

文章编号: 0253-2239(2008)03-0599-05

颜色视觉匹配中显示器颜色色差阈值的评价

黄 敏^{1,2} 廖宁放¹ 刘浩学² 徐艳芳²

(¹ 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)
² 北京印刷学院 印刷与包装工程学院, 北京 102600

摘要 为了对阴极射线管(Cathode ray tube, CRT)显示器颜色恰可辨别的小色差阈值进行评价,在中性灰背景下,用编制的颜色匹配程序,在 CRT 显示器上随机产生颜色,分别调节程序中 R、G、B 通道的值,使匹配色与随机色达到视觉上的一致,进行颜色视觉匹配实验,测量 CRT 显示器上随机色和匹配色的 $L^* a^* b^*$ 值。用不同的色差公式对实验数据分别从明度、色调、饱和度进行比较分析,色差公式评价小色差的性能是 CIEDE2000 优于 CMC (2:1) 和 CIE $L^* a^* b^*$ 。在 $a^* b^*$ 图上绘制实验颜色恰可辨别图。不同色差公式计算的 CRT 显示器恰可辨别小色差阈值不同。

关键词 视觉与色彩; 色差阈值; 颜色视觉匹配; 色差公式

中图分类号 O432.3 **文献标识码** A

Cathode-Ray Tube Color Perceptible Color Difference Threshold Evaluation in Visual Color Matching

Huang Min^{1,2} Liao Ningfang¹ Liu Haoxue² Xu Yanfang²

¹ National Laboratory of Color Science and Engineering, School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

² School of Printing and Packing Engineering, Beijing Institute of Graphics and Communication, Beijing 102600, China

Abstract For the evaluation of cathode-ray tube (CRT) perceptible color difference threshold characteristics of the visual color matching, the experiment is carried out. By using the compiled color-matching program, the CRT generates color under gray background randomly. The matching color and the random color can achieve visual color matching by adjusting the R, G and B channels in the program, then the values of L^* , a^* and b^* of the matching color and the random color are measured respectively. Upon the data processing and analysis of the experimental results, in terms of lightness, chroma and hue, the color difference formula CIEDE2000 is superior to CMC (2:1) and CIE $L^* a^* b^*$ in different aspects. Then experimental color discrimination are plotted in $a^* b^*$ diagram. Furthermore, different color difference formulae have different thresholds for evaluating CRT perceptible color difference threshold.

Key words vision and color; color difference threshold; visual color matching; color difference formula

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的研究。随着数字化技术的不断发展,图像处理已经从模拟方式转变为数字方式,可以实现

对图像颜色的准确评价与计算。近年来,高品质的阴极射线管显示器在复制颜色上的精确度和稳定性不断提高,尤其是在计算机控制下容易产生视觉实验所需要的各种刺激图形、颜色再现和时空变换灵

收稿日期: 2007-06-12; 收到修改稿日期: 2007-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(60678052)、北京市优秀人才培养基金(20071D0500400146)和北京市信号与信息处理重点学科建设学科(E-e-05-108)资助课题。

作者简介: 黄 敏(1979—),女,安徽宁国人,博士研究生,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等方面的研究。E-mail: huangmin@bigc.edu.cn

导师简介: 廖宁放(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事颜色与彩色图像、光谱成像技术等方面的研究。E-mail: liaonf@bit.edu.cn

活方便。汪哲弘等^[1~5]曾用灰标法评估阴极射线管显示的 5 个基本颜色中心的色差样对,研究不同色差公式的色差预测性能,得出 CIEDE2000 的色差预测性能最好,其次为 CMC 和 CIE94, CIEL**a***b** 最差。John H. Xin 等^[6]用灰标法对 CRT 显示器和反射样品的 5 个基本颜色中心进行视觉实验,比较了 CRT 显示器和反射样品的辨色椭圆的形状。Tao Song 等^[7]分析了 CRT 显示器上彩色图像的色差阈值,得出 $\Delta E_{a^*b^*}$ 的恰可察觉色差阈值为 2.1。

