

LED 光源的光谱与色域面积关系

周孟欣, 朱大庆*, 廖欣怡

华侨大学信息科学与工程学院福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021

摘要 采用 IES TM-30-18 色域指数表征 LED 光源的色域面积, 并对 4 种色温下的 20 个样品光源光谱进行间隔为 5 nm 的 380~780 nm 波段的单色光光谱叠加仿真, 计算色域面积的变化。结果表明: 在各样品光源光谱上叠加 380~465 nm 或 605~780 nm 波段的单色光后, 光源色域面积增大; 叠加 470~600 nm 波段的单色光后, 光源色域面积减小。对叠加的光谱采用灯箱匹配并进行色彩鲜艳度与偏好的视觉实验, 结果表明, 色域面积增加的光谱的色彩鲜艳度与颜色偏好优于色域面积减小的。同时叠加两个不同峰值波长且不同幅值功率的单色光时, 光源的色温基本不变, 且色域面积增加 2~10。对叠加单色光后的光源光谱进行仿真, 得到了光谱分布与色域面积的关系, 这对于优化 LED 光源的色域面积和视觉效果有重要意义。

关键词 光学器件; LED 光源; 光谱功率分布; 色域面积; 色温

中图分类号 TP391; TM924; TN312.8

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.232302

Relationship Between Spectrum and Color Gamut Area of LED Light Sources

Zhou Mengxin, Zhu Daqing*, Liao Xinyi

Fujian Key Laboratory of Light Propagation and Transformation,

College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

Abstract In this study, the IES TM-30-18 gamut index is used to characterize the gamut area of LED sources. Simultaneously, the spectra of 20 sample light sources at four color temperatures are simulated by the superposition of monochromatic light spectra in a 380–780 nm band with a 5-nm interval, and the change of the gamut area is calculated. The results show that the color gamut area of a light source increases after the monochromatic light of 380–465 or 605–780 nm superimposes on the spectrum of each sample light source, and decreases with the monochromatic spectral of a 470–600 nm band. A light box matching is performed to match the superimposed spectrum, and the visual experiment of color brightness and preference is conducted. The experimental results show that the brightness and color preference of the spectra with an increased color gamut area are better than those with a decreased gamut area. When two monochromatic lights with different peak wavelengths and amplitude powers are superimposed at the same time, the color temperature of the light sources can be kept substantially unchanged, whereas, the color gamut can be increased by 2–10. The relationship between the spectral distribution and gamut area is obtained by simulating the source spectrum after superimposing monochromatic light, which is of great significance for optimizing the color gamut area and visual effects of the LED light sources.

Key words optical devices; LED source; spectral power distribution; gamut area; color temperature

OCIS codes 230.3670; 300.6180; 330.1730

1 引言

近年来, 由于 LED 照明的广泛应用与其市场

竞争的增加, 人们对光源的照明质量要求也逐渐提高。早期, 国际照明委员会(CIE)提出一种评价光源品质的单一指标为一般显色指数(CRI)^[1], 其

收稿日期: 2020-04-16; **修回日期:** 2020-04-21; **录用日期:** 2020-04-23

基金项目: 福建省光电技术与器件重点实验室开放课题(OPT201603)、华侨大学研究生科研创新能力培育项目(17014082029)

***E-mail:** zhudaqing@huq.edu.cn

缺陷和局限性随着 LED 光源的发展逐渐展现出来。鉴于此,研究学者们采用色彩保真度和色域面积等多指标来综合评价光源的颜色品质^[2-4]。光源的颜色品质包括保真度、偏好、自然性、饱和度、恒常性等。马瑞青等^[5]发现红色和绿色光源下的颜色恒常性比蓝色和黄色光源下的恒常性好。除了有关光源显色指数的研究,关于光源的饱和度研究还有色域面积指数的优化、不同色域面积光源下的主观评价等。

光源的色域面积指数包括全色域指数(GAI)、色品质度(CQS)色域 Q_g 、北美照明工程学会提出的 IES TM-30 色域 R_g 等^[6-8],它可以衡量物体的鲜艳、生动、明亮程度。不同的色域指数有所差别,关于这些色域指数的差异与关联度,廖欣怡等^[9]通过对多个光源进行不同色域指数的数值计算与分析得出 Q_g 与 R_g 的相关性最高,GAI 与 Q_g 和 R_g 相关性均不高,计算所采用的颜色空间和参考光源对光源色域面积有很大影响。2019 年,Royer^[10]基于不同色域指数的计算方法,指出完整地评价颜色再现时需要均匀分布的颜色样本和一个均匀的颜色空间,即采用平均色相角或色坐标,同时避免使用过多的高色度样品。 R_g 作为近些年研究光源色域面积时使用较广泛的色域指数,采用了 99 个颜色样本和均匀的颜色空间 CAM 02-UCS。本文研究采用参数 R_g 表示光源的色域面积。

2017 年,Windisch 等^[11]研究了不同光谱结构的光源色域面积 R_g ,当同色温的光源的红色波段有不同波长值的窄带光谱时,红色的波长值越大, R_g 越大,而光源的蓝色波段的主波长值越大, R_g 值越小,即主波长按顺序为 442,450,458 nm 的光谱,色域面积指数逐渐减小,且蓝色波长主要影响 R_g 计算中黄色和绿色色样在色空间中的颜色区域,而该区域对饱和度的影响远小于红色区域,所以不同蓝色波长导致的不同 R_g 对颜色偏好影响不大。除了色域面积指数对光源下物体颜色的鲜艳度和颜色偏好主观评价有影响,光源的色域形状即颜色矢量图、红色位移(R_{cs}, h_1)均对主观评价有影响。2017 年,Royer 等^[12]对保真指数 R_f 、色域面积指数 R_g 及红色位移(R_{cs}, h_1)在一定范围内的 26 种光源照明进

行视觉实验,发现色域形状比平均色域面积能更好地表示人们的偏好,且红色色调比其他色调发挥更重要的作用。2017 年,Wei 等^[13]通过具有相同平均色度、不同色域形状的两组光源进行视觉实验,结果表明,色域形状是光源保真度与色域评价的重要辅助指标。尽管色域形状与红色位移均可用于评价光源颜色品质,而通常在二维平面(a', b')内,色域面积已能很好地说明光源色度或饱和度的水平感知^[14]。

