LED 原色光谱对颜色匹配精度的影响分析

郭春丽，黄敏*，习永惠，潘洁
北京印刷学院印刷与包装工程学院，北京 102600

摘要 为研究基于不同原色光谱的显示设备对观察者颜色匹配精度和观察者间差异的影响，实验选取了 6 通道($R_1R_2G_1G_2B_1B_2$)LED 发光面板，并组合为 4 种 RGB 匹配原色光谱。组织了 24 名年龄分布在 21～25 岁的色觉正常观察者，以 NEC-PA242W 专业显示设备上呈现的 6 个颜色(包括白色和 CIE 推荐的 5 个颜色)为目标色开展颜色匹配实验，共采集到 720 个数据。用 CIE1976 $u'v'$ 色品参数对颜色匹配精度进行分析，结果表明：不同观察者基于 636 nm-524 nm-452 nm 组合得到的配色精度更高，$\Delta(u', v')$值为 0.0062；基于 636 nm-524 nm-472 nm 组合得到的配色准确性较差，$\Delta(u', v')$值为 0.0084。用观察者匹配颜色的 $u'v'$ 值协方差逆矩阵参数构建观察者差异色度椭圆，基于 636 nm-524 nm-452 nm 组合得到的椭圆平均尺寸最小，为 0.0055；636 nm-508 nm-452 nm 组合最大，为 0.0094。结果表明，颜色匹配精度和观察者间的差异，受红通道影响较小，受蓝通道和绿通道的峰值波长位置影响较大。

关键词 视觉；视觉色彩；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/AOS202040.1633001

Influence of LED Primary Colors on Color Matching Accuracy

Guo Chunli, Huang Min*, Xi Yonghui, Pan Jie
School of Printing and Packaging Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, *China*

Abstract In order to investigate the influence of different primary colors on observers' color matching accuracy and observer variability, LED-Panel with 6 channels ($R_1R_2G_1G_2B_1B_2$) was employed and 4 corresponding combinations with different RGB primary colors were generated. 24 observers (aged from 21 to 25) with color normal vision were organized to carry out the color matching experiment. There are 6 colors, including white and 5 CIE recommended colors were displayed on NEC-PA242 professional display as target colors, and in total, 720 sets of data were collected. CIE 1976 $u'v'$ chromaticity values were used to analyze the color matching accuracy. The results indicated that higher accuracy was occurred in the combination of 636 nm-534 nm-452 nm, with $\Delta(u', v')$ value of 0.0062, while the accuracy was poor based on 636 nm-524 nm-472 nm, with $\Delta(u', v')$ value of 0.0084. The observer's covariance chromaticity ellipses were constructed using the inverse covariance matrix parameters of $u'v'$ value of the observers' matching data. The results showed that based on the combination of 636 nm-524 nm-452 nm, the average size of the ellipse was the smallest ($S=0.0055$) and the largest size was occurred in the combination of 636 nm-508 nm-452 nm ($S=0.0094$). The color matching accuracy and the observer variability were less affected by the red channel, and more affected by the peak wavelength positions of the blue and green channels.

Key words vision; color vision; primary colors; color matching functions; color matching accuracy; observer variability
OCIS codes 330.1720; 330.1710; 330.1730

1 引 言

颜色的定量化描述和不同颜色间的差异比较，需要基于均匀颜色空间和色差公式进行表征、计算。近年来，多数研究都围绕着颜色空间的均匀性检验和色差公式计算性能的评价、优化展开[1-4]。上述研究中采用的颜色样本，大多是基于宽带原色呈现，如纺织色、打印色、油漆色和宽带 CRT(Cathode Ray Tube)显示色等。随着现代化呈色设备的多样化和窄带原色设备(如激光或 LED 原色光谱)的日益

收稿日期：2020-03-09；**修回日期**：2020-04-08；**录用日期**：2020-05-14
基金项目：国家自然科学基金(61675029)
* **E-mail**：huangmin@bigc.edu.cn

