

文章编号: 1000-7032(2018)05-0730-07

基于冷暖白光 LED 的线性调光混合照明

夏振平^{1,2*}, 付保川^{1,2}, 程 成¹

(1. 苏州科技大学 电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215009;

2. 苏州市虚拟现实智能交互及应用技术重点实验室, 江苏 苏州 215009)

摘要: 为了提供高品质、更安全和智能的照明光源, 基于冷暖白光 LED 建立了线性调光混合照明系统及其优化调光调色方法。混合照明光源以色温和明度等级分别设定光色度和光强度, 更加符合人性化需求。在系统智能优化配光过程中, 设定色温转换为 CIE $u'v'$ 均匀色品坐标, 明度转换为亮度, 使优化计算更加精确。系统采用的线性调光避免了闪烁潜在的安全风险, 同时配合优化算法解决了线性调光色度漂移大的问题。实验结果表明, 系统混合光的色度稳定性可以保持在 1 阶 CIE $u'v'$ 圆内, 相应色度设定下的整个光强度调节范围内无可察觉的色差。理论研究和实验结果表明该混光照明系统简单可行, 具有较高的实用价值。

关键词: 白光 LED; 混合照明; 线性调光; 色差; CIE $u'v'$ 圆

中图分类号: O432 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20183905.0730

Mixed Lighting Based on Linear Dimming of Cold and Warm White LEDs

XIA Zhen-ping^{1,2*}, FU Bao-chuan^{1,2}, CHENG Cheng¹

(1. College of Electronic and Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

2. Virtual Reality Key Laboratory of Intelligent Interaction and Application Technology of Suzhou, Suzhou 215009, China)

* Corresponding Author, E-mail: xzp@usts.edu.cn

Abstract: To provide high quality, more safe and intelligent lighting source, the linear dimming mixed lighting system and its dimming and color modulation method were established based on the cold and warm white LEDs. The mixed lighting source set the light color and intensity using color temperature and lightness, which was more accord with humanized requirements. In the procedure of system intelligent light distribution optimization, the color temperature was converted to chromaticity coordinate on the CIE $u'v'$ diagram and the lightness was converted to luminance, which made the optimizing computation more precise. The system adopted linear dimming method to avoid safety risk induced by flicker, and the adopted optimization algorithm solved the big color shift problem of linear dimming. The experiment results show that the chromaticity stability of the mixed lighting system can keep within 1-step CIE $u'v'$ circle, which means with specific chromaticity setting, there is no perceivable chromatic aberration. The theoretical research and experiment results show that the mixed lighting system is simple, practicable and with high practical value.

Key words: white LED; mixed lighting; linear dimming; chromatic aberration; CIE $u'v'$ circle

收稿日期: 2017-08-18; 修订日期: 2017-10-17

基金项目: 江苏省高校自然科学研究面上项目(15KJB510030); 苏州市 2016 年度第六批科技发展计划(SZS201609)资助项目
Supported by The University Natural Science Research Program of Jiangsu Province(15KJB510030); The Sixth Group of Science and Technology Development Plan of Suzhou in 2016(SZS201609)

1 引言

白光发光二极管(Light emitting diode, LED)具有使用寿命长、体积小、光效高、节能、环保、可控性强等特点,因此被广泛应用于家庭、商场、道路等各种照明场合^[1-5]。随着技术的发展,人们对LED照明的光品质、安全性、智能化也提出了越来越高的要求。

以简单的相关色温指标表述的照明光色度在各种不同的照明场合都有重要的影响。家庭照明中,不同的光色度对人的情绪会产生不同的影响,同时会影响昼夜生物节律。商业照明中,环境光色度会影响消费者对商品的选择。医疗照明中,光色度的周期性变化可以影响人体免疫功能。道路照明中,光色度会影响交通参与者对道路状况的分辨能力和反应速度^[6]。智能照明中,除了光色度的调节,光强度的调节也是最基本的需求之一。LED照明常用的调光方式有脉冲宽度调光(Pulse width modulation, PWM)和线性调光。PWM调光通过控制LED驱动电流的通断时间比例进行平均光强调节,其优点是调节范围内光色度相对恒定并且可以进行精确控制,其缺点是存在闪烁有健康风险。线性调光控制通过LED电流的大小调控光强度,其优点是调控电路简单易实现,其缺点是调节范围内存在较大的色度差^[2,7]。

