

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

田会娟^{1,2}, 柳建新^{2,3}, 洪振^{2,3}, 张辉^{1,2}

¹天津工业大学电气工程与自动化学院天津市电工电能新技术重点实验室, 天津 300387;

²大功率半导体照明应用系统教育部工程研究中心, 天津 300387;

³天津工业大学电子与信息工程学院, 天津 300387

摘要 提出了一种基于脉冲宽度调制(PWM)的红/绿/蓝/暖白(R/G/B/WW)4色发光二极管(LED)调光调色计算模型。该模型根据二通道和三通道 PWM 的特点,采用黑体轨迹的 Chebyshev 方法,确定合成光的色坐标和相关色温(CCT)关系。在优化目标显色性能最佳时,建立了混合光的色坐标与占空比、相关色温与占空比的函数关系,并采用 R/G/B/WW 4 色 LED 进行实验验证。结果表明:R/G/B/WW LED 模块可实现相关色温在 2900~7600 K 范围的白光调节。当光通量设定为 300 lm 时,相关色温的最大相对误差为 0.99%,混合光一般显色指数(CRI)最大相对误差为 0.11%;当光通量值在[150,800]范围内变化时,其最大相对误差为 2.02%。该模型可应用于 4 通道 LED 调光调色,其计算方法简单、调光精度高、硬件易于实现。

关键词 光学器件; 动态色温; 脉冲宽度调制; 发光二极管

中图分类号 TN206

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0423002

Dimming Method for R/G/B/WW Light Emitting Diode Based on Four Channels' Pulse Width Modulation

Tian Huijuan^{1,2}, Liu Jianxin^{2,3}, Hong Zhen^{2,3}, Zhang Hui^{1,2}

¹ Tianjin Key Laboratory of Advanced Electrical Engineering and Energy Technology, School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

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

³ School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China

Abstract This paper proposes a dimming calculation model for red/green/blue/warm-white (R/G/B/WW) light emitting diode (LED) based on four channels' pulse width modulation (PWM). According to the characteristics of two-channel and three-channel PWM, the proposed model adopts Chebyshev method of black body locus to determine the relationship between chromaticity coordinate and correlated color temperature (CCT) of the synthesized light. When the color rendering performance is optimized, the functional relationships between chromaticity coordinate and duty cycles, CCT and duty cycles of the mixed light are established. And the experimental verification is carried out with R/B/G/WW LED. The experimental results show that R/G/B/WW LED module can realize a wide range of CCT tunable white light from 2900 K to 7600 K. When the luminous flux is set to 300 lm, the maximum relative error of CCT is 0.99%, and the maximum relative error of color rendering index (CRI) of the mixed light is 0.11%. When the luminous flux changes in the range of [150, 800], the maximum relative error is 2.02%. The model can be applied to LED dimming of four channels. And its calculation method is simple, the dimming precision is high, and the hardware is easy to implement.

Key words optical devices; dynamic color temperature; pulse width modulation; light emitting diode

OCIS codes 230.0250; 230.3670; 250.4745; 220.2945

收稿日期: 2017-08-24; **收到修改稿日期:** 2017-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(61504095)、火炬计划项目(2013GH580096)

作者简介: 田会娟(1979-),女,博士,副教授,主要从事光电检测与控制技术等方面的研究。

E-mail: tianhjgx@126.com

1 引 言

发光二极管(LED)光源因具有发光效率高、寿命长、光色可调、节能环保等优点,在室内外照明、景观照明、背光、显示、可见光通信等方面有着广泛的应用^[1-4]。目前,白光 LED 多采用蓝光激发钇铝石榴石荧光粉来获得,该方法工艺成熟、成本低,但存在色温范围单一、显色性差等缺点。随着人们生活水平的提高以及 LED 应用领域的扩大,单一色温白光 LED 已不能满足实际应用的需求^[5-10]。在模拟日光照明、背光等应用方面,实现亮度、色温在宽范围内的动态调节,可保持高的显色性,提高光照品质,创建健康、舒适的光环境,已成为近年来研究的热点^[3-10]。

