

基于冷暖白光 LED 的可调色温可调光照明光源

徐代升 陈晓 朱翔 郑黎华

(厦门理工学院光电与通信工程学院光电工程技术研究中心, 福建 厦门 361024)

摘要 可调色温可调光光源是实现智能照明的基础。充分利用发光二极管(LED)光源的可控性,采用冷暖白光 LED 和两通道脉冲宽度调制(PWM)法,设计研制成功了可调色温可调光动态照明光源。从人们关心的照明光源参数出发,依据选用冷白 LED 光源和暖白 LED 光源光度色度参数,建立了给定光度量输出时冷白 LED 光源控制占空比计算的模型,探讨了基于色温目标控制参数占空比的约束条件。实验表明,混色光源调节色温时光通量的起伏小于 2.5%,相关色温偏差在 10 K 以内,调光时色温基本不变,设计结果良好;同时,在分析过程中实际设计混色光源参数和选择光源的性能指标参数一致,表明这种方法既直观又具有很好的实用性。

关键词 光电子学;发光二极管;控制占空比;脉冲宽度调制;混色光源

中图分类号 TN206 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0123004

A Dimming Lighting Source Based on Cold and Warm White LEDs

Xu Daisheng Chen Xiao Zhu Xiang Zheng Lihua

(*Opto-Electronics Engineering Research Center, School of Opto-Electronics and Communication Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen, Fujian 361024, China*)

Abstract Dimming lighting sources are the basic parts of intelligent illumination. Fully utilizing the controllable performance of light emitting diode (LED), the dimming dynamic lighting LEDs are made successfully by cold/warm white LEDs and two channels' pulse width modulation (PWM). According to photometric and colorimetric quantities of the selected cold/warm white LEDs, and the needed mixed color lighting sources, calculation model of duty cycle which controls the outputs of them are established. The constraints of duty cycle with correlated color temperature (CCT) as an objective parameter are also analyzed. Experiments show that not only the up-and-down luminous flux is less than 2.5%, and the deviation of CCT is less than 10 K when CCT of the mixed color lighting sources are changed, but also the CCT keeps unchanged when the output luminous flux is altered. Meanwhile, the analytic process of actual parameter design of mixed color lighting sources is in accordance with the selected performance parameters of lighting sources, which shows that the method is direct and has good practicality.

Key words optoelectronics; light emitting diode; controlling duty cycle; pulse width modulation; mixed color lighting source

OCIS codes 230.0250; 230.3670; 220.2945

1 引 言

充分利用 LED 光源包含可控性在内的诸多优点,提高 LED 照明应用的光品质,让光照环境更节能、更舒适、更健康甚至智能化,才可更好地满足人们的需求。人类在长期的进化中已经适应了太阳光是动态变化和光谱连续的,其色温(CT)在日出和日落时是 2000 K,日出 1 h 后大约 3500 K,中午大

约 5300 K。研究表明,照明环境的光源色温对人体昼夜节律和环境温度变化时的体温调节和热平衡都起着一定的作用^[1],色温还会影响到人们对视觉环境的感知,动态照明在治疗失眠、减轻飞机时差效应、提高工作效率等方面都有作用^[2-3]。照明设计只有从单一地考虑视觉功能而逐步过渡到考虑视觉与非视觉双重功能上^[4],这样照明的功能才不至于

收稿日期: 2013-08-29; **收到修改稿日期**: 2013-09-14

基金项目: 厦门市产学研合作科技项目(9002178)

作者简介: 徐代升(1968—),男,博士,教授,主要从事绿色智能照明工程、激光及光电测量技术等方面的研究。

E-mail: d_sh_xu@163.com

仅仅停留在照亮环境上,而是让照明与人们的生活融合地更完美。

目前人们已大致提出了五种实现色温可调的技术方案:1)通过红、绿、蓝单色 LED 混光生成白光^[5],即所谓 RGB 技术;2)采用多芯片集成白光 LED^[6],通过芯片组合和电流调节实现色温可调;3)通过调节白光 LED、蓝光 LED 及红光 LED 三个支路的亮度实现色温变化^[7];4)采用白光 LED 和黄光 LED 组合实现色温可调^[8];5)由低色温白光 LED 和高色温白光 LED 混光和亮度调节实现色温可调,即所谓冷暖白光 LED 混色技术。上述五种方案,从技术可行性和性能稳定性来看,第一种和第五种,即 RGB 技术^[9]和冷暖白光 LED 混色技术,实现起来比较方便,是最为实用的。