广泛应用，在颜色的数字化校准、传递和评价过程中，观察者同色异谱现象也越来越明显[5-6]，观察者颜色匹配函数的计算性能成为其中不可忽视的问题。

国际照明委员会(CIE)推荐的颜色匹配函数(CMFs)有 CIE1931、CIE1964 和 CIE2006，其中 CIE1931[7] 是基于 Wright-1929 的数据建立，其 RGB 原色为 650 nm-530 nm-450 nm；CIE1964[8] 和 CIE2006[9] 是基于 Stile&Burch-1959 的数据建立，其 RGB 原色为 645.2 nm-526.3 nm-444.4 nm。为研究颜色刺激的光谱特性对颜色匹配函数计算性能、颜色匹配精度等的影响，国内外已有研究基于不同的原色光谱展开，Csuti 等[10-11] 以白炽灯透过不同颜色玻璃片呈现的颜色为目标色，以 626 nm-525 nm-476 nm 的 LED 三原色为匹配色，开展了颜色匹配实验，发现现有 CIE 推荐的颜色匹配函数在 1976-$u'v'$ 色品图的红黄区域能较好的描述观察者同色异谱现象，而在蓝绿色区域不同观察者间的差异变大；同时测试结果也表明 CIE2006 表现更优。Sarkar 等[12] 基于宽带 CRT 和 LCD 显示器开展实验，对 CIE2006 颜色匹配函数各生理参数的影响进行了分析；Asano 等[13-14] 基于不同原色光谱的呈色设备开展实验，研究了其对观察者同色异谱的影响。Li 等[15-16] 选择了 $R_1R_2G_1G_2B_1B_2$ 共 6 通道 LED 光谱组成了 6 种 RGB 原色光谱，8 名观察者基于灰色(其为光谱分布较平缓的反射色)开展颜色匹配实验，以 CIE 1976 $u'v'$ 色度值进行评价，发现基于 636 nm-521 nm-447 nm 原色光谱的结果较为稳定，CIE2006(3°视场)的表现最优，但其与目视评价数据间仍存在一定的差异。上述研究选取的目标色和匹配色中，至少存在一个颜色刺激具有较宽的光谱带宽。

本课题组[17] 前期基于 5 台不同原色的显示设备开展了颜色匹配实验，发现显示设备的原色光谱功率分布对观察者同色异谱具有一定的影响，颜色匹配的 CIELAB 色差(用 CIE1964 计算)最大值为 20.73，最小值为 3.89。由于实验选取显示设备的原色光谱除峰值波长位置不同外，其光谱带宽和光谱形状也有一定的差异，不同因素的影响程度难以确定。为进一步确定原色光谱的峰值波长位置对观察者颜色匹配精度的影响，本次研究选取了 $R_1R_2G_1G_2B_1B_2$ 共 6 通道的 LED 发光面板，并组合为 4 种 RGB 匹配原色光谱。将 CIE 推荐的 5 个颜色中心和白色共 6 个颜色显示在 NEC-PA242W 专业级显示器上，组织了 24 名色觉正常观察者开展颜色匹配实验，用现有 CIE 颜色匹配函数计算，研究原色光谱对颜色匹配精度和观察者间差异的影响，同时检验 CIE 各颜色匹配函数的表现性能。这将为今后基于不同原色光谱的颜色色度计算、观察者同色异谱计算，不同颜色匹配函数的建立、优化等提供数据支持和理论依据。

2　实验设计

2.1　呈色设备

实验以 NEC-PA242W 专业级显示器为目标设备，目标设备的色温和发光强度分别设定为 5012 K 和 101.4 cd/m^2。定制了常州千明的 LED-Panel 多通道发光面板作为匹配设备[18]，其发光面的物理尺寸为 5 cm×5 cm。使用光谱辐射度计 Photo Research 655(PR655)测量 LED-Panel 的四个边角和中心位置处的光谱能量，用 CIE1964 CMFs 计算，比较四个边角和中心位置处的色度值，以 CIE1976u'-v' 色品图上的距离[$\Delta(u', v')$ 值]表征 LED-Panel 的均匀性，其计算公式如下式所示，得到平均 $\Delta(u', v')\leqslant 0.00006$，均匀性较好，可满足本次实验的要求。

$$\Delta(u',v')=\sqrt{(u'_1-u')^2+(v'_1-v')^2}。\quad(1)$$

用 PR 655 测量 NEC-PA242W 目标设备和 LED-Panel 匹配设备 RGB 原色的光谱能量分布，归一化曲线如图 1 所示。

表 1 中列出了目标设备和匹配设备各通道原色的光谱和色度具体参数，包括各原色光谱的半峰全宽(FWHM)。考虑到颜色匹配实验的工作量，本次实验基于表 1 中 LED-Panel 的 6 通道原色，共组合了 4 种 RGB 匹配原色，分别为 L1：R1-G2-B1，L2：R2-G2-B1，L3：R1-G1-B1，L4：R1-G2-B2。其中，L1 组合的 RGB 三原色与 CIE 颜色匹配函数建立时基于的原始实验数据所采用的光谱峰值波长位置最接近。与 L1 组合比较，L2、L3、L4 组合分别改变了 R、G、B 原色通道，以研究不同通道峰值波长位置改变对实验结果的影响。图 2 为 4 种原色组合和 NEC-PA242W 目标设备在 CIE 1976 $u'v'$ 色品图上的色域。

2.2　颜色刺激

CIE 推荐了 5 个颜色[19](灰、红、黄、绿、蓝)用于颜色空间的均匀性和色差公式的计算性能检测，Csuti 等[10-11] 前期基于 9 种颜色、Li 等[15-16] 使用灰色开展了颜色匹配实验。考虑到上述实验研究对颜

