

文章编号: 0253-2239(2010)06-1851-06

不同光泽印刷样品的微小色差评价研究

黄 敏¹ 王丽丽² 刘浩学¹ 廖宁放³

(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)
³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 为了研究不同光泽纸张的印刷样品对色差评价的影响,对印在哑光、半光、高光三种不同光泽纸张上的 5 个国际照明委员会(CIE)基本颜色中心区域,约 1100 对颜色色样,采用心理物理实验方法中的 pass-fail,分别测得 23 名色觉正常的观察者对不同纸张不同颜色的辨色特性。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 STRESS 性能因子的评价和优化,除 CIELAB 色差公式外,其他色差公式表明无明显差异。采用对明度加权因子 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,但光泽度对整体色差阈值的计算影响不是很明显。

关键词 视觉光学;光泽度影响;色差公式;色差预测性能

中图分类号 0432.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103006.1851

Study on Small Color Difference Evaluation Using Printed Samples with Different Gloss

Huang Min¹ Wang Lili² Liu Haoxue¹ Liao Ningfang³

¹School of Printing and Packing Engineering, Beijing Institute of Graphics Communication, Beijing 102600, China
²College of Light Industry Science Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China
³National Laboratory of Color Science and Engineering, School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract In order to reveal the effect of gloss on color-difference evaluation, the printed samples are prepared by ink jet printer on matte, semi-gloss, gloss three papers with different gloss levels at the 5 basic international commission on illumination (CIE) color centers. About 1100 pairs of samples are carried out by 23 observers with normal color vision based on the psychophysical method of pass-fail. The calculated CIELAB color difference shows that the color discrimination thresholds have no obvious difference for different gloss. The STRESS is 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, except the CIELAB, the others have no obvious discrepancy. For the optimized k_L values, the higher gloss the smaller k_L , which indicates that the lightness difference is more noticeable for the higher gloss printed samples for evaluating color difference.

Key words visual optics; gloss effect; color-difference formula; color-difference prediction performance

1 引言

对颜色样品对进行色差评价研究,一直是颜色科学技术中的一个重要课题。但不同的观察条件,如照明光源、观察背景、样品材质和大小、间隔、色差

等级等,都会对颜色样品对之间的辨色有着很大的影响。其中,光泽度是对表面色颜色样品进行色差评价研究的一个重要影响参数。但是,目前对光泽度影响的研究相对较少, Yang Pan 等^[1]对平均色差

收稿日期: 2009-06-10; 收到修改稿日期: 2009-09-07

基金项目: 北京市教委科技面上项目(KM200910015006)和北京印刷学院重点项目(Ea2d003)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

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。

在实验研究中,用 Epson 喷墨打印机在印刷常用的哑光、半光和高光三种纸上对国际照明委员会(CIE)推荐的 5 个颜色中心制作颜色样品,色差等级为恰可察觉小色差。采用心理物理实验方法中的 pass-fail 法进行视觉评价实验,通过对测得的印刷样品恰可察觉小色差的辨色阈值数据进行处理和分析,对 4 个典型色差公式 CIELAB^[2], CIE94^[3], CMC^[4], CIEDE2000^[5] 和 CAM02 系列^[6] CAM02-LCD, CAM02-SCD, CAM02-UCS 3 个色差公式进行评价和优化。讨论光泽度对色差评价的影响,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)、高光(EFI1144)三种纸张,光泽度分别为 31.4, 56.4, 62.4,用 Epson Stylus PRO 7800 喷墨打印机分别