作为一款实用的调光调色温光源,在满足显示性指数要求的条件下,还必须做到在调节色温时,光度参量(根据测试条件,它可以是光通量、照度、亮度或光强)值应基本不发生变化,起伏应小于 5%;在调光时,色坐标不发生变化,即相关色温(CCT)值保持恒定。

2 控制占空比确定

两通道脉冲宽度调制(PWM)方法实现色温可调,占空比是控制混色光源光(度)色(度)量的唯一因素。因此需要解决的关键技术问题是依据所选用

的冷暖白光 LED 的光度、色度参数,希望得到混色光源的相关色温(以下简称色温)和光度量值,来确定控制冷暖白光 LED 输出所对应的占空比。

2.1 目标色温下混合色色品坐标计算

目标色温即为所要混色光源的色温值。为了利用国际照明委员会(CIE)色度计算方法来确定目标色温下的颜色色品坐标,采用 Tamaru 等^[10]提出的色温计算公式:

$$T = 669A^4 - 779A^3 + 3660A^2 - 7047A + 5652, \quad (1)$$

式中 T 为色温, A 为等色温线斜率的倒数,它表示为

$$A = \frac{x - 0.329}{y - 0.187}, \quad (2)$$

式中 x, y 为等温线上任意一点的色品坐标。

上述经验公式是等温线交点法得到的最小误差经验公式。在实际生活中,人们通常使用的灯具色温值一般在 2500~7500 K 之间,因此,结合 CIE 黑体轨迹等温线的色品坐标,从中抽取一系列的色温值对该经验公式进行验证,如表 1 所示。从表 1 可以看出,该经验公式给出的色温值和理论值相比,无论是黑体轨迹上还是黑体轨迹外,误差都非常小,黑体轨迹上不超过 0.7%,黑体轨迹外不超过 1.0%,因此可以直接把该经验公式应用到色温调节的计算模型中去。

表 1 用等温线经验公式计算的相关色温值

Table 1 CCTs calculated by an exponential formula of the isotherms

CT /K	On the Planckian locus		Calculated CCT /K	Near the Planckian locus		Calculated CCT /K
	x	y		x	y	
8333	0.2921	0.3015	8336	0.2998	0.2804	8243
7143	0.3045	0.3146	7146	0.3093	0.2931	7092
6667	0.3110	0.3211	6666	0.3145	0.2994	6624
5556	0.3311	0.3399	5556	0.3311	0.3174	5539
5000	0.3450	0.3516	5001	0.3430	0.3286	4990
4545	0.3591	0.3624	4547	0.3552	0.3390	4543
4000	0.3804	0.3767	3999	0.3739	0.3528	4000
3571	0.4013	0.3887	3571	0.3926	0.3643	3570
3030	0.4347	0.4033	3030	0.4229	0.3786	3024
2500	0.4769	0.4137	2517	0.4618	0.3890	2505

在已知色温的情况下,采用劈因子法对(1)式求解,可编程求得 A 值。再将程序求出 A 的值代入(2)式,得出等温线方程:

$$y = \frac{1}{A}x + 0.187 - \frac{0.329}{A}. \quad (3)$$

由 CIE 色度计算方法可知,若冷白 LED 光源

的色品坐标为 (x_1, y_1) , 暖白 LED 光源的色品坐标为 (x_2, y_2) , 则混合色光的色品坐标满足

$$y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}x + y_2 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}x_2, \quad (4)$$

式中 $x \in [x_1, x_2]$ 。

$$\text{令 } k_1 = \frac{1}{A}, b_2 = 0.187 - \frac{0.329}{A}, k_2 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1},$$