为了满足不同照明场合的需求,光色度、光强度可调的智能照明成为LED照明的研究热点。可实现以上功能的技术包括:红、绿、蓝三基色LED混合照明;红光、蓝光、白光LED混合照明;冷暖白光LED混合照明等^[4,8]。其中,冷暖白光LED混色稳定性好,混色模型简单易于实现,实用性强。然而,现有冷暖白光LED混合照明技术仍然存在诸多问题需要改进:(1)多以PWM调光为主,潜在健康隐患;(2)光色度差的定义以色温为依据,致使模型输出的光色度恒定效果不佳;(3)光强度的等级划分以客观亮度(Luminance)为依据,不符合主观需求。为了解决以上问题,本文提出了基于冷暖白光LED的线性调光混合照明技术。系统中,冷暖白光LED均采用线性调光无闪烁;光色度差的定义采用了CIE 1976 $u'v'$ 圆色差表示方法,避免了相关色温和色坐标一对多的不确定关系;光强度调控的等级以明度(Light-

ness)为依据,更加符合主观实际需求。

2 冷暖白光LED混光理论

任一种光颜色都可以用CIE 1931色度图上的坐标进行表示,如图1所示。为了量化某个光源所发出光的颜色,物理学家定义了一种理想的热辐射体——黑体。黑体辐射中,随着温度的不同,所辐射光的颜色呈现由红、橙红、黄、黄白、白、蓝白渐变的过程,相应的色坐标形成黑体轨迹(图1(a))。光源呈现的颜色与黑体辐射在某一温度呈现的颜色相同时,黑体温度称为该光源的色温。然而绝大部分光源的色坐标并不会恰好落在黑体轨迹上,因此提出了相关色温的概念,即利用距离光源色坐标点最近的黑体轨迹坐标点对应的温度表示,同一相关色温对应“等温线”上所有色坐标点(图1(a))^[9]。

冷暖白光LED混合照明系统中分别选择一

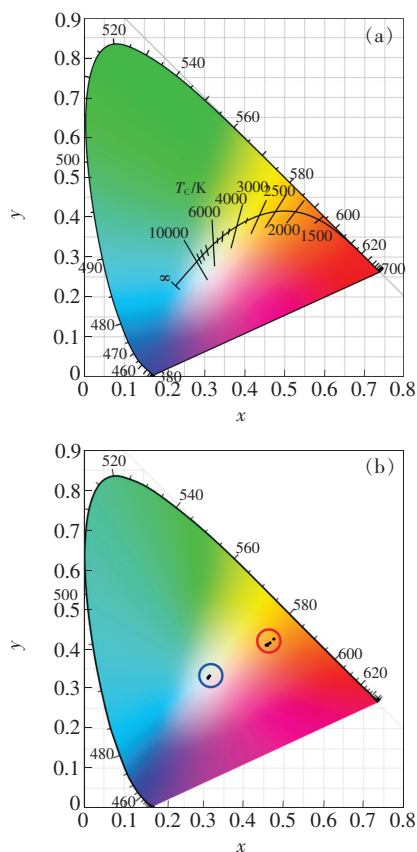


图1 CIE 1931 xy 色度图。(a) 黑体轨迹及相关色温等温线;(b) 冷暖白光LED线性调光下的色漂移。

Fig.1 CIE 1931 xy chromaticity diagram. (a) Black body locus and lines of constant correlate temperature. (b) Color shift of cold and warm white LEDs with linear dimming.

组冷色调白光 LED 和一组暖色调白光 LED 进行混光。为避免闪烁可能带来的健康隐患,两组 LED 的调光方式均为线性调光。若已知 CIE 1931 xyY 色彩空间中,冷暖白光对应表达分别为 $x_c y_c Y_c$ 和 $x_w y_w Y_w$ 。根据格拉斯曼定律和重心原理,冷暖白光 LED 混合光的色坐标 (x_m, y_m) 必定落在冷暖白光 LED 色坐标的连线上。由于 xy 色品空间并不是线性空间,具体混色坐标的计算必须在三刺激值空间(CIE 1931 XYZ)进行。两者之间的转换关系如下:

$$\zeta = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{Y}{y} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 - x - y \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\eta = \begin{bmatrix} x \\ y \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X/(X+Y+Z) \\ Y/(X+Y+Z) \\ Y \end{bmatrix}, \quad (2)$$

