中国光学（中英文）
Chinese Optics
核心期刊

基于三基色LED的线性调光混合照明

黄涛 夏振平 彭子雄 刘宇杰 李超超 顾敏明

Mixed lighting based on the linear dimming of three-primary-color LEDs

HUANG Tao, XIA Zhen-ping, PENG Zi-xiong, LIU Yu-jie, LI Chao-chao, GU Min-ming

引用本文:
黄涛, 夏振平, 彭子雄, 刘宇杰, 李超超, 顾敏明. 基于三基色LED的线性调光混合照明[J]. 中国光学, 2024, 17(1): 108–117. doi: 10.37188/CO.2023–0084
HUANG Tao, XIA Zhen-ping, PENG Zi-xiong, LIU Yu-jie, LI Chao-chao, GU Min-ming. Mixed lighting based on the linear dimming of three-primary-color LEDs[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(1): 108-117. doi: 10.37188/CO.2023-0084

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2023–0084

文章编号　2097-1842(2024)01-0108-10

基于三基色 LED 的线性调光混合照明

黄　涛，夏振平*，彭子雄，刘宇杰，李超超，顾敏明
（苏州科技大学 电子与信息工程学院，江苏 苏州 215009）

摘要：为提供高品质、智能健康的照明光源，基于三基色 LED 光源构建了线性调光混合照明系统，并提出一种调光调色的优化方法。混合光源的光色度和光强度分别用色温和明度等级来设定，使得混合照明效果更加符合“人因照明”的需求。在系统的智能优化配光过程中，将色温转化为 CIE $u'v'$ 色度坐标，明度转化为亮度，使优化计算更加精确。该系统采用线性调光的方式，既能有效避免混合光源闪烁带来的健康安全问题，配合优化算法又有效解决了线性调光色度漂移大的问题。实验结果表明，在 2000 K~8000 K 的色温范围内，混合照明系统混合光的色度稳定性保持在 1 阶 CIE $u'v'$ 圆内，在对应色温下的整个光强度调节范围内无可察觉的色差。采用线性调光方式在保持光色度稳定上比脉冲宽度调光方式效果更佳。理论探究和实验结果表明该混光照明系统简易可行，具有较高的实用价值。

关　键　词：三基色 LED；混合照明；线性调光；人因照明；色差；CIE $u'v'$ 圆
中图分类号：TN206　　**文献标志码**：A　　**doi**：10.37188/CO.2023-0084

Mixed lighting based on the linear dimming of three-primary-color LEDs

HUANG Tao, XIA Zhen-ping*, PENG Zi-xiong, LIU Yu-jie, LI Chao-chao, GU Min-ming
(*College of Electronics and Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou* 215009, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: xzp@usts.edu.cn*

Abstract: To provide high-quality, intelligent, and healthy lighting sources, a linear dimming mixed lighting system is constructed using three-primary-color LED light sources. An optimization method for dimming and color mixing is proposed. The light chromaticity and light intensity of the mixed light source are set by color temperature and brightness level, which makes the mixed lighting effect more in line with the demand of "human-centric lighting". In the intelligent optimization of the system, the color temperature is converted into CIE $u'v'$ chromaticity coordinates, and the brightness is converted into luminance to make the optimization calculations more accurate. The system adopts the linear dimming method, effectively avoiding the health and safety hazards caused by light source flicker, and effectively solves the problem of large linear dimming chromaticity drift with an optimization algorithm. Experiment results demonstate that the chromatic stability

收稿日期：2023-05-09；**修订日期**：2023-05-19
基金项目：国家自然科学基金(No. 62002254)；江苏省自然科学基金(No. BK20200988)
Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62002254); the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (No. BK20200988)

of the mixed light in the mixed lighting system is maintained within the first step of the CIE $u'v'$ chromaticity diagram in the color temperature range of 2000 K−8000 K. Moreover, the system exhibits imperceptible color deviation over the entire range of light intensity adjustments at the corresponding color temperature. This finding also indicates that linear dimming is better than the pulse-width dimming method in keeping the optical chromaticity stable. Theoretical exploration and experimental results demonstrate that the mixed lighting system is simple and feasible, with significant practical value.

Key words: three-primary-color LEDs; mixed lighting; linear dimming; human-centric lighting; chromatic aberration; CIE $u'v'$ circle

1　引　言

与传统的荧光灯和白炽灯相比，发光二极管(Light Emitting Diode, LED)具有亮度高、寿命长、体积小、绿色节能、响应快等优点，在照明领域、光通信领域有着广泛的应用[1-8]。自 2002 年美国 Brown 大学的 Berson D M 等[9] 发现了哺乳动物视网膜存在第三类感光细胞——内在光敏视网膜神经节细胞(intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cells, ipRGCs)以来，研究人员一直在探究光对人体健康的生物学和心理学影响[10-13]。因此，现在的 LED 照明不仅仅是为了照亮周围环境，更应该考虑光的非视觉效应，并将光学安全和健康作为室内照明的首要任务[14-16]。

在智能照明领域中，LED 是常用的照明技术之一，其调光方式通常有两种：脉冲宽度调光(Pulse Width Modulation, PWM)和线性调光。其中，PWM 调光通过数字化脉冲控制 LED 驱动器实现，通过改变平均输出电流实现 LED 亮度的调节。尽管其可实现对 LED 平均电流的精准控制，并将光源闪烁频率控制在人眼无法感知的范畴内，但在一定程度上会对人的注意力和视觉感知产生负面影响，存在健康安全方面的隐患[17-18]。线性调光通过连续、线性地调节 LED 电流从而实现亮度控制。由于 LED 线性调光可以在不改变频率的情况下实现光源的连续调光，因此调光过程更加自然且平滑，不会产生明显的闪烁和眩光，可以很好地避免 PWM 调光可能引起的视觉疲劳和不适，不过其在调光范围内可能存在较大色差[19]。

