

# 色觉正常观察者辨色差异影响研究

黄 敏 史春洁 李泽阳 刘浩学

北京印刷学院印刷与包装工程学院, 北京 102600

**摘要** 为了比较色觉正常观察者的辨色差异受观察条件的影响程度, 选择了不同照明光源和不同原色的显示设备, 基于显示色和打印色, 设计了 4 种不同观察条件的颜色匹配实验。利用 Stiles&Burch 的 47 个颜色匹配函数 (CMFs) 模拟个体观察者, 对颜色匹配过程进行了模拟计算; 同时, 组织 27~36 名色觉正常观察者进行了颜色匹配实验。用观察者的离均色差, 同色异谱大小和同色异谱变化三个指标来量化不同观察者的辨色差异性。结果表明, 不同观察条件下, 模拟计算结果中观察者的辨色差异受显示设备原色光谱和照明光源光谱影响较大, 在匹配中性灰颜色时尤其明显。而颜色匹配实验结果中, 外界因素的影响并不明显, 这表明观察者的辨色差异不仅取决于观察者个体颜色匹配函数差异(观察者的同色异谱性), 还取决于观察者的视觉机理响应、颜色分辨能力等。

**关键词** 视觉光学; 视觉色彩; 辨色差异; 颜色匹配实验; 颜色匹配函数; 观察者同色异谱

中图分类号 O432 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0933001

## Influences on Observers Color Discrimination with Normal Color Vision

Huang Min Shi Chunjie Li Zeyang Liu Haoxue

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

**Abstract** In order to compare the influences on the observers color discrimination with normal color vision under different viewing conditions, the lighting sources with different spectral power distributions and displays with different primary colors are selected, and the four color matching experiments are carried out based on the monitor and printed color samples. The 47 color matching functions (CMFs) of Stiles-Burch are used for a computational color matching simulation and 27 to 36 observers with normal color vision are organized to carry out the color matching experiment. The mean color difference from the mean, observer metamerism magnitude and variability are used to quantify different observers color discrimination. The results show that the spectral power distribution of the monitor primary colors and the light sources have much effect on the observers color perception for color matching simulation, especially in gray color center, but it is not suitable for the color matching experiment. It indicates that the observers color discrimination is not only determined by the observer color matching function difference (observer metamerism), but also the visual mechanism and ability of color discrimination etc.

**Key words** visual optics; color and vision; differences of color discrimination; color matching experiment; color matching functions; observer metamerism

**OCIS codes** 330.1710; 330.1720; 330.1730; 330.5020

## 1 引 言

为了描述色觉正常观察者的颜色视觉特性, 国际照明委员会(CIE)先后提出了适用于  $2^\circ(1^\circ\sim 4^\circ)$  和  $10^\circ (>4^\circ)$  视场的标准色度观察者 CIE1931<sup>[1]</sup> 和 CIE1964<sup>[2]</sup>, 代表了观察者的平均颜色视觉特性。但是这两套颜色匹配函数(CMFs)是多名参加实验观察者的平均结果, 没有反映观察者之间的个体差异, 这种差异在受到不同外界因素的影响下会产生不同的反应, 而这些差异的反应无法用现有 CMFs 给出相应的量化评价。1989 年, CIE 推荐标准偏差观察者模型<sup>[3]</sup>, 以对观察者的差异性和同色异谱性进行量化。但 Rich 等<sup>[4]</sup> 和

收稿日期: 2016-04-06; 收到修改稿日期: 2016-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(61675029, 61308081)、北京市科技新星计划(Z151100000315076)、北京市教委青年拔尖计划(CIT&TCD201404127)

作者简介: 黄 敏(1979—), 女, 博士, 教授, 主要从事均匀颜色空间及跨媒体颜色再现技术等方面的研究。

E-mail: huangmin@bigc.edu.cn

Alfvin 等<sup>[5]</sup>的颜色匹配实验指出它的预测不能评测真实观察者的差异性。为了准确描述观察者辨色差异性,2006年,CIE推出 CIE2006 生理观察者模型<sup>[6]</sup>。在此之后,Sarkar<sup>[7]</sup>研究发现观察者配色函数不仅受年龄影响,而且同年龄段观察者的配色函数也可能不同,并由此推出了 8 套观察者配色函数。

美国 RIT 实验室的 Asano 等<sup>[8]</sup>对影响观察者辨色差异性的因素进行了系列的研究,选用 LCD 显示器和窄带宽的激光投影仪作为配色设备,组织 30 名观察者对 3 幅图像的颜色进行匹配实验,发现观察者的离均色差(MCDM)值( $\Delta E_{00,a^*b^*}$ )在 3.2 到 4.4 的范围变化,属于较大的差异。Asano 等<sup>[9]</sup>选用不同带宽的设备与 Macbeth 的 24 色进行模拟匹配计算,发现用现有的 CMFs 计算时,灰色的差异性较大,原色光谱的选择对观察者的差异性影响较大。进一步用 Sarkar 的实验装置(不同 LED 原色光谱的组合),组织 61 名观察者进行灰色的匹配实验,计算得到观察者的 MCDM 值( $\Delta E_{00,a^*b^*}$ )为 9.2。因此,RIT 实验室设计了一套 7 原色的投影设备,在扩大设备色域的同时,相比现有三原色设备较好地保证了观察者色觉辨别的一致性<sup>[10]</sup>。