CIE 1931 XYZ 三刺激值空间线性可加,混合光的三刺激值矢量可表示为:

$$\zeta_m = \zeta_c + \zeta_w, \quad (3)$$

得到的混合光三刺激值可以根据式(2)再变换得到 CIE 1931 xyY 色彩空间,得到相应色品坐标。

然而由于系统中冷暖白光 LED 均采用线性调光的方式,在整个 0~100% 光强度调节范围内,单独冷暖白光 LED 所发出的光均具有较大的色漂移(图 1(b))。在给定混色色温下,要设置冷暖白光的发光强度比例,会存在极大的不确定性。

3 白光 LED 照明的色度偏差

光强度、光色度可调的智能照明系统要求在设定的色度下,调节光强度时能尽可能地保持色度的恒定,即色差在不可察觉的范围内。由于相关色温和色坐标之间存在一对多的关系,利用相关色温差表示色差并不准确。

麦克亚当(Macadam)在 1942 年设计了颜色匹配实验,实验中一个颜色为固定参考色,受测者需要调节另一颜色以匹配参考色,由于人眼精确度有限,所有的色匹配结果落在以参考色坐标为中心的椭圆范围内,以每个方向上颜色匹配结果变动的标准差确定椭圆的边界,便形成了 CIE 1931 色度图上的 25 个麦克亚当椭圆,如图 2 所示(基于可视性,图中为放大 10 倍的情况)^[10]。通常用“阶”数来表示麦克亚当椭圆,1 阶麦克亚当椭圆内的色坐标几乎没有任何差别,3 阶麦克

亚当椭圆对应颜色的恰可觉察差,能源之星以 7 阶麦克亚当椭圆定义照明产品的色差允许范围。

麦克亚当椭圆表示的是标准差,而不是直接表示色差,另外 CIE 1931 xy 色品空间也并不是均匀色度空间,无法精确表示色度差。CIE 1976 USC 色度系统将 CIE 1931 xy 色度坐标加以转换(如式 4 所示):

$$\begin{cases} u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \\ v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3} \end{cases}, \quad (4)$$

形成更加均匀的色度空间,使得色差得以精确表示。

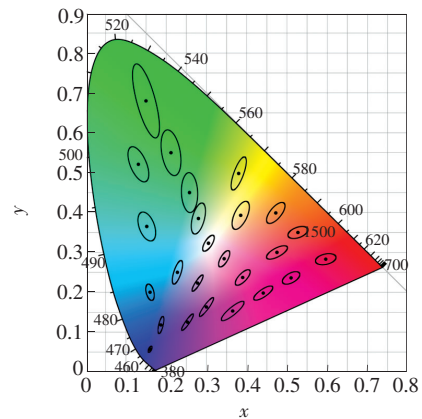


图 2 CIE 1931 xy 色度图上的 10 阶麦克亚当椭圆

Fig. 2 10-step Macadam ellipses plotted on the CIE 1931 xy chromaticity diagram

CIE 1976 $u'v'$ 色品空间的色差可以表示为:

$$\Delta u'v' = \sqrt{(u'_1 - u'_0)^2 + (v'_1 - v'_0)^2}, \quad (5)$$

图 2 中的麦克亚当椭圆转换到 $u'v'$ 坐标系后近似圆形,考虑到 1942 年实验可能存在的不确定度和实际差异的微小性,CIE 提出了 $u'v'$ 圆的方式替

