

不同原色光谱和观察视场对颜色感知的影响

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 为研究不同原色光谱和观察视场对观察者颜色感知的影响, 利用三组不同原色光谱的显示设备, 组织了18~23名年龄分布在19~25岁的正常色觉观察者, 对CIE推荐的5个颜色分别在2°, 4°, 10°, 22°的不同观察视场开展颜色匹配实验。基于采集到的1260组颜色匹配光谱数据, 分别代入CIE1931, CIE1964和CIE2006颜色匹配函数计算目标色和匹配色的色度值, 用CIEDE2000色差值评价各颜色匹配函数的表现。在 a^*b^* 和 $L^*C_{ab}^*$ 色度平面, 绘制不同观察视场下观察者基于不同显示设备匹配颜色的散点图, 发现CIE1931的计算结果与CIE1964, CIE2006的结果有较大的差别, 特别是在红色和绿色区域。同时, CIE2006颜色匹配函数计算目标色与匹配色间的色差最小, 其在大视场(2°和4°)和小视场(22°)的表现明显优于CIE1931和CIE1964; 在10°视场, CIE1964的表现较好。进一步地, 用CIE2006颜色匹配函数进行数据分析, 发现随着观察视场的增加, 观察者匹配的红、黄、蓝、灰色色度值, 均向 a^*-b^* 图的右下方偏移, 蓝色区域的匹配散点较为集中; 红色和蓝色彩度升高、黄色彩度降低, 绿色在大视场(10°和22°)较小视场(2°和4°)彩度升高; 明度变化不大。匹配设备较目标设备的原色光谱形状、光谱带宽和峰值波长位移等变化及颜色匹配的结果均有一定程度的影响。用CIE DE2000色差值计算不同设备间匹配颜色的精度, 发现目标设备和匹配设备的原色光谱峰值波长位移对颜色匹配结果的影响较为明显, 影响程度依次为蓝通道>绿通道>红通道。论文研究结果可为现有CIE颜色匹配函数的不同视场角使用提供数据和理论支撑, 也可为颜色传递、复制过程中弱化或强化观察者同色异谱现象提供指导建议。

关键词 原色光谱; 观察视场; 颜色匹配实验; 颜色匹配函数

中图分类号: TN41 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)12-3765-07

引言

人眼色觉系统的锥细胞光谱响应是由眼睛的晶状体色素、黄斑色素以及视细胞感光色素等要素共同决定, 它们对不同波长光刺激有着不同的光谱响应能力^[1-2], 共同作用形成了一组锥细胞响应函数(即颜色匹配函数, color matching functions, CMFs)。目前对观察者颜色匹配函数的相关研究主要集中在观察者年龄和观察视场的改变。研究表明, 晶状体色素光谱响应主要是由于年龄增长引起的, 而黄斑色素以及视细胞感光色素光谱响应主要与视场的变化有关; 同时, 中央凹黄斑区外的杆体细胞对颜色感知也有一定的贡献^[3]。现有CIE推荐的各颜色匹配函数(CIE1931, CIE1964和CIE2006 CMFs), 计算视场角不超过10°, 涵盖了不到0.5%的人眼视野范围, 而在自然环境下, 人眼可观测到的全视野

范围水平方向可达180°, 垂直方向可达130°^[4]。在观测大面积颜色样本观测时, 有必要研究大于10°观察视场情况下的颜色匹配函数表现。

Hu等^[4]测试了10名观察者在10°和102°×50°视场下的颜色匹配函数表现, 发现两种视场下的实验结果存在显著差异, 认为有必要提出针对大视场进行计算的颜色匹配函数。为研究样本尺寸对均匀色块颜色外貌的影响, Kutas等^[5-6]在等离子显示设备上显示大尺寸(85°×55°)色样, 组织观察者在CRT显示设备上匹配小尺寸(2°或10°)色样, 结果表明大尺寸色样更明亮, 样本的彩度和色调变化不大。Xiao等^[7]在室内墙面上分别涂上十二种不同的颜色(视场角大于50°), 组织了10名年龄在20~40岁的观察者分别通过在CRT显示器上调节和在标准观察箱中挑选NCS色卡开展色貌评估实验。结果表明, 随着观察视场的增大, 样本会呈现出更明亮和鲜艳的颜色外貌, 从而提出了表征颜色外貌随视场角变

收稿日期: 2019-11-03, 修订日期: 2020-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(61675029, 61308081)资助

作者简介: 郭春丽, 女, 1994年生, 北京印刷学院印刷与包装工程学院硕士研究生 e-mail: 942259445@qq.com

* 通讯联系人 e-mail: huangmin@bigc.edu.cn

化的计算方法。2017年, Wei^[8]等基于 Xiao 对色貌模型的研究结果, 结合 CIE CAM02 色貌模型提出了一种可以预测各种观察条件(包括颜色刺激的大小、照明水平等)下颜色外貌的计算模型。