$b_2 = y_2 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} x_2$, 联立(3)式和(4)式, 则混合色

光的色品坐标可表示为

$$x = \frac{b_1 - b_2}{k_2 - k_1}. \quad (5)$$

在已知混合色色品坐标 x 的情况下, 可以由(3)式或(4)式确定 y 的值。计算输出占空比时, 已知色品坐标 x 就能求得, 因此, 可忽略混合色色品坐标 y 值的计算。

2.2 光度条件计算

采用 PWM 技术来调节 LED 光源的亮度, 用 AVR 芯片来输出占空比以达到调节 LED 光源的亮度。文献[11]和本课题组的实验研究结果都表明, 当用 PWM 改变输出的占空比时, LED 光源的色度量基本不会发生变化而光度量会呈现相应的线性变化。当然调光时, 由于 LED 功率发生变化, 可能使 LED 结温变化、驱动电流变化, 从而有可能导致 LED 辐射的峰值波长移动, 也就是说光源色度(色品坐标)会发生变化, 不过一般来说这一变化是比较小的。为了消除这一较小变化, 在实际应用中可采用闭环控制系统^[12]减少误差和提高精度, 以便色品坐标在调光过程中保持某一恒定值。因此采用 PWM 技术, 工程上为了讨论问题的方便, 可近似认为 LED 光源输出光度量与最大光度量成正比例函数关系, 其函数斜率为占空比的值:

$$Y = DY_Z, \quad (6)$$

式中 Y 为实际输出光度量, D 为占空比, Y_Z 为满电流工作下的最大光度量。

在已知冷暖白光 LED 的占空比分别为 D_1 、 D_2 的情况下, 冷暖白光 LED 满电流工作下光度量分别为 Y_C 、 Y_W , 结合格拉斯曼颜色混合定律有^[13]

$$Y_h = Y_C \cdot D_1 + Y_W \cdot D_2, \quad (7)$$

即

$$Y_h = Y_1 + Y_2, \quad (8)$$

式中 Y_h 为混合光的光度量, Y_1 为冷白 LED 光源实际发出的光度量, Y_2 为暖白 LED 光源实际发出的光度量。

2.3 目标色温下给定光通量输出时占空比计算

结合 CIE 色度计算方法和前面的分析, 给出匹配色温时, 其色品坐标与冷白光光源的光度量 Y_1 与暖白光光源的光度量 Y_2 的关系为

$$x = \frac{Y_2 \cdot y_1 \cdot x_2 + Y_1 \cdot y_2 \cdot x_1}{Y_1 \cdot y_2 + Y_2 \cdot y_1}. \quad (9)$$

于是有

$$Y_2 = Y_1 \frac{y_2(x - x_1)}{y_1(x_2 - x)}, \quad (10)$$

再利用格拉斯曼颜色混合定律和光度计算条件可导出

$$\begin{cases} Y_1 = \frac{Y_h \cdot y_1(x_2 - x)}{y_2(x - x_1) + y_1(x_2 - x)} \\ Y_2 = Y_h - Y_1 \end{cases}. \quad (11)$$

结合(7)式和(11)式, 可进一步导出达到目标色温时冷暖光源所需要的占空比:

$$\begin{cases} D_1 = \frac{Y_h \cdot y_1(x_2 - x)}{Y_C[y_2(x - x_1) + y_1(x_2 - x)]} \\ D_2 = \frac{Y_h \cdot y_2(x - x_1)}{Y_W[y_2(x - x_1) + y_1(x_2 - x)]} \end{cases}. \quad (12)$$

3 约束条件

从 CIE 作图法中可以看出, 基于冷暖白光 LED 的可调色温可调光照明器在设计时存在着边界的约束条件, 即采用冷暖白光 LED 光源来调节不同的色温, 调出来的色温值必定在冷暖白光 LED 光源的色温值之间。在理论上, 目标色温 T 的取值范围为 $[T_w, T_C]$, 其中 T_C 是冷白 LED 光源的色温值, T_w 是暖白 LED 光源的色温值。混合光的光度量 Y_h 的取值范围为 $[0, Y_C + Y_W]$ 。事实上, 采用两通道 PWM 的调光调色方法并不能完全实现理论上给出的取值范围。