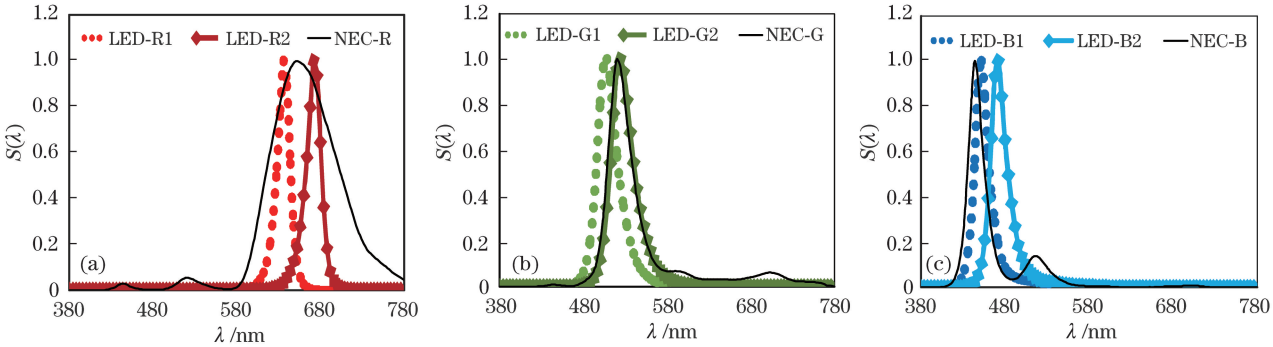

图 1　目标设备和匹配设备原色的归一化光谱能量分布。(a) R 通道;(b) G 通道;(c)B 通道

Fig. 1　Normalized spectral power distributions of the primary colors of the target and matched devices. (a) R channel; (b) G channel; (c) B channel

表 1　目标设备和匹配设备原色的光谱和色度信息

Table 1　Primary colors and colorimetric information of the target and matched devices

Device	Primary	λ-measured /nm	FWHM /nm	x_{10}	y_{10}	u'_{10}	v'_{10}
Target device	NEC-R	652	90	0.64	0.33	0.45	0.52
	NEC-G	520	32	0.26	0.68	0.10	0.58
	NEC-B	444	21	0.15	0.10	0.16	0.23
Matched device	LED-R1	636	18	0.69	0.31	0.52	0.52
	LED-R2	672	20	0.71	0.29	0.57	0.51
	LED-G1	508	27	0.12	0.70	0.04	0.56
	LED-G2	524	31	0.24	0.72	0.08	0.58
	LED-B1	452	19	0.15	0.07	0.16	0.18
	LED-B2	472	22	0.11	0.18	0.09	0.33

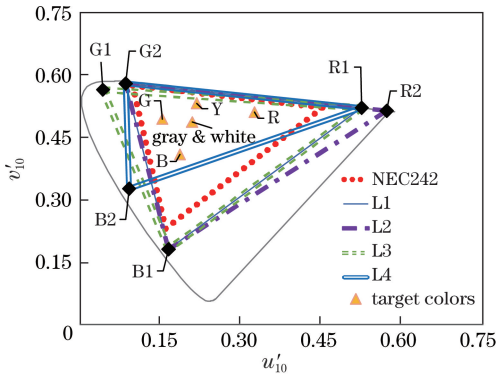

图 2　目标设备和匹配原色的色域

Fig. 2　Color gamuts of the target and matched devices

色刺激的选择和实验的工作量,本次实验选取了 6 个颜色(包括 CIE 推荐的 5 个颜色和白色)作为目标色,将其显示在 NEC-PA242W 显示设备上,PR655 测量得到其色度参数如表 2 所示。实验选取的目标色与 CIE 推荐的颜色较为接近,CIELAB 色差值均不超过 0.74。同时由图 2 可见,实验选取的 6 个目标色均在目标设备和 4 种原色组合的匹配设备可再现的范围内,可作为目标色开展颜色匹配实验。

2.3　颜色匹配实验

整个颜色匹配实验均在暗室进行,每次实验前为保证颜色稳定显示,目标设备需预热 100 min。目标色与匹配色均为 5 cm×5 cm 大小,实验装置如图 3 所示。图 3(a)的实验装置中,观察者可通过对 LED-Panel 配置软件上 R、G、B 通道的调节实现其显示颜色的改变。

实验开始前,由实验组织者告知观察者实验注意事项。采用记忆匹配法,6 个颜色刺激随机在目标设备(NEC-PA242W 显示设备)中心处显示,利用黑卡纸(明度 Y_{10}=4.72)将目标设备屏幕的其他部分遮盖,只预留出色块显示的位置。在颜色匹配过程中,观察者正坐于目标色与匹配色之间,距离目标色与匹配色均约 50 cm,目视方向需与显示屏幕中心颜色保持垂直,目标色/匹配色对人眼所形成的观察视角约为 6°。所有颜色在目标设备上随机呈现,观察者匹配一个颜色需用时 3～5 min,为避免视觉疲劳,观察者匹配完一个LED-RGB组合下的

