

基于三基色 LED 的白光色温偏差研究

梅健健 刘丽兰

上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200070

摘要 为提高照明光源质量, 采用三基色的混光方法, 实现了白光动态相关色温精确可调。根据色度学光色设计, 建立了 RGB 三基色混光数学模型。选取合适光色参数的三基色光源进行 3000~7500 K 不同相关色温的白光混光实验分析, 实验结果与理论白光色温偏差较大。分析可知, 结温是影响色温偏差的主要因素。通过调节占空比来修正三基色光通量的输出, 从而确定了占空比和目标相关色温的关系。实验结果表明, 修正后的色温偏差在 50 K 以内, 合成白光光源的参数与理论白光的性能指标参数吻合, 实现了不同相关色温变化的白光光源, 并通过调节三基色光通量实现了温度补偿。

关键词 视觉光学; 动态色温; 三基色混光; 脉冲宽度调制; 占空比

中图分类号 TN206 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0833001

Research on White Light Color Temperature Deviation Based on Tricolor LEDs

Mei Jianjian Liu Lilan

School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200070, China

Abstract In order to improve lighting quality and achieve accurate and adjustable dynamic correlated color temperature of white light, a method of tricolor light mixing is used. Based on the colorimetric light color design, one mathematical model of RGB tricolor mixing is established. Appropriate parameters of tricolor LEDs are chosen to conduct the experiment of mixing white light with different correlated color temperature between 3000 K and 7500 K. The experimental color temperature of white light has a large deviation from the theoretical one. Further analysis tells us that the junction temperature is the main factor influencing the color temperature deviation. By adjusting the duty ratio to correct the output of the tricolor luminous flux, the relationship between the duty ratio and the target correlated color temperature is obtained. The experimental results show that the corrected color temperature deviation is within 50 K. The parameters for mixing white light sources match well with the theoretical ones and the white light source with different correlated color temperature is achieved. Temperature compensation can be realized by adjusting the tricolor luminous flux.

Key words visual optics; dynamic color temperature; tricolor light mixing; pulse-width modulation; duty cycle

OCIS codes 330.1690; 230.0250; 230.3670; 220.2945

1 引 言

白光发光二极管(LED)光源具有体积小、色域广、节能、寿命长、可控性强等诸多优点,且与太阳光最为接近,因此广泛应用于背光源、普通照明、商业照明、特殊照明等领域^[1-4]。如何提高白光 LED 光源的光品质,让光照环境更加舒适、健康、智能可调,以满足人们对光照的需求,是近年来的研究热点之一^[5]。

目前能够实现色温可调白光 LED 的方法主要有三种:一是利用冷暖白光 LED 进行混光,通过调节冷暖白光 LED 的光通量比例来实现色温动态可调。这种方法只能调节冷暖白光两色品坐标连接直线上的混合光,可调范围非常小,而且冷暖白光混合出的白光偏离黑体轨迹线周围的白光,色温不连续,实用意义不大;

收稿日期: 2016-02-18; **收到修改稿日期:** 2016-03-28

基金项目: 上海市引进技术的吸收与创新年度计划(15XI-1-26)、上海市科学技术委员会科研项目(15521103502)

作者简介: 梅健健(1990—),男,硕士研究生,主要从事 LED 光学设计方面的研究。E-mail:2242041419@qq.com

导师简介: 刘丽兰(1975—),女,博士,教授,主要从事 LED 半导体照明方面的研究。E-mail:lancy@shu.edu.cn

二是采用三基色 LED 进行混光,通过调节三基色 LED 光通量的比例来实现色温动态可调。三基色 LED 光谱分布具有连续、色域广的特点,所以该方法色温调节范围广,可实现 3000~7500 K 范围内连续色温的调节;三是采用多基色 LED 进行混光,通过调节多基色 LED 混合比例来实现色温动态可调。该方法虽然调节色温范围广,但多基色混光数学模型复杂,需要花费大量时间寻找最优解^[3,6-7]。因此,三基色动态色温调光的方法具有可调色温范围广、数学模型简单的特点^[8]。

