

# 基于不同观察视角的 CIE 2006 颜色匹配函数计算性能研究

王宇, 黄敏\*, 李钰, 高心愿, 沈跃桐, 梁炯

北京印刷学院印刷与包装工程学院, 北京 102600

**摘要** 为检验 CIE 2006 颜色匹配函数(CMFs)的视角参数计算性能, 选用了不同原色光谱组合的 LED 发光面板开展颜色匹配实验。以 L1(636 nm-524 nm-448 nm)为目标原色组合, L2(676 nm-524 nm-448 nm)和 L4(636 nm-524 nm-472 nm)为匹配原色组合, 组织了 45 名色觉正常观察者在 4 个不同观察视角下(2.9°、5.7°、8.6°和 11.0°)开展了 CIE 推荐的 2 个颜色(红、蓝)和白色的颜色匹配实验。采集目标色和匹配色的光谱能量, 分别代入 CIE 2006 (1°~10°) CMFs 中进行计算, 并以计算的  $\Delta(u', v')$  值表示颜色匹配精度。结果表明: 当观察视角小于 4° 时, CIE 2006 2° CMFs 具有较好的计算性能; 当观察视角大于 4° 时, CIE 2006 3° CMFs 具有较好的计算性能。在对大视角显示设备呈现的颜色刺激进行测量和计算校正时, 现有 CIE 2006 CMFs 的视角参数计算性能有待进一步改进和优化。

**关键词** 视觉光学; 视觉色彩; 颜色匹配实验; 观察视角; CIE 2006 颜色匹配函数

**中图分类号** O436 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS222010

## 1 引言

颜色匹配函数(CMFs)能够定量表征人眼视锥细胞的光谱响应, 从而实现颜色感觉的量化计算。国际照明委员会(CIE)于 1931 年基于 Wright<sup>[1]</sup>和 Guild<sup>[2]</sup>的 17 名观察者颜色匹配实验结果, 提出了 CIE 1931 2° CMFs<sup>[3]</sup>, 适用于 1°~4° 视角范围内的颜色计算。基于 Stiles 和 Burch<sup>[4]</sup>的 49 名观察者颜色匹配实验结果, 提出了 CIE 1964 10° CMFs<sup>[3]</sup>, 适用于大于 4° 视角范围的颜色计算。2006 年, CIE TC1-36 分会<sup>[5]</sup>考虑到观察者的年龄(20~80 岁)和视角(1°~10°)两个因素, 提出了观察者 CMFs 计算模型。为了使用方便, CIE<sup>[6]</sup>于 2015 年推荐使用 CIE 2006 2° 和 CIE 2006 10° 两套 CMFs 来计算颜色的色度。

随着现代显示系统的快速发展, 观察者同色异谱现象日益突出, 研究者们围绕不同原色光谱的显示系统开展了颜色匹配实验<sup>[7-13]</sup>。Li 等<sup>[7]</sup>在 3° 视角选用 1 台 6 通道的发光二极管(LED)照明设备组成 6 种匹配原色组合和卤素灯照明的灰色进行了匹配。Wu 等<sup>[8]</sup>在 4.77° 视角选用 4 台有机发光二极管(OLED)显示设备和 1 台液晶显示器(LCD)显示设备进行了 6 个颜色的匹配。Hu 等<sup>[9]</sup>在 3.8° 视角选用 1 台 8 通道 LED 显示设备组成的 16 种原色组合和 1 台 LCD 显示设备进行了

白色的匹配。Shi 等<sup>[10]</sup>在 4° 视角使用不同原色光谱的 2 台 OLED 显示设备和 3 台 LCD 显示设备进行了 4 个颜色的匹配。本课题组<sup>[11]</sup>在 5.7° 视角使用 1 台 6 通道 LED 发光面板组成的 7 种不同原色组合和 1 台 3 通道 LED 发光面板进行了 6 个颜色的匹配。以上实验的观察视角(FOVs)均在 10° 以内, 且介于 CIE 推荐的大视场和小视场的 4° 计算边界。上述研究均使用了 CIE 推荐的 4 个 CMFs(CIE 1931 2°、CIE 1964 10°、CIE 2006 2° 和 CIE 2006 10°)进行计算。在此基础上, Li 等<sup>[7]</sup>使用 CIE 2006 3° CMFs, 而 Shi 等<sup>[10]</sup>使用 CIE 2006 4° CMFs 进行了计算。结果表明, 除文献[7]中 CIE 2006 3° CMFs 表现较好外, 其他研究均为 CIE 2006 2° CMFs 具有最佳的计算性能。这些研究结果使得颜色研究工作者对 CIE 2006 推荐的大视场 CMFs 的计算性能产生了浓厚的兴趣。

自发光显示设备在人们日常生活中被广泛使用, 实际应用中的数字图像显示常会涉及不同的观察视角, 特别是大于 10° 的视角。进一步地, Li 等<sup>[7]</sup>将观察视角由 3° 增加到 10°<sup>[12]</sup>, 而 Wu 等<sup>[8]</sup>将观察视角由 4.77° 增加到 20.2°<sup>[13]</sup>开展颜色匹配实验。Li 等<sup>[12]</sup>的实验结果中 CIE 1964 10° 和 CIE 2006 10° CMFs 的表现优于 CIE 2006 2° CMFs, 而 Wu<sup>[13]</sup>的实验结果仍为 CIE 2006 2° CMFs 具有最佳的计算性能。在 Li 等和 Wu 等

收稿日期: 2022-11-18; 修回日期: 2022-12-15; 录用日期: 2023-02-09; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(61675029)、北京印刷学院科研创新团队项目(BIGCEc202302)

通信作者: \*huangmin@bigc.edu.cn

的两组实验中,颜色刺激光谱组成、颜色刺激分布和实验观察者等均不相同,说明计算结果对实验条件有较强的依赖性,对 CIE CMFs 的视角参数计算性能仍需进行深入的比较和研究。同时,文献调研发现,在以往的颜色匹配实验中较少采用固定实验颜色刺激和观察条件,而仅改变观察视角的方式。

本文在课题组前期研究<sup>[11]</sup>的基础上基于 2.9°、5.7°、8.6°和 11.0° 4 个观察视角,组织了 45 名观察者使用 L2(改变红通道)和 L4(改变蓝通道)两种匹配光谱组合,与 L1(目标原色组合)进行了白色、红色和蓝色的颜色匹配,进行了 CIE 2006 CMFs 不同视角(1°~

10°)参数的计算性能比较和研究。

## 2 实验方法

### 2.1 实验装置和颜色刺激

考虑到颜色匹配实验的工作量较大,本研究将选用文献[11]中的两块 LED 发光面板,基于红色和蓝色开展颜色匹配实验,其中目标原色组合为 L1(636 nm-524 nm-448 nm),匹配原色组合为 L2(676 nm-524 nm-448 nm)和 L4(636 nm-524 nm-472 nm)。使用光谱辐射度计 Photo Research 670(PR 670)测量目标和匹配设备的 RGB 原色光谱分布,如图 1 所示。

