

# 基于PWM的三基色LED的调光调色方法

宋鹏程<sup>1</sup> 文尚胜<sup>1,2</sup> 尚俊<sup>3</sup> 史晨阳<sup>1</sup> 陈颖聪<sup>1</sup>

<sup>1</sup>华南理工大学高分子光电材料与器件研究所, 广东 广州 510640

<sup>2</sup>发光材料与器件国家重点实验室, 广东 广州 510640

<sup>3</sup>华南理工大学自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640

**摘要** 提出了一种基于脉冲宽度调制(PWM)的三基色发光二极管(LED)调光调色计算模型,建立了混合光的色品坐标与占空比、相关色温与占空比、最大光通量与色品坐标的函数关系。采用红绿蓝(RGB)三基色LED进行实验验证,实验结果表明:计算模型能较好的指导LED光色调节,混合光色品坐标的理论值和测量值之间的误差小于2.5%,模拟太阳光的色温变化误差仅为50 K。该计算模型可应用于各种三通道LED的调光调色,其高精度的优点能更精确地实现智能照明,极具实用价值。

**关键词** 光电子学;动态色温;三基色配光;发光二极管;脉冲宽度调制;占空比;

中图分类号 TN206

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0223001

## A Dimming Method for RGB LED Based on Three Channels' PWM

Song Pengcheng<sup>1</sup> Wen Shangsheng<sup>1,2</sup> Shang Jun<sup>3</sup> Shi Chenyang<sup>1</sup> Chen Yingcong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Polymer Optoelectronic Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China*

<sup>2</sup>*State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China*

<sup>3</sup>*College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China*

**Abstract** This paper presents a dimming method that based on three channels' pulse-width modulation (PWM) and light-mixing technology. A quantitative calculation model is established among chromaticity coordinate, correlated color temperature and three channels' duty cycles. The functional relationship between chromaticity coordinate and maximum luminous flux is also setuped. This method has been verified favorably by light mixing experiments with tricolor LED, which shows that the deviation of chromaticity is less than 2.5% between the theoretical value and the measured value. In addition, the color temperature change of sunlight has been simulated by this quantitative calculation model, and the deviation of CCT is less than 50 K. This model with the advantage of high precision can be applied to various types of LED dimming color and has a beneficial value for practicality.

**Key words** optoelectronics; dynamic color temperature; tricolor light mixing; light emitting diode; pulse-width modulation; duty cycle;

**OCIS codes** 230.0250; 230.3670; 220.2945

## 1 引言

2002年,David Berson等<sup>[1-2]</sup>在哺乳动物的视网膜上发现了第三种感光细胞,它主要在调节人体内分泌、控制生理节律等非视觉生物效应方面发挥功能,打破了以往人们对于眼睛只是人类的视觉器官这一概念。

收稿日期: 2014-07-21; 收到修改稿日期: 2014-09-23

基金项目: 广东省战略性新兴产业专项(2011A081301017,2012A08034012,2012A080304001)、广州市科技计划项目(2013J4300021)

作者简介: 宋鹏程(1990—),男,硕士研究生,主要从事LED智能照明方面的研究。E-mail: spescut@163.com

导师简介: 文尚胜(1964—),男,博士,教授,主要从事有机及无机半导体材料与器件方面的研究。

E-mail: shshwen@scut.edu.cn(通信联系人)

研究发现,照明环境的色温和照度不仅对人体昼夜节律和体温调节起着一定的作用,同时还会影响人们的睡眠和情绪<sup>[3-4]</sup>,使用适当的高色温光源还可以提高办公室员工的工作效率<sup>[5]</sup>。根据季节、情绪、昼夜对照明光源的色温和光强进行动态控制,可以使照明环境更舒适、更健康。

LED光源包含体积小、绿色节能、可控性能好的诸多优点,正被广泛运用于照明领域。单一LED的色温是不变的,不能实现动态调节。为了实现光强和色温可调以满足不同条件下的动态照明,需要对多种LED光源进行实时调控。LED常用的调光技术包括脉冲宽度调制(PWM)调光、模拟调光。PWM调光是使开关电路在以相对于人眼识别能力来说足够高的频率下工作,通过设置周期和占空比来改变输出电流的平均值<sup>[6]</sup>。相比较模拟调光,PWM调光具有色恒定性高、驱动器效率高、并且能够进行精确控制的优点<sup>[6-7]</sup>,方便与数字化系统接轨,具有更大的应用前景<sup>[8]</sup>。

