

文章编号: 0253-2239(2010)11-3359-08

用比较法研究光泽度对印刷样品的中小色差影响

黄 敏¹ 王丽丽^{1,2} 刘浩学¹

(¹北京印刷学院印刷与包装工程学院, 北京 102600; ²南京林业大学轻工科学与工程学院, 江苏 南京 210037)

摘要 为了研究哑光和半光两种光泽纸张的印刷样品对中小色差评价的影响,分别围绕 CIE 5 个基本颜色中心区域,对两种纸张制作 30 个颜色样品,采用心理物理实验方法中的比较法,分别测得 20 名色觉正常的观察者对不同纸张和不同颜色的辨色特性。对四个典型色差公式 CIELAB, CIE94, CMC, CIEDE2000 和 CAM02 系列 CAM02-LCD, CAM02-SCD, CAM02-UCS 三个色差公式用标准化残差平方和(STRESS)性能因子和 F 检验的方法进行评价和优化。原始色差公式, CIEDE2000 色差公式的表现最好, CIELAB 色差公式表现最差, CIE94 色差公式有较大的改进空间。采用对 k_L 进行优化后的计算结果表明,随着光泽度的增加,明度的影响权重在色差计算中有增加的趋势。

关键词 色度学; 视觉与色彩; 光泽度; 色差公式; 标准化残差平方和; F 检验

中图分类号 O432.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103011.3359

Study on the Influence of Gloss on Printed Samples Medium-Small Color Difference with the Psychophysical Method of Comparison

Huang Min¹ Wang Lili^{1,2} Liu Haoxue¹

(¹ School of Printing and Packing Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)
(² College of Light Industry Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract In order to reveal the effect of gloss on medium-small color difference evaluation, the printed samples were prepared by ink jet printer on matte, semi-gloss two papers with different gloss levels at the 5 basic CIE color centers. About 30 color samples were made on two kinds of paper; experiment of color difference was carried out by 20 observers with normal color vision based on the psychophysical method of comparison. The standardized residual sum of squares (STRESS) and F test were proposed to test the four classical color-difference formulae, CIELAB, CMC, CIE94, CIEDE2000 and CAM02 series CAM02-LCD, CAM02-SCD, CAM02-UCS. For the original color difference formulae, CIEDE2000 performed the best, and CIELAB color difference formulae performed the worst, while there's still room for CIE94 for improvement. For the optimized k_L values, the higher gloss is, the smaller k_L is, which indicated that the lightness difference are more noticeable for the higher gloss printed samples for evaluating color difference.

Key words chromatography; vision and color; gloss; color-difference formula; standardized residual sum of squares; F Test

1 引 言

不同的样品材质、光泽和透明度等成为颜色科学研究领域特别关注的研究课题。各国的颜色科学家对不同材质的颜色样品进行了大量的目视评价研究实验,代表性的有 Luo-Rigg、Witt、RIT-Dupont 和 Leeds 典型色差数据集^[1]。但是,缺少完整的印

刷样品色差评价数据集,同时对光泽度的影响研究也较少。Yang Pan 等对平均色差为 $4.0\Delta E_{ab}^*$ 色差单位的三种不同光泽印刷样品用灰梯尺的方法进行了实验研究,得出对于不同光泽的样本,明度差比彩度差有更明显的影响^[2]。北京印刷学院对印刷样品进行了大量的目视评价实验^[3],同时也针对微小色

收稿日期: 2009-12-31; 收到修改稿日期: 2010-04-23

基金项目: 北京市教委科技面上项目(KM200910015006)和北京印刷学院校级重点研究项目(Ea201003)资助课题。

作者简介: 黄 敏(1979—),女,博士,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等方面的研究。E-mail: huangmin@bigc.edu.cn

差研究了光泽度对印刷样品色差评价的影响^[4]。

在实验研究中,用 Epson 喷墨打印机在印刷常用的哑光、半光两种纸上对 CIE 推荐的 5 个颜色中心制作颜色样品,哑光纸和半光纸颜色样品的 CIELAB 平均色差分别为 3.06 和 3.10,色差等级为中小色差。采用心理物理实验方法中的比较法进行视觉评价实验,通过对测得的印刷样品小色差的辨色阈值数据进行处理和分析,对四个典型色差公式 CIELAB^[5],CIE94^[6],CMC^[7],CIEDE2000^[1] 和 CAM02 系列^[8] CAM02-CD, CAM02-CD, CAM02-CS 三个色差公式进行评价和优化。讨论光泽度对