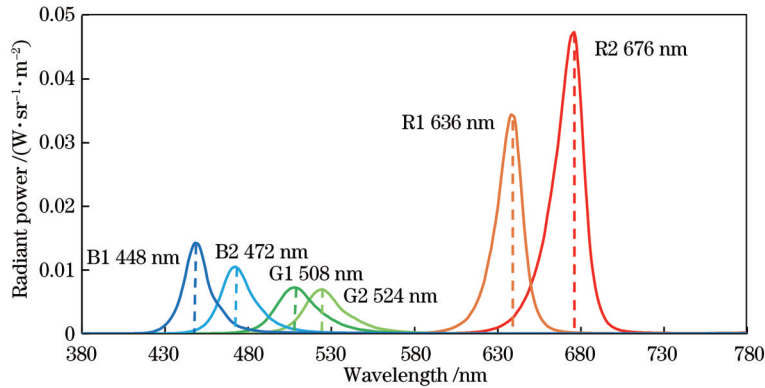


图 1 LED 发光面板原色光谱功率分布

Fig. 1 Spectral power distribution of LED panel primary colors

实验选取的 3 个目标色分别为 CIE 推荐的红色、蓝色(尽量与文献[11]中的红色和蓝色刺激保持一致)和白色(色温为 5000 K、亮度为 100 cd/m<sup>2</sup>左右)。基于 CIE 1964 10° CMFs 可计算目标色的 X、Y、Z、x、y、u' 和 v' 值,结果如表 1 所示。相应的计算公式为

$$\begin{cases} X = k \sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \\ Y = k \sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \\ Z = k \sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda, \end{cases} \quad (1)$$

$$k = \frac{100}{\sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda}$$

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X + Y + Z} \\ y = \frac{Y}{X + Y + Z} \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \\ v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3} = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: X、Y、Z 为颜色刺激的三刺激值; k 为归一化系数; λ 为可见光波长(范围为 380~780 nm); S(λ) 为显示设备辐射的光谱能量;  $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$  为人眼感红、

感绿、感蓝三种锥细胞对颜色刺激的响应能力,即 CMFs。进一步地,可计算颜色刺激在 CIE 1964 (X, Y, Z) 和 CIE 1976 (L\*, u\*, v\*) 空间的 (x<sub>10</sub>, y<sub>10</sub>) 和 (u'<sub>10</sub>, v'<sub>10</sub>) 色品坐标。

表 1 使用 CIE 1964 10° CMFs 计算的 3 个目标色色度值  
Table 1 Colorimetric characteristics of three reference stimuli calculated by CIE 1964 10° CMFs

Stimulus	Y <sub>10</sub>	x <sub>10</sub>	y <sub>10</sub>	u' <sub>10</sub>	v' <sub>10</sub>
White	100.0	0.347	0.356	0.211	0.487
Red	14.2	0.513	0.352	0.331	0.511
Blue	8.0	0.219	0.201	0.176	0.363

通过改变 L1 和 L2、L4 上颜色刺激的尺寸,以及观察者的观察距离,对单个颜色刺激可形成 2.9°、5.7°、8.6°和 11.0° 4 个观察视角,具体为方形样本 3.5 cm×3.5 cm、4.0 cm×4.0 cm、4.5 cm×4.5 cm 和 4.8 cm×4.8 cm,对应的观察距离分别为 70、40、30、25 cm。实验装置示意图如图 2 所示。对目标和匹配 LED 发光面板的测试表明<sup>[11]</sup>,本次实验选用设备的时间稳定性和空间均匀性以 Δ(u', v') 表示,其值分别为 0.0011 和 0.0013,满足颜色匹配实验的精度要求。

### 2.2 观察者

45 名(21 名男性和 24 名女性)年龄分布在 19~26 岁(平均年龄为 21 岁,标准差为 1.93 岁)的年轻观察者

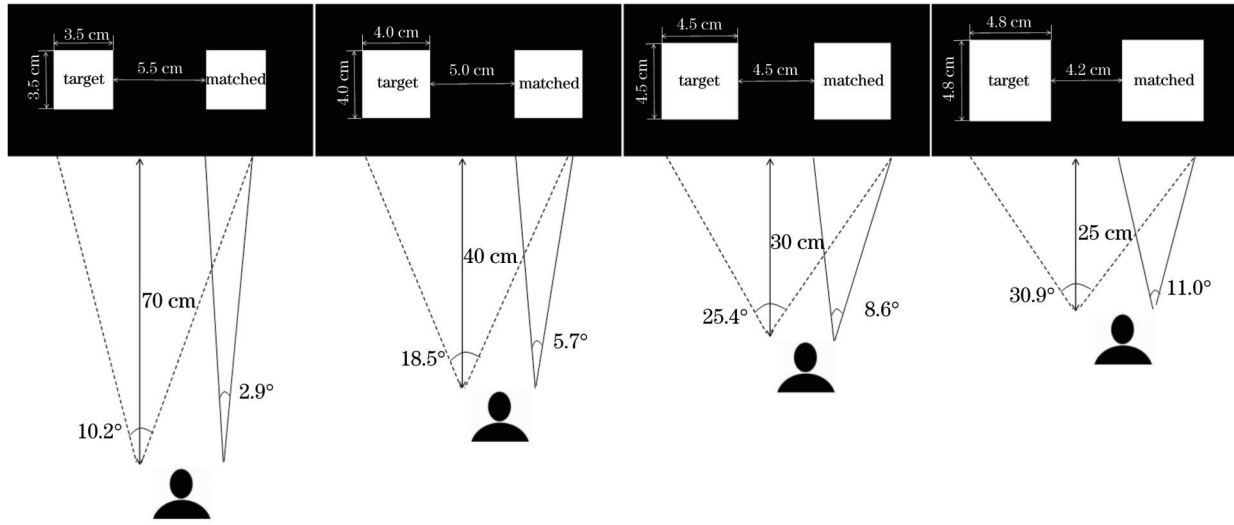


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Diagram of experimental equipments

参与了颜色匹配实验, 观察者均为北京印刷学院印刷工程专业学生, 具有颜色科学的基础知识, 在实验前均完成了 Ishihara 色觉测试, 色觉正常。

### 2.3 实验过程

实验在暗室中进行, 以双目同时匹配的方法开展, 观察者在首次开始匹配实验时, 由组织者随机挑选一个颜色由观察者进行颜色匹配的训练, 待完成匹配后再进行正式实验。观察者坐于屏幕正前方, 在目标设备和匹配设备的中间位置, 目视方向与两屏幕中心连线位置垂直, 如图 2 所示。待组织者将托腮支架的观察高度调整后, 将下颚固定在支架上, 通过对匹配设备配置软件上 RGB 通道的调节, 完成与目标设备上显示颜色刺激的匹配。

观察者随机进行每种组合下的颜色匹配, 需在不同时间完成 4 个观察视角的颜色匹配, 不同实验视角和不同匹配原色组合下的不同颜色刺激均随机呈现。实验完成后, 实验组织者用 PR 670 光谱辐射度计在观察者匹配位置处实时采集目标色和每种组合下匹配色

的光谱能量, 采集区域为 LED 发光面板的中心处。45 名观察者中 35 名进行了 1 次实验, 10 名进行了 2 次实验 (检验观察者重复性), 在每个视角下可采集 55 组数据, 共采集到 1320 组颜色匹配数据。

