

文章编号: 0253-2239(2009)05-1431-05

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

黄 敏^{1,2} 刘浩学¹ 廖宁放²

¹北京印刷学院 印刷与包装工程学院, 北京 102600
²北京理工大学信息科学技术学院 颜色科学与工程国家专业实验室, 北京 100081

摘要 为了研究人眼对反射样品颜色在恰可察觉小色差辨色阈值水平上的颜色视觉特性,对印在半光相纸上的 17 个 CIE 基本颜色中心区域,约 1000 对颜色色样,采用心理物理实验方法中的固定刺激法,在 CIE1976 $a^* - b^*$ 平面上分别测得 16 名色觉正常的观察者在不同颜色区域的辨色阈值,并以色度椭圆表示辨色阈值实验结果。通过对实验数据的详细处理和分析表明,等明度 $a^* - b^*$ 平面非视觉均匀,人眼对一、二象限的色宽容度普遍高于三、四象限的色宽容度,对高彩度的橙色具有最高的宽容度,对蓝色具有最低的宽容度,所有的颜色在红-绿方向的视觉色差尺度均低于黄-蓝方向。实验结果可为均匀颜色空间及其色差公式的改进和发展提供原始数据和参考依据。

关键词 视觉与色彩; 色差阈值; 固定刺激法; 色度椭圆

中图分类号 O432.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092905.1431

Study on Just-Noticeable Color Difference Discrimination Threshold by Using Printed Samples I: Analysis of Visual Evaluation Experimental Data

Huang Min^{1,2} Liu Haoxue¹ Liao Ningfang²

¹ School of Printing and Packing Engineering, Beijing Institute of Graphics Communication, Beijing 102600, China

² National Laboratory of Color Science and Engineering, School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract In order to study the human color vision characteristics, the just-noticeable color difference discrimination threshold experiment at the 17 basic CIE color centers with about 1000 pairs of samples was carried out by 16 observers with normal color vision on the CIE1976 $a^* - b^*$ plane, by using reflective samples color stimuli based on the psychophysical method of constant stimuli. And the color discrimination thresholds were represented via chromaticity ellipses. The detailed processing and analysis of the experimental results indicate that the color discrimination characteristics of human eyes are different for individual color regions and directions in the $a^* - b^*$ plane, and namely the CIE1976 $a^* - b^*$ plane is visually non-uniform. The visual color tolerance in the third and fourth quadrants is smaller than the first and second quadrants, the biggest tolerance is in the region of high chroma orange, and the smallest is in blue. The visual color difference scale in the red-green direction is generally smaller than that in the yellow-blue one for the 17 CIE color centers. The experimental data provides references for the improvement of uniform color space and color-difference formula.

Key words vision and color; color difference threshold; constant stimuli method; chromaticity ellipse

收稿日期: 2008-05-26; 收到修改稿日期: 2008-08-02

基金项目: 国家自然科学基金(60678052)、北京市优秀人才培养(20071D0500400146)和北京市教委(KM200910015006)资助课题。

作者简介: 黄 敏(1979-),女,博士研究生,讲师,主要从事显示设备、输出设备的颜色色差评价,测量及色彩管理技术研究。E-mail: huangmin@bigc.edu.cn

导师简介: 廖宁放(1960-),男,教授,主要从事颜色与彩色图像,光谱成像技术的研究。E-mail: liaonf@bit.edu.cn

1 引 言

颜色的准确复制与评价计算是颜色科学中一项非常重要和基础的研究,在实施色彩管理和评价印刷品颜色时,也需要计算颜色的色差来实现控制颜色的目的。1976 年国际照明委员会(International Commission on Illumination, CIE)提出了均匀颜色空间 CIELAB,极大地改善了颜色空间的均匀性,但该颜色空间仍有很大的不均匀性。小色差尤其是恰可察觉小色差的辨色阈值一直是颜色工业研究的主要课题,在工业上具有极大的实用价值。因此,研究人眼在辨色阈值水平上的颜色视觉特性,对于建立均匀颜色空间和改善各种色差公式具有重要意义。汪哲弘等^[1~6]曾用阴极射线管显示器研究人眼的辨色阈值特性。John H. Xin、C. C. Lam,赵秀萍等^[7,8]对纺织品、光泽铜版纸的 5 个颜色中心区域颜色的可接受色差阈值进行了研究。

