

文章编号: 0253-2239(2008)08-1628-05

基于物体表面色的人眼阈值水平微小色差评价

王 寒¹ 徐海松¹ Guihua Cui² M. Ronnier Luo²

(¹ 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027
² Department of Colour Science, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK)

摘要 基于物体表面色样本的视觉评价,测试常用色差公式在人眼阈值水平的微小色差预测性能。由一组 21 名观察者采用感知法对 100 个颜色样本对进行视觉实验,获得视觉色差的评价数据,通过观察者精度分析并与 BFD 和 Witt 的视觉数据进行对比,验证了本实验数据的有效性。利用实验数据对 CIELAB、CMC、BFD、CIE94、LCD 和 CIEDE2000 等六个常用色差公式在人眼阈值水平的微小色差预测性能进行了详细的测试和比较,结果表明国际照明委员会(CIE)推荐的 CIEDE2000 表现最好,而 CIELAB 性能最差。

关键词 视觉光学; 微小色差; 视觉评价; 色差公式; 人眼阈值; 物体表面色

中图分类号 O432.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20082808.1628

Evaluation of Very Small Colour Difference at Human Eye's Threshold Level Based on Object Surface Colours

Wang Han¹ Xu Haisong¹ Cui Guihua² M. Ronnier Luo²

(¹ State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)
² Department of Colour Science, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK)

Abstract The performances of modern colour-difference formulae were investigated to evaluate very small colour difference at human eye's threshold level based on object surface colours. A panel of 21 observers performed the visual assessment to 100 sample pairs using perceptibility method. The validity of the visual results was verified via the observer variation estimation and the comparison with the BFDs and Witt's published data. The detailed analysis indicates that CIEDE2000 recommended by CIE performs best and CIELAB the worst among the six modern colour-difference formulae, namely CIELAB, CMC, BFD, CIE94, LCD and CIEDE2000, for predicting very small colour difference at the level of human eye's threshold.

Key words vision optics; very small colour difference; visual evaluation; colour-difference formula; human eye's threshold; object surface colour

1 引 言

色差是工业生产中对产品颜色质量控制的最重要参数之一。理想的色差公式可对任意颜色样本对给出确定的色差值,并由此判断该色差是否可接受。至今,除了国际照明委员会(CIE)推荐的 CIELAB^[1]、CIE94^[1]以及 CIEDE2000^[2] 色差公式之

外,还出现了 CMC^[1]、BFD^[3] 和 LCD^[3] 等许多不同的色差公式,以期模拟人眼对色差进行判定。

Luo 等^[4]的研究发现人眼对于色差的接受阈值约为 0.38 CIEDE2000 色差单位,但在如此微小的色差水平上现有色差公式是否还能工作、哪个色差公式表现更好等问题尚待深入研究。由于在色差研

收稿日期: 2007-11-01; 收到修改稿日期: 2008-02-18

基金项目: 国家自然科学基金(60578011)资助课题。

作者简介: 王 寒(1984—),男,硕士研究生,主要从事颜色科学、图像技术等方面的研究。

E-mail: wanghan.1026@hotmail.com

导师简介: 徐海松(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事颜色科学、视觉与图像技术、光电信息、光学工程等方面的教学与研究工作。E-mail: chsxu@zju.edu.cn

究中常用的阴极射线管显示器的精度为 0.60 CIELAB 色差单位^[5,6], 和人眼阈值水平相近, 不能满足本研究中对微小色差进行的视觉实验, 故本实验基于物体表面色样本, 采用感知法对人眼阈值的微小色差进行视觉评价, 并将本实验数据与 BFD^[7] 和 Witt^[7] 的测试数据进行比较, 然后利用视觉实验结果评价色差公式的预测性能。

2 颜色视觉实验

2.1 实验样本

本实验选取 10 个颜色中心, 其中每个颜色中心包含 31 个物体表面色样本, 每个样本的大小为 7.5 cm×12.7 cm。采用 GretagMacbeth CE-7000A

分光光度计对所有样本进行光谱反射比测量, 并在 D65 标准照明体和 CIE1964 标准色度观察者的条件下转化为 CIE 三刺激值 XYZ, 由此得到该 10 个颜色中心在 CIELAB 颜色空间中的位置分布如图 1 所示。

由图 1 可见, 蓝色区和灰色区样本数量较多, 被给予更多的关注。对于每个颜色中心, 分别选出 10 个样本对使其尽可能好地覆盖 CIELAB 空间中的各个方向, 得到共 100 个样本对的相对分布示于图 2 中。这些样本对的色差范围为 0.22~0.51 CIEDE2000 色差单位, 其平均值为 0.36 CIEDE2000 色差单位, 接近于人眼阈值 0.38 CIEDE2000 色差单位^[4]。