田会娟等^[15]提出过一种基于脉冲宽度调制的 R/G/B/WW 四色 LED,通过调节驱动模块的占比实现不同色温、色点光源。本文利用 Matlab 软件仿真叠加一定幅值单色光的不同色温光源的光谱,计算并分析光源叠加单色光后色温和色域面积的变化,同时采用视觉实验验证了叠加单色光对光源色域面积变化的影响,最后仿真光源同时叠加两个单色光光谱,实现了保持光源色温基本不变且色域面积增加的目的。该光谱优化方法易于应用在 LED 光源产品中,简洁且成本低。

2 数值计算与仿真原理

2.1 样品参数

实验选取色温为 2800,4000,5000,6500 K 的 LED 光源或实验室理想光源共 20 个^[16],其光谱分布 $S_0(\lambda)$ 如图 1 所示,色域面积 R_g 与色温 T_c 分别如表 1、2 所示。色域面积的计算采用颜色空间 CAM 02-UCS,分别计算 99 个颜色样本在待测光源下与参考光源下的色坐标(J', a', b'),然后将这 99 个色点坐标分隔至 $a'-b'$ 平面内的 16 个色相中,并计算待测光源与参考光源下每个色相内的平均色坐标(a'_i, b'_i),最后计算两种光源下的 16 个平均色坐标围成的多边形面积,即色域面积,表达式^[17]为

$$R_g = 100 \times \frac{A_{\text{test}}}{A_{\text{ref}}}, \quad (1)$$

式中: A_{test} 为待测光源在颜色空间中的平均色点所围成的多边形面积; A_{ref} 为参考光源在颜色空间中的平均色点所围成的多边形面积。

表 1 样品光源的色域面积指数

Table 1 Gamut area index of sample sources

Color temperature/K	Number of samples in source 1	Number of samples in source 2	Number of samples in source 3	Number of samples in source 4	Number of samples in source 5
2800	111	114	105	80	96
4000	109	115	96	96	80
5000	105	99	116	95	84
6500	80	95	104	90	92

表 2 样品光源的色温

Table 2 Color temperature of sample sources

unit: K

Color temperature/K	Number of samples in source 1	Number of samples in source 2	Number of samples in source 3	Number of samples in source 4	Number of samples in source 5
2800	2780	2867	2829	2842	2796
4000	4015	4005	4002	4012	4043
5000	4969	4996	5035	5089	5002
6500	6537	6742	6524	6543	6481

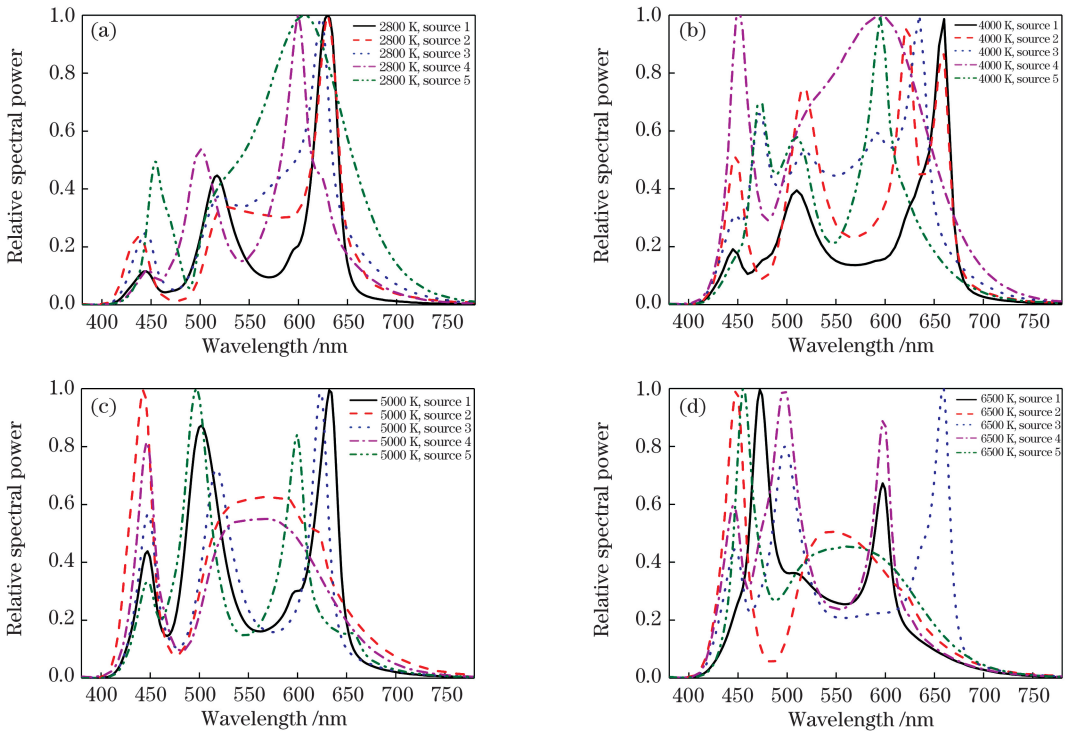


图 1 样品光源的光谱功率分布。(a) 2800 K 光源；(b) 4000 K 光源；(c) 5000 K 光源；(d) 6500 K 光源

Fig. 1 Spectral power distribution of sample sources. (a) 2800 K light sources; (b) 4000 K light sources; (c) 5000 K light sources; (d) 6500 K light sources

2.2 叠加单色光的计算过程

在 20 个样品光源光谱上叠加单色光, 计算叠加后光源的色温 T_c 及色域面积 R_g , 得到不同单色光叠加对光源色温和色域面积的影响。对叠加的单色

光取峰值波长为 380~780 nm, 间隔为 5 nm 的单色光光谱, 光谱幅值功率取样品光源光谱峰值功率的 1/2, 半峰全宽取 20 nm。单色光光谱分布 $S_{LED}(\lambda)$ 的数学模型^[18]为

$$S_{LED}(\lambda) = \frac{g(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda_{0.5}) + 2g^5(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda_{0.5})}{3}, \quad (2)$$

