

# 用 LED 原色的同色异谱样本检验不同颜色匹配函数的表现

黄敏\*, 王宇, 李钰, 胡晓雪, 李修, 刘瑜

北京印刷学院印刷与包装工程学院, 北京 102600

**摘要** 颜色刺激的光谱组成不同, 个体观察者的颜色感觉不同, 用不同颜色匹配函数计算的配色精度也会存在差异。为研究自发光设备原色光谱峰值波长位置改变对这种差异的影响程度, 选取了 1 台 3 通道(R1G2B1)和 1 台 6 通道(R1R2G1G2B1B2)LED 发光面板, 以 3 通道 LED 面板中 636 nm-524 nm-452 nm 组合呈现的颜色为目标色, 分别改变 6 通道 LED 面板中的 RGB 单通道和双通道, 共产生了 7 种(包括 1 种同谱)组合。组织 39 名年龄分布在 19~24 岁的色觉正常观察者, 基于 7 种组合开展了白色的配色实验, 共采集到 357 组光谱数据。将 CIE1964, CIE2006, 基于反射色优化建立、适于年轻观察者的 Sarkar2, BIGC17 共 4 种颜色匹配函数代入计算, 以 CIE1976- $u'v'$  色品参数计算的  $\Delta(u', v')$  值进行评价。用 CIE1964 和 CIE2006 计算的颜色匹配精度和观察者间差异, 均受红通道影响较小, 与同谱组合的计算结果较为接近; 其次是蓝通道, 绿通道峰值波长位置改变的影响较大, 与同谱组合间的差异显著。Sarkar2 和 BIGC17 的计算性能较好, 在某些组合下优于 CIE1964 和 CIE2006。

**关键词** 色彩; 原色光谱; 颜色匹配函数; 颜色匹配精度; 观察者间差异

中图分类号 O432

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1633001

## Performances of Different Color Matching Functions Examined by Metamerism Samples of LED Primary Colors

Huang Min\*, Wang Yu, Li Yu, Hu Xiaoxue, Li Xiu, Liu Yu

School of Printing and Packaging Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China

**Abstract** Color stimuli with different primary colors will arouse different color perceptions, and color matching accuracies calculated by different color matching functions are also different. To investigate the influences of the peak wavelength location of primary colors from self-illuminating equipment on such differences, we selected one 3-channel LED panel (R1G2B1) and one 6-channel LED panel (R1R2G1G2B1B2). The color displayed by the 636 nm-524 nm-452 nm combination in the 3-channel LED panel was defined as the target color, and seven corresponding combinations (including one combination of the same spectrum) were generated after the RGB single channel and double channel of the 6-channel LED panel were changed. Thirty-nine observers (aged from 19 to 24) with normal color vision were organized for the color matching experiments of white color, and 357 sets of data were collected in the visual experiments. Four sets of color matching functions were employed, including CIE1964, CIE2006, Sarkar2, and BIGC17 (the latter two are based on reflective color sample pairs and suitable for young observers). Their performances were evaluated with  $\Delta(u', v')$  calculated by CIE1976- $u'v'$  chromaticity. The results indicated that regarding the color matching accuracy and the observer variation calculated by CIE1964 and CIE2006, the peak wavelength positions of the red channel, blue channel, and green channel had increasing influences, and the differences from the same-spectrum combination results were also in an ascending order. Sarkar2 and BIGC17

收稿日期: 2021-02-05; 修回日期: 2021-03-01; 录用日期: 2021-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(61675029)、北京市委组织部青年拔尖计划(2018)、北京印刷学院校级研发计划(Ec202003)

通信作者: \*huangmin@bigc.edu.cn

outperformed CIE1964 and CIE2006 in some combinations.

**Key words** color; primary colors spectrum; color matching functions; color matching accuracy; observer variation

**OCIS codes** 330.1720; 330.1710; 330.1730

## 1 引言

为量化表征人眼颜色感觉,现有计算样本色度值的颜色匹配函数(CMFs),以及国际照明委员会(CIE)推荐的 CIE1931<sup>[1]</sup>和 CIE1964<sup>[2]</sup>,代表了不同视场下( $2^\circ$ 和 $10^\circ$ )观察者的平均锥细胞光谱响应。由于观察者个体差异,CIETC1-36 分会于 2006 年提出了考虑到年龄(20~80 岁)和视场( $1^\circ\sim 10^\circ$ )的个体观察者 CMFs 计算模型<sup>[3]</sup>。使用该模型时,需代入观察者真实年龄和实际观察视场,计算较不方便。同时,大量对 CIE2006 的测试也表明,其仍有较大的改进空间<sup>[4-6]</sup>。Sarkar 等<sup>[4]</sup>提出了基于 $10^\circ$ 视场的 8 个分类 CMFs Sarkar1~Sarkar8(以下简称 S1~S8)。Asano 等<sup>[6]</sup>基于蒙特卡罗方法模拟并聚类产生了 $10^\circ$ 视场的 10 个分类 CMFs Asano1~Asano10(以下简称 A1~A10),用 OLEDs、LEDs、激光等呈色设备模拟计算的结果表明其评价性能优于 S1~S8。本课题组<sup>[7]</sup>使用聚类分析的方法聚类产生了 BIGC 1~BIGC 19 CMFs,用异谱组合的反射样本对(中小色差等级)<sup>[8-9]</sup>检验了包括 CIE1964、CIE2006、S1-S8、A1~A10 在内的不同 CMFs 的表现。结果表明,对年轻观察者(19~25 岁),S2 和 BIGC 17(以下简称 B17)具有较好的计算性能;对老年观察者(60~75 岁),BIGC 5 的计算性能较好,且均优于 CIE 推荐的 CIE1964 和 CIE2006。