表 1 两种纸张上制作的五个颜色中心的 CIELAB 色度参量

Table 1 CIELAB chromaticity parameters of five color centers on two kinds of paper

Paper Color center	Matte paper			Semi-gloss paper		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
Grey	63.06	-0.69	0.60	63.29	-1.01	-0.86
Red	44.87	37.09	23.22	44.70	38.35	23.22
Yellow	85.91	-6.71	50.09	83.97	-6.13	47.02
Green	56.63	-34.94	2.01	55.86	-32.67	0.90
Blue	35.54	3.91	-32.02	39.53	5.96	-29.65

对每种纸张围绕 5 个基本颜色中心,分别在明度、彩度和色调三个方面变化,每个颜色中心制作颜色样品 30 个。与颜色中心的 LAB 色差值分布在 0.5~1,1~2,2~3,3~4,4~6,五个不同的色差等级。两种纸所有颜色样本与颜色中心的 LAB 平均色差、最大和最小色差如表 2 所示。

图 1 所示为用哑光、半光两种纸制作的红色颜色样品与颜色中心的色度参量在 $\Delta a^* \Delta b^*$ 平面和 $\Delta L^* \Delta C^*$ 平面上的分布。颜色样品的大小为 4.5 cm×4.5 cm,观察者在距颜色样品对 25 cm 左右处进行观察,颜色刺激色样的视角大于 4°,因此,

印刷样品中小色差评价的影响,为改善色差公式提供原始实验数据和建议。

2 实验方案

2.1 实验样本

选用哑光(EP514)、半光(EP517)两种纸,纸张的其它参数基本相同,光泽度分别为 31.4、56.4。用 Epson Stylus PRO 7800 喷墨打印机分别在两种纸张上,制作 5 个颜色中心,颜色中心的色度参量如表 1 所示。

计算中采用 CIE1964 补充标准色度系统。色样的颜色测量时,选用 Spectro-eye 分光光度计测量(0/45),测量条件为 D65/10°。

表 2 两种纸颜色样本与颜色中心的色差值

Table 2 Color differences of color centers and samples of two papers

Color difference paper	Mean	Max	Min
Semi-gloss paper	3.10	5.85	0.51

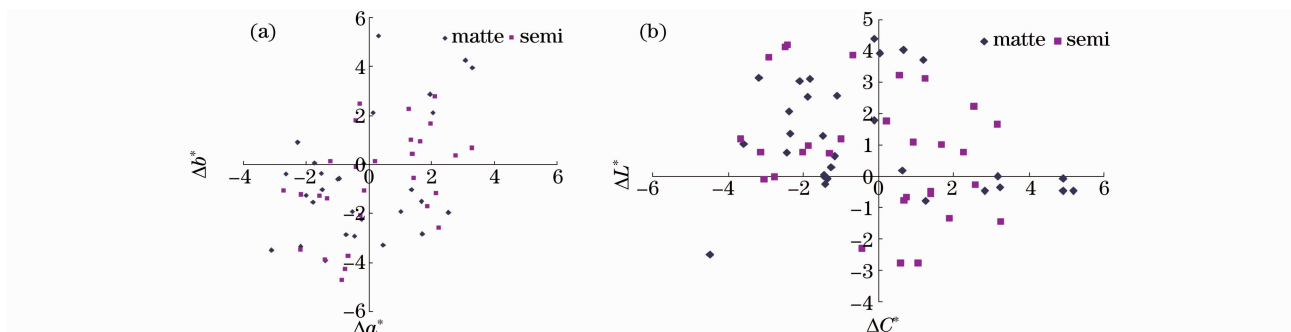


图 1 在两种纸张上制作的红色颜色样品和颜色中心的色度参量在 $\Delta a^* \Delta b^*$ 平面和 $\Delta L^* \Delta C^*$ 平面上的分布

Fig. 1 Chromatic parameters distribution of red samples and color centers made on two kinds of papers on $\Delta a^* \Delta b^*$ plane and $\Delta L^* \Delta C^*$ plane