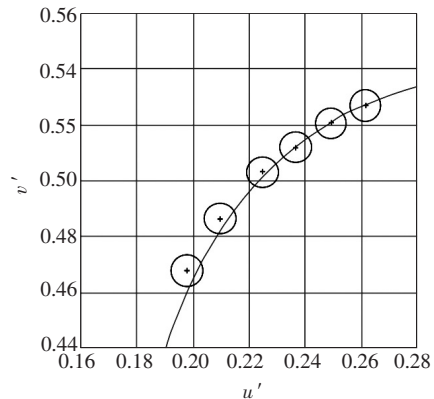


图 3 CIE 1976 $u'v'$ 色度图上的 5 阶 $u'v'$ 圆

Fig. 3 5-step circles plotted on CIE 1976 $u'v'$ chromaticity diagram

代表克亚当椭圆。CIE $u'v'$ 圆的阶数对应圆半径 $\Delta u'v'$ 除以 0.001 1 的倍数。图 3 是 5 阶 $u'v'$ 圆的情况, 其圆心与对应麦克亚当椭圆的中心点一致^[11]。

4 混合照明的线性调光调色方法

4.1 系统组成及调光调色方法

冷暖白光 LED 混合照明系统由 LED 调光控制器、微处理系统、直流驱动器组和 LED 模组组成。如图 4 所示, LED 调光控制器用于输入调光信号, 调光信号包含光强度和光色度设定信号; 微处理系统根据接收到的调光信号, 经过处理后得到冷暖白光 LED 的驱动电流控制信号; 直流驱动器根据电流控制信号, 产生直流电流直接驱动冷暖白光 LED; 为增强混光效果, LED 模组上的冷暖白光 LED 交叉分布。

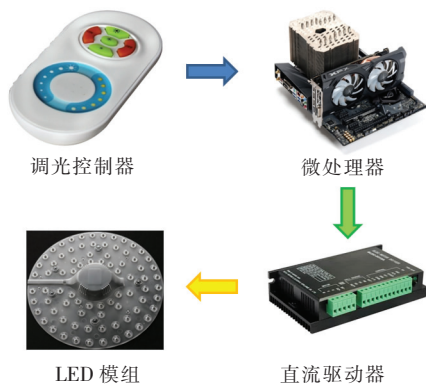


图 4 混合照明系统的组成

Fig. 4 Components of color mixing lighting system

4.2 设定与输出参量的查找表构建

为确保照明系统调控的实时性, 输入的调光信号与输出驱动电流控制信号之间通过查找表建立关系, 如图 5 所示。首先, 分别测量冷暖白光 LED 在不同工作电流下的 XYZ 三刺激值, 测量的照明系统确保是最终的产品设计, 包括 LED 的排布、灯罩的使用等, 测试过程在暗室中进行, 只改变驱动电流的大小, 其他条件保持一致。基于测试结果, 通过数据拟合分别建立冷暖白光 LED 亮度 Y 与 X, Z 以及电流 I 之间的数值关系, 如式 (6) 所示:

$$\begin{cases} X = a_1 Y^3 + a_2 Y^2 + a_3 Y + a_4 \\ Z = b_1 Y^3 + b_2 Y^2 + b_3 Y + b_4 \\ I = c_1 Y^3 + c_2 Y^2 + c_3 Y + c_4 \end{cases}, \quad (6)$$

为了符合主观光强度调控需求, 需要依据明度划分光强度调控等级, 因此建立归一化的亮度 Y 与明度 L 之间的函数关系, 如式 (7) 所示:

$$\begin{cases} Y = [(L + 16)/116]^3, L > 0.08 \\ Y = L \times 27/29^3, L \leq 0.08 \end{cases}, \quad (7)$$