随着窄带原色的日益广泛应用,研究表明<sup>[10-13]</sup>样本对间的光谱组成对颜色表征和色差计算有着较大的影响。Li 等<sup>[10]</sup>基于 6 通道 LED 光源和灰色(光谱组成较平缓的反射色)的配色结果可知,8 名观察者在 636 nm-521 nm-447 nm 光谱组合下的匹配结果较为一致,CIE2006( $3^\circ$ 视场)的计算性能最好。郭春丽等<sup>[13]</sup>以 6 通道 LED 发光面板为匹配设备,组织了 24 名观察者与 NEC-PA242W 专业显示器再现的 6 个颜色进行匹配,结果表明 636 nm-524 nm-452 nm 的光谱组合可引起较高的颜色匹配精度和较小的观察者差异。Hu 等<sup>[12]</sup>选择了 16 通道的 LED 光源组成 16 种匹配原色,与 iPad 显示的白色进行匹配,8 名观察者在 665 nm-525 nm-450 nm 光谱组合下的观察者差异最小,CIE2006( $2^\circ$

视场)的计算性能较好。上述研究中的结果均是使用 CIE 推荐的 CMFs 计算,得到的最优光谱组合与 CIE 推荐 CMFs 具有相近的峰值波长,匹配设备的 R 通道峰值波长位置改变对实验结果的影响远低于 G 和 B 通道,但选用的目标设备和匹配设备的原色光谱参数(如:峰值波长、光谱带宽和光谱形状)均有一定的差异,G 和 B 通道的影响程度、异谱组合与同谱组合的差异还有待进一步验证;同时,使用其他分类 CMFs 计算的结果与 CIE 推荐 CMFs 的一致性也有待检验。

本文以 LED 原色光谱组合 636 nm-524 nm-452 nm 呈现的白色为目标色,选用 6 通道 LED 原色光谱分别与目标色组成了同谱(1 组)和异谱(6 组)的光谱组合,组织了 39 名年轻观察者开展了白色的颜色匹配实验。将异谱组合的实验结果与同谱组合比较,研究 RGB 原色光谱的峰值波长位置改变,对颜色匹配精度和观察者间差异的影响;同时研究、比较不同 CMFs 对年轻观察者颜色匹配结果的计算性能。

## 2 实验设计

### 2.1 呈色设备

选取了常州千明的 LED-Panel 多通道发光面板作为实验的呈色设备<sup>[14]</sup>,其发光面的尺寸为 5 cm×5 cm,图 1 为用 PR655 光谱辐射度计测量得到的各通道最大光谱能量分布,表 1 中给出了 LED-Panel 各原色 R1R2G1G2B1B2 的光谱和色度信息,其中 $\lambda_{\text{measured}}$ 为光谱峰值波长位置,FWHM 为光谱半峰全宽。

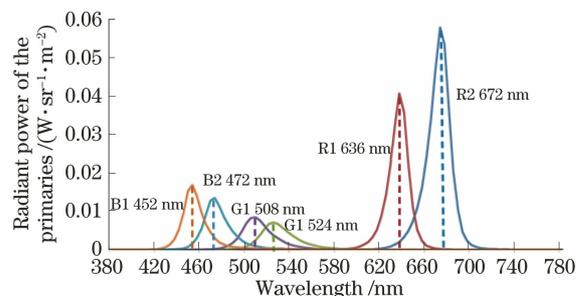


图 1 LED-Panel 原色的光谱能量分布

Fig. 1 Spectral power distributions of primary colors of LED-Panel

表 1 LED-Panel 原色的光谱和色度信息

Table 1 Spectral and colorimetric information of primary colors of LED-Panel

Primary colors	$\lambda_{\text{measured}} / \text{nm}$	FWHM /nm	$x_{10}$	$y_{10}$	$u'_{10}$	$v'_{10}$
R1	636	20	0.69	0.31	0.53	0.52
R2	672	20	0.71	0.29	0.57	0.51
G1	508	28	0.12	0.70	0.04	0.57
G2	524	32	0.24	0.73	0.09	0.58
B1	452	20	0.15	0.06	0.17	0.17
B2	472	21	0.11	0.17	0.09	0.32

本次实验选取了 2 台 LED-Panel, 考虑到文献 [13] 中, 636 nm-524 nm-452 nm 的光谱组合可得到较高的颜色匹配精度, 且与现有 CIE 推荐的各颜色匹配函数建立时使用的原色光谱峰值波长位置接

近。将其设定为目标色的 RGB 原色组合; 将另一台 LED-Panel 的 R1R2G1G2B1B2 原色通道进行组合, 所得结果如表 2 所示。

表 2 目标设备和匹配设备的光谱组合及变化特点

Table 2 Spectral combination and change characteristics of target and matched devices