白光 LED 作为绿色半导体照明光源,其技术指标主要有色温、显色指数和光视效能。白光的显色指数及动态色温等性能与传统的荧光灯相比具有较大优势。可调色温的白光光源在智能化高品质照明领域具有广泛应用^[9]。为获取色温可调且光谱连续的类太阳光的白光 LED,本文对三基色混光的白光光源进行色度学研究,建立了三基色混光数学模型,采用光谱仪进行实验分析,通过调节占空比来修正、优化三基色 LED 的光通量,并通过实验对优化结果进行验证。

2 三基色白光混色理论计算

采用 RGB 三基色混合生成白光的方式,需要先研究 RGB 三基色的配光模型^[10]。设所要配出的白光色坐标为 $W(x_w, y_w)$,使用的三原色 R、G、B 色坐标分别为 $R(x_R, y_R)$ 、 $G(x_G, y_G)$ 、 $B(x_B, y_B)$,光谱功率分布曲线分别为 $S_R(\lambda)$ 、 $S_G(\lambda)$ 、 $S_B(\lambda)$,CIE1931 标准色度观察者配色函数为 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$,相应的三刺激值分别为 (X_w, Y_w, Z_w) 、 (X_R, Y_R, Z_R) 、 (X_G, Y_G, Z_G) 、 (X_B, Y_B, Z_B) ,光通量分别为 ϕ_w 、 ϕ_R 、 ϕ_G 、 ϕ_B 。

单色光 XYZ 值和色坐标值的计算公式为

$$\begin{cases} X = K_m \int_{380}^{780} \bar{x}(\lambda) S(\lambda) d\lambda \\ Y = K_m \int_{380}^{780} \bar{y}(\lambda) S(\lambda) d\lambda, \\ Z = K_m \int_{380}^{780} \bar{z}(\lambda) S(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X + Y + Z} \\ y = \frac{Y}{X + Y + Z} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 K_m 为明视觉光谱光视效能。

根据格拉斯曼颜色混合定律及 1931CIE 标准^[5]可得三基色混光数学模型为

$$\begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \\ y_w \\ \phi_w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_R & x_G & x_B \\ y_R & y_G & y_B \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_R \\ \phi_G \\ \phi_B \end{pmatrix}, \quad (3)$$

最终化简得到 RGB 各自的光通量为

$$\begin{cases} \phi_R = \frac{\left(\frac{x_w - x_B}{y_w - y_B}\right) \cdot \left(\frac{1}{y_G} - \frac{1}{y_B}\right) - \left(\frac{1}{y_w} - \frac{1}{y_B}\right) \cdot \left(\frac{x_G - x_B}{y_G - y_B}\right)}{\left(\frac{x_R - x_B}{y_R - y_B}\right) \cdot \left(\frac{1}{y_G} - \frac{1}{y_R}\right) - \left(\frac{1}{y_w} - \frac{1}{y_B}\right) \cdot \left(\frac{x_G - x_B}{y_G - y_B}\right)} \phi_w \\ \phi_G = \frac{\left(\frac{x_w - x_B}{y_w - y_B}\right) \cdot \left(\frac{1}{y_R} - \frac{1}{y_B}\right) - \left(\frac{1}{y_w} - \frac{1}{y_B}\right) \cdot \left(\frac{x_R - x_B}{y_R - y_B}\right)}{\left(\frac{x_G - x_B}{y_G - y_B}\right) \cdot \left(\frac{1}{y_R} - \frac{1}{y_B}\right) - \left(\frac{1}{y_G} - \frac{1}{y_B}\right) \cdot \left(\frac{x_R - x_B}{y_R - y_B}\right)} \phi_w \\ \phi_B = \phi_w - \phi_R - \phi_G \end{cases}. \quad (4)$$

3 实验测试及结果分析

3.1 实验光源

实验选取型号为科锐 CLX6A-FKB 的 RGB 三合一的 3535 灯珠,其主波长分别为 $\lambda_{DR} = 623.3 \text{ nm}$, $\lambda_{DG} = 520.2 \text{ nm}$, $\lambda_{DB} = 465.9 \text{ nm}$ 。为达到照明效果,实现 LED 精确调光,此处将 6 颗灯珠进行串联,采用三通道脉宽调制(PWM)调光调色^[11]。通过光谱仪测试得到 RGB 三基色 LED 的光度学和色度学性能参数,见表 1。