表 2　目标色的色度参数

Table 2　Colorimetric parameters of the target colors

Colors	CIE recommended value			Measured value					ΔE_{ab}^*
	L_{10}^*	a_{10}^*	b_{10}^*	L_{10}^*	a_{10}^*	b_{10}^*	u'_{10}	v'_{10}	
White	-	-	-	-	-	-	0.21	0.49	-
Gray	62	0	0	62.42	0.11	−0.41	0.21	0.49	0.60
Red	44	37	23	43.91	36.49	22.95	0.32	0.51	0.52
Yellow	87	−7	47	87.25	−6.91	46.85	0.22	0.53	0.30
Green	56	−32	0	56.25	−32.16	−0.33	0.15	0.50	0.44
Blue	36	5	−31	36.49	4.56	−30.65	0.19	0.41	0.74

图 3　实验相关示意图。(a)实验装置图;(b)LED-Panel 及控制器连接;(c)软件调节界面

Fig. 3　Experimental related diagram. (a) Experimental setup; (b) LED-Panel and the controllers; (c) interface of software adjustment

3 个颜色后,需进行短暂休息,然后再完成该组合下另外 3 个颜色的匹配。观察者需在不同时间段进行不同 LED-RGB 组合下的实验。每组实验完成后,实验组织者用 PR 655 实时采集目标色和匹配色的光谱能量。

所有观察者均为来自北京印刷学院印刷工程、包装工程专业的学生,色觉正常并具有颜色科学的基础理论知识。24 名年龄分布在 21～25 岁的观察者(16 女 8 男)参与了颜色匹配实验,其中 6 人(5 女 1 男)基于匹配设备的每种组合分别进行 1 次重复实验,共采集到 30 组(＝18×1＋6×2),720 个(＝30 组×4 个匹配光源组合×6 个颜色)颜色匹配数据。

3　数据处理

将采集到目标色和匹配色的光谱数据,基于 CIE1964 CMFs,以 CIE1976 $u'v'$色度参数和$u'v'$色品图上的距离 $\Delta(u', v')$值分别进行观察者间差异性和颜色匹配精度的表征。

3.1　观察者精度

观察者的精度包括观察者的重复性(Intra-Observer)和观察者的准确性(Inter-Observer)。计算观察者重复性时,需计算观察者每次匹配的颜色与 2 次匹配颜色均值间的差异;观察者的准确性是指每名观察者匹配颜色与所有观察者匹配颜色平均值间的差异。表 3 中列出了参与实验观察者重复性、准确性的最小值、最大值和平均值,以 $\Delta(u', v')$值表示。

表 3　实验观察者的精度

Table 3　Observer variations in the experiments

LED-conbination	L1	L2	L3	L4
Intra-observer	R1-G2-B1	R2-G2-B1	R1-G1-B1	R1-G2-B2
Min	0.0017	0.0011	0.0018	0.0012
Max	0.0032	0.0032	0.0069	0.0032
Mean	0.0024	0.0024	0.0038	0.0024
Inter-observer	R1-G2-B1	R2-G2-B1	R1-G1-B1	R1-G2-B2
Min	0.0002	0.0002	0.0002	0.0005
Max	0.0188	0.0209	0.0241	0.0221
Mean	0.0039	0.0053	0.0069	0.0059

可见,四种 LED-RGB 匹配原色的组合下,观察者重复性在 0.0024～0.0038 间变化,准确性在 0.0039～0.0069 间变化。L1 组合下的观察者重复性和准确性均最佳,L3 组合下的观察者重复性和准

确性均较差。同时，观察者的准确性结果是观察者重复性结果的 1.6～2.5 倍。与 Sarkar 等[12] 和 Li 等[15] 的实验结果具有较好的一致性，说明本次实验采集到的数据是可靠、有效的。

3.2　不同颜色匹配函数的表现

将实验采集到的目标色和匹配色光谱数据，分别代入 CIE1931、CIE1964 和 CIE2006 CMFs 计算 CIE1976-$u'v'$ 色度值。其中，CIE2006 CMFs 计算时需代入观察者的真实年龄和 6°视角，计算结果如图 4 所示。使用 CIE 推荐的 3 种颜色匹配函数计算，观察者匹配结果均在 L1 组合下更为集中，在 L3 及 L4 组合下的离散性较大。使用不同颜色匹配函数计算，CIE1931 和 CIE2006 的计算散点在 $u'v'$ 色品图中，分别较目标色向右下方和左上方偏移。CIE1964 和 CIE2006 的计算结果较为接近。

