多通道多基色 LED 的光色调节^[7,9]。基于线性叠加原理,多色光混合白光的光谱功率分布可表示为^[10-11]

$$S(\lambda) = D_1 S_1(\lambda) + D_2 S_2(\lambda) + \dots + D_n S_n(\lambda), \quad (1)$$

式中: D_n 和 $S_n(\lambda)$ 分别为第 n 种光源的占空比和在满电流工作状态下的光谱功率分布。假定合成白光光源的色坐标和光通量分别为 (x, y) 和 1 lm, 根据 CIE 色匹配函数,LED 合成白光光源的三刺激值 X, Y, Z 可表示为^[12-13]

$$\begin{cases} Y = \int V(\lambda) S(\lambda) d\lambda = \frac{1 \text{ lm}}{683 \text{ lm/W}} \\ X = \frac{x}{y} Y \\ Z = \frac{1-x-y}{y} Y \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $V(\lambda)$ 为光谱光视效率函数; (x, y) 为合成白光光源的色坐标。

以 R/G/B/C/Y/WW 6 色 LED 光源模块为例,假定合成白光光源的色坐标和光通量分别为 (x, y) 和 1 lm, 设其三刺激值分别为 $(X_R, Y_R, Z_R), (X_G, Y_G, Z_G), (X_B, Y_B, Z_B), (X_C, Y_C, Z_C), (X_Y, Y_Y, Z_Y)$ 和 (X_{WW}, Y_{WW}, Z_{WW}) , 根据 2 通道 PWM 调光调色关系^[9], 6 通道 6 种光源的两两混合可得混合光 $G+WW, B+C$ 和 $R+Y$ 三刺激值分别为 $[X_{G+WW}(r_1), Y_{G+WW}(r_1), Z_{G+WW}(r_1)], [X_{B+C}(r_2), Y_{B+C}(r_2), Z_{B+C}(r_2)]$ 和 $[X_{R+Y}(r_3), Y_{R+Y}(r_3), Z_{R+Y}(r_3)]$, 满足^[13]

$$\begin{cases} [X_{G+WW}(r_1) \quad Y_{G+WW}(r_1) \quad Z_{G+WW}(r_1)] = [r_1 \quad 1-r_1] \begin{bmatrix} X_G & Y_G & Z_G \\ X_{WW} & Y_{WW} & Z_{WW} \end{bmatrix} \\ [X_{B+C}(r_2) \quad Y_{B+C}(r_2) \quad Z_{B+C}(r_2)] = [r_2 \quad 1-r_2] \begin{bmatrix} X_B & Y_B & Z_B \\ X_C & Y_C & Z_C \end{bmatrix} \\ [X_{R+Y}(r_3) \quad Y_{R+Y}(r_3) \quad Z_{R+Y}(r_3)] = [r_3 \quad 1-r_3] \begin{bmatrix} X_R & Y_R & Z_R \\ X_Y & Y_Y & Z_Y \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: r_1, r_2, r_3 分别为 G, B, R 在混合光 $G+WW, B+C, R+Y$ 中的光通量所占的百分比。本研究中

r_1, r_2, r_3 取值范围均为 $[0, 1]$ 。在任意 r_1, r_2, r_3 下, 3 种混合光满足

$$[\rho_{G+WW}(r_1) \quad \rho_{B+C}(r_2) \quad \rho_{R+Y}(r_3)] = [X \quad Y \quad Z] \begin{bmatrix} X_{G+WW}(r_1) & Y_{G+WW}(r_1) & Z_{G+WW}(r_1) \\ X_{B+C}(r_2) & Y_{B+C}(r_2) & Z_{B+C}(r_2) \\ X_{R+Y}(r_3) & Y_{R+Y}(r_3) & Z_{R+Y}(r_3) \end{bmatrix}^{-1}, \quad (4)$$

式中： $\rho_{G+WW}(r_1), \rho_{B+C}(r_2), \rho_{R+Y}(r_3)$ (均为非负值) 分别表示 G+WW, B+C, R+Y 在合成白光中的光通量贡献率, 且 $\rho_{G+WW}(r_1) + \rho_{B+C}(r_2) + \rho_{R+Y}(r_3) = 1$ 。利用(4)式可得出 G+WW, B+C, R+Y 在目标光通量 Φ_0 下的合成白光中各色光通量为

$$\begin{cases} \Phi_G = r_1 \cdot \rho_{G+WW}(r_1) \cdot \Phi_0 \\ \Phi_{WW} = (1 - r_1) \rho_{G+WW}(r_1) \cdot \Phi_0 \\ \Phi_B = r_2 \cdot \rho_{B+C}(r_2) \cdot \Phi_0 \\ \Phi_C = (1 - r_2) \rho_{B+C}(r_2) \cdot \Phi_0 \\ \Phi_R = r_3 \cdot \rho_{R+Y}(r_3) \cdot \Phi_0 \\ \Phi_Y = (1 - r_3) \rho_{R+Y}(r_3) \cdot \Phi_0 \end{cases} \quad (5)$$