采用冷/暖白光 LED 可实现色温可调,其缺点是白光的显色指数(CRI)不高^[5-8]。采用红/绿/蓝(R/G/B)LED 进行混光,通过调节三种光源的混合比例实现色温调节,这种光源模块的优点是调光范围广,缺点是显色指数较低^[7-8, 11-12]。为提高 LED 合成白光的显色性,研究发现,在三基色基础上添加白光 LED 构成的新光源模块可以兼顾调光范围和显色性能,该方面的研究一般采用 LED 光谱的数学模型进行模拟实验^[13]。综合考虑显色性能和调光范围,4 色 LED 光源模型具有较为明显的优势。Ohno 等^[14]模拟计算三基色芯片和四基色芯片 LED 模型得到低色温高显色指数的白光,但多芯片集成封装为一颗 LED,结构比较复杂、稳定性差、成本较高。Xu 等^[3]采用实验和模拟仿真方法研究了光谱参量对 R/G/B-W LEDs 的显色指数和发光效率的影响。宋鹏程等^[11]针对 RGBW 4 色混光方程组的不定解性,提出借助 Matlab 软件对混合光的光效和一般显色指数进行多元约束条件下的寻优,通过平衡光效和显色性能,实现一般显色指数大于 90 的高光效白光。因此,研究易于实现、成本低、能满足优质照明需求的色温可调、显色指数高的合成白光 LED 光源是目前 LED 照明技术的研究热点^[12]。

本文提出了一种基于脉冲宽度调制(PWM)的红/绿/蓝/暖白(R/G/B/WW)4 色 LED 调光调色计算模型。该模型根据二通道和三通道 PWM 的特点,采用黑体轨迹的 Chebyshev 方法,确定二通道合成光的色坐标和相关色温关系,建立了 4 色混合光的色坐标与占空比、相关色温与占空比的函数关系,并进行实验验证。

2 理论计算

PWM 调光是指通过调节输入驱动模块 PWM 占空比,实现所驱动 LED 光源发光强度的改变,与其他方式相比,具有不改变 LED 电流脉冲幅值、驱动器效率高、连接控制系统简单等优点^[10,15]。对于同一 LED 驱动模块,在工程上为讨论方便,假定输入驱动的占空比与光源输出的光通量成正比例函数关系,结合格拉斯曼颜色定律^[4-5,10],根据混色原理及国际照明委员会(CIE)1931 色坐标计算方法^[14],推导出 n 种已知色混光方程组为^[6-7,11]:

$$\begin{cases} Y_m = D_1 Y_1 + D_2 Y_2 + \dots + D_n Y_n \\ x_m = \frac{X_m}{X_m + Y_m + Z_m} = \frac{C_1 D_1 x_1 + C_2 D_2 x_2 + \dots + C_n D_n x_n}{C_1 D_1 + C_2 D_2 + \dots + C_n D_n}, (1) \\ y_m = \frac{Y_m}{X_m + Y_m + Z_m} = \frac{C_1 D_1 y_1 + C_2 D_2 y_2 + \dots + C_n D_n y_n}{C_1 D_1 + C_2 D_2 + \dots + C_n D_n} \end{cases}$$

式中, X_m, Y_m, Z_m 是混合光 M 的三刺激值, Y_i 为光源 i 在满电流工作状态下的刺激值 Y ,在 CIE-1931 标准色度系统中刺激值 Y 等于光通量。 $C_i = Y_i/y_i$ 为光源 i 在满电流工作下的三刺激值之和^[11]。 D_i 和 (x_i, y_i) 分别为光源 i 对应的占空比及色坐标。