因此,本文提出了一种三通道PWM调光调色的计算模型。从人们关心的照明光源的参数出发,建立起色品坐标与占空比、相关色温(CCT)与占空比、最大光通量与色品坐标之间的函数关系,进一步对日光轨迹线进行动态跟踪模拟。为动态照明以及智能照明的实现提供了一种新的途径。

## 2 理论计算

### 2.1 三通道PWM调光调色

根据色度学原理,在国际照明委员会(CIE) $x-y$ 色品图上,两种颜色相加产生的第三种颜色总是在连接两种颜色的直线上。如图1所示,R、G、B分别代表红光、绿光、蓝光在CIE  $x-y$ 色品图上的位置。红光和蓝光混合可以得到中间色P,根据格拉斯曼混色原理可知,P在R、B连线上的具体位置将由R和B的混合比例决定。同理可再利用中间色P与绿光混合出目标色M。所以三角形RGB内所包含的颜色都可以通过控制R、G、B的不同比例混合实现。利用PWM调光的高精度的优点对R、G、B之间的比例进行精确的控制,可以实现精确调光调色的目的。同时从图1可以看出,三角形RGB包含了大部分的黑体轨迹线,理论上可以混合出任意色温的白光,相对于两通道PWM调光具有更多的颜色选择。

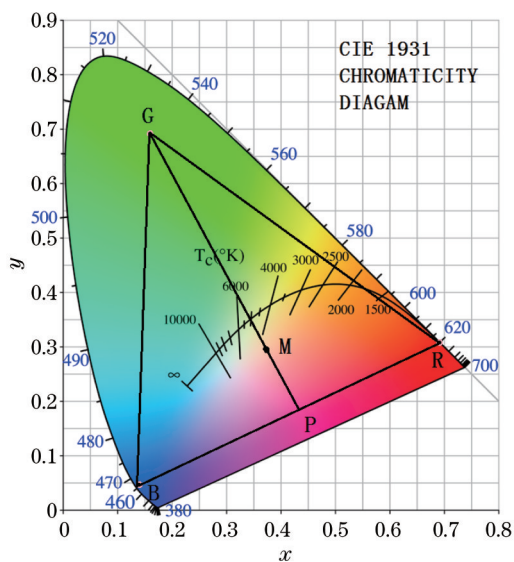


图1 CIE  $x-y$ 色品分析图

Fig.1 CIE  $x-y$  chromaticity analysis diagram

### 2.2 色品坐标与占空比的关系

改变驱动LED的PWM占空比,其色品坐标基本不发生改变,而光通量相应地线性变化,所以工程上为了讨论问题的方便,近似认为光通量与占空比成正比例函数关系<sup>[9,10]</sup>。结合格拉斯曼颜色混合定律有

$$Y_m = D_r Y_r + D_g Y_g + D_b Y_b \quad (1)$$

根据加混色原理和CIE色度计算方法,占空比分别  $D_r$ 、 $D_g$ 、 $D_b$  时,光源R、G、B混光后的色品坐标满足

$$\begin{cases} x_m = \frac{X_m}{X_m + Y_m + Z_m} = \frac{C_r D_r x_r + C_g D_g x_g + C_b D_b x_b}{C_r D_r + C_g D_g + C_b D_b} \\ y_m = \frac{Y_m}{X_m + Y_m + Z_m} = \frac{C_r D_r y_r + C_g D_g y_g + C_b D_b y_b}{C_r D_r + C_g D_g + C_b D_b} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $X_m, Y_m, Z_m$  是混合光源 M 的三刺激值,  $Y_r, Y_g, Y_b$  为光源 R、G、B 满电流工作下的 Y 刺激值;  $C_r = Y_r/y_r, C_g = Y_g/y_g, C_b = Y_b/y_b$  为光源 R、G、B 满电流工作下的三刺激值之和, 在 CIE-1931 标准色度系统中刺激值 Y 等于光通量。