实现光色度、光强度可调的技术包括冷暖白光混合照明[4, 19]、红绿蓝三基色混合照明[5] 以及红、绿、蓝、青、黄、暖白 6 色 LED 混合照明[20] 等。但目前的照明系统存在以下问题：通常采用的 PWM 调光存在因调光方式导致 LED 闪烁并由此带来的健康安全隐患；用客观亮度划分光强度等级，并未考虑人的主观感知；光色度的定义以相关色温为依据，导致调光过程中光色度恒定效果不佳。

针对上述问题，本文提出基于红绿蓝三基色 LED 的线性调光混合照明系统。该系统采用线性调光方式，因此并不存在因光源闪烁而引起的健康及安全问题。为更契合“人因照明”理念，在光强度调节过程中以明度代替亮度，使得混合照明光源的调光等级更符合人的感知等级。光色度差采用 CIE 1976 $u'v'$ 中的圆色差定义，避免由相关色温定义色度偏差而带来的不准确性。同时采用三基色 LED 进行混合照明，解决了冷暖白光混合照明色域范围小，多色 LED 混合照明所需成本高的问题。

2　三基色 LED 混光理论

色温是描述光源颜色的重要参数。人们可以根据光源色温的高低来判断光源的颜色。色温通常以黑体辐射源发出的颜色进行表征，即当光源颜色与某一特定温度 T 下的黑体辐射源发出的颜色相同时，该黑体的温度就代表该光源的色温。然而，任何温度下的黑体辐射源所发出的颜色并不可能与实际光源颜色完全相同。因此，物理学家引入了相关色温(Correlated Color Temperature, CCT)的概念。根据国际照明委员会(Commission Internationale de l'Eclairage, CIE)的标准，任何颜色都能在 CIE 1931 xy 色度图上表示出来，如图 1(a)(彩图见期刊电子版)所示。图 1(a) 中的黑

色曲线称为黑体轨迹，它代表的是不同温度下的黑体辐射源的颜色坐标。光源色坐标与黑体轨迹最接近的色品坐标对应的黑体辐射源温度称为该光源的相关色温，同一相关色温对应“等温线”上所有色坐标点（即与图 1(a) 黑色曲线相交的斜线）。

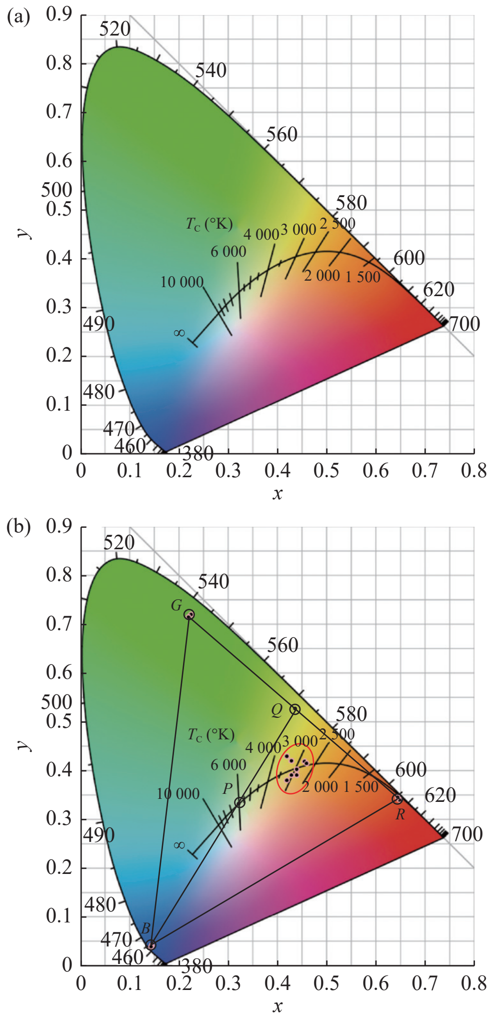

图 1 CIE 1931 xy 色度图。(a)黑体轨迹及相关色温等温线；(b)三基色混光区域图及色漂移示意图

Fig. 1 CIE 1931 xy chromaticity diagram. (a) Blackbody locus and correlated color temperature isotherms; (b) three primary colors mixed lighting region diagram and color draft schematic

红绿蓝三基色 LED 混合照明系统是采用红光 LED、绿光 LED、蓝光 LED 进行线性混光。在混合白光的同时，线性调光避免了闪烁可能引起的健康安全隐患。在 CIE 1931 xyY 色彩空间中，通过色品坐标和亮度值 Y 来唯一表征颜色，即通过 xyY 来表示颜色。红光、绿光、蓝光对应表达分别为 $x_r y_r Y_r$、$x_g y_g Y_g$、$x_b y_b Y_b$，相应的色坐标点在图 1(b)（彩图见期刊电子版）中用 R、G、B 表示。根据格拉斯曼定律，红光、绿光 LED 混合得到的中间色的色坐标必定落在两色坐标点连线上，如图 1(b) 中的点 Q，点 Q 的具体坐标是由红色、绿色 LED 光源的混合比例决定的。然后，再利用中间色 Q 与蓝光 LED 根据某一混合比例得到目标色，如图 1(b) 中 P 点。从图中可以看出，三基色所围成的区域涵盖了大部分的黑体轨迹，这也从理论上说明采用三基色能够混合任意色温的白光。