对观察者同色异谱差异性的研究主要为围绕不同呈色方式的样品,设计了不同类型的颜色匹配实验: Oicherman 等<sup>[11]</sup>设计了跨媒体颜色(打印色和显示色)匹配实验,发现不同观察者匹配中性色的差异最明显,CIE 推荐的观察者偏差方法不适合评价该实验。进一步的分析表明,由于受到不同因素的影响,并不能用观察者的配色函数差异来直接量化表示观察者的同色异谱差异,因此需要提出一种直接研究观察者差异的方法,同时通过对观察者颜色匹配实验结果差异的分析,使实验上升为对不同观察者颜色视觉差异的高阶视觉机理的研究。

为研究不同观察条件下观察者的辨色差异,本文选择了 Stiles&Burch(10°视场) 47 个 CMFs<sup>[12]</sup>进行模拟计算,同时设计不同观察条件(不同光源和显示设备)下的颜色匹配实验。结合模拟计算结果和实验结果,比较分析了不同观察条件对观察者的辨色差异的影响。

## 2 实验设计

### 2.1 实验条件

基于显示色和打印色,设计了 4 组跨媒体颜色匹配实验,分别记为 Exp1、Exp2、Exp3 和 Exp4,实验的相关信息如表 1 所示。其中,Exp1、Exp2 选用光谱分布不同的照明光源 L1、L2,及相同原色的显示设备(EIZO-LCD);相较于 Exp1 和 Exp2,Exp3 选用光谱分布和色温不同的照明光源 L3;Exp2 和 Exp4 选用光谱分布基本相同的照明光源 L2 和不同原色的显示设备(EIZO-LCD 和 BenQ-LED)。4 组实验的条件可分别简写为 Exp1(L1+LCD)、Exp2(L2+LCD)、Exp3(L3+LCD)和 Exp4(L2+LED)。

表 1 颜色匹配实验信息

Table 1 Experimental information of the color matching experiment

No	Light source /lx	Color temperature	Size of colors /cm <sup>2</sup>	Viewing distance /cm	Monitor
Exp1	902	6302	12×12	80	EIZO CG19
Exp2	922	6364	12×12	80	EIZO CG19
Exp3	1023	3891	12×12	80	EIZO CG19
Exp4	984	6376	12×12	69	BenQ PG240

不同实验选用的照明光源光谱能量分布和显示器三原色光谱辐射能量曲线分别如图 1、2 所示。

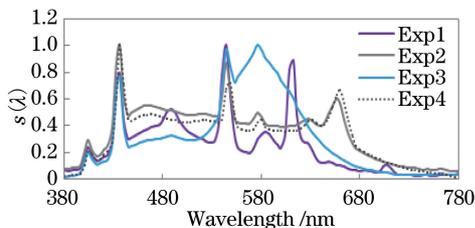


图 1 照明光源光谱曲线

Fig. 1 Spectral curves of the light sources

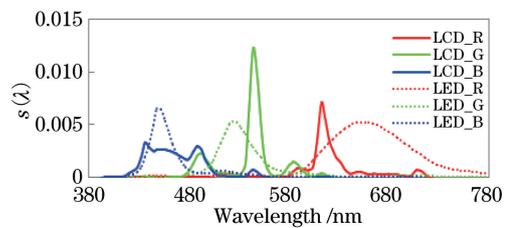


图 2 显示器三原色光谱曲线

Fig. 2 Spectral curves of the monitor three primary colors

### 2.2 颜色刺激

选用 CIE1995 年推荐 17 个颜色中心<sup>[13]</sup>中的 9 个颜色中心为实验的目标色,以打印色的形式呈现。9

个不同色调的颜色中心在 CIELAB 颜色空间均匀分布,它们在  $a^*b^*$ ,  $L^*C^*$  平面上的散点图分布如图 3 所示(以 Exp1 的样品实际测量值为例)。

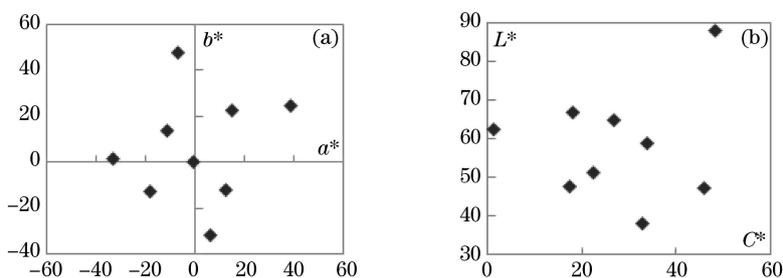


图 3 颜色中心在  $a^*b^*$  和  $L^*C^*$  平面上的分布

Fig. 3 Distribution of the color centers in  $a^*b^*$  and  $L^*C^*$  plane

### 2.3 观察者

实验组织了不同年龄段的观察者参与了颜色匹配实验,所有参与实验的观察者均色觉正常。80%以上的观察者具有颜色科学相关理论知识(其中 Exp1、Exp2 和 Exp3 中 35 岁以上观察者的实验数量分别占 10.26%,9.09%和 10.38%,因此忽略了 4 个实验间的年龄影响),详细信息如表 2 所示。