在 PWM 调光下, 占空比是控制色品坐标的唯一因素。若期望的光通量为  $Y_m$ , 期望的色品坐标为  $(x, y)$ , 把占空比当作未知数, 则三通道的占空比可结合式(1)、(2)求得:

$$\begin{aligned} D_r &= \frac{\left[ (y_g - y_b)(x_b - x) + (y - y_b)(x_g - x_b) \right] y_r Y_m}{\left[ (y_g - y_b)(x_b - x_r) + (y_r - y_b)(x_g - x_b) \right] y Y_r}, \\ D_g &= \frac{\left[ (y_b - y_r)(x_r - x) + (y - y_r)(x_b - x_r) \right] y_g Y_m}{\left[ (y_b - y_r)(x_r - x_g) + (y_g - y_r)(x_b - x_r) \right] y Y_g}, \\ D_b &= \frac{\left[ (y_g - y_r)(x_r - x) + (y - y_r)(x_g - x_r) \right] y_b Y_m}{\left[ (y_g - y_r)(x_r - x_b) + (y_b - y_r)(x_g - x_r) \right] y Y_b}, \end{aligned} \quad (3)$$

上式所建立起的色品坐标与占空比的函数关系, 为探究占空比与相关色温、色品坐标与最大光通量的函数关系奠定基础。

### 2.3 最大光通量与色品坐标的关系

理论上在三角形 RGB 中的, 光通量的取值范围为  $[0, Y_r + Y_g + Y_b]$ , 然而采用 PWM 调光时, 光通量受占空比的约束, 不能实现理论上的取值范围。在调光过程, 不同色品坐标的混合光, 其 RGB 三基色的比例不同。只有占空比比例为 1:1:1 的混合光其占空比才可以同时达到 100%, 此时光通量的取值范围为  $0 \sim Y_r + Y_g + Y_b$ , 其他混合光的光通量取值范围则小于此范围, 每组色品坐标都有对应的最大光通量。从实际意义出发, PWM 的占空比应该满足  $D_r \leq 1, D_g \leq 1, D_b \leq 1$ , 把  $Y_m$  当作目标函数, 对(3)式进行变形可得

$$Y_m \leq \frac{\left[ (y_g - y_b)(x_b - x_r) + (y_r - y_b)(x_g - x_b) \right] y Y_r}{\left[ (y_g - y_b)(x_b - x) + (y - y_b)(x_g - x_b) \right] y_r} \quad (4)$$

$$Y_m \leq \frac{\left[ (y_b - y_r)(x_r - x_g) + (y_g - y_r)(x_b - x_r) \right] y Y_g}{\left[ (y_b - y_r)(x_r - x) + (y - y_r)(x_b - x_r) \right] y_g} \quad (5)$$

$$Y_m \leq \frac{\left[ (y_g - y_r)(x_r - x_b) + (y_b - y_r)(x_g - x_r) \right] y Y_b}{\left[ (y_g - y_r)(x_r - x) + (y - y_r)(x_g - x_r) \right] y_b} \quad (6)$$

混合光的光通量应该同时满足(4)~(6)式, 通过进一步地色度学和代数计算可知, 当混合光色品坐标位于靠近红光的区域 I 时, 红光的占空比最大, 此时(4)式所描述的光通量取值范围最小, 所以预期光通量只需满足(4)式即可。同理当混合光的色品坐标位于区域 II、III 时, 预期光通量只需分别满足(5)、(6)式即可。对区域 I、II、III 的划分如图 2 所示。利用最大光通量与色品坐标的函数关系, 可以事先模拟光通量的分布, 具有实际意义。

图中点 P 是 R、B 占空比之比为 1:1 时混合光在色品图中对应的点, 同理 C 和 Y 分别是 G、B 和 G、R 占空比之比为 1:1 时的混合光在色品图中的点。通过几何计算可知, 连接 GP、CR、BY 会相交于 O 点, 其中 O 点对应的是三种光源占空比为 1:1:1 时的色品坐标。此时, 四边形 YOPR 为区域 I, 四边形 COYG 为区域 II, 四边形 COPB 是区域 III。