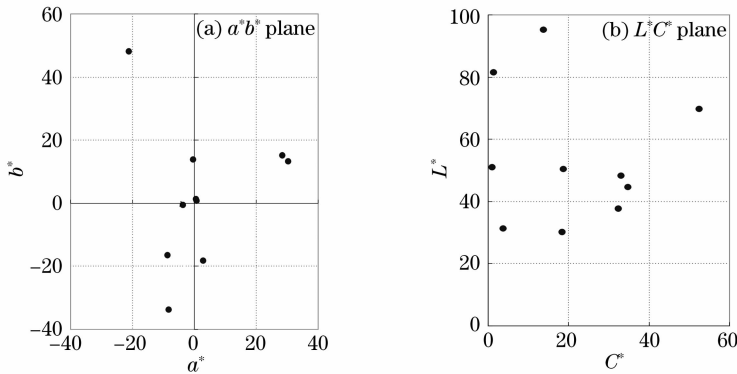


图 1 测试颜色中心在(a) a^*b^* 平面和(b) L^*C^* 平面上的位置分布

Fig. 1 Locations of the testing colour centres on (a) a^*b^* plane and (b) L^*C^* plane

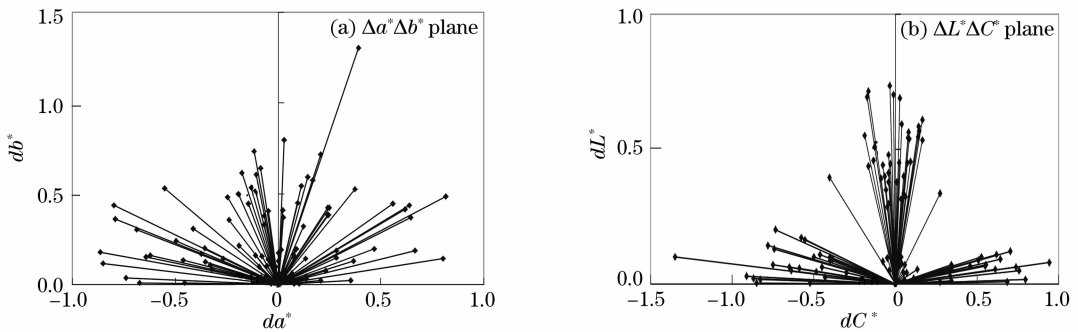


图 2 微小色差样本对在(a) $\Delta a^* \Delta b^*$ 平面和(b) $\Delta L^* \Delta C^*$ 平面上的分布

Fig. 2 Very small colour difference sample pair distributions on (a) $\Delta a^* \Delta b^*$ plane and (b) $\Delta L^* \Delta C^*$ plane

2.2 实验过程与数据处理

本实验采用感知法在 GretagMacbeth SpectraLight III 标准灯箱中采用 D65 光源对具有微小色差的表面颜色样本对进行视觉评价。感知法作为一种阈值判断的常用视觉实验方法, 是让观察者判断实验样本的某种属性是否可以被观察者所感知, 通过进一步分析可以得到观察者对于实验样本的这种属性的可感知阈值。来自英国利兹大学(University

of Leeds) 的 21 名色觉正常观察者对该 100 个样本对进行视觉实验, 其中 5 名观察者对每个样本对评价两次以用来评估测试的重复性, 故每个样本对共被评估 26 次。实验中, 样本对以随机顺序呈现给观察者, 由其判断是否可以觉察到两个被观察样本之间颜色的差异。

根据心理物理学的实验数据处理方法, 对某一颜色样本对, 若觉察出其颜色差异的观察次数为 N , 则

其被观察到颜色差异的概率为 $P = N/26 \times 100\%$ ，再将概率 P 转化为标准正态分布中的 z 值。因此，某样本对的色差越大，对应 P 越大，并导致 z 值越大。然后，对所有颜色样本的 z 值与其对应的 CIEDE2000 计算色差值进行线性拟合便可得直线方程：

$$\Delta V = 0.0608z + 0.3424, \quad (1)$$

由此通过 z 值将原始视觉观察数据 (P) 与视觉色差 (ΔV) 联系起来，从而将原始视觉数据转化为视觉色差。

3 结果与讨论

3.1 观察者的重复性和精确度

采用误判率 (Wrong decision, WD)^[4] 来衡量观察者的重复性和精确度。观察者的重复性是指任一观察者在几次重复实验中所得结果的一致性。在本实验中，有 5 名观察者对每个样本对进行了两次重复的视觉观察。对同一个样本对，若观察者在两次实验中得到不同结果，则认为其对该样本对作出了误判。观察者的精确度考察某一名观察者的结果与总体结果的一致性。对同一个样本对，若某观察者的实验结果与一半以上的观察者结果不同，则认为其对该样本对作出了误判。对于一个观察者，其作出误判的样本对数量占样本对总量的百分比定义为误判率。误判率的取值范围为 0 到 100 之间，值越小表示观察者的重复性和精确度越高。

