

文章编号: 0253-2239(2008)06-1215-05

基于阈上小色差的色差公式权重函数研究

汪哲弘 徐海松

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 利用心理物理实验的恒常刺激法,测得了在 CIELAB 颜色空间中 $a^* b^*$ 平面上 16 个颜色中心的阈上小色差(约 $3 \Delta E_{ab}^*$ 单位)色度椭圆。基于本实验和 RIT-Dupont 各 16 个非中性色颜色中心的彩度差和色调差数据分别拟合得到相应的彩度权重函数 $S_{C,ZJU07}$ 和色调权重函数 $S_{H,ZJU07}$ 。应用获得的视觉实验数据对六个基于 CIELAB 的典型色差公式的彩度和色调权重函数以及 $S_{C,ZJU07}$ 和 $S_{H,ZJU07}$ 的色差预测性能进行评价,结果表明所提出的 $S_{C,ZJU07}$ 和 $S_{H,ZJU07}$ 的预测性能均为最佳。对于彩度差数据,六个色差公式彩度权重函数的预测性能表现不佳;而对于色调差数据,CIEDE2000 色调权重函数的预测性能明显优于其他公式。

关键词 视觉与色彩; 阈上小色差; 恒常刺激法; 色度椭圆; 权重函数; 色差公式

中图分类号 TN942.1 **文献标识码** A

Investigations for Weighting Functions of Color-Difference Formulae Based on Small Suprathreshold Color Differences

Wang Zhehong Xu Haisong

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

Abstract Small suprathreshold color-difference (about $3 \Delta E_{ab}^*$ units) chromaticity ellipses at 16 color centers in the $a^* b^*$ plane of CIELAB space were measured using the psychophysical method of constant stimuli. The corresponding chroma weighting function $S_{C,ZJU07}$ and hue weighting function $S_{H,ZJU07}$ were respectively fitted based on the chroma- and hue-difference data of 16 non-neutral-color color centers from this study and RIT-Dupont datasets. The chroma and hue weighting functions of six CIELAB-based color-difference formulae together with $S_{C,ZJU07}$ and $S_{H,ZJU07}$ were compared, and the detailed analysis indicates that $S_{C,ZJU07}$ and $S_{H,ZJU07}$ perform best. For the chroma-difference data, the predicting performances of chroma weighting functions of all the six formulae are not good, while for the hue-difference data, the hue weighting functions of CIEDE2000 obviously outperform the others.

Key words vision and color; small supra-threshold color difference; method of constant stimuli; chromaticity ellipses; weighting functions; color-difference formulae

1 引言

CIELAB 颜色空间的色度尺度与人眼的颜色视觉感受之间的相关性一直以来都是颜色科学专家及相关产业关注的重点。随着科技发展和工业进步,色差评价的重要性越趋明显。各国科学家在视觉实验的基础上,建立了许多基于 CIELAB 的色差公式,极大地改善了色度尺度与视觉感受的一致性,并在相应工业生产中得到了广泛的应用^[1~6]。由于不同色差数据集之间的不一致性,相应的色差公式也

存在局限性,因此即使是 CIE 最新推荐的色差公式 CIEDE2000 其色差预测性能与人眼视觉感受之间依然存在不一致性,需要利用新的实验数据加以测试和改进^[6~8]。

利用阴极射线管(CRT, Cathode Ray Tube)显示器进行视觉实验,具有操作方便、显示稳定、成本低等优点,且与物体色实验结果之间的一致性较好,因此大量视觉实验都采用了 CRT 显示器^[8~10]。本研究通过在 CRT 显示器上基于心理物理学的恒常

收稿日期: 2007-10-09; **收到修改稿日期:** 2007-11-29

基金项目: 国家自然科学基金(60578011)资助课题。

作者简介: 汪哲弘(1981-),男,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,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、光学工程等方面的研究。E-mail: chsxu@zju.edu.cn

刺激法^[10]显示相应刺激色样,采用概率分析方法得到相应的阈上小色差值(约 $3 \Delta E_{cb}^*$ 单位),然后利用相关数据处理和分析,提出了相应的彩度权重函数 S_{C_ZJU07} 和色调权重函数 S_{H_ZJU07} ,并与六个典型色差公式的彩度和色调权重函数的预测性能进行了比较和评价。