进一步地，使用不同颜色匹配函数计算观察者匹配各颜色 $\Delta(u', v')$ 值的平均值，如图 5 所示。CIE1964 和 CIE2006 的计算结果较为一致，各颜色中心处均优于 CIE1931 的计算结果。这与本次实验视场为 6°(属于大视场范围)有一定的关系。同时，在计算时，CIE2006 虽然考虑了观察者的年龄和观察视场的影响，但计算性能并没有优于 CIE1964。不同颜色匹配函数的计算结果均表明，黄色颜色匹配精度最高，蓝色颜色匹配精度最差。

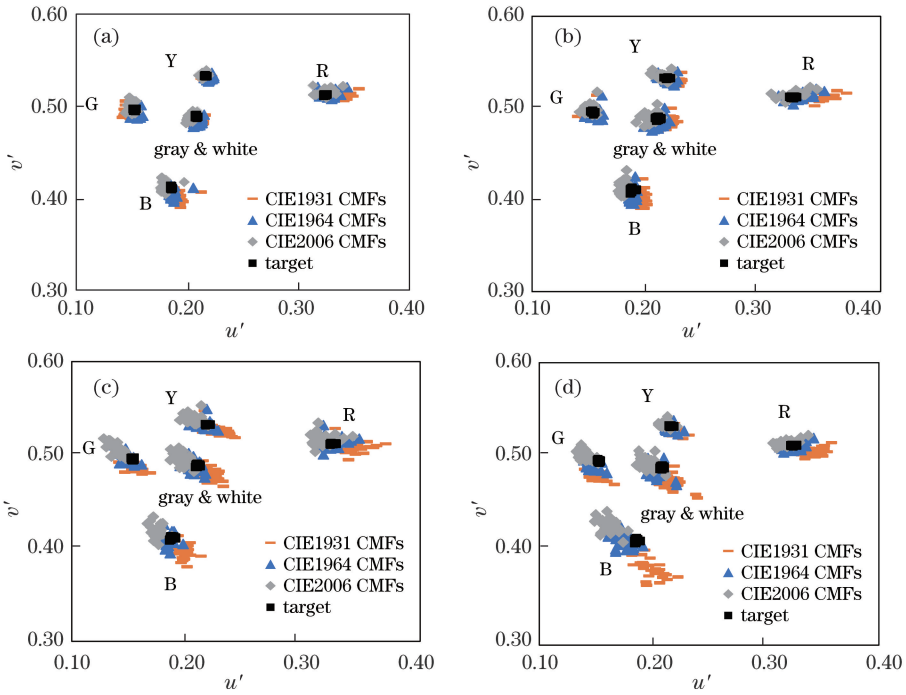

图 4　不同颜色匹配函数计算不同 RGB 组合下匹配颜色比较。(a) L1；(b) L2；(c) L3；(d) L4

Fig. 4　Comparisons of the matched colors with different CMFs in different RGB combinations. (a) L1; (b) L2; (c) L3; (d) L4

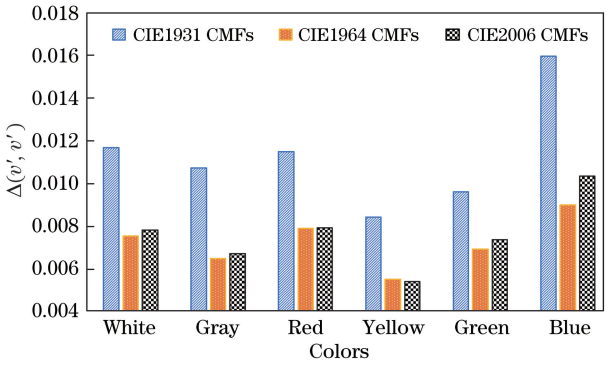

图 5　不同颜色匹配函数计算 $\Delta(u', v')$ 值柱状图

Fig. 5　Histograms of the $\Delta(u', v')$ values calculated by different color matching functions

分析原因可知，人眼视网膜锥细胞的光谱响应是其中一个重要影响因素，RGB 原色通道间峰值波长位置的变化，蓝通道的响应影响会高于其他两个通道，参与计算时会引起较大的色差。文献[10]中提到基于白炽灯和 RGB-LED 光源匹配的结果，在红色到黄色区域 $u'v'$ 差异较小，在绿色到蓝色区域 $u'v'$ 差异较大；文献[11]中 CIE2006 颜色匹配函数的计算表现优于 CIE1931 颜色匹配函数，上述研究结果都与本次实验的结果具有较好的一致性。综合考虑，在本文的后续数据处理中，将采用 CIE1964 进行计算、分析。

3.3　RGB 原色光谱的影响分析

用 CIE1964 计算观察者匹配颜色与目标色间的 $\Delta(u', v')$值，进而分别计算 4 种 LED-RGB 光源组合下各颜色的匹配结果及其 $\Delta(u', v')$值平均值，如表 4 所示。