由于 xy 色品空间是非线性空间，根据 CIE 1931 色坐标计算方法[21]，混色坐标的计算须在三刺激值空间 CIE 1931 XYZ)进行。二者之间的转换关系为：

$$\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ Y \end{bmatrix} = \frac{Y}{y}\begin{bmatrix} X/(X+Y+Z) \\ Y/(X+Y+Z) \\ Y \end{bmatrix} \quad , \tag{1}$$

$$\boldsymbol{\zeta} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{Y}{y}\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1-x-y \end{bmatrix} \quad . \tag{2}$$

三刺激值空间线性可加，故三基色混合光的三刺激值矢量表示为：

$$\zeta_m = \zeta_r + \zeta_g + \zeta_b \quad . \tag{3}$$

再通过式(1)变换得到 CIE 1931 xyY 色彩空间，从而得到对应的混合光源的色品坐标。

在该系统中三基色 LED 光源均采用线性调光，在整个 0~100% 光强度调节范围内,单独的三基色 LED 也存在色度偏差，如图 1(b) 中 RGB 三个顶点处。当混合白光的色温确定时，分别调节三基色 LED 的发光强度，实际的混合色坐标也可能和理论上色坐标存在较大差异,如图 1(b) 中红色圈出来的色坐标点（所代表的含义是混光目标色温为 3 000 K 时，调节三基色的驱动电流进行混光时所产生的色漂移）。

3 三基色 LED 混合照明的色度偏差

智能照明系统中的 LED 具有丰富多变的光谱特点，使得它可以广泛应用于照明领域。然而，由于 LED 光源的灵活性和多变性，三基色 LED 混光照明应用中存在光色不一致的问题。在颜色

工程领域中,色差用于度量光色度的变化。在光色度和光强度均可调节的智能照明系统中,当光色度固定时,光强度调节要求色差在不可察觉的范围内,即光色度无显著变化。尽管相关色温与色坐标之间存在关系,但由于其是一对多的关系,因此用相关色温来表示色差并不准确。

美国颜色科学家麦克亚当进行了大量颜色匹配实验,并从 CIE 1931 *xy* 色品坐标系中选择了 25 个参考点。他认为每个参考点的观察误差服从正态分布,且在不同方向上可能有不同的标准差。因此,他考虑了 1 个标准差的误差坐标点,并将这些点绘制成封闭曲线。研究后发现,这些封闭曲线近似为椭圆形,这就是 CIE 1931 色度图中的 25 个麦克亚当椭圆。通常用“阶”数来表示麦克亚当椭圆,1 个标准差表示 1 阶。1 阶麦克亚当椭圆内的色坐标基本没有差异,而 3 阶麦克亚当椭圆代表恰可察觉的色差,7 阶麦克亚当椭圆用于定义照明产品的色差容忍范围。当光源的色差超出人眼能够容忍的范围时,照明会造成光学和健康安全方面的影响。图 2(彩图见期刊电子版)为带有 25 个麦克亚当椭圆的色度图(为方便观察,椭圆的长短轴已各放大 10 倍)。

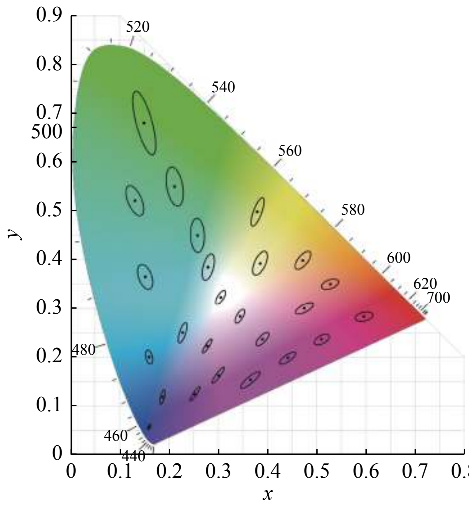

图 2　CIE1931 *xy* 色度图上的 10 阶麦克亚当椭圆

Fig. 2　10-step MacAdam ellipse in CIE1931 *xy* chromaticity diagram

CIE TN 001:2014 指出麦克亚当当初对于 3 阶的恰可察觉色差定义不清,且由于 CIE1931 色品空间是非均匀的,用基于 CIE 1931 色品坐标系定义的麦克亚当椭圆的色差概念并不准确。考虑到 CIE 1976 色品空间是个均匀的色品空间,在 CIE 1976 的白光区域,麦克亚当椭圆近似为圆,LED 的大部分实际应用就在这个区域,所以用$u'v'$圆代替椭圆表示色差更加精确。图 3 是 5 阶 $u'v'$圆,其圆心与对应的麦克亚当椭圆的中心点一致[22]。

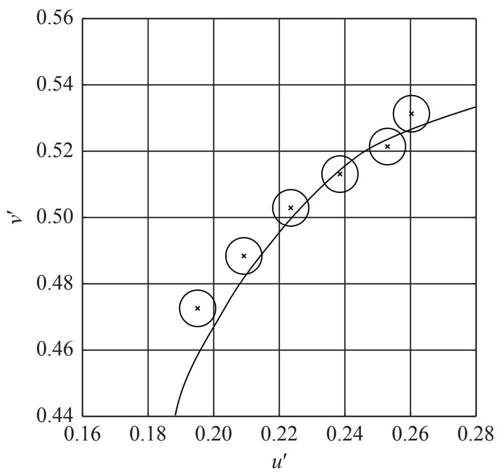

图 3　CIE 1976 $u'v'$ 色度图上的 5 阶$u'v'$圆

Fig. 3　5-step $u'v'$ circle on the CIE 1976 $u'v'$ chromaticity diagram

CIE 1976 USC 色度坐标表示为 (u', v'), 其是在 CIE 1931 色度坐标 (x, y) 基础上进行转换得到的,转换过程如式(4)所示:

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

由于 CIE 1976 色品空间是均匀空间,人眼视觉差异相同的不同颜色大致是等距的,所以通过两个颜色点的相对距离可以直观看出两颜色的色差大小。CIE 1976 色品空间色差可以表示为:

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

式中u'_1, v'_1为实际光源的坐标,u'_0, v'_0为目标光源的坐标。在 CIE 1976 $u'v'$圆色差的表示方法中,$u'v'$圆的阶数等于$\Delta u'v'$除以 0.001 1。

4　混合照明的线性调光调色方法

4.1　系统组成和调光调色方法

红绿蓝三基色 LED 混合照明系统是由 LED 调光控制器、微处理器、流驱动器和三基色 LED 模组构成。整体调光调色通过以下步骤实

现：首先，LED 调光控制器输入一个包含光色度、光强度的调光信号；微处理器接收并分析该调光信息，然后输出一个三基色 LED 的直流驱动控制信号；直流驱动器根据上级传输过来的直流驱动控制信号输出相应的直流电流去驱动 LED。

4.2 设定与输出参量的查找表构建

照明系统要求光源调控具有准确性和实时性，故需在输入的调光信号和输出的驱动电流控制信号之间建立查找表。

首先，建立光强度信号与驱动电流控制信号的关系。分别测量红、绿、蓝三组 LED 光源在不同电流 I 下的三刺激值 X、Y、Z 数据。所测系统是最终的产品设计方案，结果考虑到了 LED 光源的排布、散热等。整个测量过程在积分球中进行，只改变驱动电流这一变量。对测量结果进行数据拟合，分别得到三基色 LED 光源的亮度 Y 与刺激值 X、Z 及驱动电流 I 的拟合关系式，如式(6)~(8)所示：

$$\begin{bmatrix} X_r \\ Z_r \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9.111\times10^{-5} & -6.527\times10^{-3} & 2.243 & -0.118\,3 \\ -5.987\times10^{-5} & 4.238\times10^{-3} & 1.132\times10^{-2} & 0.119\,5 \\ 6.191\times10^{-4} & -3.449\times10^{-2} & 5.112 & -0.322\,8 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y_r^3 \\ Y_r^2 \\ Y_r \\ 1 \end{bmatrix}, \tag{6}$$

$$\begin{bmatrix} X_g \\ Z_g \\ I_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5.614\times10^{-6} & 1.005\times10^{-3} & 0.205\,8 & 0.175\,1 \\ -2.505\times10^{-6} & 4.048\times10^{-4} & 0.119\,3 & 0.150\,9 \\ -4.357\times10^{-6} & -7.726\times10^{-5} & 2.523 & 0.216\,2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y_g^3 \\ Y_g^2 \\ Y_g \\ 1 \end{bmatrix}, \tag{7}$$

$$\begin{bmatrix} X_b \\ Z_b \\ I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6.964\times10^{-4} & -4.842\times10^{-2} & 3.768 & -0.193\,4 \\ 6.737\times10^{-3} & -0.359\,7 & 21.58 & -1.502 \\ 1.094\times10^{-2} & -0.386\,7 & 18.02 & -1.321 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y_b^3 \\ Y_b^2 \\ Y_b \\ 1 \end{bmatrix}. \tag{8}$$

本文利用已有的三基色 LED 光源进行相关数据拟合，得到三基色 LED 光源关于以上相关拟合的拟合系数 R-square 均大于 0.98，拟合效果良好。

进一步，输入的光色度信号以色温为依据，但在实际调光优化过程中，用 CIE 1976 USC 色度坐标来表示色度信息，所以通过数据拟合建立黑体轨迹坐标 $u_0'v_0'$ 与色温 T_c 的函数关系，具体形式如式(9)所示：

$$\begin{bmatrix} u_0' \\ v_0' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.185\times10^{-12} & 2.435\times10^{-8} & -1.630\times10^{-4} & 0.555\,8 \\ 2.351\times10^{-13} & -3.198\times10^{-9} & -1.861\times10^{-6} & 0.548\,3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_c^3 \\ T_c^2 \\ T_c \\ 1 \end{bmatrix}. \tag{9}$$

为了使得拟合结果更加精确，在色温范围 1 000 ~10 000 K 内，每隔 200 K 求取色坐标用来拟合。通过拟合得到相关的拟合系数 R-square 均大于 0.99。

以主观明度取代客观亮度来划分光强度调控等级，使得光强度的调控需求更符合人的主观感知。式(10)表示的是归一化的亮度 Y'与明度 L 之间的函数关系[23]：

$$\begin{cases} Y' = [(L+16)/116]^3, L > 0.08 \\ Y' = L\times(27/29^3), L \leqslant 0.08 \end{cases}. \tag{10}$$

亮度 Y' 与明度 L 的关系曲线如图 4 所示。

建立相关查找表的最后一步是通过遍历法，寻找在固定色温和相应明度等级下，对应的三基色 LED 光源的电流控制信号。相关流程如图 5 所示。

为方便确定系统亮度的取值，明度信号以百分数表示，根据式(10)计算出对应等级下的归一化的亮度 Y'。选取三基色 LED 混合光源的最大亮度中的最小值作为该系统的最大亮度，系统的实际亮度为该亮度与归一化亮度 Y' 的乘积。