在实际的占空比调控中, 占空比的值必须满足 $0 \leq D_1 \leq 1, 0 \leq D_2 \leq 1$, 则冷白光光源的光度量 Y_1 的取值范围为 $[0, Y_C]$, 暖白光光源的光通量 Y_2 的取值范围为 $[0, Y_W]$ 。文献[14]给出了基于色坐标约束条件的分析讨论, 但在实际设计过程中应用并不直观。下面给出基于色温目标控制参数占空比的约束条件。

由前面的等温线计算公式及 CIE 作图法可以知道, 冷暖白光 LED 光源混光的色温值 T 与它的色品坐标成一一对应关系, 因此可以将基于色坐标的约束条件转化为基于色温的约束条件; 这样可以更直观地看出在色温调节过程中, 色温调节范围与输出光通量之间的关系, 从而恰当地确定基于色温目标控制参数的占空比 D_1 、 D_2 。图 1 给出了色温及输出光度量的限制区域。

图 1 中, 假定 $Y_C < Y_W, T_1 < T_2$ 。从图 1 中可以看出, 在已知冷暖白光 LED 光源的参数情况下, 混合光的光度量的值决定了可以选取的色温调节范围。当所选定的混合色的光度量小于冷暖白光

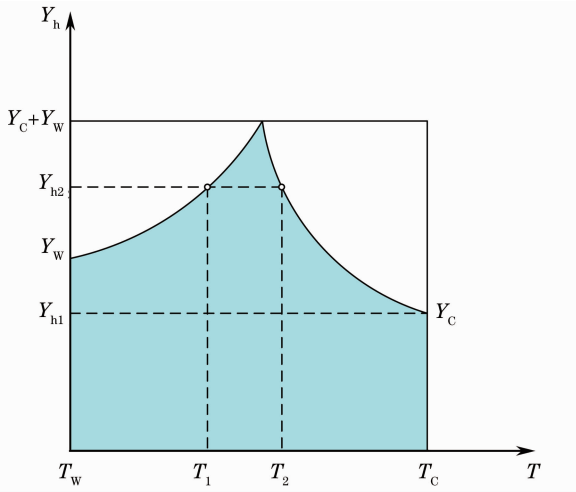


图 1 色温及输出光度量限制区域图

Fig. 1 Restricted zone of CT and output photometry

LED 光源的较小值 Y_c 时,就可以在 $[T_w, T_c]$ 全色温范围内进行调节,如图 1 中输出光度量小于等于 Y_{h1} 的情形;当混合光输出光度量的值大于冷暖白光光源中光度量较小值 Y_c 时,混合光的色温调节范围就有所限定,如图 1 中当输出光通量的值为 Y_{h2} 时,混合光可以允许调节色温的区域限定在 $[T_1, T_2]$ 内;当混合光输出光度量的值为 $Y_c + Y_w$ 时,则混合光色温值为唯一确定值,此时 $D_1 = 1, D_2 = 1$ 。由图 1 可知,实际的应用当中,若想在 $[T_w, T_c]$ 全色温范围内进行调节,且混合光光度参量在色温调节时基本保持不变,则 Y_c 与 Y_w 值尽可能接近,有助于使冷暖白光 LED 光源的利用率达到最大。

下面针对 Y_{h2} 的情形,探讨确定色温调节范围的计算方法。由(8)式和(10)式可得

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x} = \frac{(Y_h - Y_1)y_1}{Y_1 y_2} \quad (13)$$