表 1 实验中 RGB 三基色 LEDs 的色度学参数

Table 1 Experimental colorimetric parameters of RGB LEDs

	x	y	Luminous flux /lm
R	0.7009	0.2988	41.0
G	0.1578	0.6388	85.2
B	0.1376	0.0509	24.5

3.2 实验结果与分析

3.2.1 色品坐标与占空比的关系

该实验采用 PWM 方式调光。PWM 调光是开关电路在相对于人眼足够高的频率下,通过设置周期和占空比来改变输出电流的平均值。通过分别调节 R、G、B 灯珠的占空比来测量其光通量,R、G、B 灯珠的光通量和占空比的关系如图 1 所示。单色光的光通量虽然受结温的影响,但调节占空比时,其还是呈较好的线性变化^[12],此处近似认为占空比和光通量成比例。三基色光通量的表达式为

$$\phi_{R,G,B} = k_{R,G,B} D_{R,G,B} + b_{R,G,B}, \quad (5)$$

式中 k 为占空比变化时色坐标的变化率, b 为一个常数, D 代表单色光调光时的占空比。

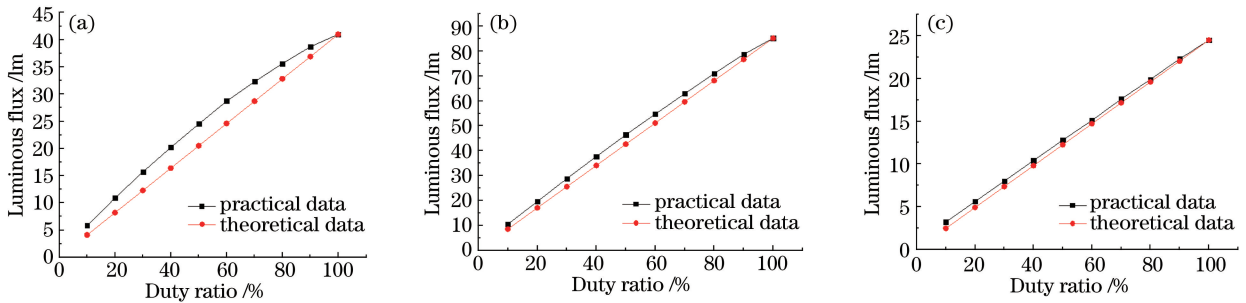


图 1 单色光光通量和占空比的关系。(a) R 灯珠;(b) G 灯珠;(c) B 灯珠

Fig. 1 Relation between luminous flux of monochromatic light and duty ratio. (a) R LED; (b) G LED; (c) B LED

色温是描述光源特性的一个基本参数,光源发射光的光色与黑体在某一温度下辐射光色相同时,黑体的温度称为该光源的色温。但光源实际辐射特性与黑体辐射特性差别较大,所以通常用相关色温来描述光源的颜色特性。取 9 个不同白光的相关色温点,包含暖白、正白、冷白三个色调,目标白光的光通量为 100 lm,对应相关色温、色坐标值及混成白光时的光通量比例见表 2。

表 2 实验中 LED 灯珠的参数

Table 2 Experimental parameters of LEDs

Color temperature /K	x	y	Luminous flux /lm			Duty ratio /%		
			R	G	B	R	G	B
3030	0.43474	0.40340	38.1	60.6	1.3	92.8	71.2	5.3
3571	0.40135	0.38878	34.9	62.9	2.1	85.2	73.9	8.7
4000	0.38040	0.37681	33.1	64.1	2.8	80.7	75.3	11.3
4545	0.35920	0.36248	31.3	65.2	3.5	76.4	76.5	14.3
5000	0.34508	0.35168	30.2	65.7	4.1	73.6	77.1	16.7
5556	0.33116	0.34001	29.1	66.2	4.7	70.9	77.7	19.4
6250	0.31760	0.32764	28.0	66.5	5.5	68.4	78.1	22.3
6667	0.31099	0.32123	27.5	66.6	5.8	67.1	78.2	23.9
7143	0.30454	0.31473	27.0	66.7	6.3	65.9	78.3	25.5