在本文的实验研究中,用 Epson 喷墨打印机在半光相纸上对 CIE 1995 年推荐的 17 个颜色中心制作颜色样品,采用心理物理实验方法中的固定刺激法进行视觉评价实验,通过对测得的反射样品恰可察觉小色差的辨色阈值数据进行处理和分析,讨论人眼的颜色视觉特性,为研究人眼的颜色视觉机理和改善色差公式提供原始实验数据。

2 实验方案

2.1 实验设备与颜色刺激

根据 CIE 1995 年推荐的 8 个不同色调的 17 个颜色中心^[9],用 Epson Stylus PRO 7800 喷墨打印机在半光相纸上制作颜色样品。对每个颜色中心首先需要确定中心色样(标样),如表 1 所示,分别为 CIE 推荐颜色中心的 $L^* a^* b^*$ 值和实际制作样品的 $L^* a^* b^*$ 值,颜色测量时,选用 GretagMacbeth Spectro Eye 分光光度计测量,测量条件为 D65/10°,测量的几何条件为 0°/45°。

由于喷墨打印机的色域限制,在高彩黄、高彩绿和高彩蓝绿颜色区域均未达到 CIE 的规定值。固定明度 L^* 值,围绕标样,对 a^* 、 b^* 值进行微小变化,制作大量的颜色样品。2~3 个观察者对颜色样品进行初步筛选,在每个颜色中心周围各确定 50~60 个色样,要求色样的明度值 L^* 与标样的差别不超过 0.5,并且在 $a^* - b^*$ 平面图上比较均匀地分布在标样周围,与标样的色差感觉“似有似无”。视觉评价中选用 Gretag Macbeth The Judge II 多光源

标准观察箱 Day 模式下的光源进行观察(其照度为 1036 lx,色温为 6748 K),与 CIE 推荐的参照条件相符。箱体是灰色背景,一对标样和色样放在中央的位置,并用灰色挡板遮盖(中间挖孔 9 cm × 4.5 cm),同时在一侧粘贴标样(颜色中心),每次只让标样和色样呈现在观察者的视线范围内。观察条件为 0°/45°。由于颜色样品的大小为 4.5 cm × 4.5 cm,观察者在距颜色样品对 25cm 左右处进行观察,颜色刺激色样的视角大于 4°,因此,计算中需采用 CIE1964 补充标准色度系统。

表 1 17 个颜色中心的 CIELAB 色度参量

Table 1 CIELAB chromaticity parameters of the 17

Color centers	test color centers					
	Target CIE values			Measured CIE values		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
Grey	62	0	0	61.9	-0.17	-0.25
Red	44	37	23	45.4	37.1	22.2
Red, high chroma	44	58	36	43.9	57.2	35.6
Orange	63	13	21	63.2	13.5	21.5
Orange, high chroma	63	36	63	60.8	34.8	62.2
Yellow	87	-7	47	85.4	-6.6	47.2
* Yellow, high chroma	87	-11	76	85.8	-9.9	69.9
Yellow-green	65	-10	13	65.3	-10.1	13.1
Yellow-green, high chroma	65	-30	39	64.5	-30.1	40.2
Green	56	-32	0	56.5	-32.0	0.38
* Green, high chroma	56	-45	0	57.8	-37.3	0
Blue-green	50	-16	-11	49.9	-16.2	-10.8
* Blue-green, high chroma	50	-32	-22	51.2	-26.2	-17.8
Blue	36	5	-31	36.4	5.8	-31.8
Blue, high chroma	34	7	-44	35.4	6.8	-44.5
Purple	46	12	-13	46.9	11.5	-13.3
Purple, high chroma	46	26	-26	45.6	26.3	-26.6

2.2 实验过程

整个目视评价实验都是在光暗室中进行的。实验开始前,观察箱需预热 5 分钟。实验开始后,观察者先对灰色挡板进行约 1 分钟左右的亮适应,完成适应后正式开始颜色阈值辨别实验。为使实验简单、易操作,并减少观察者对上次判断的记忆。将色样随机粘成 5~6 条,每 10 个色样为一组,两边以中性灰的纸条包边。完全随机呈现给观察者,每个颜色刺激的观察时间约为 2 s,要求观察者在“第一时间”做出与“标样”有无色差差别的判断。在标样和