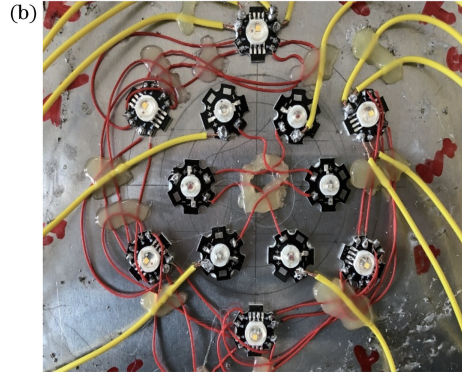
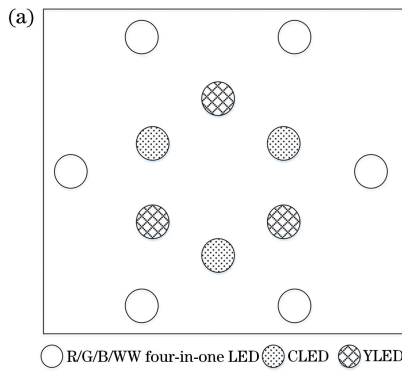


图 1 实验采用的光源模块。(a) R/G/B/C/Y/WW LED 灯珠排布图; (b) R/G/B/C/Y/WW LED 光源实物图

Fig. 1 Light source module used in the experiment. (a) R/G/B/C/Y/WW LED lamp bead layout;

(b) R/G/B/C/Y/WW LED physical drawing of light source

驱动电路主要由直流稳压电源、Wi-Fi 模块、STM32-ARM 模块、光源模块组成, 如图 2 所示。直流稳压电源将市电转换为电压为 18.5 V 的直流电(DC)。Wi-Fi 模块接收由手机端自主设计的调光 Application(APP)发出的各色占空比信号, 并将信号反馈至 STM32-ARM 模块。STM32-ARM 模块根据占空比与光通量关系控制 R/G/B/C/Y/WW LED 光源模块混合比例, 实现各色 LED 的准确调光^[14], 如图 2 所示。用远方光电公司的 HASS-2000 光谱分析系统测量光源模块中各色 LED 光源在满电流状态下的性能参数, 如表 1 所示, 表中 WW LED 光源的相关色温为 3054 K, 显色指数为 85.2; 红光 LED 的峰值波长为 626.3 nm, 绿光 LED 的峰值波长为 515.9 nm, 蓝光 LED 的峰值波长为 463.5 nm, 青光 LED 峰值波长 472.8 nm, 黄光 LED 峰值波长为 595.2 nm, 各色 LED 光源的色坐标为 (x, y) 。图 3(a)

3 仿真计算与实验测试结果分析

3.1 实验用光源模块及驱动电路

实验采用八脚 R/G/B/WW 4 合 1 LED 灯珠 6 颗和 C、Y 单色 LED 灯珠各 3 颗组成光源模块。为使 LED 灯珠混光更加均匀, 避免 LED 灯珠因发热导致结温过高而引起色漂移和光效降低等问题, 基于光线追迹分析和热性能分析优化阵列排布, 最终按照优化的阵列排布将 LED 灯珠用导热胶固定在带有散热器的铝基板上, 如图 1 所示。