令 $m = \frac{(Y_h - Y_1)y_1}{Y_1 y_2}$, 则当冷光源的输出光通量 Y_1

取最大值 Y_c , 即 $m = \frac{(Y_h - Y_c)y_1}{Y_c y_2}$ 时, m 的取值最

小, 于是有

$$x \geq \frac{mx_2 + x_1}{m + 1} \quad (14)$$

同理有

$$\frac{x_2 - x}{x - x_1} = \frac{y_2(Y_h - Y_2)}{y_1 Y_2} \quad (15)$$

令 $n = \frac{y_2(Y_h - Y_2)}{y_1 Y_2}$, 则当暖光源的输出光通量 Y_2

取最大值 Y_w , 即 $n = \frac{y_2(Y_h - Y_w)}{y_1 Y_w}$ 时, n 的取值最

小, 于是有

$$x \leq \frac{nx_1 + x_2}{n + 1} \quad (16)$$

综合(14)式和(16)式, 则有

$$\frac{mx_2 + x_1}{m + 1} \leq x \leq \frac{nx_1 + x_2}{n + 1} \quad (17)$$

因为混合光的色品坐标与它的色温值成一一对应关系, 所以将已知冷暖 LED 光源的光度和色度参数代入(17)式, 并结合(2)式所给出的等温线计算公式, 就可求得已知输出光通量时的色温调节范围。由于求出色温调节范围的显性表达式比较复杂, 因此通过编制计算小软件来完成这一工作。

下面给出所编计算软件的一组计算结果。若冷白光 LED 光源的色品坐标 x_1, y_1 为(0.3034, 0.2977), 最大光通量 Y_c 为 323.86 lm, 色温坐标 T_c 为 7500 K; 暖白光 LED 光源的色品坐标 x_2, y_2 为(0.4918, 0.4252), 最大光通量 Y_w 为 282.76 lm, 色温坐标 T_w 为 2500 K; 混合光光通量 Y_h 要求为 350 lm; 则混合光的色温范围 $[T_1, T_2]$ 为 [2786.43 K, 6648.67 K]。设混合光此光通量下所要求的色温值为 4000 K, 则冷白光 LED 光源占空比 $D_1 = 0.597648$ 、暖白光 LED 光源占空比 $D_2 = 0.553281$ 。如果要求混合光的为 6650 K, 即在约束色温范围 $[T_1, T_2]$ 之外, 就会得到冷白光 LED 光源占空比 $D_1 = 1.00016$ 、暖白光 LED 光源占空比 $D_2 = 0.0922576$; 如果要求混合光的为 2700 K, 也在约束色温范围 $[T_1, T_2]$ 之外, 就会得到冷白光 LED 光源占空比 $D_1 = 0.162416$ 、暖白光 LED 光源占空比 $D_2 = 1.05177$; 这些显然是不可能实现的。这也从理论上证明, 当输出光通量为一定值时, 混合光存在允许调节色温的区域限定; 实际应用当中, 若想在 $[T_w, T_c]$ 全色温范围内进行调节, 且混合光光度参量在色温调节时基本保持不变, 则 Y_c 与 Y_w 值尽可能接近, 有助于使冷暖白光 LED 光源的利用率达到最大。这和前面从图 1 看到的直观结论是一致的。

4 实验测试与结果分析

4.1 实验光源及研制光源模块

实验光源采用韩国三星 Samsung 5630 贴片 LED 灯珠, 用远方 HAAS-2000 积分球测量单颗冷暖白光 LED 光源光通量、色温、显色指数(CRI)、色坐标、发光效率等光源色参数, 结果如表 2 所示。

单颗 LED 的光通量不能满足照明的要求, 通常会采用多颗 LED 组合工作来达到照明的照度要求。本光源模块由单个冷白光 LED 光源和单个暖白光 LED

光源组合为一单元的 8 个单元构成,并根据匀光结构和照度均匀性要求合理布局。8 颗冷白 LED 光源可发出的总光通量为 323.86 lm;8 颗暖白 LED

光源可发出的总光通量为 282.76 lm。为了使色温调节范围更大,根据前面的分析讨论,设定研制的光源模块的光通量为 245 lm 左右。

表 2 冷暖白光 LED 光源参数

Table 2 Optical source parameters of cold and warm white LEDs

	Chromatic coordinate x	Chromatic coordinate y	CCT /K	Luminous flux /lm	CRI	Luminous efficiency /(lm/W)
Cold white LED	0.3034	0.2977	7458	40.48	81.4	101.19
Warm white LED	0.4662	0.3922	2470	35.345	80.3	88.34