以 R/G/B/WW 4 色 LED 光源模块为例,由 (1) 式可得 4 色方程组的占空比与色坐标的函数关系,对确定的色坐标和光通量,4 色方程组无定解。实验根据二通道 PWM 调光调色关系,若二通道两光源设为 G/WW LED 模块,可确定目标光源 M_1 的色坐标为 (x_{GW}, y_{GW}) 和光通量为 Y_{GW} 的占空比与色坐标的函数关系为^[5]:

$$\begin{cases} D_G = \frac{y_G(x_w - x_{GW})}{y_w(x_{GW} - x_G) + y_G(x_w - x_{GW})} \cdot \frac{Y_{GW}}{Y_G} \\ D_W = \frac{y_w(x_{GW} - x_G)}{y_w(x_{GW} - x_G) + y_G(x_w - x_{GW})} \cdot \frac{Y_{GW}}{Y_w} \end{cases}, (2)$$

式中, $(x_G, y_G), (x_w, y_w)$ 为绿、暖白(G/WW) LED 模块的色坐标, Y_G, Y_w 分别为其光通量, D_G, D_w 为绿、暖白 LED 模块的占空比。将目标光源 M_1 与红、蓝 LED 光源组合,根据三通道 PWM 调光关系,可得 M_1 /R/B LED 光源模块混合白光的占空比与色坐标的函数关系为:

$$\begin{cases} D_{GW} = \frac{(y_B - y_R)(x_R - x) + (y - y_R)(x_B - x_R)}{(y_B - y_R)(x_R - x_{GW}) + (y_{GW} - y_R)(x_B - x_R)} \cdot \frac{y_{GW} Y_m}{y Y_{MGW}} \\ D_R = \frac{(y_{GW} - y_B)(x_B - x) + (y - y_B)(x_{GW} - x_B)}{(y_{GW} - y_B)(x_B - x_R) + (y_R - y_B)(x_{GW} - x_B)} \cdot \frac{y_R Y_m}{y Y_R} \\ D_B = \frac{(y_{GW} - y_R)(x_R - x) + (y - y_R)(x_{GW} - x_R)}{(y_{GW} - y_R)(x_R - x_B) + (y_B - y_R)(x_{GW} - x_R)} \cdot \frac{y_B Y_m}{y Y_B} \end{cases}, \quad (3)$$

式中, (x, y) 是 4 色混合光 M 的色坐标, Y 为混合光 M 的光通量, (x_R, y_R) 、 (x_B, y_B) 为红、蓝 LED 模块的色坐标, Y_{MGW} 、 Y_R 、 Y_B 为 M_1 、红、蓝 LED 光源在满电流工作状态下的光通量, D_{GW} 、 D_R 、 D_B 为 M_1 、红、蓝 LED 模块的占空比, 其中 $Y_{GW} = D_{GW} \cdot Y_{MGW}$ 。由(3)式可知, 求解(3)式需得到已知相关色温下各光源模块的色坐标。由模拟黑体轨迹的 Chebyshev 方法^[15], 可得相关色温(CCT)在 1000~15000 K 内的色坐标和相关色温的函数关系为^[16]:

$$\begin{cases} u = \frac{0.860117757 + 1.54118254 \times 10^{-4} V_{CCT} + 1.28641212 \times 10^{-7} V_{CCT}^2}{1 + 8.42420235 \times 10^{-4} V_{CCT} + 7.08145163 \times 10^{-7} V_{CCT}^2} \\ v = \frac{0.317398726 + 4.22806245 \times 10^{-5} V_{CCT} + 4.2048169 \times 10^{-8} V_{CCT}^2}{1 - 2.89741816 \times 10^{-5} V_{CCT} + 1.61456053 \times 10^{-7} V_{CCT}^2} \end{cases}, \quad (4)$$

式中, (u, v) 为在 CIE1960 色度空间(UCS)图中的色坐标, 将其转换成 CIE1931 色坐标形式, 可得到混合光 M 的色坐标: $x = 3u / (4 - 8v + 2u)$, $y = 2v / (4 - 8v + 2u)$ 。