在不同的纸张上,围绕 5 个基本颜色中心制作颜色样品(颜色中心 CIELAB 色度参量如图 1 所示)。颜色样品的制作方法和目视评价的实验过程,与已进行的印刷样品恰可察觉小色差辨色阈值的研究实验相同^[7]。在每个颜色中心周围制作并挑选出约 70 对样品,图 2 所示分别为用哑光、半光和高光三种纸张制作的黄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。挑选出的样本与标样的色差感觉“似有似无”,属于恰可察觉小色差的色差范围,所有颜色样本与颜色中心的平均色差约为 $0.8\Delta E_{ab}^*$ 色差单位。颜色样品的大小为 $4.5\text{ cm} \times 4.5\text{ cm}$,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,计算中采用 CIE1964 补充标准色度系统。色样测量时,用 Spectro-Eye(0/45) 分光光度计和 X-Rite SP64 积分球($\text{de}; 8^\circ$) 分光光度计分别测量,测量条件为 D65/10 $^\circ$ 。用两种测量方法采集到的数据,进行数据处理的结果较为一致,因此在数据分析中采用 Spectro-Eye(0/45) 的测量和计算结果讨论。

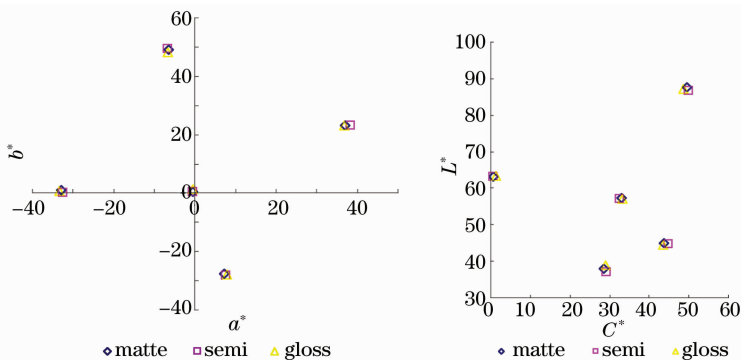


图 1 在 3 种纸张上制作的 5 个颜色中心的 CIELAB 色度参量

Fig. 1 CIELAB chromaticity parameters of three papers and five color centers

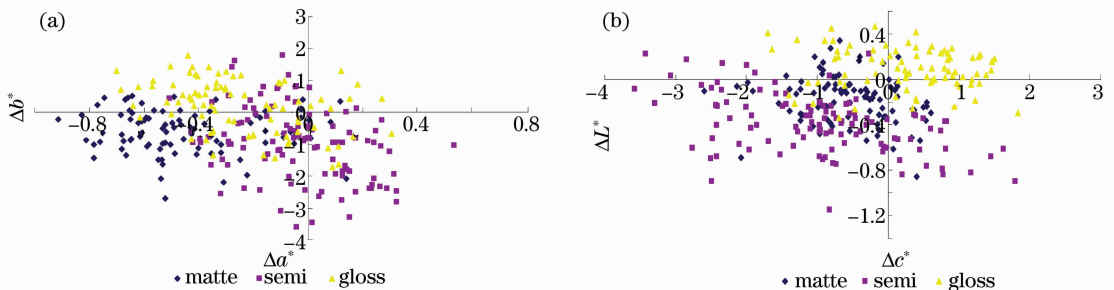


图 2 在 3 种纸张上制作的黄色颜色样品在(a) $\Delta a^* \Delta b^*$ 平面和(b) $\Delta L^* \Delta C^*$ 平面上的分布

Fig. 2 Distributions of yellow color samples made on three papers on (a) $\Delta a^* \Delta b^*$ plane and (b) $\Delta L^* \Delta C^*$ 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 1036 lx,色温为 6748 K),观察条件为 $0^\circ/45^\circ$ 。23 名观察者(13 女 10 男),年龄在 19~30 岁,

全都色觉正常。在进行了初期目视评价实验训练后参与了实验,分别对 3 种不同纸张的颜色样品对用感知法进行颜色阈值的辨别实验。观察者分别对每对色样在不同的时间评价 3 次,样品对以随机的顺序呈现给观察者。这样共有 $23 \times 3 \times 15 = 1035$ 组数据,整个实验的时间跨度约 5 个月(包括颜色样品的制作和样品的初选实验)。

