

文章编号: 0253-2239(2009)06-1740-06

# 印刷样品恰可察觉小色差辨色阈值的研究 II : 色差公式分析与评价

黄 敏<sup>1,2</sup> 刘浩学<sup>1</sup> 廖宁放<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>北京印刷学院 印刷与包装工程学院, 北京 102600  
<sup>2</sup>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)

**摘要** 利用由对印刷样品恰可察觉小色差的辨色阈值实验得到的 CIELAB 颜色空间中的视觉数据,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。不同色差公式计算的印刷样品不同颜色区域的恰可辨别小色差阈值不同,色差公式 CIELAB 除在灰色区域色差阈值低于其余典型色差公式外,在其他颜色区域均高于典型色差公式。对于原始形式( $k_L=k_C=k_H=1$ )的色差公式,CIEDE2000 与人眼的视觉匹配程度最好;采用对  $k_C:k_H$  进行优化后的 CIEDE2000 色差公式,色差预测性能在颜色空间均有不同程度的改善,其中对灰色和高彩橙颜色区域的性能改善最大。

**关键词** 视觉与色彩; 颜色辨别阈值; 色差公式; 色差预测性能

**中图分类号** O432.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092906.1740

## Just-Noticeable Color Difference Discrimination Threshold Using Printed Samples II : Analysis and Evaluation of Color-Difference Formulae

Huang Min<sup>1,2</sup> Liu Haoxue<sup>1</sup> Liao Ningfang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Printing and Packing Engineering, Beijing Institute of  
Graphics Communication, Beijing 102600, China

<sup>2</sup> National Laboratory of Color Science and Engineering, School of Information Science and  
Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** The visual data, obtained from the just-noticeable color difference discrimination threshold experiment carried out in CIELAB color space, were used to test the four classical color-difference formulae, CIELAB, CMC, CIE94 and CIEDE2000. The just-noticeable color difference discrimination thresholds of the printed samples' different color regions calculated by different formulae are different. Except for the grey color region, the CIELAB color-difference is higher than others. For the original forms ( $k_L=k_C=k_H=1$ ), CIEDE2000 outperforms others with the best matching with visual evaluation. For the color-difference formulae with optimized  $k_C$  and  $k_H$ , the optimized form of CIEDE2000 performs the best especially in the color region of grey and high chroma orange.

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

## 1 引 言

色差公式的研究<sup>[1~5]</sup>一直是颜色科学技术中的

一个重要课题。近期的色差公式大多数是在工业生产质量控制条件下,通过对各种材料色样的目视评

收稿日期: 2008-05-26; 收到修改稿日期: 2008-08-02

基金项目: 国家自然科学基金(60678052)、北京市优秀人才培养(20071D0500400146)和北京市教委(KM200910015006)资助课题。

作者简介: 黄 敏(1979-),女,博士研究生,讲师,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研究。E-mail: huangmin@bigc.edu.cn

导师简介: 廖宁放(1960-),男,教授,主要从事颜色与彩色图像,光谱成像技术的研究。E-mail: liaonf@bit.edu.cn

价比较,积累了大量的视觉评价数据,对 CIELAB 均匀颜色空间及其色差公式<sup>[6]</sup>进行修正的基础上形成的,如 CMC<sup>[7]</sup>、CIE94<sup>[8]</sup>和 CIEDE2000<sup>[9]</sup>等是其中的代表。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,而且多数是基于纺织样品和涂料、油漆样品进行的,尚无针对印刷样品颜色的视觉评价数据,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目视评价实验中得到的印刷样品恰可察觉小色差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、为印刷行业进行颜色质量评价和实施色彩管理技术都可提供相应的参考数据。

## 2 色差公式分析与评价

### 2.1 原始色差公式阈值计算

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:

$$\Delta V = \Delta E = \frac{1}{k_E} \left[ \left( \frac{\Delta L^*}{k_L S_L} \right)^2 + \left( \frac{\Delta C_{ab}^*}{k_C S_C} \right)^2 + \left( \frac{\Delta H_{ab}^*}{k_H S_H} \right)^2 + R_T f(\Delta C^*, \Delta H^*) \right]^{1/2}, \quad (1)$$