## 3 结果讨论

### 3.1 观察者精度

观察者精度为观察者重复性 (intra-observer) 和观察者准确性 (inter-observer), 使用 CIE 1964 10° CMFs 计算, 结果如表 2 所示。当计算观察者重复性时, 需计算观察者每次匹配色的  $u'v'$  值与 2 次匹配色的  $u'v'$  值均值间的  $\Delta(u', v')$  值。观察者准确性是指每种组合下, 每名观察者匹配色的  $u'v'$  值与 55 组匹配色  $u'v'$  值均值间的  $\Delta(u', v')$ , 计算公式为

$$\Delta(u', v') = \sqrt{(u'_1 - u'_2)^2 + (v'_1 - v'_2)^2}, \quad (4)$$

式中:  $(u'_1, v'_1)$  和  $(u'_2, v'_2)$  分别为颜色刺激 1 和颜色刺激 2 的色品坐标。

表 2 不同原色组合下的观察者精度

Table 2 Observer variations in different primary sets

Observer-variation	$\Delta(u', v')$	L2				L4			
		2.9°	5.7°	8.6°	11.0°	2.9°	5.7°	8.6°	11.0°
Intra-observer	Maximum	0.0158	0.0127	0.0146	0.0112	0.0119	0.0178	0.0126	0.0152
	Minimum	0.0002	0.0001	0.0003	0.0001	0.0001	0.0003	0.0001	0.0001
	Mean	0.0042	0.0037	0.0042	0.0036	0.0044	0.0039	0.0040	0.0038
Inter-observer	Maximum	0.0255	0.0332	0.0264	0.0317	0.0297	0.0297	0.0333	0.0298
	Minimum	0.0004	0.0004	0.0003	0.0005	0.0005	0.0001	0.0003	0.0008
	Mean	0.0069	0.0069	0.0076	0.0074	0.0087	0.0082	0.0082	0.0084

由表 2 可知, 观察者重复性精度高于观察者准确性精度, 说明观察者个体间的差异小于不同观察者之间的差异, 实验结果是合理的。观察者准确性在

0.0069~0.0087 范围内变化, L2 组合下的观察者准确性优于 L4 组合下的计算结果。观察者精度略低于前期实验的结果<sup>[11,14]</sup> (0.0040~0.0069 和 0.0029~

0.0073) 与 Wu 等<sup>[8,13]</sup> (0.0027~0.0122 和 0.0022~0.0095)、Hu 等<sup>[9]</sup> (0.0057) 和郭春丽等<sup>[15]</sup> (0.0039~0.0069) 的实验结果有较好的一致性,这也与本次实验是基于 4 个不同观察视角开展的有一定的关系。

### 3.2 颜色匹配精度

#### 3.2.1 CIE CMFs

为检验 CIE 2006 CMFs 中不同视角参数的计算性能,代入上述实验中的观察者平均年龄 21 岁,计算 CIE 2006 CMFs (1°~10°) 的光谱响应,由于光谱响应趋势较为一致,故仅绘制 CIE 2006 1°、3°、5°、7°、9°、10° CMFs 曲线,如图 3(a) 所示。可以发现:随着计算视角的增大, $\bar{x}(\lambda)$  通道在长波段的峰值波长响应向短波方向偏移,且  $\bar{x}(\lambda)$  通道在短波段的光谱响应强度有所增加。代入 1° 视角计算的光谱峰值波长位置较其他视角向长波方向(红色)偏移最为明显,对长波段颜色(红色)的响应能力高于其他配色函数,即计算颜色时会偏红; $\bar{y}(\lambda)$  通道的半峰全宽逐渐变宽; $\bar{z}(\lambda)$  通

道的峰值波长光谱响应强度逐渐增加。这是因为在视角减小的过程中,人眼视网膜黄斑色素的光学密度逐渐增加,感红锥细胞分布较为集中,类似于在眼睛中增加了一个“黄化”的滤色器,表现为  $\bar{x}(\lambda)$  通道在长波段的峰值波长响应向长波方向偏移,使颜色偏黄<sup>[16]</sup>。

将 CIE 推荐的 4 个 CMFs (CIE 1931 2°、CIE 1964 10°、CIE 2006 2° 和 CIE 2006 10° CMFs) 绘制于图 3(b) 中。可见:随着计算视角的增大, $\bar{x}(\lambda)$  和  $\bar{y}(\lambda)$  通道的峰值波长位置均向短波方向偏移, $\bar{z}(\lambda)$  通道的峰值波长光谱响应强度逐渐增加,与图 3(a) 中 CIE 2006 (1°~10°) CMFs 随着视角变化的规律一致;CIE 2006 2° CMFs 和 CIE 2006 10° CMFs 在  $\bar{z}(\lambda)$  通道的峰值波长响应高于 CIE 1931 2° CMFs 和 CIE 1964 10° CMFs, CIE 1964 10° CMFs 光谱响应介于 CIE 2006 2° CMFs 和 CIE 2006 10° CMFs 之间,与 CIE 2006 6° CMFs 分布较为接近。

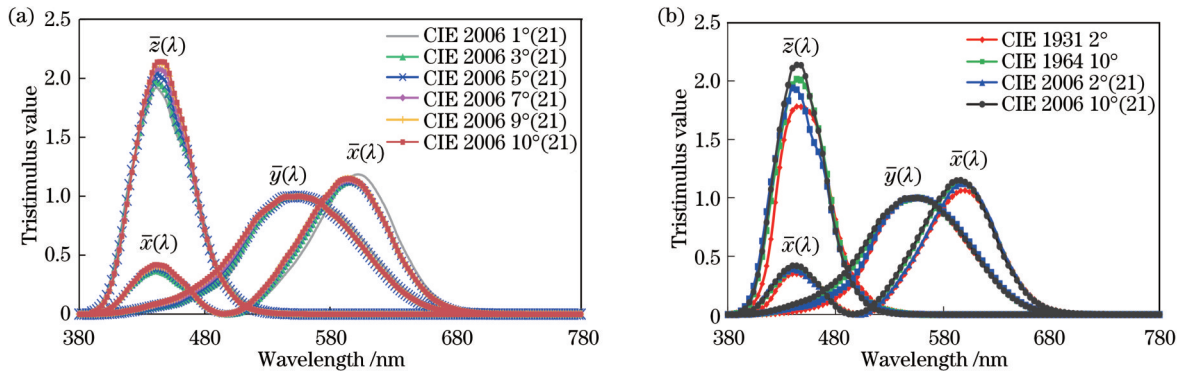


图 3 CIE CMFs 在不同视角下的锥细胞光谱响应。(a) 6 个 CIE 2006 CMFs; (b) 4 个 CIE CMFs

Fig. 3 Spectral cone response of CIE CMFs in different FOVs. (a) Six CIE 2006 CMFs; (b) four CIE CMFs

#### 3.2.2 颜色匹配精度计算

将上述颜色匹配的光谱数据分别代入 CIE 推荐的 CIE 1931 2°、CIE 1964 10°、CIE 2006 1°~10° 共 12 个 CMFs, 计算不同视角下目标色和匹配色间的  $\Delta(u', v')$  值, 以 55 组数据的平均  $\Delta(u', v')$  值表示颜色匹配的精度。理想情况下的计算  $\Delta(u', v')$  应为 0, 计算  $\Delta(u', v')$  越小表明相应 CMFs 的表现性能越好, 反之越差。图 4 为观察者匹配 2 种组合下 6 个颜色的平均  $\Delta(u', v')$  值, 其中  $0.0040\Delta(u', v')$  约为 1 个单位的恰可察觉色差  $\Delta E_{ab}^*$ <sup>[17]</sup>。