2.2 实验过程

目视评价实验与 CIE 推荐的参照条件相符,在光暗室中进行,选用 Gretag Macbeth The Judge II

多光源标准观察箱 Day 模式下的光源进行观察(其照度为 958 lx,色温为 6587 K),箱体是灰色背景,观察条件为 0°/45°。20 名观察者(13 女 7 男),年龄

在 19~22 岁,为北京印刷学院不同专业、不同年级的学生,全都色觉正常。颜色中心和色样放在标准观察箱中央的位置,并用灰色挡板遮盖,灰板的 L^* , a^* , b^* 色度值为 56.5, 0.2, 1.05。在中间挖孔 $13.5\text{ cm} \times 4.5\text{ cm}$, 在中央粘贴颜色中心(如图 2 所示),左侧固定编号为 1 的色样,右侧依次为色样 2, 3, ..., 30。然后左侧换为编号为 2 的色样,右侧依次为色样 3, 4, ..., 30, 依次类推。

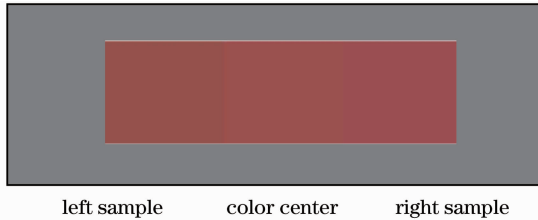


图 2 实验中色样的排列方式

Fig. 2 Arrangement of experimental color samples

每次实验开始之前,观察者要进行 1 min 左右的亮适应。然后判断左色样与颜色中心组成的色样对,和右色样与颜色中心组成的色样对,其中哪一对色样具有较大的色差。20 名观察者中有 5 名观察者重复观察两次用以检验重复性。因此每种纸的每个颜色共有 $435 \times (20 - 5) + 29 \times 29 \times 5 = 10730$ 个视觉数据,整个实验的时间跨度约 3 个月(包括颜色样品的制作和样品的初选实验)。

3 实验结果分析

3.1 观察者精度分析

用 η_{WD} (wrong decision) 误判率^[9]来评价观察者的重复性和准确性。 η_{WD} 值越小,说明观察者精度越高。实验中,为了研究观察者的准确性,对于左右

两组色样对,每位观察者分别判断左侧色样对色差大还是右侧色样对色差大,在总共 20 次的判断中,如有 10 次以上的判断认为左侧色样对色差大,而某位观察者给出右侧色样对色差大的判断,则认为其为误判。这种原则适用于所有的样品对。用观察者误判的样品对数除以总的样品对数,结果用 η_{WD} 表示。同样,也可以用 η_{WD} 来表示 5 名观察者两次判断的重复性。对观察者的精度进行分析得:20 名观察者的重复性的平均值为 12;准确性的平均值为 17。与经典数据比较,均在可接受的范围内,因此视觉评价实验数据是有效的^[10]。

3.2 视觉评价数据处理

对于比较法的视觉实验数据,应用 Coates 等的方法^[11,12]转换为视觉色差。以哑光红的实验数据为例,首先将视觉评价数据列于表 3 中,表中的每个数据表示视觉实验中判断其所在列色样对的色差大于所在行色样对色差的次数,因此表中对角线右上部分和左下部分数据之和为每两组色样对判断的总次数 20 次(实验数据取 20 名观察者每人评价一次的数据计算)。

将表 3 中的全部数据除以总观察次数 20 以转换为概率,再转化为标准正态分布中的 z -score 值(在转换过程中概率为 1 和 0 的数分别以 0.99 和 0.01 代替),然后求出每一列 z -score 值的平均值,表示该列色样对的视觉色差大小,并对其按照升序进行排列后得到如表 4 所示结果。

表 4 中的数据代表了所在行列对应的两组色样对之间视觉色差的差,进一步将表 4 中相邻两列中右侧列数据减去左侧列对应的数据,得到一组表示色样对视觉色差之差的数据,如表 5 所示。

表 3 比较法视觉评价实验数据

Table 3 Experimental data of visual evaluation by psychophysical method of comparison

Pair No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	.....	30
1		4	18	12	19	20	13	16	18	3	.....	14
2	16		18	20	20	20	15	18	17	4	.....	18
3	2	2		8	19	20	4	11	13	2	.....	7
4	8	0	12		18	19	7	16	13	0	.....	11
5	1	0	1	2		20	0	6	4	1	.....	0
6	0	0	0	1	0		1	2	1	0	.....	0
7	7	5	16	13	20	19		20	19	5	.....	17
8	4	2	9	4	14	18	0		11	1	.....	6
9	2	3	7	7	16	19	1	9		0	.....	10
10	17	16	18	20	19	20	15	19	20		.....	17
.....
30	6	2	13	9	20	20	3	14	10	3	.....