式中  $\Delta L^*$ 、 $\Delta C^*$  和  $\Delta H^*$  分别为对应颜色样品的明度差、彩度差和色调差,  $R_T f(\Delta C^*, \Delta H^*)$  为彩度差和色调差的交叉旋转项,  $R_T$  为该旋转项的系数,其中仅 CIEDE2000 存在该项。  $k_L$ 、 $k_C$  和  $k_H$  为实验条件的校正项,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  $k_L = k_C = k_H = 1$ ;  $S_L$ 、 $S_C$  和  $S_H$  分别为用于校正 CIELAB 缺乏视觉均匀性的明度、彩度和色调的权重函数。

根据反射样品的恰可察觉小色差的辨色阈值实验中得到的测试数据,计算印刷样品不同颜色区域的宽容度<sup>[10,11]</sup>。将视觉判断“无差别”的称作“合格”,“有差别”的称作“不合格”。使用各色差方程计算标样和各试样之间的色差。同时将试样分为“合格”与“不合格”两组。每组都按上升序号排列。使用下面的方程计算每组的累计百分率,其中  $n_p$  表示“合格”试样的数目,  $n_f$  表示“不合格”试样的数目,  $i$  表示试样 1, 2, …,  $n_p$  或  $n_f$ 。累计合格,  $\sum_{p,i} = 100 (i/n_p)$ , 累计不合格,  $\sum_f, i = 100 - 100(i/n_f)$ 。

将累计百分率和被排序的色差作图。把合格率和不合格率与对应的色差划在同一图上,两条线的交点色差就是阈值。如图 1 所示即为 CIEDE2000 公式计算灰色区域色差值和累计观察(不)合格率间的对应关系,两条线的交点即为色差阈值  $\Delta E_t = 0.43$ 。

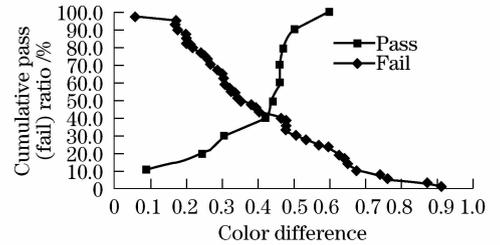


图 1 印刷样品灰色的 CIEDE2000 色差阈值  
Fig. 1 CIEDE2000 grey color difference threshold of the printed samples

表 1 所示,为用该方法求得的 17 个颜色中心不同色差公式的计算阈值。

由表 1 可知,不同色差公式计算的一、二象限颜色的辨色阈值普遍高于三、四象限颜色的辨色阈值,说明人眼对色差的分辨能力随着色调由暖色调向冷色调变化而逐渐增强。对于同一色调的颜色区域,高彩度颜色的阈值大于低彩度颜色的阈值,说明人眼对恰可察觉小色差阈值的分辨能力随着彩度的增加而下降。

各色差公式计算的恰可察觉小色差辨色阈值,除中性灰处 CIEL\* a\* b\* 的计算值低于典型色差公式的计算值外,其余色调处 CIEL\* a\* b\* 的计算值均高于其它色差公式的计算值。

同时,  $\Delta E_{ab}^*$ 、CMC(2:1)、 $\Delta E_{00}$  色差公式的计算结果表明,反射样品的恰可察觉小色差辨色阈值分别为 0.76、0.38、0.42,均低于显示器的辨色阈值 1.94、0.99、1.09<sup>[4]</sup>。这可能与两次实验所采用的实验方法,实验样品的呈色原理、大小、观察条件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人眼对反射样品较自发光颜色样品具有较高的辨色敏感度。

### 2.2 原始色差公式评价

色差公式计算颜色空间 17 个颜色区域的色差阈值时,色差阈值越接近,说明色差公式评价的均匀性越好,用均方差  $\sigma$  来表示。一个理想的色差公式,在 17 个颜色区域的计算色差阈值应为一平行于坐标横轴的直线。由于每个色差公式的色差单位不同,以 CIEL\* a\* b\* 色差公式为基准,对各公式的计算结果进行归一化处理,结果如图 2 所示:

表 1 不同色差公式计算各颜色中心恰可察觉小色差阈值

Table 1 Just-noticeable color difference thresholds for different color centers with different color-difference formulae