色刺激显示期间,周围均以灰色档板遮盖。

共有 16 位观察者参与了实验,全部为北京印刷学院的学生,9 女 7 男,平均年龄在 21 岁,全都色觉正常。12 位没有任何类似观察实验的经验,4 位曾进行过前期颜色样品的初选实验。观察者每次观察 30~40 个色样后需要休息,以避免长时间观察产生的视觉疲劳以及对同一颜色中心色样视觉判断的习惯误差和期望误差、练习误差和疲劳误差。每位观察者每天测试不超过 2 次,每次测试过程的时间不超过 60 min,16 名观察者分别对每对色样在不同的时间评价 3 次。这样共有 $16 \times 3 \times 17 = 816$ 组数据,整个实验的时间跨度约 4 个月(包括颜色样品的制作和样品的初选实验)。

3 实验结果讨论

心理物理实验中的阈值实验技术主要是用来测定刺激的恰可察觉的变化,有时也被称为恰可察觉差(Just-noticeable difference, JND),它得到的是观察者对于刺激变化量的感知性。根据阈限的性质,阈值应该是觉察不到与觉察到之间临界点所对应的刺激强度。从统计学角度看,很自然的做法是把 JND 定义为这样一种刺激强度,即 50% 的次数被觉察,50% 的次数未被觉察。阈值实验方法是颜色视觉研究的重要工具,在色差分辨的研究中常常离不开阈值实验。在心理物理实验中,造成视觉匹配误差的主要原因包括较长时间的观察导致的视觉疲劳、匹配时观察者的心理因素以及视觉匹配实验重复次数相对较少等。在本实验中,每个观察者需要分别对色样与标样“有”或“无”色差感觉,在不同的时间做出 3 次的判断,共有 $3 \times 16 = 48$ 个判断,因此认为实验是符合心理物理实验要求的。

3.1 观察者精度分析

McLaren^[10]采用错误判断率(WD)来研究观察者的重复性和准确性。为了研究观察者的准确性,每一个观察者对每对样品的“有”或“无”色差感觉的判断与整个视觉评价实验的结果相比较。如果一个观察者判断结果是“无”,而整个视觉评判的通过率为 35%(小于 50%),为“有色差”。因此,就可以得出该观察者的判断是错误判断。这种原则适用于所有的样品对。用观察者误判的样品对数除以总的样品对数,结果用 WD 表示,WD 越小,说明观察者判断的准确率越高。同样,也可以用 WD 来表示一个观察者三次判断的重复性。对观察者的精度进行分析得:16 位观察者的重复性的平均值为 21,从 9 变化到 32;准确性的平均值为 24,从 10 变化到 39。与经典数据比较,均在可接受的范围内,因此本次视觉评价实验数据是有效的。

取“无”色差感觉的判断 ≥ 24 的颜色样品,重新进行颜色测量(避免随时间的变化对反射样品颜色造成的影响),进行数据处理。

3.2 色度椭圆

上世纪 70 年代麦克亚当的椭圆形宽容量理论表明人眼对不同色相的颜色敏感程度不同。辨色阈值实验结果用色度椭圆来表示,是合适和有效的^[11]。

对挑选的色差感觉“无”的颜色样品和标样拟合色度椭圆。色度椭圆表示了对应颜色中心区域的阈值轮廓线,其参量包括长半轴 A、长短半轴之比 A/B、轴间角 θ 以及面积 πAB ,实验数据列于表 2,对应的色度椭圆如图 1、2 所示,其中图 1 横坐标表示 CIELAB 色品坐标 a^* ,纵坐标为 b^* (图中的椭圆均为放大 4 倍绘制);图 2 横坐标表示 CIELAB 色品坐标 a^* 的变化量 Δa^* ,而纵坐标则为 b^* 的变化量 Δb^* 。

表 2 恰可察觉色差阈值色度椭圆参量

Table 2 Just-noticeable difference threshold chromaticity ellipse parameters

Color centers	A	A/B	θ	πAB	Color centers	A	A/B	θ	πAB
Grey	0.35	1	90	0.38					
Red	1.35	2.08	48	2.76	Red, high chroma	1.75	1.84	50	5.22
Orange	0.75	1.67	68	1.06	Orange, high chroma	2.95	4.54	74	6.02
Yellow	1.75	3.18	94	3.02	Yellow, high chroma	2.15	3.91	90	3.71
Yellow-green	0.55	2.2	110	0.43	Yellow-green, high chroma	1.35	3	114	1.91
Green	0.85	3.4	158	0.68	Green, high chroma	0.65	1.44	136	0.92
Blue-green	0.45	1.29	68	0.49	Blue-green, high chroma	0.75	1.36	26	1.30
Blue	0.35	2.33	118	0.16	Blue, high chroma	0.45	3	138	0.21
Purple	0.35	1.4	90	0.27	Purple, high chroma	1.85	2.85	128	3.78