表 2 观察者信息

Table 2 Information of the observers

No.	Number of observers	Age	Average age	Total observations	Number of repeated observers
Exp1	27	20~59	28.9	78	11
Exp2	28	20~59	29.2	77	10
Exp3	27	20~59	30.1	77	9
Exp4	36	20~35	21.7	80	26

### 2.4 实验过程

整个目视评价实验都是在暗室中进行。实验装置如图 4 所示,打印色样和显示器同时放置在标准观察箱中。打印色样的背景为实验制作的灰板,灯箱里灰色背景的  $L^*a^*b^*$  值为 63.44, -1.85, 1.31, 眼睛的目视观察方向垂直于显示器。实验开始前,观察箱需预热 10 min。整个配色实验分两部分进行,首先观察者需要调节显示器上的背景色,使之与灯箱里的灰色背景板相匹配;第二阶段,调节匹配界面左下方的 RGB 通道,使显示器上显示的屏幕色与观察箱里的打印色样具有相同的颜色外貌。实验中上述的 9 个颜色色样为一组,随机呈现给观察者。观察者初期完成背景色和 9 个颜色的匹配约需 30~40 min。匹配实验完成后,实时用 PR650 光谱辐射度计采集显示器上观察者匹配颜色的光谱数据。

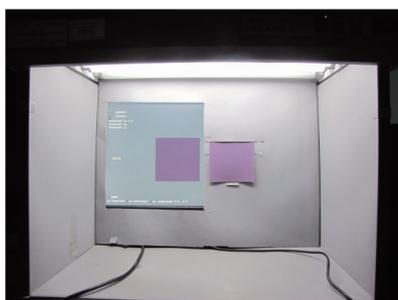


图 4 颜色匹配实验装置

Fig. 4 Experimental setup of the color matching

## 3 模拟计算

### 3.1 模拟计算过程

在组织观察者进行实验前,先通过计算对颜色匹配过程进行模拟<sup>[9]</sup>,以预测颜色匹配实验中观察者的不

同 CMFs 引起的实验结果差异, 简要模拟步骤如下:

- 1) 选择参考色光谱  $S_{ref}$ 。颜色匹配实验中选择的 9 个颜色中心在 L1、L2 或 L3 光源照射下的光谱分布。
- 2) 选择匹配原色光谱  $S_{match,max}$ 。实验中 LCD 或 LED 显示器的红、绿、蓝原色光谱分布。
- 3) 选择观察者的 CMFs  $C_i$ 。Stiles&Burch(10°视场)47 个 CMFs, 其颜色匹配函数(即光谱三刺激值)

$\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 分布如图 5 所示。

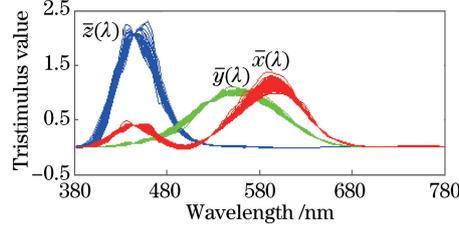


图 5 Stiles&Burch 的 47 个 CMFs

Fig. 5 47 CMFs of the Stiles&Burch

4) 计算特定观察者的匹配  $R$ 。为使显示设备上的颜色与光源照明下的反射色达到视觉匹配, 代入 Stiles&Burch 的每一个 CMFs 计算在显示器上匹配参考色时, 显示器的三原色辐射强度比例  $R$  (取值范围 0~1), 表达式为

$$R = (C_i S_{match,max})^{-1} C_i S_{ref} \quad (1)$$

5) 将 4) 中计算得到的  $R$  值用来重建匹配色的光谱能量分布  $S_m(\lambda)$ , 表达式为

$$S_m(\lambda) = S_{match,max} \times R, \quad (2)$$

(1)式中  $C_i$  是观察者函数, 为 3 行×101 列矩阵(波长取值范围 380~780 nm,  $\Delta\lambda = 4$  nm);  $S_{match,max}$  是显示设备原色的最大光谱能量分布曲线, 为 101 行×3 列矩阵(RGB 三个通道的最大光谱能量分布曲线);  $S_{ref}$  是反射样本在光源照明下的光谱辐亮度分布曲线, 为 101 行×1 列矩阵;  $R$  是计算得出的需在显示设备上调节的原色比例, 为 3 行×1 列矩阵(变化范围 0~1);  $S_m(\lambda)$  为在重建的显示设备上匹配颜色的光谱分布, 为 101 行×1 列矩阵。