Color centers	CIE L* a* b*	CMC(1 : 1)	CMC(2 : 1)	CIE94	CIEDE2000
Grey	0.37	0.47	0.4	0.37	0.43
Red	0.83	0.53	0.46	0.45	0.46
Red, high chroma	1.08	0.59	0.51	0.52	0.53
Orange	0.56	0.42	0.37	0.35	0.33
Orange, high chroma	1.77	0.87	0.8	0.73	0.75
Yellow	1.06	0.52	0.49	0.52	0.48
Yellow, high chroma	1.52	0.68	0.57	0.67	0.57
Yellow-green	0.29	0.22	0.18	0.22	0.2
Yellow-green, high chroma	1.24	0.73	0.5	0.85	0.72
Green	0.56	0.33	0.29	0.31	0.31
Green, high chroma	0.71	0.42	0.33	0.44	0.42
Blue-green	0.41	0.26	0.2	0.25	0.25
Blue-green, high chroma	0.41	0.35	0.25	0.35	0.36
Blue	0.41	0.32	0.23	0.28	0.26
Blue, high chroma	0.52	0.39	0.26	0.34	0.28
Purple	0.16	0.14	0.12	0.13	0.14
Purple, high chroma	0.96	0.71	0.5	0.69	0.68
Average color-difference	0.76	0.47	0.38	0.44	0.42

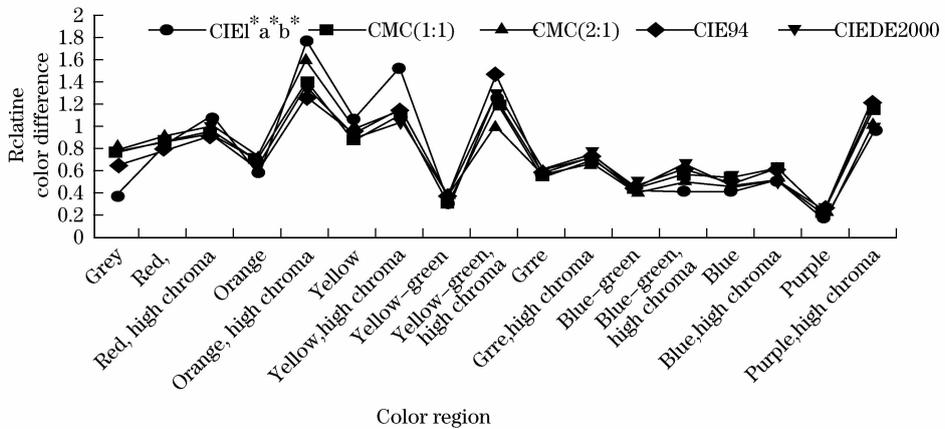


图 2 各色差公式的计算结果归一化后比较

Fig. 2 Comparison of the normalized results calculated with color difference formulae

色差公式的评价性能优劣表现依次是 CMC (1 : 1) 最优  $\sigma = 0.31$ , 其次是 CIEDE2000:  $\sigma = 0.32$ ; CIE94:  $\sigma = 0.33$ ; CMC (2 : 1):  $\sigma = 0.34$ ; CIE L\* a\* b\* 最差  $\sigma = 0.44$ 。

同时,也可以用错误判断率(wrong decision ratio, WD)对色差公式计算不同颜色区域的性能进行评价。对于每一对色样,如果色差公式计算值大于色差阈值,而“无色差”的判断概率(即合格率)大于 50%,则为 WD;如果色差公式计算值小于色差阈值,而“无色差”的判断概率小于 50%,也为 WD。反之,则为合理的判断。表 2 所示用 WD 对不同色差

公式计算不同颜色区域色差值的性能评价。

由表 2 可见,不同的颜色区域色差公式与人眼视觉评价的一致性是不同的,即错误判断的大小各异。总体来说,CIEDE2000 色差公式与视觉评判的一致性表现最好,色差公式 CIELAB、CMC、CIE94 的表现无明显差异。

2.3 优化形式 CIEDE2000 色差公式评价

在 17 个颜色区域对上述性能最佳的 CIEDE2000 色差公式的参量因子进行优化,令  $k_L = 1$ ,对  $k_C : k_H$  进行优化,使得色差公式计算值与视觉评价实验数据的一致性较好,即使错误判断率