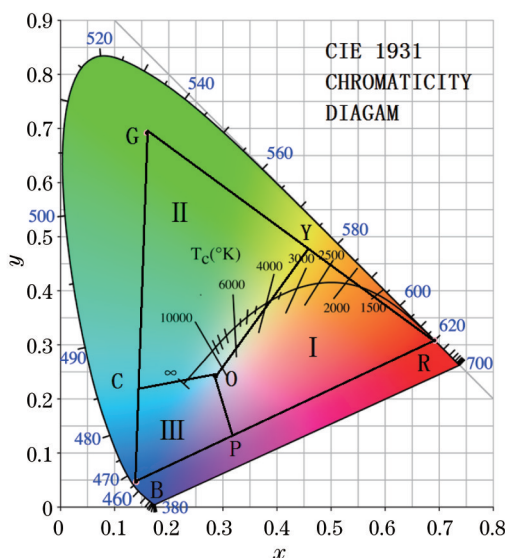


图2 CIE x-y色品图的划分

Fig.2 Division of CIE x-y chromaticity diagram

### 2.4 相关色温与占空比的关系

色温是描述光源特性的一个基本参数,光源的色温定义为与光源辐射颜色相同时的黑体温度,但实际光源光谱功率分布不可能与黑体完全一致,所以光源一般使用相关色温的概念。对光源相关色温的动态调节,体现在PWM调光中,即动态控制每个通道的占空比。目前色温的调控方法主要是通过普朗克黑体线来查找色温对应的色品坐标,结合色品坐标和目标光通量计算出对应的RGB三基色的光通量,再将数据汇总存储<sup>[11]</sup>,实验中采这种方法需要查阅或计算匹配色温的色品坐标,耗时较多,而且难以实现相关色温的连续动态调节。采用用日光色品轨迹代替黑体轨迹的方法。这条轨迹是根据许多实测的日光色度点的分布确定的,它位于黑体轨迹的上方,包括了4000 K~40000 K典型日光的色度点<sup>[12]</sup>。由于日光轨迹的色品坐标与相关色温  $T_{cp}$  存在明确的函数关系,可根据相关色温求得对应日光的色品坐标,再通过(3)式所确定的占空比和色品坐标的函数关系,直接建立占空比与相关色温的函数关系。采用此方法的优点在于可直接计算出对应的占空比,不需要事先查阅、存储等步骤,在实际操作中具有快捷、精确的特点。日光轨迹的色品坐标有以下关系:

$$y_D = -3.000x_D^2 + 2.870x_D - 0.275, \tag{7}$$

在相关色温  $T_{cp}$  已知的情况下,可通过下式计算典型日光的色品坐标。

当  $4000\text{ K} \leq T_{cp} \leq 7000\text{ K}$  时:

$$x_D = -4.607 \frac{10^9}{T_{cp}^3} + 2.9678 \frac{10^6}{T_{cp}^2} + 0.09911 \frac{10^3}{T_{cp}} + 0.244063, \tag{8}$$

当  $7000\text{ K} \leq T_{cp} \leq 25000\text{ K}$  时:

$$x_D = -4.607 \frac{10^9}{T_{cp}^3} + 2.9678 \frac{10^6}{T_{cp}^2} + 0.09911 \frac{10^3}{T_{cp}} + 0.244063. \tag{9}$$

若需要 4000 K 相关色温、80 lm 的日光,根据(7)、(8)式计算出对应的色品坐标为(0.3823, 0.3838),结合预期光通量代入(3)式求得对应的占空比为  $D_r = 68.64\%$ 、 $D_g = 83.64\%$ 、 $D_b = 14.46\%$ 。采用第二种方法可以连续动态地调节相关色温,从而实现类太阳光的光照环境,改善人们的光照环境及工作环境。

## 3 实验测试及结果分析

### 3.1 实验光源

实验光源采用广州巨宏光电生产的六脚 RGB 三基色 LED 灯珠,其主波长分别为  $\lambda_r = 620\text{ nm}$ 、

$\lambda_g = 523 \text{ nm}$ 、 $\lambda_b = 465 \text{ nm}$ 。用远方的 PMS-80 光谱测试仪测量 LED 灯珠中各芯片在满电流工作状态时的色度学参数,结果如表 1 所示。将 LED 灯珠焊接在铝基板上,由于结温升高会引起色漂移、出光效率降低,从而导致 RGB 三基色比例失调<sup>[11]</sup>,所以实验中需要将铝基板用导热胶固定在散热器上,以减小由结温造成的误差。每种颜色的 LED 芯片都可通过两个引脚进行独立地调光。