Target (combinations)	Matched (combinations)	Variations	Color gamut areas	
			CIE 1964- $x_{10}y_{10}$	CIE 1976- $u'_{10}v'_{10}$
(R1-G2-B1)	L1(R1-G2-B1)	-	0.1697	0.0878
	L2(R2-G2-B1)	R	0.1773	0.0956
	L3(R1-G1-B1)	G	0.1766	0.0947
	L4(R1-G2-B2)	B	0.1533	0.0572
	L5(R1-G1-B2)	G+B	0.1530	0.0600
	L6(R2-G2-B2)	R+B	0.1602	0.0624
	L7(R2-G1-B1)	R+G	0.1827	0.1021

表 2 中, 匹配设备的 L1 组合与目标设备 (R1-G2-B1) 呈现的颜色为同谱颜色对, 匹配设备 L2~L7 组合为分别改变了单通道 R、G、B 和双通道 G+B、R+B、R+G 与目标设备组成的异谱颜色对。不同的原色光谱组合会影响颜色匹配精度、反映观察者同色异谱差异, 同时也会影响其呈色性能, 其中色域大小就是一项重要的呈色指标。将不同原色的色

品坐标绘制在图 2 的  $x_{10}y_{10}$  和  $u'_{10}v'_{10}$  色品图上, 可得到不同原色光谱组合下的色域, 其计算结果见表 2 中的第 4 列和第 5 列。图 2 中原色 B1 和 B2 的  $xy$  和  $u'v'$  色度值差别较大, 因此计算得到的 L1、L2、L3、L7 组合 (由 B1 组成) 的色域较大, 而 L4、L5 和 L6 组合 (由 B2 组成) 的色域较小。

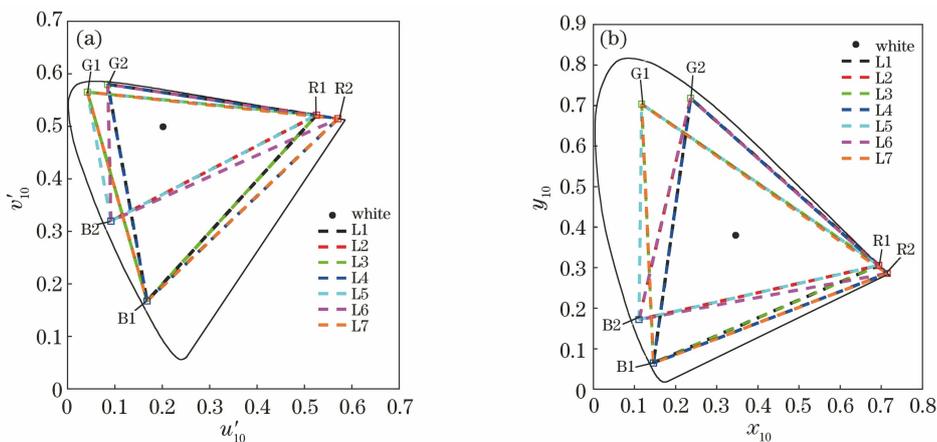


图 2 不同原色组合的色域。(a)  $u'_{10}v'_{10}$ ; (b)  $x_{10}y_{10}$

Fig. 2 Color gamut of different primary color combinations. (a)  $u'_{10}v'_{10}$ ; (b)  $x_{10}y_{10}$

## 2.2 颜色匹配实验

在目标设备 LED-Panel (636 nm-524 nm-452 nm) 上再现白色,使其色温和发光强度在 5000 K 和  $100 \text{ cd/m}^2$  左右,如图 2 中黑点所示。实验开始前,进行了 LED-Panel 颜色显示稳定性和均匀性的测试,以 CIE1976- $u'v'$  色品图上的距离  $\Delta(u', v') = \sqrt{(u'_1 - u'_2)^2 + (v'_1 - v'_2)^2}$  表征。以开机 5 min 后的白色为参照,在开机后的 300 min 内每间隔 2 min 测量一次,计算其显示白色的  $\Delta(u', v')$  值均在  $1.1 \times 10^{-4}$  以内。为避免 LED-Panel 的边缘强光影响,将开孔为  $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$  的黑挡板(明度  $Y_{10} = 4.72$ )覆盖于 LED-Panel 上,测量、计算得到发光面板中心位置与边缘四角显示颜色的离均色差,以  $\Delta(u', v')$  值表示,且其值在 0.0013 以内。结果表明,LED-Panel 满足实验使用要求。

整个颜色匹配实验均在暗室进行,正式开始实验前,由组织者告知观察者实验注意事项。观察者通过对匹配设备 LED-panel 配置软件上 R、G、B 通道的调节,与目标白色比较,开展 L1~L7 组合下的匹配。如图 3 所示,观察者正坐于显示屏前方,距离目标色与匹配色均约 40 cm,目视方向与屏幕中心垂直,目标色/匹配色对人眼所形成的观察视角约为  $5.7^\circ \times 18.5^\circ$ 。观察者随机进行每种组合下的匹配实验,一种组合匹配需用时 3~5 min,匹配完 7 种 LED 组合下的颜色约需 30~40 min。观察者完成实验后,实验组织者用 PR 655 实时采集目标白色和每种组合下匹配白色的光谱能量,采集位置为 LED-Panel 的中心处。