4.2 光源模块驱动电路结构

光源模块要在市电下混光调色温调光,其驱动电路原理方框图如图 2 所示。图 2 主要由交流/直流

(AC/DC)电源适配器、DC/DC 降压电路、ATmega 16 单片机最小系统板、PT4115 及外围电路、LED 光源模块电路、控制开关等六部分组成。

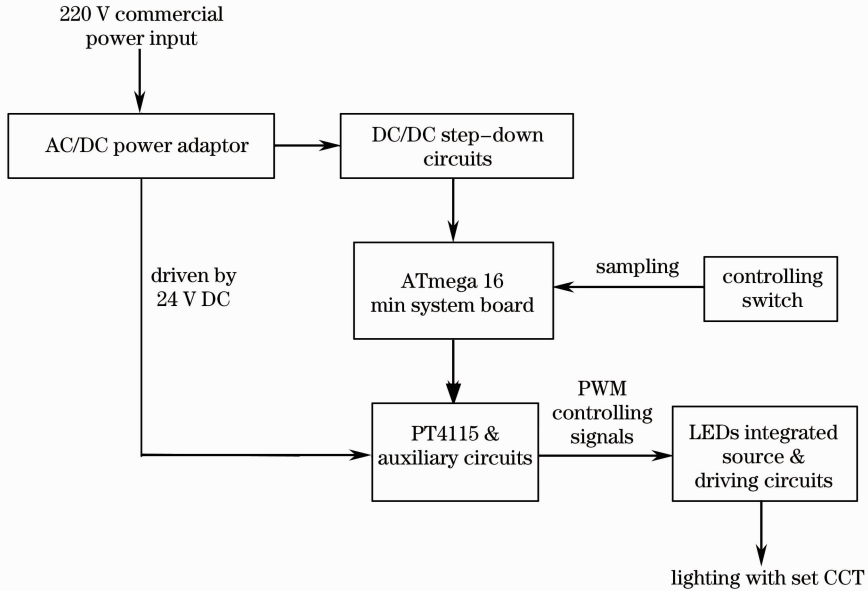


图 2 光源模块驱动电路原理图

Fig. 2 Schematic graph of driving circuit of light source module

AC/DC 电源适配器的功能是将 220 V 市电转换为 PT4115 的工作电压和电流,同时电路设计包含了电磁干扰 (EMI) 和功率因数校正 (PFC)。ATmega 16 的最小系统板是整个驱动电路的控制模块,可通过设置单片机内部的寄存器很快速地对 PWM 信号进行调整。PT4115 内置了功率开关,采用高灵敏的电流采样来设置 LED 的平均电流, DIM 引脚既可以接受模拟调光,又能接受较宽频率范围的 PWM 调光,用来驱动 LED 光源模块并实现 PWM 调色温调光。控制开关切换实现不同色温设置和输出;当然色温输出也可由 ATmega 16 单片机进行程序控制,如模拟太阳光一天的色温变化。

4.3 实验结果及分析

实验给定色温分为 7 档,分别是 3300、4000、4500、5000、5500、6000、6500 K。按照第 2 节确定占

空比的方法,并根据图 2 给出的驱动电路原理图,设计且调试电路,制作了样品,如图 3 所示。将其置于远方 2 m 积分球中进行测试,如图 4 所示。最终测试结果如表 3 所示。



图 3 组装样品照明图

Fig. 3 Lighting effect of an assembling sample



图 4 在 2 m 积分球中测试样品
Fig. 4 Testing an assembling sample in 2 m integrated sphere

从表 3 可以看出,在这七种设定混光色温值下,LED 阵列的输出光通量虽然都有一些不同,但是差别不大,最大的光通量偏离设定值只有 6 lm,一般情况下偏差都在 1~2 lm,对整个照明灯具而言,偏差也只有 1% 不到。同时,该照明灯具的色温输出也和设置的色温值相差无几,说明算法比较准确并且系统可以稳定地工作,达到了色温可变的要求。