3 实验结果讨论

3.1 观察者精度分析

用误判率(WD)^[8]来评价观察者的重复性和准确性。实验中,23 名观察者分别对每对色样进行了 3 次视觉评价。为了研究观察者的准确性,每一名观察者对每对样品的“有”或“无”色差感觉的判断与整个视觉评价实验的结果相比较。如果一个观察者判断结果是“无”,而整个视觉评判的通过率为 40% (小于 50%),为“有色差”。因此,就可以得出该观察者的判断是错误判断。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,即错误判断率。因此,错误判断率越小,说明观察者判断的准确率越高。同样,也可以用错误判断率来表示一个观察者 3 次判断的重复性。对观察者的精度进行分析得,23 名观察者的重复性平均值为 15,从 10 变化到 17;准确性的平均值为 33,从 18 变化到 41。与经典数据比较,均在可接受的范围内,因此本次视觉评价实验数据是有效的^[9]。

3.2 原始色差公式阈值计算

每个颜色中心,23 名观察者用感知法在 70 个实验样本中挑选出的“无色差”感觉样本(约为 10~20 个)都是均匀分布在颜色中心周围的各个方向。根据辨色阈值实验中得到的测试数据,三种光泽纸张 5 个颜色中心恰可辨别色差样品点与颜色中心拟合的色度椭圆与印刷样品恰可察觉小色差辨色阈值的研究实验结果、Witt 数据集的实验结果^[7],汪哲弘等对显示器的小色差辨色阈值实验结果^[10]有较好的一致性,沿彩度方向的色宽容度大于沿色调方向的色宽容度。

计算印刷样品不同颜色区域的宽容度值^[11,12]。由于不同色差公式的色差单位不同,计算颜色样品色差阈值主要是幅度上的不同,总体变化趋势并没有很大区别^[12]。因此,计算了 CIELAB 色差值进行说明,如图 3 所示即为 CIELAB 色差公式计算半光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 $\Delta E_i = 0.21$ 。

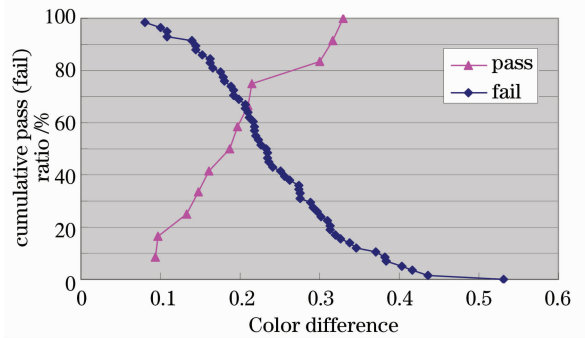


图 3 半光泽纸张印刷样品灰色的 CIELAB 色差阈值

Fig. 3 Grey color difference threshold of CIELAB of the semi-gloss printed samples

表 1 所示为用 CIELAB 色差公式分别计算不同纸张不同颜色区域的色差辨色阈值(M 代表 Matte 亚光,S 代表 Semi-gloss 半光泽,Gloss 代表高光泽)。

表 1 CIELAB 色差公式计算 3 种纸张 5 个颜色中心色差阈值

Table 1 Color difference thresholds of three papers and five color centers with CIELAB color difference formula

Paper	Grey	Red	Yellow	Green	Blue	Combine
M	0.21	0.77	0.54	0.46	0.46	0.52
S	0.18	1.10	0.95	0.95	0.38	0.55
G	0.25	0.59	0.58	0.76	0.47	0.50

由表 1 可见,在 5 个颜色中心,CIELAB 色差公式计算出的不同光泽纸张恰可察觉色差辨色阈值表现不同。同一种纸张,色差阈值不同,其中亚光和半光纸,红色的辨色阈值最大;高光纸,绿色的辨色阈值最大。同一种颜色在不同纸张上的辨色阈值也不同,其中红、黄、绿颜色区域半光纸辨色阈值最大,灰、蓝颜色区域高光纸辨色阈值最大。将所有的数据组成数据集(见表 1),用同样的方法研究在整个颜色区域纸张光泽度对色差阈值计算的影响,不同光泽纸张的色差阈值差别并不是很大,没有显著的影响。这种色差阈值的差异,有可能是实验样本对颜色中心的平均色差、目视评价的先后顺序等因素所引起的。