上述中特定光源 M_1 的色坐标 (x_{GW}, y_{GW}) 可通过实验确定。根据 CIE 作图法, 可取的绿、暖白 LED 色坐标直线上若干色坐标 (x_{GW}, y_{GW}) , 由(3)~(4)式可得到红、蓝 LED 模块的占空比 D_R 、 D_B 和特定光源 M_1 的光通量 Y_{GW} 。由(2)式得到绿、暖白驱动模块 PWM 占空比。通过多次测试, 可以获得在一定色温范围内 4 色 LED 混合白光在高显色指数下的系列混合光 M 相关色温 V_{CCT} 与色坐标 x 间的关系。实验设定相关色温范围为 2900~7600 K, 选取 11 种不同相关色温的情况, 通过 Origin9.1 软件进行拟合运算, 获得不同色温范围内相关色温 V_{CCT} 与 x_{GW} 的函数关系为:

$$\begin{cases} x_{GW} = -1.6 \times 10^{-5} \times V_{CCT} + 0.467 & (2900 \leq V_{CCT} < 3500) \\ x_{GW} = -1.4 \times 10^{-5} \times V_{CCT} + 0.458 & (3500 \leq V_{CCT} < 4000) \\ x_{GW} = -1.0 \times 10^{-5} \times V_{CCT} + 0.442 & (4000 \leq V_{CCT} < 4500) \\ x_{GW} = -4.0 \times 10^{-6} \times V_{CCT} + 0.415 & (4500 \leq V_{CCT} < 5000) \\ x_{GW} = -8.0 \times 10^{-6} \times V_{CCT} + 0.435 & (5000 \leq V_{CCT} < 5500) \\ x_{GW} = -4.0 \times 10^{-6} \times V_{CCT} + 0.413 & (5500 \leq V_{CCT} < 6000) \\ x_{GW} = -8.0 \times 10^{-6} \times V_{CCT} + 0.437 & (6000 \leq V_{CCT} < 6500) \\ x_{GW} = -4.0 \times 10^{-6} \times V_{CCT} + 0.411 & (6500 \leq V_{CCT} < 7000) \\ x_{GW} = -3.0 \times 10^{-6} \times V_{CCT} + 0.406 & (7000 \leq V_{CCT} < 7600) \end{cases}. \quad (5)$$

色坐标 y_{GW} 为:

$$y_{GW} = \frac{y_w - y_G}{x_w - x_G} \cdot (x_{GW} - x_G) + y_G. \quad (6)$$

3 实验验证

3.1 实验用光源模块

实验采用 R/G/B/WW 4 色 LED 灯珠各 6 颗组成光源模块。用远方光电公司的 HASS-2000 光谱分析系统测量各色 LED 在满电流工作状态下的色度学参数及相对光谱功率分布, 如表 1 和图 1 所示。同一种 LED 灯珠串联, 4 种类型灯珠并联, 焊接在铝基板上。为降低结温引起的色漂移和避免出

光效率降低等问题^[7], 实验中将铝基板用导热胶固定在散热器上, 以减少由结温变化造成的误差。

表 1 实验中 R/G/B/WW LED 模块参数

Table 1 Parameters of R/G/B/WW LED module in the experiment

	x	y	Luminous flux /lm	Peak wavelength /nm	Power /W
Red LED	0.6831	0.3114	186.42	631	4.02
Green LED	0.1868	0.6971	291.36	522	3.69
Blue LED	0.1501	0.0311	57.103	451	3.28
WW LED	0.4314	0.4082	613.58	$\frac{V_{CCT}/K}{3132}$ CRI 83.5	6.14

