

基于不同显示设备的观察者同色异谱差异研究

黄敏*, 何瑞丽, 郭春丽, 习永惠, 刘瑜

北京印刷学院印刷与包装工程学院, 北京 102600

摘要 为了研究显示设备的原色光谱对色觉正常观察者的颜色分辨差异影响, 选择了 5 台红绿蓝三原色光谱能量分布不同的显示设备, 基于国际照明委员会推荐的 5 个颜色中心, 组织了 30 名年龄分布在 20~27 岁的色觉正常观察者基于 5 台显示设备开展颜色匹配实验。同时用 108 个颜色匹配函数对颜色匹配过程进行了模拟计算, 将计算结果与颜色匹配实验结果进行比较, 并用同色异谱指标量化不同显示设备对观察者差异性的影响, 发现模拟计算结果与颜色匹配实验结果具有较好的一致性。基于实验选取的 4 台待匹配设备与目标设备进行颜色匹配实验, 采集到 285 个 CIELAB 色差数据, 同色异谱指标的最大值为 9.59, 最小值为 3.89。显示设备的原色光谱对观察者同色异谱的影响较大, 红色受设备的影响低于黄色和蓝色。

关键词 视觉光学; 视觉色彩; 原色光谱; 颜色匹配实验; 观察者同色异谱; 同色异谱指标

中图分类号 O432

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0133001

Discrimination of Observer Metamerism Based on Different Display Devices

Huang Min*, He Ruili, Guo Chunli, Xi Yonghui, Liu Yu

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

Abstract In order to investigate the influence of the primary spectrum of a display device on the color discrimination difference of observers with normal color vision, five display devices with different red, green and blue color primary spectral energy distributions are selected. Based on the 5 color stimuli recommended by CIE, 30 observers aged from 20 to 27 with normal color vision are organized to carry out the color-matching experiment based on these five display devices. Meanwhile, the 108 color-matching functions (CMFs) are used for the computational simulation of the color-matching process, and the calculation results are compared with the color-matching experimental ones. The influence of different display devices on the discrimination of observers is quantified by the metamerism index. It is found that the simulation results are well consistent with the color-matching experimental ones. With the 285 CIELAB color difference data acquired from the color-matching experiment based on the selected four display devices to be matched and the target display device, the maximum of 9.59 and the minimum of 3.89 as for the metamerism index are obtained. The primary color spectrum of a display device has a strong influence on the observer metamerism and the influence of a red color device is weaker than those of yellow and blue ones.

Key words vision optics; color and vision; primary color spectrum; color matching experiment; observer metamerism; metamerism index

OCIS codes 330.1710; 330.1720; 330.1730

1 引 言

同色异谱样本对是指视觉上看起来相同的一对颜色, 其光谱组成不同。颜色对(如反射样本)具有不同的光谱特性, 在某种光源照明下具有相同的颜色外貌, 当改变照明光源后, 颜色对会呈现出不同的颜色外貌(即照明光源引起的同色异谱)。同样是上

述颜色对, 不同的观察者在同一照明光源下观测时, 也可能出现颜色不匹配的现象(即观察者的同色异谱)^[1], 这主要是由于色觉正常观察者具有不同的锥细胞光谱响应。

为研究颜色刺激的光谱对观察者同色异谱差异的影响, Oicherman^[2-3]设计了跨媒体颜色(打印色和显示色)匹配实验, 得到不同观察者匹配中性色的

收稿日期: 2018-06-27; 修回日期: 2018-08-10; 录用日期: 2018-08-22

基金项目: 国家自然科学基金(61675029, 61308081)

* E-mail: huangmin@bigc.edu.cn

差异最大,其他颜色的色差并不大,同时发现 L^* 明度方向的变化($\Delta E_{00\max} = 3.5$)大于 a^*b^* 色品方向的变化($\Delta E_{00\max} = 1.5$)。Sarkar^[4]基于宽带阴极射线管(CRT)显示器和窄带发光二极管(LCD)显示器的9个颜色,组织10名观察者开展了颜色匹配实验,发现10名观察者的CIEDE2000色差值最大为3.4,90%以上的观察者配色色差均大于2.6。美国RIT实验室的Asano等^[5]选用LCD显示器和窄带宽的激光投影仪作为配色设备,组织了30名观察者对3幅图像进行匹配,发现观察者的离均色差(MCDM,即 ΔE_{00})在3.2~4.4范围内变化。上述颜色匹配误差的差异较大。Asano^[6]选用不同带宽的设备与Macbeth的24色进行模拟匹配计算,用Stiles & Burch^[7]的47个数据进行模拟计算时,发现观察者的差异性(MCDM偏差为 $1.9\Delta E_{00}$)在匹配灰色时较其他颜色的差异性(MCDM偏差小于 $1.0\Delta E_{00}$)大。进一步用Sarkar的实验装置(不同LED原色光谱的组合),组织61名观察者进行灰色匹配实验,计算得到观察者的MCDM偏差(ΔE_{00})为 $9.2^{[8]}$ 。