6) 代入不同观察者函数 CMFs 投影到 CIELAB 色空间(10°视角), 计算其 CIELAB 色度值。

7) 计算观察者的辨色差异。

### 3.2 观察者辨色差异的评价指标

在分析观察者辨色差异的过程中, 常用的评价指标有观察者之间的差异性(用离均色差 MCDM 表示,  $X_{MCDM}$ ), 观察者同色异谱大小(用 OM 表示,  $X_{OM}$ ), 观察者同色异谱变化(用  $OM_{var}$  表示,  $X_{OM_{var}}$ )<sup>[10]</sup>。

其表达式分别为

$$X_{MCDM} = \frac{\sum_{i=1,N} [f_{\Delta E}(V_i, V_{ave})]}{N}, \quad (3)$$

$$X_{OM} = \max(\Delta E_{P,i}), \quad (4)$$

$$X_{OM_{var}} = \text{Area}[\Delta(a^* b^*)_P], \quad (5)$$

式中  $V_i$  表示第  $i$  个观察者匹配颜色的色度值,  $V_{ave}$  表示所有观察者匹配颜色的平均色度值,  $N$  表示观察者的数量,  $f_{\Delta E}$  是色差计算公式, 此处采用 CIEDE2000 色差公式 ( $\Delta E_{00}$ )<sup>[14]</sup>。  $X_{MCDM}$  通常用来评估测量精度, 此处用来评估观察者的实验精度,  $X_{MCDM}$  值越小, 表示观察者的准确性越高, 即观察者之间的辨色差异越小。  $\Delta E_{P,i}$  表示在目标色系  $P$  中第  $i$  个观察者匹配的颜色(显示色)与目标色(打印色)之间的色差, 此处选用 CIEDE2000 色差公式 ( $\Delta E_{00}$ ), 取每个观察者匹配 9 个颜色色差平均值的最大值。定义该最大值  $X_{OM}$  表示观察者同色异谱大小, 用来表征颜色匹配偏差最大的观察者。  $\text{Area}[\Delta(a^* b^*)_P]$  表示在目标色系  $P$  中所有观察者匹配的颜色在  $a^*$  和  $b^*$  方向的矢量偏差构建的椭圆面积, 目标色系  $P$  中所有颜色构建的椭圆面积的平均值用来表示观察者同色异谱变化性。  $X_{OM_{var}}$  用来评估观察者在  $a^*$  和  $b^*$  方向上的辨色差异。

## 4 结果分析

### 4.1 模拟计算和实验结果汇总

实验过程中,选择的9个打印色样在不同光源的照明下呈现的颜色,都在LCD或LED显示器的颜色显示范围内。将实验中选用的颜色刺激光谱、显示色三原色光谱、不同的CMFs和实验采集到的不同观察者匹配色光谱数据代入计算,用上述的评价指标分别对模拟计算和颜色匹配结果进行分析,如表3所示。从表3中可以看出,模拟计算的结果均低于实验结果,这是由于模拟计算过程中仅考虑到了观察者CMFs间的差异;而真实观察者在颜色匹配实验过程中,除了CMFs不同外,还包含了生理、心理的不同反应和不同心理物理实验引起的实验误差。

表3 模拟计算和颜色匹配的结果

Table 3 Results of simulation calculation and color matching experiments

No	Simulated result			Experimental result		
	$X_{MCDM}$	$X_{OM}$	$X_{OM_{var}}$	$X_{MCDM}$	$X_{OM}$	$X_{OM_{var}}$
Exp1	0.46	1.03	0.86	2.04	4.51	2.95
Exp2	0.52	1.06	1.02	2.39	4.92	3.34
Exp3	0.93	2.36	1.72	3.17	6.44	4.35
Exp4	1.09	2.64	1.80	2.26	5.70	2.97

模拟结果中,光谱分布不同、色温近似相同的照明光源(Exp1 & Exp2)对观察者辨色差异的影响不大;显示设备的原色光谱不同(Exp2 & Exp4),以及照明光源的光谱分布和色温不同(Exp3 & Exp1,2)对观察者的辨色差异的影响较大。LED原色显示器较LCD原色显示器和光谱分布有较大差异的照明光源都会放大观察者的辨色差异。

实验结果中,光谱分布不同、色温近似相同的照明光源(Exp1 & Exp2),观察者的各指标差异不是很大。LED原色显示器会放大观察者同色异谱大小,但是对观察者间的辨色差异影响不大。光谱分布有较大不同的低色温照明光源L3会放大观察者的各指标差异。