本实验中，观察者的重复性和精确度结果如表 1 所示。可见，观察者的重复性和精确度很接近。

另外，同样作为微小色差视觉实验，Luo 实验^[4] 中的观察者重复性和精确度分别为 32 和 32，本实验对应数据与其相近，故可认为本实验数据是有效的。约为 33% 的重复性和精确度说明本实验中的观察者每做出 3 个判断，其中就有一个是错误的。

表 1 观察者的重复性和精确度

Table 1 Observer's repeatability and accuracy

WD	Repeatability			Accuracy		
	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean
	49	22	35	54	20	34

3.2 色差椭圆

在 CIELAB 空间中，按 (2) 式^[8] 来拟合视觉实验数据以计算每个颜色中心对应的视觉色差椭圆：

$$\Delta V = k_1 \Delta L^* + k_2 \Delta a^{*2} + k_3 \Delta b^{*2} + k_4 \Delta a^* \Delta b^*, \quad (2)$$

令 (2) 式中 $\Delta L^* = 0$ ，便可得到在 $a^* b^*$ 平面上的色差椭圆。为与已有相关研究数据进行对比，从 BFD^[7] 和 Witt^[7] 的实验数据中选出与本实验接近的 9 个颜色中心，并将其对应的色差椭圆与本实验测得的色差椭圆同时绘于 $a^* b^*$ 平面，如图 3 所示。可见，本实验获得的色差椭圆有如下趋势：除蓝色区外，其长轴指向中性灰轴；随彩度的增大，其面积变大；在灰轴附近的色差椭圆更接近圆形；蓝色区的色差椭圆长轴不再指向中心，而存在一个旋转角度。与 BFD 和 Witt 的椭圆相比较，在相近的区域，与本实验的色差椭圆在大小、形状、长轴方向等方面具有相似的变化趋势，进一步验证了本实验数据的可靠性。

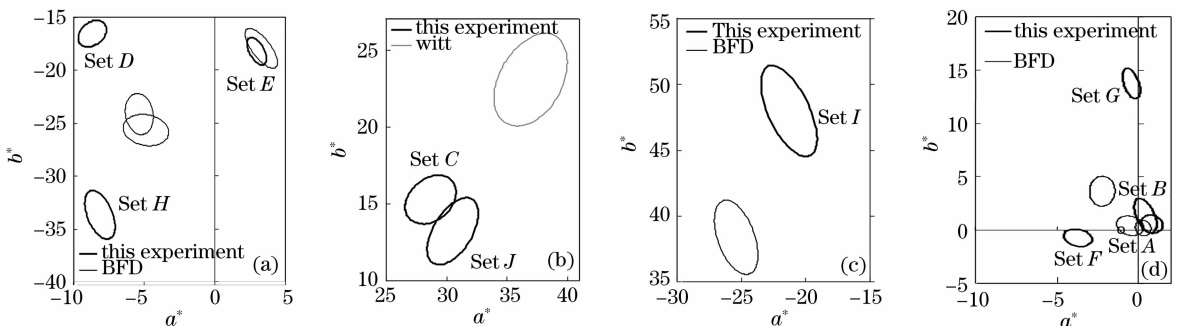


图 3 本实验 10 个颜色中心的视觉色差椭圆与 BFD 和 Witt 的 9 个色差椭圆之比较

Fig. 3 Comparison between colour-difference ellipses at the 10 colour centres in this experiment and the 9 colour centres from Witt & BFD data

3.3 色差公式的评价

采用色差公式计算的色差 ΔE 与视觉实验获得的视觉色差 ΔV 之间的 $PF/3$ 值^[1] 来评价 CIELAB、CMC、BFD、CIE94、LCD、CIEDE2000 等六个常用色差公式对本实验中颜色样本对色差的预

测性能，该 $PF/3$ 值越小表示对应色差公式对于色差的预测值和视觉评估值之间的一致性越好，即对应色差公式的性能越好。当使用原始形式的色差公式即 $k_L = k_C = k_H = 1$ 时的测试结果如表 2 所示。