3.2.2 RGB 占空比和光通量关系

通过测试的数据可以看到,从 3000~7500 K 所取的 9 个不同相关色温的点都发生了色温的偏移,混合光的相关色温均与目标相关色温有较大的偏差。目标相关色温及色坐标值、实际混合光的相关色温及色坐标值以及其色温偏差见表 3^[13]。

表 3 LED 参数设定值和测量值对比

Table 3 Comparison between set values and measured values of LED parameters

Set value of color temperature /K	Set value of x	Set value of y	Measured value of color temperature /K	Measured value of x	Measured value of y	Color temperature deviation /K
3030	0.43474	0.40340	3373	0.4158	0.4021	343
3571	0.40135	0.38878	4007	0.3813	0.3808	436
4000	0.38040	0.37681	4465	0.3628	0.3686	465
4545	0.35920	0.36248	5070	0.3434	0.3527	525
5000	0.34508	0.35168	5619	0.3298	0.3377	619
5556	0.33116	0.34001	6261	0.3170	0.3299	705
6250	0.31760	0.32764	7100	0.3051	0.3151	850
6667	0.31099	0.32123	7705	0.2983	0.3075	1038
7143	0.30454	0.31473	8401	0.2920	0.2997	1258

在相同输入电功率下,PWM 调光和模拟调光这两种调光模式下的相关色温会随着平均输入电流的增大而升高^[14]。平均输入电流的增大会导致 LED 的结温的升高,结温的升高会导致色温及色度参数的漂移,无论是模拟调光还是 PWM 调光都无法避免这个问题。当温度升高时,混合光中三基色光通量的比例会发生变化,混合光的色坐标与目标色光的色坐标也会发生偏差^[15]。由上面占空比与光通量的关系可知平均电流影响光通量,当调节混合光的某一单色光的比例时,混合光的相关色温会发生变化,即混合光的色坐标会发生相应的变化。因此,只要找到单色光占空比变化与混合光色坐标变化的关系,这样就可以通过调节三基色的占空比来改变混合光的色坐标,最终合成相关色温的目标色光。

LED 结温是影响 LED 光色电性能、寿命及可靠性的重要因素。对于大功率 LED,当结温升高时,LED 的光通量会明显降低,同理 RGB 三基色的光通量也会随着结温的升高发生不同程度的变化^[16]。

实际调光的相关色温比目标相关色温高,这表明混合光里面缺少红光,而绿光和蓝光偏多。通过调节修正 RGB 三色光通量,改变混合光 x 坐标和 y 坐标,使色坐标向目标相关色光的色坐标移动,这样可减小色坐标的偏差和色温的偏差。当色坐标 x 和 y 的偏差 Δx 和 Δy 同时在 0.003 以内,且相关色温偏差在 50 K 以内时,可通过调节三基色占空比来修正误差,即增加红色 LED 占空比,相应减少绿色 LED 和蓝色 LED 的占空比^[17]。此处选取相关色温为 3571 K 的白光进行实验,具体实验如下:单调 R 灯珠,增加红色 LED 的占空比,合成白光的 x 和 y 坐标随占空比的变化关系如图 2 所示,其中 R 灯珠上部分点的 y 坐标有上下波动,为了简化计算,此处将其处理成图中线性关系。

单调 G 灯珠,减少绿色 LED 的占空比,合成白光的 x 和 y 坐标随占空比的变化关系如图 3 所示。单调 B 灯珠,减少蓝色 LED 的占空比,合成白光的 x 和 y 坐标随占空比的变化关系如图 4 所示。

