

doi:10.3969/j.issn.1007-7162.2016.01.015

基于时间混色方式的冷暖双色 LED 调光调色光源

李楠, 潘永雄, 苏成悦, 黄明旭

(广东工业大学 物理与光电工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 针对两通道冷暖 LED 光源 PWM 调光调色照明灯具的巨大市场需求以及当前该类技术存在的问题, 提出一种基于时间混色方式的照明光源系统控制算法, 实现混色光源色温与亮度的独立调制. 实验结果表明, 在色温调节过程中, 光源亮度基本保持恒定; 在亮度调节过程中, 光源的色温也基本保持恒定. 该算法在降低控制器运算量的同时, 提高了调光调色的控制精度, 消除电源瞬态过载现象, 提高了照明系统可靠性.

关键词: 混色光源; 时间混色; 脉宽调制; 发光二极管

中图分类号: TN206

文献标志码: A

文章编号: 1007-7162(2016)01-0077-06

A Dimming Lighting Based on Cold and Warm White LEDs in Time Hybrid Color Mode

Li Nan, Pan Yong-xiong, Su Cheng-yue, Huang Ming-xu

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: According to the huge market demand for the PWM dimming lamps of two-channel cold/warm LED lighting source and the existing problems in dimming technique, a lighting source system control algorithm based on time hybrid color mode is proposed in this paper and the independent modulation of hybrid lighting source luminance and color temperature are realized by this method. Experimental result shows that, in the process of color temperature adjustment, luminance keeps constant basically. And in the process of brightness adjustment, color temperature is also constant. This algorithm reduces the computing load of controller. At the same time, it improves the dimming control precision and eliminates the transient power overload phenomena for reliability of lighting system.

Key words: hybrid color lighting source; time hybrid color; pulse width modulation; light emitting diode

近年来,LED 照明光源在人们生活中逐渐普及,越来越广泛地用于各种照明应用中,深刻改变着中国乃至全球照明产业的面貌^[1-2]. 随着生活水平不断提高,人们对照明光源的需求不再局限于单纯照明功能,色温与亮度均可调节的 LED 光源成为市场新热点.

研究证实,光源的色温与亮度对人们心理和生理有着一定影响^[3-5]. 高色温白光偏蓝,让人感到清凉或是寒冷;而低色温白光偏黄,让人觉得温暖甚至闷热. 在光亮、高色温的光照环境中,人容易兴奋,有助于提高工作效率;相反,在昏暗、低色温的环境中,人容易困倦,可以帮助人们尽快入睡,缓解失眠问题. 在不同场合中使用色温、亮度适当的光源,能够显著提高人们生活品质. 因此,如何利用 LED 光源

的高可控性和色温多样性开发出亮度、色温任意可调的高品质照明光源成了近年来照明领域热门研究课题之一.

目前,常用于 LED 照明的调光方法有模拟调光和数字调光^[6]. 模拟调光方法通过改变 LED 电流大小实现发光强度的调节. 数字调光方法以 PWM(脉冲宽度调制)为主,该方法以人眼无法识别的高频对 LED 进行开关操作,控制其平均发光强度. 由于 PWM 调光方法在调节光度时色偏小^[6-7]、色温稳定、抗干扰性好,因此在工程上多采用这种调光方式. 在光度调节的基础上,对若干个不同色彩的 LED 光源进行混光,就能够得到一个亮度与色温在一定范围内可任意调节的光源. 常用的混色方式包括红、绿、

收稿日期: 2014-12-16

基金项目: 广东省信息产业发展专项现代信息服务业资助项目(2150510)

作者简介: 李楠(1988-),男,硕士研究生,主要研究方向为开关电源、LED 照明技术.

蓝三色 LED 混光生成白色光(RGB)方式^[8-10],以及高色温(冷白光)、低色温(暖白光)LED 混光生成中间色温白光方式^[11-13]. 这两种方式各有优缺点,在照明应用场合中,双色温白光混光方式在光效、体积、控制复杂度等方面具有绝对优势.