式中： $g(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda_{0.5}) = \exp\{-[(\lambda - \lambda_0) / \Delta\lambda_{0.5}]^2\}$ ； λ 为波长； λ_0 为单色光的峰值波长； $\Delta\lambda_{0.5}$ 为半峰全宽，设为 20 nm。叠加后的光谱分布 $S(\lambda)$ 的表达式为

$$S(\lambda) = S_0(\lambda) + kS_{LED}(\lambda), \quad (3)$$

式中： $S_0(\lambda)$ 为样品光源的初始光谱功率分布； k 取 $0.5S_0(\lambda_p)$ ，即叠加的单色光峰值功率为原样品光源光谱峰值功率的 1/2。

为了保持叠加后光源的色温不变，同时叠加两个不同峰值波长、峰值功率的单色光，其叠加后光谱

分布为 $S'(\lambda)$ ，表达式为

$$S'(\lambda) = S_0(\lambda) + k_1S_{LED1}(\lambda) + k_2S_{LED2}(\lambda), \quad (4)$$

式中： k_1, k_2 取 $0.1S_0(\lambda_p) \sim S_0(\lambda_p)$ ，表示叠加的两个单色光 $S_{LED1}(\lambda), S_{LED2}(\lambda)$ 的峰值功率均取原样品光源光谱峰值功率的 0.1~1。

3 仿真结果与分析

3.1 叠加单色光的色温分析

按照光谱优化仿真设计，在 20 个样品光源光谱上进行单色光叠加仿真，计算叠加后光源的色温与色域面积，其中，叠加单色光光谱后，光源的色温变化 ΔT_c 如图 2 所示。

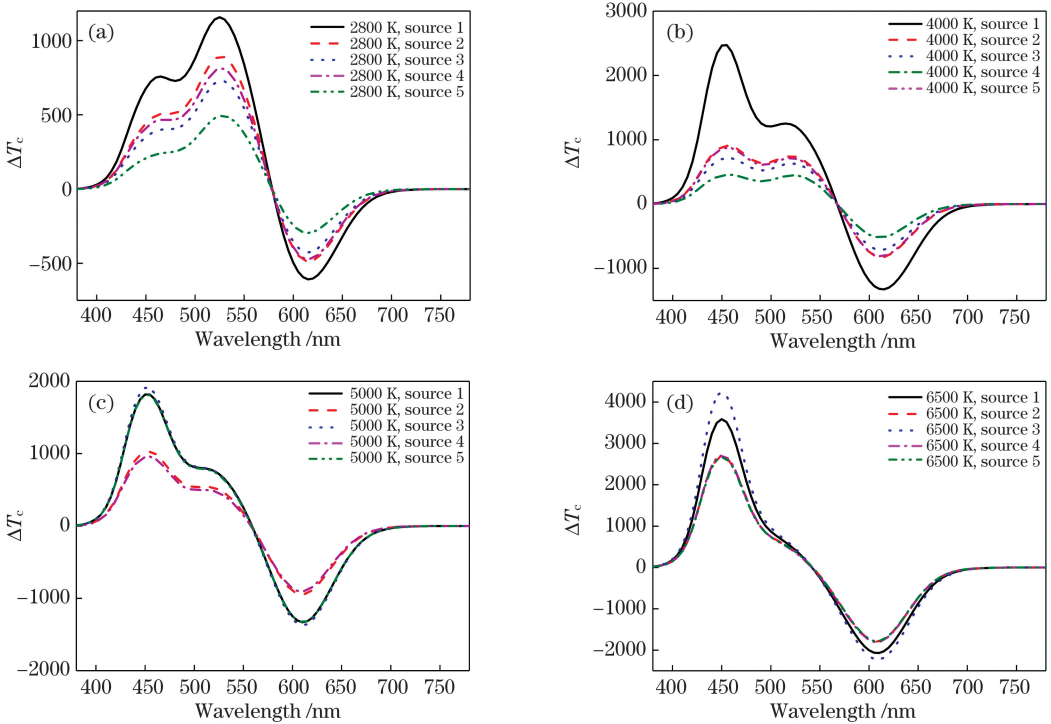


图 2 光源叠加单色光后色温的变化。(a) 2800 K 光源；(b) 4000 K 光源；(c) 5000 K 光源；(d) 6500 K 光源

Fig. 2 Change of color temperature after monochromatic light is superimposed on light sources. (a) 2800 K light sources; (b) 4000 K light sources; (c) 5000 K light sources; (d) 6500 K light sources

由图 2 可知：叠加在 2800, 4000, 5000, 6500 K 光源上的单色光波长分别为 380~575 nm, 380~565 nm, 380~555 nm, 380~545 nm 时，光源的色温越大，叠加后色温越大，可叠加的单色光波长范围越小；叠加的单色光波长分别为 580~780 nm, 570~780 nm, 560~780 nm, 550~780 nm 时，光源色温越大，叠加后光源色温越小，可叠加的单色光的波长范围越大；令叠加的单色光波长间隔为 1 nm，发现 2800, 4000, 5000, 6500 K 光源分别叠加 578, 567, 558, 542 nm 的单色光时，光源色温基本保持不变，

而这些叠加的单色光的色温分别为 2838, 4086, 5055, 6529 K。光源叠加与之相近色温的单色光时才能使光源色温保持不变，光源色温越大，保色温需叠加的单色光的波长越小。因此叠加单色光后光源色温增大时，色温越大的光源其叠加的单色光的可取波长范围越小；叠加单色光后光源色温减小时，色温越大的光源其叠加的单色光的可取波长范围越大。

