

文章编号: 0253-2239(2006)08-1274-5

颜色视觉匹配中明度阈值的评价*

汪哲弘 徐海松

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 为了对颜色视觉匹配中的明度阈值特性进行评价, 采用在阴极射线管显示器上获得的颜色刺激, 在 5 个不同明度的中性色背景下, 标准刺激的明度 L^* 从 5 到 95 以 5 个 CIELAB 单位为变化步长, 共对 19 个不同明度的中性标准颜色进行视觉匹配实验。通过对实验结果的处理和分析, 验证了关于颜色刺激视觉辨别明度阈值与背景明度之间相关性的韦伯法则和 crispening 效应, 同时利用颜色视觉匹配数据对基于 CIELAB 的相关色差公式进行了评价和比较, CIEDE2000 具有最好的明度差预测性能, CMC 次之, CIELAB 和 CIE94 最差。

关键词: 视觉与色彩; 明度阈值; 颜色视觉匹配; Crispening 效应; 韦伯法则

中图分类号: TN942.1 文献标识码: A

Lightness Threshold Evaluation in Visual Color Matching

Wang Zhehong Xu Haisong

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: For the evaluation of lightness threshold characteristics of the visual color matching the experiment is carried out. By using cathode-ray tube (CRT)-generated color stimuli under five different gray backgrounds, the visual color matching is achieved for 19 neutral standard stimuli with their lightness L^* ranging from 5 to 95 by the step of 5 CIELAB unit. Upon the data processing and the analysis of the experimental results, the crispening effect and the Weber's law, which are about the correlation between the visual lightness discrimination threshold of color stimuli and the lightness of the background, are validated. Furthermore the visual color matching data from the present experiment are used to evaluate the CIELAB-based related aberration formulae. For the lightness-difference predicting, the CIEDE2000 outperforms the others, followed by CMC, and with CIE94 and CIELAB the poorest.

Key words vision and color; lightness threshold; visual color matching; crispening effect; Weber's law

1 引 言

由于背景颜色的改变而造成颜色感受差异的变化称为 crispening 效应^[1,2]。这个效应由 Semmelroth 首先在他的研究论文中提出^[1], 发现由于背景明度的改变而产生了很明显的明度感受差异的变化。韦伯法则和 crispening 效应都是关于颜色刺激视觉辨别明度阈值与背景明度之间关系的规律, 其中前者分析了背景明度对颜色刺激明度衬比度的影响, 而后者则说明了颜色样品对明度差对背景明度的依存性。新近

的研究进一步表明^[2,3], 在色样明度差与背景明度的相关性中存在 V 字型的变化趋势。

在本文的实验研究中, 通过对 19 组不同明度的中性色刺激分别在 5 种不同的灰色背景条件下, 进行人眼视觉颜色匹配, 以分析 crispening 效应的特性, 并测试明度辨别的韦伯比。同时, 应用视觉匹配数据对 CIELAB、CMC、CIE94、CIEDE2000 等典型色差公式^[3~6]的明度权重函数进行了比较和评价, 为色差评价模型的修正和改善提供原始数据。

* 国家自然科学基金(60578011)资助课题。

作者简介: 汪哲弘(1981~), 男, 浙江嘉兴人, 浙江大学博士研究生, 主要从事颜色科学、图像技术等方面的研究。

E-mail: wangzhehong1981@126.com

导师简介: 徐海松(1966~), 男, 江苏人, 浙江大学教授, 主要从事颜色科学、视觉与图像工程、光电技术、光学工程方面的研究。E-mail: chsxu@zju.edu.cn