表 4 中，L1 的组合光源下，观察者的匹配精度最高，$\Delta(u', v')$值为 0.0062；L4 组合下的匹配精度最低，$\Delta(u', v')$值为 0.0084。如前所述，与 L1 组合比较，L2、L3、L4 组合分别改变了 R、G、B 原色，主要为 RGB 原色的峰值波长位置不同，$\Delta R=$ L2(R_2)－L1(R_1)＝36 nm，$\Delta G=$L3(G_1)－L1(G_2)＝－16 nm，$\Delta B=$L4(B_2)－L1(B_1)＝20 nm。其中正值代表当前通道的峰值波长位置相对于 L1 向长波方向偏移，负值代表向短波方向发生偏移。

表 4　不同 LED-RGB 光源组合下每种颜色的匹配结果[以 $\Delta(u', v')$表示]

Table 4　$\Delta(u', v')$ values of each color from different LED-RGB combinations

Colors	L1	L2	L3	L4	Mean
White	0.0065	0.0075	0.0075	0.0085	**0.0075**
Gray	0.0054	0.0057	0.0063	0.0084	**0.0065**
Red	0.0070	0.0096	0.0080	0.0068	**0.0079**
Yellow	0.0050	0.0052	0.0073	0.0045	**0.0055**
Green	0.0057	0.0054	0.0083	0.0081	**0.0069**
Blue	0.0075	0.0068	0.0079	0.0138	**0.0090**
Mean	**0.0062**	**0.0067**	**0.0076**	**0.0084**	**0.0072**

基于颜色匹配实验，每种原色光谱组合下可采集 180 个数据组＝30 组数据×6 个颜色中心，以 L1 原色组合得到的实验结果为参照，L2、L3、L4 组合下得到的实验结果分别与其进行显著性差异比较。得到：L2($F=1.386$，$p=0.2399>0.05$)；L3($F=9.919$，$p=0.002<0.01$)；L4($F=22.01$，$p=3.87\times10^{-6}<0.01$)，其中 F 临界值 $F_c=3.868$。可见，与 L1 原色组合下的实验结果比较，L2 与其不具有显著性差异；而 L3、L4 组合与其具有显著性差异。这说明，红通道的峰值波长位置对颜色匹配精度的影响最小，各通道的影响由高到低依次为 $B>G>R$。鉴于目前计算是采用 CIE1964 颜色匹配函数和 CIE1976$u'v'$色品指数，人眼视网膜锥细胞的光谱响应也是其中一个重要影响因素。说明，RGB 原色通道间的峰值波长位置变化，蓝通道的响应影响会高于其他两个通道，参与计算时会引起较大的色差。

表 4 中的 L2、L3、L4 组合下，6 个匹配色中，由于红、绿、蓝通道的改变，分别使得匹配红色、绿色和蓝色的 $\Delta(u', v')$值最大(见表 4 中斜体标记)。同时，基于现有的 6 个颜色匹配平均计算结果，仍然是黄色的 $\Delta(u', v')$值最小，为 0.0055，蓝色的差异最大，为 0.0090。

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，构建观察者差异色度椭圆[17,19](图 6)，研究观察者匹配不同颜色的差异。其中图 6(a)和图 6(b)中的色度椭圆为放大 4 倍绘制。基于不同 LED-RGB 光源组合下观察者色度椭圆尺寸 $S=\sqrt{\pi AB}$(其中 A 和 B 分别是椭圆的长半轴和短半轴)是基于 CIE1976$u'v'$色品参数计算得到的。椭圆倾角 θ 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，如表 5 所示。

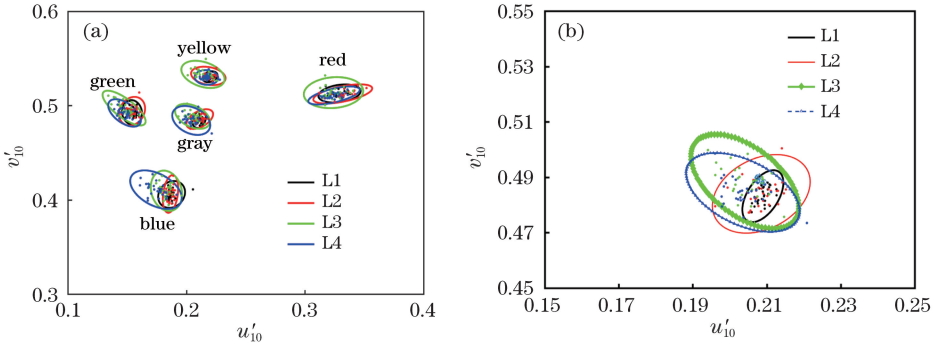

图 6　不同 LED-RGB 三原色光源组合下的观察者差异色度椭圆。(a)5 个颜色；(b)白色

Fig. 6　Observer variability ellipses from different LED-RGB primary color combinations. (a) 5 colors; (b) white