上述研究主要是围绕颜色外貌随观察视场的变化开展, 但并未对计算颜色外貌的颜色匹配函数性能进行系统的比较

分析。同时, 前期研究也表明^[9-10], 同色异谱样本的光谱组成对颜色匹配的实验结果有一定的影响。为研究基于不同原色呈色方式、不同观察视场的颜色感知差异, 需要开展大量颜色匹配实验, 以收集观察者在不同观察视场下的颜色匹配数据, 从而进行不同原色光谱、观察视场变化对观察者颜色感知的影响分析。

表 1 显示设备的色度参数

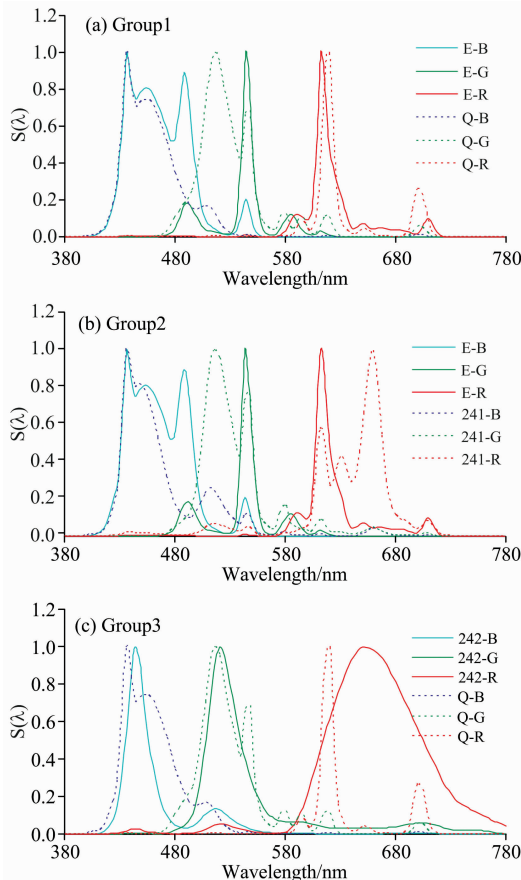
Table 1 Colorimetric values of different displays

Group	Displays	Illuminant/(cd · m ⁻²)	CCT/K	Tristimulus Values (white points)			
				X _n	Y _n	Z _n	
Group 1	Target No. 1	EIZO	110.5	6 309	92.78	100	100.44
	Matched No. 2	QUATO	110.6	6 188	94.42	100	105.6
Group 2	Target No. 1	EIZO	120.2	5 188	95.43	100	85.35
	Matched No. 3	NEC241	118.7	5 064	96.97	100	85.12
Group 3	Target No. 4	NEC242	121.3	5 111	97.41	100	85.18
	Matched No. 2	QUATO	119.4	5 001	96.41	100	84.33

1 实验部分

1.1 不同原色显示设备

实验共选择了 4 台专业级显示设备, 分别为 LCD 原色



光谱的显示器 EIZO-CG19 (CCFL 冷阴极荧光灯背光, TFT 面板)、QUATO-220ex 显示器 (LED 背光)、LED 原色光谱的 NEC-PA242W (AH-IPS 面板) 及 NEC-PA241W (CCFL 冷阴极荧光灯背光, IPS 面板) 显示器。将 4 台显示设备进行组合, 共组成了 3 组颜色匹配实验装置(包括目标设备和匹配设备), 如表 1 所示。图 1 为用光谱辐射度计 PhotoResearch655 (PR655) 采集到 3 组实验目标和匹配设备的原色光谱归一化能量分布曲线。

由图 1 可见, 测量得到的每一组目标和匹配设备的原色光谱形状、峰值波长位置和光谱带宽均有一定的差异, 表 2 为每组显示设备在红、绿、蓝原色光谱的峰值波长位置及匹配设备相对于目标设备的峰值波长位移, 其中正值代表匹配设备的峰值波长位置较目标设备向长波段偏移, 反之则为向短波段偏移。

表 2 不同显示设备红绿蓝通道的峰值波长位置 (nm)

Table 2 The peak wavelength positions of RGB channels for different displays (nm)

	Group 1		$\Delta\lambda$	Group 2		$\Delta\lambda$	Group 3		$\Delta\lambda$
	No. 1	No. 2		No. 1	No. 3		No. 4	No. 2	
R(λ)	612	620	8	612	660	48	652	620	-32
G(λ)	544	516	-28	544	516	-28	520	516	-4
B(λ)	436	436	0	436	436	0	444	436	-8