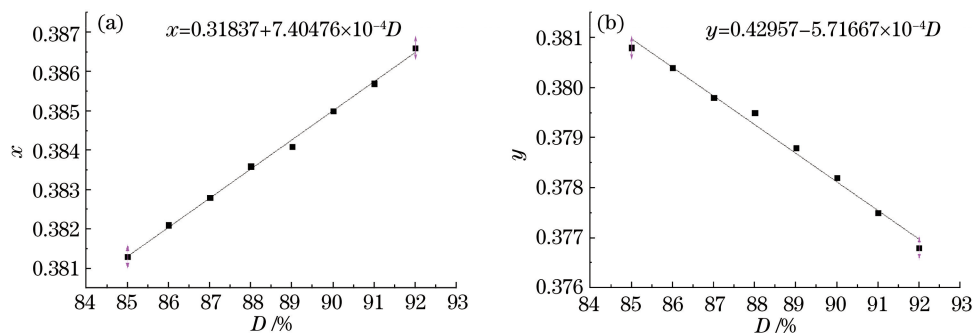


图 2 R 灯珠 (a) x 和 (b) y 坐标与占空比的关系

Fig. 2 Relationship between (a) x and (b) y coordinates of R LED and duty ratio

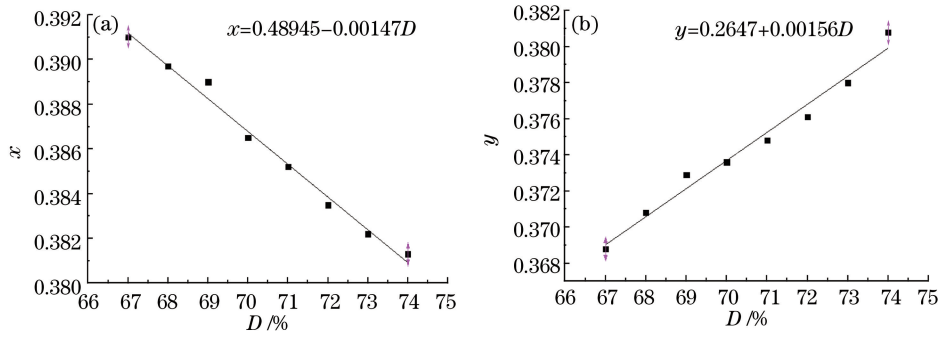


图3 G灯珠 (a) x 和 (b) y 坐标与占空比的关系

Fig. 3 Relationship between (a) x and (b) y coordinates of G LED and duty ratio

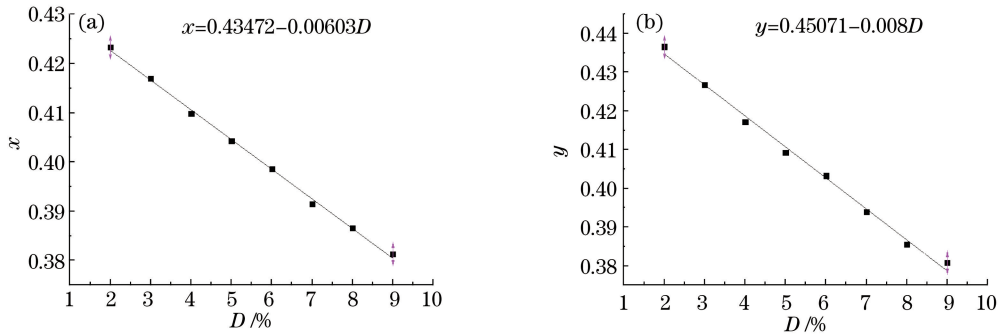


图4 B灯珠 (a) x 和 (b) y 坐标与占空比的关系

Fig. 4 Relationship between (a) x and (b) y coordinates of B LED and duty ratio

由图3~5可以看出,合成光的色坐标虽然受结温的影响,但调节占空比时,其还是呈较好的线性变化。合成光的 x 和 y 坐标表达式为

$$\begin{cases} x_{R,G,B} = k_{R,G,B}D + b_{R,G,B} \\ y_{R,G,B} = k'_{R,G,B}D + b'_{R,G,B} \end{cases} \quad (6)$$