由图 4 可知, 2.9° 小视角与其他视角的计算结果差别较大。CIE 1931 2° CMFs 和 CIE 2006 1° CMFs 对 2.9° 小视角的计算精度高于 4° 以上 (5.7°、8.6° 和 11.0°) 视角的实验精度。在 2.9° 小视角情况下, CIE 2006 2° CMFs 的计算性能较好, CIE 2006 10° CMFs 的计算性能最差。在大于 4° (5.7°、8.6° 和 11.0°) 视角的情况下, 均为 CIE 2006 3° CMFs 的计算性能最佳, CIE 1931 2° CMFs 的计算性能最差。随着 CIE 2006

CMFs 中计算视角参数的增加 (>3°), 颜色匹配精度逐渐变差, 这与 CIE 推荐的计算条件并不相符。进一步地, 将上述 12 个 CIE CMFs 计算不同颜色刺激的结果列于表 3 中, 计算最大的  $\Delta(u', v')$  值以灰色文本框填充, 最小的  $\Delta(u', v')$  值加粗表示。

在表 3 中, CIE 1931 2° CMFs 计算白色和红色的性能较差, CIE 2006 10° CMFs 在 4 个观察视角下计算蓝色的性能最差。在不同观察视角下, 除大视角下的红色刺激和小视角下的蓝色刺激外, 均为 CIE 2006 2°、CIE 2006 3° 和 CIE 2006 4° CMFs 的计算性能较好。对于白色, 小视角 (2.9°) 时 CIE 2006 2° CMFs 的计算性能较好, 大于 4° 视角 (5.7°、8.6° 和 11.0°) 时均为 CIE 2006 3° 和 CIE 2006 4° CMFs 的计算性能最佳。对于红色, 随着观察视角的增大, CIE 2006 CMFs 中代入不同视角参数计算的差异变化不大, 表现最佳的 CIE 2006 CMFs 的视角计算参数与实验观察视角较为一致。例如, 当观察视角为 2.9°、5.7°、8.6° 和 11.0° 时, 依次为 CIE 2006 3°、CIE 2006 5°、CIE 2006 6° 和 CIE

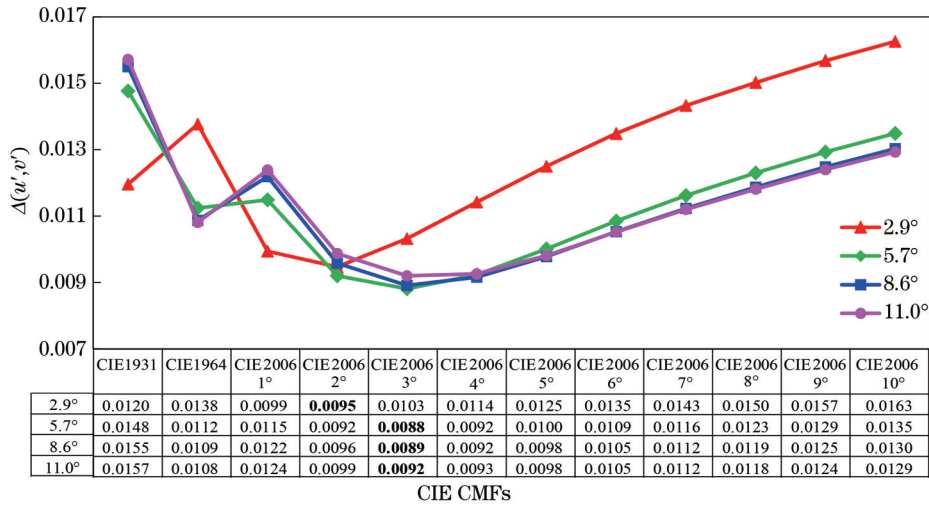


图 4 CIE CMFs 计算观察者在不同视角下的匹配颜色精度

Fig. 4 Accuracies of color matching by the all the observers using CIE CMFs in different field of views

表 3 CIE CMFs 计算不同颜色刺激的匹配精度

Table 3 Matching accuracy of different color stimuli calculated by CIE CMFs

Color	FOV / (°)	CIE 1931	CIE 1964	CIE 2006 1° (21)	CIE 2006 2° (21)	CIE 2006 3° (21)	CIE 2006 4° (21)	CIE 2006 5° (21)	CIE 2006 6° (21)	CIE 2006 7° (21)	CIE 2006 8° (21)	CIE 2006 9° (21)	CIE 2006 10° (21)
White	2.9	0.0096	0.0094	0.0073	<b>0.0063</b>	0.0066	0.0072	0.0080	0.0087	0.0093	0.0098	0.0103	0.0107
	5.7	0.0116	0.0077	0.0088	0.0065	<b>0.0057</b>	0.0058	0.0061	0.0066	0.0071	0.0076	0.0081	0.0085
	8.6	0.0118	0.0072	0.0090	0.0067	0.0059	<b>0.0057</b>	0.0058	0.0062	0.0065	0.0070	0.0074	0.0078
	11.0	0.0122	0.0072	0.0093	0.0071	0.0062	<b>0.0059</b>	0.0059	0.0062	0.0066	0.0070	0.0074	0.0078
Red	2.9	0.0098	0.0086	0.0094	0.0077	<b>0.0075</b>	0.0077	0.0079	0.0083	0.0085	0.0089	0.0091	0.0093
	5.7	0.0124	0.0082	0.0118	0.0092	0.0084	0.0081	<b>0.0080</b>	0.0080	0.0081	0.0083	0.0084	0.0085
	8.6	0.0122	0.0077	0.0116	0.0090	0.0081	0.0077	0.0076	<b>0.0076</b>	0.0076	0.0078	0.0079	0.0080
	11.0	0.0126	0.0077	0.0119	0.0094	0.0084	0.0080	0.0077	0.0076	<b>0.0076</b>	0.0077	0.0077	0.0078
Blue	2.9	0.0165	0.0233	<b>0.0132</b>	0.0145	0.0168	0.0193	0.0216	0.0235	0.0252	0.0264	0.0277	0.0288
	5.7	0.0203	0.0179	0.0139	<b>0.0119</b>	0.0123	0.0138	0.0159	0.0179	0.0196	0.0210	0.0223	0.0235
	8.6	0.0226	0.0177	0.0160	0.0130	<b>0.0127</b>	0.0140	0.0159	0.0178	0.0195	0.0209	0.0222	0.0234
	11.0	0.0224	0.0176	0.0160	0.0132	<b>0.0130</b>	0.0139	0.0158	0.0177	0.0194	0.0207	0.0221	0.0232

2006 7° CMFs 表现最好, CIE 2006 CMFs 的视角计算参数在 7° 时基本达到最佳。由图 3(b) 的比较发现, CIE 1964 10° CMFs 的光谱响应介于 CIE 2006 6° 和 CIE 2006 7° CMFs 之间, 说明大视角时 CIE 1964 10° CMFs 可用来进行红色的颜色匹配计算, 这与课题组前期研究<sup>[11]</sup>中 CIE 1964 10° CMFs 计算红色的性能较好的结论一致, 同时也与 CIE 推荐的初衷一致。对于蓝色刺激, 小视角 (2.9°) 观察时 CIE 2006 1° CMFs 的计算性能较好, 大视角 (5.7°、8.6° 和 11.0°) 时 CIE 2006 2° 和 CIE 2006 3° CMFs 的计算性能最佳。

在人眼视网膜 2°~4° 的中央凹黄斑区, 集中了大量的感红、感绿和感蓝锥体细胞, 且以感红锥细胞居多, 三种锥细胞的比例约为 6:3:1。以中央凹为中点 (136.9±4.2) μm 范围内无感蓝细胞分布, 感蓝细胞在