1.2 颜色刺激

选用 CIE 推荐的 5 个颜色中心^[11] (灰、红、黄、绿、蓝) 为本实验的颜色刺激, 制作了不同大小的正方形开窗黑色挡板, 其明度 $Y_{10} = 4.72$ 。观察者到颜色刺激的观察距离为 50 cm, 通过改变样本尺寸以实现观察视场的改变。颜色刺激在不同显示设备上呈现, 其各边缘和中心颜色的 CIELAB 色差值不超过 1.2, 以保证在不同视场的实验过程中, 颜色均具有较好的均匀性。不同观察视场 (2°, 4°, 10°, 22°) 对应的样本边长分别为 1.74, 3.50, 8.54 和 19.44 cm。

图 1 三组颜色匹配实验目标和匹配设备的原色光谱曲线分布
Fig. 1 The spectral power distributions of the target and matched displays three groups in the experiments

1.3 观察者

组织了 63 名(19 男, 44 女)18~25 岁的观察者平均年龄 20 岁, 其中 18 人(2 男, 16 女)、23 人(10 男, 13 女)、22 人(7 男, 15 女)基于 Group1, Group2 和 Group3 进行了实验。所有观察者均为北京印刷学院印刷工程专业的学生, 色觉正常且具有颜色科学的基础理论知识。基于三组实验四个视场角的 5 个颜色中心, 共采集到 1 260 组(=63 人×4 个视场×5 个色中心)实验数据。

1.4 颜色匹配实验

实验在暗室进行, 显示设备是唯一的发光源, 每次实验前, 所有显示设备均需预热 90 min。为保证观察者到每台显示设备的距离相同(约 50 cm), 观察者正坐于两台显示设备呈现颜色的中心位置。5 个颜色刺激随机在目标设备上显示, 用黑色挡板将匹配设备屏幕的其他部分遮盖, 只预留出色块与调节通道的位置。实验开始前, 观察者需进行 1 min 左右的色适应。正式实验时, 观察者需调节匹配设备上的 R, G 和 B 三通道使匹配色与目标色达到视觉上的匹配。对于每位观察者, 4 个观察视场中的一组(即固定样本尺寸的 5 个颜色中心)颜色随机呈现。观察者每次需完成一个视场下的一组颜色匹配, 然后由实验组织者用 PR655 实时采集目标设备和匹配设备上颜色刺激的光谱能量。

2 结果与讨论

2.1 观察者精度分析

前期研究表明^[9-10, 12], 不同光谱原色的显示色之间^[9]、不同光谱原色的反射色之间^[10]、反射色和自发光色间^[12]的光谱组成对目视实验的结果有一定的影响。为避免实验数据采集误差和观察者匹配误差等的影响, 同时考虑到数据初选的易操作性, 由实验组织者对采集的观察者配色光谱数据, 用 CIE1931 CMFs (2°及 4°视场)或 CIE1964 CMFs (10°及 22°视场)代入计算, 进行实验数据的初选。具体为: 计算目标色和匹配色的 CIELAB 色差, 如果色差值大于 10.0, 则需要观察者重新匹配; 如果第二次匹配颜色的 CIELAB 色差仍然大于 10.0, 则取观察者两次匹配的最小色差数据进行后续处理。完成实验数据的初选后, 需计算每位观察者匹配某一颜色与所有观察者匹配某一颜色平均值间的 CIE DE2000 色差^[13], 随后计算五个颜色的 CIE DE2000 色差平均值, 如表 3 所示。

表 3 三组实验不同视场下观察者匹配颜色的准确性
Table 3 The observer accuracies of three experimental groups with different field sizes

	Group 1			Group 2			Group 3		
	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean
2°	0.89	4.95	2.55	0.88	5.47	2.69	0.90	7.03	2.94
4°	0.87	5.49	2.50	0.48	6.16	2.47	0.94	5.77	3.10
10°	0.55	4.60	2.16	0.66	6.11	2.41	0.49	7.12	2.40
22°	0.52	4.17	1.71	0.47	6.04	2.44	1.18	6.25	3.19
Mean	0.71	4.80	2.23	0.62	5.95	2.50	0.88	6.54	2.91

由表 3 可见, 三组实验观察者的配色精度为 2.23, 2.50 和 2.91。Asano 等模拟计算^[14]观察者的匹配精度为 0.54~2.60, 说明三组实验数据是准确有效的。

2.2 颜色匹配色度值

考虑到眼睛的晶状体色素、黄斑色素和视细胞感光色素等的共同影响, CIE2006 CMFs 中以观察视场和观察者的年龄为变量, 由此可以得到不同的颜色匹配函数^[15]。图 2 为观察者年龄和视场变化得到的 $\bar{x}(\lambda)\bar{y}(\lambda)\bar{z}(\lambda)$ 各通道光谱响应。可见, 随着观察视场的增加, $\bar{x}(\lambda)\bar{y}(\lambda)\bar{z}(\lambda)$ 各通道, 特别是 $\bar{z}(\lambda)$ 通道的峰值波长处光谱响应有所上升; 随着观察者年龄的增长, CIE2006 CMFs 中 $\bar{x}(\lambda)\bar{y}(\lambda)\bar{z}(\lambda)$ 各通道峰值光谱响应均向长波段移动。