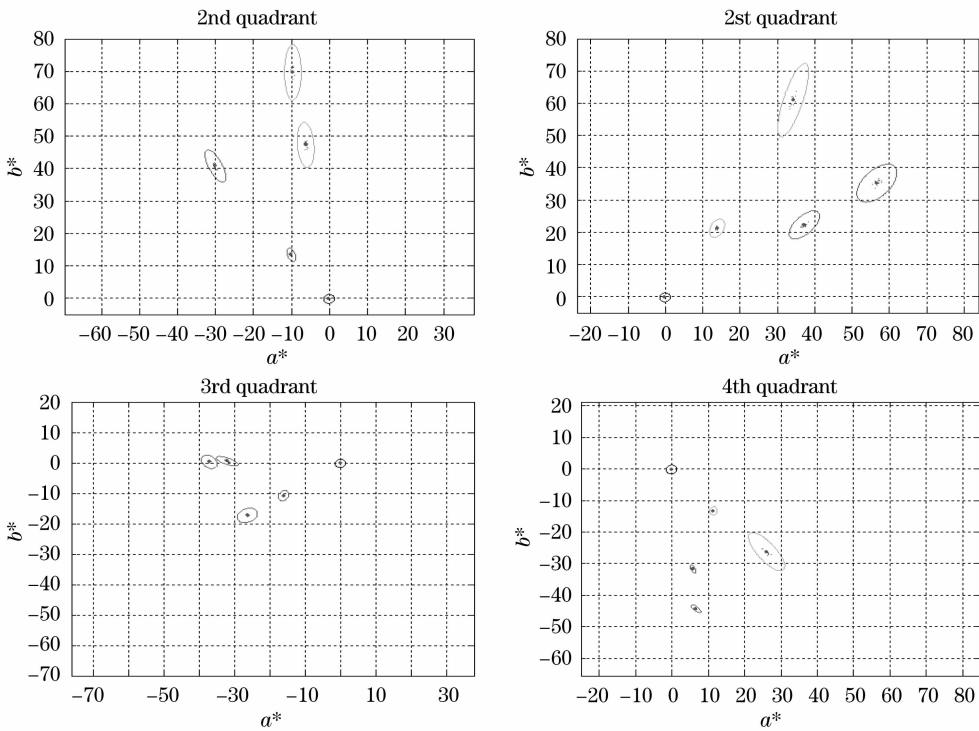


图 1 $a^* - b^*$ 平面上四个象限的色度椭圆

Fig.1 Chromaticity ellipses of four quadrants in $a^* - b^*$ chromaticity diagram