观察者色觉正常,均为来自北京印刷学院印刷工程专业的学生,具有颜色科学的基础知识。39 名

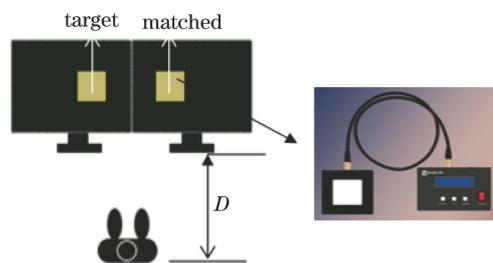


图 3 颜色匹配实验示意图

Fig. 3 Diagram of color matching experiment

(28 女 11 男) 观察者,年龄分布在 19~24 岁,有 12 人基于匹配设备的每种组合分别进行了 1 次重复实验,每种组合下可采集 51 组 ( $= 27 \times 1 + 12 \times 2$ ) 数据,共采集到 357 组 ( $= 51 \text{ 组} \times 7 \text{ 种组合}$ ) 数据。

## 3 数据分析

由于实验是在大于  $4^\circ$  的观察视场进行,基于 CIE1964 CMFs 和由 PR655 测量得到的每名观察者的目标色和匹配色光谱数据,以 CIE1976- $u'v'$  色度参数和  $\Delta(u'_{10}, v'_{10})$  值进行配色精度和观察者间差异计算。

### 3.1 观察者精度

观察者精度分为观察者重复性 (Intra-observer) 和观察者准确性 (Inter-observer)。有 12 名观察者在 7 种组合下重复 1 次匹配了目标白色,计算 Intra-observer 时,需计算观察者每次匹配色的  $u'v'$  值与 2 次匹配色的  $u'v'$  均值间的  $\Delta(u', v')$  值; Inter-observer 是指每种组合下,每名观察者匹配色的  $u'v'$  值与 51 组匹配色  $u'v'$  值间的  $\Delta(u', v')$  值。表 3 中列出了观察者重复性、准确性的最小值、最大值和平均值。

表 3 不同组合下的观察者精度

Table 3 Observer variations under different combinations

Intra-observer	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
Min	0.0005	0.0003	0.0009	0.0005	0.0005	0.0002	0.0006
Max	0.0062	0.0020	0.0041	0.0051	0.0040	0.0037	0.0041
Mean	0.0021	0.0009	0.0020	0.0022	0.0022	0.0017	0.0023
Inter-observer	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
Min	0.0002	0.0005	0.0004	0.0010	0.0007	0.0010	0.0005
Max	0.0077	0.0063	0.0117	0.0114	0.0184	0.0105	0.0162
Mean	0.0029	0.0029	0.0048	0.0045	0.0071	0.0050	0.0073

表 3 中,观察者的 Intra-observer 小于 Inter-observer,说明观察者个体间的差异小于不同观察者之间的差异,实验结果是可靠的。同时,由于重复实验观察者的 2 次实验在不同时间段进行,目标色

并不完全相同,在此不对观察者重复性进行比较、分析。观察者准确性在 0.0029~0.0073 变化,在 L1 和 L2 组合下,观察者的颜色匹配精度较好,具有较小的计算  $\Delta(u'_{10}, v'_{10})$  值,均为 0.0029; 在 L5 和 L7

组合下,观察者的颜色匹配精度较差,具有较大的计算  $\Delta(u'_{10}, v'_{10})$  值,为 0.0071 和 0.0073,可见观察者在 L2 组合(R 通道改变)下的配色精度与同谱组合 L1 最为接近,这与文献[10]、文献[12]和文献[13]等的实验结果具有较好的一致性。

### 3.2 原色光谱影响分析

用 CIE1964 CMFs 计算目标色和每名观察者匹配颜色的色度值,进而计算每种组合下观察者匹配颜色  $\Delta(u'_{10}, v'_{10})$  值的平均值,结果如图 4 所示。

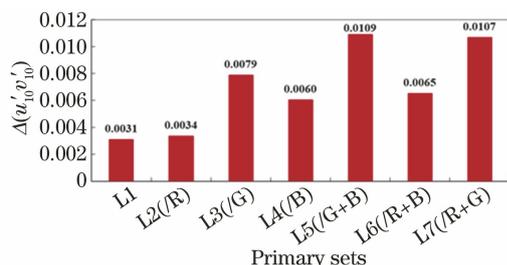


图 4 CIE1964 计算的不同组合下颜色匹配结果

Fig. 4 Color matching results under different combinations calculated by CIE1964

可见颜色匹配精度由高到低的排序为  $L1 < L2 < L4 < L6 < L3 < L7 < L5$ ,说明颜色匹配精度受 R 通道峰值波长位置改变影响最小,其次是 B 通道,影响最大的是 G 通道。进一步地,以 L1 组合为参照,与其他组合下的配色结果进行差异显著性比较。得到  $F$  值分别为:  $L2(F = 11.56)$ ,  $L3(F = 42.32)$ ,  $L4(F = 15.46)$ ,  $L5(F = 67.49)$ ,  $L6(F = 14.25)$ ,  $L7(F = 67.63)$ ,均大于置信度  $\alpha = 0.05$  时的临界值  $F_{\alpha, 0.05} = 3.94$ ,不同组合下的配色结果均较 L1 同谱组合差异显著。说明以 CIE1964 计算,实验中目标色和匹配色原色光谱的差异,会直接影响到颜色匹配的精度和观察者差异的大小。其中 R

通道影响最小, G 通道影响最大。这主要是由于 CIE1964 建立时使用的原色光谱峰值波长位置 645.2 nm-526.3 nm-444.4 nm 与本次实验选用的 636 nm-524 nm-452 nm 目标色原色光谱组合接近。同时说明, CIE1964 观察者对原色光谱中 G 通道变化的光谱响应灵敏,其次是 B 通道,对 R 通道变化的光谱响应灵敏度最低。因此 L1 组合和 L2 组合可得到较高的颜色匹配精度和较小的观察者差异。