2 实验方案

2.1 实验设备和颜色刺激

采用 3D-LUT 模型^[11]对 CRT 显示器 Neso FD570A 进行色度特性化,并在其上显示相应的颜色刺激色样。在特性化标定前,先对显示器的亮度和对比度进行调节,使其白点和黑点的亮度分别为 113.86 cd/m^2 和 0.083 cd/m^2 ,相关色温为 6500 K 。利用 Photo Research 公司的光谱辐射计 PR-650 对测试颜色中心和其周围分布的点进行测量。CRT 的色度特性化精度可用下式表示:

$$\Delta E_{m,s}^* = [(\Delta L_m^* - \Delta L_s^*)^2 + (\Delta a_m^* - \Delta a_s^*)^2 + (\Delta b_m^* - \Delta b_s^*)^2]^{1/2}, \quad (1)$$

式中 ΔL_s^* , Δa_s^* , Δb_s^* 分别为颜色中心周围分布的点到颜色中心在 CIELAB 空间中 L^* , a^* 和 b^* 标度上的理论偏差, ΔL_m^* , Δa_m^* , Δb_m^* 则为相应的实际测量偏差。在本实验中,平均 $\Delta E_{m,s}^*$ 为 0.34 CIELAB 色差单位,表明该显示器的特性化精度是可接受的^[6,9,12]。

颜色刺激色样如图 1 所示。颜色刺激为位于显示器中央的 2 对 $1^\circ \times 1^\circ$ 视角的正方形色块,每个色

块由 1 个像素黑线所包围。色块对之间的间隔为 0.5° ,其中一对为参考色样对,另一对为测试色样对。测试时,两个色样对的左右显示位置由控制软件随机决定,色样对中两个刺激色样的上下位置也随机显示。刺激色样为从选定的颜色中心分别在 CIELAB 的 a^*b^* 平面上每隔 30° 共 12 个方向上等间隔分布的颜色,并在每个颜色方向上以一定的色差间隔分别确定 7 个测试色样,与相应的颜色中心组成测试色样对,并通过先验性实验确定测试色样对的色差大小,使其处于从绝大多数观察者认为测试色样对的色差“小于参考色样对”到“大于参考色样对”的色差范围之内。通过观察者比较参考色样对和测试色样对的色差大小,利用概率统计的方法,计算出相应测试方向的阈上色差值。根据 CIE 的色差研究指导方针^[15,16]和显示器的色域,16 个颜色中心被选择用于视觉实验,其 CIELAB 色度参量如表 1 所示,其中粗体表示的为 CIE 推荐的颜色中心,括号中为相应参量多次测量值的标准偏差。参考色样为一对中性色色样,其 CIELAB 参量也列于表 1 中。参考色样对的色差定义为视觉色差(ΔV),其大小为 3.01 CIELAB 单位,且 $\Delta L^* / \Delta V > 99\%$,可认为只有明度差。背景为一个 $6^\circ \times 6^\circ$ 的中性色方块,其参量见表 1 最后一行。背景外面为一个 $8^\circ \times 8^\circ$ 的白色边框,其亮度值为 100 cd/m^2 ,色品坐标采用 D65 的相应参量。由于刺激色样对的视角小于 4° ,故相应计算采用 CIE 标准照明体 D65 和 CIE1931 标准色度系统。屏幕其余部分显示为黑色。