本文采用视觉实验中最简单的方法—直接调整法,用编制的颜色匹配程序,在中性灰的背景下,在 CRT 显示器上随机产生颜色,实现大样本数据采集,使随机色的分布基本涵盖了 CRT 显示器的显色范围,进行人眼视觉颜色匹配,分析 CRT 显示器上匀色色块的恰可察觉的色差阈值。同时,应用视觉匹配数据分别在明度、色调、彩度方面对 CIEL**a***b**、CMC (2:1)、CIEDE2000 色差公式进行比较,评价不同色差公式计算恰可察觉色差值的均匀性,为色差评价模型、色差公式的修正和改善提供原始数据。

2 实验方案

2.1 实验设备与颜色刺激

采用 syncMaster753DFX 彩色阴极射线管显示器,根据增益-偏置-伽马模型(Gain-offset-Gamma, GOG)对阴极射线管进行特性化^[8],由于整个实验数据采集持续时间较长,特性化的目的是为使显示器在整个实验数据采集阶段保持较一致的工作状态。显示器 D65 白场,亮度为 100 cd/m²,在如图 1 所示,color-matching 程序的颜色视觉匹配界面产生相应的颜色刺激。实验采用直接调整法,是最简单和最易操作的视觉匹配方法。由于视觉匹配刺激色样的视角 2°左右,所以在计算中采用了 CIE1931

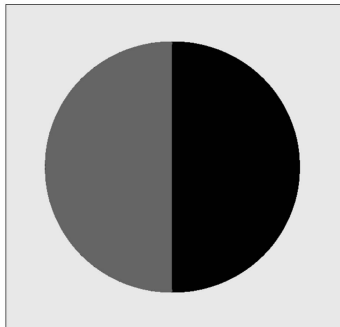


图 1 调节颜色的颜色视觉匹配实验

Fig. 1 Visual color matching experiment for adjusting each color patch

标准色度系统。

2.2 实验过程

先对阴极射线管进行半小时左右的预热。观察者需要 1 分钟左右的亮适应,观察显示器上的中性色,完成适应后正式开始颜色匹配实验,然后在阴极射线管上产生随机色,出现如图 1 所示的颜色刺激。随机色的产生完全随机,没有任何规律性,并且随机色的分布基本涵盖了显示器的显色范围。左半圆为显示器产生的随机色,右半圆为观察者实验过程中需要调节的匹配色,其初始状态为 $R=G=B=0$,变化范围从 0~255。观察者通过调节程序中 *R*、*G*、*B* 通道中的数值来控制右半圆的颜色,使匹配色与随机色达到视觉上的一致。观察者的操作匹配时间需在 2 min 内完成(避免较长时间造成视觉疲劳),用 Monaco Optix Pro 色度仪直接吸附在 CRT 显示器的屏幕上分别测量随机色和匹配色的 $L^*a^*b^*$ 值。

实验分两个方面进行:

1) 每个观察者完成 2 对颜色的匹配,共有 250 名观察者,年龄在 20~55 岁,全都色觉正常,基本没有类似视觉实验的观察经验。每次数据采集基本都是在《色彩学》实验课开始前进行。为避免观察者视觉疲劳及实验时间考虑,每个观察者匹配 2 对颜色。

2) 对图 1 中产生的随机色进行匹配,微调 RGB 通道中的数值,采集到能与随机色匹配的颜色 $L^*a^*b^*$ 值,4 名具有正常视觉的观察者同时进行颜色视觉判断,全部实验的数据历时 1 个月完成,在 a^*b^* 平面上做出恰可辨别颜色的分布图。

3 实验结果讨论

3.1 观察者精度

为了评价测试数据的有效性,首先需要分析观察者的测试重复性和准确度。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。与国际上公开发表的相关实验进行比较可知^[1,9],由于直接调整法的操作相对简便,对观察者的要求不高,而且随机色与匹配色出现在同一界面,较为直观,颜色匹配在 2 分钟之内完成,所以本实验的观察者精度优于该类心理物理实验,具有可信度。