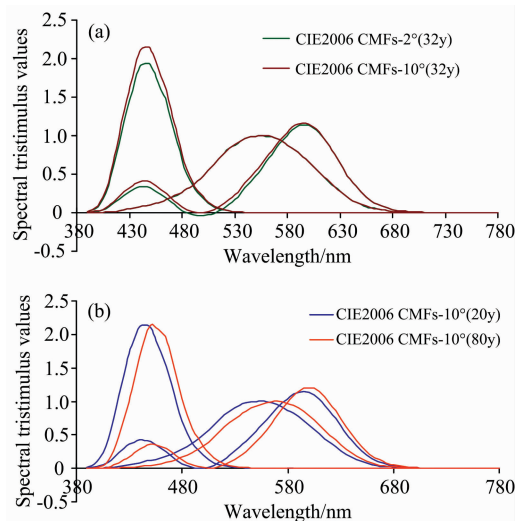


图 2 用不同观察视场和观察者年龄计算的 CIE2006 CMFs
Fig. 2 The CIE2006 CMFs for different viewing fields and ages

将实验采集到的观察者匹配颜色光谱数据, 分别用 CIE1931, CIE1964 和 CIE2006 CMFs(代入相应视场角和观察者的真实年龄)计算在不同匹配设备上得到的不同观察视场下颜色的 $L^* a^* b^*$ 色度值(考虑到 CIE2006 CMFs 的视场计算范围为 1°~10°, 因此 22°视场的计算以 10°代入), 将散点图绘制在图 3(其中黑色边框的点为计算不同匹配颜色的散点平均值)。

由图 3 可见, 三种颜色匹配函数计算灰色区域散点分布较为接近。其他颜色区域, CIE1964 和 CIE2006 CMFs 计算得到的观察者匹配颜色散点分布较为接近, 与 CIE1931 CMFs 的计算结果相差较大。各颜色匹配函数计算的明度差异不大, 使用 CIE1931 CMFs 计算的黄色和蓝色较 CIE1964、CIE2006 CMFs 沿逆时针方向偏移, 说明色调有所偏移; 红、绿、蓝色向远离中心非彩色点的方向偏移, 说明彩度增加。用三种颜色匹配函数计算每个视场下观察者匹配的 5 个颜色与目标色之间的 CIE DE2000 色差平均值, 统计色差最小值出现的次数, 如表 4 所示。

由表 4 可见, CIE1931 CMFs 的表现劣于其他颜色匹配函数, 特别是在 22°大视场; CIE1964 CMFs 在 10°视场优于

其他颜色匹配函数；CIE2006 CMFs 在 2° 和 4° 小视场、 22° 大视场的表现最优。进一步地，分别用 CIE1931, CIE1964, CIE2006 CMFs 计算 1260 组匹配色与目标色间的 CIE DE2000 色差平均值，分别为 3.60, 3.50 和 3.45。不同颜色匹配函数的计算结果差别不是很大，这与本次实验数据包含了不同观察视场的数据有关。总体上，CIE2006 CMFs 的表现性能优于 CIE1931 和 CIE1964 CMFs，故在以下的数据处理中以 CIE2006 CMFs 的计算结果进行统计分析。

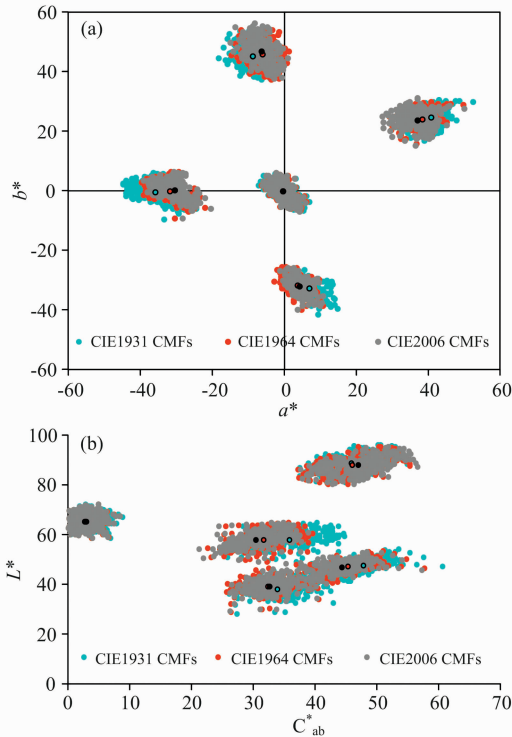


图 3 用三种颜色匹配函数计算的匹配色色度值分布

Fig. 3 The distributions of the matched colors of different field sizes with three CMFs