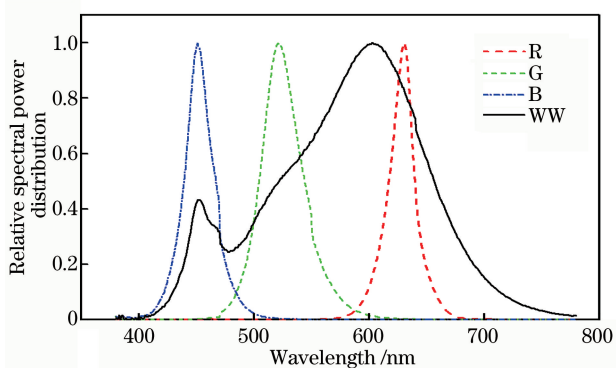


图 1 R/G/B/WW LED 光源相对光谱功率分布

Fig. 1 Relative spectral power distribution of R/G/B/WW LED sources

驱动电路主要由直流稳压电源、WiFi 模块、STM32-ARM 模块、R/G/B/WW LED 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 5 V 的直流电;WiFi 模块接收客户端的调光控制信号并将该信号反馈到 STM32-ARM 模块;STM32-ARM 模块根据调光公式(5)式编写的程序段控制 R/G/B/WW LED 光源模块混合比例,从而实现对混合光相关色温、光通量等参数的控制。

3.2 实验结果及分析

当目标混合光的相关色温以及预期光通量已知时,可根据(2)~(3)式计算出对应的占空比。

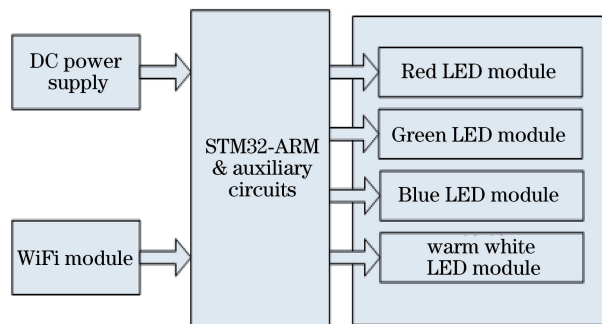


图 2 R/G/B/WW LED 光源模块驱动电路原理图

Fig. 2 Schematic graph of driving circuit of R/G/B/WW LED source module

根据上述讨论,在调光约束范围内,取相关色温在 2900~7600 K,光通量设定为 300 lm,对该调光方法进行实验验证,实验结果如表 2 和图 3 所示。由表 2 可知,相关色温和光通量的设定值与测量值一致性较好,相关色温的最大相对误差为 0.99%,光通量的最大相对误差为 2.24%。同时,进一步分析了该调光模型下 LED 光源模块的显色性能,如表 2 所示:当相关色温在 2900~7600 K 范围内调节时,一般显色指数值均在较高范围[94.1, 96.0]内,设定值与测试值间误差较小,最大相对误差为 0.11%,且随色温的升高而有所降低。图 4 为相关色温在 3000, 5000, 7000 K 时 4 色 LED 模块的照明效果。

表 2 当光通量 $\phi=300$ lm 时,设定值与测量值的对比

Table 2 Contrast between the set and measured values at luminous flux $\phi=300$ lm

Set CCT /K	Measured CCT /K	Relative error of CCT /%	Measured luminous flux ϕ /lm	Relative error of luminous flux ϕ /%	Set CRI	Measured CRI	Relative error of CRI /%
2900	2890	0.34	303.40	1.13	96.1	96.0	0.10
3200	3213	0.41	302.73	0.91	96.0	96.0	0.00
3600	3605	0.14	300.86	0.29	96.1	96.0	0.10
4000	3977	0.58	299.23	0.26	96.1	96.0	0.10
4400	4366	0.77	297.84	0.72	96.0	95.9	0.10
4800	4757	0.90	297.86	0.71	95.9	95.9	0.00
5200	5191	0.17	295.62	1.46	94.8	94.7	0.11
5600	5552	0.86	295.75	1.42	94.7	94.6	0.11
6000	5956	0.73	294.49	1.84	94.6	94.5	0.11
6400	6349	0.80	295.20	1.60	94.4	94.4	0.00
6800	6733	0.99	294.10	1.97	94.3	94.3	0.00
7200	7162	0.53	293.69	2.10	94.3	94.2	0.11
7600	7591	0.12	293.28	2.24	94.2	94.1	0.11