本课题组在以往的研究中^[9],组织了53名年龄为20~79岁的观察者并基于同一台显示设备开展了17个颜色的匹配实验(同色同谱),通过研究观察者的颜色色差分辨阈值,发现不同年龄观察者的 ΔE_{00} 色差阈值较为接近,在0.97~1.36范围内变化。进一步地,为放大观察者的颜色分辨差异,基于反射色制作了20对近同色异谱色样对,组织30名18~25岁和26名60~74岁的观察者开展了色差大小比较实验,发现二者的颜色分辨差异较大,呈负相关^[10]。

上述研究表明,颜色刺激呈现的原色光谱选择对观察者颜色分辨差异的影响较大。随着现代网络

技术的发展和多样化呈色设备的出现,人们摒弃了以往单纯通过纸质媒介传递文件和图像的方式,更多的是由专业人员对彩色数字图像文件进行校正、调色后,通过网络进行传输。不同的观察者经常需要在不同的地点、不同的显示设备上进行彩色数字图像的预览、评估。如何选择合适的原色设备和照明光源,从而在颜色的传递、复制和评价过程中弱化观察者的差异性,是颜色科学领域和工业界需要解决的问题。基于此,本文选用红绿蓝三原色光谱能量分布不同的5台显示设备,基于国际照明委员会(CIE)推荐的5个颜色,组织了30名观察者开展颜色匹配实验,进而检验显示设备原色光谱对观察者同色异谱的影响。

2 实验设计

2.1 显示设备

选择了5台自发光显示设备:平板电脑IPAD(LED背光,IPS面板)、LCD原色光谱显示器EIZO-CG19(CCFL冷阴极荧光灯背光,TFT面板)、QUATO-220ex显示器(LED背光)、LED原色光谱显示器NEC-PA242W(AH-IPS面板)和LED原色光谱显示器NEC-PA241W(CCFL冷阴极荧光灯背光,IPS面板)。其中,第一种设备为办公级便携式显示设备,其他设备为印刷软打样常用的专业级显示设备。这5台显示设备具有不同的呈色方式,原色光谱分布具有较大的差异,将5台显示设备的目标色温、发光强度分别设定为5000 K和 120 cd/m^2 。用光谱辐射度计PhotoResearch655测量得到显示设备的红绿蓝三通道光谱能量分布曲线如图1所示,各参数如表1、2所示。为方便起见,将上述5种显示设备依次表示为No.1~No.5。

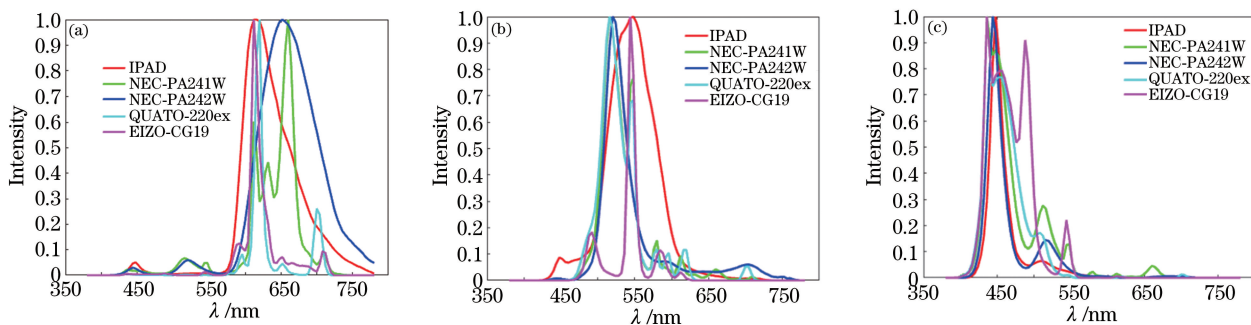


图1 显示设备三原色的光谱能量分布。(a)红通道;(b)绿通道;(c)蓝通道

Fig. 1 Spectral power distributions of three primaries of display devices. (a) Red channel; (b) green channel; (c) blue channel

表 1 显示设备的具体参数
Table 1 Specific parameters of display devices

No.	Display	Luminance / ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	Correlated colour temperature / K	Tristimulus value (white points)			Resolution / (pixel \times pixel)
				X_n	Y_n	Z_n	
1	IPAD	119.58	5038	116.31	117.58	105.69	2048 \times 1536
2	NEC-PA241W	121.73	4996	112.14	119.05	93.33	1920 \times 1200
3	NEC-PA242W	120.38	5012	114.81	120.28	94.89	1920 \times 1200
4	QUATO-220ex	119.56	5053	109.25	117.24	88.89	1920 \times 1080
5	EIZO-CG19	121.49	4989	112.77	117.01	99.45	1280 \times 1024

表 2 各显示设备的三原色色品坐标
Table 2 Chromaticity coordinates of three primaries of display devices