WD 最小。如表 3 所示,为在 17 个颜色区域的拟合的  $k_C : k_H$  加权系数。

表 2 用 WD 评价色差公式性能

Table 2 Performance of different color-difference formulae evaluated by WD

Color centers	CIEL* a* b* /%	CMC(1 : 1) /%	CMC(2 : 1) /%	CIE94 /%	CIEDE2000 /%
Grey	52	60	62	52	54
Red	26	24	24	26	22
Red, high chroma	29	30	29	32	30
Orange	28	24	26	22	18
Orange, high chroma	44	42	42	46	44
Yellow	33	33	33	35	33
Yellow, high chroma	32	26	30	28	26
Yellow-green	30	30	32	32	29
Yellow-green, high chroma	44	44	42	44	42
Green	24	22	24	22	22
Green, high chroma	24	26	26	26	22
Blue-green	42	40	42	42	38
Blue-green, high chroma	26	28	28	26	26
Blue	52	52	47	52	44
Blue, high chroma	36	36	28	34	26
Purple	50	44	46	48	42
Purple, high chroma	10	12	8	18	8

表 3 不同颜色中心的 CIEDE2000 色差公式加权系数  $k_C : k_H$  值

Table 3 Optimized  $k_C : k_H$  of CIEDE2000 color difference formula for different color centers

Color centers	$k_C$	$k_H$	Color centers	$k_C$	$k_H$
Grey	2.9	2.1			
Red	2.9	1.5	Red, high chroma	0.7	0.9
Orange	2.9	0.9	Orange, high chroma	2.7	1.3
Yellow	0.7	1.7	Yellow, high chroma	0.7	1.5
Yellow-green	2.9	1.3	Yellow-green, high chroma	2.9	0.3
Green	1.9	0.7	Green, high chroma	0.7	0.7
Blue-green	2.9	0.7	Blue-green, high chroma	1.7	0.7
Blue	0.5	0.3	Blue, high chroma	0.1	0.5
Purple	0.3	0.1	Purple, high chroma	0.5	0.7

使用表 3 中优化的  $k_C : k_H$  加权系数和原始的  $k_L : k_C : k_H = 1 : 1 : 1$  加权系数计算 CIEDE2000 色差值,用 WD 对色差公式的性能进行评价,如表 4 所示。

可见,优化后的 CIEDE2000 色差公式计算值,在不同颜色区域与人眼的视觉匹配度都有所提高,WD 都有不同程度的降低。其中,在灰色和高彩橙区域的改善最为明显。同样,以 CIEL\* a\* b\* 色差公式为基准,对原始形式的 CIEDE2000 色差公式

$\Delta E_{00(1:1:1)}$  和优化后的  $\Delta E_{00}^*$  色差公式进行归一化处理,结果如图 3 所示。

原始的 CIEDE2000 色差公式计算 17 个颜色区域色差值的均方差为 0.32,优化后的 CIEDE2000 色差公式的均方差为 0.30,较原始色差公式有所改善。

用 CIEDE2000 色差公式计算 Witt 数据组中 5 个颜色中心  $\Delta V \leq 1$  的色差对,用线性相关系数  $r^2$  表示色差公式的计算值与视觉评价值的线性相关性,如表 5 所示。

表 4 原始色差公式和优化的色差公式在 17 个颜色中心的色差值和 WD 比较

Table 4 Color-difference and WD of the color-difference formulae in their original and optimized forms for 17 color centers

Color centers	Original E00		Optimized E00	
	Color difference	WD / %	Color difference	WD / %
Grey	0.43	54	0.24	44
Red	0.46	22	0.33	20
Red, high chroma	0.53	30	0.58	27
Orange	0.33	18	0.28	14
Orange, high chroma	0.75	44	0.47	28
Yellow	0.48	33	0.5	28
Yellow, high chroma	0.57	26	0.56	24
Yellow-green	0.2	29	0.16	28
Yellow-green, high chroma	0.72	42	0.86	38
Green	0.31	22	0.29	20
Green, high chroma	0.42	22	0.51	16
Blue-green	0.25	38	0.36	30
Blue-green, high chroma	0.36	26	0.27	20
Blue	0.26	44	0.46	35
Blue, high chroma	0.28	26	0.64	18
Purple	0.14	42	0.51	38
Purple, high chroma	0.68	8	0.82	6