表 4 比较法视觉实验所得 z-score 值升序排列后的结果

Table 4 Ascending sort of z-score values from the experimental data of psychophysical method of comparison

Pair No.	10	2	21	7	1	16	23	28	4	30	.....	27
1	-1	-0.8	-0.8	0.39		0.67	0.52	0.67	0.25	0.52	.....	2.33
2	-0.8		-0.4	0.67	0.84	1.04	1.28	1.04	2.33	1.28	.....	2.33
3	-1.3	-1.3	-1.6	-0.8	-1.3	-1	-0.3	-0.8	-0.3	-0.4	.....	2.33
4	-2.3	-2.3	-0.8	-0.4	-0.3	-0	0.25	-0		0.13	.....	1.64
5	-1.6	-2.3	-1.3	-2.3	-1.6	-1.6	-1.3	-2.3	-1.3	-2.3	.....	1.64
6	-2.3	-2.3	-2.3	-1.6	-2.3	-1.6	-2.3	-1.6	-1.6	-2.3	.....	1.64
7	-0.7	-0.7	-0.5		-0.4	0.52	0.84	0.67	0.39	1.04	.....	2.33
8	-1.6	-1.3	-1.3	-2.3	-0.8	-0.5	-0.8	-0.7	-0.8	-0.5	.....	1.64
9	-2.3	-1	-1.3	-1.6	-1.3	0.25	-0.5	-0.4	-0.4	-0	.....	2.33
10		0.84	0.25	0.67	1.04	1.64	1.28	0.84	2.33	1.04	.....	2.33
.....
30	-1	-1.3	-1	-1	-0.5	-0.7	-0.5	-0.3	-0.1		.....	2.33
Mean	-1.7	-1.6	-1.5	-1.4	-1.2	-1	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	.....	1.94
Rank	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	.....	30

表 5 比较法色样对视觉色差之差数据

Table 5 Subtraction of the visual color differences from the psychophysical method of comparison

Pair No.	d(2-10)	d(21-2)	d(7-21)	d(1-7)	d(16-1)	d(23-16)	d(28--23)	d(4-28)	d(30-4)	.....
1	0.19	0	1.23	-0.4	0.67	-0.2	0.15	-0.4	0.27	.....
2	0.84	-0.4	1.06	0.17	0.19	0.25	-0.2	1.29	-1	.....
3	0	-0.4	0.8	-0.4	0.25	0.78	-0.6	0.59	-0.1	.....
4	0	1.48	0.46	0.13	0.25	0.25	-0.3	0	0.13	.....
5	-0.7	1.04	-1	0.68	0	0.36	-1	1.04	-1	.....
6	0	0	0.68	-0.7	0.68	-0.7	0.68	0	-0.7	.....
7	0	0.15	0.52	-0.4	0.91	0.32	-0.2	-0.3	0.65	.....
8	0.36	0	-1	1.48	0.32	-0.3	0.17	-0.2	0.32	.....
9	1.29	-0.2	-0.4	0.36	1.53	-0.8	0.14	0	0.39	.....
10	0.84	-0.6	0.42	0.36	0.61	-0.4	-0.4	1.48	-1.3	.....
.....
30	-0.2	0.25	0	0.51	-0.2	0.15	0.27	0.13	0.13	.....
Mean	0.07	0.08	0.19	0.2	0.15	0.28	0	0.02	0.11	.....