表 1 测试颜色中心的色度参量

Table 1 CIELAB chromaticity parameters of the color centers under test

Color center	L^*	a^*	b^*	C^*	h°
Red I	44.37 (0.16)	36.84 (0.29)	23.37 (0.40)	43.63	32
Red II	44.01 (0.07)	17.25 (0.06)	10.65 (0.19)	20.27	32
Orange I	62.96 (0.11)	13.11 (0.24)	20.88 (0.34)	24.65	58
Orange II	63.01 (0.10)	25.99 (0.23)	41.92 (0.21)	49.32	58
Yellow I	86.61 (0.13)	-6.66 (0.29)	47.05 (0.44)	47.52	98
Yellow II	87.04 (0.12)	-3.29 (0.08)	23.61 (0.16)	23.84	98
Yellow-Green I	64.95 (0.32)	-9.88 (0.27)	13.08 (0.36)	16.39	127
Yellow-Green II	64.94 (0.17)	-29.96 (0.17)	38.82 (0.21)	49.04	128
Green I	56.04 (0.15)	-32.20 (0.28)	0.38 (0.14)	32.20	179
Green II	56.06 (0.20)	-16.06 (0.10)	-0.01 (0.20)	16.06	180
Blue-Green I	50.06 (0.15)	-16.09 (0.15)	-11.01 (0.17)	19.50	214
Blue-Green II	50.08 (0.05)	-9.83 (0.29)	-6.68 (0.13)	11.88	214
Blue I	35.46 (0.28)	4.76 (0.39)	-30.23 (0.29)	30.60	279
Blue II	35.99 (0.20)	2.53 (0.22)	-15.75 (0.08)	15.95	279
Purple I	45.95 (0.38)	11.76 (0.20)	-12.81 (0.36)	17.39	313
Purple II	46.12 (0.14)	25.99 (0.16)	-26.07 (0.29)	36.81	315
Reference pair	61.58 (0.15)	0.03 (0.24)	-0.01 (0.25)	0.03	342
	64.59 (0.15)	0.09 (0.24)	-0.10 (0.29)	0.13	312
Background	50.02 (0.17)	0.02 (0.29)	0.08 (0.29)	0.08	76

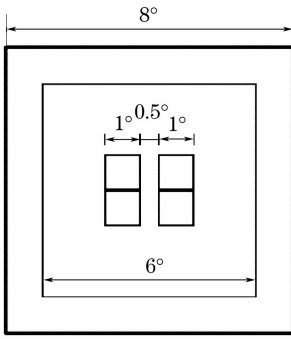


图1 恒常刺激法的测试刺激图样

Fig.1 Test stimulus pattern used in the method of constant stimuli

2.2 实验过程

参与实验的6名色觉正常观察者均为浙江大学在读研究生。在开始正式实验前,先通过先验性实验使观察者熟悉实验操作方法,并确定测试色样对的色差控制参量。

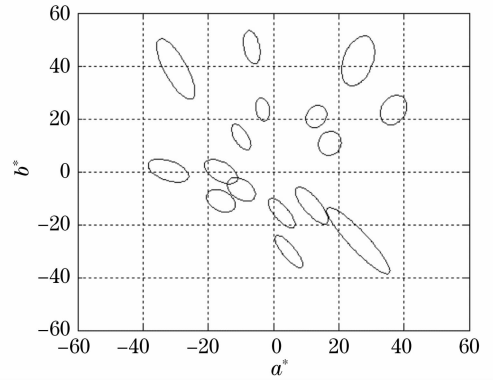
每天实验开始前,显示器预热2 h。每次实验开始后,先进行3 min屏幕全黑的暗适应过程,接着显示图1所示的刺激色样并进入1 min的亮适应过程,之后按照恒常刺激法的流程测定阈上视觉色差。每个观察周期包括显示刺激色样过程及其之前的200 ms黑色间隔显示过程。在黑色间隔显示期间,两个色样对以黑色覆盖,而保持背景和白框可见,以使观察者对白点和背景充分适应,且消除视觉残像的影响。

观察者的任务是比较参考色样对与测试色样对的色差大小,并按下键盘上设定的相应按键作为应答,由此保存当前测试结果并开始下一次判断。每个测试色样对观察10次,每位观察者对单个颜色中心观察2次,共产生26880(16个颜色中心×12个测试方向×7个测试色样对/方向×10次判断/测试色样对×2次观察/颜色中心)次判断数据。

3 实验结果和分析

3.1 色度椭圆

取全部观察者对单个颜色中心在某测试方向的平均值作为该方向的阈上视觉色差值,利用最小二乘法分别拟合出16个颜色中心在 a^*b^* 平面的色度椭圆,如图2所示。将单个观察者在各测试方向的阈上值与色度椭圆轮廓线在对应方向上的值相比较,得到以PF/3因子^[6~8]表示的观察者精度,平均为11,最大为20,优于国际上用灰标法得到的实验结果^[6]。