由图1和2可知,Exp1中照明光源光谱分布与显示器原色光谱分布最相似,峰值波长的位置和形状较为接近,颜色匹配中同色异谱现象的程度会有所降低;Exp4中照明光源光谱分布与显示器原色光谱分布区别较大,LED显示器原色光谱与观察者的CMFs作用后会放大颜色匹配的同色异谱程度。颜色匹配实验中,窄带原色显示器放大了观察者匹配打印色的同色异谱大小,而对观察者之间的差异性和观察者之间的同色异谱变化影响不大,这是由于离均色差和同色异谱变化这两个指标只需要考察观察者之间光谱响应的差异变化。或许也与在实验数据采集和筛选过程中,为了保证采集数据的准确性,将一些差异较大的奇异数据剔除有关。可见,照明光源的光谱和显示设备的原色光谱对匹配颜色的同色异谱都有不同程度的影响。

以下对观察者匹配9个颜色中心的表现进行详细讨论。

### 4.2 颜色中心的影响

#### 4.2.1 观察者的离均色差(9个色中心)

计算出匹配每个颜色中心时观察者之间的差异性,通过柱状图比较不同色中心对观察者间辨色差异的影响,如图6所示。模拟计算结果[图6(a)]表明,对于9个颜色,以LED显示器呈现匹配色,或者以光谱分布和色温与其他光源有较大差异的L3光源照明时,观察者间的辨色差异普遍较高。表明对于9个颜色的观察,观察者间的辨色差异会因窄带原色显示器或照明光源的光谱而放大。由于匹配色为同色异谱色对,不同的原色光谱与不同观察者的CMFs作用后,达到了视觉上的颜色匹配。实验观察者的CMFs都有一定的微小差异性。因此当原色光谱,即颜色刺激光谱间存在较大差异时,与不同观察者的CMFs作用后,会明显地引起观察者之间的差异性。相较而言,在红、绿和蓝色中心处,观察者间的辨色差异变化较小,而在中性灰处,观察者间的辨色差异变化最大。

从模拟计算中可以发现,无论哪种实验条件下,观察者在匹配中性灰时,观察者间的辨色差异都是最大的,但在实验结果[图6(b)]中并未发现与此相同的规律,这可能是由于在颜色匹配过程中,人眼的视觉功能会进一步对颜色信号进行处理、加工,同时对不同的颜色具有不同的宽容量,不同观察者间的差异不仅仅是

由观察者的配色函数差异引起。因而在实际观察条件下,并未出现模拟计算预测的变化规律。该实验结果与 Oicherman 等的研究结果较为类似<sup>[11]</sup>。同时,由实验结果可以发现,Exp1、Exp2 和 Exp4 的实验结果在不同色中心处差异不大,Exp3 的观察者 MCDM 值明显高于其他三个实验。

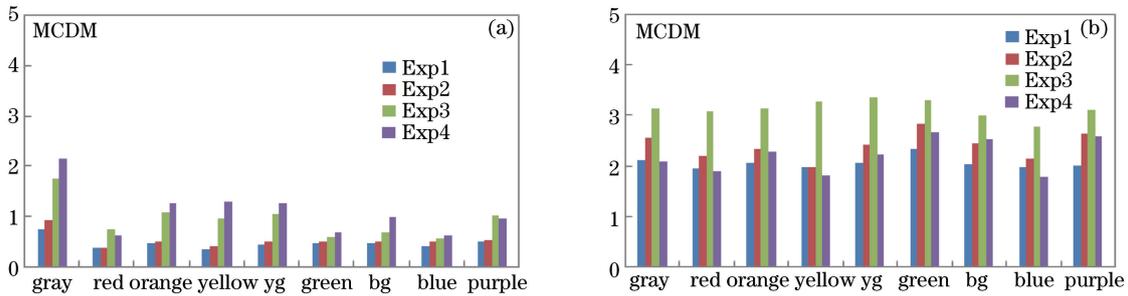


图 6 9 个颜色中心的 MCDM 值。(a)模拟计算结果;(b)实验结果

Fig. 6 MCDM value for the nine color centers. (a) Simulation result; (b) experimental result

#### 4.2.2 同色异谱大小指标(9 个色中心)

计算出观察者匹配每个打印色的辨色色差(用  $\Delta E_{00}$  色差值表示),取其最大值,即为观察者匹配该颜色的同色异谱大小。通过柱状图比较,如图 7 所示。从模拟计算结果[图 7(a)]可以看出,不同颜色中心对同色异谱大小的影响,与对观察者之间的差异性影响趋势是一致的。在颜色匹配的实验结果[图 7(b)]中,对于不同颜色中心,Exp1 中观察者的同色异谱大小较其他三个实验偏低,Exp4 中观察者的同色异谱大小没有出现明显偏大的现象,中性灰处也没有出现最大的同色异谱数值。引起模拟和实际实验结果差异的原因,与颜色匹配过程中,人眼视觉对颜色信号的加工、处理有一定的关系。