收稿日期: 2005-10-09; 收到修改稿日期: 2005-11-30

2 实验方案

2.1 实验设备与颜色刺激

采用与观察者相距 500 mm 的 Neso FD570A 彩色阴极射线管显示器,根据增益-偏置-伽马模型 (Gain-offset-Gamma, GOG)^[7]对阴极射线管进行特性化,并产生相应的颜色刺激,在暗室中进行颜色视觉匹配实验。观察者都是浙江大学的在读硕士研究生,全都色觉正常,基本没有类似视觉实验的观察经验。实验采用直接调整法 (method of adjustment),这是最简单和最易操作的视觉匹配方法。颜色刺激为两个位于阴极射线管中央的 $1^\circ \times 1^\circ$ 的正方形色块,并列组成有 1 个像素黑线分割的色样对,其中一个为标准刺激,另一个为测试刺激,其背景为 $6^\circ \times 6^\circ$ 的中性灰色以避免彩色背景对视觉明度判断的影响,如图 1 所示。背景和标准刺激的 CIELAB 参量如表 1 所示。背景外侧是 $8^\circ \times 8^\circ$ 的白色边框,其亮度值为 100 cd/m^2 ,色品坐标采用 D65 的对应参量。白框用于确定匹配时的白点,并使阴极射线管显示器产生的颜色为相关色而非孤立色。白框的外围则全部为黑色。由于视觉匹配刺激色样的视角为 2° 左右 (小于 4°),所以在计算中采用了 CIE1931 标准色度系统。

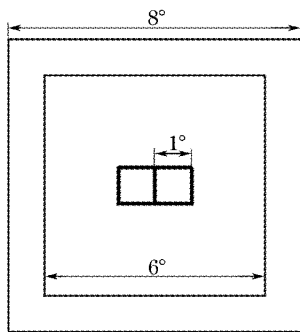


图 1 颜色视觉匹配实验中的测试刺激图样

Fig. 1 Test stimulus arrangement used in visual color matching experiment

表 1 背景和标准刺激的 CIELAB 值

Table 1 CIELAB values of background and standard stimuli

CIELAB	L^*	a^*	b^*
Background	5, 25, 50, 75, 95	0.11	0.04
Standard	5~95 ($\Delta L^* = 5$)	0.11	0.04

2.2 实验过程

实验开始前,先对阴极射线管进行半小时左右的预热。之后,首先在全黑屏情况下经过 3 min 的

暗适应,然后阴极射线管上出现如图 1 所示的颜色刺激图样并进入 1 min 的亮适应过程。完成色适应后正式开始视觉匹配,观察者通过计算机键盘上的按键来调节测试刺激的明度,当判断测试刺激和标准刺激的颜色一致时,软件自动保存包括颜色的 L^* 值在内的各种结果数据。对观察者的匹配操作时间没有具体的限制,但从实验结果来看,每对色样的视觉匹配时间约为 3~5 min,每次实验匹配一组即 3~4 对色样,共需 15~25 min。在每次实验启动时,由软件随机确定标准刺激与测试刺激的相对位置,以避免观察者的心理预期想像和判断偏差。每个观察者对每对色样各进行 2 次匹配实验,以评价观察者的匹配重复性并保证实验结果的精度。整个实验共设 5 种背景明度、19 个标准刺激明度,每对色样匹配两次,因此每个观察者需要进行 $5 \times 19 \times 2 = 190$ 次视觉匹配实验,全部实验历时三个月完成。

3 实验结果与讨论

3.1 观察者精度

在心理物理实验中,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。Luo 和 Rigg 采用性能因子 PF 值 (Performance Factor) 来对两个数据集的一致性进行定量比较,之后 Guan 和 Luo 又将其改进为 $PF/3$ 值^[8],其表达式为

$$PF/3 = 100 \left[(\gamma - 1) + V_{AB} + \frac{CV}{100} \right], \quad (1)$$

式中

$$\begin{cases} CV = 100 \sqrt{\frac{1}{N} \sum (X_i - fY_i)^2} / \bar{X}, \\ f = \sum X_i Y_i / \sum Y_i^2, \end{cases} \quad (2)$$

$$\lg \gamma = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\lg \left(\frac{X_i}{Y_i} \right) - \lg \left(\frac{\bar{X}}{\bar{Y}} \right) \right]^2}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} V_{AB} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \frac{(X_i - FY_i)^2}{X_i FY_i}}, \\ F = \sqrt{\sum \frac{X_i}{Y_i} / \sum \frac{Y_i}{X_i}}, \end{cases} \quad (4)$$

其中 N 是被比较的色样数据对数, X_i 和 Y_i 分别是第 i 对被比较的两个对应数据。较高的 $PF/3$ 值表示被比较的数据集之间具有较差的一致性,如 $PF/3$ 值为 30 代表数据集之间的不一致性为 30%。