本文提出一种基于时间混色法的控制算法,该算法充分考虑了驱动电源的荷载能力,并确保亮度与色温不存在互调现象.基于该算法设计了一套低成本、易实现、高可靠性的 LED 冷暖双色调光调色照明光源.

1 调光调色参数计算方法

1.1 混色光色品坐标及色温计算

由色度学知识^[14]可知,在 CIE 色品图中,混色光的色品坐标位于两光源色品坐标的连线上,具体位置取决于两个光源光度值相对强度. 设高色温光源色品坐标为 (x_e, y_e) 、光度为 Y_e ,低色温光源色品坐标为 (x_w, y_w) 、光度为 Y_w ,混合光色品坐标为 (x_m, y_m) ,那么根据 CIE1931 色品坐标计算方法可知混色光色品坐标为

$$\left\{ \begin{array}{l} x_m = \frac{\frac{Y_c}{y_c} \cdot x_c + \frac{Y_w}{y_w} \cdot x_w}{\frac{Y_c}{y_c} + \frac{Y_w}{y_w}}, \\ y_m = \frac{\frac{Y_c}{y_c} + \frac{Y_w}{y_w}}{\frac{Y_c}{y_c} + \frac{Y_w}{y_w}}. \end{array} \right. \quad (1)$$

利用文献[15]中提出的色温计算公式可得到混色光源的相关色温为

$$\text{CCT} = 669 \times A^4 - 799 \times A^3 + 3\,660 \times A^2 - 7\,047 \times A + 5\,652, \quad (2)$$

式(2)中的 A 为等色温线斜率的倒数,表示为 $A = \frac{x_m - 0.329}{y_m - 0.187}$. 该公式是应用等温线交点法所得到的最小误差经验公式,在常用色温范围内计算结果有较高精度.

反过来,若已知目标相关色温 CCT,可以通过式(2)推出目标色品坐标 x 与 y 的关系,然后结合式(1)解出该色温所对应的色品坐标.

1.2 双通道 PWM 占空比计算

由塔尔博特定律可知,对于变化周期短于人眼视觉惰性的间歇光刺激,人眼所感受的等效光度可表达为

$$Y_e = \frac{1}{T} \int_0^T Y_s(t) dt, \quad (3)$$

其中 Y_e 为等效光度, $Y_s(t)$ 为光源光度的时间函数. 在 PWM 调光系统中, 为简化分析, 认为光源不变, $Y_s(t)$ 不随时间变化, 记为 Y_s . 可给出相应的光度表达式为

$$Y_{\text{PWM}} = DY_s, \quad (4)$$

式(4)中, D 为 PWM 波形的占空比. 可见, PWM 控制方式下等效光度与占空比存在线性关系, 在光源确定的情况下, 等效光度仅由占空比 D 决定.

设在额定电流下冷暖光源的光度分别为 Y_c 、 Y_w , 冷暖两路 PWM 控制线路的占空比分别为 D_c 、 D_w , 那么两光源的实际光度为

$$\begin{cases} Y_{c,\text{pwm}} = D_c Y_c, \\ Y_{w,\text{pwm}} = D_w Y_w. \end{cases} \quad (5)$$

显然, $0 \leq D_c \leq 1, 0 \leq D_w \leq 1$.

根据格拉斯曼颜色混合定律^[14],混色光的光度为

$$Y_m = Y_{c, \text{pwm}} + Y_{w, \text{pwm}} = D_c Y_c + D_w Y_w. \quad (6)$$

若已知目标色品坐标(x_m , y_m)以及两路光源参数,根据文献[13],高色温、低色温两光源占空比可表示为

$$\begin{cases} D_c = \frac{Y_m y_c (x_w - x_m)}{Y_c [y_w (x_m - x_c) + y_c (x_w - x_m)]}, \\ D_w = \frac{Y_m y_w (x_m - x_c)}{Y_w [y_w (x_m - x_c) + y_c (x_w - x_m)]}. \end{cases} \quad (7)$$

2 现有调光调色控制策略存在的问题

(1) 根据前文的分析,如果仅是单独改变暖光源 PWM 控制信号占空比 D_w 或者冷光源 PWM 控制信号占空比 D_c 来改变混色光色温,都将引起光度变化,即调色对光度产生影响.如果直接使用前文中的计算方法,将得到两路 PWM 信号的精确占空比.根据文献[13],其可行域如图1所示.