由图 6(a)和表 5 的结果可见，L1 光源组合下构建的色度椭圆尺寸最小($S=0.0055$)，L3 光源组合下的色度椭圆尺寸最大($S=0.0094$)，表明基于 L1 组合下的观察者间差异最小，L3 光源组合下的观察者间差异最大。不同光源组合下构建的色度椭圆，在不同颜色区域有不同的变化规律，椭圆尺寸最小值出现在黄色($S=0.0062$)，最大值出现在蓝色($S=0.0089$)和红色($S=0.0089$)。基于白色的匹配结果与图 6(a)中 5 个颜色的变化趋势较为一致，均为基于L1组合下的匹配结果更加集中，L2、L3

表 5　不同 LED-RGB 三原色光源组合下的观察者色度椭圆参数

Table 5　Parameters of the observer variability ellipses from different LED-RGB primary color combinations

Color	Size					θ			
	L1	L2	L3	L4	Mean	L1	L2	L3	L4
White	0.0039	0.0079	0.0085	0.0082	0.0071	68.35	51.42	127.00	139.41
Gray	0.0042	0.0060	0.0078	0.0090	0.0067	76.46	40.88	142.17	138.45
Red	**0.0076**	**0.0085**	**0.0119**	0.0075	0.0089	11.27	14.79	7.09	17.26
Yellow	0.0035	0.0069	0.0093	0.0052	0.0062	35.38	163.89	151.91	172.54
Green	0.0062	0.0076	0.0087	0.0077	0.0075	95.27	74.97	134.39	132.13
Blue	**0.0075**	0.0066	0.0099	**0.0118**	0.0089	71.58	84.23	99.53	139.03
Mean	0.0055	0.0072	0.0094	0.0082		-	-	-	-

和 L4 的匹配结果较为离散。比较实验选取目标设备和匹配设备间的光谱峰值波长位置差异，如表 6 所示。与表 5 的结果比较可见，L1、L2、L3 组合主要是 R 通道的位移最大，红色处观察者差异色度椭圆尺寸较大，不同观察者匹配红色的数据较为离散；而 L4 组合主要是 B 通道的位移最大，蓝色处观察者差异色度椭圆尺寸较大，不同观察者匹配蓝色的数据较为离散（见表 6 中加粗标记）。可认为由于这种原色光谱差异的存在，使不同观察者（具有不同的个体颜色匹配函数）感知到的颜色不同（通过匹配的颜色反映出来）。同时可见，L1 和 L2 组合下拟合的椭圆方向 θ，L3 和 L4 组合下的椭圆方向 θ 均具有较好的一致性。

表 6　不同组合匹配设备与目标设备原色峰值波长位置比较

Table 6 Comparison of the peak wavelength of the target and matched devices with different combinations

Combination	ΔR /nm	ΔG /nm	ΔB /nm
L1	−16	4	8
L2	20	4	8
L3	−16	−12	8
L4	−16	4	28

Li 等基于反射色灰色（光谱变化较为平缓）的实验结果中（图 7）：636 nm-521 nm-447 nm 原色光谱和改变红通道基于 598 nm-521 nm-447 nm 组合得到的色度椭圆位置、尺寸和方向最为接近，与改变蓝通道基于 636 nm-521 nm-404 nm 组合的差异大。这与本次实验的结果较为一致。但 Li 等的实验中，绿通道改变（636 nm-502 nm-447 nm），除椭圆位置外，椭圆的尺寸和方向变化不大，这与本次实验结果有一定的不一致。本次实验中绿通道的改变会引起较大的观察者间差异变化，且其与蓝通道改变后的变化趋势一致。这也许是受两次实验的目标色原色光谱不同影响，下一步工作，需要继续基于不同光谱组成的目标色，增加匹配色的原色光谱组合，进一步研究原色光谱对观察者间差异的影响。

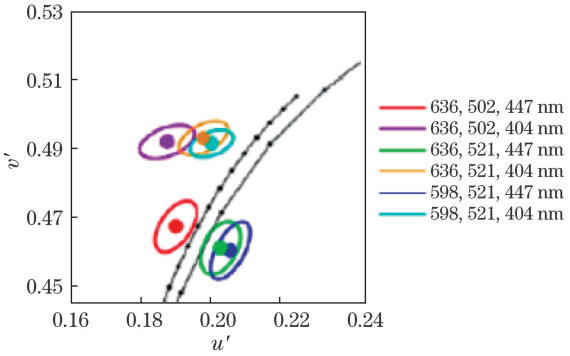

图 7　基于 CIE1964 计算得到的文献[15]的实验结果

Fig. 7　Results from Ref. [15] with different primary-sets by CIE1964

4　结　　论

随着颜色刺激呈色方式的多样化，观察者同色异谱现象日益凸显，呈色设备原色光谱对观察者颜色分辨，及其对现有 CIE 推荐颜色匹配函数计算准确性的影响，是需要检验的关键问题。本次研究以专业显示设备 NEC-PA242W 作为目标设备，选取了 6 种 LED 光源（$R_1R_2G_1G_2B_1B_2$），组成 L1：R1-G2-B1，L2：R2-G2-B1，L3：R1-G1-B1，L4：R1-G2-B2 共 4 种匹配原色。基于实验采集到的 720 组颜色匹配数据，计算发现 CIE1964 和 CIE2006（视角为 6°）的计算性能较为接近，CIE1931 的计算结果离散性较大。