Channel	IPAD		NEC-PA241W		NEC-PA242W		QUATO-220ex		EIZO-CG19	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
R	0.64	0.33	0.6	0.34	0.64	0.33	0.66	0.33	0.65	0.34
G	0.35	0.57	0.25	0.68	0.26	0.68	0.24	0.67	0.33	0.61
B	0.15	0.08	0.15	0.13	0.16	0.10	0.14	0.09	0.14	0.13
W	0.34	0.35	0.34	0.37	0.35	0.37	0.35	0.37	0.34	0.35

由图 1 可见,5 台显示设备在红、绿、蓝不同通道的光谱形状、光谱带宽和光谱能量的峰值波长位置都有较大差异。在红通道,设备 No.4 和 No.5 显示的峰值波长位置接近,但 No.4 和 No.5 的带宽窄于 No.1;设备 No.2 和 No.3 显示的峰值波长位置接近。在绿通道,设备 No.1 和 No.5 显示的峰值波长位置接近,No.5 的带宽窄于 No.1;设备 No.2~No.4 的光谱形状、光谱带宽和峰值波长位置接近。在蓝通道,设备 No.5 较其他设备的光谱带宽较宽,有两个峰值波长位置,其他设备较 No.1 向短波段分别偏移了 4~12 nm。

由表 2 可见,显示设备 No.1 和 No.5 在绿色处的饱和度较低(色品坐标点较为接近),色域较其他三台设备小。5 台显示设备在红色、蓝色处的色域差别不是很大(色品坐标点较为接近)。考虑到设备 No.1 在颜色匹配实验中较其他设备便于移动,有利于保证目标设备和待匹配设备上的颜色在位置、角度与观察者的距离一致,因此在颜色匹配实验过程

中将设备 No.1 选定为目标设备。为保证实验结果的一致性,对 5 台显示设备的稳定性进行了测试,发现 5 台显示设备在开机 100 min 后颜色显示达到稳定,CIELAB 色差值保持在 1.0 以内。

2.2 颜色刺激

选用 CIE 推荐的 5 个颜色中心^[11]作为本次实验的颜色刺激,5 个不同色调的颜色中心在 CIELAB 颜色空间呈均匀分布,同时没有饱和度过高的颜色,均能保证在 5 台显示设备上准确再现,符合课题研究的需要。将目标设备上显示的颜色刺激光谱代入 CIE1964 颜色匹配函数中进行计算。由表 3 可见,实验选择的目标色与 CIE 推荐的颜色较为接近,CIELAB 色差值均 ≤ 5.0 ,可作为实验的目标色开展颜色匹配实验。

2.3 颜色匹配实验

整个目视评价实验都是在暗室中进行,显示设备是唯一的发光源,每次实验前,为保证颜色稳定显示,所有显示设备均需预热 100 min。实验装置如

表 3 目标设备显示颜色和 CIE 推荐颜色的色度值

Table 3 Colorimetric values of CIE-recommended colors and colors from target display device

Color	CIE-recommended colors					Target colors					ΔE_{ab}^*
	L_1^*	a_1^*	b_1^*	C_1^*	h_{1ab}^*	L_1^*	a_1^*	b_1^*	C_1^*	h_{1ab}^*	
Gray	62	0	0	0	0	63.0	-0.5	0.6	0.8	127.0	1.3
Red	44	37	23	43.6	31.9	45.9	37.7	23.3	44.3	31.7	2.0
Yellow	87	-7	47	47.5	98.4	88.6	-6.9	46.3	46.8	98.4	1.8
Green	56	-32	0	32.0	180.0	57.0	-27.1	0.7	27.1	178.5	5.0
Blue	36	5	-31	31.4	279.1	37.1	3.1	-31.1	31.2	275.7	2.2

图 2 所示,为确保观察者到每台显示设备的距离相同(约为 60 cm),将 4 台待匹配设备(No.2~No.5)在实验台上摆放成一个圆弧型(分别位于图 2 中的 A、B、C、D 位置处),需要调节的颜色刺激呈现在显示设备的屏幕中心,位于同一水平高度,具有相同的大小(9 cm×9 cm)。观察者正坐于 4 台显示设备的中间位置处,目视方向与显示设备上呈现的色样保持垂直,实验的观察视场角约为 $8.6^{\circ}\times 27.2^{\circ}$,属于 CIE 推荐的大视场范围。