图 3 R/G/B/WW LED 光源模块测试系统

Fig. 3 Testing system of R/G/B/WW LED source module

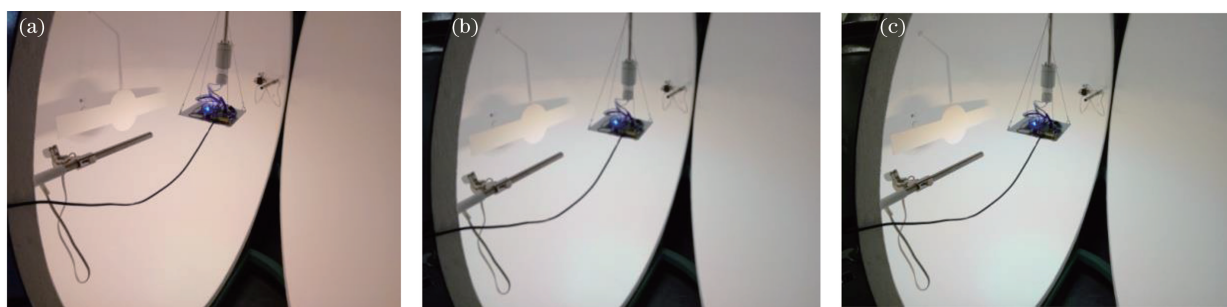


图 4 R/G/B/WW LED 模块的照明效果图。(a) $V_{CCT}=3000\text{ K}$; (b) $V_{CCT}=5000\text{ K}$; (c) $V_{CCT}=7000\text{ K}$

Fig. 4 Lighting effect photos of R/G/B/WW LED module. (a) $V_{CCT}=3000\text{ K}$; (b) $V_{CCT}=5000\text{ K}$; (c) $V_{CCT}=7000\text{ K}$

表 3 当 $V_{CCT}=5000\text{ K}$ 时设定值与测量值的对比

Table 3 Contrast between the set and measured values at $V_{CCT}=5000\text{ K}$

Measured CCT /K	Relative error of CCT /%	Set luminous flux ϕ /lm	Measured luminous flux ϕ /lm	Relative error of luminous flux ϕ /%	Measured CRI
5098	1.96	150	152.95	1.97	94.6
5010	0.20	200	200.35	0.17	94.6
4989	0.22	250	247.77	0.89	95.7
4952	0.96	300	295.84	1.39	95.7
4922	1.56	350	344.26	1.64	95.8
4922	1.56	400	391.93	2.02	95.8
4905	1.90	450	442.06	1.76	95.8
4908	1.84	500	490.03	1.99	95.8
4893	2.14	550	540.98	1.64	95.9
4867	2.66	600	591.28	1.45	95.9
4867	2.66	650	642.41	1.17	95.9
4867	2.66	700	692.00	1.14	95.9
4853	2.94	750	742.05	1.06	96.0
4863	2.74	800	791.58	1.05	96.0
4956	0.88	850	810.09	4.70	96.0
5070	1.40	851	824.18	3.15	95.0
5098	2.94	851	824.18	4.70	96.0

上述实验设定光通量 $\phi = 300 \text{ lm}$ 时,分析了各种参数的变化情况。为进一步研究光通量的改变对测量结果的影响,设定相关色温 $V_{\text{CCT}} = 5000 \text{ K}$ 时,研究了光通量的变化对调光模型精度的影响。由表 3 可知,当 $V_{\text{CCT}} = 5000 \text{ K}$ 时,测试的相关色温值与设置值间的相对误差最小为 0.20% ,最大为 2.94% 。当光通量 ϕ 在 $150 \sim 800 \text{ lm}$ 范围内变化时,最大相对误差为 2.02% ;在大于 800 lm 时其相对误差变化较大,从 1.05% 增至 4.70% 。同时,也对该模块的显色性进行研究,结果发现一般显色指数 CRI 最小值为 94.6 ,最大为 96 。