首先对实验 1) 中采集到的 500 对数据进行初步筛选,发现 CIEL**a***b** 色差值大于 5 的数据对共有 17 对,分布在不同的明度、色调和彩度区域,因此可以认为是由于评价者的匹配误差和测量误差导致,不会对实验结果产生影响,可以删除。

实验 2) 中的 299 对数据是 4 名具有正常视觉的观察者同时进行颜色视觉判断得到的, 因此认为是真实可信的。

3.2 实验结果分析

分别从明度、色调、彩度三方面来分析实验 1) 中的 483 对数据与色差公式间的关系。

3.2.1 明度的影响

对实验数据按明度划分, 每间隔 $L^* = 10$ 为一个等级, 0~10 (3 对), 10~20 (6 对), 20~30 (28 对), 30~40 (49 对), 40~50 (86 对), 50~60 (92 对), 60~70 (82 对), 70~80 (63 对), 80~90 (63 对), 90~100 (11 对), 可见显示器产生的随机色大多数集中在中等亮度范围, 如图 2 所示。

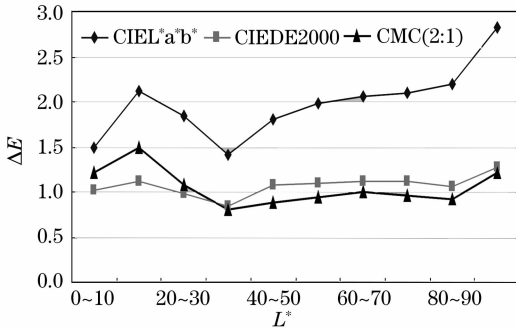


图 2 不同明度下的 CIEL* a* b*、CMC(2:1)、CIEDE2000 色差值

Fig. 2 Color difference values ΔE of CIEL* a* b* , CMC(2:1) and CIEDE2000 of different lightness

可见, CIEL* a* b*、CMC(2:1)、CIEDE2000 在明度值 L^* 为 30~40 时, 色差阈值最小, 说明眼睛对中等明度范围颜色的分辨能力最强。CIEL* a* b* 色差值随着明度的增大, 色差阈值也在逐渐增大, 在高明度时的色差阈值较大, 这与 Tao Song 等^[7]的实验结果较为一致, 人眼对亮调的颜色分辨能力较低。CMC(2:1)、CIEDE2000 在低、中、高明度的色差阈值除在明度值 L^* 为 10~20 和 30~40 有峰值外, 其余明度区域变化比较平缓。表明在评价显示器的恰可辨别小色差时, 在 CIEL* a* b* 基础上修正的色差公式 CMC(2:1)、CIEDE2000 具有较好的明度预测性^[10]。CIEDE2000、CMC(2:1)、CIEL* a* b* 的均方差值 σ 依次为 0.11、0.20、0.40。

3.2.2 彩度的影响

对实验数据按彩度划分, 每间隔 $C=10$ 为一个等级, 0~10 (10 对), 10~20 (49 对), 20~30 (65 对), 30~40 (77 对), 40~50 (56 对), 50~60 (57 对), 60~70 (71 对), 70~80 (32 对), 80~90

(37 对), 90~100 (15 对), 100 以上 (14 对), 可见显示器产生的随机色大多数集中在中等彩度范围, 如图 3 所示。

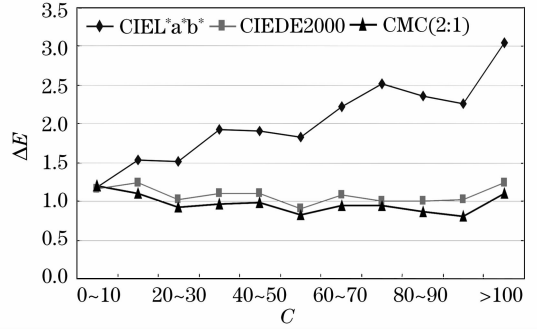


图 3 不同彩度下的 CIEL* a* b*、CMC(2:1)、CIEDE2000 色差值

Fig. 3 Color difference values ΔE CIEL* a* b* , CMC(2:1) and CIEDE2000 of different chromas