图2 16个测试颜色中心在 a^*b^* 平面的色度椭圆
Fig.2 Chromaticity ellipses of the 16 color centers under test in a^*b^* plane

同样采用PF/3性能因子评价色度椭圆的拟合精度,得到的PF/3值介于4和13之间,平均为8,表明色度椭圆和视觉数据之间具有良好的 consistency。

3.2 拟合彩度和色调权重函数

基于CIELAB色差公式具有相同的通用结构,即

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

式中 ΔL 、 ΔC 和 ΔH 分别为对应的明度差、彩度差和色调差, $\Delta R = R_T \cdot f(\Delta C, \Delta H)$ 为彩度差和色调差的交叉旋转项。 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 $k_L = k_C = k_H = 1$ 。

为了得到彩度和色调权重函数,以本实验(自发光色)和RIT-Dupont数据集(物体色)^[17]的各16个非中性色颜色中心的实验数据作为综合数据集,进行处理和分析。

利用色度椭圆轮廓与相应颜色中心,比较其仅有彩度差 ΔC 和色调差 ΔH 的数据,对彩度差和色调差根据(3)式和(4)式进行校正^[15]:

$$\Delta C' = (\Delta C / \Delta V) / (1 + 0.045 \bar{C}), \quad (3)$$

$$\Delta H' = (\Delta H / \Delta V) / (1 + 0.015 \bar{C}), \quad (4)$$

其中, $\Delta C'$ 和 $\Delta H'$ 分别为校正后的彩度差和色调差, ΔC 和 ΔH 分别为校正前的彩度差和色调差, ΔV 为视觉色差, \bar{C} 为颜色中心与测试色样的平均彩度。

对于校正后的彩度差和色调差,通过(5)式拟合得到校正后彩度差和色调差与色调角之间的关系表达式分别为(6)式和(7)式中的 T_{CH} 和 T_{HH} ,其中 $S_{C_{ZJU07}}$ 和 $S_{H_{ZJU07}}$ 分别为相应的权重函数。

$$\Delta X = 1 + a_1 \cos(\bar{h} + b_1) + a_2 \cos(2\bar{h} + b_2) + a_3 \cos(3\bar{h} + b_3) + a_4 \cos(4\bar{h} + b_4), \quad (5)$$

式中 ΔX 表示校正后的彩度差 $\Delta C'$ 或色调差 $\Delta H'$, \bar{h} 为颜色中心与测试色样的平均色调角, $a_i, b_i (i=1, 2, 3, 4)$ 为表达式参量。

$$\begin{cases} S_{C_ZJU07} = (1 + 0.045\bar{C})T_{CH}, \\ T_{CH} = 1 + 0.25\cos(\bar{h} + 40^\circ) + 0.62\cos(2\bar{h} + 59^\circ) - 0.29\cos(3\bar{h} - 54^\circ) - 0.21\cos(4\bar{h} - 67^\circ), \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} S_{H_ZJU07} = (1 + 0.015\bar{C})T_{HH}, \\ T_{HH} = 1 - 0.62\cos(\bar{h} - 74^\circ) + 1.05\cos(2\bar{h} - 49^\circ) + 0.71\cos(3\bar{h} + 31^\circ) - 0.50\cos(4\bar{h} - 86^\circ), \end{cases} \quad (7)$$

式中 \bar{C} 和 \bar{h} 分别为标准色样与测试色样的平均彩度和平均色调角。

图 3(a) 和图 3(b) 分别为 T_{CH} 和 T_{HH} 的曲线拟合结果, 其中横坐标为色调角 \bar{h} , 纵坐标分别为校正后彩度差 $\Delta C'$ 和色调差 $\Delta H'$ 。图中圆点为实验数据, 曲线分别对应于(6)式和(7)式的 T_{CH} 和 T_{HH} 方程式。