为 6 色 LED 色坐标、两色混合后的色坐标以及覆盖的色域范围。图 3(b) 为 6 色 LED 在满电流状态的相对光谱功率分布。

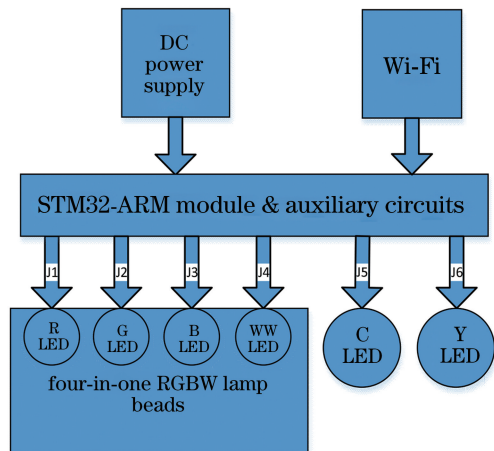


图 2 R/G/B/C/Y/WW LED 光源模块驱动电路原理图

Fig. 2 R/G/B/C/Y/WW LED module drive circuit schematic

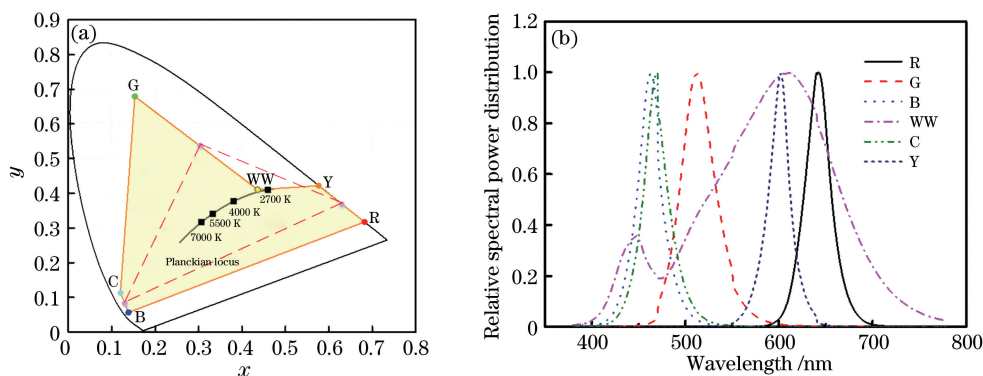


图 3 R/G/B/C/Y/WW LED 光源参数。(a) 6 色 LED 色坐标;(b) LED 光源相对光谱功率分布
Fig. 3 Light source parameters of R/G/B/C/Y/WW LED. (a) Chromaticity coordinate of each LED;
(b) relative spectral power distribution of the LED

表 1 实验中 R/G/B/C/Y/WW 灯珠参数

Table 1 R/G/B/C/Y/WW lamp bead parameters in the experiment

Channel	x	y	Luminous flux /lm	Power /W
R	0.6825	0.3174	561.44	2.27
G	0.1529	0.6796	854	2.88
B	0.1384	0.0566	220.95	2.94
C	0.1195	0.1128	146.3	2.96
Y	0.5768	0.4221	170.7	2.11
WW	0.4363	0.4103	584.41	2.74

电公司的 HASS-2000 光谱分析系统测试得出 R/G/B/C/Y/WW 6 色 LED 占空比 D 在 $[0,100]$ 范围内所对应的光通量,并对测试数据进行线性拟合,其相关系数 R^2 在 $0.99899 \sim 0.99997$ 之间(如图 4 所示),同时可得这 6 色 LED 的光通量与占空比间的关系为

$$\begin{cases} D_R = (\Phi_R - 0.7772)/1.01288 \\ D_G = (\Phi_G + 5.84067)/5.90503 \\ D_B = (\Phi_B + 1.31507)/1.13666 \\ D_{WW} = (\Phi_{WW} + 9.24933)/5.92664 \\ D_C = (\Phi_C - 4.78953)/2.38137 \\ D_Y = (\Phi_Y - 3.4872)/0.76068 \end{cases} \quad (6)$$

3.2 实验用光源模块占空比与光通量关系

光通量与占空比存在线性关系^[9],利用远方光

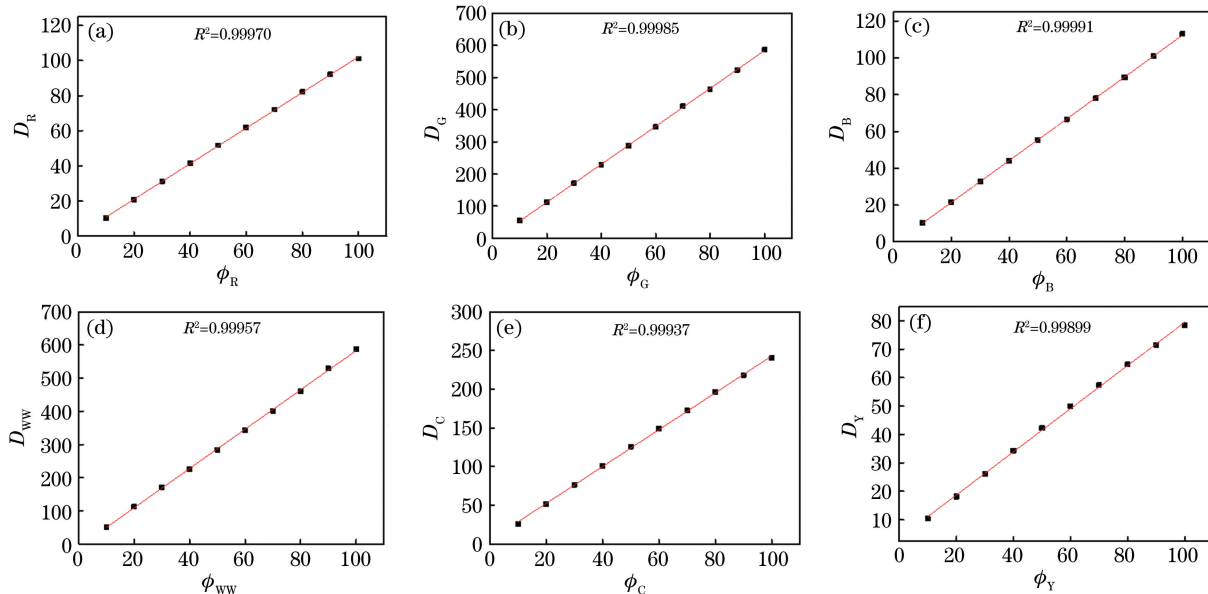


图 4 R/G/B/C/Y/WW 6 色 LED 占空比与光通量间的关系。(a) Φ_R-D_R ;(b) Φ_G-D_G ;(c) Φ_B-D_B ;
(d) $\Phi_{WW}-D_{WW}$;(e) Φ_C-D_C ;(f) Φ_Y-D_Y