可见, CIEL* a* b* 的色差阈值随彩度的增加基本上保持增加的趋势, 表明人眼对于色差的分辨能力随彩度的增加而下降。CMC(2:1)、CIEDE2000 色差公式针对这一现象进行了修正, 因此色差阈值比较一致。在评价显示器的恰可辨别小色差时, 在 CIEL* a* b* 基础上修正的色差公式 CMC(2:1)、CIEDE2000 具有较好的彩度预测性。CIEDE2000、CMC(2:1)、CIEL* a* b* 的均方差值 σ 依次为 0.10、0.12、0.52。

与 Luo 等^[11]收集的小色差样品进行实验绘制的宽容量图表现一致。他们收集了大多数的表面色的实验数据, 集中绘出了 120 多个辨别椭圆, 这是第一次在 $a^* b^*$ 色度图中进行的研究, 如图 4 所示。

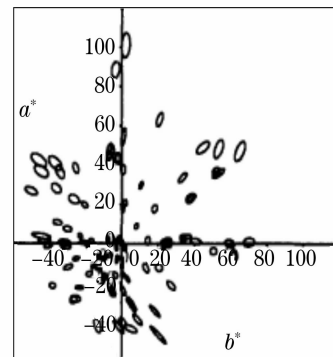


图 4 $a^* b^*$ 图的实验颜色辨别椭圆

Fig. 4 Experimental color discrimination ellipses plotted in $a^* b^*$ diagram in Ref. [11]

3.2.3 色调的影响

对实验数据按色调划分, 参照 Munsell 表色系统的 5 个主色调和中间色调的划分, 每 36° 为一个单

位。如表 1 所示。

表 1 不同色调下的 CIEL* a* b*、CMC(2:1)、CIEDE2000 色差值
Table 1 CIEL* a* b*, CMC(2:1), CIEDE2000 of different hues

Degree (pairs)	CIEL* a* b* CMC(2:1)	CIEDE2000	
0°~36°(49 pairs)	1.86	1.03	1.14
36°~72°(34 pairs)	1.81	1.24	1.15
72°~118°(30 pairs)	2.15	1.06	1.17
118°~144°(92 pairs)	2.26	0.92	1.06
144°~180°(52 pairs)	2.23	0.93	1.05
180°~216°(27 pairs)	1.73	0.97	1.15
216°~252°(25 pairs)	1.64	0.96	1.08
252°~288°(38 pairs)	1.79	1.04	1.11
288°~324°(97 pairs)	1.91	0.85	0.95
324°~360°(39 pairs)	1.98	0.86	1.05

可见,在 72°~118°的 Y,118°~144°的 GY,144°~180°的 G 色色差阈值分别为 2.15,2.26 和 2.23 相对较大,说明人眼对这三个色调的颜色较不敏感,分辨能力较弱;在 180°~216°的 B,216°~252°的 BP 色色差阈值为 1.73 和 1.64 相对较小,说明人眼对蓝色和蓝紫色较为敏感,分辨能力较强。这与图 4 所示的 Luo 等对于小色差的实验结果也较为一致。针对这种现象,CMC(2:1),CIEDE2000 色差公式都在不同程度上做了修正,色差阈值在不同色调区域比较一致。CIEDE2000、CMC(2:1)、CIEL* a* b* 的均方差值 σ 依次为 0.21、0.11、0.07。

通过对上述 483 对试验数据的计算,可知 CIEL* a* b*、CMC(2:1)、CIEDE2000 在计算 CRT 显示器的恰可辨别色差阈值分别为 1.94,0.99 和 1.09。色差公式评价小色差的性能依次是 CIEDE2000 色差公式优于 CMC(2:1)优于 CIEL* a* b*。