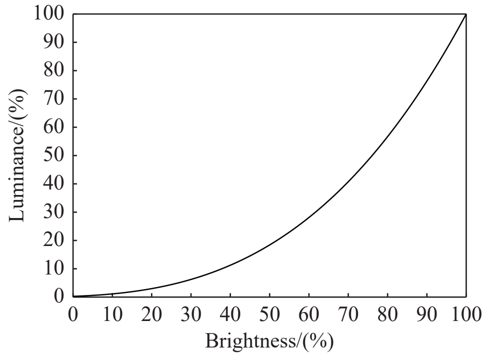

图 4 明度与亮度的关系曲线

Fig. 4 The relationship between brightness and luminance

具体的遍历过程如下:已知固定色温 T_c,将该色温 T_c 代入式(9)得到黑体轨迹坐标(u'_0, v'_0)。在明度为 100% 的情况下,遍历寻找使式(5)中的 $\Delta u'v'$ 最小的三基色 LED 亮度配比。在后面明度等级非 100% 的情况下,为了使得色差误差更小,不以该色温 T_c 下的黑体轨迹坐标作为混合光源的目标坐标,而是以明度在 100% 等级下使得色差 $\Delta u'v'$ 值最小的混合光源实际坐标(u'_1, v'_1)为目标坐标。遍历寻找到对应的使 $\Delta u'v'$ 值最小的三基色亮度配比。通过驱动电流 I 与亮度 Y 之间的对应关系(式(6)~(8)),得到对应明度等级和色温下的三基色 LED 光源的驱动电流信号,如式(11)所示:

$$\begin{cases} I_r = f_1(L, T_c) \\ I_g = f_2(L, T_c) \\ I_b = f_3(L, T_c) \end{cases} . \tag{11}$$

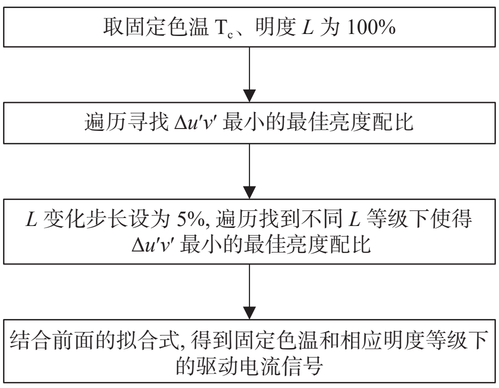

图 5　电流控制信号查找流程图

Fig. 5　Retrieval flowchart of the current control signal

5　混合照明效果分析

为验证三基色 LED 线性调光混色照明系统的可行性和实用性,用光谱分析系统(双色云谱 HP 8000 Pro)测量了三基色 LED 光源在最大正向导通电流下的光色度参数及光谱功率分布,结果如表 1 和图 6 所示。

表 1　三基色 LED 光源数据

Tab. 1　Data of three-primary-color LED light sources

光源类型	x	y	亮度值 /cd·m^{-2}	电流值/mA
Red LED	0.6636	0.3112	34.33	157.9
Green LED	0.1837	0.7164	74.26	183.5
Blue LED	0.1464	0.0450	12.55	185.3

出于对 LED 芯片结温会导致色漂移和出光效率降低的考虑,测试环境温度保持在 25 °C, LED 光源稳定照明 30 分钟以上再进行测试。

为了使混光效果更精确,实验过程中将明度等级从 5%~100% 均分为 20 个等级,根据 4.2 节提到的方法,遍历寻找在设定色温和不同明度等级的最佳亮度配比,同时测量不同色温和明度等级下混合光源的色坐标,并计算出色温、色温差、$u'v'$ 色差及其对应的阶数。实验发现该照明系统的混合光在色温 2000 K~8000 K 之间有良好的色度稳定性。表 2 所示的是照明系统在 6 种特定色温下的相关数据。从表中数据可知,在设定的色温下,调节混合照明系统的明度等级,其色温变化在 34 K 以内,$u'v'$ 色差均小于 0.0011。即色差阶数在 1 阶以内,光色度变化在不可察觉范围内。表 3 所示的是对应色温在 6500 K 时不同明度等级下的最佳驱电流数据以及对应的 $u'v'$ 坐标值。

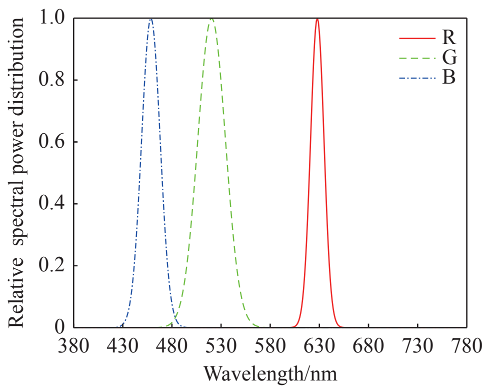

图 6　LED 光源相对光谱功率分布

Fig. 6　Relative spectral power distribution of LED light sources

表 2　三基色 LED 线性调光混合照明的色度稳定性

Tab. 2　Chroma stability of mixed lighting based on linear dimming of three-primary-color LEDs

100%明度下的色温/K	0~100%明度对应色温范围/K	最大色温差/K	$u'v'$ 色差	阶数
2700	2692~2711	19	0.0010	1
3000	2992~3006	14	0.0005	1
3500	3486~3513	27	0.0008	1
4000	3989~4006	17	0.0004	1
5000	4994~5012	18	0.0003	1
6500	6483~6517	34	0.0002	1