取每种视觉匹配条件下单个观察者 2 次测试数据的平均值作为参照值,可以计算出每个观察者以 $PF/3$ 值表示的测试重复性,如表 2 所示。可见,所

有观察者的测试重复性均在 10 个 $PF/3$ 单位以下。

以每种视觉匹配条件下所有观察者测试数据的平均值作为基准,可以计算出每个观察者的匹配结果与平均数据之间的一致性,并采用 $PF/3$ 值来评价观察者的测试准确度。由此,在 5 个背景明度下每个观察者的 $PF/3$ 值如表 3 所示。可见,所有观察者的 $PF/3$ 值均在 1.5~12 之间,除观察者 2 (YJ) 在背景明度为 50 时的 $PF/3$ 值为 11.96 之外,其余的 $PF/3$ 值都在 10 以下。

表 2 五种不同背景下的观察者重复性($PF/3$ 表示)

Table 2 Observer repeatability in terms of $PF/3$ under five different backgrounds

Background Lightness	5	25	50	75	95
Observer 1 (ZH)	1.55	3.05	3.01	0.88	1.72
Observer 2 (YJ)	3.34	1.43	7.91	3.06	8.99
Observer 3 (XG)	4.75	4.22	1.96	9.40	6.39
Mean	3.48	3.14	5.09	5.69	6.26

表 3 五种不同背景下的观察者准确度($PF/3$ 表示)

Table 3 Observer accuracy in terms of $PF/3$ under five different backgrounds

Background Lightness	5	25	50	75	95
Observer 1 (ZH)	2.65	2.00	2.68	1.49	5.6
Observer 2 (YJ)	2.17	2.49	11.96	1.70	3.65
Observer 3 (XG)	2.84	2.90	5.65	3.56	6.33
Mean	2.71	2.63	8.07	2.65	5.53

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^[9,10],由于直接调整法的操作相对简便,对观察者的要求不高,而且只需要进行单方向的明度匹配,所以本实验的观察者精度明显优于该类心理物理实验。

3.2 韦伯法则的验证

在亮度为 L 的背景中,把视觉可以辨认出的最小亮度差 ΔL 称为亮度辨别阈值或增量。研究表明^[11],在背景亮度非常低的时候, ΔL 是一个确定的值;随着背景亮度的提高, ΔL 也会增大,而衬比度 $\Delta L/L$ 趋于不变。 $\Delta L/L$ 具有的确定关系称为韦伯法则(Weber's law),并称衬比度 $\Delta L/L$ 为韦伯比(Weber ratio)。韦伯比受刺激显示条件的影响,在最低条件下可达 0.01 以下。

将本实验中在 5 种背景明度条件下不同标准刺激的颜色视觉匹配实验数据进行分组,对属于同一

匹配条件(包括背景和标准刺激)下不同观察者的测试数据求其平均值,共有 $5 \times 19 = 95$ 个数据,并按背景明度的不同而分为 5 组,从而得到了如图 2 所示的 5 条对应于不同背景明度的韦伯比 $\Delta L^*/L^*$ 随刺激明度 L^* 而变化的曲线。

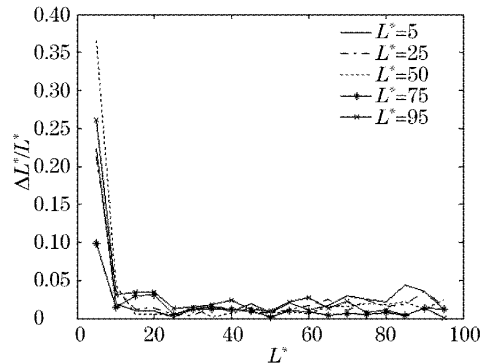


图 2 五种不同背景下的韦伯比

Fig. 2 Weber ratio under five different backgrounds

由图 2 可见,当刺激明度较小($L^* < 10$)时,由于增量 ΔL^* 基本稳定,所以韦伯比 $\Delta L^*/L^*$ 呈单调下降趋势;当 L^* 进一步提高时, ΔL^* 也随之增大,所以 $\Delta L^*/L^*$ 趋于一个稳定的数值,其变化幅度在 0.05 以内,并且其中最小的韦伯比在 0.01 以下,基本上验证了在本次视觉颜色匹配实验中韦伯法则的存在。