表 2 原始形式色差公式的预测性能比较

Table 2 Performance comparison of original colour-difference formulae

Formula	CIELAB	CMC	BFD	CIE94	LCD	CIEDE2000
$PF/3$	37	24	23	34	23	20

由表 2 可知, CIEDE2000 表现最好, 然后是 BFD、LCD、CMC 和 CIE94, 而 CIELAB 表现最差。与 Guan & Luo 的小色差实验结果^[9]相比, 其结果具有一致性。在 Guan & Luo 的实验所评价的四个色差公式中, 其性能从好到差的次序是 BFD、CMC、CIE94、CIELAB, 对应 $PF/3$ 值分别是 24、26、33 和 43。可见, BFD 和 CMC 性能相似, 而 CIE94 和 CIELAB 表现较差。

通过 F-test^[10]考察各色差公式在原始形式时性能差异的显著性, 给出了与 $PF/3$ 相似的评价结果, 如表 3 所示。如果表中某个 F 值小于 F_c 或者大于 $1/F_c$, 表示该数据所在列和行对应的两个色差公式

的表现有明显差异; F 值小于 F_c 表示该数据所在列的公式性能明显优于所在行的公式; F 值大于 $1/F_c$ 表示该数据所在列的公式明显劣于所在行的相应公式。

表 3 数据说明, 在评价微小色差时, CIE94 和 CIELAB 的表现明显劣于其他四个公式 (CMC、BFD、LCD 和 CIEDE2000), 而 CIEDE2000 的性能最佳。由图 4 所示的视觉色差与计算色差的对比中也可以得出相同的结论。从图 4 可见, CIEDE2000 的数据点分布很集中, 靠近趋势线, LCD 也表现很好; 而 CIELAB 和 CIE94 的数据点分布较为离散, 表现不佳。

表 3 原始形式色差公式的 F-test 结果 (F_c : F-test 的临界值)

Table 3 F-test results of original colour-difference formulae (F_c : F critical value)

$F_c = 0.67, 1/F_c = 1.49$						
F-value	CIELAB	CMC	BFD	CIE94	LCD	CIEDE2000
CIELAB		0.42	0.40	0.86	0.37	0.29
CMC	2.39		0.95	2.06	0.88	0.70
BFD	2.51	1.05		2.16	0.93	0.74
CIE94	1.16	0.48	0.46		0.43	0.34
LCD	2.71	1.13	1.08	2.33		0.79
CIEDE2000	3.41	1.42	1.36	2.94	1.26	

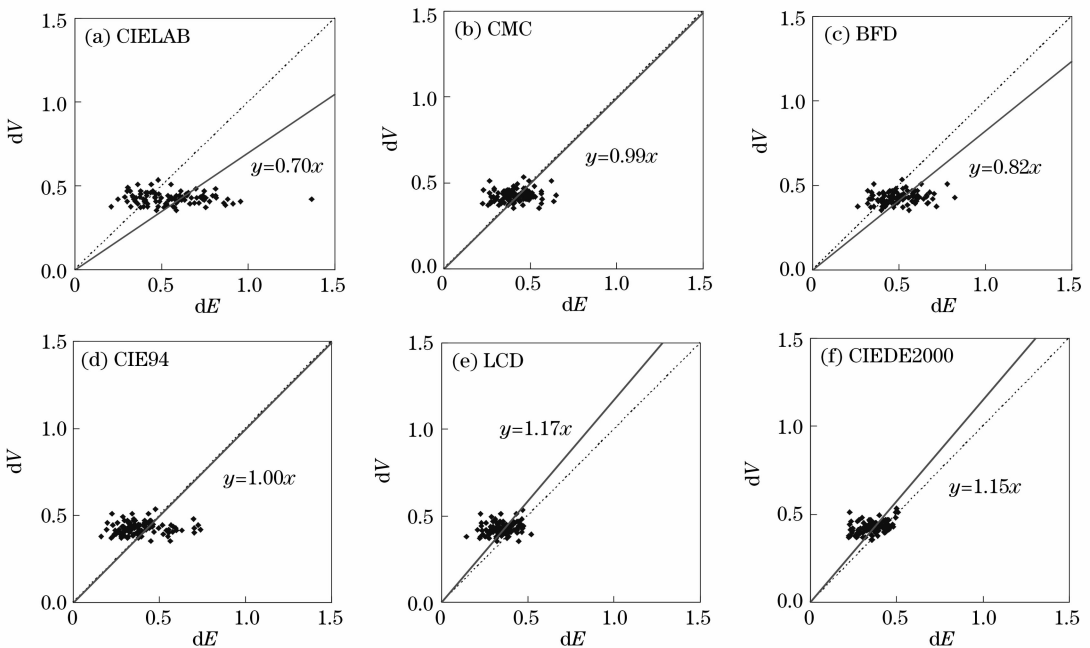


图 4 视觉色差与各色差公式计算色差的对比图 (实线: 趋势线; 虚线: 45°线)