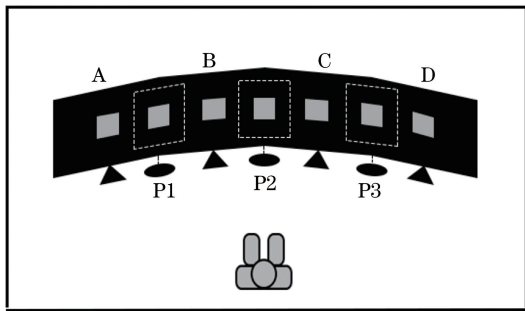


图 2 颜色匹配实验装置

Fig. 2 Color-matching experimental setup

实验采用双目同时匹配法,5 个颜色刺激随机在目标设备 No.1 上显示,利用黑卡纸(明度 $Y_{10} = 4.72$)将每台设备屏幕的其他部分遮盖住,只预留出色块与调节通道的位置。颜色匹配实验分为两个阶段:在第一阶段,观察者调节待匹配设备 No.2~No.5 的红绿蓝通道逐一完成与目标设备 No.1 的颜色匹配,在颜色匹配过程中,观察者的目视方向需与显示器屏幕中心目标颜色保持垂直,当观察者完成一台设备与目标设备的颜色匹配后,将目标设备由 P1 位置移动至 P2(或 P3)处,并用遮光布遮住其他显示设备,继续进行匹配实验;在第二阶段,当观察者将 4 台显示设备的颜色都匹配完成后,移除显示器上的遮光布,在 5 台显示设备上进行一次全面比较,若发现有个别显示器上的颜色刺激与其他显示器存在较大差异,可再次进行微调,直至 5 台显示器上的颜色刺激具有相同的颜色外貌,则完成该组颜色中心的匹配实验。实验完成后,实验组织者用光谱辐射计 PhotoResearch655 实时采集目标设备 No.1 和其余 4 台待匹配设备上颜色刺激的光谱能量。

观察者在 4 台设备上匹配每个颜色刺激需 20~30 min,为避免视觉疲劳,观察者需在不同时间段完成一组实验(即 4 台设备上 5 个颜色的匹配)。30 名观察者(14 名男性,16 名女性)参与了颜色匹配实验,年龄分布在 20~27 岁,所有观察者均为来自北京印刷学院印刷工程专业的学生,色觉正常并具有

颜色科学的基础理论知识。30 名观察者中,5 名观察者重复了 6 组实验,2 名观察者重复了 2 组实验,23 名观察者进行了 1 组实验,共采集到 57 组、1140 个颜色匹配数据。

3 数据处理

3.1 观察者的精度分析

本次实验共有 7 名观察者进行了颜色匹配的重复实验,由于观察者需在不同时间段完成重复实验,这时目标设备 No.1 上呈现的颜色刺激并不完全相同。实验组织者每次开展实验时,需将目标设备 No.1 上显示的 5 个颜色中心限定在一定的范围内,CIED2000 色差值 ≤ 0.61 ,每次实时采集目标设备和待匹配设备上各观察者匹配的颜色刺激的光谱信息进行色差和同色异谱指标的计算。

本次实验选取不同显示设备是为了放大观察者之间的配色差异。对基于不同显示设备采集到的 57 组配色数据,观察者之间的配色差异会比较大。对实验精度的控制采用的方法是由实验组织者每天将采集到的观察者颜色匹配数据代入 CIE1964 颜色匹配函数,计算目标色和匹配色的 CIEDE2000 色差值,如果色差值大于 10.0,则需要观察者重新进行颜色匹配,如果第二次匹配色差值仍然较大,则保留该数据。

3.2 匹配颜色色度参数

数据处理分为模拟计算和颜色匹配实验数据处理两部分。模拟计算时,计算方法与文献[6]中 Asano 的方法相同,只是将观察者的颜色匹配函数由 47 个增加为 108 个,其中 47 个为 Stiles 和 Burch 的颜色匹配函数^[8],61 个为将观察者不同年龄(20~80 岁)代入 CIE2006 颜色匹配函数中产生的颜色匹配函数^[12]。108 个颜色匹配函数的光谱响应曲线如图 3 所示。

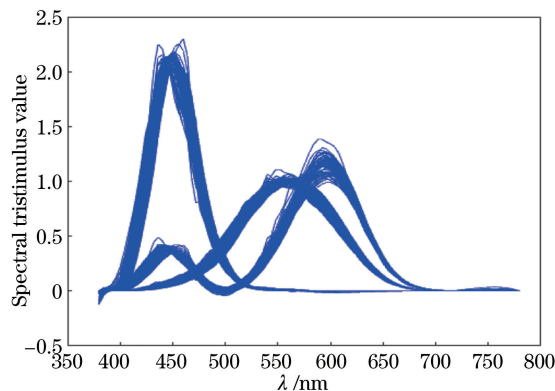


图 3 108 个颜色匹配函数的光谱响应曲线

Fig. 3 Spectral response curves of 108 color-matching functions

模拟计算时,以 108 个颜色匹配函数作为参与匹配实验的观察者锥细胞响应,将其与目标设备 No.1 上呈现的 5 个颜色刺激相比,在不同待匹配设备上模拟计算得到匹配色的 RGB 比例,从而计算出匹配色的光谱,将其代入 CIE1964 颜色匹配函数进行计算,可得到匹配色的色度值,其散点分布如图 4