1）以 $\Delta(u', v')$ 值表示颜色匹配精度：与目标色比较，不同 LED-RGB 原色光源组合，$\Delta(u', v')$ 值由低到高排序，依次为 L1(0.0062)<L2(0.0067)<L3(0.0076)<L4(0.0084)，说明基于 L1 的颜色匹配精度最高，基于 L4 的匹配精度最低；显著性测试结果表明，红通道的峰值波长位置改变引起的观察者差异不显著，绿通道和蓝通道的峰值波长位置改变引起的观察者差异显著，且蓝通道改变的影响最大。

2）以观察者差异椭圆尺寸表示观察者间差异：不同 LED-RGB 原色光源组合，观察者椭圆尺寸由小到大排序，依次为 L1(0.0055)＜ L2(0.0072)＜ L4(0.0082)＜ L3(0.0094)，说明基于 L1 进行匹配的观察者间差异性最小，基于 L3 的观察者间差异性最大。

L1(636 nm-524 nm-452 nm)组合的匹配精度最高、观察者间差异最小。改变红通道峰值波长位置对颜色匹配精度的影响最小，颜色匹配精度和观察者间的差异，受蓝通道和绿通道的峰值波长位置改变影响较大。L1 组合的峰值波长位置，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最为接近，分析这也是 L1 组合用不同颜色匹配函数计算得到的精度较其他三种组合高的原因。同时，绿通道峰值波长位置的改变引起观察者颜色分辨差异性显著的机理有待进一步研究。在今后的研究工作中，需要进一步积累原始数据检验 CIE 推荐颜色匹配函数的计算准确性；另一方面通过具有不同原色光谱颜色样本的选择，研究颜色刺激光谱对颜色计算、匹配精度和观察者同色异谱的影响，为针对不同原色光谱颜色刺激的计算和色差评价，建立适合的分类观察者颜色匹配函数。

参　考　文　献

[1] Melgosa M, Cui G H, Oleari C, et al. Revisiting the weighting function for lightness in the CIEDE2000 colour-difference formula[J]. Coloration Technology, 2017, 133(4): 273-282.

[2] Li C J, Li Z Q, Wang Z F, et al. Comprehensive color solutions: CAM16, CAT16, and CAM16-UCS[J]. Color Research & Application, 2017, 42(6): 703-718.

[3] Huang M, Cui G, Melgosa M, et al. Power functions improving the performance of color-difference formulas[J]. Optics Express, 2015, 23(1): 597-610.

[4] Melgosa M, García P A, et al. Color-quality control using color-difference formulas: progress and problems[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 1045: 104530U.

[5] le Moan S, Tanksale T M, Byshko R, et al. An observer-metamerism sensitivity index for electronic displays[J]. Journal of the Society for Information Display, 2017, 25(9): 554-560.

[6] Asano Y, Fairchild M D, Blondé L, et al. Color matching experiment for highlighting interobser vervariability[J]. Color Research & Application, 2016, 41(5): 530-539.

[7] 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.

[8] 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.

[9] CIE. Fundamental chromaticity diagram with physiological axes[R]. CIE Technical Report, 2006: 170-171.

[10] Csuti P, Schanda J. Colour matching experiments with RGB-LEDs[J]. Color Research & Application, 2008, 33(2): 108-112.

[11] Csuti P, Schanda J. A better description of metameric experience of LED clusters[J]. Light and Engineering, 2010, 18(1): 44-50.

[12] 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.

[13] Asano Y. Individual colorimetric observers for personalized color imaging[D]. Rochester: Rochester Institute of Technology, 2015.

[14] Long D L, Fairchild M D. Modeling observer variability and metamerism failure in electronic color displays[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2014, 58(3): 030402.

[15] 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. International Commission on Illumination, CIE, 2019: 1010-1018.

[16] Li J, Hanselaer P, Smet K A G. The impact of matching primary peak wavelength on color matching accuracy and observer variability[C]//Society for Imaging Science and Technology. Paris, France, Oct 21, 2019: 220-224.

[17] Huang M, He R L, Guo C L, et al. Discrimination of observer metamerism based on different display devices[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0133001.
黄敏, 何瑞丽, 郭春丽, 等. 基于不同显示设备的观察者同色异谱差异研究[J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0133001.

[18] Witt K. Cie guidelines for coordinated future work on industrial colour-difference evaluation[J]. Color Research & Application, 1995, 20(6): 399-403.

[19] 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.