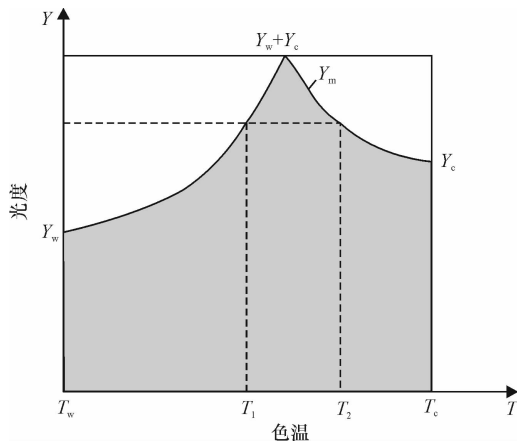


图1 混色光色温与光度的理论可行域
Fig.1 Theory zone of CCT and photometry

当暖光源 PWM 调光控制信号占空比 D_w 为 1,而冷光源 PWM 调光控制信号占空比 D_c 为 0,即只有暖光源工作时,混色光色温最低(T_w),光度 $Y_m = Y_w$;反之,当暖光源 PWM 调光控制信号占空比 D_w 为 0,而冷光源 PWM 调光控制信号占空比 D_c 为 1,即只有冷光源工作时,此时色温最高(T_c),光度 $Y_m = Y_c$;而当暖光源 PWM 调光控制信号占空比 D_w 、冷光源 PWM 调光控制信号占空比 D_c 均为 1,即两路同时工作时,混色光色温 T_m 在 T_w 与 T_c 之间,混色光光度 $Y_m = Y_c + Y_w$,达到最大.

在这种控制策略中,为现实色温从 T_w 至 T_c 调节过程中的光度保持恒定,必须使用式(7)严格计算出两光源 PWM 控制信号占空比 D_c 、 D_w ,并限制照明灯具混色光最大光度为 $Y_{m,max} \leq \min(Y_c, Y_w)$. 如此,可行域范围已经被大大缩小至 $Y_{m,max}$ 下方的区域.为了使可行域最大化,实际应用中通常会对两路白光源光度进行优选,使 $Y_c = Y_w$.

在这种情况下,高精度所带来的优势不再突出,而运算复杂的劣势显露无疑.复杂的运算加重了灯具内控制芯片负担,严重消耗控制器的内部资源.特别是在渐变调光过程中,控制芯片需要在短时间内处理大量数据,极大地增加了运算量或被迫采用巨大的数表存放不同色温对应的占空比信息.在调光过程中将可能引起卡顿、抖动、延时,甚至失控的情况.

(2) 目前关于双色白光 LED 光源 PWM 调光调色方法的文献中均没有提及控制信号之间的相位关系,每一路 PWM 信号占空比均可独立地在 0~1 之间变化,可能存在交叠部分,如图 2 所示.这样的控制时序对驱动电源极为有害.

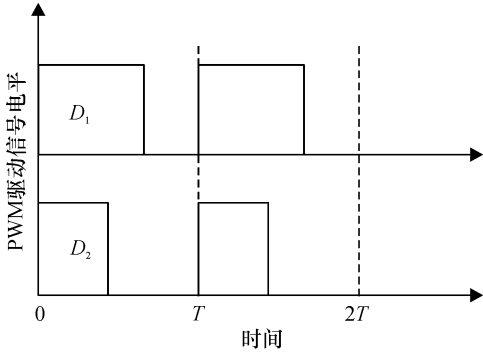


图 2 无相位约束的 PWM 调光调色控制信号
Fig.2 PWM dimming signals without phase constraint

根据前文分析,在实际应用中混色灯具的最大光度不会超过两路白光源的最大者.驱动电源将依照这一需求进行设计,那么电源输出功率远不能满足同时点亮两路白光 LED 的需求.若驱动信号存在

交叠,造成两路光源同时工作,必将周期性地引入过重负荷,造成电源瞬态过载,严重影响电源可靠性,并有可能触发驱动电源的过载保护机制导致系统不能正常运行.