200~300 μm 处密度达峰值, 随着视角的变化, 会有感蓝锥细胞和部分杆体细胞的参与<sup>[18]</sup>。基于此, 在 CIE 2006 CMFs 中随着计算视角参数的增加,  $\bar{x}(\lambda)$  和  $\bar{y}(\lambda)$  通道的峰值波长位置均向短波方向偏移,  $\bar{z}(\lambda)$  通道的峰值波长光谱响应逐渐增加。结合图 4 中的计算结果, 发现 CIE 2006 2° 和 CIE 2006 3° CMFs 有较好的计算表现, 在某种程度上表明现有 CIE 2006 的 10° 视角中的蓝通道高估了人眼对感蓝锥细胞的光谱响应, 这种高估也对白色刺激的计算性能产生了一定的影响。

### 3.2.3 对 CIE 2006 CMFs 不同视角计算性能的应用建议

利用课题组前期研究<sup>[11]</sup>中采集的目标色和匹配色光谱, 基于年轻观察者的平均年龄 22 岁, 代入 CIE 2006 (1°~10°) CMFs 计算目标色和匹配色间的

$\Delta(u', v')$  值, 结果如表 4 中的 Mean(6) 所示, 其为 6 个颜色刺激的计算平均值。在表 4 中, 加粗字体表示 10 个 CMFs 中计算性能最佳者, L1 与目标色的 RGB 原色组

合相同, L2~L7 组合中括号中的字母代表相较于 L1 的 R、G、B 通道改变。

表 4 CIE 2006 CMFs 不同视角参数的计算性能检验  
Table 4 Performance of CIE 2006 CMFs using different FOVs

CMFs	L1	L2 (R)	L3 (G)	L4 (B)	L5 (G+B)	L6 (R+B)	L7 (R+G)	Mean (6)	Mean (3)
CIE 2006 1° (22)	0.0044	0.0085	0.0111	0.0083	0.0151	0.0129	0.0179	0.0112	0.0094
CIE 2006 2° (22)	<b>0.0042</b>	0.0062	0.0075	0.0065	0.0099	0.0084	0.0101	0.0075	0.0067
CIE 2006 3° (22)	0.0042	0.0054	0.0061	<b>0.0058</b>	<b>0.0080</b>	0.0070	0.0076	0.0063	0.0057
CIE 2006 4° (22)	0.0042	0.0051	<b>0.0060</b>	0.0059	0.0080	<b>0.0070</b>	<b>0.0073</b>	<b>0.0062</b>	<b>0.0056</b>
CIE 2006 5° (22)	0.0042	0.0050	0.0064	0.0064	0.0090	0.0075	0.0079	0.0066	0.0059
CIE 2006 6° (22)	0.0043	0.0049	0.0071	0.0072	0.0104	0.0083	0.0086	0.0073	0.0064
CIE 2006 7° (22)	0.0043	0.0049	0.0079	0.0079	0.0118	0.0090	0.0093	0.0079	0.0069
CIE 2006 8° (22)	0.0043	0.0049	0.0086	0.0086	0.0132	0.0097	0.0100	0.0085	0.0074
CIE 2006 9° (22)	0.0043	0.0049	0.0093	0.0093	0.0145	0.0104	0.0106	0.0090	0.0078
CIE 2006 10° (22)	0.0043	<b>0.0049</b>	0.0099	0.0099	0.0156	0.0110	0.0112	0.0095	0.0082

从表 4 可以发现: 对于 L1 同谱组合, 10 个 CMFs 的计算结果较为一致; 对于 L2 组合 (改变 R 通道), 当计算视角由 5° 变化至 10° 时, CIE 2006 CMFs 均有较好的计算性能; 对于 L3~L7 组合, CIE 2006 CMFs 代入小视角计算时, 对由 G (或 B) 单通道和双通道改变的组合均为 CIE 2006 3° 和 CIE 2006 4° CMFs 的计算性能最佳。总体而言: CIE 2006 1° CMFs 的计算性能最差; 随着计算视角的增加, CMFs 的计算性能逐渐得到改善, 变化至 3° 和 4° 时为最佳; 随后又开始变差, CIE 2006 10° CMFs 计算性能最差 (仅次于 CIE 2006 1° CMFs)。

进一步地, 比较仅有 3 个颜色 (红色、蓝色和白色) 参与计算的结果和表 4 中由 6 个颜色计算得到结果间的差异性, 结果如表 4 的最后一列 Mean(3) 所示。可以发现, 对于 CIE 2006 (1°~10°) CMFs, 3 个颜色刺激与 6 个颜色刺激的计算规律一致。结合本次实验的研究结果并综合考虑 CIE 2006 CMFs 的表现推荐: 当观察视角小于 4° 时, 使用 CIE 2006 2° CMFs; 当观察视角大于 4° 时, 选用 CIE 2006 3° CMFs 进行颜色刺激的色度值和色差计算, 其对大视角颜色刺激的计算性能优于 CIE 推荐的 CIE 2006 10° CMFs。

### 3.3 不同视角下的色度值分布

使用上述计算性能较好的 CIE 2006 3° CMFs 和 CIE 推荐的大视角下的 CIE 2006 10° CMFs 计算目标色的  $u'v'$  值, 以及所有观察者在不同视角下匹配白色刺激、红色刺激、蓝色刺激的  $u'v'$  值的平均值, 研究观察者在不同视角下匹配颜色在  $u'v'$  色品图上的分布特点, 如图 5 所示。图 5 中的虚线框为放大的目标色和匹配色的散点分布, 以方便观察不同视角下的颜色分布变化规律。

在图 5(a) 中, 随着观察视角由 11.0° 减小到 2.9°, 观察

者匹配的颜色逐渐偏向  $u'v'$  色品图的左方 (对于白色和红色刺激) 或左上方 (对于蓝色刺激)。该结果表明, 在 2.9° 小视角下, 观察者匹配颜色较大视角偏“黄绿”色, 主要是观察者在小视角时感知到的颜色较大视角下偏品红色, 从而匹配颜色时, 需要抵扣这部分品红色, 则小视角下匹配的颜色较大视角偏黄绿色。这与郭春丽等<sup>[19]</sup>使用了 4 台不同原色光谱的专业级显示器分别在 2°、4°、10° 和 22° 视角下开展的颜色匹配实验的结果较为一致, 其研究表明, 随着观察视角的增加, 观察者匹配的红、黄、蓝、灰色度值在  $a^*b^*$  色品图中向右下方偏移 (偏“红蓝”色)。Wu 等<sup>[8, 13]</sup>在 4.77° 和 20.2° 视角下以 OLED 显示器为目标设备、LCD 显示器为匹配设备进行颜色匹配时均发现, 与目标色相比, 代入 CIE 1931 2° CMFs 计算的匹配色较 CIE 1964 10° CMFs 计算的匹配色的  $u'v'$  值在  $u'v'$  色品图中向左上方偏移 (颜色偏“黄绿”色), 表明 CIE 推荐的小视角 CMFs 计算结果与本次实验小视角下的实验结果一致。