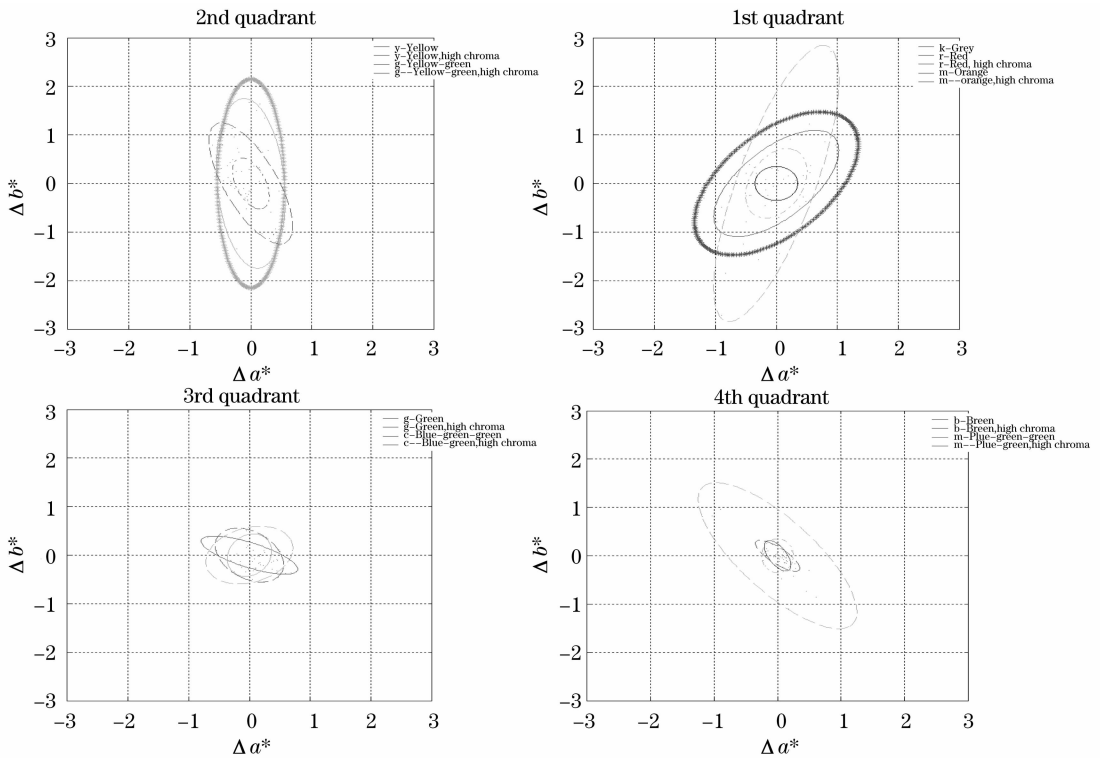


图 2 $\Delta a^* - \Delta b^*$ 平面上四个象限的色度椭圆

Fig.2 Chromaticity ellipses of four quadrants in $\Delta a^* - \Delta b^*$ chromaticity diagram

3.3 实验结果分析

由表 2,图 1、2 可知,人眼对 17 个颜色中心区域的恰可觉察小色差辨色阈值色度椭圆的形状、大

小和朝向均不同,表明 CIE1976 $a^* - b^*$ 平面上各颜色区之间在整体上并非视觉均匀。除蓝色、高彩蓝色中心区域的色度椭圆外,其余 15 个颜色中心的色

度椭圆长轴都基本指向 $a^* - b^*$ 平面的坐标原点,表明人眼对于蓝色区域的视觉特性与其余 15 种色区存在明显的不一致性。对于每种色区,除灰色区域为圆形外,其余各颜色方向上的辨色阈值轮廓线均为椭圆而非理想的圆形,说明 CIELAB 颜色空间的等明度 $a^* - b^*$ 平面上各色区内的局部视觉均匀性也不理想。

如果用视觉色差尺度来表示具有相同视觉色差值的色样对在 CIELAB 颜色空间中所对应的欧几里德距离,那么对于色度椭圆其短轴方向上的视觉色差尺度小于长轴方向。由图 1、2 明显可见,几乎所有的颜色在 a^* 轴(红-绿方向)上的视觉色差尺度均小于 b^* 轴(黄-蓝方向),并且不同色区的差异也不同,这正是 CIELAB 颜色空间中 a^* 轴与 b^* 轴的欧几里德刻度与人眼视觉辨色特性之间存在非均匀性的具体表现。说明,CIELAB 的彩度差和色调差对人眼的刺激是不同的,或者说人眼对色调差更敏感。这也与汪哲弘等对显示器的小色差辨色阈值实

验结果有着较好的一致性^[2]。

实验结果表明,人眼在一、二象限的颜色辨色阈值,明显大于三、四象限颜色的辨色阈值。说明人眼对暖色调的颜色宽容度大于对冷色调颜色的宽容度。人眼对高彩橙颜色具有最高的宽容度,对蓝色具有最低的宽容度,对第四象限颜色实验结果比较也发现,对高彩紫具有明显高于其它颜色的宽容度,在某种程度上也反映了喷墨打印机印制的反射样品颜色的特性。通过对同一色调的不同彩度的两个颜色中心进行比较发现,人眼在高彩度区域的辨色椭圆均不同程度大于同一色调低彩度区域的辨色椭圆。

国际经典色差评价数据中,RIT-Dupont 数据集为 $\Delta E_{ab}^* \approx 1$ 、Witt 数据集为 $\Delta E_{ab}^* \approx 1.9$ 的油漆样品对,本实验数据与 Witt 数据集的实验方法相同(都是选定一个颜色中心进行视觉评价实验),因此选用本实验的 5 个基本颜色中心数据与 Witt 数据集的 5 个基本颜色进行比较。如表 3 和图 3 所示。