Fig. 4 Relationship between duty cycle and luminous flux of R/G/B/C/Y/WW LED. (a) Φ_R-D_R ;(b) Φ_G-D_G ;
(c) Φ_B-D_B ;(d) $\Phi_{WW}-D_{WW}$;(e) Φ_C-D_C ;(f) Φ_Y-D_Y

3.3 最优显色指数计算

由(3)~(5)式可知,不同的 r_1, r_2, r_3 值会得出不同的R/G/B/C/Y/WW 6色LED合成白光的配比关系,不同的配光比会影响其色温及显色性能。因此,要想在一定色温下得到最优的显色指数,需要计算6色LED光源模块的最优配比。在6色调光约束范围内,沿黑体轨迹取色坐标 (x, y) 在 $(0.4600, 0.4104), (0.3805, 0.3766), (0.3325, 0.3409)$ 和 $(0.3065, 0.3164)$ 处所对应的相关色温为 $T_c = 2700, 4000, 5500, 7000$ K。根据(1)~(6)式,可计算出6色LED合成白光的光谱功率分布,同时由一般显色指数的计算公式 $R_a = \sum_{i=1}^8 R_i / 8$,可计算出混合白光的一般显色指数 $R_a^{[5-6, 15]}$,其中 $R_i = 100 - 4.6\Delta E_i$, ΔE_i 为14种颜

色样品在标准光源与待测光源下的色差, $i = 1, 2, \dots, 14$ 。采用遍历算法,在 r_1, r_2, r_3 分别在 $[0.05, 1]$ 范围内每隔0.05取值,在上述4种相关色温下可产生32000个 R_a 值,图5~8分别为 $T_c = 2700, 4000, 5500, 7000$ K下,合成白光显色指数 $R_a > 70$ 时, r_1 与 R_a 间的变化关系图。从图中可以看出,在 $T_c = 2700$ K时, $r_1 = 0.50, r_2 = 0.95, r_3 = 0.10$,能够得到一个最优的显色指数 $R_a = 96.4$;在 $T_c = 4000$ K时, $r_1 = 0.55, r_2 = 0.95, r_3 = 0.15$,能够得到一个最优的显色指数 $R_a = 97.0$;在 $T_c = 5500$ K时, $r_1 = 0.55, r_2 = 0.95, r_3 = 0.20$,能够得到一个最优的显色指数 $R_a = 97.3$;在 $T_c = 7000$ K时, $r_1 = 0.60, r_2 = 1.00, r_3 = 0.10$,能够得到一个最优的显色指数 $R_a = 97.4$ 。