Fig. 4 Comparison diagram for ΔV against ΔE (solid line: trend line; dash line: line with slope of 1)

最后,通过对 k_L 优化使 ΔV 和 ΔE 之间的 $PF/3$ 最小,并在该优化条件下对各个色差公式的预测性能进行了比较,其结果列于表 4 中。可见,CIEDE2000 和 LCD 性能最佳,然后是 BFD、CMC 和 CIE94,而 CIELAB 依然表现最差;CIE94 的性能在优化 k_L 下有了显著提高。该结果与 Guan & Luo 的结论^[9]很相似。在 Guan & Luo 实验中,当对 k_L 进行优化后,

表 4 色差公式在原始形式($k_L=1$)和 k_L 优化条件下的性能比较

Table 4 Performance comparison of colour-difference formulae with original form ($k_L=1$) and optimised k_L

Formula	CIELAB	CMC	BFD	CIE94	LCD	CIEDE2000
$k_L=1$						
$PF/3$	37	24	23	34	23	20
Optimised k_L	0.88	1.18	0.88	1.64	1.30	1.17
$PF/3$	37	22	22	24	19	19

4 结 论

本文利用物体表面色样本采用感知法测得了人眼阈值水平微小色差的视觉实验数据,评价并比较了六个常用色差公式对人眼阈值附近微小色差的预测性能。在原始形式即 $k_L=1$ 时,CIEDE2000 公式表现最好,然后依次是 LCD、BFD、CMC 和 CIE94,而一般认为适合评价大色差的 CIELAB^[11] 性能最差。在 k_L 优化条件下,除 CIELAB 之外,其余五个色差公式的表现都有所提高,其中 CIE94 改善明显,此时性能最佳的是 CIEDE2000 和 LCD,最差的仍然是 CIELAB 公式。

参 考 文 献

- 1 M. Ronnier Luo. Development of colour-difference formulae[J]. *Rev. Prog. Color*, 2002, **32**: 28~39
- 2 CIE. Colorimetry 3rd Ed.. CIE Publ. 15; 2004 [S], Central Bureau of the CIE, Vienna, Austria, 2004
- 3 Dong-Ho Kim, Eun Kyoung Cho, Jae Pil Kim. Evaluation of CIELAB-based colour difference formulae using a new data set [J]. *Col. Res. Appl.*, 2001, **26**(5): 369~375
- 4 M. Ronnier Luo *et al.*. Verification of CIEDE2000 using industry data[J]. *AIC 2004 Color and Paints, Interim Meeting of the International Color Association, Proceedings*

CIE94 的性能显著提高,CIELAB 性能提高了 1 个 $PF/3$ 单位;被评价的四个色差公式在优化 k_L 下的表现由好到差依次是 BFD(0.88)、CMC(1.10)、CIE94(1.45)和 CIELAB(0.81),其中括号内的数据是对应的优化 k_L 值,这与本实验中的优化 k_L 数据非常接近。

- 5 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): 1139~1144
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征分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1139~1144
- 6 Wang Zhehong, Xu Haisong. Study on 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
- 7 M. Ronnier Luo, Guihua Cui, B. Rigg. The development of the CIE 2000 colour-difference formula CIEDE2000 [J]. *Col. Res. Appl.*, 2001, **26**(5): 340~350
- 8 Guihua Cui, M. Ronnier Luo, B. Rigg *et al.*. Colour difference evaluation using CRT colours Part I: data gathering and testing colour difference formulae[J]. *Col. Res. Appl.*, 2001, **26**(5): 394~402
- 9 Shing-Sheng Guan, M. Ronnier Luo. Investigation of parametric effects using small colour differences [J]. *Col. Res. Appl.*, 1999, **24**(5): 331~343
- 10 Pedro A. García *et al.*. Measurement of the relationship between perceived and computed color differences[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, **24**(7): 1823~1829
- 11 Shing-Sheng Guan, M. Ronnier Luo. A colour-difference formula for assessing large colour difference [J]. *Col. Res. Appl.*, 1999, **24**(5): 344~355