在本次研究中, 相较于目标色, 图 5(c) 中 L4 组合下的匹配色偏移大于图 5(b) 中 L2 组合下的结果, L4 组合的 2.9° 小视角 (<4°) 下匹配结果较大视角 (>4°) 下的结果偏移明显。该结果表明, 以 4° 为临界, 有较多感蓝锥细胞参与感光感色, 使得人眼对颜色感知产生了较大的偏移, 在  $u'v'$  色品图中偏向右下方的“蓝色”, 这种现象在匹配设备相较目标设备蓝通道偏移时最为明显。

### 3.4 观察者差异椭圆

为评价参与实验的观察者在不同视角下匹配颜色的差异性 (即观察者同色异谱), 同时检验不同 CIE CMFs 的计算表现, 分别用 CIE 1931 2° CMFs、CIE 1964 10° CMFs、CIE 2006 (1°~10°) CMFs 计算目标

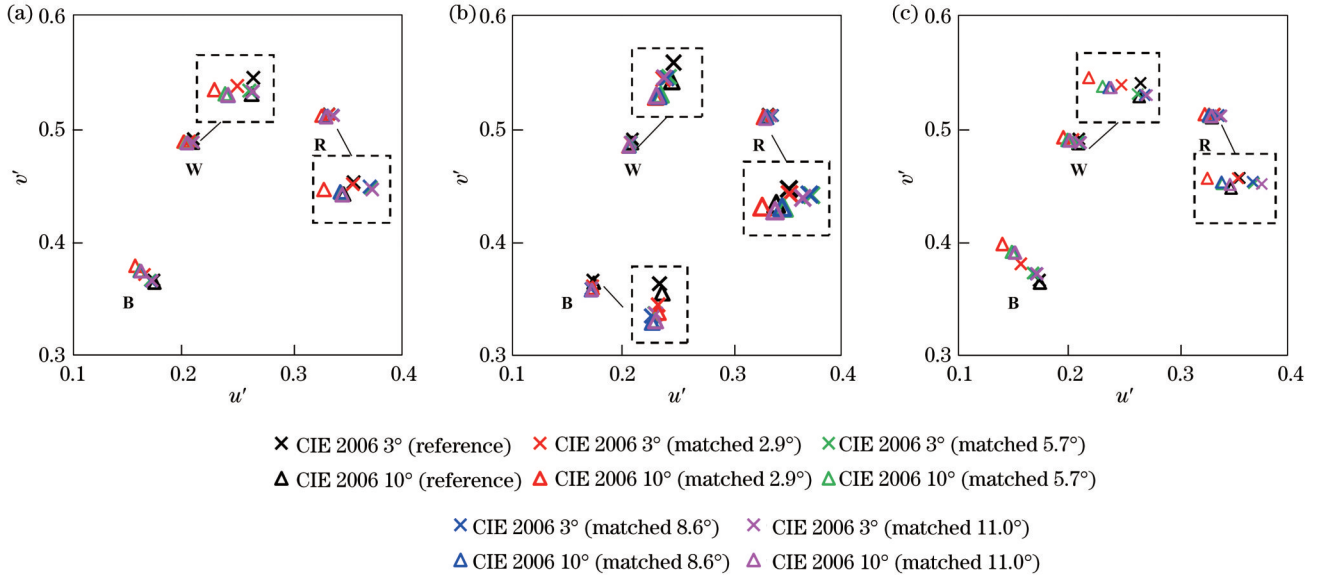


图 5 CIE 2006 3°和CIE 2006 10° CMFs计算的目标色与匹配色的  $u'$  和  $v'$  色度值。(a) 平均值; (b) L2; (c) L4

Fig. 5 Target and matched  $u'$  and  $v'$  chromaticity values calculated by CIE 2006 3° and CIE 2006 10° CMFs. (a) Mean; (b) L2; (c) L4

色和观察者在不同视角下匹配颜色的  $u'$  值和  $v'$  值, 以观察者匹配颜色的  $u'$  值和  $v'$  值协方差逆矩阵参数, 构

建观察者差异椭圆<sup>[8-9, 12]</sup>进行观察者匹配颜色差异的评价, 结果如图 6 所示。

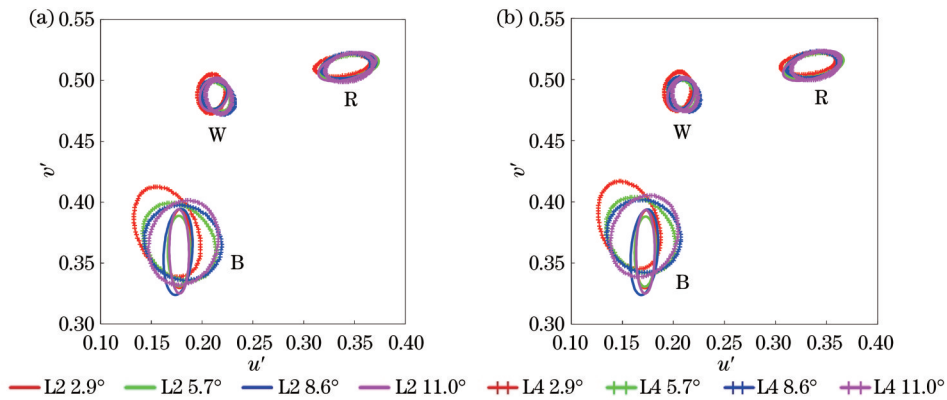


图 6 基于 CIE 2006 CMFs 拟合的观察者差异椭圆。(a) CIE 2006 2°; (b) CIE 2006 3°

Fig. 6 Observer variability ellipses from CIE 2006 CMFs. (a) CIE 2006 2°; (b) CIE 2006 3°

由于使用不同 CIE CMFs 拟合的观察者差异椭圆分布规律较为一致, 简化起见, 仅在图 6 中给出 3.2 节和 3.3 节中小视角 ( $<4^\circ$ ) 和大视角 ( $>4^\circ$ ) 下推荐使用的 CIE 2006 2° 和 CIE 2006 3° CMFs 的拟合结果。其中, 椭圆中心为所有观察者在每种组合下匹配颜色的  $u'/v'$  值平均值。

可以发现, 在 L4 组合下, 2.9° 小视角匹配蓝色, 与其他视角下匹配蓝色的观察者差异性不同。在 L2 组合进行颜色匹配时, 观察者同色异谱低于 L4 组合的计算结果。同时, 由图 6 可知, 除红色刺激的椭圆中心较为重合外, 其他颜色刺激, 特别是蓝色的椭圆中心随观察视角和原色组合的变化都有不同程度的偏移, 在 2.9° 小视角下的偏移最为明显。该现象说明, 观察者在 L2 和 L4 组合下仅对红色的匹配差异性较为一致, 受原色组合和观察视角的影响较小。以椭圆尺寸  $S =$

$\sqrt{\pi AB}$  表示观察者匹配同一颜色的差异 ( $A$  和  $B$  分别为椭圆的长半轴和短半轴长度), 将不同视角下的观察者差异椭圆尺寸  $S$  取平均值以研究 CIE CMFs 计算观察者同色异谱的性能, 如图 7 所示。

可以发现, 小视角 ( $<4^\circ$ ) 下的观察者差异性小于大视角 ( $>4^\circ$ ) 下的观察者差异性, 说明不同色觉正常观察之间的视网膜上的感蓝锥细胞分布和光谱响应差异较大, 大于感红和感绿锥细胞引起的观察者差异。以 CIE 2006 CMFs 进行计算评价, 随着计算视角的增大, 观察者差异椭圆尺寸逐渐减小, CIE 2006 3° 和 CIE 2006 4° CMFs 计算结果小于 CIE 2006 2° CMFs。该结果表明, 现有 CIE 2006 CMFs 的计算模型在视角参数增大后 (考虑到感蓝锥细胞的光谱响应作用), 计算得到的不同观察者之间的差异性减小。对图 6 中观察者匹配不同颜色刺激 (白色、红色和蓝