单独调节单色灯珠时,虽然能达到目标相关色温,但色坐标已偏离目标相关色温的色坐标, x 和 y 坐标偏差在 0.003 以上,所以单独调节某一种基色的光通量的比例是达不到目标相关色温的,需要调节两种颜色或三种颜色。从图3~5可知,在改变混合光的三基色光通量的比例时,其 x 和 y 坐标呈线性变化,所以通过改变三基色的占空比来改变光通量的比例,从而合成目标相关色温的白光:

$$\begin{cases} x_w = x + k'_R(D'_R - D_R) + k'_G(D'_G - D_G) + k'_B(D'_B - D_B) \\ y_w = y + k''_R(D'_R - D_R) + k''_G(D'_G - D_G) + k''_B(D'_B - D_B) \\ \phi_w = 0.01D'_R\phi_R + 0.01D'_G\phi_G + 0.01D'_B\phi_B \end{cases} \quad (7)$$

式中 D_R, D_G, D_B 分别是红色、绿色和蓝色 LED 初始调节输入的占空比; D'_R, D'_G, D'_B 分别是红色、绿色和蓝色修正后输入的占空比, $D'_R \in [0, 100\%], D'_G \in [0, 100\%], D'_B \in [0, 100\%]$; k'_R, k'_G, k'_B 分别是红色、绿色和蓝色调整占空比时 x 坐标的变化率; k''_R, k''_G, k''_B 分别是红色、绿色和蓝色调整占空比时 y 坐标的变化率; x 和 y 是初始合成光的色坐标; x_w 和 y_w 是目标相关色温的色坐标。

(7)式是包含 4 个变量的三次方程组,该方程组的解不定,但当设定目标色光的光通量为 ϕ_w 时,该方程组为三元一次方程组,有唯一解。本次测试占空比为 100 时, R、B、G 的光通量分别为 41.0, 85.2, 24.5 lm。通过反复代入一些 ϕ_w 数据最终确定目标色光的光通量 ϕ_w 为 100 lm。通过求解三元一次方程组,求出修正后三基色占空比的数值即 91.2%、71.4%、7.1%, 测量其色坐标为(0.4011, 0.3873), 相关色温为 3567 K, 修正后的色坐标偏差在 0.003 之内, 色温偏差在 50 K 以内。

3.2.3 结果分析

合成其他相关色温白光,其三基色的比例也按此方法进行修正,修正后的占空比及光色参数见表 4。

表 4 修正后 LED 参数设定值和测量值对比

Table 4 Comparison between set values and measured values of modified LED parameters

D_R /%	D_G /%	D_B /%	Set value of x	Measured value of x	Set value of y	Measured value of y	Set value of color temperature /K	Measured value of color temperature /K
100	67.7	3.6	0.43474	0.4351	0.40340	0.4030	3030	3023
91.2	71.4	7.1	0.40135	0.4011	0.38878	0.3873	3571	3567
86.5	73.1	9.2	0.38040	0.3815	0.37681	0.3777	4000	3979
79.8	74.5	12.2	0.35920	0.3591	0.36248	0.3615	4545	4543
76.4	76.3	14.9	0.34508	0.3443	0.35168	0.3525	5000	5035
73.9	76.8	17.3	0.33116	0.3308	0.34001	0.3372	5556	5575
70.1	77.8	20.2	0.31760	0.3170	0.32764	0.3283	6250	6277
68.8	77.9	22.1	0.31099	0.3104	0.32123	0.3203	6667	6710
67.2	78.1	24.1	0.30454	0.3045	0.31473	0.3140	7143	7157

修正后测试的实验数据都与目标相关色温吻合较好,色坐标和色温均在允许的偏差范围内,通过调节 R、G、B 灯珠的光通量来解决结温造成的色温偏差问题,该方法操作方便快捷,但计算量较大。色温偏差的问题还可以通过给灯珠通小电流的方法或者加入温度和颜色传感器的方法来解决,前者光的利用率不高,后者电路设计复杂,而且成本高。综上所述,修正 R、G、B 灯珠的光通量比例的方法相对其他两种方法优势明显。

4 结 论

通过光色混合设计建立三基色混光数学模型,并对其进行实验分析。通过寻找混合光色坐标与单色光占空比之间的关系,最终修正了三基色的占空比,解决了由结温引起的色温偏差问题。修正后的白光光色参数与目标相关色温的白光吻合较好,动态模拟出 3000~7500 K 范围内相关色温的白光,具有很好的实用价值。