3 基于时间混色法的 PWM 调光调色方式

鉴于任意占空比、相位无关驱动信号存在的问题,根据实际应用条件,本文提出一种基于时间混色方式的冷暖 LED 光源调光调色 PWM 控制方法.在该方法中,两路 PWM 控制信号相位始终保持交错关系,即保持 180° 相位差,不允许驱动信号存在交叠,如图 3 所示.在这种控制方式中,两路 PWM 控制信号的占空比之和小于或等于 1,任意时刻至多有一路光源在工作,两路光源不会在同一时刻内发生空间混色,因此称之为时间混色方式.

为方便描述,引入色温系数 m 和光度系数 B .色温系数 m 表示某一路光源的发光强度占混色光源总体发光强度的比例, $0 \leq m \leq 1$.显然,在高低温白光光源系统中 $m_c + m_w = 1$.不妨令 $m_c = m$,那么 $m_w = 1 - m$.光度系数 B 表示混合光的目标光强与系统额定输出光强的比例, $0 \leq B \leq 1$.两路控制信号

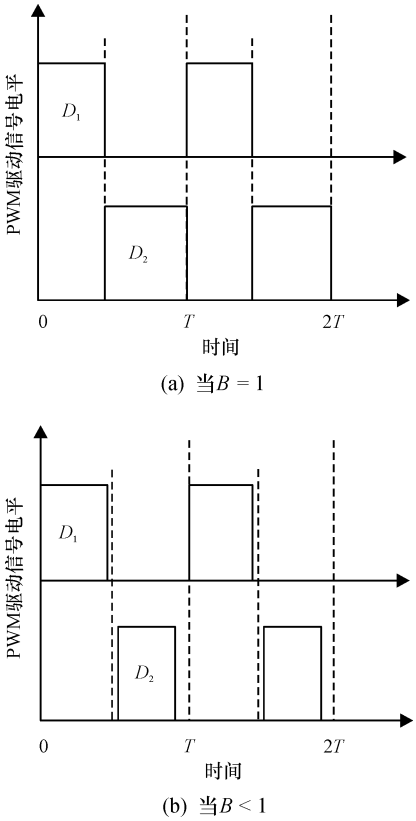


图 3 PWM 调光调色控制信号
Fig.3 Dimming PWM signals

的占空比可定义为

$$\begin{cases} D_c = m_c B = mB, \\ D_w = m_w B = (1 - m)B. \end{cases} \quad (8)$$

当光度系数 $B = 1$ 时, PWM 控制信号占空比 $D_c + D_w = 1$. 当 $m = 0$ 时, 冷光源通道的占空比 $D_c = 0$, 即冷光源不工作; 当 $m = 1$ 时, 暖光源通道的占空比 $D_w = 0$, 即暖色光源不工作; 而 $0 < m < 1$ 时, $0 < D_c + D_w < B$, 两路光源交替工作. 将占空比代入光度表达式, 可得

$$\begin{cases} Y_{c, \text{pwm}} = D_c Y_c = m_c B Y_c = m B Y_c, \\ Y_{w, \text{pwm}} = D_w Y_w = m_w B Y_w = (1 - m) B Y_w. \end{cases} \quad (9)$$