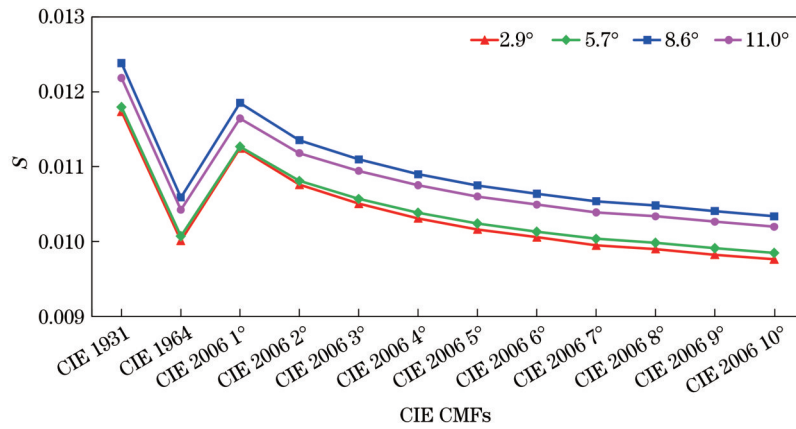


图 7 CIE 推荐 CMFs 计算得到的不同观察视角下的观察者差异性

Fig. 7 Observer variability obtained by using different CIE CMFs in different FOVs

色)的观察者差异椭圆进行椭圆尺寸 S 的计算,结果如图 8 所示。

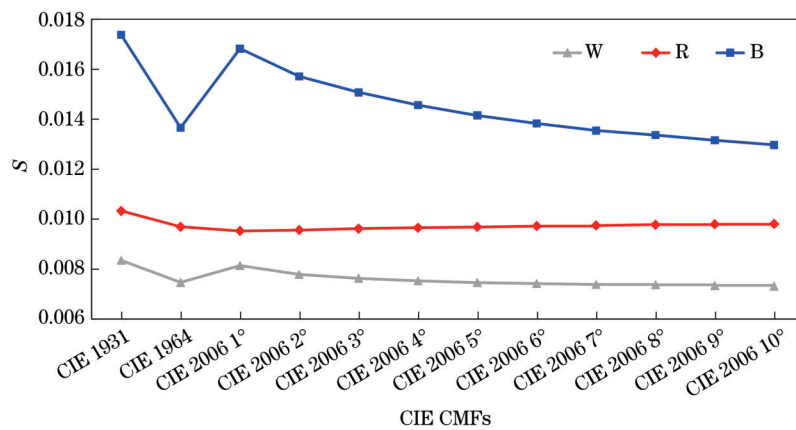


图 8 不同 CIE CMFs 计算得到的不同颜色刺激的观察者差异性

Fig. 8 Observer variability obtained by using different CIE CMFs in different color stimuli

可以发现,观察者匹配不同颜色刺激的差异性(观察者同色异谱),由小到大依次为白色、红色、蓝色。该结果表明,不同色觉正常观察之间的视网膜上的感蓝锥细胞分布和光谱响应差异较大,故匹配蓝色时出现了较大的差异。在 CIE 2006 CMFs 中代入不同视角参数计算观察者匹配红色的差异不大,匹配白色和蓝色时均为随着 CIE 2006 CMFs 中代入的计算视角参数的增大,观察者差异在逐渐减小,均为 CIE 2006 10° CMFs 的计算结果最小。然而,这种弱化是否真实代表了不同观察者之间的辨色差异,需要进一步探究。基于现代显示系统间的颜色传递和再现,观察者对蓝色的感知存在较大的差异。为避免不同观察者间的颜色分辨差异(即观察者同色异谱),应尽量避免两台显示系统的蓝通道有较大的偏移。两台显示系统为同谱组合,或仅有红通道的偏移,对观察者同色异谱的影响较小。

## 4 结 论

为检验 CIE 2006 CMFs 中视角参数的计算性能,

选用具有不同原色光谱组合的 LED 发光面板,组织观察者在 2.9°、5.7°、8.6°和 11.0° 4 个观察视角下开展白色、红色和蓝色的颜色匹配实验。所得结果如下:

1) 在不同观察视角下,除大视角下的红色刺激和小视角下的蓝色刺激外,均为 CIE 2006 2°、CIE 2006 3°和 CIE 2006 4° CMFs 的计算性能较好。对于红色刺激,随着观察视角的增大,CIE 2006 CMFs 中代入不同视角参数计算的差异变化不大,表现最佳的 CIE 2006 CMFs 的视角计算参数与实验观察视角较为一致。现有 CIE 2006 10° CMFs 在大视角下高估了感蓝锥细胞的光谱响应,其计算性能有待进一步优化和改进。

2) 在 2.9°小视角下,观察者感知到的颜色较大视角下的颜色偏“品红”色,且这种偏移对于 L4 组合(蓝通道改变)下匹配的蓝色最为明显。在颜色传递和再现过程,应尽量避免选取蓝通道改变的显示设备,其对蓝色刺激的再现精度影响很大。

3) 以观察者差异椭圆进行观察者在不同视角下的颜色匹配差异(即观察者同色异谱)评价,发现小视角



( $<4^\circ$ )下的观察者差异性小于大视角( $>4^\circ$ )下的差异性结果,观察者匹配不同颜色刺激间的差异性,由小到大依次为白色、红色、蓝色。该现象说明不同观察者之间的感蓝锥细胞分布和光谱响应强度具有较大差异性。

现有测试结果也表明,CIE 2006  $4^\circ$  CMFs与CIE 2006  $3^\circ$  CMFs在大视角下的计算性能很接近。本次研究的LED发光面板发光尺寸有限(仅为 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ ),今后需围绕不同呈色方式的显示设备,进一步增大观察视角来开展颜色匹配实验,进行CIE 2006 CMFs视角参数计算性能的检验,以适用于不同显示系统间的颜色刺激的校正和管理。