表 5 中最后一行为每一列数据的平均值,代表相应的两组色样对的视觉色差之差,然后再将其转换为每对色样对与 z-score 值最小的 10 号色样对的视觉色差之差,如表 6 所示。

表 6 比较法各色样对与 10 号色样对的视觉色差之差数据

Table 6 Subtraction of the visual color differences of color samples compared with No. 10 sample

Pair No (i)	10	2	21	7	1	16	23	28	4	30	.....	27
dV _i - dV ₁₀	0	0.07	0.14	0.33	0.53	0.68	0.96	0.96	0.98	1.09	.....	3.52

表 6 中的视觉色差差值实际为每一个色样与 10 号色样的相对视觉色差值 $\Delta V_i - \Delta V_E$ 。应用 COATES 等的方法,由以下两式计算表 6 中 10 号色样的视觉色差值,

$$f = \frac{n \sum \Delta E_i (\Delta V_i - \Delta V_E) - \sum (\Delta V_i - \Delta V_E) \sum \Delta E_i}{n \sum (\Delta E_i)^2 - \sum \Delta E_i \sum \Delta E_i}, \tag{1}$$

$$n \Delta V_E = f \sum \Delta E_i - \sum (\Delta V_i - \Delta V_E), \tag{2}$$

式中 n 为实验样本的数量, $\sum (\Delta V_i - \Delta V_E)$ 为该颜色中心所有样本视觉色差差值之和, $\sum \Delta E_i$ 为该颜色

中心所有样本的色差值之和,数据处理中,选用了 CIEDE2000 色差值进行计算。计算得到的 ΔV_E 为

视觉色差最小的样本(例中为编号为 10 的样本)与颜色中心的视觉色差值。将计算得到的 ΔV_E 值加到表 6 中,即可得到颜色样本与颜色中心的原始视觉色差值。

对每个色中心按照一定比例缩放后即获得各个色样对的最终视觉色差,该比例是 7 个待评估色差公式与原始视觉色差计算 ScaleFactor 的平均值。

3.3 原始形式色差公式评价

用标准化残差平方和(STRESS), S_{TRESS} 性能因子评价原始色差公式(ΔE_i)和视觉评价(ΔV_i)间的一致性^[13]。STRESS 值越小,说明这两组数据之间的相关性越好。STRESS 的表达式为

$$S_{\text{TRESS}} = \left[\frac{\sum (\Delta E_i - F_1 \Delta V_i)^2}{\sum F_1^2 \Delta V_i^2} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

式中

$$F_1 = \frac{\sum \Delta E_i^2}{\sum \Delta E_i \Delta V_i}, \quad (4)$$

STRESS 的计算方式与 F 检验^[13] (F -Test) 相关,可以直接用来比较两个色差公式的显著性:

$$F = \frac{V_A}{V_B} = \frac{\sum (\Delta V_i - a_A \Delta E_{A,i})^2}{\sum (\Delta V_i - a_B \Delta E_{B,i})^2} = \frac{\sum (F_2 \Delta E_{A,i} - \Delta V_i)^2}{\sum (F_2 \Delta E_{B,i} - \Delta V_i)^2} = \frac{S_{\text{TRESSA}}^2}{S_{\text{TRESSB}}^2}, \quad (5)$$

表 7 用 STRESS 评价色差公式

Table 7 Performance of different color difference formulae in terms of STRESS

		CIELAB	CIE94	CMC	DE00	CAM02-LCD	CAM02-SCD	CAM02-UCS
Grey	M	18.2	19.4	11.8	10.8	19.0	11.7	14.1
	S	18.6	21.0	16.5	18.9	17.7	18.9	17.4
Red	M	30.0	29.5	24.5	27.8	30.4	29.2	29.9
	S	33.8	25.6	26.0	26.0	25.8	24.6	24.9
Yellow	M	39.2	30.8	28.9	24.8	31.9	28.9	30.0
	S	33.5	36.9	27.5	22.8	36.9	33.6	35.6
Green	M	26.5	25.5	24.8	24.5	26.9	24.9	25.8
	S	35.3	28.2	29.7	27.6	28.3	25.8	26.9
Blue	M	21.1	27.2	25.0	17.7	21.9	20.4	21.4
	S	31.2	23.8	21.3	20.1	23.3	20.0	21.2
Combine	M	33.0	26.8	23.3	20.8	25.3	23.5	23.4
	S	35.3	26.0	23.8	22.5	25.2	25.2	23.8