表 4 各 CMFs 计算不同视场颜色匹配色差最小值出现的次数

Table 4 The numbers of the minimum CIEDE2000 values occurred for different CMFs

Field Size/ $^\circ$	CIE1931 CMFs	CIE1964 CMFs	CIE2006 CMFs	In Total
2	11	13	39	63
4	15	16	32	63
10	13	30	20	63
22	6	23	34	63
In Total	45	82	125	252

2.3 观察视场的影响

为研究观察视场对观察者颜色感知的影响，将三组实验中不同视场下所有观察者匹配颜色的 $a^* b^*$ 和 $L^* C_{ab}^*$ 色度值平均值绘制在图 4 中。由图 4 的 $a^* - b^*$ 平面图可见，随着观察视场的增加，除绿色外，观察者匹配的红、黄、蓝、灰色色度值，均向 $a^* - b^*$ 图的右下方偏移，观察者在蓝色区域匹配颜色的散点较为集中；在 $L^* - C_{ab}^*$ 图上，随着视场的增加，除

黄色外，红色和蓝色彩度升高、绿色中心大视场 ($10^\circ, 22^\circ$) 较小视场 ($2^\circ, 4^\circ$) 彩度升高；匹配色的明度值随观察视场的增大变化不大。

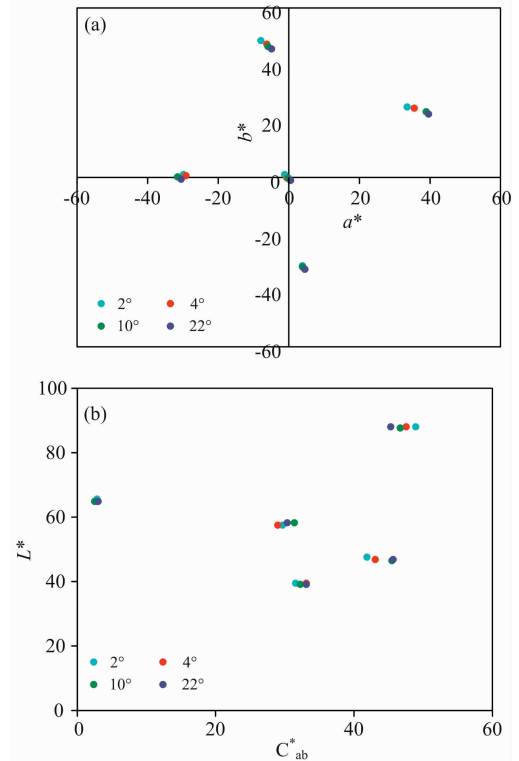


图 4 不同观察视场下观察者匹配的颜色色度平均值分布

Fig. 4 The distribution of the averaged matched colors of different field sizes from CIE2006 CMFs

2.4 显示设备的影响

为了研究基于不同原色匹配设备的观察视场变化对观察者颜色感知的影响，以 2° 视场数据作为参照，其他观察视场下匹配颜色的色度值分别与 2° 视场数据比较，线性拟合得到明度 L^* 、饱和度 C_{ab}^* 和色调角 h_{ab}^* 的系数，如表 5 所示。由于灰色中心的匹配颜色较离散地分布在 $(0, 0)$ 点周围，色调变化范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ ，色调角的拟合仅使用了红、黄、绿、蓝 4 个颜色的数据。

由表 5 可见，基于三组显示设备得到的实验结果具有不同的变化规律。第一组中，小视场下的颜色较大视场的颜色更明亮、彩度更高，颜色的色调整体沿顺时针方向偏移。第二组中，与 2° 视场比较，随着视场的增加，颜色的明度和彩度都有所下降，同时除 4° 视场外，颜色的色调角也向逆时针方向偏移。同样地，第三组的匹配色，随着观察视场的增加也有不同程度的变化。进一步地，计算基于三组显示设备，在不同观察视场下，观察者匹配颜色的色度值与目标色之间的 CIE DE2000 色差平均值。如图 5 所示。

图 5 表明，基于不同显示设备，在不同观察视场下匹配颜色的色差变化规律不同。整体来看，Group 3 在不同观察视场的颜色匹配色差值最大，Group 1 的色差值最小。

Group 2和 Group 3 在 10° 视场下的颜色匹配色差最小，而 Group 1 在 2° 视场时颜色匹配的色差最小。图 1 和表 2 所示，三组颜色匹配实验中，匹配设备和目标设备的 RGB 三原色