由于人眼存在视觉惰性, 时间混色时格拉斯曼颜色混合定理依然成立, 那么混色光光度:

$$Y_m = D_c Y_c + D_w Y_w = m B Y_c + (1 - m) B Y_w. \quad (10)$$

结合前文中已经提到的两路光源的光度关系, 令 $Y_c = Y_w = Y$, 则混色光光度:

$$Y_m = m B Y_c + (1 - m) B Y_w = B Y. \quad (11)$$

此时混色光光度正比于光度系数 B , 而与色温系数 m 无关. 若保持光度系数 B 不变, 而仅调节色温系数 m , 则可实现调色过程中光度恒定不变. 当色温系数 m 保持不变时, 调节光度系数 B 时, 相当于等比例压缩了占空比 D_c 、 D_w , 由式(8)可以推出:

$$\begin{cases} \frac{y_c(x_w - x_m)}{y_w(x_m - x_c) + y_c(x_w - x_m)} = \frac{D_c Y_c}{Y_m} = m_c = m, \\ \frac{y_c(x_m - x_c)}{y_w(x_m - x_c) + y_c(x_w - x_m)} = \frac{D_w Y_w}{Y_m} = m_w = 1 - m. \end{cases} \quad (12)$$

整理可得到混色光的色品坐标 x_m 的表达式为

$$x_m = \frac{\frac{m x_c}{y_c} + \frac{(1 - m) x_w}{y_w}}{\frac{m}{y_c} + \frac{1 - m}{y_w}}. \quad (13)$$

结合式(1), 可以给出色品坐标 y_m 的表达式为

$$y_m = \frac{1}{\frac{m}{y_c} + \frac{1 - m}{y_w}}. \quad (14)$$

可见, 混色光源的色品坐标与光度系数 B 无关, 只与色温系数 m 存在一一对应关系. 说明在光度调节的过程中, 混色光源的色温保持不变.

前文的推导表明了使用光度系数、色度系数这两个参量描述冷暖双色温白光 PWM 调光调色系统的方法是可行的, 这种方法可扩展至任意两种光源

的 PWM 混光系统中使用. 结合本方法提出的控制策略, 只需要单独调节上述两个参数即可实现色温与亮度的独立控制, 在色温连续调节的过程中占空比计算简单, 适合于小体积、低功耗、运算能力有限的 MCU 进行控制; 另外, 在任何时刻至多只有一路光源工作, 可以有效防止电源过载, 降低了对驱动电源冗余功率容量的要求.

4 实验与分析

4.1 实验光源模块

根据上文推导结果, 本文设计了一套基于上述混色方法的调光调色灯具, 验证光度系数 B 与色度系数 m 是否独立影响混色光源光色度. 选用了国星光电的高、低两种色温贴片 LED 灯珠, 单颗标称功率为 0.5 W. 由于低色温灯珠光效低于高色温灯珠, 经过光通量平衡设计后, 两个模块的光通量大体相同, 参数如表 1 所示.

表 1 LED 模块参数

Tab.1 Parameters of LED modules

模块	相对色温/K	光通量/lm	发光效率/(lm · W ⁻¹)
冷白光	6 284	1 884.1	69.95
暖白光	3 012	1 848.8	62.07

4.2 电源及控制系统

电源和控制系统由 AC/DC 变换器、MCU 稳压供电电路、MCU 核心控制系统、恒流及开关电路构成, 系统框图如图 4 所示.

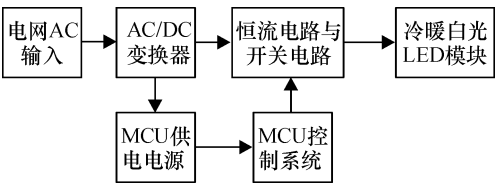


图 4 实验系统框图

Fig.4 Schematic block of experimental system

AC/DC 变换器将 220 V/50 Hz 电网电压转换为 LED 负载所需的直流电压, 设计额定输出功率为 30 W, 提供功率因数校正、EMC 以及各类保护功能; MCU 稳压供电电路提供控制器所需的低压直流电压, 功率较小; MCU 核心系统用于实时计算占空比和发出 PWM 控制信号. 另外, 可以通过预留的接口与外部设备行进通信, 实现远程控制; 恒流及开关电路用于防止 LED 负载过流和对 LED 负载进行 PWM 开关操作.