3.3 原始色差公式评价

用 STRESS (standardized residual sum of squares)性能因子 S_{STRESS} 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

$$S_{STRESS} = \left[\frac{\sum (\Delta E_i - F_1 \Delta V_i)^2}{\sum F_1^2 \Delta V_i^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中 $F_1 = \frac{\sum \Delta E_i^2}{\sum \Delta E_i \Delta V_i}$ 。STRESS 的计算方式与 F

检验^[13] (*F-Test*) 相关, 它可以直接用来比较两个色差公式的显著性, 有

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

式中

$$F_2 = \frac{1}{F_1}, \quad (3)$$

$$V_A = \frac{\sum (\Delta V_i - a_A \Delta E_{A,i})^2}{(N-1)}$$

$$a_A = \frac{\sum (\Delta E_{A,i} \Delta V_i)}{\sum (\Delta E_{A,i})^2},$$

$$V_B = \frac{\sum (\Delta V_i - a_B \Delta E_{B,i})^2}{(N-1)}$$

$$a_B = \frac{\sum (\Delta E_{B,i} \Delta V_i)}{\sum (\Delta E_{B,i})^2} \quad (4)$$

下标 *A* 和 *B* 分别代表两个被比较的色差公式。

用 F_c 表示 *F* 检测的临界值, (2) 式计算的 *F* 值可分为如下 5 种情况:

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

将每对色样被察觉到颜色差别的概率 *P* 转化为标准分数 *Z* 值^[14], $Z = (P_i - u) / S$ 。其中 P_i 为每对颜色样品对被察觉出的概率, *u* 为所有样品对 P_i 值的平均值, *S* 为标准偏差值。将概率 *P* 转化为标准正态分布中的 *Z* 值, 被察觉到颜色差别的概率越大, 则 *Z* 值越大, *P* 为 0.5 时对应的 *Z* 值为 0。为把负的 *Z* 值转换为正值, 在原有 *Z* 值的基础上加上最小的 *Z* 值的绝对值。以哑光纸微小色差的实验数据为例进行说明, 哑光纸 399 对样本 *Z* 值的最小值为 -0.88, 将所有的 *Z* 值加上 0.9, 转换为 Z' -score。如图 4 所示为目视评价实验中的接受率 *A* 与 Z' -score 的关系曲线图。

同时将 399 个样本的 *Z* 值与相应的 CIELAB 和 CIEDE2000 色差公式计算得到的色差值分别进行线性拟合, 便可得到视觉色差值 ΔV_{ab} 和 ΔV_{00} :

$$\Delta V_{ab} = 0.10Z + 0.67, \quad (5)$$

$$\Delta V_{00} = 0.11Z + 0.39, \quad (6)$$

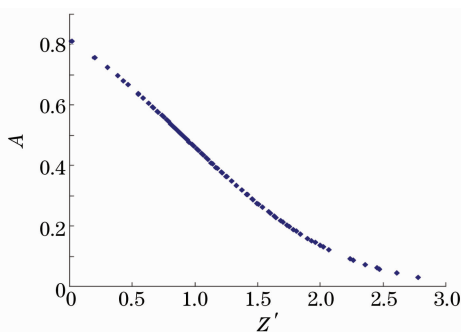


图 4 *A* 和 Z' -score 的关系图

Fig. 4 Variation of *A* against Z' -score

从而将色样对被察觉到颜色差别的概率转化为视觉色差数据^[9,14]。

如图 5 为由 (5), (6) 式拟合得到的视觉色差 ΔV_{ab} , ΔV_{00} 分别和 Z' 值的散点图分布, 可见三者之间有良好的线性关系。即在对实验数据进行 STRESS 评价时, 选用其中的任一组数据作为目视评价的视觉色差, 计算的总体结果是一致的。因此在本文的数据处理中, 选用了 Z' 值作为目视评价的视觉色差结果进行计算。