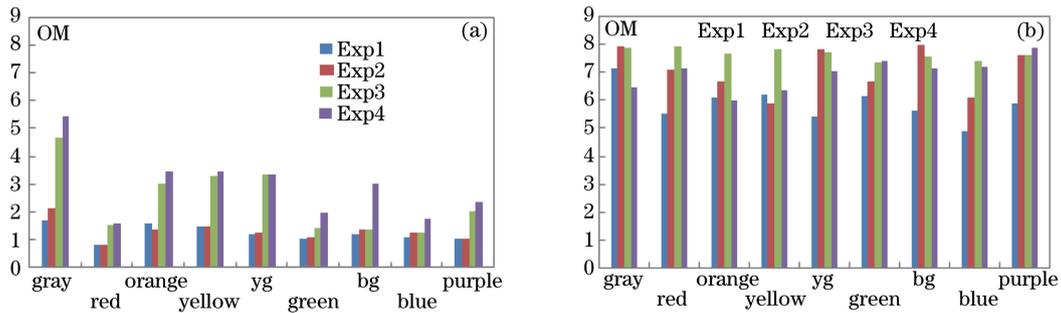


图 7 9 个颜色中心的 OM 值。(a)模拟计算结果;(b)实验结果

Fig. 7 OM value for the nine color centers. (a) Simulation result; (b) experimental result

以实验 1 中 LCD 显示器的原色光谱与光源 L1 照明下红色和灰色的颜色刺激光谱分布为例,红色打印色光谱和显示器红原色光谱分布较为相似,因此颜色匹配时的同色异谱差异小;而灰色打印色在光源 L1 照明下需要 LCD 显示器 RGB 三个通道的共同作用,导致匹配色和目标色的光谱分布差异较大。

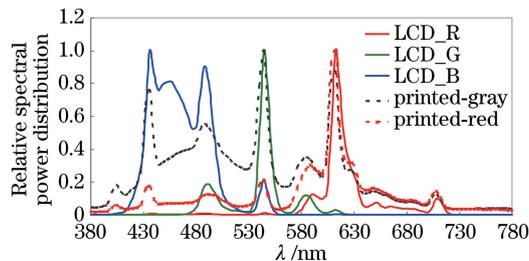


图 8 Exp1 中显示原色和打印色光谱分布

Fig. 8 Spectral distribution of the monitor primary colors and printed samples in Exp1

今后一方面需要优化并考虑到观察者的锥细胞响应,将不同外界因素对观察者分辨颜色的差异影响量化;另一方面,合理选择原色设备和照明光源,在保证原特性(如宽色域)变化不大的情况下,弱化观察者的差异性。

4.2.3 同色异谱变化指标(计算椭圆的面积)

不同观察者在颜色空间匹配不同打印色,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,研究观察者匹配打印色的同色异谱变化<sup>[10-11]</sup>。

由图 9 可知,图 9(a)中模拟计算的观察者差异椭圆尺寸小于图 9(b)中由实验结果计算得到结果,同时椭圆的偏向和形状也有很大的差异。其中,图 9(b)中椭圆的长轴基本都是指向中心点( $a^* = 0, b^* = 0$ ),与观察者的颜色宽容量色度椭圆分布规律一致<sup>[15]</sup>。

上述结果中,实验组织观察者的变化性大于 Stiles&Burch 不同观察者函数的表现,某种情况下说明,Stiles&Burch 测量的 47 名观察者的 CMFs 并不能完全代表所有色觉正常观察者的色觉特性;同时也说明在跨媒体颜色复制过程中,观察者的同色异谱现象(CMFs 的变化)并不是导致实验结果存在差异的主要原因。图 9 中观察者差异椭圆的参数如表 4 所示,表 4 中  $A, B, \theta$  分别为椭圆的长短轴和椭圆的偏向,  $S = \sqrt{\pi AB}$  表示不同色中心观察者差异椭圆的尺寸。其中,黑体数字表示椭圆尺寸最大,下划线数字表示椭圆尺寸最小。

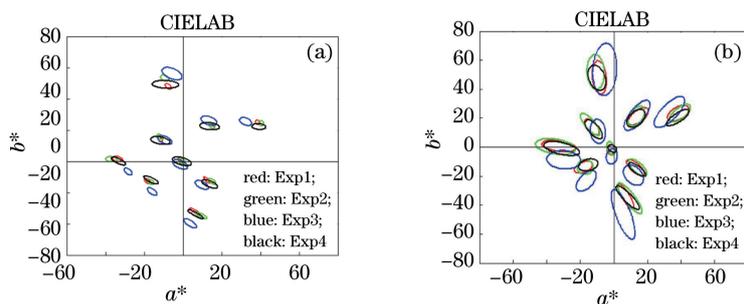


图 9  $a^* b^*$  平面的观察者差异椭圆分布(放大 3 倍)。(a)模拟计算结果;(b)实验结果

Fig. 9 Distribution of observer variability ellipses in  $a^* b^*$  plane (multiplied three times)