由于相关色温和色品坐标并不是一一对应的关系,利用 CIE 1976 USC 色度坐标描述混合光源

的色度及其差异更加精确。对于所提出的混合照明系统，用色温表示输入的调光色度信号时，将色温转化为$u'v'$坐标表达会导致所设定的色温和实际测量的色温之间存在一定的差异。图 7 为 CIE $u'v'$圆表示的该线性调光照明系统的色度稳定性。从图 7 可知，采用线性调光的调光优化算法能够使得混合光源的色差保持在 1 阶$u'v'$圆内。随着设定色温的增大，不同明度等级下的混合光源的$u'v'$坐标点越来越密集，即混合光源色温更加趋近于所设定的色温。

为进一步验证本文提出的线性调光优化算法的优势，将线性调光与 PWM 调光方式的混光色度稳定性进行比较。在相同的实验条件下，用光谱分析系统分别测量三基色当占空比 D 从 0% 变化到 100% 过程中的光色度参数(占空比调节间隔为 1%)。先将亮度 Y 与刺激值 X、Z 及占空比 D 进行数据拟合。根据 4.2 节中提到的方法遍历寻找到在设定色温和不同明度等级下使$\Delta u'v'$值最小的三基色亮度配比。最后，根据前面建立的拟合式，得到对应明度等级和色温下的三基色 LED 光源的占空比。表 4 所示的是照明系统在 6 种特定色温下的 PWM 调光的色度稳定性相关数据。由表 4 可知，在特定的色温下，调节混合照明系统的明度范围，PWM 调光方式下的相关色温变化范围变大，从线性调光方式下的 34 K 变为 234 K，色差阶数达到了 3 阶(3 阶$u'v'$圆代表恰可察觉的色差)。

表 3 三基色 LED 光源在 T_C=6500 K 时不同明度下的电流及$u'v'$坐标值

Tab. 3 The currents and $u'v'$ coordinate values of three-primary-color LED light sources under different brightnesses at T_C=6500 K

明度等级/%	红光LED电流值/mA	绿光LED电流值/mA	蓝光LED电流值/mA	u'	v'
10	62.10	75.30	37.19	0.2004	0.4657
20	78.40	93.90	47.33	0.2003	0.4656
30	93.80	111.9	56.65	0.2004	0.4656
40	106.5	129.6	65.35	0.2004	0.4656
50	115.6	144.2	69.85	0.2004	0.4656
60	124.3	149.2	76.26	0.2006	0.4654
70	132.0	159.3	80.94	0.2004	0.4656
80	144.3	169.5	85.20	0.2003	0.4657
90	150.0	181.7	91.29	0.2004	0.4655
100	153.4	179.7	89.71	0.2005	0.4656

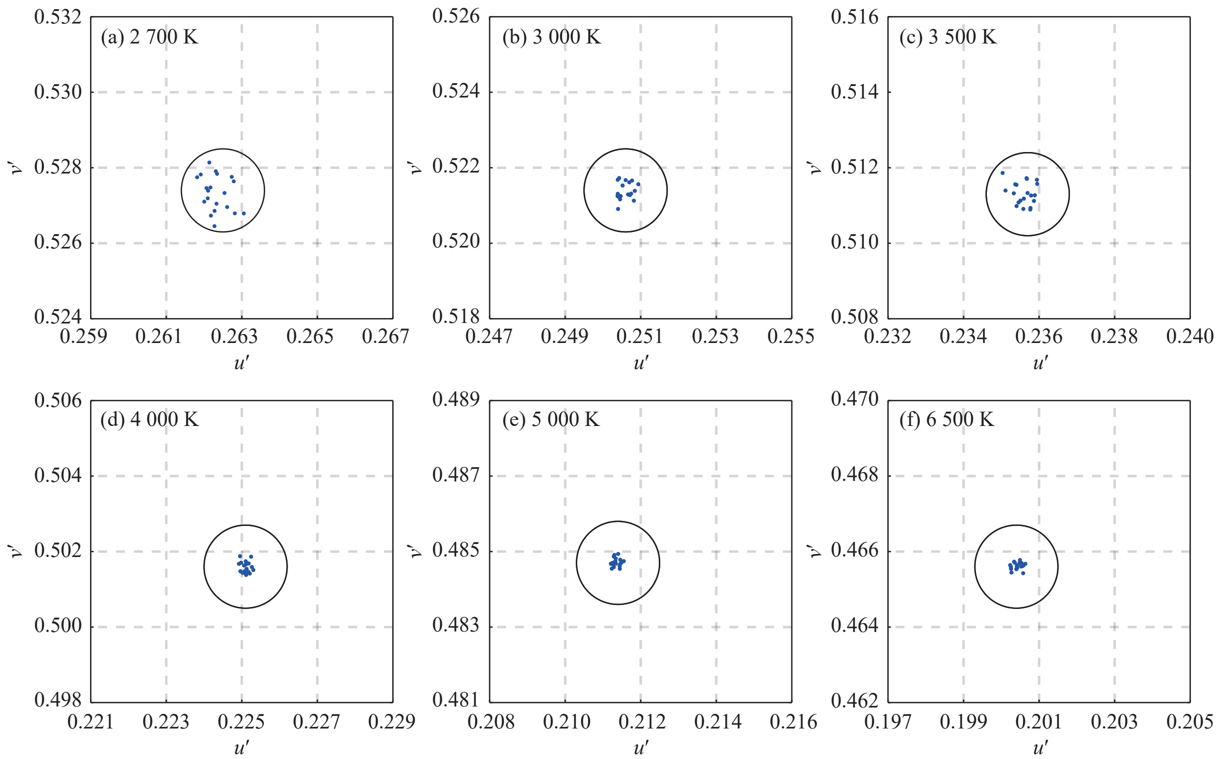

图 7 CIE$u'v'$圆表示的照明系统色度稳定性

Fig. 7 Chroma stability of the lighting system represented by CIE $u'v'$ circle

表 4　三基色 LED 的 PWM 调光混合照明的色度稳定性

Tab. 4　Chroma stability of mixed lighting based on PWM dimming of three-primary-color LEDs

