

文章编号: 0253-2239(2007)07-1344-5

用阴极射线管显示器研究辨色阈值 II : 典型色差公式评价 *

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: 利用由辨色阈值实验得到的 CIELAB 颜色空间中中等明度 $a^* - b^*$ 平面上的视觉数据, 对四个典型色差公式 CIELAB、CMC、CIE94 和 CIEDE2000 在辨色阈值水平上的色差预测性能进行测试和评价, 并采用性能因子 $PF/3$ 来表示各色差公式的优劣。对于原始形式 ($k_c = k_H = 1$) 的色差公式, CIEDE2000 的色差预测性能最好, 其次为 CIE94 和 CMC, CIELAB 最差。采用对 k_c 和 k_H 进行优化后的色差公式, CIEDE2000 的色差预测性能依然最佳, 其余三个色差公式的预测性能基本相同; 除了 CIELAB 明显改善外, 其他公式的色差预测性能只比原始形式略有提高。色差公式 CIEDE2000 在黄色和蓝色区域的色差预测性能表现优异, 但在灰色、红色和绿色区域的预测性能仍有待进一步改进。

关键词: 视觉与色彩; 颜色辨别阈值; 性能因子; 色差公式; 色差预测性能

中图分类号: TN942.1 文献标识码: A

Study of Color Discrimination Threshold Using CRT Display. Part II : Evaluation of Classical Color-Difference Formulae

Wang Zhehong Xu Haisong

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

Abstract: The visual data obtained from the color discrimination threshold experiment carried out in the iso-lightness $a^* - b^*$ plane of CIELAB color space were used to test the four classical color-difference formulae, CIELAB, CMC, CIE94 and CIEDE2000, in terms of performance factor $PF/3$. For the original forms ($k_c = k_H = 1$), CIEDE2000 outperformed others, followed by CIE94 and CMC, with CIELAB the worst. For the color-difference formulae with k_c and k_H optimized, CIEDE2000 still performed the best, while the color-difference prediction performances of other three formulae were almost the same; except for CIELAB improved obviously, others were enhanced a little in comparison with their individual original forms. The CIEDE2000 formula performed excellently in the yellow and blue color regions, but its color-difference prediction performances in the gray, red and green regions remained to be further improved.

Key words: vision and color; color discrimination threshold; performance factor; color-difference formula; color-difference prediction performance

1 引 言

在工业色差评价实践中, 目视比较具有较大的主观性和易变性, 故通常需要采用合适的色差公式

进行分析, 因此色差公式的研究^[1~4]一直是颜色科学技术中的一个重要课题。自从国际照明委员会 (CIE) 于 1976 年推荐 CIELAB 均匀颜色空间及其

* 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, 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, 江苏吴江人, 教授, 博士生导师, 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: 2006-08-09; 收到修改稿日期: 2006-10-17

色差公式^[5]以来,在色差研究领域取得了巨大的进展,提出了各种色差评价模型,其中包括 CMC^[6]、CIE94^[7]和 CIEDE2000^[8]等典型色差公式。这些公式都是在一定实验条件下得到的视觉数据的基础上建立的,因此需要采用新的视觉实验数据对其进行测试和评价。

本文利用由第一部分辨色阈值实验中得到的 CIE1976 $a^* - b^*$ 平面上的辨色阈值视觉数据对 CIELAB、CMC、CIE94 和 CIEDE2000 四个典型色差公式的色差预测性能进行了评价,为色差公式的修正和改善提供参考数据。

2 色差公式评价

典型色差公式 CMC、CIE94 和 CIEDE2000 都是在基本色差公式 CIELAB 的基础上发展而来的,因此它们具有相同的通用结构:

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{k_H S_H}\right)^2} + \Delta R, \quad (1)$$

式中 $\Delta R = R_T \cdot f(\Delta C, \Delta H)$, 为彩底差色调差的交叉旋转项, R_T 为该旋转项的系数, ΔL 、 ΔC 和 ΔH 分别为对应的明度差、彩度差和色调差, 其中仅 CIEDE2000 存在彩度差和色调差的交叉旋转项 ΔR 。 S_L 、 S_C 和 S_H 分别为明度、彩度和色调的权重函数; k_L 、 k_C 和 k_H 则为相应的参量因子, 可根据不同的观察条件参量进行调节, 并且原始形式色差公式中的 $k_L = k_C = k_H = 1$ 。