亮度 Y 与明度 L 是非线性关系, 如图 6 所示^[12]。

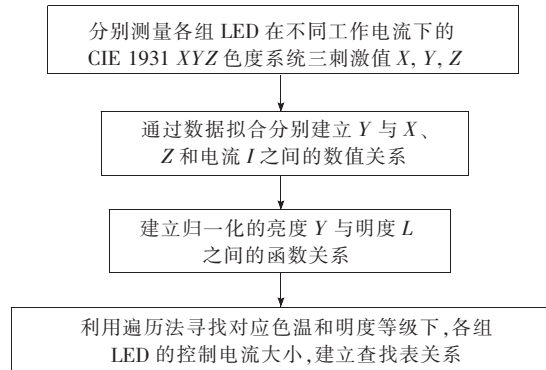


图 5 查找表建立流程图

Fig. 5 Flow diagram of lookup table establishment

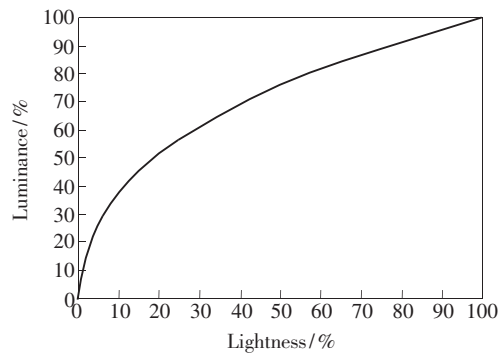


图 6 明度与亮度之间的非线性关系

Fig. 6 Nonlinear relation between lightness and luminance

输入光色度信号以色温为依据, 而实际优化配光比的计算中涉及的色度需要以 CIE $u'v'$ 色坐标表示, 因此需要建立两者之间的关系。同样通过数据拟合的方式建立黑体轨迹坐标 $u'_0v'_0$ 与色温 T_c 的对应关系:

$$\begin{cases} u'_0 = p_1 T_c^3 + p_2 T_c^2 + p_3 T_c + p_4 \\ v'_0 = q_1 T_c^3 + q_2 T_c^2 + q_3 T_c + q_4 \end{cases}, \quad (8)$$

图 5 涉及查找表建立的最后一步也是最关键的一步, 利用遍历法寻找对应色温和明度等级下, 冷暖白光 LED 的电流控制信号。输入的明度信号 L 用百分数表示, 根据式 (7) 可计算出对应归一化亮度 Y 。选取冷暖白光 LED 最大亮度中的最小值作为整个照明系统的最大亮度, 该最大亮度与归一化亮度 Y 相乘即为当前照明系统的实际亮

度。在当前设定的色温 T_c 下,根据式(8)存在对应的黑体轨迹坐标 $u'_0v'_0$,系统的优化首先是确定明度 L 在 100% 时,最佳的冷暖白光 LED 亮度组合,满足混光色坐标与黑体轨迹坐标 $u'_0v'_0$ 差异最小,见式(5)。在计算后续非 100% 明度等级下的最佳值时,为保证 LED 照明系统自身的色差最小化,后续最佳色坐标不再以对应色温下的黑体辐射轨迹坐标为依据,而是以 100% 明度等级下计算出的最佳色度坐标为依据,同样寻找色差最小的混光配比。最后再根据亮度与驱动电流之间的对应关系,计算出各个输入明度等级和色温设定下的冷暖白光驱动电流信号,如式(9)所示:

$$\begin{cases} I_w = f_1(L, T_c) \\ I_c = f_2(L, T_c) \end{cases} \quad (9)$$

表 1 冷暖白光 LED 混合照明的色度稳定性

Tab. 1 Chromaticity consistence of cold and warm white LED mixed lighting

照明类型	100% 明度时的色温/K	0 ~ 100% 明度对应色温范围/K	最大色温差/K	$u'v'$ 色差	色差阶数
单色暖光	2 663	2 615 ~ 2 668	53	0.003 3	3
单色冷光	6 446	6 335 ~ 6 446	111	0.002 2	2
混合照明	2 979	2 974 ~ 2 996	22	0.000 8	1
	3 365	3 363 ~ 3 374	11	0.001 0	1
	3 864	3 864 ~ 3 883	19	0.001 3	1
	4 407	4 407 ~ 4 424	17	0.001 4	1
	4 952	4 952 ~ 4 976	24	0.001 4	1
	5 628	5 628 ~ 5 653	25	0.001 5	1