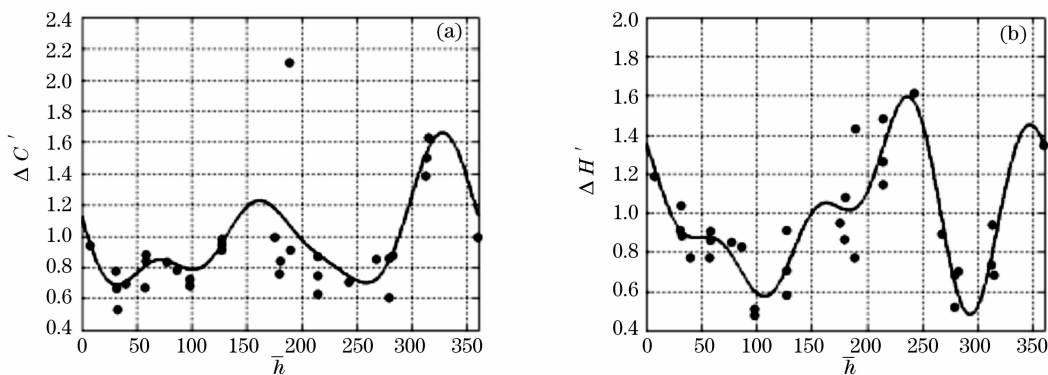


图 3 T_{CH} 和 T_{HH} 的拟合曲线

Fig. 3 Fitting plot of T_{CH} and T_{HH}

4 色差公式权重函数预测性能评价

利用彩度差和色调差数据分别对六个基于 CIELAB 的典型色差公式 (CIELAB^[1], CMC^[2], BFD^[3], CIE94^[4], LCD^[5], CIEDE2000^[6]) 以及权重函数 S_{C_ZJU07} 和 S_{H_ZJU07} 的色差预测性能进行评价, 以 PF/3 表示的结果列于表 2 和表 3 中, 其中色差公式均采用原始形式, 即 $k_L = k_C = k_H = 1$ 。

表 2 色差公式和 S_{C_ZJU07} 的彩度预测性能比较 (PF/3 表示)

Table 2 Comparison of chroma prediction performances of color-difference formulae and S_{C_ZJU07} in terms of PF/3

Dataset	CIELAB	CMC	BFD	CIE94	LCD	CIEDE2000	S_{C_ZJU07}
This study	41.8	32.0	35.6	31.7	31.7	33.7	16.5
RIT-Dupont	37.2	31.1	33.2	31.2	31.2	32.3	21.8
Combined	42.5	33.3	36.7	33.1	33.1	34.6	20.2

表 3 色差公式和 S_{H_ZJU07} 的色调预测性能比较 (PF/3 表示)

Table 3 Comparison of hue prediction performances of color-difference formulae and S_{H_ZJU07} in terms of PF/3

Dataset	CIELAB	CMC	BFD	CIE94	LCD	CIEDE2000	S_{H_ZJU07}
This study	31.2	42.4	31.7	34.2	34.2	30.2	14.8
RIT-Dupont	26.3	22.7	23.0	25.0	25.0	17.0	16.4
Combined	32.5	38.0	31.4	33.6	33.6	28.1	16.6

从表 2 可知, 对于本实验和 RIT-Dupont 数据集以及两者的综合数据集的彩度差数据, S_{C_ZJU07} 的预测性能均为最佳。而六个色差公式的彩度权重函数中 CIE94、LCD 和 CMC 预测性能表现最好, CIEDE2000 和 BFD 次之, 而 CIELAB 的彩度差预测性能最差。

表 3 为色调差预测性能, 其中 S_{H_ZJU07} 的预测性能优于六个色差公式的色调权重函数, 且对于本实验、RIT-Dupont 数据集以及两者综合数据集比色调差预测性能最好的色差公式 CIEDE2000 分别提高了 15.4、0.6 和 11.5 个 PF/3 单位。对于六个色差公式的色调差预测性能, CIEDE2000 表现最好, 表

明 CIEDE2000 中对色调权重函数的改进是极为有效的。对 RIT-Dupont 数据集, CMC 和 BFD 表现次之, CIE94 和 LCD 相差不多, CIELAB 最差。而对于本实验和两者的综合数据集, BFD 和 CIELAB 表现次之, CIE94、LCD 和 CMC 最差。