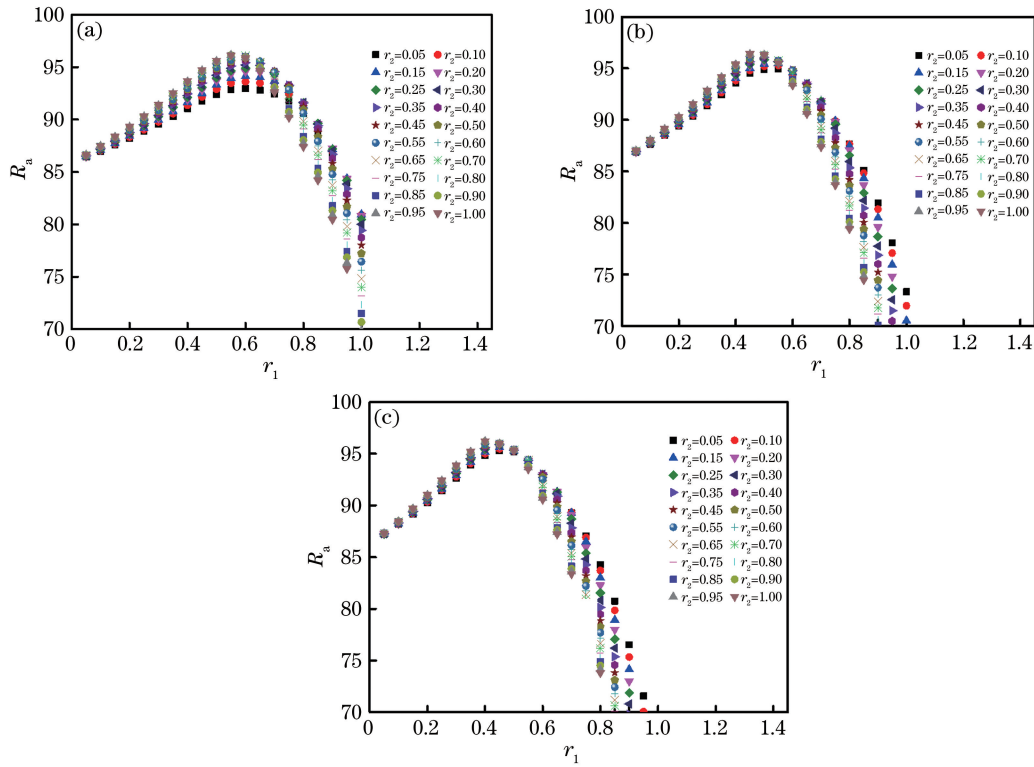


图5 当 $T_c = 2700$ K, r_2 在 $[0.05, 1.00]$ 范围内时, R_a 随 r_1 的变化关系。(a) $r_3 = 0.05$; (b) $r_3 = 0.10$; (c) $r_3 = 0.15$

Fig. 5 Relationship between R_a and r_1 at $T_c = 2700$ K and $r_2 = [0.05, 1.00]$. (a) $r_3 = 0.05$; (b) $r_3 = 0.10$; (c) $r_3 = 0.15$

3.4 实验结果及分析

当目标混合光中光通百分比 r_1, r_2, r_3 以及预期光通量已知时,可根据(3)~(6)式计算出各色光源对应的占空比。将混合白光光通量设定为500 lm,在相关色温 $T_c = 2700, 4000, 5500, 7000$ K时通过优化遍历算法模拟计算获得的最优显色指数,并对该优化方法进行实验验证。为保证LED光源模块处于稳定状态,实验中改变每种色温后,需先

将LED模块点亮使其稳定2 min后再进行测试,实验结果如表2和图9所示。

由表2可知,光通量、相关色温、一般显色指数的设定值与测量值一致性较好,光通量的最大相对误差为1.34%,相关色温的最大相对误差为1.96%,一般显色指数的最大相对误差为1.24%,发光效率的范围为 $146.81 \sim 152.40 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

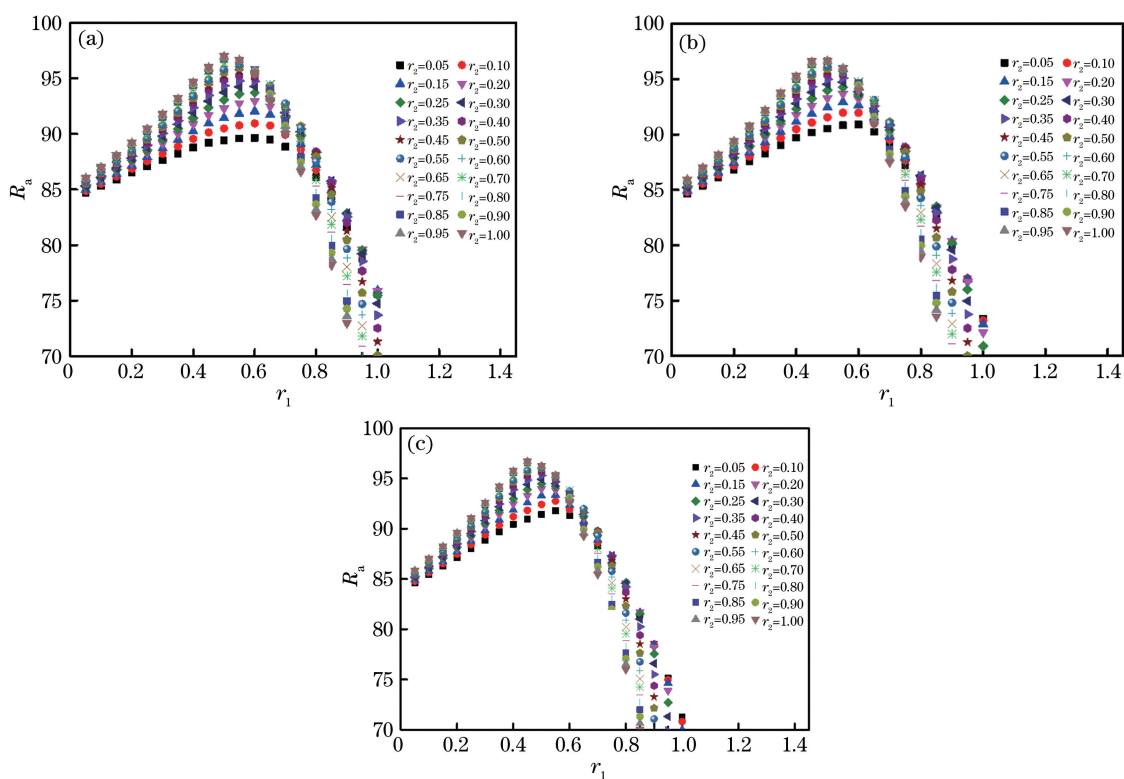


图 6 当 $T_c=4000\text{ K}$, r_2 在 $[0.05, 1.00]$ 范围时, R_a 随 r_1 的变化关系。(a) $r_3=0.15$; (b) $r_3=0.20$; (c) $r_3=0.25$