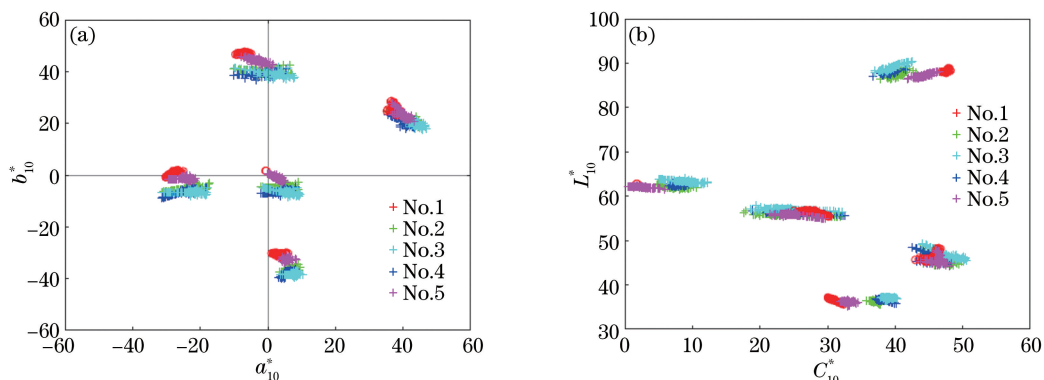


图 4 基于不同显示设备模拟计算得到的匹配数据散点分布。(a) $a_{10}^* b_{10}^*$ 平面; (b) $L_{10}^* C_{10}^*$ 平面

Fig. 4 Scattering distributions of matched data obtained by simulation based on different display devices.

(a) $a_{10}^* b_{10}^*$ plane; (b) $L_{10}^* C_{10}^*$ plane

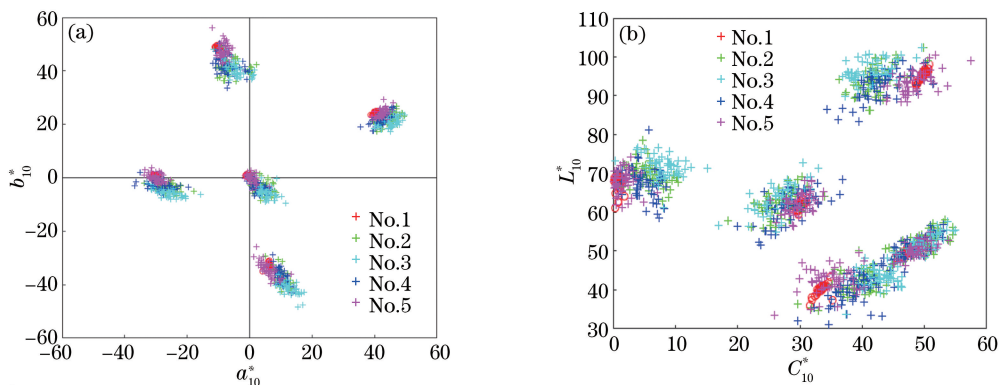


图 5 基于不同显示设备的颜色匹配实验所得的匹配数据散点分布。(a) $a_{10}^* b_{10}^*$ 平面; (b) $L_{10}^* C_{10}^*$ 平面

Fig. 5 Scattering distributions of matched data obtained from color-matching experiment based on different display devices.

(a) $a_{10}^* b_{10}^*$ plane; (b) $L_{10}^* C_{10}^*$ plane

由图 4、5 可见,模拟计算得到的颜色散点在色品图上的分布较颜色匹配实验结果的离散性小,模拟计算的匹配色在红绿方向(a^* 轴)的变化大于黄蓝方向(b^* 轴),彩度方向(C^*)的变化大于明度方向(L^*)。这与颜色匹配实验结果不同,颜色匹配实验采集到的观察者配色实验数据明度方向 L_{10}^* 的变化明显高于模拟计算的结果。模拟计算与颜色匹配实验得到的色度值散点存在较大的差异,主要原因是:1)模拟计算中选用的 Stiles & Burch 的 47 个颜色匹配函数是基于观察者重复多次的平均实验结果建立的,已经弱化了不同观察者之间的差异;2)在模拟计算过程中,仅考虑颜色匹配函数对观察者色觉的影响,而真实观察者在颜色匹配实验过程中,除

了颜色匹配函数的影响外,还包含了不同观察者的生理、心理等影响和心理物理实验(如实验环境、实验数据采集的仪器稳定性等)引起的不可避免的实验误差。本次实验的模拟计算结果与 Asano^[6] 的研究结果较为一致,但在 Asano 的研究中,以模拟计算为参考,在后续颜色匹配实验的设计中固定了颜色的明度值,仅让观察者调节颜色 $a^* b^*$ 方向的变化,这显然会带来一定的误差。

基于不同显示设备的影响,模拟计算与颜色匹配实验得到的结果较为一致,设备 No.5(品红散点)与目标设备 No.1(红色散点)的颜色散点较为接近。设备 No.2~No.4 特别是设备 No.4(青色散点)的颜色散点远离目标设备 No.1。颜色匹配实验中,30

名观察者在每台待匹配设备上匹配得到的 57 组匹配色的光谱能量分布,将其代入 CIE1964 颜色匹配函数进行计算,可得到匹配色的色度值,其散点分布如图 5 所示。