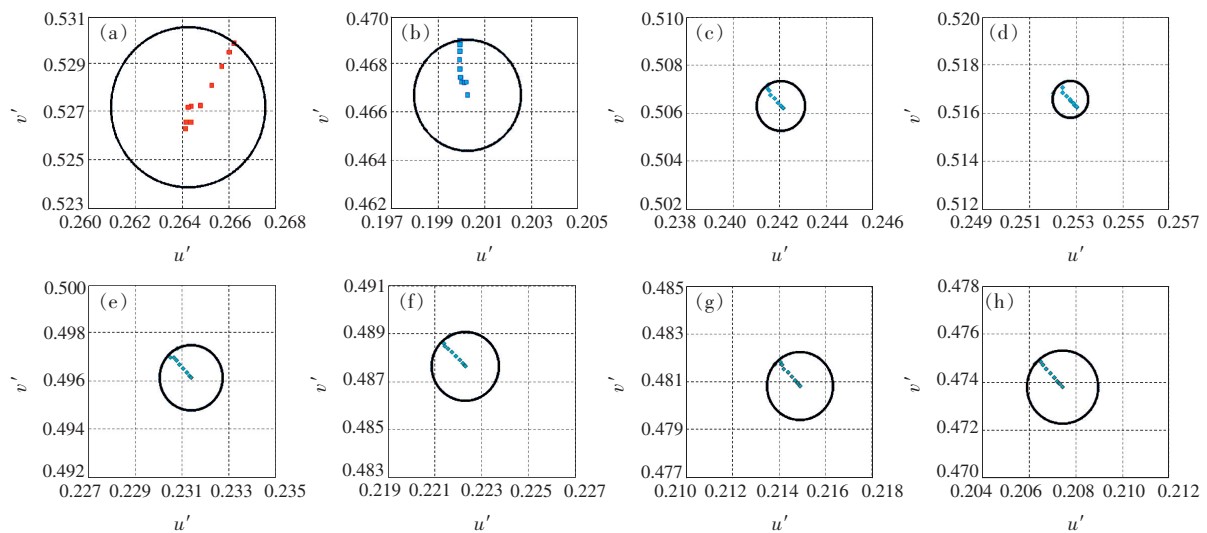


图 7 CIE $u'v'$ 圆表示的照明系统色度稳定性。(a) 单色暖光 2 700 K; (b) 单色冷光 6 400 K; (c) 混光 3 000 K; (d) 混光 3 400 K; (e) 混光 3 900 K; (f) 混光 4 400 K; (g) 混光 5 000 K; (h) 混光 5 600 K。

Fig. 7 Lighting system chromaticity consistence illuminated with CIE $u'v'$ circle. (a) Monochrome warm light 2 700 K. (b) Monochrome cold light 6 400 K. (c) Mixed light 3 000 K. (d) Mixed light 3 400 K. (e) Mixed light 3 900 K. (f) Mixed light 4 400 K. (g) Mixed light 5 000 K. (h) Mixed light 5 600 K.

5 混合照明效果分析

冷暖白光 LED 线性混合照明系统的效果验证采用了额定色温分别为 6 500 K 和 2 700 K 的冷暖白光 LED。表 1 分别列出了单色和混色情况下各个明度等级的色温、色温差、 $u'v'$ 色差及其对应的阶数。明度等级为从 10% 到 100% 的均分 10 个等级。冷暖白光 LED 单独工作时,在整个明度的调节范围内,无论从色温变化的范围还是 $u'v'$ 色度变化的角度,都具有较大的色度漂移。其中, $u'v'$ 色差等级分别对应 3 阶和 2 阶。表 1 所列 6 种混合照明的效果分别对应设定色温 3 000, 3 400, 3 900, 4 400, 5 000, 5 600 K。混合照明在各自的设定色温下,整个明度调节范围内的相关

色温差均在 25 K 以内, $u'v'$ 色差等级均为 1 阶,表明不可察觉的色差。

相关色温和 $u'v'$ 色坐标两种对 LED 照明色度的表示方法各有优劣。相关色温的表示对于普通消费者更易于理解和使用;而相关色温和 $u'v'$ 色坐标之间是一对多的关系, $u'v'$ 色坐标在均匀色空间表示色度及其差异更加准确。因此,提出的混合照明系统的调色输入设置采用色温表达,在实际的色差计算和调控过程中,采用由色温转换而来的 $u'v'$ 色坐标的表达。由此可以理解 6 种混光的设定色温和实际测量相关色温之间存在一定的差异。图 7 为 CIE $u'v'$ 圆表示的照明系统色度稳定性。