为了将其组装成照明器(灯),购买了现成的外壳,并将带有单片机、PT4115 以及 DC/DC 降压电路的集成电路板附着在灯具的后方。至此,将除了适配器以外的所有原件集成在了同一个灯具内。图 5 是在这七档色温设定下,该灯具的光照效果图。

表 3 色温设定值与测量值的对照关系

Table 3 Contrast relationship between set and measured CT

Set light source CT /K	Cold white LED output controlling duty cycle	Warm white LED output controlling duty cycle	Luminous flux /lm	Measured CT /K
3300	0.292148	0.5504	242.34	3301
4000	0.427696	0.395375	240.16	4005
4500	0.501693	0.310745	240.63	4507
5000	0.563667	0.239866	241.89	5023
5500	0.616849	0.179042	243.21	5516
6000	0.66329	0.125928	244.67	6026
6500	0.704385	0.078928	246.08	6520

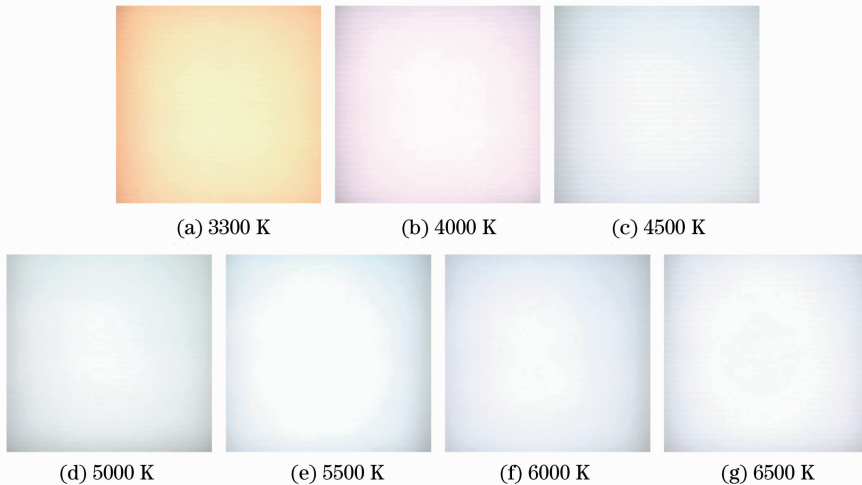


图 5 七档混色色温照明效果图

Fig. 5 Lighting effect of seven CT

照片效果不是很好,人眼观测的效果要更加明显。色温从 3300 K 到 6500 K 的照明效果是与理论相符的,较低时偏黄色,较冷时偏微蓝色,实现了色温的分档调节,并且经过测量,误差都是控制在 30 K 之内的。这也证明了可以良好地调节色温,不同的色温照明效果很明显,通过匀光板等设计使得照明灯具具有很好的均匀性,并且基本保证了光通量

在调整色温过程中始终不变。

从上面的实验结果可以看出,实验的结果是比较符合理论计算值的,基本上与实验预设值吻合。但是实验结果值和实验预设值之间还是存有一些误差,之所以会产生误差,原因如下:

1) 在理论值计算过程中,采用的等温线公式是一个经验公式,虽然计算结果是非常精确的,但是还

是出现了一些偏差,而且在后面的计算过程中也采用了近似值,而这些原因都会导致实验结果出现误差。

2) 实验中采用的是 LED 光源,由于实验本身的制作条件限制,没能对 LED 光源进行很好的散热设计,而 LED 光源的发热问题将会影响它的稳定性。LED 光源发热会使芯片的结温发生改变,而这一影响会导致 LED 光源的光度和色度量发生变化,从而影响实验结果。

3) 实验时采用 PT4115 芯片来实现 LED 光源的 PWM 调控,而 PT4115 芯片存在着 5% 的输出电流精度,这一因素导致了冷暖白 LED 光源的光亮度曲线与理论曲线存在一定的误差,从而影响了整体占空比的计算准确度,导致实验误差。