4 结 论

可调光调色的 LED 光源是实现智能照明和动态照明的基础。本文根据二通道和三通道脉冲宽度调制 PWM 特点,采用黑体轨迹的 Chebyshev 方法,在优化目标一般显色指数 CRI 最佳时,建立了混合光的色坐标与占空比、相关色温与占空比的函数关系,并采用 R/G/B/WW 4 色 LED 实际制作组合光源模块,进行实验验证。实验结果表明:当一般显色指数 CRI 保持在较高范围 $94.1 \sim 96.0$ 时,可实现 V_{CCT} 在 $2900 \sim 7600 \text{ K}$ 色温范围的混合白光的调节。同时,分别研究了光通量和相关色温的改变对测量结果产生的影响。当光通量 $\phi = 300 \text{ lm}$ 时, V_{CCT} 的最大误差值为 0.99% ;当 $V_{\text{CCT}} = 5000 \text{ K}$ 时,光通量 ϕ 的最大误差值变化较大,光通量 ϕ 在 $150 \sim 800 \text{ lm}$ 范围内时的最大相对误差为 2.02% ,在大于 800 lm 时其误差变化较大,相对误差从 1.05% 增至 4.70% 。同时,也对该模块的相关色温和显色性进行了研究,当 $V_{\text{CCT}} = 5000 \text{ K}$ 时,测量的相关色温 V_{CCT} 与设置值的相对误差最小为 0.20% ,最大为 2.94% ,一般显色指数 CRI 都在 94.6 以上,最高为 96 。需要注意的是,在研究中发现,高色温混合白光的均匀性较差(如图 4 所示)。因该问题不仅涉及到模型的构建,还涉及到各色 LED 光源的配光、照射距离、位置排布等多方面设计的影响。因此,后续工作将对该问题进行系统研究,同时对其混合光效问题进行讨论,探索健康、舒适的 LED 智能调光照明解决方案。

参 考 文 献

- [1] Pulli T, Dönsberg T, Poikonen T, *et al.* Advantages of white LED lamps and new detector technology in photometry [J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(9): 1-7.
- [2] Wang Y G, Huang X X, Tao L, *et al.* 4.5-Gb/s RGB-LED based WDM visible light communication system employing CAP modulation and RLS based adaptive equalization[J]. *Optics Express*, 2015, 23(10):13626-13633.
- [3] 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): 4456-4460.
- [4] 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.
- [5] Xu D S, Chen X, Zhu X, *et al.* A dimming lighting source based on cold and warm white LEDs[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0123004.
徐代升, 陈晓, 朱翔, 等. 基于冷暖白光 LED 的可调色温可调光照明光源 [J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0123004.
- [6] Song P C, Wen S S. A dimming method for LEDs based on three-channel pulse width modulation [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2015, 26(5): 839-846.
宋鹏程, 文尚胜. 基于三通道脉冲宽度调制的 LED 调光调色 [J]. *光电子·激光*, 2015, 26(5): 839-846.
- [7] Song P C, Wen S S, Shang J, *et al.* A dimming method for RGB LED based on three channels' PWM [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0223001.
宋鹏程, 文尚胜, 尚俊, 等. 基于 PWM 的三基色 LED 的调光调色方法 [J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0223001.
- [8] 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.
谌江波, 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.
- [9] Yin L Q, Yang W Q, Li S Z, *et al.* Dynamic color temperature white lighting source based on red green and blue light emitting diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0523004.
殷录桥, 杨卫桥, 李抒智, 等. 基于三基色的动态色温白光发光二极管照明光源 [J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0523004.
- [10] He G X, Zheng L H. Color temperature tunable white-light light-emitting diode clusters with high color rendering index [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(24): 4670-4676.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Speier I, Salsbury M. Color temperature tunable white light LED system [C]. SPIE, 2006, 6337: 63371F.
- [14] Ohno Y. Color rendering and luminous efficacy of white LED spectra[C]. SPIE, 2004, 5530: 88-98.
- [15] Krystek M. An algorithm to calculate correlated color temperature [J]. *Color Research and Application*, 1985, 10(1): 38-40.
- [16] Zhang H, Xu H S, Comparative study of correlated color temperature algorithm for lighting sources[J]. *Optical Instruments*, 2006, 28(1): 54-58.
- 张浩, 徐海松. 光源相关色温算法的比较研究 [J]. *光学仪器*, 2006, 28(1): 54-58.