4.3 实验结果与分析

实验分别对光度系数 B 取 0.25、0.5、0.75、1 和

对色度系数 m 取 0、0.25、0.5、0.75、1,由这两个系数组合得到 20 个测试点.

对这 20 个测试点的数据进行了采集和分析,使用 TDS1012B 型示波器测量两路输出端电压波形,经计算得到实际占空比数据(见表 2).

表 2 两路控制信号占空比
Tab. 2 Experimental duty ratio of two-channel PWM signals

光度系数 B	色温系数 m	暖色光控制信号 占空比 D_w	冷色光控制信号 占空比 D_c
0.25	1.000	0.000	0.246
0.25	0.750	0.057	0.182
0.25	0.500	0.121	0.123
0.25	0.250	0.182	0.057
0.25	0.000	0.244	0.000
0.50	1.000	0.000	0.496
0.50	0.750	0.122	0.371
0.50	0.500	0.243	0.246
0.50	0.250	0.369	0.121
0.50	0.000	0.494	0.000
0.75	1.000	0.000	0.746
0.75	0.750	0.182	0.557
0.75	0.500	0.371	0.376
0.75	0.250	0.554	0.183
0.75	0.000	0.746	0.000
1.00	1.000	0.000	1.000
1.00	0.750	0.236	0.737
1.00	0.500	0.481	0.483
1.00	0.250	0.732	0.232
1.00	0.000	1.000	0.000

如表 2 所示,占空比的实际测量值与设计值相一致,而存在的略微差别是因为在控制时序中插入了“死区时间”和电路中存在的开关延迟.

本文使用了杭州远方公司的光电测试系统对实验灯具进行测试,结果如图 5 所示.

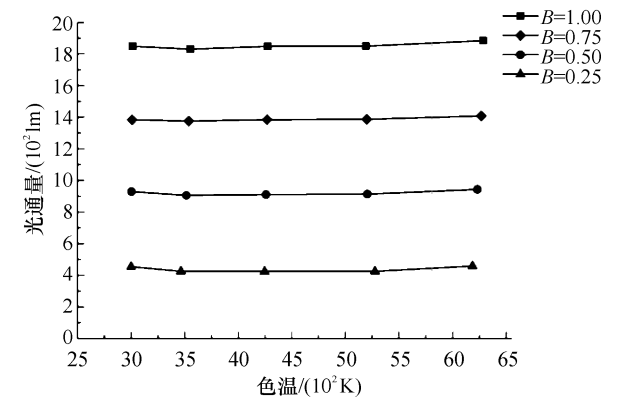


图 5 色温与光通量关系
Fig. 5 CCT versus luminous flux

图 5 中显示了各测试点对应色温与光通量,当光度系数 B 不同取值时混色光的色度变化.从图 5 中可以看出:

(1) 当光度系数 B 取值固定后,在色温变化过程中,光通量基本保持不变,连线保持水平.而当 B 取不同值时,光通量大小随之成比例变化.说明混色光源的光度仅由光度系数 B 决定,与色度系数 m 无关.

(2) 当色度系数 m 取值固定时,在竖直方向上,光通量变化过程中,色温基本保持恒定.而当 m 取值变化时,色温才随之变化.说明色温仅由色度系数 m 决定,不受光度系数 B 影响.

以上结果表明,光度系数 B 与色度系数 m 独立作用于混色光源, B 仅控制光度, m 仅控制色度(色温),两者不存在交叉控制关系,符合实验预期结果.所以,系统可以通过控制这两个系数来保证色温调整与光度调整的独立性.前文提出的控制方法具有现实可行性.

实验结果与理论计算存在一些误差,经分析,产生误差的原因有以下几点:

(1) 为保证两路 PWM 信号不发生边沿交叠,控制时序中插入了“死区时间”,混色光的光通量略低于单路白光.

(2) 随着实验进行,LED 芯片结温上升,自身光效和色温发生变化.

(3) 均光罩对不同波长的光吸收程度存在差异,影响出光的光度与色温.

(4) 实验存在实验误差,对测量结果有一定影响.