从上述结果可以看出 CIELAB 颜色空间的彩度和色调均匀性都很差。六个基于 CIELAB 的色差公式对彩度差的预测性能并没有明显改善。由于最新的 CIEDE2000 仅考虑了色调角对色调差的影响, 并未考虑对彩度差的影响, 因此其对彩度差的预测性能并非最佳, 而对色调差数据的预测性能有所提高。通过本实验得到的彩度权重函数 $S_{C_{ZJU07}}$ 和色调权重函数 $S_{H_{ZJU07}}$ 均对彩度差和色调差数据的预测性能有较大提高, 表明现有的色差公式在彩度差和色调差的预测性能上有较大的提升空间。

5 结 论

利用本实验测定的 CRT 数据以及 RIT-Dupont 数据集在 CIELAB 颜色空间 a^*b^* 平面上各 16 个非中性色的阈上色度椭圆的彩度差和色调差数据, 得到了彩度权重函数 $S_{C_{ZJU07}}$ 和色调权重函数 $S_{H_{ZJU07}}$ 。对六个典型色差公式和文中提出的两个权重函数的预测性能进行评价和比较, $S_{C_{ZJU07}}$ 和 $S_{H_{ZJU07}}$ 的预测性能均为最佳。六个色差公式的彩度权重函数对于彩度差数据的预测性能较差, 而对于色调差数据, CIEDE2000 的表现优于其他公式, 表明 CIEDE2000 的色调权重函数的改进是合理有效的。由此可见, 现有色差公式权重函数的预测性能尚有较大的提升空间, 利用色差评价的心理物理实验数据可以获取合理可靠的色差公式权重函数, 从而改善相关工业色差评价模型的预测性能。

参 考 文 献

- 1 A. R. Robertson. The CIE 1976 color-difference formulae[J]. *Color Research and Application*, 1977, **2**(1): 7~11
- 2 CMC Colour-Difference Formula [R]. *Color Research and Application*, 1984, **9**(4): 250
- 3 M. R. Luo, B. Rigg. BFD(l; c) colour-difference formula Part 1-Development of formula[J]. *J Soc. Dyers Colour*, 1987, **103**: 86~94
- 4 Lewis D. Griffin, Arsalan Sepehri. Performance of CIE94 for nonreference conditions[J]. *Color Research and Application*, 2002, **27**(2): 108~115
- 5 Dong-Ho Kim, Eun Kyoung Cho, Jea Pil Kim. Evaluation of CIELAB-based colour-difference formulae using a new dataset[J]. *Color Research and Application*, 2001, **26**(5): 369~375
- 6 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
- 7 M. Melgosa, R. Huertas, R. S. Berns. Relative significance of the terms in the CIEDE2000 and CIE94 color-difference formulas[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2004, **21**(12): 2269~2275
- 8 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
- 9 Roy S. Berns. Color tolerance feasibility study comparing CRT-generated stimuli with an acrylic-lacquer coating[J]. *Color Research and Application*, 1991, **16**(4): 232~242
- 10 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性分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1139~1144
- 11 Liao Ningfang, Shi Junsheng, Zeng Hua *et al.*. Analysis of interactive errors in conventional CRT colorimetric prediction model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(1): 133~138
廖宁放, 石俊生, 曾华等. 传统阴极射线管色度预测模型的相干误差分析[J]. *光学学报*, 2000, **20**(1): 133~138
- 12 A. R. Robertson. CIE guidelines for coordinated research on colour difference evaluation[J]. *Color Research and Application*, 1978, **3**(3): 149~151
- 13 K. Witt. CIE guidelines for coordinated future work on industrial colour-difference evaluation[J]. *Color Research and Application*, 1995, **20**(6): 399~403
- 14 M. Melgosa, E. Hita, A. J. Poza *et al.*. Suprathreshold color-difference ellipsoids for surface colors[J]. *Color Research and Application*, 1997, **22**(3): 148~155
- 15 M. Melgosa, R. Huertas, A. Yebra *et al.*. Are chroma tolerances dependent on hue-angle [J]. *Color Research and Application*, 2004, **29**(6): 420~427