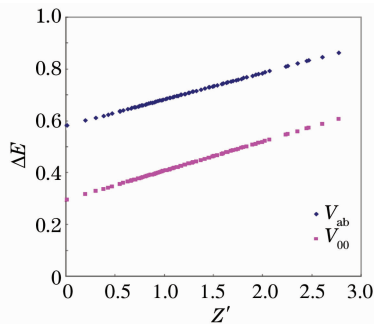


图 5 Z' 值和 V_{ab} , V_{00} 的散点分布图

Fig. 5 Scatter distribution of Z' -score, V_{ab} and V_{00} values

如表 2 所示, 为计算出的 3 种纸张视觉评价结果与不同色差公式间的 STRESS 值。

对综合数据的计算结果表明, 在不同颜色区域、不同类型纸张, 不同色差公式的计算结果与人眼视觉评价的一致性是不同的, 但均是 CIELAB 色差公式的性能最差, CAM02-SCD 和 CAM02-UCS 色差公式的表现较好。CAM02 系列 3 个色差公式在计算印刷样品恰可察觉小色差辨色阈值时的性能优于 CIELAB 颜色空间基础上建立的 4 个色差公式。表 2 计算的 STRESS 值较大, 可能是由三方面的原因导致的^[14]: 对微小色差进行目视评价实验时, 观察者自身的不确定性导致的实验误差, Spectro-Eye (0/45) 分光光度计测量样本时, 测量口径的限制引起的仪器测量误差和色差公式本身的评价误差等。

表 2 用 STRESS 评价色差公式

Table 2 Performance of different color difference formulae in terms of STRESS

Color		CIELAB	CIE94	CMC	CIEDE2000	CAM02-LCD	CAM02-SCD	CAM02-UCS
Grey	M	40.9	40.9	43.5	38.9	42.0	44.3	42.9
	S	32.9	33.1	30.3	31.4	33.3	31.1	31.8
	G	36.5	36.7	37.8	37.4	38.2	36.7	36.9
Red	M	45.5	44.2	45.3	44.9	42.7	42.3	42.2
	S	50.3	50.9	54.3	53.9	49.4	50.1	49.5
	G	34.7	34.3	34.4	34.4	33.0	32.7	32.7
Yellow	M	45.8	34.9	36.9	33.8	39.4	34.9	36.3
	S	45.1	41.3	40.4	39.0	42.0	40.9	41.3
	G	42.8	38.3	39.5	38.9	40.8	39.6	39.8
Green	M	40.1	43.7	42.0	42.8	42.4	41.6	42.3
	S	37.7	40.6	38.3	39.9	37.2	38.9	38.6
	G	48.0	44.2	45.0	44.2	46.3	44.8	45.2
Blue	M	45.6	49.8	48.7	48.7	48.4	48.1	48.6
	S	45.9	49.0	48.5	46.8	47.0	47.2	47.4
	G	55.7	54.9	54.4	53.0	53.0	52.3	52.7
Combine	M	55.0	46.0	47.3	45.5	46.7	42.5	43.9
	S	51.9	46.7	50.2	48.9	45.8	44.8	44.7
	G	56.1	50.3	52.5	52.0	51.0	50.2	49.9

3.4 优化色差公式评价

在上述 5 个颜色区域令 $k_C: k_H=1$, 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

表 3 优化的 k_L 值和色差公式的 STRESSTable 3 The optimized k_L and color difference formulae in terms of STRESS

Paper	Color stress	CIELAB	CIE94	CMC	DE00	CAM02-LCD	CAM02-SCD	CAM02-UCS
matte	Original	55.0	46.0	47.3	45.5	46.7	42.5	43.9
	optimized	51.4	45.5	47.3	45.5	46.7	42.2	43.6
	k_L	0.46	1.28	1.04	1.02	1.03	1.20	1.22
	F -test($F_c=1, 22$)	1.14	1.02	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01
Semi-gloss	Original	51.9	46.7	50.2	48.9	45.8	44.8	44.7
	optimized	45.5	46.5	48.2	48.2	44.6	44.4	44.3
	k_L	0.39	0.88	0.61	0.75	0.71	0.82	0.82
	F -test($F_c=1, 23$)	1.30	1.01	1.08	1.03	1.05	1.02	1.02
gloss	Original	56.1	50.3	52.5	52.0	51.0	50.2	49.9
	optimized	49.8	50.1	50.3	51.3	49.9	49.6	49.4
	k_L	0.38	0.85	0.59	0.74	0.68	0.75	0.78
	F -test($F_c=1, 23$)	1.27	1.01	1.09	1.03	1.04	1.02	1.02