3.3 crispening 效应与色差公式的评价

为了分析颜色视觉匹配中的 crispening 效应与色差评价公式的关系,图 3 给出了 5 种不同背景明度条件下明度辨别阈值 ΔL^* 以及 CIELAB、CMC、CIE94 和 CIEDE2000 色差公式的明度权重函数 S_L 随测试刺激明度 L^* 而变化的趋势曲线。其中由于在标准刺激的明度值为 50 时,CIEDE2000 的色差值具有最小值 1,所以将图中所有的明度辨别阈值 ΔL^* 在纵轴方向进行了平移,使当标准刺激的明度值为 50 时的 ΔL^* 为 1,以便与各色差公式的 S_L 值进行比较。

由图 3 可见,当标准刺激与背景的明度值接近时,其明度辨别阈值较小,即视觉色差的灵敏度较高,所以容易分辨。随着标准刺激与背景明度差的提高,明度辨别阈值也随之增大。除了背景明度 $L^* = 95$ 的图 3 (e) 具有几个离异点之外的其他背景条件下,视觉匹配实验数据均较好地符合上述规律,即所谓的 crispening 效应。导致图 3 (e) 结果的原因主要有观察者在亮背景下容易视觉疲劳、亮背景引起视觉不适和耐心性差等心理因素以及重复测

试次数较少等。

在所有的背景明度条件下, CIELAB 和 CIE94 的预测色差都没有体现客观存在的 crispening 效应。而对于色差公式 CMC, 在背景明度小于等于 50 时, 能较好地符合实验数据; 但当背景明度大于 50 时, 如果标准刺激的明度值在 50 以下, 则其计算色差与实验结果存在偏离, 而当标准刺激的明度值在 50 以上时, 仍能获得较好的明度差预测性能。实验结果表明在色样明度差与背景明度的相关性中存在 V 字型的变化趋势, CIEDE2000 的明度权重函数能较好地体现了这种变化趋势。当背景明度大于

50 时, CIEDE2000 能较好地符合实验结果; 但当背景明度小于 50 时, 如果标准刺激的明度在 50 以上, 则其预测的色差与实验数据比较一致, 而当标准刺激的明度在 50 以下时, CIEDE2000 则不能很好地反映实验结果的变化趋势, 尤其是当背景明度在 50 时的实验数据与相关文献的结果存在差异^[10], 这可能与本文所采用的实验方法不同以及观察匹配重复次数不足等因素有关, 但在某种程度上也说明了该色差公式中的明度权重函数还需各种视觉实验的进一步测试和改善。