100%明度下的色温/K	0~100%明度对应色温范围/K	最大色温差/K	$u'v'$ 色差	阶数
2700	2653~2752	99	0.0034	3
3000	2940~3058	118	0.0036	3
3500	3432~3554	122	0.0033	3
4000	3964~4198	234	0.0037	3
5000	4933~5079	146	0.0038	3
6500	6403~6590	187	0.0037	3

为直观表现两种调光方式在采用同种优化算法时，系统混合光的色度稳定性的差异，此处列出色温为 6500 K 时的 CIE $u'v'$ 圆对比图，如图 8 所示。通过图 8 可以直观地看出，在所提出的调光优化算法基础上，采用线性调光方式在不同明度等级下的色差保持在 1 阶 $u'v'$ 圆内，而 PWM 调光方式的色差达到了 3 阶。通过相关数据对比可得在该混合照明系统中，线性调光方式在维持混合光的色度稳定性上效果更佳。

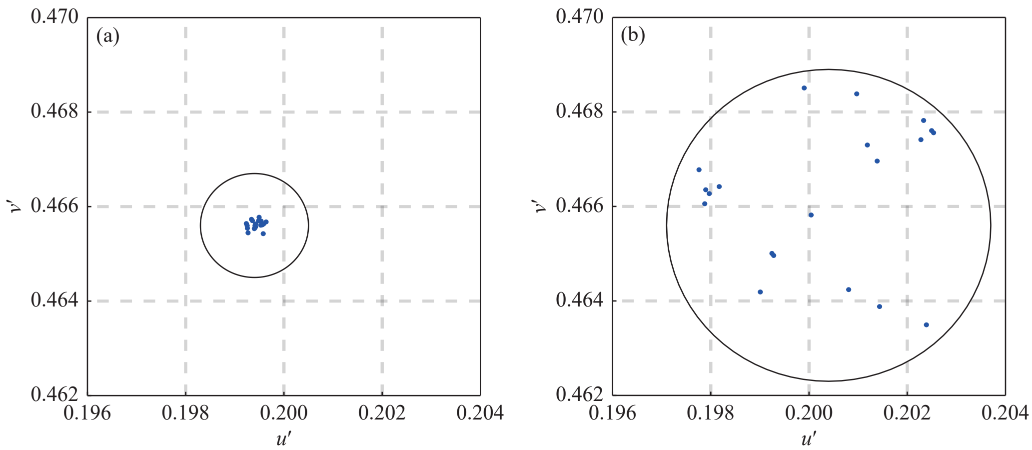

图 8　6500 K 下照明系统色度稳定性比较。(a)线性调光；(b)PWM 调光

Fig. 8　Comparison of chroma stability of lighting systems at 6500 K. (a) Linear dimming; (b) PWM dimming

6　结　论

LED 照明系统需要的是高品质、智能健康的光源。首先，本文提出了一个基于三基色 LED 光源的智能照明系统，可以实现光的色度和强度的自由调节。其次，为了确保照明的安全性，系统使用了线性调光，避免了 PWM 调光可能带来的健康隐患。此外，为了提高照明质量，系统采用了一种新颖的优化算法，使得可以在固定色温下，在整个光强度调节范围内，色差在不可察觉的范围内进行调节。同时，系统采用明度等级设置光强度，使得光强度的调控更加符合人的主观感知。实验结果表明：在 2000 K~8000 K 的色温范围内，基于三基色 LED 的线性调光混合照明系统的混合光的色度稳定性在 1 阶的 CIE$u'v'$ 圆内，且随着所设色温的增大，混合光的色差变化幅度更小。相比于 PWM 调光，本文提出的线性调光混合照明系统在维持光色度稳定性方面性能突出。结合三基色 LED 结构简单、混光方便易行的特点，本文为高品质智能 LED 照明需求提供了有一种良好的解决方案，其有助于促进改善人们的视觉体验。

参考文献:

[1]　林嘉源，邹念育，梁静，等. LED 光源照度与色温对佩伯尔幻象展陈效果的作用趋势[J]. 中国光学 (中英文), 2023, 16(2): 339-347.
LIN J Y, ZHOU N Y, LIANG J, *et al*.. Trend of action on the display effect based on Pepper's ghost images affected by illumination and color temperature from led light sources[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(2): 339-347. (in Chinese)

[2]　吴福培，谢晓扬，李昇平. 一种散热型发光二极管阵列结构光源设计方法[J]. 中国光学, 2021, 14(3): 670-684.
WU F P, XIE X Y, LI SH P. A thermal dissipation design method for LED array structure illumination[J]. *Chinese*

Optics, 2021, 14(3): 670-684. (in Chinese)

[3] 董冰, 佟首峰, 张鹏, 等. 20 m 水下无线蓝光 LED 通信系统样机设计[J]. 中国光学, 2021, 14(6): 1451-1458.
DONG B, DONG SH F, ZHANG P, *et al*.. Design of a 20 m underwater wireless optical communication system based on blue LED[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1451-1458. (in Chinese)