### 3.3 观察者间差异比较

表 3 中给出了观察者的准确性,是指每名观察者匹配的颜色与所有观察者匹配颜色平均值间的差异,亦即离均色差(MCDM)<sup>[15]</sup>,可以用来进行观察者间差异的评估。与检验配色精度的方法相似,以 L1 组合为参照,与其他组合下的观察者的准确性结果进行差异显著性比较。得到的  $F$  值分别为:  $L2(F = 0.065)$ ,  $L3(F = 17.66)$ ,  $L4(F = 15.03)$ ,  $L5(F = 45.50)$ ,  $L6(F = 22.43)$ ,  $L7(F = 57.60)$ ,其中  $F_{\alpha, 0.05} = 3.94$ 。可见用 CIE1964 计算,仅在 L2 组合下的观察者间的差异和 L1 组合差异不显著,其他组合均与 L1 组合具有显著性差异。

进一步地,以观察者匹配颜色的  $u'_{10}v'_{10}$  值协方差逆矩阵参数,构建观察者差异椭圆<sup>[10,12,15]</sup>进行观察者在不同组合下匹配颜色差异的表征,如图 5 所示,其中,色度椭圆的中心为所有观察者在每种组合下匹配目标色  $u'v'$  色度值的平均值。将本次实验结果与文献[13]实验中白色、灰色样本的观察者差异椭圆的各参数进行比较。表 4 中,椭圆尺寸  $S = \sqrt{\pi AB}$ ,长半轴  $A$  和短半轴  $B$  是由 CIE1976- $u'v'$  值计算得到。椭圆倾角  $\theta$  是指以  $u'_{10}$  坐标轴为起始边,沿逆时针方向的椭圆长轴与坐标轴  $u'_{10}$  的夹角。

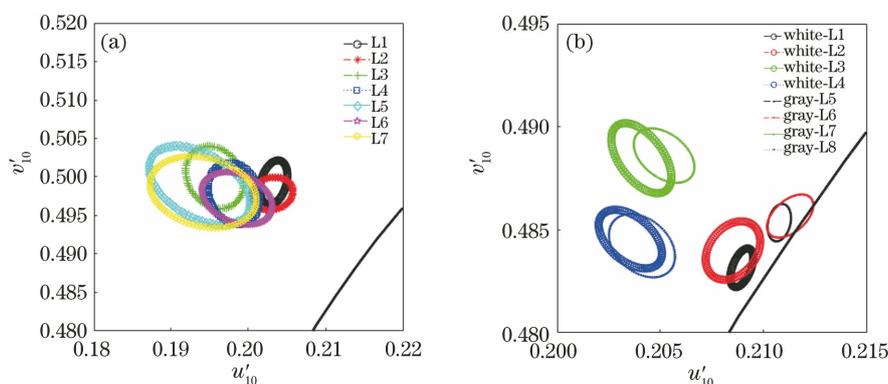


图 5 不同 LED-RGB 原色组合下的观察者差异色度椭圆。(a)本文方法;(b)文献[13]方法

Fig. 5 Observer variability ellipses from different LED-RGB primary colors. (a) Proposed method; (b) Ref. [13] method

表 4 不同 LED-RGB 三原色光源组合下的观察者色度椭圆参数

Table 4 Parameters of observer variability ellipses from different LED-RGB primary color combinations

Parameter	Proposed method							
Combination	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	
S	0.0039	0.0042	0.0068	0.0065	0.0097	0.0068	0.0099	
$\theta$	74.05	14.04	123.58	111.06	149.39	156.87	165.84	
Parameter	Ref. [13] method							
Color	White			Gray				
Combination	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
S	0.0039	0.0079	0.0085	0.0082	0.0042	0.0060	0.0078	0.0090
$\theta$	68.35	51.42	127.00	139.41	76.46	40.88	142.17	138.45

由图 5 和表 4 对椭圆参数的计算结果可知,本次实验与文献[13]实验在 L1~L4 组合下的椭圆形状与偏角结果较为一致。在 L1~L7 不同组合下,观察者差异椭圆大小与表 3 中观察者准确性计算、图 4 中颜色匹配精度计算的变化规律相同,均为 R 通道改变时的结果与同谱组合的色度椭圆最小,单通道 G 的影响最大;其中 L5 和 L7 组合中有 G 通道改变时的色度椭圆较大。说明,颜色刺激的原色光谱与 CIE1964 建立时使用的原色光谱峰值波长位置较为接近时,计算得到观察者之间的差异较小。本次实验结果中,CIE1964 观察者对 R 通道改变光谱响应不灵敏,对 B 通道,特别是 G 通道改变的光谱响应灵敏,说明 G 和 B 原色改变导致观察者同色异谱更为明显。对于这种响应的变化规律,目前很难给出分析结论,今后需尽可能增加原色光谱的数量和种类进行比较、研究。