表 1 实验中 RGB 三基色 LED 芯片的色度学参数

Table 1 Colorimetric parameters of RGB LED in the experiment

	$x$	$y$	Luminous flux /lm
R	0.6917	0.3078	40.03
G	0.1605	0.6923	60.15
B	0.1402	0.0467	15.29

### 3.2 光源模块驱动电路结构

光源模块要在市电下调光调色,其驱动电路原理方框图如图 3 所示,主要由直流稳压电源、信号发生器、DD313 及外围电路、LED 光源四部分组成。

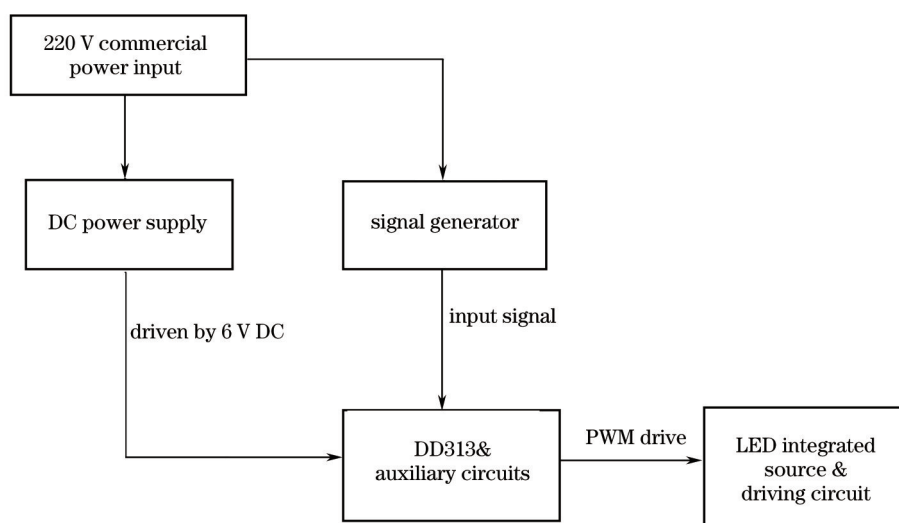


图 3 光源模块驱动电路原理图

Fig.3 Schematic graph of driving circuit of light source module

直流稳压电源的功能是将 220 V 的市电转换为 DD313 工作的直流电压,DD313 是专门为大功率 LED 提供恒流驱动芯片,内建三个恒流输出通道,并且特别设计三个使能端,可以分别独立控制三路占空比。信号发生器可以通过 DD313 芯片的使能端对 PWM 调光的占空比、频率进行控制,从而实现调光调色。通过对 R、G、B 三通道占空比的设定就可以调制出不同颜色的混合光,例如一天之内日光的变化。

### 3.3 实验结果及分析

#### 3.3.1 色品坐标与占空比的关系

当目标混合光的色品坐标以及预期光通量已知时,就可以根据(3)式计算出对应的占空比。例如,当目标混合光的色品坐标为(0.4002、0.3670),目标光通量为 51.62 lm,则可通过(3)式计算出对应的占空比分别为  $D_r = 50\%$ 、 $D_g = 50\%$ 、 $D_b = 10\%$ 。受限于占空比要小于 100%,期望光通量应该小于最大光通量,否则占空比将大于 100%,与实际不符。实验中,通过色品坐标及预期光通量计算出对应的占空比,再将占空比通过信号发生器输入到驱动芯片从而控制光源进行调光调色,随机选取十组结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出,色品坐标和光通量的测量值与设定值比较吻合,色品坐标的误差在 2.5% 以内,光通量的误差保持在 4.5% 以内。LED 的光通量受结温的影响较大,所以调光时,随着功率的提高,测量值和设定值的误差也会越大。其误差都保持在较合理的范围,说明(3)式所描述的色品坐标与占空比的函数关系式可以指导现实中的调光调色。