根据辨色阈值实验中得到的测试数据, 采用原始形式的色差公式计算出 $a^* - b^*$ 平面上各色区^[9]各颜色方向上的色差值, 并用色度椭圆^[10]表示, 如图 1(a)~图 1(e)所示, 其中横坐标为 a^* 的变化量, 而纵坐标为 b^* 的变化量。

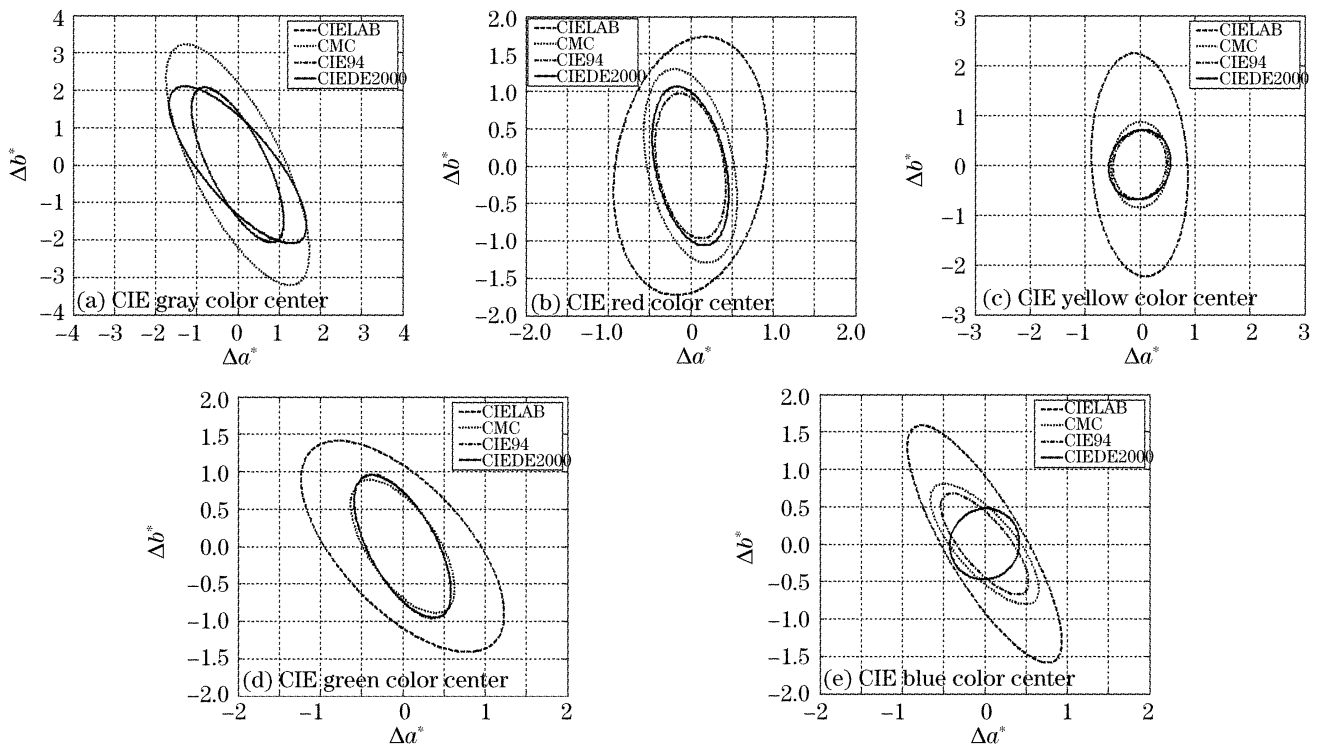


图 1 根据四个原始形式色差公式计算得到的色度椭圆

Fig. 1 Chromaticity ellipses predicted by the four color-difference formulae in their original forms

2.1 原始形式色差公式评价

假定人眼理想的辨色阈值 $\Delta V = 1$ ^[11] (仅作为统一的比较参照, 不影响各色差公式的相对比较结果), 将 ΔV 与各色差公式在各个颜色测试方向上计算的色差预测值 ΔE 进行比较, 用 $PF/3$ 值^[12] 表示相应的色差预测性能, 结果数据列于表 1 的第 1 行。

从表 1 可知, 对于同一颜色中心, 不同色差公式的色差预测性能各不相同。由于色度椭圆在等明度的 $a^* - b^*$ 平面上, 其明度值 L^* 不变, 因此导致上