3.2 叠加单色光的色域分析

各色温样品叠加单色光光谱后，光源的色域面积变化 ΔR_g 如图 3 所示。

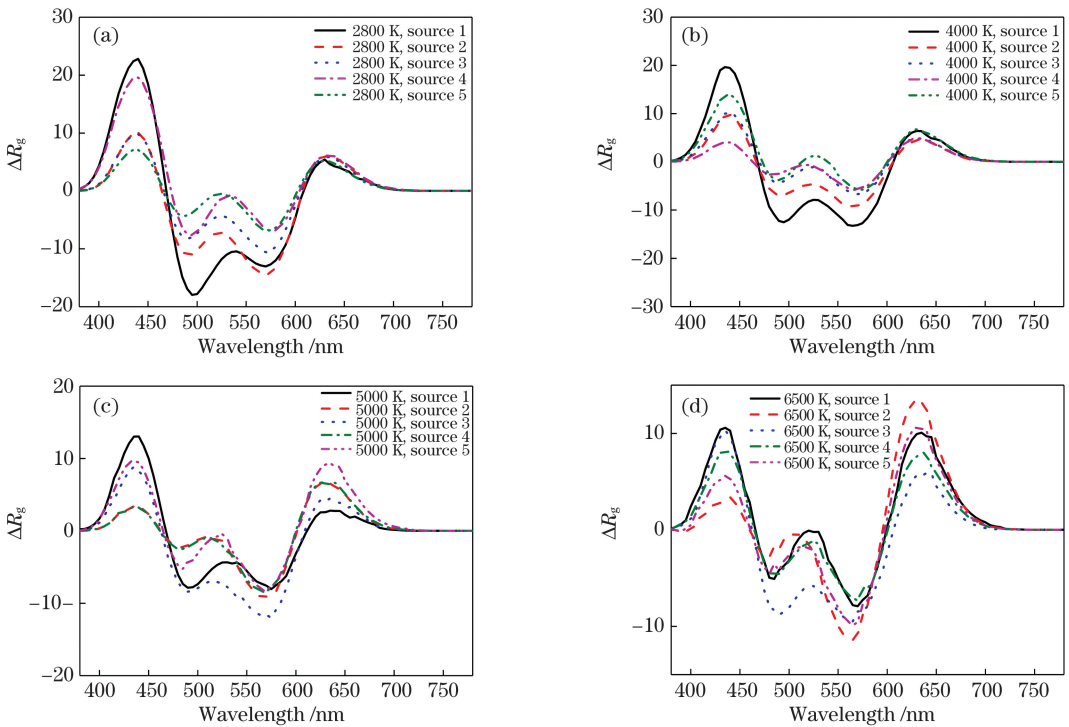


图 3 光源叠加单色光后色域面积的变化。(a) 2800 K 光源;(b) 4000 K 光源;(c) 5000 K 光源;(d) 6500 K 光源

Fig. 3 Change of gamut area after monochromatic light is superimposed on light sources. (a) 2800 K light sources; (b) 4000 K light sources; (c) 5000 K light sources; (d) 6500 K light sources

由图 3 可知:当样品光源叠加 380~465 nm 或 605~780 nm 波段的单色光时,光源色域面积增大;叠加 470~600 nm 波段的单色光时,光源色域面积减小,且在 500~550 nm 处,存在一个色域面积变化的峰值。其原因可结合 CIE1931-RGB 系统的标准光谱三刺激值曲线进行说明,如图 4 所示。光源叠加 380~465 nm 或 605~780 nm 单色光后,色域面积增加,其原因可能是光源在增加红、蓝波段的单色光谱时增加了 B 或 R 的刺激,减小了 G 和 R(或 B)的刺激比例,增加了视觉饱和度,所以其色域面积是增大的。光源叠加 470~546 nm 单色光后,R 刺激为负

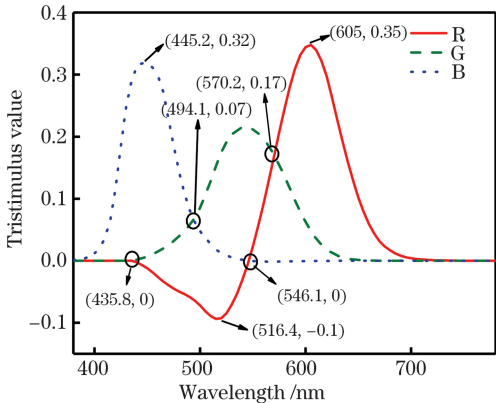


图 4 CIE1931-RGB 系统的光谱三刺激值曲线

Fig. 4 Spectrum tristimulus curve of CIE1931-RGB system

值,先减小后增大,G 刺激从零增加,且 B 刺激减小的速率比 R 刺激的变化速率快,总体效果是在富含蓝光区域,减小了 B 刺激增加了其他颜色的刺激,导致饱和度降低,所以色域面积减小。叠加 550~600 nm 单色光后,在富含 G 刺激区域,G 刺激继续减小,R 刺激增加,但二者同时有较大值,因此饱和度降低,色域面积减小。在叠加 500~546 nm 单色光后,B 刺激继续减小,R 刺激在增加,虽然 G 刺激在 546 nm 附近达到最大值,但 R 刺激增加的速度比 G 刺激快,因此光源在叠加 500~550 nm 内的某一个波长的单色光后色域变化存在一个极大值,色域面积变化图上存在一个次高峰。叠加的波长约为 425 nm 或 630 nm 时,色域面积增加最大,且叠加波长为 425~465 nm 时,随着叠加的单色光波长增加,色域面积增加程度逐渐减小,这与文献[11]的结果一致。

由于各色温光源叠加单色光后的色域面积变化有相近趋势,选取 2800 K 色域变化适当的光源 3,对其叠加单色光后的色域面积变化进行分析。而由图 3 色域变化图可知:2800 K 下的光源 3 在叠加 425 nm、630 nm 单色光时,色域面积增大,分别为 121.7、119.8;叠加 505 nm、590 nm 单色光时色域面积减小,分别为 98.1、97.8。计算 2800 K 光源 3 和其叠加 425、630、505、590 nm 单色光后在颜色空

间 CAM 02-UCS 中的平均色点,形成的多边形形色域图如图 5、6 所示。

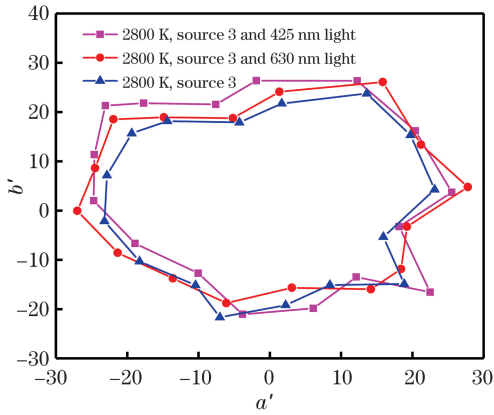


图 5 2800 K 光源 3 及其与 425 nm 及 630 nm 单色光叠加后的色域

Fig. 5 Color gamuts of 2800 K source 3, superposition of 425 nm and 630 nm monochromatic light on 2800 K source 3