光谱曲线的形状、带宽和峰值波长位置均不相同。进一步分析原色光谱特性对颜色匹配结果的影响：

表 5 色度值线性拟合结果

Table 5 The linear fitting results of the colorimetric values

	Group 1			Group 2			Group 3		
	L*	C _{ab}	h _{ab}	L*	C _{ab}	h _{ab}	L*	C _{ab}	h _{ab}
4°	0.994 9	0.990 7	0.995 0	1.006 8	1.010 8	0.991 7	0.985 3	1.002 1	1.003 9
10°	0.995 6	0.958 3	0.999 6	1.001 0	1.036 3	1.004 7	0.984 8	1.051 1	1.012 4
22°	0.993 5	0.952 9	0.995 9	1.002 3	1.043 0	1.003 6	0.996 2	1.019 7	1.005 4

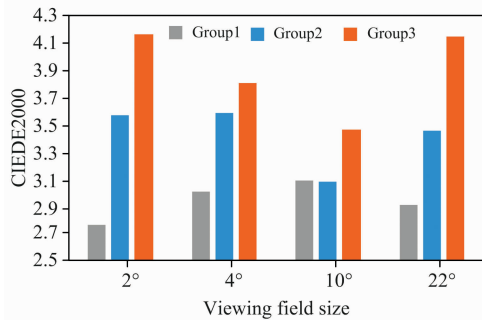


图 5 三组显示设备各视场下的色差值

Fig. 5 The CIEDE2000 values of the three experimental groups for different field sizes

(1)图 1(a)和(b)的 Group 1 和 Group 2 中，目标设备和匹配设备在 G、B 通道的光谱曲线分布相近，仅 R 通道有差异，表现为 Group 1 中的匹配设备和目标设备光谱形状和带宽较为接近，且峰值波长位移为 8 nm，小于 Group 2 中的 48 nm，说明 R 通道的峰值波长位移和光谱带宽对颜色匹配结果有一定的影响；

R 和 B 通道峰值波长位移均小于 Group3 中的比较结果 (Group1 在 R 通道的峰值波长位移为 8 nm，小于 Group3 中的一 32 nm)，仅在 G 通道，Group1 中的峰值波长位移 -28 nm 高于 Group3 中的一 4 nm，结果使得 Group1 的色差匹配结果小于 Group3，说明 G 通道对颜色匹配结果的影响低于 R 和 B 通道的共同作用；

(3)图 1(b)和(c)的 Group 2 和 Group3 中，Group2 中的 R 和 G 通道峰值波长位移均高于 Group3 中的比较结果，仅在 B 通道的峰值波长位移低于 Group3 中的一 8 nm。但 Group3 中的匹配色差最大，说明 B 通道的位移对颜色匹配结果的影响程度高于 R 和 G 通道的共同作用。

2.5 用色度椭圆表示观察者的差异

为进一步研究基于不同显示设备的观察视场变化引起的观察者颜色感知差异，分别取观察者匹配颜色 a* b* 值的协方差逆矩阵参数，构建观察者色度椭圆。将三组设备中的 4 个观察视场(2°, 4°, 10°, 22°)匹配颜色的色度值用于计算、绘制观察者色度椭圆，结果如图 6 所示。

色度椭圆的参数如表 6 所示，实验拟合的观察者色度椭圆尺寸 $S = \sqrt{\pi AB}$ (A 为椭圆长半轴，B 为椭圆短半轴)，表示参加实验观察者在三组实验中不同观察视场下的差异变化。

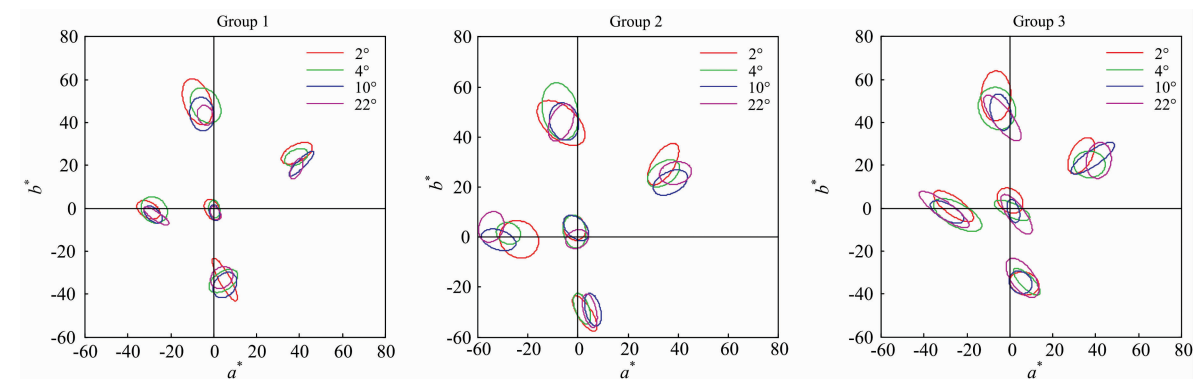


图 6 基于不同显示设备和不同观察视场的观察者差异椭圆(放大 3 倍绘制)

Fig. 6 The observers covariance ellipses based on different displays and field sizes (magnified 3 times)