述色差公式不同预测性能的主要原因是彩度和色调的权重函数不同。在黄色和蓝色区域, CIEDE2000 公式的色差预测性能均为最好 ($PF/3$ 值分别为 9.4 和 5.0), 相对于预测性能最差的 CIELAB 其 $PF/3$ 值分别提高了 25.2 和 44.0, 而 CMC 和 CIE94 的预测性能在上述两者之间。在红色和绿色区域, CIELAB 的预测性能最优, 其余三个公式的色差预测性能相差不多。在灰色区域, 四个色差公式的预测性能大致相同, 均表现不佳。对包括 5 个颜色区

域的整体而言,色差预测性能最好的是 CIEDE2000 (32.7),最差为 CIELAB(35.2)。

($PF/3$ 值为 26.0),其次为 CIE94(32.5)和 CMC

表 1 原始形式色差公式在 5 个颜色中心的色差预测性能及与经典实验数据集的比较($PF/3$ 值表示)

Table 1 Prediction performances of the color-difference formulae in their original forms for the five color centers and their comparison with classical datasets in terms of $PF/3$

Data set	Color centers	CIELAB	CMC	CIE94	CIEDE2000
This study	Gray	41.7	41.7	41.7	43.1
	Red	23.4	36.6	34.3	36.7
	Yellow	34.6	18.2	13.2	9.4
	Green	27.5	31.3	36.2	35.6
	Blue	49.0	35.8	37.0	5.0
	Mean	35.2	32.7	32.5	26.0
RIT-Dupont $\overline{\Delta E_{ab}^*} \approx 1.0$	Gray	15.3	15.3	15.3	6.1
	Red	19.3	5.7	3.7	6.0
	Yellow	19.3	12.7	14.5	17.3
	Green	22.3	13.1	8.2	8.7
	Blue	44.4	32.0	33.0	5.1
	Mean	24.1	15.8	15.0	8.6
Xu and Yaguchi thresholds	Gray	39.8	39.8	39.8	31.5
	Red	36.3	43.7	42.0	43.7
	Yellow	25.9	10.7	6.5	6.0
	Green	41.6	42.4	44.9	44.6
	Blue	34.9	17.8	19.6	19.4
	Mean	35.7	30.9	30.6	29.0
Cui and Luo $\overline{\Delta E_{ab}^*} \approx 2.5$	Gray	19.0	19.0	19.0	11.5
	Red	25.2	2.6	4.45	2.86
	Yellow	21.4	9.9	9.9	12.1
	Green	28.0	18.0	11.0	11.8
	Blue	40.4	31.4	31.9	7.8
	Mean	26.8	16.2	15.3	9.2

CIELAB 是最基本形式的色差公式,结构简单,明度、彩度和色调的权重函数均为 1,色差值为 CIELAB 颜色空间中色样对之间的欧几里德距离,正是该欧几里德距离的非视觉均匀性直接导致了 CIELAB 较差的色差预测性能。CMC 主要用于纺织工业的大色差评价,而 CIE94 的参考观察条件与本实验存在差异,因此在本研究的实验条件下这两个色差公式的预测性能均不如意。CIEDE2000 是在多个相关模型的基础上改进得到的最新色差公式,计算方法相对复杂,并利用交叉旋转项 ΔR 对蓝色区域的色度椭圆进行旋转使之与其他色区一致,明显改善了蓝区的性能,并且总体色差预测性能得到了最大的提高。

与三组经典实验结果进行比较,假定 RIT-Dupont 物体色实验^[13]的 $\Delta V = 1.0$, Xu 和 Yaguchi^[1]的阴极射线管自发光色实验的 $\Delta V = 1$, Cui 和 Luo^[2]的阴极射线管自发光色实验的 $\Delta V =$

2.5,将 ΔV 与各色差公式在 12 个颜色测试方向上计算的色差预测值 ΔE 进行比较,用 $PF/3$ 值表示相应的色差预测性能,详细数据如表 1 所示。

对于 RIT-Dupont 实验数据,整体色差预测性能最好为 CIEDE2000 ($PF/3$ 值为 8.6),其次为 CIE94(15.0)和 CMC(15.8),CIELAB(24.1)最差。对于 Xu 和 Yaguchi 实验数据,整体色差预测性能最好为 CIEDE2000(29.0),依次为 CIE94(30.6)和 CMC94(30.9),最差为 CIELAB(35.7)。对于 Cui Luo 实验数据,CIEDE2000 的整体色差预测性能依旧最好(9.2),最差仍为 CIELAB(26.8),而 CIE94(15.3)和 CMC(16.2)的色差预测性能介于前两者之间。

2.2 优化形式色差公式评价

在 5 个颜色区域利用最小二乘法对各色差公式的参量因子 k_L 、 k_C 和 k_H 进行整体优化,使色差预测值 ΔE 与理想辨色阈值 ΔV 最接近。由于本实验的