对综合数据的计算结果表明,对于中小色差印刷样品,CIEDE2000 色差公式与视觉评判的一致性表现最好,CMC 色差公式和 CAM02 系列色差公式的表现较好。除 CIELAB 色差公式的表现较差外,其它色差公式的评价性能都较为接近。该结果与 S. S. Guan^[10]使用平均值为 3LAB 色差单位的羊毛织品的颜色样本对和 M. R. Luo 等^[8]采用平均值为 2.6LAB 色差单位的不同材质(CRT 显示器、羊毛织品、尼龙样本和 Munsell 颜色样品)的颜色样本对视觉色差实验数据的实验结果基本一致。

用 F 检验对各色差公式的预测性能进行比较,检验的置信度为 0.975,服从自由度为(149,149)的 F 分

$$F_2 = \frac{1}{F_1}, \quad (6)$$

式中

$$\begin{cases} V_A = \frac{\sum (\Delta V_i - a_A \Delta E_{A,i})^2}{(N-1)}, \\ V_B = \frac{\sum (\Delta V_i - a_B \Delta E_{B,i})^2}{(N-1)}, \\ a_A = \frac{\sum (\Delta E_{A,i} \Delta V_i)}{\sum (\Delta E_{A,i})^2}, \\ a_B = \frac{\sum (\Delta E_{B,i} \Delta V_i)}{\sum (\Delta E_{B,i})^2}, \end{cases} \quad (7)$$

式中下标 A 和 B 分别代表两个被比较的色差公式。

用 F_c 表示临界值,(5)式计算的 F 值可分为如下五种情况:

- 1)如果 $F < F_c$,则公式 A 明显优于公式 B;
- 2)如果 $F_c \leq F < 1$,则公式 A 不明显优于公式 B;
- 3)如果 $F_c = F$,则公式 A 等同于公式 B;
- 4)如果 $1 < F \leq 1/F_c$,则公式 A 不明显劣于公式 B;
- 5)如果 $F > 1/F_c$,则公式 A 明显劣于公式 B。

表 7 为计算出的在两种纸张上的颜色样品视觉评价数据与不同色差公式计算值间的 STRESS 值。

布。表 8 和表 9 分别为哑光和半光纸的各色差公式的 F 检验结果, $F_c=0.724, 1/F_c=1.380$ 。

表 8 原始形式下各色差公式对于哑光样品的检验结果

Table 8 F -test of matte paper color samples with the original color difference formulae

Matte	CIELAB	CIE94	CMC	DE00	CAM02-LCD	CAM02-SCD	CAM02-UCS
CIELAB		1.523	2.001	2.528	1.705	1.972	1.986
CIE94	0.657		1.314	1.660	1.120	1.295	1.304
CMC	0.500	0.761		1.263	0.852	0.985	0.992
DE00	0.396	0.602	0.792		0.675	0.780	0.786
CAM02-LCD	0.586	0.893	1.174	1.482		1.156	1.165
CAM02-SCD	0.507	0.772	1.015	1.282	0.865		1.007
CAM02-UCS	0.503	0.767	1.008	1.273	0.859	0.993	

表 9 原始形式下各色差公式对于半光样品的检验结果

Table 9 F -test of semi-gloss paper color samples with the original color difference formulae

Semi-gloss	CIELAB	CIE94	CMC	DE00	CAM02-LCD	CAM02-SCD	CAM02-UCS
CIELAB		1.844	2.196	2.455	1.958	1.969	2.191
CIE94	0.542		1.191	1.331	1.062	1.068	1.188
CMC	0.455	0.840		1.118	0.892	0.897	0.998
DE00	0.407	0.751	0.894		0.798	0.802	0.893
CAM02-LCD	0.511	0.942	1.121	1.254		1.006	1.119
CAM02-SCD	0.508	0.937	1.115	1.247	0.994		1.113
CAM02-UCS	0.456	0.842	1.002	1.120	0.894	0.899	

从表 8 和表 9 的 F 检验也可以看出,对于 5 个颜色哑光纸和半光纸的综合数据计算,CIELAB 色差公式显著劣于其它色差公式,CIE94 和 CAM02-LCD 在计算哑光纸色差时,显著劣于 CIEDE2000 色差公式,其他各色差公式的计算结果无显著性差异。

3.4 优化色差公式评价

令 $k_C/k_H=1$,对各个色差公式的明度加权因子 k_L 进行优化,使得色差公式计算值和视觉评价价值间的一致性达到最佳,即用 STRESS 对色差公式计算值和视觉评价价值进行评价时 STRESS 最小。