(a) Simulation result; (b) experimental result

由图 9(a)和表 4 中的数据可知,模拟计算时,Exp3 和 Exp4 的观察者配色变化远大于 Exp1 和 Exp2。以 Exp1 的观察者差异椭圆尺寸  $S_1 = \sqrt{\pi AB}$  作为参照,其他三个实验的观察者差异椭圆尺度  $S_2, S_3, S_4$  分别与 Exp1 中对应色中心椭圆尺寸进行比较,将 9 个色中心的计算比值取平均值,表达式为

$$S_{j1} = \frac{\sum_{j=2,3,4}^{i=1 \dots 9} \left[ \frac{S_{ji}}{S_{1i}} \right]}{N} \quad (6)$$

表 4 模拟计算和实验椭圆参数

Table 4 Ellipse parameters of simulation and experiment

		Exp1				Exp2				Exp3				Exp4			
		A	B	$\theta$	S												
Simulation	Gray	0.70	0.23	122.7	<u>0.71</u>	0.73	0.39	130.2	0.94	1.48	0.77	147.8	1.89	1.74	0.78	159.7	2.07
	Red	0.58	0.32	122.5	<u>0.77</u>	0.56	0.40	103.0	<u>0.83</u>	1.16	0.71	146.4	1.61	1.22	0.62	173.5	1.54
	Orange	0.64	0.31	125.9	0.79	0.63	0.43	125.4	<u>0.92</u>	1.50	0.84	152.7	1.99	1.72	0.77	171.8	2.04
	Yellow	0.72	0.38	127.5	0.92	0.83	0.55	136.8	1.20	1.92	1.06	149.4	<b>2.53</b>	2.31	0.82	177.1	<b>2.44</b>
	Y-green	0.63	0.31	127.1	0.78	0.67	0.45	140.2	0.97	1.38	0.73	150.2	1.78	1.71	0.76	165.9	2.02
	Green	0.89	0.51	164.6	<b>1.19</b>	1.04	0.54	171.7	<b>1.32</b>	0.94	0.45	133.3	<u>1.15</u>	1.41	0.50	148.4	1.48
	B-green	0.64	0.34	130.0	0.83	0.66	0.42	142.6	0.93	1.07	0.50	137.3	<u>1.29</u>	1.47	0.49	148.3	1.50
	Blue	1.09	0.26	140.9	0.93	1.20	0.33	147.2	1.11	1.39	0.54	138.8	1.54	1.63	0.36	144.9	<u>1.36</u>
	Purple	0.82	0.25	129.7	0.81	0.83	0.36	135.8	0.97	1.34	0.68	143.2	1.70	1.53	0.63	150.9	<u>1.74</u>
Experiment	Gray	1.12	0.76	86.6	<u>1.63</u>	1.58	0.71	104.5	<u>1.87</u>	1.77	1.10	81.2	<u>2.46</u>	1.03	0.69	135.9	<u>1.49</u>
	Red	2.46	1.37	36.3	<u>3.25</u>	2.64	1.20	43.6	<u>3.15</u>	4.37	1.68	51.3	4.80	2.76	0.96	38.7	<u>2.89</u>
	Orange	2.56	1.24	44.6	3.15	2.45	1.37	62.2	3.25	4.03	1.51	56.5	4.37	2.34	1.44	52.1	3.25
	Yellow	3.84	1.39	94.9	<b>4.09</b>	4.01	1.70	92.5	<b>4.63</b>	6.02	2.38	87.2	<b>6.71</b>	2.97	1.64	105.9	3.91
	Y-green	2.13	1.04	124.5	2.64	3.05	0.99	125.8	3.08	2.79	1.48	95.4	3.60	2.57	1.07	125.6	2.94
	Green	3.44	1.23	170.4	3.65	4.02	1.68	168.8	4.61	3.37	2.10	174.4	4.72	3.66	1.34	164.3	<b>3.93</b>
	B-green	1.98	1.16	28.5	2.68	1.69	1.57	85.8	2.88	2.77	1.43	53.9	3.52	1.96	1.30	20.6	2.83
	Blue	3.16	0.78	116.7	2.78	4.14	1.09	123.3	3.77	5.99	1.49	108.2	5.30	3.45	0.91	129.5	3.15
	Purple	2.36	0.95	132.8	2.66	2.47	1.04	131.5	2.84	2.57	1.70	123.0	3.70	2.21	0.78	137.8	2.32

得到模拟计算的结果  $S_{21}$ 、 $S_{31}$ 、 $S_{41}$  分别为 1.19, 2.06, 2.15; 实验数据的计算结果  $S_{21}$ 、 $S_{31}$ 、 $S_{41}$  分别为 1.06, 1.64, 1.10。不同实验间的差异性, 实验结果小于模拟计算。模拟计算的结果表明, Exp3 中基于不同照明光源光谱, Exp4 中基于 LED 显示器进行的颜色匹配实验, 观察者之间的偏差明显大于颜色匹配实验 Exp1 和 Exp2。同时, Exp4 中灰色、红色、橙色、黄色和黄绿色的观察者差异椭圆长轴几乎都平行于坐标横轴( $a^*$  轴), Exp1 和 Exp2 的椭圆分布规律较为一致。实际的颜色匹配实验中, Exp3 中观察者之间的偏差大于其他三个实验, 不同实验的观察者差异椭圆的分布规律较为一致。