参 考 文 献

- Song Pengcheng, Wen Shangsheng, Shang Jun, *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.
- Luan Xinyuan, Liu Tingzhang, Zhou Zhuangli. LED color mixing design based on improved artificial fish swarm algorithm[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(1): 113-120.
栾新源, 刘廷章, 周壮丽. 基于改进人工鱼群算法的 LED 混光方法[J]. *发光学报*, 2015, 36(1): 113-120.
- Song Pengcheng, Wen Shangsheng, Chen Yingcong. 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.
- Muthu S, Schuurmans F J, Pashley M D. Red, green, and blue LED based white light generation: Issues and control[C]. *Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the IEEE, 2002, 1: 327-333.*
- Zhou Jinrong. Intelligent dimmer mathematical model of white light LED[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015(8): 953-956.
周锦荣. 白光 LED 智能调光数学模型[J]. *发光学报*, 2015(8): 953-956.
- Zhang Jinhua, Zhu Daqing, Wang Jiexian. Study on high CRI white LED integrated with three chips[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2012, 33(5): 667-671.
张锦华, 朱大庆, 王加贤. 三芯片集成高显色指数白光 LED 的研究[J]. *半导体光电*, 2012, 33(5): 667-671.
- Muthu S, Schuurmans F J P, Pashley M D. Red, green, and blue LEDs for white light illumination[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, 8(2): 333-338.
- Xu Shibao, Lü Yijun, Chen Huanting, *et al.* Color matching of RGB-LEDs based on dichotomy [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2009, 24(6): 7-10, 27.
徐示波, 吕毅军, 陈焕庭, 等. 基于二分法的 RGB-LEDs 配色研究[J]. *光电技术应用*, 2009, 24(6): 7-10, 27.
- Qu X H, Wong S C, Tse C K. Color control system for RGB LED light sources using junction temperature measurement [C]. *Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE, 2007: 1363-1368.*

- 10 He Xin. White light source based on RGB-LEDs[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2012.
何 欣. 基于 RGB 混色技术的白光 LED 光源的研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2012.
- 11 Song Pengcheng, Wen Shangsheng. 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.
- 12 Zhao H S, Ricky Lee S W. Determination of driving current of RGB LEDs for white light illumination[C]. Electronic Packaging Technology and High Density Packaging (ICEPT-HDP), 2012 13th International Conference on, 2012: 1540-1545.
- 13 Dyble M, Narendran N, Bierman A, *et al.* Impact of dimming white LEDs: Chromaticity shifts due to different dimming methods[C]. SPIE, 2005, 5941: 59411H.
- 14 Zhang Jingjing, Zhang Tao, Zheng Qi, *et al.* Radiant efficiency and thermal analysis of high-power LEDs at linear and PWM dimming modes[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2013, 24(1): 50-55.
张晶晶, 张 涛, 郑 奇, 等. 大功率 LED 在线性及 PWM 调光下的电光转换效率及热分析[J]. 光电子 • 激光, 2013, 24(1): 50-55.
- 15 Wu Yuxiang, Shang Jun, Wang Xiaohong, *et al.* A light emitting diode driver based on pulse width modulation and pulse amplitude modulation dimming[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0922003.
吴玉香, 尚 俊, 王孝洪, 等. 一种基于脉冲宽度调制和脉冲幅度调制的发光二极管驱动器[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0922003.
- 16 Rao Feng, Zhu Xifang, Xu Ancheng, *et al.* Characterization of junction temperature of GaN blue LED with optimum spectral bandwidth[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0130002.
饶 丰, 朱锡芳, 徐安成, 等. GaN 蓝色 LED 结温的最佳光谱带宽表征[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0130002.
- 17 Xiang Jinrong, Ren Jianwei, Liu Hongxing, *et al.* Research on color correction of multi-spectral camera based on spectral tunable integrating sphere[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 51(1): 013301.
项金蓉, 任建伟, 刘洪兴, 等. 基于光谱可调积分球光源的多光谱相机颜色校正研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 013301.