Fig. 6 Relationship between R_a and r_1 at $T_c=4000\text{ K}$ and $r_2=[0.05, 1.00]$. (a) $r_3=0.15$; (b) $r_3=0.20$; (c) $r_3=0.25$

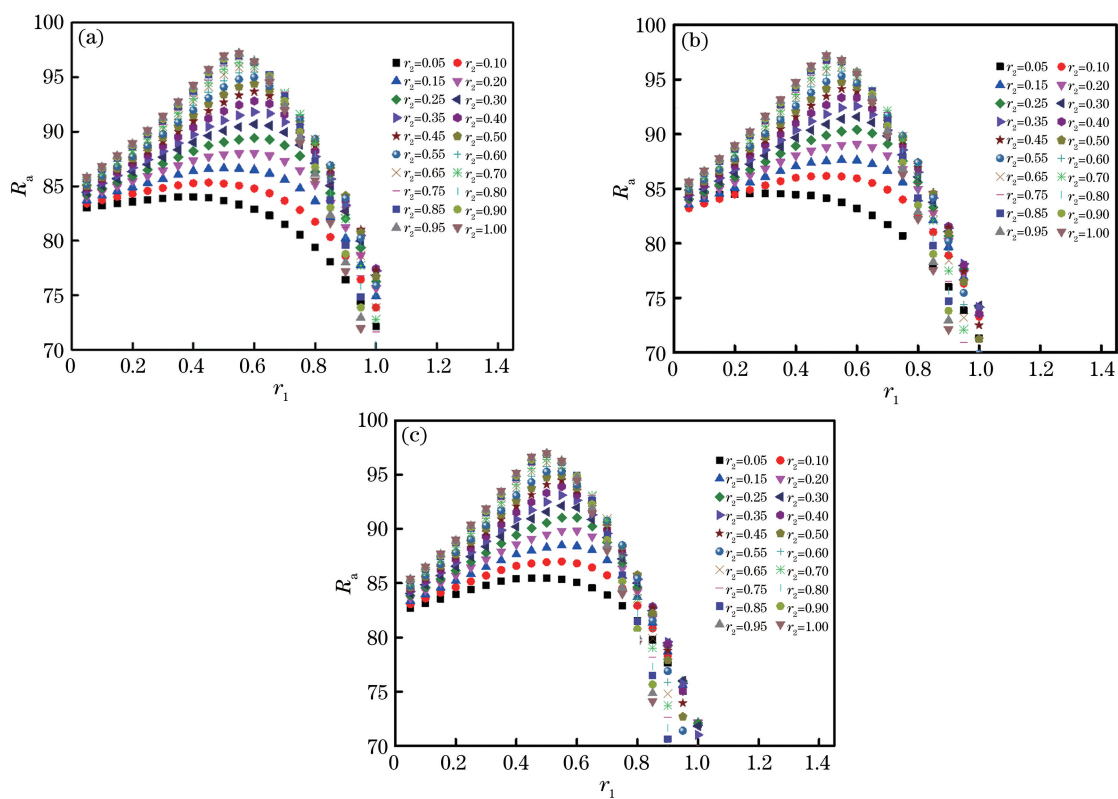


图 7 当 $T_c=5500\text{ K}$, r_2 在 $[0.05, 1.00]$ 范围时, R_a 随 r_1 的变化关系。(a) $r_3=0.15$; (b) $r_3=0.20$; (c) $r_3=0.25$

Fig. 7 Relationship between R_a and r_1 at $T_c=5500\text{ K}$ and $r_2=[0.05, 1.00]$. (a) $r_3=0.15$; (b) $r_3=0.20$; (c) $r_3=0.25$