表 3 恰可察觉色差阈值色度椭圆参量及与 Witt 数据比较

Table 3 Comparison of JND threshold chromaticity ellipse parameters with Witt dataset

Color centers	This study				Witt($\Delta V \leq 1$)				S_{this}/S_{Witt}
	A	A/B	θ	πAB	A	A/B	θ	πAB	
Grey	0.35	1	90	0.38	1.2	3	106	1.51	0.25
Red	1.35	2.08	48	2.76	3	1.36	32	20.73	0.13
Yellow	1.75	3.18	94	3.02	2.2	5.5	90	2.76	1.09
Green	0.85	3.4	158	0.68	3.2	2.29	166	14.07	0.05
Blue	0.35	2.33	118	0.16	3	3	118	9.42	0.02

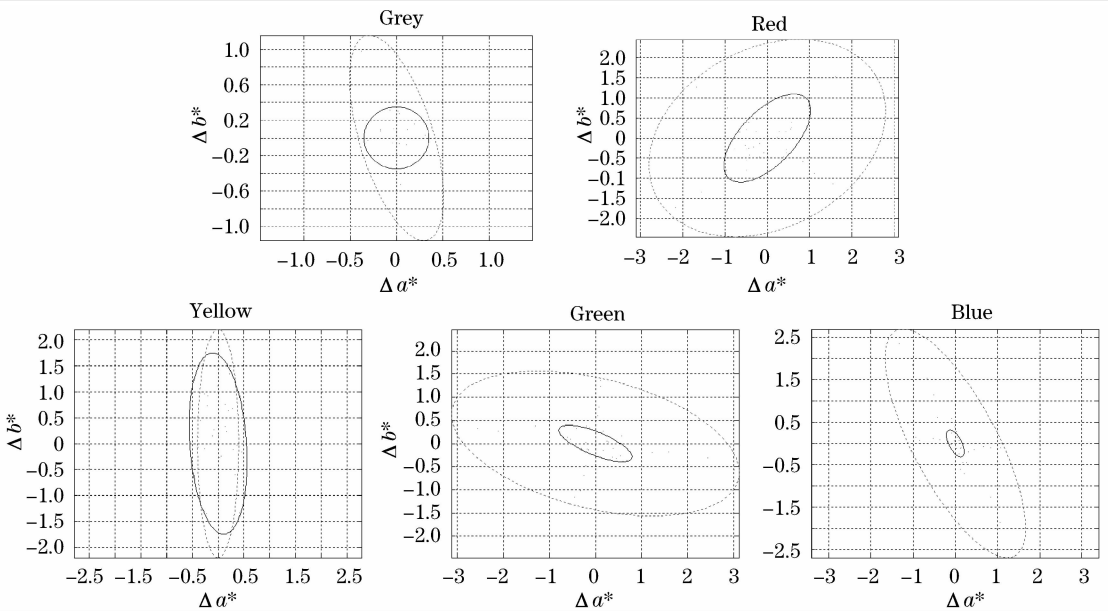


图 3 $\Delta a^* - \Delta b^*$ 平面上本实验和 witt 指数 5 个颜色中心数据的色度椭圆比较

Fig. 3 Chromaticity ellipses of this study and witt dataset of five color centers in $\Delta a^* - \Delta b^*$ chromaticity diagram

图 3 所示,实线为以本次实验数据拟合的色度椭圆,虚线为以 Witt 数据拟合的色度椭圆。椭圆的倾角和形状都基本保持了较好的一致性,但是不同颜色区域,不同色差阈值等级,椭圆面积的相对大小有一定的差异。

同时,以本实验数据的色度椭圆为基准,图 1 与图 4 所示 Luo 和 Rigg^[11] 于 1986 年收集的小色差样品进行实验绘制的宽容量图在不同色区的整体分布趋势和规律表现一致;表 3 中相应色度椭圆的参数和图 3 色度椭圆的形状、大小和倾角与汪哲弘^[2] 等对 CRT 自发光颜色和典型的表面色差数据等的计算结果也表现了较好的一致性。