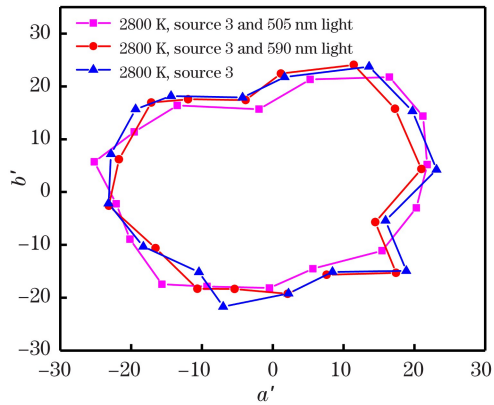


图 6 2800 K 光源 3 及其与 505 nm 及 590 nm 单色光叠加后的色域

Fig. 6 Color gamuts of 2800 K source 3, superposition of 505 nm and 590 nm monochromatic light on 2800 K source 3

由图 5 可以看到:当叠加 425 nm、630 nm 单色光后,平均色点在第二象限坐标区域内,色点 a' 值减小, b' 值增大,发生绿移现象;叠加 630 nm 时,色点在 $+a'$ 区域会有很明显的红移现象,从而增大色域面积,两种单色光分别叠加后,平均色点围成的多边形较原先光源在第二象限往外扩张,故色域面积增加。由图 6 可知,当叠加 505 nm、590 nm 单色光后,平均色点在第二象限坐标区域内,色点 a' 值增大,向原点收缩,故色域面积减小。

上述光源的色域面积是仿真计算的结果,采用 LED View 标准光源箱对其进行关于光谱匹配、颜色鲜艳度、颜色偏好的视觉实验,如图 7 所示。匹配光谱的参数如表 3 所示,实验受试者为年龄在 22~26 岁的视觉正常的 16 个大学生,共有 8 个男生,8 个女生,平均年龄为 24。问卷采用李克特量表,颜色鲜艳度量化得分为 1-非常多彩、2-多彩、3-微色彩、4-微无色彩、5-无色彩、6-非常无色彩,颜色偏好量化得分为 1-非常喜欢、2-喜欢、3-一般喜欢、4-无所谓喜欢不喜欢、5-一般不喜欢、6-不喜欢、7-非常不喜欢^[19],如表 4 所示。



图 7 视觉实验

Fig. 7 Visual experiment

表 3 灯箱匹配光源参数

Table 3 Light source parameters matched by light box

Parameter	Source 1	Source 2	Source 3	Source 4	Source 5
λ/nm	425	630		505	590
R_f	60.4	70.5	86.3	83.3	78.2
R_g	121.4	119.6	103.5	98.1	97.8
T_c/K	2934	2339	2797	3312	2582

表4 视觉实验量化评分
Table 4 Quantitative scoring of visual experiment

Content	1	2	3	4	5	6	7
Color clarity	Very colorful	Colorful	Slightly colorful	Slightly colorless	Colorless	Very colorless	
Color preference	Like very much	Like	Generally like	Neutral	Generally dislike	Dislike	Dislike very much

在表3中,1~5代表5个灯箱匹配光源,分别是2800 K光源3叠加425 nm单色光后的光谱、2800 K光源3叠加630 nm单色光后的光谱,初始2800 K光源3、2800 K光源3叠加505 nm单色光后的光谱、2800 K光源3叠加590 nm单色光后的光谱,色域面积依次为121.4、119.6、103.5、98.1、97.8,与前面仿真计算得到的色域面积121.7、119.8、104、98.1、97.8几乎相等,5个光源依次点亮,受试者进行主观量化评分。统计量化评分表,得到的颜色鲜艳度与偏好的平均得分和标准差如图8所示。5个光源照射下,物体颜色鲜艳度平均得分分别为1.81、2.25、2.88、3.13、3.19,可知,在色域面积较大的光源照射下,物体色彩得分越低,多彩性越好,验证了3.2节仿真实验;物体颜色偏好平均得分为2.38、2.69、3.12、3.50、3.31,总得来看,似乎是色域面积越大,偏好越好,人们越喜欢,但色域面积为98.1的4号光源偏好(3.50)比色域面积为97.8的5号光源(3.31)更差。其原因在于主观偏好不仅与色域面积有关,叠加一个单色光后改变了光源的色温,4号光源的色温最大,与其他光源的色温存在一定差异,故偏好最低。色温也是影响主观

偏好的重要因素,日常生活中,人们偏好使用低色温的光源^[20]。

3.3 双叠加单色光的色域分析

为了使光源叠加单色光后色域面积增加的同时光源色温基本保持不变,结合图2和图3叠加单色光后光源色温和色域面积变化的分析,采取同时叠加两个不同峰值波长且不同峰值功率的单色光的方式,结合市场较常见的单色光灯珠,叠加的两个单色光 $S_{LED1}(\lambda)$ 和 $S_{LED2}(\lambda)$ 的峰值波长 λ_1 和 λ_2 分别取420,435,450 nm和635,660 nm,幅值功率分别为 k_1, k_2, k_1, k_2 取 $0.1S_0(\lambda_p) \sim S_0(\lambda_p)$,即叠加的两个单色光 $S_{LED1}(\lambda), S_{LED2}(\lambda)$ 的峰值功率均取原样品光源光谱峰值功率的0.1~1。

选取 R_g 分别为96、96、95、95的2800 K光源5、4000 K光源3、5000 K光源4、6500 K光源2,在其光谱上叠加上述两种单色光光谱,仿真计算叠加后光源的色域面积变化 ΔR_g ,以2800 K光源5为例,双单色光同时叠加后其色域面积变化 ΔR_g 如图9所示。