颜色匹配实验结束后,可测得参与实验的 30 名观察者在每台待匹配设备上匹配得到的 57 组匹配色的光谱能量分布,将其代入 CIE1964 颜色匹配函数进行计算,可得到匹配色的色度值,其散点分布如图 5 所示。

颜色匹配实验结束后,可测得参与实验的 30 名观察者在每台待匹配设备上匹配得到的 57 组匹配色的光谱能量分布,将其代入 CIE1964 颜色匹配函数进行计算,可得到匹配色的色度值,其散点分布如图 5 所示。

颜色匹配实验结束后,可测得参与实验的 30 名观察者在每台待匹配设备上匹配得到的 57 组匹配色的光谱能量分布,将其代入 CIE1964 颜色匹配函数进行计算,可得到匹配色的色度值,其散点分布如图 5 所示。

颜色匹配实验结束后,可测得参与实验的 30 名观察者在每台待匹配设备上匹配得到的 57 组匹配色的光谱能量分布,将其代入 CIE1964 颜色匹配函数进行计算,可得到匹配色的色度值,其散点分布如图 5 所示。

颜色匹配实验结束后,可测得参与实验的 30 名观察者在每台待匹配设备上匹配得到的 57 组匹配色的光谱能量分布,将其代入 CIE1964 颜色匹配函数进行计算,可得到匹配色的色度值,其散点分布如图 5 所示。

颜色匹配实验结束后,可测得参与实验的 30 名观察者在每台待匹配设备上匹配得到的 57 组匹配色的光谱能量分布,将其代入 CIE1964 颜色匹配函数进行计算,可得到匹配色的色度值,其散点分布如图 5 所示。

名观察者(57 组数据)在不同显示设备上匹配目标设备 No.1 上显示的 5 个颜色,取观察者配色 a^* 和 b^* 数值的协方差逆矩阵参数,构建观察者差异椭圆参数,并绘制色度椭圆(图 6),研究基于不同显示设备的观察者同色异谱变化^[2,13]。

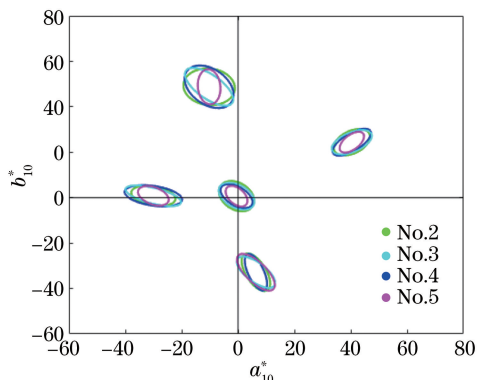


图 6 不同显示设备的观察者的色度椭圆

Fig. 6 Colorimetric ellipses of observers based on different display devices

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) 为 4 台设备显示的 30 名观察者(57 组数据)的差异变化,其中设备 No.2~No.5 的椭圆尺寸分别为 3.82, 3.64, 3.63, 2.89。可见,与目标设备 No.1 相比,设备 No.2~No.4 显示的观察者差异变化较为接近,设备 No.5 显示的观察者差异变化最小,观察者的同色异谱变化较小。由图 6 可以看出,除设备 No.5 在黄色区域的指向与其他设备不同之外,其余设备显示的观察者差异椭圆分布具有较好的一致性。

3.3 同色异谱评价指标

在进行观察者同色异谱大小评价时,以目标设备 No.1 上显示的目标色和待评价设备上匹配颜色的色差值来计算观察者的同色异谱大小^[6,13]。考虑到实验基于不同显示设备计算得到的颜色色差值(CIELAB 色差)大多数大于 5.0, CIEDE2000^[14] 色差的计算范围适用于 CIELAB 色差值 ≤ 5.0 , 因此本次实验的评价指标用 CIELAB 色差值表示。本次计算选用了两个评价指标表示观察者的同色异谱大小,这两个评价指标分别为待评价设备上所有匹配色和目标设备上显示颜色的 CIELAB 色差值的平均值 \overline{OM} 和最大值 OM_{\max} 。模拟计算时, \overline{OM} 、 OM_{\max} 分别为 540 个色差值的平均值和最大值。颜色匹配实验时, \overline{OM} 、 OM_{\max} 分别为 285 个色差值的平均值和最大值。两个指标的计算公式分别为

$$I_{OM} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{CIELAB}(C_{i0}, C_{i1})}{n}, \quad (1)$$

$$I_{OM_{\max}} = \max[\text{CIELAB}(C_{i0}, C_{i1})_{i=1,2,\dots,n}], \quad (2)$$

式中 C_{i0} 为目标设备上的颜色刺激色度值, C_{i1} 为观察者在待评价设备上匹配颜色的色度值, i 为观察者的数量, $\text{CIELAB}(\cdot)$ 表示计算目标设备上的颜色刺激和观察者在待评价设备上匹配颜色的 CIELAB 色差值。按照上述同色异谱评价指标的表示方法,分别以 No.1, No.2, No.3, …… 为目标设备,得到模拟计算和颜色匹配实验的结果,如表 4 所示。