由表 3 对整个颜色区域的综合数据可见, 对于不同光泽的印刷样品, 优化的 k_L 因子随着光泽度的增加逐渐减小。总的来说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^[1]的实验结果有较好的一致性。同时色差公式的表现为, 在计算哑光颜色样品时 CAM02-SCD 色差公式的表现较好, 半光泽颜色样

品和高光泽颜色样品时 CAM02-UCS 色差公式最好。优化后的色差公式, 除 CIELAB 色差公式在计算半光和高光纸时有明显改善外, 其他色差公式的评价性能并无显著性的提高。

4 结 论

用不同纸张印刷样品的恰可察觉小色差辨色阈

值视觉实验数据,分别对4个典型色差公式 CIELAB, CIE94, CMC, CIEDE2000 和 CAM02 系列 CAM02-LCD, CAM02-SCD, CAM02-UCS3 个色差公式进行评价和优化。原始形式下, CIELAB 色差公式的表现最差, CAM02-SCD 和 CAM02-UCS 色差公式的表现较好。

对各个色差公式经过 k_L 因子的参量优化后,优化的 k_L 因子随着光泽度的增加逐渐减小,表明明度差在色差计算中的影响权重随着光泽度的增大而逐渐增大。优化后的色差公式除 CIELAB 色差公式在半光和高光时的预测性能有显著性的改善外,其他色差公式并无显著性的改善。同时对不同光泽印刷样品的恰可察觉小色差的 CIELAB 色差阈值计算表明,光泽度对于整体色差阈值计算并没有显著影响。

致 谢 感谢英国利兹大学 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,感谢目视评价实验所有的观察者。

参 考 文 献

- 1 Yang Pan, Guihua Cui M. Ronnier Luo. Gloss effect on colour difference evaluation[J]. *AIC 2007 Color Science for Industry*, 2007, 199~202
- 2 A. R. Robertson. The CIE1976 color-difference formulae [J]. *Color Res. Appl.*, 1977, **2**(1): 7~11
- 3 CMC colour-difference formula [J]. *Color Res. Appl.*, 1984, **9**(4): 250
- 4 Lewis D. Griffin, Arsalan Sepehri. performance of CIE94 for nonreference conditions [J]. *Color Res. Appl.*, 2002, **27**(2): 108~115
- 5 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
- 6 M. Ronnier Luo, Guihua Cui, Changjun Li. Uniform colour spaces based on CIECAM02 colour appearance model[J]. *Color Res. Appl.*, 2006, **31**(4): 320~330
- 7 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
- 8 M. Ronnier Luo *et al.*. Verification of CIEDE2000 using industry data[J]. *Proc. AIC 2004 Color and Paints, Interim Meeting of the International Color Association*,
- 9 Wang Han, Xu Haisong *et al.*. Evaluation of very small colour difference at human eye's threshold level based on object surface colours[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1628~1632
王 寒, 徐海松等. 基于物体表面色的人眼阈值水平微小色差评价[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1628~1632
- 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): 1139~1143
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
- 11 R. S. Berns. Deriving instrumental tolerances from pass-fail and colorimetric data[J]. *Color Res. Appl.*, 1996, **21**: 459~472
- 12 Huang Min, Liu Haoxue, Liao Ningfang. Just-noticeable color difference discrimination threshold using printed samples II: analysis and evaluation of color-difference formulae [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1740~1745
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 II: 色差公式分析与评价 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1740~1745
- 13 Pedro A. Garcia *et al.*. Measurement of the relationship between perceived and computed color difference[J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 2007, **24**(7): 1823~1829
- 14 E. Coates, S. Day, J. R. Provost and *et al.*. The Measurement and assessment of color differences for industrial use II-The accuracy of colour-difference equations[J]. *JSDC*, 1972, 69~75