图9表示峰值波长 λ_1 为420,435,450 nm与 λ_2 为635,660 nm的单色光排列组合进行双单色光叠加后2800 K光源5的色域面积变化 ΔR_g 和相应的色温变化 ΔT_c 。由图3叠加一个单色光后色域面积的变化可知,当同时叠加435 nm与635 nm单色光时,相对于其他组合,色域面积增加最大,在色温不变情况下(± 50 K), ΔR_g 为20。同样地,仿真计算得到4000 K光源3、5000 K光源4、6500 K光源2同时叠加435 nm和635 nm单色光后, ΔR_g 分别为24、21、28。同时考虑到色偏差值 $|D_{uv}| < 0.007^{[21]}$,取2800 K光源5、4000 K光源3、5000 K光源4、6500 K光源2在上述组合的双单色光叠加后色温基本不变的部分结果,如表5所示,光谱分布如图10所示。

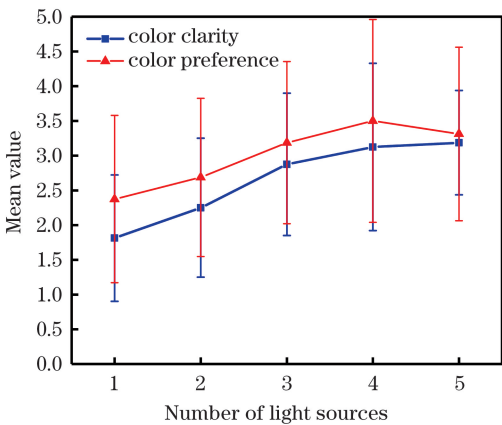


图8 视觉实验的统计结果

Fig. 8 Statistical results of visual experiment

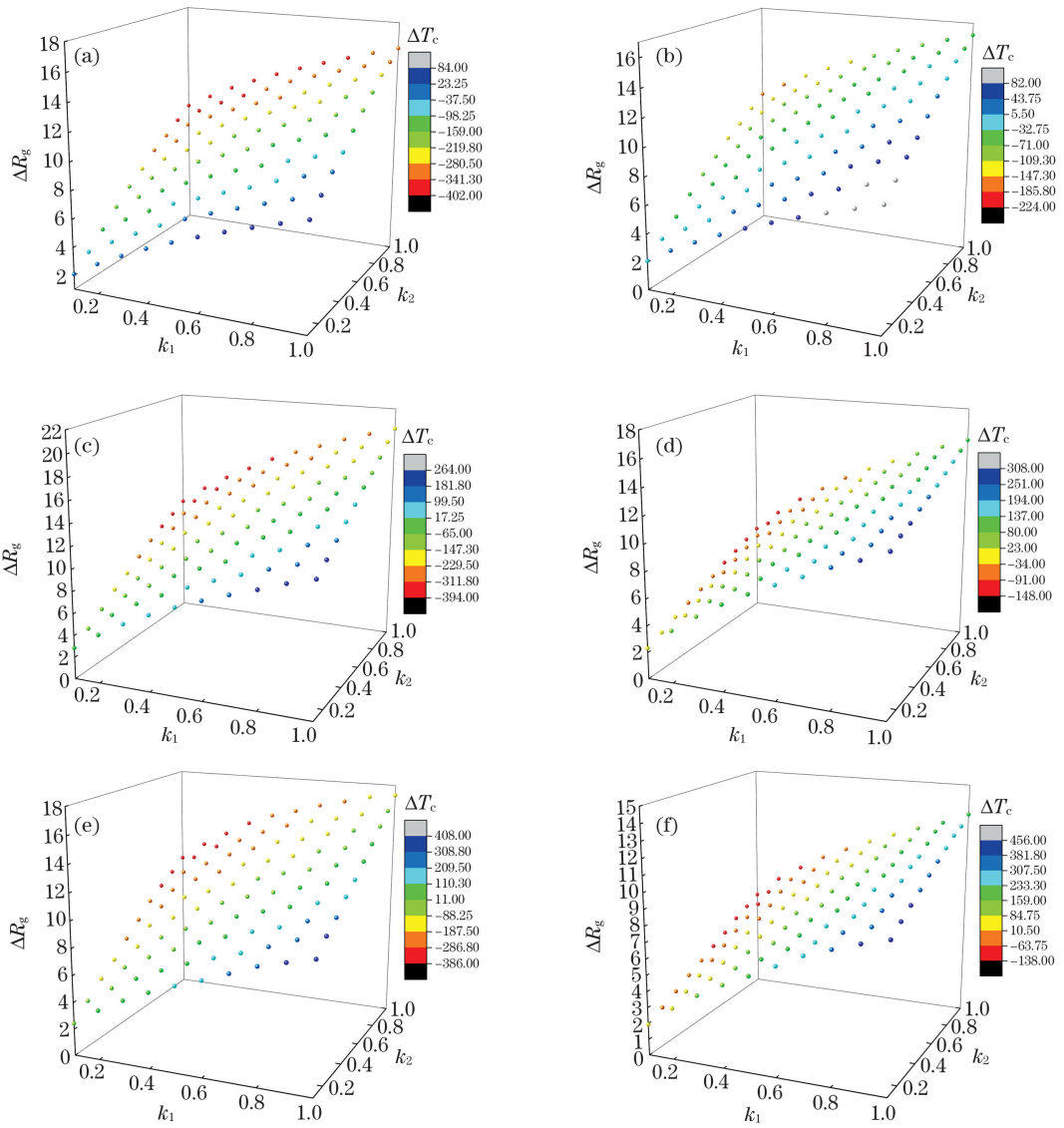


图9 叠加双单色光后 2800 K 光源 5 的色域面积变化。(a) 420 nm 和 635 nm；(b) 420 nm 和 660 nm；(c) 435 nm 和 635 nm；(d) 435 nm 和 660 nm；(e) 450 nm 和 635 nm；(f) 450 nm 和 660 nm

Fig.9 Change of gamut area of 2800 K source 5 after superposition of double monochromatic light. (a) 420 nm and 635 nm；(b) 420 nm and 660 nm；(c) 435 nm and 635 nm；(d) 435 nm and 660 nm；(e) 450 nm and 635 nm；(f) 450 nm and 660 nm