表2 设定值和测量值对比

Table 2 Contrast relationship between set and measured values

$D_r / \%$	$D_g / \%$	$D_b / \%$	Set $x$	Measured $x$	Set $y$	Measured $y$	Measured luminous flux/lm	Theoretical luminous flux/lm
50.0	20.0	20.0	0.3873	0.3847	0.2379	0.2574	35.33	35.10
50.0	40.0	10.0	0.4179	0.4159	0.3408	0.3454	45.60	46.30
80.0	70.0	60.0	0.3022	0.2939	0.2311	0.2253	82.34	83.30
30.0	80.0	20.0	0.2718	0.2742	0.3577	0.3646	62.04	63.19
100.0	67.5	1.9	0.5176	0.5139	0.4145	0.4137	77.50	80.00
50.0	90.0	10.0	0.3533	0.3529	0.4249	0.4321	72.90	75.68
40.0	90.0	8.0	0.3337	0.3347	0.4536	0.4586	69.32	71.37
73.3	81.1	12.5	0.4013	0.4001	0.3887	0.3827	77.53	80.00
15.0	50.0	10.0	0.2617	0.2666	0.3947	0.3867	38.48	37.61
74.1	100.0	31.0	0.3333	0.3269	0.3334	0.3262	90.65	94.53

### 3.3.2 最大光通量与色品坐标的关系

如 2.3 节所分析, PWM 通过调节占空比来实现调光调色, 在这个过程中, 光通量也必然会受到占空比的限制。对于确定色品坐标的混合光, 要取得最大光通量, 则三个占空比中必有一个已经达到 100%。实验中, 保持某一通道的占空比为 100%, 再调节另外两个通道的占空比, 从而测得色品坐标对应的最大光通量。同时把表 1 中的 R、G、B 光源的参数代入(4)~(6)式, 通过 Matlab 软件对最大光通量的分布进行模拟, 模拟和测量结果如图 4 所示。

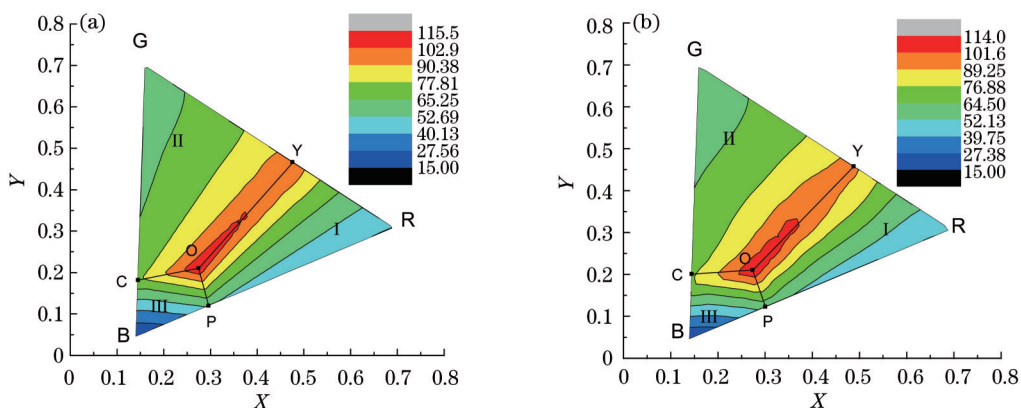


图4 色品坐标与最大光通量关系图。(a)理论模拟;(b)实际测量

Fig.4 Relationship between chromaticity coordinate and maximum luminous flux. (a) Theoretical simulation; (b) actual measurement

从图 4 可知, 理论模拟和实际测量的结果一致, 都在 O 点取得光通量的最大值, 并向四周递减。同时可以观察到在划分的区域内最大光通量的等值线为直线, 这与(4)~(6)式可变形为  $y=kx+b$  的性质相符。按照 2.3 节中所讨论的划分方法对色品图进行划分, O 点是 R、G、B 三通道的占空比都为 100% 时混合光的色品坐标。