### 3.4 不同颜色匹配函数计算比较

本次实验观察者年龄在 19~24 岁,为年轻观察者,故将实验采集到的目标色和匹配色光谱数据,分别代入 CIE1964、CIE2006、S2 和 B17 共 4 种 CMFs,计算目标色和匹配色的 CIE1976- $u'v'$  色度值(其中,CIE2006 计算时代入观察者的平均年龄 22 岁和  $10^\circ$  视角)。4 种 CMFs 的  $\bar{x}(\lambda)\bar{y}(\lambda)\bar{z}(\lambda)$  通道的光谱响应绘制于图 6 中。

进一步地,表 5 中给出了 4 种 CMFs 的光谱信息,其中  $\lambda_{\max}$  为各通道光谱响应的峰值波长位置,  $STV_{\max}$  为光谱三刺激值的峰值。

不同 CMFs 在  $\bar{x}(\lambda)$  通道有两个峰值,S2 在  $\bar{x}(\lambda)$  通道短波段的峰值波长向长波方向偏移,同时其在长波段的  $STV_{\max}$  值最高,B17 的  $STV_{\max}$  值最低。在  $\bar{z}(\lambda)$  通道,CIE1964 和 S2 的  $STV_{\max}$  值较低,CIE2006 和 B17 较高。这些光谱响应的差异,将会对匹配设备的 RGB 单通道或双通道改变得到的

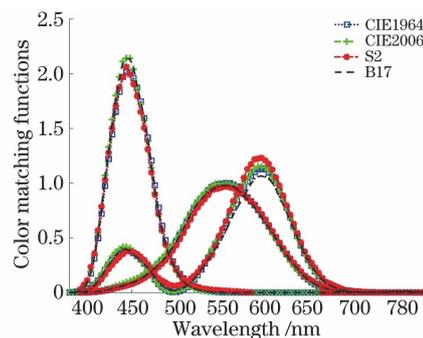


图 6 不同颜色匹配函数的光谱响应分布

Fig. 6 Spectral response distribution of different CMFs

匹配精度和观察者间差异计算产生一定的影响。将目标色的  $u'v'$  色度值和所有观察者在 L1~L7 组合下匹配颜色的平均  $u'v'$  色度值绘制在图 7 中,图中圆圈为观察者匹配色的  $u'v'$  平均值,初始位置为目标色的  $u'v'$  色品坐标,各组合标注于图 7(a)中。

不同 CMFs 计算的 L1(同谱)组合配色精度均较高,计算的异谱组合规律不同。图 7(a)和(b)中,CIE1964 和 CIE2006 的计算结果较为接近,在 L1 和 L2 组合下,观察者匹配的颜色向右方(偏红)偏移;其他组合下均向左方(偏绿)偏移。这主要是由于 L1 与目标色为同谱组合,L2 较 L1 改变了 R 通道,匹配的白色精度也较高,这与以前的研究结果具有较好的一致性<sup>[10,12-13]</sup>。图 7(c)中,S2 计算的白色  $u'_{10}v'_{10}$  色度值与其他 3 种 CMFs 的结果相差较大,均偏红色;不同组合下的匹配色也均较目标色向右方(偏红)偏移,且在 L2(R)、L6(R+B)、L7(R+G)组合有 R 通道的改变时,计算的配色精度较低。这与图 6 和表 5 中给出的 S2 在  $\bar{x}(\lambda)$  通道与其他 CMFs 有较大差异有关,这会在某种程度放大异谱组合的颜色匹配精度。B17 计算的结果中,G 通道改变时的 L3(G)、L5(G+B)组合偏离目标色较远,颜色匹配精度下降,B17 在 G 通道改变时的计算精度不高。

表 5 不同颜色匹配函数的光谱信息

Table 5 Spectral information of different CMFs

Channel	CIE1964				CIE2006(22)					
	$\lambda_{\max}$	Half-max	FWHM	$STV_{\max}$	$\lambda_{\max}$	Half-max	FWHM	$STV_{\max}$		
$x(\lambda)$	596	552	634	82	1.132	594	551	632	81	1.152
	442	419	470	51	0.387	441	419	468	49	0.420
$y(\lambda)$	557	503	612	109	0.999	556	500	611	111	1.000
$z(\lambda)$	445	420	476	56	2.018	446	420	473	53	2.147

Channel	S2				B17					
	$\lambda_{\max}$	Half-max	FWHM	$STV_{\max}$	$\lambda_{\max}$	Half-max	FWHM	$STV_{\max}$		
$x(\lambda)$	595	554	633	79	1.229	595	554	635	81	1.063
	445	422	474	52	0.381	443	420	470	50	0.396
$y(\lambda)$	556	504	614	110	0.969	558	502	612	110	0.976
$z(\lambda)$	444	420	473	53	2.060	446	420	474	54	2.140