表 5 双单色光叠加后色温不变且色域增加的结果

Table 5 Result of constant color temperature and increased color gamut after double monochromatic light superimposing

Color temperature/K	λ_1	λ_2	k_1	k_2	T_c	R_g	R_f	ΔR_f	ΔR_g	D_{uv}
2800, source 5	420	635	0.2	0.1	2771	99	80	-2.6	3	0.0052
	420	660	0.2	0.4	2749	101	80	-1.6	4	0.0055
	435	635	0.1	0.1	2772	100	81	-2.4	3	-0.0050
	435	660	0.1	0.4	2750	100	81	-1.4	4	0.0053
	450	635	0.1	0.1	2783	98	80	-2.4	2	0.0053
	450	660	0.1	0.4	2760	99	81	-1.4	3	0.0056

Color temperature/K	λ_1	λ_2	k_1	k_2	T_c	R_g	R_f	ΔR_f	ΔR_g	D_{uv}
4000, source 3	420	635	0.3	0.1	4026	101	91	4.5	5	0.0059
	420	660	0.2	0.2	4015	99	90	3.0	3	0.0066
	435	635	0.1	0.1	3983	99	88	1.5	3	0.0042
	435	660	0.1	0.3	3974	99	86	-0.5	3	0.0044
	450	635	0.1	0.1	4007	98	88	1.5	2	0.0044
	450	660	0.1	0.3	3998	99	87	0.5	3	0.0046
5000, source 4	420	635	0.7	0.3	5130	103	69	-5.3	8	0.0049
	420	660	0.7	0.9	5104	105	69	-4.9	10	0.0054
	435	635	0.3	0.3	5059	103	72	-2.6	8	0.0033
	435	660	0.3	0.8	5084	104	72	-2.4	9	0.0031
	450	635	0.2	0.2	5130	100	73	-1.3	5	0.0004
	450	660	0.3	1.0	5075	104	74	-0.3	9	0.0046
6500, source 2	420	635	0.2	0.1	6508	98	66	-3.5	3	0.0025
	420	660	0.2	0.3	6495	99	66	-3.1	4	0.0028
	435	635	0.1	0.1	6502	98	66	-3.5	3	0.0023
	435	660	0.1	0.3	6489	99	67	-2.5	4	0.0026
	450	660	0.1	0.4	6453	100	68	-1.5	5	0.0036

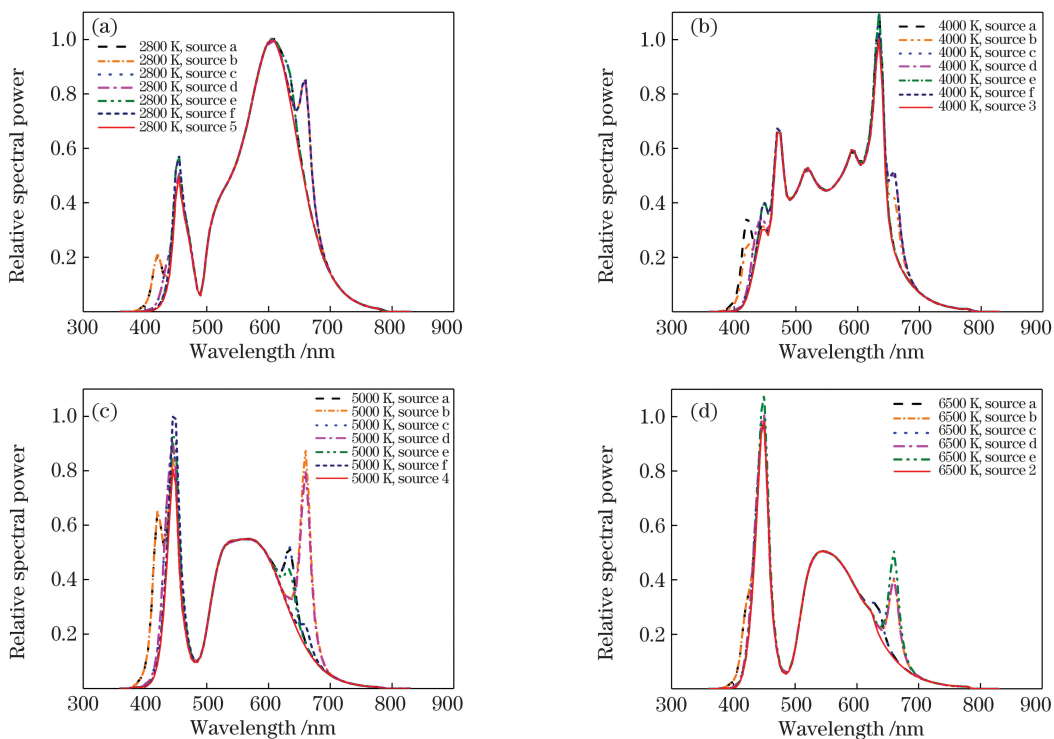


图 10 双叠加单色光后的结果。(a) 2800 K 光源；(b) 4000 K 光源；(c) 5000 K 光源；(d) 6500 K 光源

Fig. 10 Results after superposition of double monochromatic light. (a) 2800 K light sources; (b) 4000 K light sources; (c) 5000 K light sources; (d) 6500 K light sources

图 10(a)中 a、b、c、d、e、f 分别为表 5 中 2800 K 光源 5 对应的 6 种双叠加单色光后的光源,图(b)~(d)同理。从表 5 可以看出,一般情况下,保色温双叠加单色光后,增加光源色域面积的同时光源的色彩保真指数会降低,即验证了北美照明学会中提到的光源色域面积 R_g 与颜色保真指数 R_f 的相互制约关系,保色温双单色光叠加后光源色域面积可增加 2~10。6500 K 光源 2 不存在 435 nm 与 660 nm 双单色光叠加后色温不变且 D_{uv} 小于 0.007 的现象,故只有 5 种双叠加组合能实现保色温、增大色域面积的结果。4000 K 光源 3 在双单色光组合叠加后色域面积和颜色保真指数同时增加,得到了保色温优化光源颜色品质的较好效果。图 10 分别为表 5 中的 2800 K 光源 5、4000 K 光源 3、5000 K 光源 4、6500 K 光源 2 本身和其叠加单色光 $k_1 S_{LED1}(\lambda)$ 、 $k_2 S_{LED2}(\lambda)$ 后色温不变且色域面积增大的光谱分布。由图 10 可以看到,通过叠加 420, 435, 450, 630, 660 nm 单色光,光源有了较好的蓝色波峰和红色波峰,增加了 B 刺激或 R 刺激,一定程度优化了光源的色域面积。所有色温的光源均可通过某种组合方式叠加 420, 435, 450, 630, 660 nm 的单色光实现保色温、增大光源色域面积的目的,叠加的单色光功率幅值为原样品光源光谱功率幅值的 0.1~1。