对于不同色中心, 观察者同色异谱的变化, 模拟计算和实验结果表现出了较好的一致性, 最大值出现在黄色和绿色区域。模拟计算结果, 最小值出现在灰色、红色和蓝色区域; 实验结果, 最小值出现在灰色区域, 这种规律与色差评估实验中的色度椭圆宽容量分布规律较为一致<sup>[16]</sup>。

## 5 结 论

为研究不同实验条件(不同光源和显示设备)下观察者的颜色辨别差异, 同时研究 CMFs 对观察者颜色分辨的影响程度, 选择了 Stiles&Burch 的 47 个 CMFs 进行模拟计算。设计了基于上述不同实验条件的颜色匹配实验, 通过对实验数据和模拟计算数据的比对分析可知:

1) 模拟计算中, 观察者的离均色差、同色异谱大小和观察者同色异谱变化, 受显示设备原色光谱和照明光源光谱分布的影响较大, 特别是匹配灰色的差异性最大。

2) 用观察者差异椭圆表示观察者在颜色空间配色变化性时, 模拟计算的观察者差异椭圆和由实验数据绘制的观察者差异椭圆大小和偏向存在明显的差异。模拟计算的观察者差异椭圆, 基于 LED 显示设备的配色数据大多数椭圆的长轴都平行于横轴; 实验匹配数据绘制得到的观察者差异椭圆的分布规律与观察者进行的色差评估实验结果较为一致。

上述结果表明, 在进行跨媒介的颜色样本匹配时, 观察者的 CMFs 差异(观察者的同色异谱性)不一定是引起不同观察者实验结果差异的直接或最主要原因, 观察者的视觉机理的响应和颜色分辨能力对观察者的辨色差异都有一定的影响。这也是今后需要进一步研究的方向。

## 参 考 文 献

- 1 Guild J. The colorimetric properties of the spectrum[J]. Philosophical Trans Royal Soc London A, 1932, 230: 149-187.
- 2 Speranskaya N I. Determination of spectrum color coordinates for 27 normal observers[J]. Optics and Spectroscopy, 1959, 7: 424-428.
- 3 Abhijit S. Special metamerism index: Change in observer[J]. Encyclopedia of Color Science and Technology, 2015: 1-9.
- 4 Rich D, Jalijali J. Effects of observer metamerism in the determination of human color-matching functions[J]. Color Research and Application, 1995, 20(1): 29-35.
- 5 Alfvén R L, Fairchild M D. Observer variability in metameric color matches using color reproduction media[J]. Color Research and Application, 1997, 22(3): 174-188.
- 6 CIE. Fundamental chromaticity diagram with physiological axes[R]. CIE Technical Report, 2006: 170-171.
- 7 Sarkar A. Identification and assignment of colorimetric observer categories and their applications in color and vision sciences[D]. Rennes: Université de Nantes, 2011.
- 8 Asano Y, Fairchild M D, Blondé L, *et al.* Observer variability in color image matching on a LCD monitor and a laser projector[C]. Proceedings of the IS&T/SID Color Imaging Conference, Society for Imaging Science and Technology, Boston, MA, 2014: 1-6.
- 9 Asano Y, Fairchild M D, Blondé L, *et al.* Color matching experiment for highlighting interobserver variability[J]. Color Research & Application, 2015.
- 10 Long D L, Fairchild M D. Modeling observer variability and metamerism failure in electronic color displays[J]. Journal of Imaging Science & Technology, 2014, 58(3): 0304021.
- 11 Oicherman B, Luo M R, Rigg B, *et al.* Effect of observer metamerism on colour matching of display and surface colours [J]. Color Research and Application, 2008, 33(5): 346-359.
- 12 Institute of Ophthalmology, University College London UK. Colour & vision research laboratory, Stiles & Burch individual 10-deg colour matching data[EB/OL]. [2016-04-01]. www.cvrl.org.

- 13 Witt K. CIE guidelines for coordinated future work on industrial colour-difference evaluation[J]. Color Research and Application, 1995, 20(6): 399-403.
- 14 Luo M R, Cui G, Rigg B. The development of the CIE2000 color-difference formula: CIEDE2000[J]. Color Research and Application, 2001, 26(5): 340-350.
- 15 Huang Min, Liu Haoxue, Liao Ningfang. Study on just-noticeable color difference discrimination threshold by using printed samples I: Analysis of visual evaluation experimental data[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1431-1435.  
黄 敏, 刘浩学, 廖宁放. 印刷样品恰可察觉小色差辨色阈值的研究 I: 目视评价实验数据分析[J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1431-1435.
- 16 Huang Min, Liao Ningfang, Liu Haoxue, *et al.* Cathode-ray tube color perceptible color difference threshold evaluation in visual color matching[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(3): 599-603.  
黄 敏, 廖宁放, 刘浩学, 等. 颜色视觉匹配中显示器颜色色差阈值的评价[J]. 光学学报, 2008, 28(3): 599-603.