[4] 夏振平, 付保川, 程成. 基于冷暖白光 LED 的线性调光混合照明[J]. 发光学报, 2018, 39(5): 730-736.
XIA ZH P, FU B CH, CHENG CH. Mixed lighting based on linear dimming of cold and warm white LEDs[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(5): 730-736. (in Chinese)

[5] 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.
SONG P CH, WEN SH SH, SHANG J, *et al*.. A dimming method for RGB LED based on three channels′ PWM[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0223001. (in Chinese)

[6] 熊木地, 葛凯彬, 徐晓, 等. LED 显示串行总线数据分发芯片的设计[J]. 液晶与显示, 2023, 38(5): 602-608.
XIONG M D, GE K B, XU X, *et al*.. Design of serial bus data distribution chip for LED display[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(5): 602-608. (in Chinese)

[7] 李宗涛, 李杰鑫, 郑家龙, 等. 量子点 LED 显示研究进展: 材料、封装涂层、图案化显示应用[J]. 液晶与显示, 2023, 38(3): 319-341.
LI Z T, LI J X, ZHENG J L, *et al*.. Review of quantum dot-based LED display: materials, encapsulation coatings, patterned display applications[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(3): 319-341. (in Chinese)

[8] 杨梅慧, 林伟瀚, 于海, 等. Mini LED 显示光学性能分析[J]. 液晶与显示, 2022, 37(6): 680-686.
YANG M H, LIN W H, YU H, *et al*.. Optical performance analysis of Mini LED display[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(6): 680-686. (in Chinese)

[9] BERSON D M, DUNN F A, TAKAO M. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock[J]. *Science*, 2002, 295(5557): 1070-1073.

[10] FIGUEIRO M G, REA M S. Office lighting and personal light exposures in two seasons: impact on sleep and mood[J]. *Lighting Research & Technology*, 2016, 48(3): 352-364.

[11] YANG C, YANG P, LIANG S, *et al*.. The effects of illuminance and correlated colour temperature on daytime melatonin levels in undergraduates with sub-syndromal SAD[J]. *Lighting Research & Technology*, 2020, 52(6): 722-735.

[12] NIE J X, CHEN ZH ZH, JIAO F, *et al*.. Low blue light hazard for tunable white light emitting diode with high color fidelity and circadian performances[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 135: 106709.

[13] LU Y, LI W, XU W, *et al*.. Impacts of LED dynamic white lighting on atmosphere perception[J]. *Lighting Research & Technology*, 2019, 51(8): 1143-1158.

[14] 沈雪华, 陈焕庭, 陈赐海, 等. 白光 LED 光谱特性及司辰节律因子[J]. 发光学报, 2019, 40(12): 1514-1522.
SHEN X H, CHEN H T, CHEN C H, *et al*.. Spectral characteristics and circadian action factor of white LEDs[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(12): 1514-1522. (in Chinese)

[15] 李剑飞, 周晓明. 基于 LED 电流、温度光谱模型的照明系统研究[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(7): 20210727.
LI J F, ZHOU X M. Research on lighting system based on LED current and temperature spectrum model[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(7): 20210727. (in Chinese)

[16] ZHANG J J, GUO W H, XIE B, *et al*.. Blue light hazard optimization for white light-emitting diode sources with high luminous efficacy of radiation and high color rendering index[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 94: 193-198.

[17] 崔嘉杰, 王新宇, 罗萍. 一种基于 Triac 调光的小功率 LED 驱动电路[J]. 微电子学, 2013, 43(4): 488-490,498.
CUI J J, WANG X Y, LUO P. A low power LED driver based on triac dimming[J]. *Microelectronics*, 2013, 43(4): 488-490,498. (in Chinese)

[18] YANG J, ZHANG T CH, LIN Y D, *et al*. . Effect of illuminance and light strobe on attention and visual fatigue in indoor lighting[C]. *2019 16th China International Forum on Solid State Lighting & 2019 International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China (SSLChina: IFWS)*, IEEE, 2019: 149-152.

[19] 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.
XU D SH, CHEN X, ZHU X, *et al*.. A dimming lighting source based on cold and warm white LEDs[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0123004. (in Chinese)

[20] 田会娟, 胡阳, 陈陶, 等. 基于红/绿/蓝/青/黄/暖白 6 色 LED 的白光光谱优化方法[J]. 光学学报, 2020, 40(8):

0823001.
TIAN H J, HU Y, CHEN T, *et al*.. Spectral optimization of a mixed white light-emitting diode (LED) cluster comprising a red/green/blue/cyan/yellow/warm white LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0823001. (in Chinese)

[21] OHNO Y. Color rendering and luminous efficacy of white LED spectra[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5530: 88-98.

[22] 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): 42-44,65.
HUANG Y, REN SH D, CHEN C, *et al*.. Explanation of CIE new technical note on the colour difference of light sources[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2013, 24(6): 42-44,65. (in Chinese)

[23] GILCHRIST A. Mapping luminance onto lightness in vision and art[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8651: 865105.

作者简介：

黄　涛(1998—), 男, 江西丰城人, 硕士研究生, 2021 年于九江学院获得学士学位, 主要从事智能照明和健康照明的研究。E-mail: htao2021998@163.com

夏振平(1985—), 男, 江苏兴化人, 副教授, 硕士生导师, 2014 年于东南大学获得博士学位, 主要从事视觉相关的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