### 3.3.3 相关色温与占空比的关系

实验设定的相关色温范围为 2000 K~10000 K, 选取 16 种不同相关色温的日光, 根据 2.4 节确定占空比的方法, 计算出相关色温对应的三通道占空比, 计算占空比时光通量取值 80 lm, 实验结果如表 3 所示。只要设定的相关色温间隔较小, 就可以连续地、动态地模拟一天内日光的变化。

从表 3 可以看出, 不同相关色温条件下光通量虽然有些不同, 但偏离保持在 3 lm 内。当设置的相关色温越大, 测量值和设定值的误差也越大, 在 7000 K 以下, 偏差一般保持在 50 K 之内。7000 K 以上的相关色温偏差在 100 K 以上, 这是由于相关色温越高, 对色品坐标的变化越敏感, 色品坐标的微小变化将导致相关色温很大的浮动。在 RGB 三基色配比色温过程中, 三通道的占空比有一定的变化趋势, 随着蓝光百分比的增加、红光百分比的下降, 混合光的相关色温逐渐升高。从表 3 可以看出设定值和测量值比较吻合, 所以(7)~(9)

式可以指导现实中对日光进行连续地、动态地模拟。图 5 是相关色温设定为 2000 K~7000 K 时的效果图。

表 3 相关色温目标值与测量值的对照

Table 3 Contrast relationship between set and measured CCT values

Set light source CCT/K	$D_r$ %	$D_g$ %	$D_b$ %	Luminous flux /lm	Measured
2000*	100.0	65.7	1.9	77.50	2035
3030*	80.0	77.7	8.5	77.47	2480
4000	68.6	83.6	14.5	77.17	3975
4250	66.7	84.5	16.1	77.45	4252
4500	65.0	85.3	17.7	76.75	4509
4750	63.5	85.9	19.3	77.49	4735
5000	62.2	86.3	20.9	76.81	4986
5250	60.9	86.8	22.3	77.54	5272
5550	59.9	87.2	23.7	77.85	5552
5750	58.9	87.5	25.0	77.80	5775
6000	58.1	87.7	26.3	78.78	6049
6250	57.3	87.9	27.5	77.70	6294
6500	56.6	88.1	28.6	78.17	6523
6750	55.9	88.2	29.7	77.84	6784
7000	55.4	88.3	30.8	77.69	7066
8000	53.5	88.6	34.5	78.95	8101
9000	52.1	88.8	37.6	77.75	9261
10000	51.0	88.9	40.1	77.73	10125

注：由于(7)~(9)式只在 4000 K 以上适用,缺少 2000 K 和 3000 K 的色温,所以取黑体轨迹上对应的色品坐标来代替

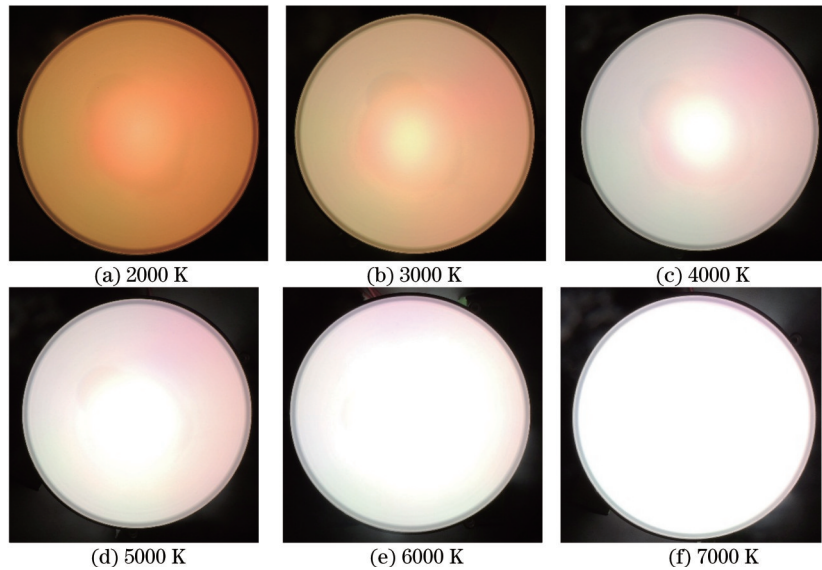


图 5 六档混色色温照明效果图

Fig.5 Lighting effect of six levels of CCT

### 3.4 误差分析

从上面实验结果可以看出,实验结果是比较符合理论计算值的,但是测量值和理论值之间还存在一些误差,产生的原因如下:

1) 实验中,对 R、G、B 光源的色品坐标和光通量的测量都是在单独点亮的条件下进行的,当进行调光调色的时候,R、G、B 三个芯片都要通电发光,此时的结温将比单独点亮时的高,而结温的变化将会影响光通量和色品坐标,所以用单独点亮时的色度学参数计算的理论值将与实际测量值存在误差。

2)实验时采用DD313芯片来实现RGB灯珠的PWM调光,而DD313芯片存在着 $\pm 5\%$ 的输出电流精度,这一因素也将对实验产生误差。

## 4 结 论

可调光色的LED光源是实现智能照明和动态照明的基础,结合占空比与光通量成线性关系的特点,从人们关心的光源参数出发,建立色品坐标与占空比、最大光通量与色品坐标的函数关系,结合日光色品轨迹线推导出相关色温和占空比的函数关系,并通过实验对上述模型进行验证。实验表明,通过调节占空比可以精确地实现预期的混合光,连续动态地模拟出2000 K~7000 K色温的太阳光。该模型可以为大范围色温和亮度连续调节的智能照明的实现提供色度学上的参考,而且适用于任意三种不同颜色的LED调光调色,具有很好的实用价值。

## 参 考 文 献

- 1 Zhou Taiming. The biological effects of light and dynamic lighting [J]. China Light & Lighting, 2005,(10): 7-8.  
周大明.光的生物功能与动感照明[J].中国照明电器,2005,(10): 7-8.
- 2 D M Berson, F A Dunn, Motoharu Takao. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock [J]. Science (S0036-8075), 2002, 295(5557): 1070-1073.
- 3 Shi Lu. The effect of lighting source correlated color temperature on biological rhythm and thermoregulation of human body [J]. Chinese J Ergonomic, 2006,12(3): 53-55.  
石 路.光源色温对人体生物节律和体温调节的影响[J].人类工效学,2006, 12(3): 53-55.
- 4 Yao Qi, Ju Jiaqi, Cheng Wenting, *et al.*. Discussion on the visual and non-visual biological effect of different light sources [J]. China Illumination Engineering Journal, 2008, 19(2): 14-19.  
姚 其,居家奇,程雯婷,等.不同光源的人体视觉及非视觉生物效应的探讨[J].照明工程学报,2008, 19(2): 14-19.
- 5 N I Lisdiani. Blue light exposure improves awareness during monotonous activities at night [C]. Southeast Asian Network of Ergonomics Societies Conference, 2012. 1-5
- 6 Tian Lidong, Zhou Jijun, Qin Huibin. Design of PWM dimming LED driver [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2012, 29(4): 465-468.  
田立东,周继军,秦会斌.PWM调光LED驱动器设计[J].机电工程,2012, 29(4): 465-468.
- 7 Liu Zulong, Guo Zhenning, Hu Zhiwei, *et al.*. Effect of dimming on LED color temperature and luminous flux [J]. J Huaqiao University (Nature Science), 2013, 34(1): 14-17.  
刘祖隆,郭震宁,胡志伟,等.调光方式对LED色温和光通量的影响[J].华侨大学学报(自然科学版),2013, 34(1): 14-17.
- 8 M Dyble, N Narendran, A Bierman, *et al.*. Impact of dimming white LEDs: chromaticity shifts due to different dimming methods [C]. SPIE, 2005, 5941: 59411H.
- 9 Wang Feng. Research of Pulse Power Driving High Power LED [D]. Xinjiang: Xinjiang University,2008.  
王 峰.大功率LED脉冲驱动电源技术的研究[D].新疆:新疆大学,2008.
- 10 Xu Daisheng, Chen Xiao, Zhu Xiang, *et al.*. A dimming Lightings 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.
- 11 Yin Luqiao, Yang Weiqiao, Li Shuzhi, *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.
- 12 Zhang Hao, Xu Haisong. 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.

栏目编辑:韩 峰