视觉数据均在等明度的 $a^* - b^*$ 平面上 (L^* 不变), 因此仅需对 k_C 和 k_H 进行优化。采用参量优化后的各色差公式计算相应的色差值, 并与 ΔV 比较, 得到以 $PF/3$ 值表示的色差预测性能比较数据如表 2 的第 1 行所示。

由表 2 见, 各个色差公式在不同颜色中心预测性能的改善程度并不相同。CIEDE2000 的 k_C 和 k_H 没有变化, 表明 CIEDE2000 原始形式的公式其色差

预测性能已达最佳; 其余三个色差公式的 k_C 和 k_H 均有所改变, 可知其分别在一定程度上存在着可优化的空间。经过 k_C 和 k_H 参量优化后, 色差公式的预测性能从优到劣 (平均 $PF/3$ 值从小到大) 依次为 CIEDE2000(26.0)、CIELAB(32.3)、CIE94(32.5) 和 CMC(32.6), 其中 CIEDE2000 和 CIE94 的总体性能基本没有变化, 而 CIELAB 和 CMC 则分别提高了 2.9 和 0.1。

表 2 优化形式色差公式在 5 个颜色中心的色差预测性能及与经典实验数据集的比较 ($PF/3$ 值表示)

Table 2 Prediction performances of the color-difference formulae in their optimized forms for the five color centers and their comparison with classical datasets in terms of $PF/3$

Data set	Color centers	CIELAB	CMC	CIE94	CIEDE2000
		$k_C=1.0, k_H=0.6$	$k_C=1.1, k_H=1.0$	$k_C=1.3, k_H=1.2$	$k_C=1.0, k_H=1.0$
This study	Gray	39.7	41.1	41.2	43.1
	Red	32.5	39.2	36.5	36.7
	Yellow	16.3	18.2	15.0	10.9
	Green	36.4	33.3	38.1	35.6
	Blue	36.6	34.5	35.7	5.0
	Mean	32.3	32.6	32.5	26.0
		$k_C=1.7, k_H=1.0$	$k_C=2.0, k_H=1.9$	$k_C=1.0, k_H=1.0$	$k_C=1.7, k_H=1.8$
RIT-dupont $\overline{\Delta E_{ab}^*} \approx 1.0$	Gray	17.7	15.2	15.3	6.1
	Red	3.2	7.2	3.7	4.5
	Yellow	13.4	13.1	14.5	16.1
	Green	8.0	11.6	8.2	9.7
	Blue	32.4	31.4	33.0	5.8
	Mean	14.9	15.7	15.0	8.4
		$k_C=2.0, k_H=1.1$	$k_C=1.5, k_H=1.3$	$k_C=1.9, k_H=1.8$	$k_C=0.9, k_H=1.1$
Xu and Yaguchi thresholds	Gray	37.9	39.0	39.5	32.0
	Red	42.3	46.8	43.1	41.6
	Yellow	6.7	6.7	5.8	6.2
	Green	46.5	43.9	45.8	43.3
	Blue	17.1	15.3	18.3	20.3
	Mean	30.1	30.3	30.5	28.7
		$k_C=1.9, k_H=1.0$	$k_C=0.9, k_H=0.8$	$k_C=1.0, k_H=1.0$	$k_C=1.9, k_H=2.0$
Cui and Luo $\overline{\Delta E_{ab}^*} \approx 2.5$	Gray	23.3	18.7	15.3	11.6
	Red	2.9	4.0	3.7	3.7
	Yellow	10.3	9.7	14.5	11.1
	Green	7.8	14.1	8.2	13.4
	Blue	31.2	31.2	33.0	5.8
	Mean	15.1	15.5	15.0	9.1

优化形式色差公式的预测性能改善越多, 表明其参量因子对该色差公式预测性能的影响越大。由于 CIELAB 的形式最为简单, 因此参量因子的影响最大, 优化后有明显改善, 仅次于最优的 CIEDE2000 公式。CIEDE2000 虽然计算过程较为复杂, 但其色差预测性能优异, 在本实验条件下其相应的参量因子已达最优化设置。

不论是原始形式或是优化形式的色差公式, 它

们在灰色区域的色差预测性能均不够理想, 并且优化后也改善甚微。对于红色和绿色区域, 原始形式的 CIELAB 其预测性能最好, 其余三个公式的性能基本相同, 而且优化后 CMC 和 CIE94 的预测性能反而稍有劣化趋势。在黄色区域, 原始形式的 CIEDE2000 预测性能最好, CIE94 和 CMC 次之, 但均远优于 CIELAB; 参量优化后, 除 CIEDE2000 外的各色差公式预测性能均有所改善, 尤其以