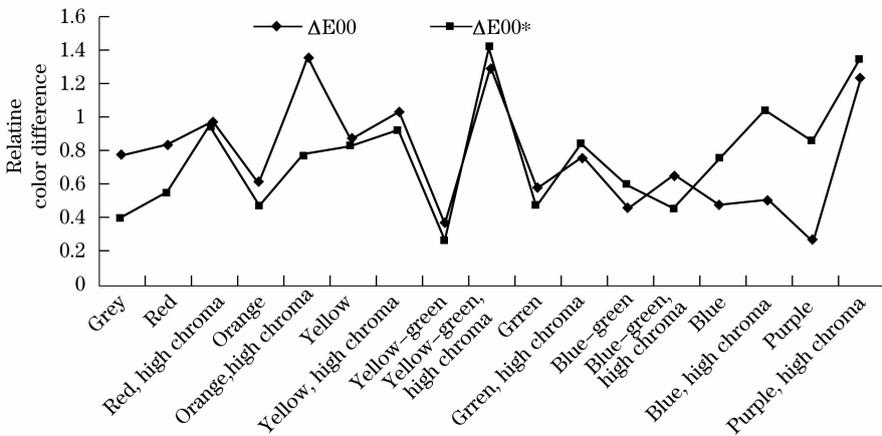


图 3 归一化后的原始和优化 CIEDE2000 计算值

Fig. 3 Comparison of the normalized results calculated with the original and optimized CIEDE2000 color-difference formulae

表 5 CIEDE2000 色差公式计算 Witt 数据的加权系数和线性相关系数

Table 5 Weight parameters and linear correlation coefficient of the Witt data caaculated by CIEDE2000 color-difference formula

Data set	Color centers	$k_L$	$k_C$	$k_H$	$r^2$ (original)	$r^2$ (optimized)
Witt $\Delta V \leq 1$	Grey	1	1	10	0.21	0.39
	Red	1	1.08	1.54	0.85	0.97
	Yellow	1	1.26	0.74	0.82	0.93
	Green	1	2.06	1.11	0.62	0.96
	Blue	1	1.38	1.54	0.85	0.95

同理可见,原始 CIEDE2000 色差公式在灰色和绿色区域的计算性能明显不如其他四个颜色区域,

$k_C$  :  $k_H$  加权系数在灰色区域的改善最大。在不同颜色区域可拟合出适合计算 Witt 数据组的色差公

式,使得与视觉评价的线性相关性有所提高。

### 3 结 论

基于 CIELAB 颜色空间中的恰可察觉小色差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 CIE 17 个基本颜色中心的色差预测性能进行了测试和评价,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,CMC(1:1)的色差预测性能最好,其次为 CIEDE2000、CIE94、CMC(2:1),CIELAB 最差;CIEDE2000 色差公式与视觉评判的一致性表现最好,WD 最小。

对 CIEDE2000 色差公式经过  $k_C:k_H$  参量优化,优化后的 CIEDE2000 色差公式的预测性能较原始的 CIEDE2000 色差公式有不同程度的改善,其中在灰和高彩橙颜色区域的改善最为明显。由计算结果可知,反射样品的恰可察觉小色差的色差阈值低于显示器的色差阈值,这也在某种程度上也说明人眼对反射样品具有较高的敏感度。

### 参 考 文 献

- 1 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
- 2 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 Huang Min, Liao Ningfang, Liu Haoxue *et al.*. Cathode-ray tube color perceptible color difference threshold evaluation in visual color matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 599~603
- 黄 敏, 廖宁放, 刘浩学等. 颜色视觉匹配中显示器颜色色差阈值的评价[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 599~603

- 5 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

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 A. R. Robertson. The CIE1976 color-difference formulae[J]. *Color Res. Appl.*, 1977, **2**(1): 7~11

- 7 CMC Colour-Difference Formula [R]. *Color Res. Appl.*, 1984, **9**(4): 250

- 8 Lewis D. Griffin, Arsalan Sephri. Performance of CIE94 for nonreference conditions[J]. *Color Res. Appl.*, 2002, **27**(2): 108~115

- 9 M. R. Luo, G. Cui, B. Rigg. The development of the CIE2000 colour-difference formulae; CIEDE2000 [J]. *Color Res. Appl.*, 2001, **26**(5): 340~350

- 10 Roy S. Berns. *Principles of Color* [M]. Li Xiaomei Transl. Beijing: Chemistry Industry Press, 2004. 177~180

Roy S. Berns. 颜色技术原理[M]. 李小梅译. 北京: 化学工业出版社, 2004. 177~180

- 11 R. S. Berns. Deriving instrumental tolerances from pass-fail and colorimetric data[J]. *Color Res. Appl.*, 1996, **21**: 459~472