表 4 中,模拟计算与颜色匹配实验的结果具有较好的一致性。可见,显示设备 No.2 与 No.3、No.4

表 4 不同显示设备的观察者同色异谱指标

Table 4 Indexes of observer metamerism based on different display devices

Condition	No.1				No.2			No.3		No.4 and No.5	
	No.2	No.3	No.4	No.5	No.3	No.4	No.5	No.4	No.5		
Simulation	\overline{OM}	8.10	8.42	9.50	3.91	0.91	1.74	4.81	3.85	2.82	6.55
	OM_{\max}	14.56	12.77	16.00	9.21	2.75	3.67	9.00	7.12	6.38	9.45
Experiment	\overline{OM}	7.61	6.76	9.59	3.89	4.41	4.71	6.33	6.13	5.85	8.22
	OM_{\max}	15.32	18.98	20.73	11.08	12.83	14.41	15.16	14.24	19.52	15.11

具有较小的同色异谱差异;显示设备 No.1 与 No.5 具有较小的同色异谱差异。以 \overline{OM} 来检验具有不同原色光谱显示设备的影响:模拟计算中, No.1 和 No.4 的观察者同色异谱差异最大(9.50),其次是 No.1 和 No.3, No.1 和 No.2, No.4 和 No.5, 同色异谱指标均较大。颜色匹配实验中, No.1 和 No.4 的观察者同色异谱差异最大(9.59),其次是 No.4 和

No.5, No.1 和 No.2, No.3, 同色异谱指标均较大。

3.4 显示设备原色光谱影响分析

比较图 1 中不同显示设备的光谱能量曲线形状、光谱带宽和峰值波长位移,可得三个参数均有一定的差异,但其对观察者同色异谱大小的影响趋势并不一致:1) 设备 No.4 和 No.5 在红、绿通道的光谱带宽较设备 No.1 窄,但设备 No.1 与 No.4 的观