4 结 论

通过对不同色温的多个样品光源叠加单色光,分析了单色光叠加对白光 LED 光源色温和色域面积的影响,叠加与光源相近色温的单色光可保持光源色温基本不变。叠加不同单色光后,光源色域平均色点的移动会导致光源色域图扩张或收缩,进而色域面积也会增大或减小。同时采用视觉实验得到了在叠加单色光后色域面积增大的光源照射下物体颜色更鲜艳的结果,相反,则显得暗淡些,即叠加的单色光对光源色域面积变化有影响。结合 CIE1931-RGB 系统光谱三刺激值,当光源增加红、蓝波段的单色光时,增大了 B 或 R 的刺激,减小 G 和 R(或 B)的刺激比例,增加了视觉饱和度,所以色域面积增大;当光源叠加绿色波段的单色光时,减小了 B 刺激,增大了其他颜色的刺激,或 G 刺激减小的同时 R 刺激增加,但二者同时有较大值,因此饱和度降低,色域面积减小。在实际应用生活中,由于存在特定色温或相关光谱分布的光源照明需求,采用同时叠加两个不同幅值和波长的单色光来优化光谱的方法,实现了保持光源色温基本不变的情况下

增大色域面积的目的,这种叠加单色光来构建光谱优化光源色域面积的方法具有很强的实际应用意义,且其为光源光谱与色域面积关系、不同色域面积光源下的视觉主观评价研究提供了一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] CIE. Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources: CIE 13.3-1995 [S]. Vienna: Central Bureau of CIE, 1995.
- [2] Rea M S, Freyssinier-Nova J P. Color rendering: a tale of two metrics [J]. Color Research & Application, 2008, 33(3): 192-202.
- [3] Smet K A G, Whitehead L, Schanda J, et al. Toward a replacement of the CIE color rendering index for white light sources [J]. Leukos, 2016, 12 (1/2): 61-69.
- [4] Houser K W, Wei M C, David A, et al. Review of measures for light-source color rendition and considerations for a two-measure system for characterizing color rendition [J]. Optics Express, 2013, 21(8): 10393-10411.
- [5] Ma R Q, Liao N F. Influence of illuminant chromaticity on color constancy under RGB-LED light source [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39 (9): 0933001.
马瑞青, 廖宁放. RGB-LED 光源下光源色度对颜色恒常性的影响 [J]. 光学学报, 2019, 39 (9): 0933001.
- [6] David A, Fini P T, Houser K W, et al. Development of the IES method for evaluating the color rendition of light sources [J]. Optics Express, 2015, 23 (12): 15888-15906.
- [7] Davis W, Ohno Y. Color quality scale [J]. Optical Engineering, 2010, 49(3): 033602.
- [8] Illuminating Engineering Society of North America. IES method for evaluating light source color rendition: ANSI/IES TM-30-18 [S]. New York: IES Standards Committee, 2018.
- [9] Liao X Y, Zhu D Q, Zhuang Q R. Comparative analysis of methods for evaluating gamut area of light sources [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2019, 40(5): 683-690.
廖欣怡, 朱大庆, 庄其仁. 光源色域面积评价方法的比较分析 [J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2019, 40(5): 683-690.
- [10] Royer M P. Comparing measures of gamut area [J]. Leukos, 2019, 15(1): 29-53.

- [11] Windisch R, Heidel G, Binder U, et al. Impact of spectral features of common LED lighting systems on TM-30 color indices [J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 1824-1830.
- [12] Royer M P, Wilkerson A, Wei M, et al. Human perceptions of colour rendition vary with average fidelity, average gamut, and gamut shape [J]. *Lighting Research & Technology*, 2017, 49(8): 966-991.
- [13] Wei M, Houser K W, David A, et al. Colour gamut size and shape influence colour preference [J]. *Lighting Research & Technology*, 2017, 49(8): 992-1014.
- [14] Royer M P, Houser K W, David A. Chroma shift and gamut shape: going beyond average color fidelity and gamut area [J]. *Leukos*, 2018, 14(3): 149-165.
- [15] Tian H J, Liu J X, Hong Z, et al. Dimming method for R/G/B/WW light emitting diode based on four channels' pulse width modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0423002.
田会娟, 柳建新, 洪振, 等. 基于脉冲宽度调制的 R/G/B/WW 4 色发光二极管调光调色方法 [J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0423002.
- [16] Wei M C, Houser K W. Systematic changes in gamut size affect color preference [J]. *Leukos*, 2017, 13(1): 23-32.
- [17] Teunissen C, van der Heijden F, Poort S, et al. Characterising user preference for white LED light sources with CIE colour rendering index combined with a relative gamut area index [J]. *Lighting Research & Technology*, 2017, 49(4): 461-480.
- [18] Ohno Y. Spectral design considerations for white LED color rendering [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(11): 111302.
- [19] Revantino, Mangkuto R A, Enge A, et al. The effects of illuminance, colour temperature, and colour rendering of various existing light-emitting diode lamps on subjective preference and performance in Indonesia [J]. *Journal of Building Engineering*, 2018, 19: 334-341.
- [20] Viénot F, Durand M L, Mahler E. Kruithof's rule revisited using LED illumination [J]. *Journal of Modern Optics*, 2009, 56(13): 1433-1446.
- [21] National Electrical Manufacturers Association. Electric lamps-specification for the chromaticity of solid-state lighting products: ANSI C78. 377-2015 [S]. US: US-ANSI, 2015.