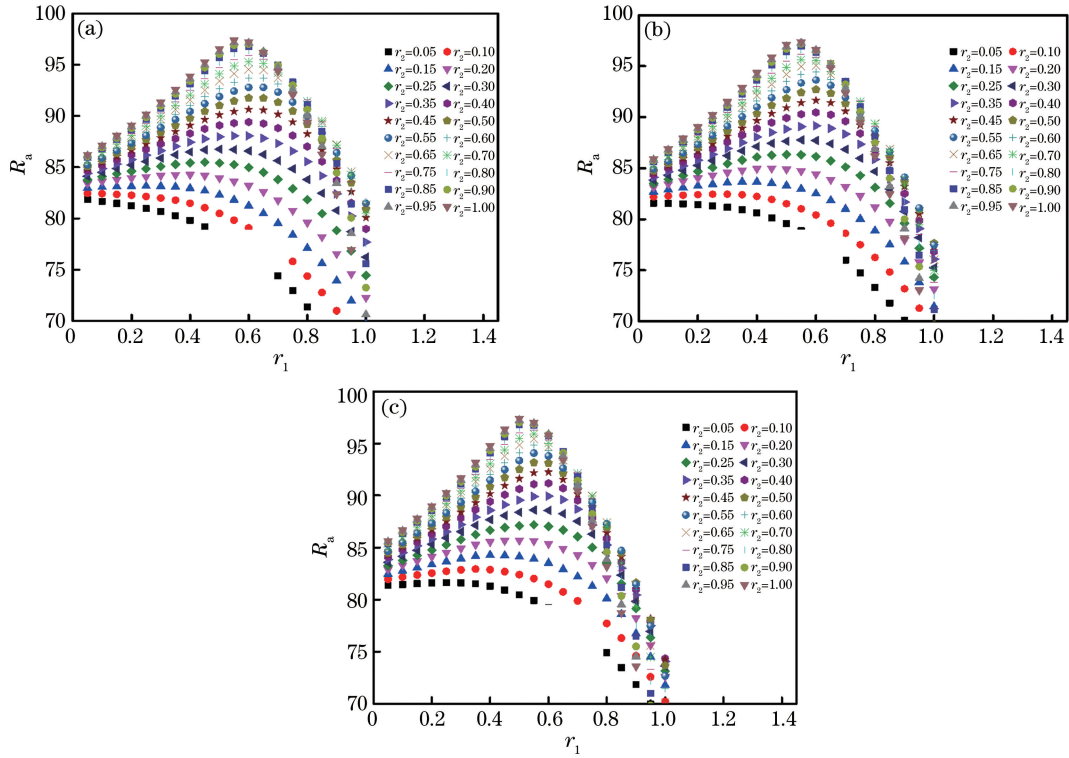


图 8 当 $T_c=7000\text{ K}$, r_2 在 $[0.05, 1.00]$ 范围时, R_a 随 r_1 的变化关系。(a) $r_3=0.10$; (b) $r_3=0.15$; (c) $r_3=0.20$

Fig. 8 Relationship between R_a and r_1 at $T_c=7000\text{ K}$ and $r_2=[0.05, 1.00]$. (a) $r_3=0.10$; (b) $r_3=0.15$; (c) $r_3=0.20$

表 2 当光通量为 500 lm 时, 设定值与测量值的对比

Table 2 Comparison of the set and measured values at luminous flux $\Phi=500\text{ lm}$

Set T_c / K	Measured Φ / lm	Relative error of $\Phi / \%$	Measured power / W	Measured luminous efficiency / $(\text{lm} \cdot \text{W}^{-1})$	Measured T_c / K	Relative error of $T_c / \%$	Set R_a	Measured R_a	Relative error of $R_a / \%$
2700	499.21	0.16	3.33	150.00	2647	1.96	96.4	95.2	1.24
4000	506.71	1.34	3.37	150.24	4070	1.75	97.0	96.1	0.93
5500	505.53	1.11	3.32	152.40	5420	1.45	97.3	96.2	1.13
7000	505.76	1.15	3.45	146.81	6927	1.04	97.4	96.4	1.03

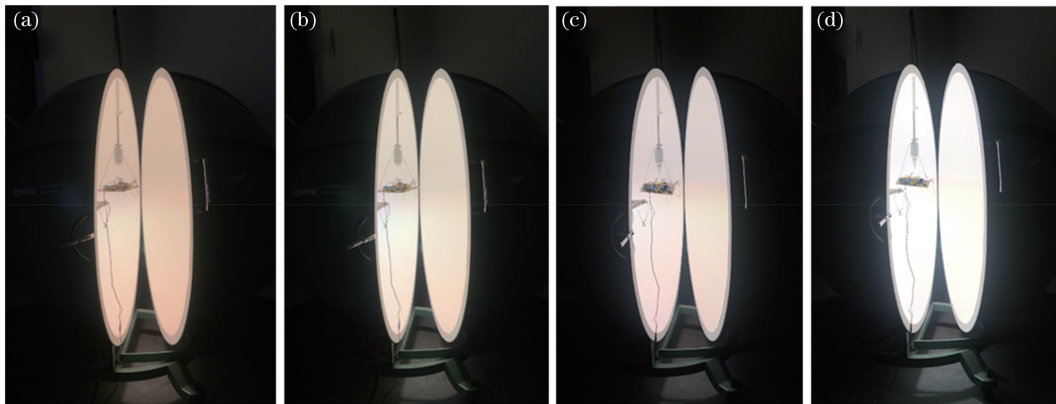


图 9 R/G/B/C/Y/WW LED 光源模块的照明效果图。(a) $T_c=2700\text{ K}$; (b) $T_c=4000\text{ K}$; (c) $T_c=5500\text{ K}$; (d) $T_c=7000\text{ K}$