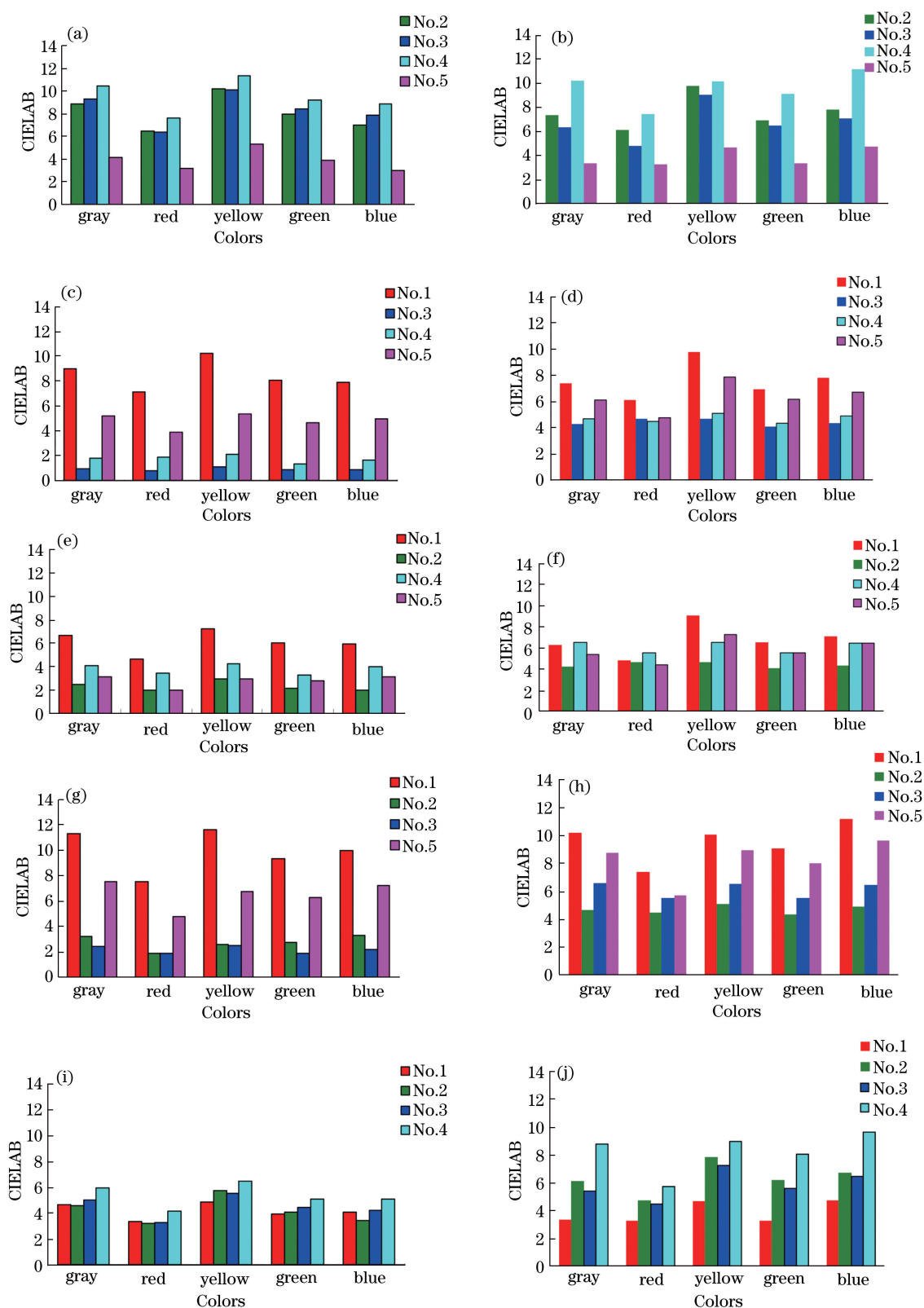


图 7 不同显示设备和目标设备的 (a)(c)(e)(g)(i)模拟计算结果和 (b)(d)(f)(h)(j)颜色匹配实验结果(不同颜色中心)
 Fig. 7 (a)(c)(e)(g)(i) Simulation results and (b)(d)(f)(h)(j) color-matching experimental results based on different display devices and target device (different color stimuli)

者的同色异谱指标小于本次基于不同显示设备得到的结果。分析原因,主要是由于其中一种颜色刺激

的原色光谱是由打印色构成的,在不同光源的照明下,颜色刺激的光谱分布带宽较不同显示设备的原

色光谱宽,且其光谱形状变化不大。

4 结 论

为了研究显示设备的红绿蓝三原色光谱能量分布对观察者同色异谱差异的影响,实验选取了 5 台具有不同光谱功率分布的显示设备,基于 5 个颜色中心,组织 30 名观察者开展了颜色匹配实验。同时,基于 108 个颜色匹配函数进行了颜色匹配的模拟计算。基于实验选取的 5 台显示设备,可得到以下结论:

1)通过比较模拟计算与颜色匹配实验得到的颜色散点在 a^*b^* 和 L^*C^* 平面的分布,发现颜色匹配实验得到的颜色散点较模拟计算结果的离散性大。

2)显示设备 No.1 和 No.5 的同色异谱指标最小;显示设备 No.2 和 No.3, No.2 和 No.4 之间的同色异谱指标较小。颜色刺激对在这些设备上呈现、匹配,可引起的观察者差异(失匹配)较小。

3)显示设备 No.1 和 No.2, No.1 和 No.4, 以及 No.4 和 No.5 的同色异谱指标较大,颜色刺激对在这些设备上呈现、匹配,可引起的观察者差异(失匹配)较大。

由此可见,显示设备的原色光谱分布对观察者的同色异谱差异具有较大的影响,基于本次实验选取的 5 台显示设备和 5 个颜色中心,发现峰值波长位移(特别是绿通道的峰值波长位移)对观察者同色异谱大小的影响最大。综合上述结果,在选择显示设备时,为避免由于观察者同色异谱差异造成的颜色再现不一致,可通过将仪器采集显示设备的原色光谱数据和白场光谱数据(作为输入数据)代入 108 个颜色匹配函数进行计算,通过计算同色异谱指标 OM 和 OM_{\max} 来评价显示设备对观察者同色异谱差异的影响,为设备的选取提供指导建议。

参 考 文 献

- [1] ASTM E284-17. Standard terminology of appearance [S]. West Conshohochen: ASTM International, 1995.
- [2] Oicherman B. Effects of colorimetric additivity failure and of observer metamerism on cross-media colour matching [D]. Leeds: University of Leeds, 2007.
- [3] 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.
- [4] Sarkar A. Identification and assignment of colorimetric observer categories and their applications in color and vision sciences [D]. Rennes: Université de Nantes, 2011.
- [5] Asano Y, Fairchild M D, Blondé L, *et al.* Observer variability in color image matching on a LCD monitor and a laser projector [C]. 22nd Color and Imaging Conference Final Program and Proceedings and 2nd Congress of the International Academy of Digital Pathology, 2014: 1-6.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [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] Shi C J, Huang M, Liu H X. Evaluation of color perception among different aged observers based on color matching experiments[M]. Singapore: Springer Singapore, 2015: 139-145.
- [10] 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.
- [11] Witt K. Cie guidelines for coordinated future work on industrial colour-difference evaluation [J]. *Color Research & Application*, 1995, 20(6): 399-403.
- [12] CIE. Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes-Part I[R]. Vienna: CIE Technical Report, 2006: 170-171.
- [13] Huang M, Shi C J, Li Z Y, *et al.* Research on influences of observers' color discrimination with normal color vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0933001.
黄敏, 史春洁, 李泽阳, 等. 色觉正常观察者辨色差异影响研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(9): 0933001.
- [14] Luo M R, Cui G, Rigg B. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000 [J]. *Color Research & Application*, 2001, 26(5): 340-350.