由表 10 可见,经过优化后,仍然是 CIEDE2000 色差公式的评价性能最优。原始和优化后的色差公式,除 CIE94 色差公式的在计算哑光纸时评价性能有

显著改善外,其它色差公式的评价性能无显著性变化。说明在计算印刷样品中小色差时,除 CIE94 色差公式有一定改善空间外,其它原始色差公式的性能已达到较好的评价状态。同时,优化的 k_L 因子随着光泽度的增加逐渐减小,表明在色差的计算过程中,明度差的影响权重随着光泽度的增加在逐渐增大。与 Yang Pan 等^[2]的实验结果和课题组前期进行的印刷样品微小色差的实验结果^[3]都有较好的一致性。

由表 11 对哑光纸的色差计算结果可见,优化后的 CIE94 和 CIEDE2000 色差公式明显优于其它色差公式,CIELAB 色差公式明显劣于其它色差公式。由表 12 对半光纸的色差计算结果可见,优化后的 CIELAB 色差公式明显劣于其它 6 个色差公式。

表 10 优化的 k_L 值和色差公式的 STRESS ($F_c=0.724, 1/F_c=1.380$)

Table 10 Optimized k_L and color difference formulae in terms of STRESS ($F_c=0.724, 1/F_c=1.380$)

Paper	Color difference		CIELAB	CIE94	CMC	DE00	CAM02-LCD	CAM02-SCD	CAM02-UCS
	Stress								
Matte	Original		33.0	26.8	23.3	20.8	25.3	23.5	23.4
	Optimized		32.7	19.7	23.2	19.4	23.8	23.2	22.0
	k_L		0.84	1.77	1.1	1.26	1	1.3	1.28
	F -test		1.02	1.85	1.01	1.15	1.13	1.03	1.13
Semi-gloss	Original		35.3	26.0	23.8	22.5	25.2	25.2	23.8
	Optimized		34.6	23.1	23.6	22.5	24.4	25.2	23.8
	k_L		0.79	1.44	0.9	0.99	0.94	1.24	1.07
	F -test		1.04	1.27	1.02	1.00	1.07	1.00	1.01

表 11 优化后各色差公式对于哑光样品的检验结果($F_c=0.724, 1/F_c=1.380$)Table 11 F -test of matte paper color samples with the optimized color difference formulae ($F_c=0.724, 1/F_c=1.380$)

Matte	CIELAB	CIEDE94	CMC	DE00	CAM02-LCD	CAM02-SCD	CAM02-UCS
CIELAB		2.754	1.985	2.847	1.882	1.977	2.199
CIEDE94	0.363		0.721	1.034	0.683	0.718	0.799
CMC	0.504	1.388		1.434	0.948	0.996	1.108
CIEDE2000	0.351	0.967	0.697		0.661	0.694	0.772
CAM02-LCD	0.531	1.463	1.055	1.513		1.050	1.169
CAM02-SCD	0.506	1.393	1.004	1.440	0.952		1.113
CAM02-UCS	0.455	1.252	0.903	1.294	0.856	0.899	

表 12 优化后各色差公式对于半光中等色差的检验结果($F_c=0.724, 1/F_c=1.380$)Table 12 F -test of semi-gloss paper color samples with the optimized color difference formulae($F_c=0.724, 1/F_c=1.380$)

Matte	CIELAB	CIEDE94	CMC	DE00	CAM02-LCD	CAM02-SCD	CAM02-UCS
CIELAB		2.248	2.160	2.365	2.012	1.896	2.127
CIEDE94	0.445		0.961	1.052	0.895	0.844	0.946
CMC	0.463	1.041		1.095	0.931	0.878	0.985
CIEDE2000	0.423	0.950	0.913		0.851	0.802	0.899
CAM02-LCD	0.497	1.117	1.074	1.176		0.943	1.057
CAM02-SCD	0.527	1.185	1.139	1.247	1.061		1.121
CAM02-UCS	0.470	1.057	1.015	1.112	0.946	0.892	