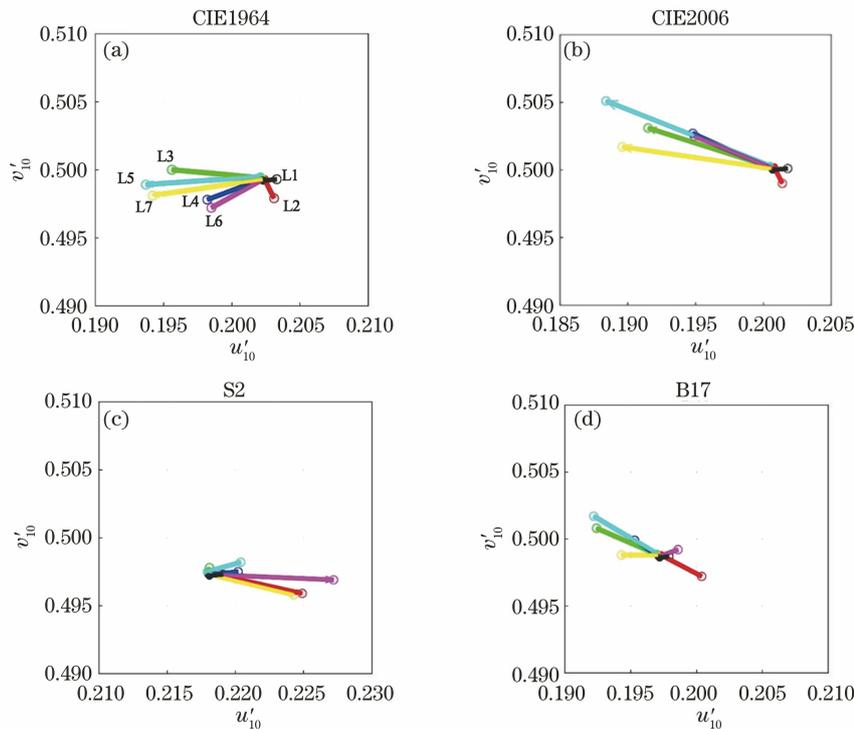


图 7 不同 CMFs 计算不同组合下观察者匹配颜色  $u'_{10}v'_{10}$  平均值

Fig. 7 Averaged  $u'_{10}v'_{10}$  values of matched devices with different CMFs in different combinations

用 4 种 CMFs 分别计算目标色和每名观察者匹配颜色  $\Delta(u', v')$  值的平均值, 如表 6 所示, 每种组合下的计算最小值加粗表示。

表 6 用  $\Delta(u', v')$  值表示不同颜色匹配函数计算不同光谱组合的颜色匹配结果

Table 6 Color matching results from different combinations with different CMFs in terms of  $\Delta(u', v')$  values

CMFs	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	Mean
	—	R	G	B	G+B	R+B	R+G	
CIE1964	<b>0.0031</b>	0.0034	0.0079	0.0060	0.0109	0.0065	0.0107	0.0069
CIE2006	0.0031	<b>0.0032</b>	0.0104	0.0074	0.0141	0.0075	0.0126	0.0083
S2	0.0031	0.0073	<b>0.0050</b>	0.0052	<b>0.0074</b>	0.0098	0.0090	0.0067
B17	0.0031	0.0046	0.0068	<b>0.0050</b>	0.0088	<b>0.0050</b>	<b>0.0080</b>	<b>0.0059</b>

表 6 中, 由于 L1 组合与目标色为同谱颜色对, 0.0031, 说明不同 CMFs 对同谱组合的颜色匹配精度计算无明显影响。4 种 CMFs 计算 7 种组合下的

平均值, B17 的计算精度最高, 为 0.0059; 其次为 S2, 最差的是 CIE2006。CIE 推荐的 CIE1964 和 CIE2006 计算的配色精度以  $\Delta(u', v')$  值表示, 其值由低到高的排序为:  $L1 < L2 < L4 < L6 < L3 < L7 < L5$ 。但这种规律与 S2 和 B17 的计算结果并不相同, 如: CIE1964 和 CIE2006 在 R 通道改变时的计算结果与颜色匹配结果最一致, S2 在 L3(/G) 和 L5(/G+B) 组合; B17 在 L4(/B)、L6(/R+B) 和 L7(/R+G) 组合下的计算结果与颜色匹配结果最符合。不同的 CMFs 即代表了不同类别的观察者, 说明由于不同类别观察者的锥细胞光谱响应不同, 对颜色刺激的原色光谱组合改变后的响应是不同的。S2 在  $\bar{x}(\lambda)$  通道的短波段的峰值波长位置会较

CIE1964 和 CIE2006 向长波段偏移, 且光谱响应  $STV_{max}$  较高, 使得 R 通道改变时, 计算精度下降; B17 与 S2 比较, 在 G 通道改变时, 计算性能劣于 S2, 但在 R 和 B 通道改变时, 均优于 S2, 说明 B17 观察者对 R 和 B 的光谱响应灵敏度低于 S2。通道改变时, B17 与 CIE 推荐 CMFs 的计算规律相同。基于反射色样本建立的 S2 和 B17, 对窄带自发光色也有较好的计算性能, 现有 CIE2006 仍有较大改进空间。

进一步地, 统计 4 种 CMFs 计算 L1~L7 组合下各观察者匹配颜色  $\Delta(u', v')$  值的最小值, 并将此时的 CMFs 作为代表该名观察者锥细胞光谱响应的 CMFs。计算结果如表 7 所示。

表 7 观察者分类颜色匹配函数个数及概率统计

Table 7 Number of observer classification color matching functions and probability statistics

CMFs	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	P / %
	—	R	G	B	G+B	R+B	R+G	
CIE1964	9	11	5	11	2	7	3	13.4
CIE2006	13	31	1	5	6	9	7	20.2
S2	11	4	40	13	34	6	23	36.7
B17	18	5	5	22	9	29	18	29.7
Total	51	51	51	51	51	51	51	100.0