### 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] Guild J. The colorimetric properties of the spectrum[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 1931, 230: 149-187.
- [3] CIE. Colorimetry, 4th edition[EB/OL]. [2022-10-11]. <https://cie.co.at/publications/colorimetry-4th-edition>.
- [4] 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.
- [5] CIE. Fundamental chromaticity diagram with physiological axes-part I[EB/OL]. [2022-10-11]. <https://cie.co.at/publications/fundamental-chromaticity-diagram-physiological-axes-part-1>.
- [6] CIE. CIE 170-2: 2015 fundamental chromaticity diagram with physiological axes-part 2: spectral luminous efficiency functions and chromaticity diagrams[J]. Color Research & Application, 2016, 41(2): 216.
- [7] 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. Vienna: International Commission on Illumination, CIE, 2019: 1010-1018.
- [8] Wu J L, Wei M C, Fu Y, et al. Color mismatch and observer metamerism between conventional liquid crystal displays and organic light emitting diode displays[J]. Optics Express, 2021, 29(8): 12292-12306.
- [9] 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.
- [10] Shi K Y, Luo M R. Factors affecting colour matching between displays[J]. Optics Express, 2022, 30(15): 26841-26855.
- [11] Huang M, Li Y, Wang Y, et al. Effect of primary peak wavelength on color matching and color matching function performance[J]. Optics Express, 2021, 29(24): 40447-40461.
- [12] Li J Y, Hanselaer P, Smet K A G. Impact of color-matching primaries on observer matching: part I accuracy[J]. LEUKOS, 2022, 18(2): 104-126.
- [13] Wu J L, Wei M C. Color mismatch and observer metamerism between conventional liquid crystal displays and organic light emitting diode displays, part II: adjacent stimuli with a larger field of view[J]. Optics Express, 2021, 29(25): 41731-41744.
- [14] 黄敏, 王宇, 李钰, 等. 用LED原色的同色异谱样本检验不同颜色匹配函数的表现[J]. 光学学报, 2021, 41(16): 1633001. Huang M, Wang Y, Li Y, et al. Performances of different color matching functions examined by metamerism samples of LED primary colors[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(16): 1633001.
- [15] 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. 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.
- [16] Asano Y, Fairchild M, Blondé L. Observer variability experiment using a four-primary display and its relationship with physiological factors[C]//21st Color and Imaging Conference, CIC 2013, November 4-8, 2013, Albuquerque, New Mexico, USA. London: Society for Imaging Science and Technology, 2013: 171-176.
- [17] CIE, CIE TN001. Chromaticity difference specification for light sources[R]. Commission Internationale de l'Éclairage, Vienna, Austria, 2014.
- [18] 冯琛莉. 人视网膜视锥细胞数量及在黄斑部分布的研究[D]. 上海: 复旦大学, 2007. Feng C L. Study on the number of cone cells in human retina and their distribution in macula[D]. Shanghai: Fudan University, 2007.
- [19] 郭春丽, 黄敏, 习永惠, 等. 不同原色光谱和观察视场对颜色感知的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(12): 3765-3771. Guo C L, Huang M, Xi Y H, et al. Influences of different viewing fields on color perceptions using the displays with different primary colors[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(12): 3765-3771.

## Performance of CIE 2006 Color Matching Functions in Different Fields of View

Wang Yu, Huang Min\*, Li Yu, Gao Xinyuan, Shen Yuetong, Liang Jiong

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

### Abstract

**Objective** Color matching functions (CMFs) play a critical role in color science and management. Accurate colorimetry starts with accurate CMFs. Due to changes in the cone pigment optical densities and macular pigment at different retinal locations, different CMFs are required for different fields of view (FOVs). Currently, the CIE 1931  $2^\circ$  CMFs are

recommended for a FOV between  $1^\circ$  and  $4^\circ$ , while the CIE 1964  $10^\circ$  CMFs are recommended for a FOV beyond  $4^\circ$ . In 2006, the committee derived a model to estimate the cone fundamentals for normal observers with a FOV ranging from  $1^\circ$  to  $10^\circ$ . With the development of wide color gamut displays and display devices for different application scenarios, several recent studies have disclosed that the field size can have a large impact on CMFs, and hence the colorimetric values are derived from them. It is worth systematically investigating the accuracy and performance of the CMFs recommended by International Commission on illumination (CIE) concerning the parameter of FOVs.

**Methods** In this study, a series of color matching experiments using spectrally narrowband primaries are performed. Firstly, we select LED panels with red, green, and blue colors of 636 nm, 524 nm, and 448 nm as the target set (named L1 set), and the peak wavelengths of these three primaries are generally similar to those used in Stiles and Burch (*i. e.*, 645.2, 526.3, and 444.4 nm), with wavelength shifts of below 10 nm, which are found to introduce a small degree of observer metamerism. Meanwhile, the L2 (676 nm-524 nm-448 nm) and L4 (636 nm-524 nm-472 nm) are selected as the matched primary sets. Then, three colors including red and blue from the five colors recommended by CIE and white are randomly presented with the L1 target set. After that, forty-five color normal observers are organized to carry out the color matching experiments in four FOVs ( $2.9^\circ$ ,  $5.7^\circ$ ,  $8.6^\circ$ , and  $11.0^\circ$ ). Finally, the spectral power distributions (SPDs) of the target and the matched colors are measured immediately.

**Results and Discussions** The SPDs of the target and the matched colors are measured and calculated by CMFs recommended by CIE, including CIE 1931  $2^\circ$ , CIE 1964  $10^\circ$ , and CIE 2006 ( $1^\circ$ - $10^\circ$ ) CMFs with the indices of color matching accuracy and inter-observer variability ellipses. The  $\Delta(u', v')$  values are used to test the color matching accuracies, and the results indicate that the CIE 2006  $2^\circ$  CMFs have the best performance in small FOV (below  $4^\circ$ ), and the CIE 2006  $3^\circ$  CMFs has the best performance in large FOV (beyond  $4^\circ$ ) (Fig. 3). In addition, the chromaticity differences  $\Delta(u', v')$  with different CIE CMFs between the average chromaticity of three stimuli adjusted by the observers in the four FOVs using the L2 and L4 sets are compared (Table 4). The CIE 1931  $2^\circ$  CMFs have the worst performance in white and red stimuli, while CIE 2006  $10^\circ$  CMFs perform the worst in the blue stimulus in the four FOVs. On the whole, the CIE 2006  $2^\circ$ , CIE 2006  $3^\circ$ , and CIE 2006  $4^\circ$  CMFs have the best performances except for the red stimulus in large FOVs and the blue stimulus in small FOV. The 95% confidence ellipses of the chromaticity adjusted by the observers, which are calculated by using different CMFs, are used to express the observer metamerism (Fig. 5). The observer metamerism in small FOV (below  $4^\circ$ ) is smaller than that in large FOV (beyond  $4^\circ$ ), and the smallest observer metamerism occurs in the white stimulus, followed by the red stimulus, and the blue stimulus has the largest observer metamerism.

**Conclusions** This article reports the results of a series of color matching experiments by using narrowband LED primaries under  $2.9^\circ$ ,  $5.7^\circ$ ,  $8.6^\circ$ , and  $11.0^\circ$  FOVs conditions. In terms of color matching accuracy, the results indicate that in small FOVs, the 2006  $2^\circ$  standard observer CMFs recommended by CIE for small field sizes (below  $4^\circ$ ) is confirmed. The results also indicate that among the CIE standard CMFs, the CIE 2006  $3^\circ$  CMFs have a higher predictive performance than the CIE 2006  $10^\circ$  CMFs and CIE 1964  $10^\circ$  CMFs for the field size beyond  $4^\circ$ , which will not support the CIE's recommendation. The CIE 2006  $10^\circ$  CMFs have overestimated the blue cone response in large FOV, which is needed to be improved. In FOV of  $2.9^\circ$ , the color perception tends to be magenta compared with colors matched in large FOV, especially the blue stimulus in the L4 (with the shift of blue primary) primary set. In terms of observer metamerism, a discrepancy of blue cone distribution in retinal occurs among different observers, which will lead to the largest observer metamerism in the blue stimulus, as well as in small FOV (below  $4^\circ$ ). With fewer blue cones, the observer metamerism will be smaller than that in large FOV (beyond  $4^\circ$ ). The parameters of FOV in CIE 2006 CMFs are needed to be improved and modified when the colors in different displays in the larger FOV are calculated and calibrated.

**Key words** visual optics; visual color; color matching experiment; field of view; CIE 2006 color matching functions