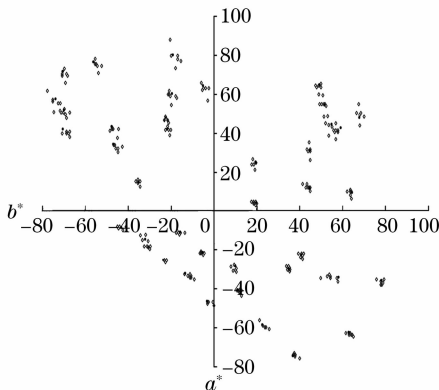


图 5 a^*b^* 平面上的恰可辨别颜色分布图

Fig. 5 Experimental color discrimination in a^*b^* diagram

3.2.4 颜色宽容量的分析

用实验 2) 中的 299 对数据,在 a^*b^* 平面图绘出颜色恰可辨别的分布图,其中实心圆点表示显示器产生的随机色,空心菱形点表示匹配色,如图 5 所示(恰可辨别分布图放大两倍绘制)。

由图 5 可见,实验结果在色调和彩度方面基本验证了图 4 所示 Luo 等对于小色差实验的实验结果:彩度越大,宽容量越大;Y、G、YG 区域的宽容量大。另外发现,第一象限彩度较大的黄红色区域,大多数的匹配色指向都朝向 a^* 轴,这可能与本文所采用的方法、样品的呈色形式以及观察匹配重复次数不足等因素有关,在某种程度上也说明该颜色区域的变化规律。

由于实验方案用 RGB 调节颜色实现颜色匹配,RGB 与 $L^*a^*b^*$ 对应有非线性的映射关系,因此导致围绕每个随机色,没有寻找到所有能在 a^*b^* 平面图上直观反应出来的与随机色匹配的颜色,再加上观察匹配次数不足等因素影响,无法在 a^*b^* 平面图上画出辨别椭圆,这也是下一步实验需要继续完善的工作。

4 结 论

在 CRT 显示器上进行颜色匹配实验,通过 483 对实验数据的分析,得到 CIEL* a* b*、CMC(2:1)、CIEDE2000 的恰可辨别色差阈值分别为 1.94,0.99 和 1.09。分别用色差公式在明度、色调、彩度方面分析对颜色表现的影响,色差公式评价小色差的性能依次是 CIEDE2000 色差公式优于 CMC(2:1)和 CIEL* a* b*。

通过 299 对实验数据,在 a^*b^* 平面图上绘出恰可辨别颜色的宽容量分布图,发现大多数颜色区域与 Luo 等对于小色差实验的实验结果较为一致,在第一象限的饱和度较高的黄红色区域,大多数的匹配色指向都朝向 a^* 轴,在某种程度上也说明该颜色区域的变化规律。

参 考 文 献

- Haisong Xu, Hirohisa Yaguchi. Visual evaluation at scale of threshold to suprathreshold 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

- 3 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
- 4 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
- 5 Cui Guihua, Li Wei, Tan 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
- 6 J. H. Xin, C. C. Lam. Comparative study of visual color differences using reflective and self-luminous colour stimuli[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4421**: 630~633
- 7 Tao Song, M. R. Luo. Testing color difference formulae on complex images using CRT monitor[C]. *Proc. IS&T/SID 8th Color Imaging Conference*, 2000. 44~48
- 8 Roy S. Berns. Methods for characterizing CRT displays[J]. *Displays*, 1996, **16**(4): 173~182
- 9 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
- 10 Wang Zhehong, Xu Haisong. Lightness threshold evaluation in visual color matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1274~1278
汪哲弘, 徐海松. 颜色视觉匹配中明度阈值的评价[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1274~1278
- 11 M. R. Luo, B. Rigg. Chromaticity-discrimination ellipses for surface colours [J]. *Color Research and Application*, 1986, **11**(1): 25~42