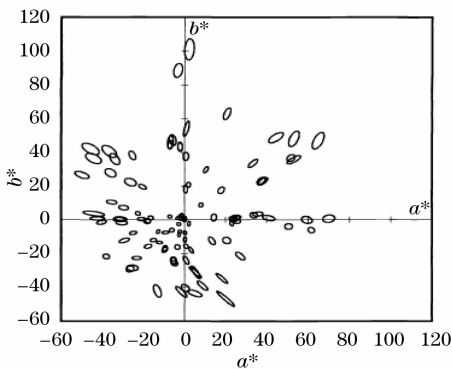


图 4 a^*b^* 图中的 Luo 和 Rigg 实验颜色辨别椭圆

Fig. 4 Experimental color discrimination ellipses plotted in a^*b^* diagram of Luo and Rigg

4 结 论

对反射样品的 17 个颜色中心,每个颜色中心周围设计 50~60 个色样进行人眼恰可察觉小色差的辨色阈值的心理物理实验,以研究人眼在辨色阈值水平上的颜色视觉特性。以 50% 的判断作为阈值的界限,具有统计的意义。通过色度椭圆对辨色阈值数据的表征和分析可知,CIELAB 颜色空间的等明度 a^*-b^* 平面对人眼辨色特性的欧几里德描述,无论是各色区之间的整体上,还是每个色区内各颜色方向之间的局部上都是非视觉均匀的。

具体而言,人眼在 17 个颜色中心,所有的颜色在 a^* 轴(红-绿方向)上的视觉色差尺度均小于 b^* 轴(黄-蓝方向),人眼对色调差的敏感度高于对彩度差的敏感度;人眼对一、二象限颜色的视觉色差尺度大于三、四象限颜色的视觉色差尺度,人眼对高彩橙色具有最高的宽容度,对蓝色具有最低的宽容度;对于同一色调的两种颜色中心,高彩度的颜色视觉色差尺度大于低彩度的颜色。因此,在均匀颜色空

间及其色差公式的研究中,必须充分测试和分析人眼的颜色视觉特性,使之真正达到视觉均匀的描述和表征。

参 考 文 献

- Haisong Xu, Hirohisa Yaguchi. Visual evaluation at scale of threshold to supra threshold color difference[J]. *Color Research and Application*, 2005, **30**(3):198~208
- Wang Zhehong, Xu Haisong. Study on color discrimination threshold using CRT display part I: analysis of experimental data and human color vision characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6):1139~1143
汪哲弘, 徐海松. 用阴极射线管显示器研究辨色阈值 I: 实验数据及人眼颜色视觉特性分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6):1139~1143
- Wang Zhehong, Xu Haisong. Study of color discrimination threshold using CRT display. Part II: evaluation of classical color-difference formulae[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7):1344~1348
汪哲弘, 徐海松. 用阴极射线管显示器研究辨色阈值 II: 典型色差公式评价[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7):1344~1348
- Li Wei, Yuan Xiaolei. Visual evaluation of moderate and large color-differences—effect of color-difference size on color-difference evaluation[J]. *Progress in Natural Science*, 1999, **9**(9):696~702
- Cui Guihua, Li Wei, Fan Qiumei *et al.*. Study of the parametric effects in colour-difference evaluation using CRT display[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(4):426~432
崔桂华, 李 为, 范秋梅 等. 用阴极射线管显示器研究影响色差知觉的因素[J]. *光学学报*, 2001, **21**(4):426~432
- 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
- J. H. Xin, C. C. Lam, M. R. Luo. Evaluation of the crispening effect using CRT-displayed colour samples [J]. *Color Research and Application*, 2004, **29**(5):374~380
- Zhao Xiuping, Phil Green. Evaluating acceptability threshold and weighting for color difference on gloss paper reproduction[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, **31**(9):814~817
赵秀萍, Phil Green. 彩色印刷复制中色差公式加权系数的计算和可接受阈值的评价[J]. *武汉大学学报. 信息科学版*, 2006, **31**(9):814~817
- J. H. Xin, C. C. Lam. Comparative study of visual color differences using reflective and self-luminous color stimuli [C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4421**: 630~633
- Xu Haisong. *Color Information Engineering* [M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2005. 88~90
徐海松. *颜色信息工程* [M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2005. 88~90
- McLaren, K. 1970. Colour passing-visual or instrumental[J]. *J. the Society of Dyers and Colourists*, **86**:389~3392
- S. S. Guan, M. R. Luo. Investigation of parametric effects using small colour-differences[J]. *Color Res. Appl.*, 1999, **24**(5):331~343
- Luo M. R., Rigg B. Chromaticity-discrimination ellipse for surface colours[J]. *Col. Res. Appl.*, 1986, **11**:25~42