可见在 7 种组合下, 4 种 CMFs 的观察者分类结果由高到低为: S2 (36.7%) > B17 (29.7%) > CIE2006 (20.2%) > CIE1964 (13.4%)。检验反射色有较好表现的 S2 和 B17, 用本次自发光设备的配色结果检验也有较好的计算性能。CIE2006 在 R 通道改变时有较好的分类结果, S2 在 G 和 G+B 通道改变时有较好的分类结果; 由图 6 中不同 CMFs 的光谱分布进一步证明, S2 在 R 通道改变时的计算结果较差, 较少的观察者属于 S2。B17 在 B 通道和 R+B 通道改变时具有较好的分类结果。说明由于 CMFs 的光谱响应在不同的通道存在差异, 计算的颜色匹配结果和观察者差异也存在较大不同。

## 4 结 论

选取了两台 LED-Panel 显示设备开展白色的匹配实验, 与目标设备的原色光谱比较, 匹配设备分别改变了 R、G、B 单通道和 G+B、R+B、R+G 双通道。用 CIE1964、CIE2006、S2 和 B17 共 4 种 CMFs 计算, 将异谱组合(L2~L7)的实验结果与同谱组合(L1)进行比较。结果表明:

1) 用 CIE1964 和 CIE2006 计算的  $\Delta(u', v')$  值表征颜色匹配精度, 其值越小配色精度越高,  $\Delta(u', v')$  值由低到高为:  $L1 < L2(R) < L4(B) < L6$

$(R+B) < L3(G) < L7(R+G) < L5(G+B)$ 。F 检验表明, 所有组合下(单通道、双通道的原色光谱改变)的配色精度均较同谱组合 L1 的差异显著, 其中单通道 G 改变的影响最大, 双通道 G+B 的影响最大。

2) 用 CIE1964 计算离均色差和观察者差异椭圆评价观察者间差异, F 检验表明, 改变 R 通道与同谱组合 L1 的差异不显著; 其他 5 种组合下的结果与 L1 组合的差异显著, 其中单通道 G 改变的影响最大, 双通道 G+B 的影响最大。

3) 基于同色异谱反射色(中小色差数据组)优化建立的 B17 和 S2 CMFs, 在检验窄带自发光色(小色差数据组)实验结果时, 其表现性能优于现有 CIE 推荐的 CIE1964 和 CIE2006 CMFs。以  $\Delta(u', v')$  值表征颜色匹配精度,  $B17(0.0059) < S2(0.0067) < CIE1964(0.0069) < CIE2006(0.0083)$ , 有 36.7% 和 29.7% 的观察者的锥细胞光谱响应分别属于 S2 和 B17。

## 参 考 文 献

- [1] Wright W D. A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours [J]. Transactions of the Optical Society, 1929, 30(4): 141-164.

- [2] Stiles W S, Burch J M. N. P. L. Colour-matching investigation: final report (1958) [J]. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 1959, 6(1): 1-26.
- [3] CIE. Fundamental chromaticity diagram with physiological axes: part I [R]. Vienna: CIE Central Bureau, 2006: 170-171.
- [4] Sarkar A, Autrusseau F, Viénot F, et al. From CIE 2006 physiological model to improved age-dependent and average colorimetric observers [J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision*, 2011, 28(10): 2033-2048.
- [5] Huang M, He R L, Guo C L, et al. Test and optimization of different color matching functions for different aged observers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0333001.  
黄敏, 何瑞丽, 郭春丽, 等. 不同年龄观察者颜色匹配函数的测试及优化 [J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0333001.
- [6] Asano Y, Fairchild M D. Categorical observers for metamerism [J]. *Color Research & Application*, 2020, 45(4): 576-585.
- [7] Huang M, Xi Y H, Pan J, et al. Colorimetric observer categories for young and aged using paired-comparison experiments [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 219473-219482.
- [8] He R L, Huang M, Guo C L, et al. Color-difference discrimination between young and old observers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 033301.  
何瑞丽, 黄敏, 郭春丽, 等. 年轻和老年观察者的色差分辨差异研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 033301.
- [9] Xi Y H, Huang M, He R L, et al. Testing cone-cell response of young and old observers by using nearly metameric samples [M] // Zhao P F, Ouyang Y, Xu M, et al. *Advances in graphic communication, printing and packaging. Lecture notes in electrical engineering*. Singapore: Springer, 2019, 543: 80-86.
- [10] Li J Y, Hanselaer P, Smet K. Pilot study on color matching accuracy using different primaries [C] // *Proceedings of the 29th Quadrennial Session of the CIE*, June 14-22, 2019, Washington DC, USA. Washington DC: International Commission on Illumination, CIE, 2019: 1010-1018.
- [11] Asano Y, Fairchild M D, Blondé L, et al. Color matching experiment for highlighting interobserver variability [J]. *Color Research & Application*, 2016, 41(5): 530-539.
- [12] Hu Y, Wei M C, Luo M R. Observer metamerism to display white point using different primary sets [J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 20305-20323.
- [13] Guo C L, Huang M, Xi Y H, et al. Influence of LED primary colors on color matching accuracy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(16): 1633001.  
郭春丽, 黄敏, 习永惠, 等. LED 原色光谱对颜色匹配精度的影响分析 [J]. *光学学报*, 2020, 40(16): 1633001.
- [14] HOUSLITE. [2021-02-01]. <http://www.thouslite.cn/PRODUCTS/17.html>.
- [15] Oicherman B, Luo M R, Rigg B, et al. Effect of observer metamerism on colour matching of display and surface colours [J]. *Color Research & Application*, 2008, 33(5): 346-359.