5 结 论

文中提出一种高效的基于时间混色方式的 LED 冷暖双色调光调色照明光源的表征方法,并基于该方法提出了一种新型的控制策略.在保证调色、调光互相独立的情况下,有效地解决了驱动电源过载问题和 MCU 运算负担过重的问题.为设计高效能、小体积、高可靠性的冷暖双色 LED 照明系统提供了一种新的设计依据.

参考文献:

[1] 窦林平. 国内 LED 照明应用探讨[J]. 照明工程学报, 2011, 22(6): 51-58.
DOU L P. Discussion on LED lighting application in China [J]. China Association of Lighting Industry, 2011, 22 (6): 51-58.
[2] 郝洛西,杨秀. 基于 LED 光源特性的半导体照明应用创新与发展[J]. 照明工程学报, 2012, 23(1): 1-6.
HAO L X, YANG X. Innovation and tendency of LED

- lighting based on LED's feature [J]. China Association of Lighting Industry, 2012, 23(1): 1-6.
- [3] 居家奇, 陈大华, 林燕丹. 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.
JU J Q, CHEN D H, LIN Y D. The non-visual biological effect of lighting and its practical meaning[J]. China Association of Lighting Industry, 2009, 20(1): 25-28.
- [4] 杨春宇, 梁树英, 张青文. 调节人体生理节律的光照治疗[J]. 照明工程学报, 2012, 23(5): 4-17.
YANG C Y, LIANG S Y, ZHANG Q W. Research of the phototherapy about adjusting physiological rhythm of human [J]. China Association of Lighting Industry, 2012, 23(5): 4-17.
- [5] 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.
YAO Q, JU J Q, CHENG W T, et al. Discussion on the Visual and Non-visual Biological Effect of Different Light Sources[J]. China Association of Lighting Industry, 2008, 19(2): 14-19.
- [6] 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.
LIU Z L, GUO Z N, HU Z W, et al. Effect of dimming on LED color temperature and luminous flux [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2013, 34(1): 14-17.
- [7] 崔晓艳, 张晓冬. 基色 LED 的光谱漂移及其对显色性能影响的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(8): 2190-2193.
CUI X Y, ZHANG X D. Study of spectrum drifting of primary colors and its impact on color rendering properties [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(8): 2190-2193.
- [8] 陈东灵, 林志贤. 三基色光源连续色温调控方法的研究[J]. 计算机与现代化, 2012, 6: 179-199.
CHEN D L, LIN Z X. Study on method of adjusting color temperature continuously based on three primary lighting sources [J]. Computer and Modernization, 2012, 6: 179-199.
- [9] 龙兴明, 周静. 基于加性混光的色彩可调 LED 照明设计[J]. 半导体光电, 2007, 28(1): 43-46.
LONG X M, ZHOU J. Development of Adjusted LED Lighting Based on Additive Mixing [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2007, 28(1): 43-46.
- [10] 朱钧, 张鹤, 金国藩. 一种基于 RGB 三基色 LED 的白光光源[J]. 光学技术, 2007, 33(6): 929-931.
ZHU J, ZHANG H, JIN G F. A novel white light source based on RGB LED [J]. Optical Technique, 2007, 33(6): 929-931.
- [11] 刘康, 郭震宁, 林介本, 等. 高亮度白光 LED 混色理论及其实验研究[J]. 照明工程学报, 2012, 3(1): 51-57.
LIU K, GUO Z N, LIN J B, et al. Thoretical and experimental investigation on mixture of high brightness white LEDs [J]. China Association of Lighting Industry, 2012, 23(1): 51-57.
- [12] 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.
WANG J Y, WANG J P. A dimming method for LED based on two channels' PWM [J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(7): 132-136.
- [13] 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): 1-7.
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): 1-7.
- [14] 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.
- [15] TAMARU S, OHNO Y, MATSUBA T, et al. Measurements of colour temperature: a simple and reliable method [J]. J Illuminating Engineering Institute of Japan, 1981, 65(4): 158-162.