Fig. 9 Lighting effect photos of R/G/B/C/Y/WW LED module. (a) $T_c=2700\text{ K}$; (b) $T_c=4000\text{ K}$; (c) $T_c=5500\text{ K}$; (d) $T_c=7000\text{ K}$

4 结 论

根据脉冲宽度调制特点研究了 R/G/B/C/Y/WW 6 色 LED 混合白光的优化方法。该方法根据多色混合白光光源相对光谱功率分布符合线性叠加的原理,采用 1931 CIE-XYZ 三刺激值建立了混合光源 G+WW, B+C 和 R+Y 色坐标与光通量贡献率的函数关系,在 6 色调光约束范围内,沿黑体轨迹取色坐标 (x, y) 在 $(0.4600, 0.4104)$, $(0.3805, 0.3766)$, $(0.3325, 0.3409)$ 和 $(0.3065, 0.3164)$ 处所对应的相关色温 $T_c = 2700, 4000, 5500, 7000$ K。通过优化遍历范围,得到上述 4 种色温情况下最优参数配比及最大的显色指数 R_a, R_s 分别为 96.4, 97.0, 97.3, 97.4, 并采用 R/G/B/C/Y/WW 6 色 LED PWM 调光系统对该优化方法进行实验验证。实验结果表明,计算结果与实验测试结果的一致性较好。运用上述方法,可以根据实际的用光需求,实现显色指数和色温的控制。该方法可用于指导实际工程的设计。需要注意的是,该工作采用的 6 色光源的光谱功率分布以及配光曲线会对最终混合白光的相关色温范围、一般显色指数、发光效率、以及照明均匀性等产生影响,同时光源模块的散热性能会对混合白光的光电参数造成一定的影响,这些问题有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Mei J J, Liu L L. Research on white light color temperature deviation based on tricolor LEDs [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0833001.
梅健健, 刘丽兰. 基于三基色 LED 的白光色温偏差研究 [J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0833001.
- [3] 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.
- [4] Wu M, Deng D G, Huang F F, et al. A full-spectrum emission phosphor of white LED and its fabrication method: CN108192614A [P]. 2018-06-22.
吴铭, 邓德刚, 黄飞飞, 等. 一种白光 LED 用全光谱发射荧光粉及其制备方法: CN108192614A [P]. 2018-06-22.
- [5] Guo Z Q, Gao Y L, Lü Y J, et al. Spectrum optimization of tri-color white LEDs at fixed correlated color temperature [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2011, 22(7): 992-996.
郭自泉, 高玉琳, 吕毅军, 等. 固定相关色温下三基色合成白光 LED 的光谱优化 [J]. *光电子·激光*, 2011, 22(7): 992-996.
- [6] Chen J B, Yu J H, Gao Y F, et al. Study on tunable color temperature white LED light source with ultra-high color rendering index [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1023002.
湛江波, 余建华, 高亚飞, 等. 超高显色指数和色温可调的 LED 白光照明光源研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1023002.
- [7] 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.
- [8] Jin Y Z, Han Q Y, Zhang S D. Simulation and calculation of high quality white light mixed with three channels and six color LEDs [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2015, 26(2): 54-59.
金宇章, 韩秋漪, 张善端. 三通道六色 LED 合成高品质白光的模拟和计算 [J]. *照明工程学报*, 2015, 26(2): 54-59.
- [9] Wu C C, Hu N C, Chen J N, et al. Parameterised LED current regulator for pulse width modulation switch delay for accurate colour mixing in multi-LED light sources [J]. *Lighting Research & Technology*, 2014, 46(2): 171-186.
- [10] Song P C, Wen S S, Chen Y C. Research on color mixing based on RGBW-LEDs [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0923004.
宋鹏程, 文尚胜, 陈颖聪. 基于 RGBW 四色 LED 的混光研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0923004.
- [11] Xu M S, Zhang H X, Zhou Q B, et al. Effects of spectral parameters on the light properties of red-green-blue white light-emitting diodes [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(16): 4456.
- [12] Jing Q C, Jiao S L. *Colorimetry* [M]. Beijing: Science Press, 1979.
荆其诚, 焦书兰. *色度学* [M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [13] Dai Q, Cai W, Hao L, et al. Spectral optimisation and a novel lighting-design space based on circadian stimulus [J]. *Lighting Research & Technology*, 2018, 50(8): 1198-1211.
- [14] Yu C Y, Jin P, Zhou Q F. Optimizing color rendering for mixed-color white light LED [J].

Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(5): 1316-1319.

喻春雨, 金鹏, 周奇峰. 多基色混合白光 LED 显色性优化研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(5): 1316-1319.

[15] Hu Y B, Zhuang Q R, Liu S W, et al. Study on

LEDs synthesized high color rendering index white light source[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0323003.

胡奕彬, 庄其仁, 刘士伟, 等. 高显色指数 LED 合成白光光源的研究[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0323003.