CIELAB 的性能提高最为显著,但 CIEDE2000 的色差预测性能依然最佳。在蓝色区域,原始和优化形式的 CIEDE2000 其色差预测性能均远优于其他各个公式,这正是 CIEDE2000 对蓝色区域进行改善的结果。

用三组经典实验数据分别对四个色差公式进行优化,采用参量优化后的各色差公式计算相应的色差值,并与 ΔV 比较,比较结果以 $PF/3$ 值表示,具体数据列于表 2。

优化后,对于 RIT-Dupont 实验数据,CIEDE2000 的整体色差预测性能最好($PF/3$ 值为 8.4),其次为 CIELAB(14.9)和 CIE94(15.0),CMC(15.7)最差,其中 CIELAB 改善最多($PF/3$ 值减小了 9.8),其余三个公式改善不多。对于 Xu 和 Yaguchi 实验数据,优化后四个公式的整体色差预测性能均有所改善,其中 CIEDE2000 表现最好(28.7),其余依次为 CIELAB(30.1),CMC(30.3)和 CIE94(30.5)。而对于 Cui 和 Luo 实验数据,整体色差预测性能依旧是 CIEDE2000 表现最好(9.1),其次为 CIE94(15.0)和 CIELAB(15.1),CMC(15.5)最差。

3 结 论

基于 CIELAB 颜色空间中明度 $a^* - b^*$ 平面上的辨色阈值视觉实验数据,分别对 CIELAB、CMC、CIE94 以及 CIEDE2000 等典型色差公式在 5 个 CIE 基本颜色中心的色差预测性能进行了测试和评价。采用 $PF/3$ 值分别对原始形式和优化形式的色差公式在辨色阈值水平上的色差预测性能进行了检测。在原始形式下,CIEDE2000 的色差预测性能最好,其次为 CIE94 和 CMC,CIELAB 最差;经过 k_C 与 k_H 参量优化后,CIEDE2000 的预测性能依然最佳,其余三个公式的性能大致相同。CIEDE2000 公式在黄色和蓝色区域的色差预测性能极好,而在

灰色、红色和绿色区域的表现相对欠佳,有待进一步改善和提高。

参 考 文 献

- 1 Haisong Xu, Hirohisa Yaguchi, Satoshi Shioiri. Estimation of colour-difference formulae at color discrimination threshold using CRT-generated stimuli[J]. *Opt. Rev.*, 2001, **8**(2): 142~147
- 2 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]. *Color Res. Appl.*, 2001, **26**(5): 394~402
- 3 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 (in Chinese)
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
- 4 Wang Zhehong, Xu Haisong. Lightness threshold evaluation in visual color matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1274~1278 (in Chinese)
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
- 5 A. R. Robertson. The CIE 1976 color-difference formulae[J]. *Color Res. Appl.*, 1977, **2**(1): 7~11
- 6 CMC Colour-Difference Formula[R]. *Color Res. Appl.*, 1984, **9**(4): 250
- 7 Lewis D. Griffin, Arsalan Sepehri. Performance of CIE94 for nonreference conditions[J]. *Color Res. Appl.*, 2002, **27**(2): 108~115
- 8 M. R. Luo, G. Cui, B. Rigg. The development of the CIE 2000 colour-difference formulae; CIEDE2000[J]. *Color Res. Appl.*, 2001, **26**(5): 340~350
- 9 A. R. Robertson. CIE guidelines for coordinated research on colour-difference evaluation[J]. *Color Res. Appl.*, 1978, **3**(3): 149~151
- 10 M. R. Luo, B. Rigg. Chromaticity-discrimination ellipses for surface colours[J]. *Color Res. Appl.*, 1986, **11**(1): 25~42
- 11 Haisong Xu, Hirohisa Yaguchi, Satoshi Shioiri. Correlation between visual and colorimetric scales ranging from threshold to large color difference[J]. *Color Res. Appl.*, 2002, **27**(5): 349~359
- 12 S. S. Guan, M. R. Luo. Investigation of parametric effects using small colour-differences[J]. *Color Res. Appl.*, 1999, **24**(5): 331~343
- 13 Roy S. Berns. Color tolerance feasibility study comparing CRT-generated stimuli with an acrylic-lacquer coating[J]. *Color Res. Appl.*, 1991, **16**(4): 232~242