4) 在进行实验测试时,仪器本身存在实验误差,多次测量同一个色温值时也会出现多个不同的值,各个值之间的差别很小,在 10 K 以下。

5 结 论

根据所希望混合得到动态光源的色温值计算其色品坐标,然后依据混色光源目标色温下恒定光通量输出来计算冷白 LED 光源和暖白 LED 光源的输出控制占空比,再通过色温约束条件分析,并对得到的占空比进行判断,能够保证获得的混色光源的光度色度参数既满足设计指标要求又性能稳定。文中所述计算过程简便,实际设计的混色光源参数和人们选择光源的性能指标参数一致,具有很好的直观性和实用性。当然,采取更好的配光方法^[15]或直接采用导光板,所设计的可调光调色智能平面灯的光照均匀性将会更好,这一点将继续探索,以期获得性能更加优良的可调色温可调光智能照明器。

参 考 文 献

- 1 Shi Lu. The effect of lighting source correlated color temperature on biological rhythm and thermoregulation of human body [J]. Chinese J Ergonomics, 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.
- 2 Wout J M van Bommel. Non-visual biological effect of lighting and the practical meaning for lighting for work [J]. Appl Ergon,

- 2006, 37(4): 461-466.
- 3 M U Gillette, S A Tischkau. Supra chiasmatic nucleus: the brain's circadian clock [J]. Recent Prog Horm Res, 1999, 54: 33-58.
- 4 Ju Jiaqi. The non-visual biological effect of lighting and its practical meaning [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2009, 20(1): 25-28.
居家奇. 照明的非视觉生物效应及其实践意义 [J]. 照明工程学报, 2009, 20(1): 25-28.
- 5 I Moreno, U Contreras. Color distribution from multicolor LED arrays [J]. Opt Express, 2007, 15(6): 3607-3618.
- 6 S P Ying, C W Tang, B J Huang. Characterizing LEDs for mixture of colored LED light sources [C]. 2006 International Conference on Electronic Materials and Packaging, 2006.
- 7 He Guoxing, Zheng Lihong. A Tunable CCT Method with High Color Render Index Based on Mixing White LEDs and Red-Blue LEDs. CN, 101808451A[P]. 2010-08-18. <http://www.Soopat.com/Patent/201010132448>.
何国兴, 郑利红. 白光加红蓝 LED 组合获得高显色可调色温白光的方法: 中国, 101808451A [P]. 2010-08-18. <http://www.Soopat.com/Patent/201010132448>.
- 8 Huang Dengmao, Wu Cui. A Tunable CCT Light with Yellow and White LEDs. CN, 201425283 [P]. 2010-03-17. <http://www.Soopat.com/Patent/200920136933>.
黄登茂, 吴 翠. 黄、白 LED 可调色温灯. 中国, 201425283 [P]. 2010-03-17. <http://www.Soopat.com/Patent/200920136933>.
- 9 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.
- 10 S Tamaru, Y Ohno, T Matsuba, et al.. Measurements of colour temperature: a simple and reliable method [J]. J Illuminating Engineering Institute of Japan, 1981, 65(4): 158-162.
- 11 Liu Zulong, Guo Zhenning, Hu Zhiwei, et al.. Effect of dimming on LED color temperature and luminous flux [J]. J Huqiao University (Natural Science), 2013, 34(1): 14-17.
刘祖隆, 郭震宇, 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.
- 12 S Robinson, I Ashdown. Polychromatic optical feedback control, stability and dimming [C]. SPIE, 2006, 6337: 633714.
- 13 Jin Weiqi, Hu Weijie. Radiation Intensity, Photometric and Chromaticity and Test [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009. 126-127.
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, 2009. 126-127.
- 14 Wang Jiyong, Wang Jianping. A dimming method for LED based on two channels' PWM [J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(7): 132-136.
王纪永, 王建平. 基于两通道 PWM 的 LED 调光调色方法[J]. 光电工程, 2012, 39(7): 132-136.
- 15 C C Sun, I Moreno, Y C Lo, et al.. Collimating lamp with well color mixing of red/green/blue LEDs [J]. Opt Express, 2012, 20(S1): A75-A84.

栏目编辑: 韩 峰