6 结 论

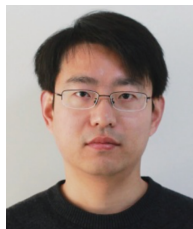
光源的高光品质、安全性和智能化成为 LED 照明系统追求的目标。基于智能化的要

求,本文提出了基于冷暖白光 LED 的光强度、光色度可调的智能照明系统;基于安全性的考虑,系统采用线性调光的方式,避免了 PWM 调光方法可能存在的安全隐患;为了追求高的光品质,系统采用优化算法确保设定色度下,整个光强度调节范围内色度维持恒定。优化算法中采用 CIE $u'v'$ 均匀色品坐标中的色差定义,避免相关色温差定义带来的不确定性。除此以外,系统的光强度设定采用明度为量化等级,使其更加符合主观需求。实验验证结果表明,基于冷暖白光 LED 的线性调光混合照明系统混合光的色度稳定性可以保持在 1 阶 CIE $u'v'$ 圆内,相应色度设定下的整个光强度调节范围内无可察觉的色差。系统的优化方法采用线性调光避免闪烁的同时,通过混光算法解决了单色冷暖白光 LED 线性调光时色度漂移大的问题,提供了高品质的智能 LED 调光解决方案。

参 考 文 献:

- [1] 唐帆,王丹,郭震宁,等. LED 异形灯的散热设计与实验 [J]. 发光学报, 2017, 38(3):365-371.
TANG F, WANG D, GUO Z N, *et al.*. Thermal design and experiment for special-shaped LED lamp [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(3):365-371. (in Chinese)
- [2] 周晓明, 罗达, 张惠平. 不同调光方式 LED 照射下的人体非视觉效应 [J]. 发光学报, 2016, 37(7):892-898.
ZHOU X M, LUO D, ZHANG H P. Human non-visual effects under LED light with different dimming methods [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016, 37(7):892-898. (in Chinese)
- [3] 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.
LUAN X Y, LIU T Z, ZHOU Z L. LED color mixing design based on improved artificial fish swarm algorithm [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(1):113-120. (in Chinese)
- [4] 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.
SONG P C, WEN S S. A dimming method for LEDs based on three-channel pulse width modulation [J]. *J. Optoelectron · Laser*, 2015, 26(5):839-846. (in Chinese)
- [5] 熊晨雨, 吴玉香, 李杨, 等. RGBW 四色 LED 混光优化在日光模拟中的应用 [J]. 光子学报, 2017, 46(8):0823006.
XIONG C Y, WU Y X, LI Y, *et al.*. Application of mixed light optimization of RGBW-LEDs in solar simulation [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2017, 46(8):0823006. (in Chinese)
- [6] 陈盛雄, 朱大庆, 廖欣怡. 一种预测白光 LED 相关色温的新方法 [J]. 发光学报, 2017, 38(6):820-827.
CHEN S X, ZHU D Q, LIAO X Y. A new method for predicting correlated color temperature of white LEDs [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(6):820-827. (in Chinese)
- [7] DYBLE M, NARENDRAN N, BIERMAN A, *et al.*. Impact of dimming white LEDs: chromaticity shifts due to different dimming methods [J]. *SPIE*, 2005, 59411:59411H.
- [8] 胡奕彬, 刘士伟, 刘思远, 等. 双通道 PWM 的冷暖白光 LED 混色模型研究 [J]. 光电子·激光, 2015, 26(11):2089-2095.
HU Y B, LIU S W, LIU S Y, *et al.*. A study on colour mixture model for cold and warm white LEDs based on two-channel PWM [J]. *J. Optoelectron · Laser*, 2015, 26(11):2089-2095. (in Chinese)

- [9] LI C J, CUI G H, MELGOSA M, *et al.* . Accurate method for computing correlated color temperature [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(13):14066-14078.
- [10] GRAVESEN J. The metric of colour space [J]. *Graph. Models*, 2015, 82:77-86.
- [11] 黄艳, 任胜东, 陈聪, 等. CIE 关于光源色差的最新技术注解解读 [J]. *照明工程学报*, 2013, 24(6):42-44.
HUANG Y, REN S D, CHEN C, *et al.* . Explanation of CIE new technical note on the colour difference of light sources [J]. *J. Lighting Eng.*, 2013, 24(6):42-44. (in Chinese)
- [12] GILCHRIST A. Mapping luminance onto lightness in vision and art [J]. *SPIE*, 2013, 8651:865105-1.



夏振平(1985 -),男,江苏兴化人,博士,讲师,2014 年于东南大学获得博士学位,主要从事显示和照明质量的测量、评价和优化方面的研究。

E-mail: xzp@usts.edu.cn