对中小色差数据的计算结果与课题组前期用感知法(pass-fail)进行的印刷样品微小色差实验比较^[4],总体来说,对于印刷样品微小色差的计算,原始和优化的色差公式都是CAM02-SCD和CAM02-UCS的表现较好,对中小色差的计算,CIEDE2000色差公式的表现较好,两个不同色差等级的实验结果都是CIELAB色差公式的表现最差。对于不同的色差大小、不同的印刷品材质、不同的心理物理实验方法得到的实验结果,需要在今后的工作中综合大量的目视评价实验数据进一步进行系统的比较和分析。

优化的 k_L 因子随着纸张光泽度的增加逐渐减小。同时,对微小色差和中小色差的计算结果表明,优化后的各色差公式,大多数色差公式的改善并不显著,说明对现有颜色空间及其基础上建立的色差公式的优化已达到一个瓶颈,急需推出一个新的均匀颜色空间,这也是CIETC1-55目前正在努力进行的工作。

4 结 论

用哑光和半光两种不同光泽度纸张印刷样品的中色差视觉评价实验数据,分别对四个典型色差公式CIELAB, CIE94, CMC, CIEDE2000和CAM02系列CAM02-LCD, CAM02-SCD, CAM02-UCS三个色差公式进行评价和优化。原始形式下,对综合数据的评价,CIEDE2000色差公式表现最好,其次

为CMC和CAM02-SCD, CAM02-UCS色差公式,表现相对较差的是CIELAB色差公式。优化后的色差公式,CIEDE2000和CIE94色差公式的表现较好。 F 检验结果表明,除CIE94色差公式有显著性的变化外,其它原始色差公式和 k_L 因子优化后的色差公式计算结果并无显著性差异,表明在计算印刷样品中小色差时,除CIE94色差公式外,其它色差公式采用原始的色差公式计算的效果已达到较好的评价状态。同时,对各色差公式进行 k_L 因子的优化,随着光泽度的增加 k_L 因子逐渐减小,表明在色差的计算过程中,明度差的影响权重随着光泽度的增加在逐渐增大。

致谢 感谢英国利兹大学的Dr. Guihua Cui和Pro. M. R. Luo在实验数据处理过程中给予的指导和帮助,感谢参与目视评价实验的所有观察者。

参 考 文 献

- 1 M. R. Luo, G. Cui, B. Rigg. The Development of the CIE 2000 colour-difference formula; CIEDE 2000[J]. *Color Res. Appl.*, 2001, **26**(5): 340~350
- 2 Yang Pan, Guihua Cui, M. Ronnier Luo. Gloss effect on colour difference evaluation [C]. AIC 2007 Color Science for Industry. 2007, 199~202
- 3 Huang Min, Liu Haoxue, Liao Ningfang. Study on just-noticeable color difference discrimination threshold by using printed samples I: analysis of visual evaluation experimental data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1431~1435
黄敏, 刘浩学, 廖宁放. 印刷样品恰可察觉小色差辨色阈值的研究 I: 目视评价实验数据分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5):

- 1431~1435
- 4 Huang Min, Wang Lili, Liu Haoxue *et al.*. Study on small color difference evaluation using printed samples with different gloss [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1851~1856
黄 敏, 王丽丽, 刘浩学. 不同光泽印刷样品的微小色差评价研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1851~1856
- 5 A. R. Robertson. The CIE1976 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, Guihua Cui, Changjun Li. Uniform colour spaces based on CIECAM02 colour appearance model [J]. *Color Res. Appl.*, 2006, **31**(4): 320~330
- 9 M. R. Luo, C. Minchew, P. Kenyon *et al.*. Verification of CIEDE2000 using industry data [J]. AIC 2004 Color and Paints, Interim Meeting of the International Color Association, Proceedings, 2004
- 10 S. S. Guan, M. R. Luo. Investigation of parametric effects using small colour-differences [J]. *Color Res. Appl.*, 1999, **24**(5): 331~343
- 11 E. Coates, S. Day, B. Rigg. Colour-difference measurements in relation to visual assessments-some further observations [J]. *Journal of Society of Dyers and Colourists*, 1969, (7): 312~318
- 12 E. Coates, S. Day, J. R. Provost *et al.*. The measurement and assessment of colour differences for industrial use III-methods of scaling visual assessments [J]. *Journal of Society of Dyers and Colourists*, 1972, (5): 186~190
- 13 P. A. Garcia, R. Huertas, M. Melgosa *et al.*. Measurement of the relationship between perceived and computed color difference [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, **24**(7): 1823~1829