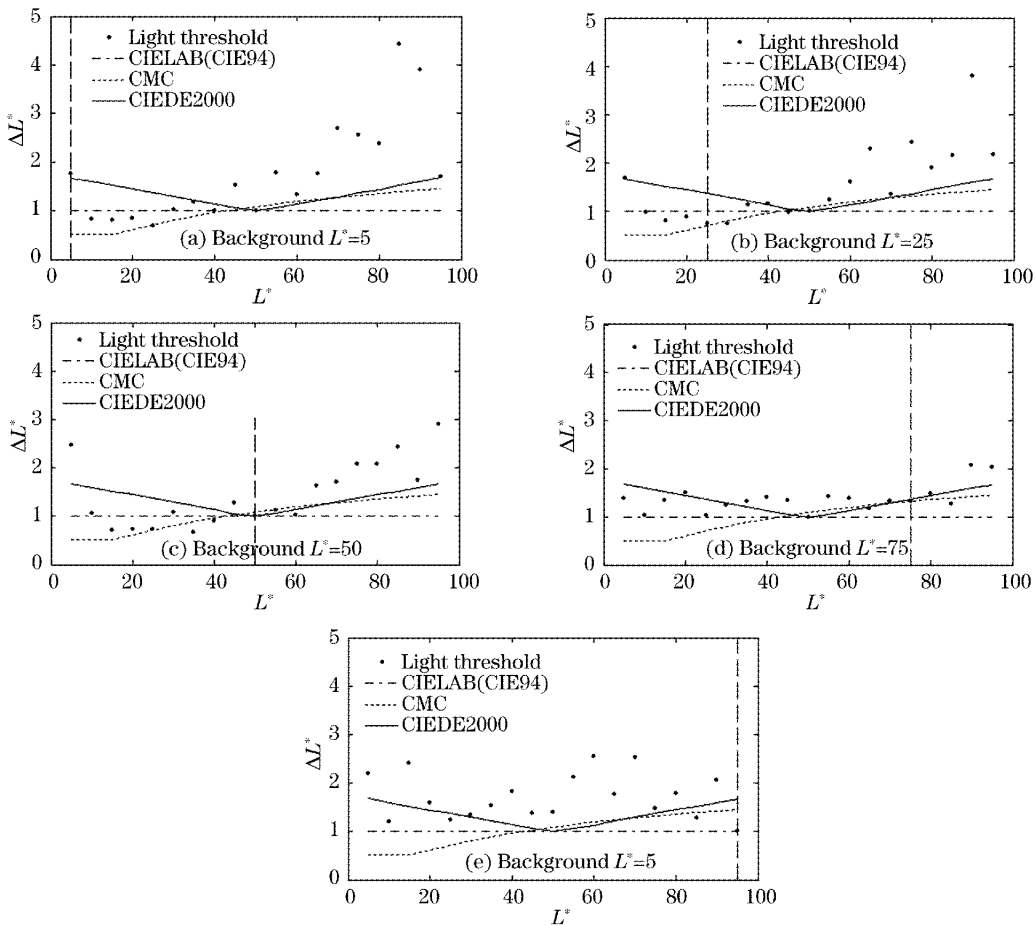


图3 五种不同背景下明度阈值的 crispening 效应

Fig. 3 Crispening effect indicated by lightness threshold under five different backgrounds

4 结 论

在 5 个不同明度的灰色背景下, 通过 19 对不同明度中性刺激的视觉颜色匹配实验, 证实了明度辨别的韦伯法则和 crispening 效应的存在。利用实验数据对色差公式明度权重函数的测试表明, CIEDE2000 具有最好的明度预测性能, CMC 次之, CIELAB 和 CIE94 最差。

参 考 文 献

- 1 C. C. Semmelroth. Prediction of lightness and brightness on different backgrounds[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1970, **60**(12): 1685~1689
- 2 G. Cui, M. R. Luo, B. Rigg. Investigation of the 'crispening effect' on lightness differences[C]. *Proc SPIE*, 2002, **4421**: 634~637
- 3 M. R. Luo, G. Cui, B. Rigg. The development of the CIE 2000 colour-difference formulae: CIEDE2000[J]. *Color Research and Application*, 2001, **26**(5): 340~350

- 4 A. R. Robertson. The CIE 1976 color-difference formulae[J]. *Color Color Research and Application*, 1977, **2**(1): 7~11
- 5 CMC Colour-Difference formula[R]. *Color Color Research and Application*, 1984, **9**(4): 250
- 6 Haisong Xu, Hirohisa Yaguchi, Satoshi Shioiri. Correlation between visual and colorimetric scales ranging from threshold to large color difference[J]. *Color Color Research and Application*, 2002, **27**(5): 349~359
- 7 Roy S. Berns. Methods for characterizing CRT displays[J]. *Displays*, 1996, **16**(4): 173~182
- 8 S. S. Guan, M. R. Luo. Investigation of parametric effects using small colour-differences [J]. *Color Color Research and Application*, 1999, **24**(5): 331~343
- 9 Haisong Xu, Hirohisa Yaguchi. Visual evaluation at scale of threshold to suprathreshold color difference [J]. *Color Color Research and Application*, 2005, **30**(3): 198~208
- 10 J. H. Xin, C. C. Lam, M. R. Luo. Evaluation of the crispening effect using CRT-displayed colour samples[J]. *Color Color Research and Application*, 2004, **29**(5): 374~380
- 11 M. D. Fairchild. *Color Appearance Models* [M]. Massachusetts: Addison-Wesley, 1998. 45~46