由图 5 的色差计算结果和表 6 的拟合观察者差异椭圆结果可以发现，Group3 中计算五个颜色中心在不同观察视场的色度椭圆平均尺寸以及 CIE DE2000 均值都是最大，而

Group1 的计算数值最小，说明基于 Group3 的观察者间差异性最大，Group1 的观察者间差异性最小。随着观察视场的增加，对于 Group1 和 Group2，观察者差异椭圆的尺寸均有所

表 6 观察者差异椭圆的参数
Table 6 Parameters of the observers covariance ellipses

Field Size/(°)	Colors	Group 1				Group 2				Group 3			
		A	B	S	S _{Ave}	A	B	S	S _{Ave}	A	B	S	S _{Ave}
2	Gray	1.75	1.10	2.45		1.75	1.43	2.81		2.24	1.72	3.48	
	Red	2.61	1.31	3.28		3.15	1.44	3.77		3.09	1.65	4.00	
	Yellow	3.72	2.07	4.92		3.83	2.14	5.07		3.89	2.30	5.30	
	Green	1.95	1.21	2.73		2.69	2.39	4.49		3.67	1.34	3.94	
	Blue	3.77	0.85	3.17	3.31	2.69	0.96	2.84	3.80	2.30	1.75	3.55	4.05
4	Gray	1.43	0.86	1.96		2.22	1.50	3.24		2.99	1.08	3.18	
	Red	1.93	1.16	2.64		2.39	1.45	3.30		2.45	2.07	3.99	
	Yellow	2.94	2.11	4.41		3.86	2.32	5.31		3.36	2.80	5.43	
	Green	2.22	1.86	3.60		1.66	1.40	2.69		4.16	1.79	4.83	
	Blue	2.49	1.42	3.33	3.19	2.18	0.92	2.51	3.41	2.80	0.97	2.91	4.07
10	Gray	1.26	0.76	1.74		2.00	1.27	2.82		1.86	0.89	2.28	
	Red	2.66	0.64	2.32		2.44	1.43	3.31		3.98	1.18	3.84	
	Yellow	2.63	1.89	3.94		2.52	1.91	3.90		2.87	1.56	3.75	
	Green	1.65	0.97	2.24		2.37	1.30	3.11		2.88	1.22	3.33	
	Blue	2.17	1.62	3.33	2.71	2.23	1.01	2.66	3.16	1.93	1.62	3.13	3.27
22	Gray	1.16	0.70	1.59		1.55	1.20	2.42		3.72	1.31	3.92	
	Red	1.74	0.80	2.09		2.15	1.49	3.17		2.81	1.94	4.13	
	Yellow	1.57	1.18	2.42		2.63	1.48	3.50		4.35	1.47	4.48	
	Green	2.34	0.65	2.18		2.09	1.61	3.25		4.64	1.24	4.24	
	Blue	1.90	1.54	3.03	2.26	2.29	0.86	2.49	2.97	3.56	1.76	4.44	4.24
Ave			2.87				3.33				3.91		

下降,表明观察者间的颜色匹配结果在大视场更为一致。而对于 Group3 这样的规律并不存在,观察者之间在 10°视场时具有较小的变化。

由 Group 2 和 Group3 的比较结果可知,B通道的位移对颜色匹配结果的影响程度高于 R 和 G 通道的共同作用;Group 1 和 Group3 的比较结果可知,G 通道对颜色匹配结果的影响低于 R 和 B 通道的共同作用。结合前期基于不同显示设备的研究结果^[9],红通道的峰值波长位移对颜色匹配结果影响不大,G 通道对实验结果有较为明显的影响。可以推断,基于实验选取的 4 台显示设备,目标设备和匹配设备的原色光谱峰值波长位移对颜色匹配结果的影响程度大小依次为蓝通道>绿通道>红通道。下一步工作,准备固定目标设备,选用具有不同峰值波长的原色光谱设备进行观察者差异的影响,同时尽量使得不同匹配设备具有相近的光谱形状、光谱带宽和平滑的光谱曲线分布。

3 结论

为了研究基于不同原色光谱的显示设备呈现颜色样本的

大小(即观察视场)变化,对观察者颜色感知的影响,选择 CIE 推荐的 5 个颜色中心,在 4 个不同观察视场(2°, 4°, 10° 和 22°)下,组织观察者开展颜色匹配实验。基于采集到的 1260 组颜色匹配实验数据,用 CIE1931, CIE1964 和 CIE2006 颜色匹配函数进行计算,结果表明:

(1)CIE1964 在 10°视场的表现优于其他颜色匹配函数;CIE2006 在 2°、4°视场和 22°大视场的表现最优。综合所有视场下不同颜色匹配函数的计算结果,CIE2006 的表现性能优于 CIE1931 和 CIE1964。

(2)用 CIE2006 计算观察者的颜色匹配结果,发现随着观察视场的增加,观察者匹配的红、黄、蓝、灰色色度值,均向 a*-b* 图的右下方偏移;同时,红色和蓝色彩度升高、黄色彩度降低,绿色中心大视场(10°和 22°)较小视场(2°和 4°)彩度升高;同时随着观察视场的增大,匹配色的明度值变化不大。

(3)基于不同显示设备,在不同观察视场下匹配颜色的色差大小变化规律不同。基于实验选取的 4 台显示设备,目标设备和匹配设备的原色光谱峰值波长位移对颜色匹配结果的影响程度为蓝通道>绿通道>红通道。

References

- [1] Hunt R W G, Pointer M R. Measuring Colour. 4th ed. State of New Jersey: A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2011. 122.
- [2] Long D L, Fairchild M D. Journal of Imaging Science and Technology, 2014, 58(3): 030402.
- [3] Xiao K D, Luo M R, Li C J, et al. Color Res. Appl., 2010, 36(3): 201.

- [4] Hu X, Kevin W H. *Color Res. Appl.*, 2006, 31(1): 18.
- [5] Kutas G, Gocza K, Bodrogi P, et al. *Colour Size Effect*, AIC Colour 05—10th Congress of the International Color Association, 2005, 887.
- [6] Kutas G, Bodrogi P. *Color Res. Appl.*, 2008, 33(1): 45.
- [7] Xiao K D, Luo M R, Li C J, et al. *Color Res. Appl.*, 2010, 35(4): 284.
- [8] Wei S T, Luo M R, Xiao K D, et al. *Color Res. Appl.*, 2017, 42(3): 293.
- [9] HUANG Min, HE Rui-li, GUO Chun-li, et al(黄敏, 何瑞丽, 郭春丽, 等). *Acta Optica Sinica(光学学报)*, 2019, 39(1): 0133001.
- [10] HE Rui-li, HUANG Min, GUO Chun-li, et al(何瑞丽, 黄敏, 郭春丽, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2019, 39(8): 2454.
- [11] Robertson A R. *Color Res. Appl.*, 1978, 3: 149.
- [12] Li J, Hanselaer P, Smet K A G. *Pilot Study on Color Matching Accuracy Using Different Primaries*. *Proceedings of 29th CIE Session*, Washington D. C., 2019. 1010.
- [13] Luo M R, Cui G, Rigg B. *Color Research and Application*, 2001, 26(5): 340.
- [14] Asano Y, Fairchild M D, Blondé L, et al. *Color Res. Appl.*, 2016, 41(5): 530.
- [15] CIE (International Commission on Illumination). *Fundamental Chromaticity Diagram With Physiological Axes-Part 1*, CIE Technical Report, 2006, 170.

Influences of Different Viewing Fields on Color Perceptions Using the Displays With Different Primary Colors

GUO Chun-li, HUANG Min*, XI Yong-hui, PAN Jie

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

Abstract In order to investigate the influences of different primary colors and viewing fields on observers' color perceptions, three groups of color matching experiments were designed, and 18~23 observers aged from 19 to 25 were organized to carry out the visual experiments. The CIE recommended 5 colors and 4 different field sizes (2° , 4° , 10° , 22°) were used in the experiments, and 1 260 datasets were gathered. The CIE1931, CIE1964 and CIE2006 color matching functions (CMFs) were used to compute the colorimetric values of the target and matched colors, and then CIE DE2000 color difference values were used to test the performances of different CMFs. The distributions of the matched colors from different field sizes and different groups were plotted in a^*b^* and $L^*C_{ab}^*$ plane, it can be found that there are larger discrepancies in CIE1931 and CIE1964, as well as CIE2006, especially in red and green colors. The CIE DE2000 color difference values computed by CIE2006 CMFs are the smallest, and CIE2006 CMFs outperformed others in small field sizes (2° and 4°), large filed size (22°). In the filed size of 10° , CIE1964 have the best performance. CIE2006 CMFs was used in the following data analysis, and the results indicated that with the increasing of the field size, the hue of the matched red, yellow, blue and gray colors would be shifted with the direction of the bottom right in a^*b^* plane, the chroma of the red and blue colors would be increased, the chroma of the yellow colors would be decreased, there is no obvious variation of the lightness of the matched colors. The primary colors have some influences on the experimental results, the shift of the peak wavelength in blue channels can enlarge the color differences of the target and matched colors, followed by green channel, and finally the red channel. The results can provide datasets and theoretical support to extend the range of the existing CIE proposed CMFs, and also provide guidance for weak or enlarge the observer metamerism in the process of color transmission and reproduction.

Keywords Primary colors; Viewing filed size; Color matching experiment; Color matching functions

(Received Nov. 3, 2019; accepted Mar. 20, 2020)

* Corresponding author