

# 用不同光泽和色差等级的彩色印刷样品检验 均匀颜色空间

黄 敏<sup>1</sup> 刘浩学<sup>1</sup> 崔桂华<sup>2\*</sup> Luo M. Ronnier<sup>3</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> VeriVide Limited, Leicester, LE19 4SG, UK  
<sup>3</sup> 浙江大学颜色与影像技术研究中心, 浙江 杭州 310027

**摘要** 用不同光泽纸张和不同色差等级彩色印刷样品的目视评价色差数据拟合色度椭圆, 研究各均匀颜色空间在评价不同光泽度和色差样本时的表现, 检验基于 CIELAB, DIN99, OSA 和 CIECAM02 共 7 个颜色空间的均匀性。用局部均匀性和全局均匀性因子分别检验不同颜色空间色度椭圆的椭圆度和空间中不同位置椭圆尺寸的一致性。结果表明, 其他所有颜色空间的表现均优于 CIELAB 和 OSA 颜色空间, OSA-Gp-Eu 和 DIN99d 颜色空间在评价印刷品颜色差异的表现上较为接近, 同时优于其他的颜色空间。

**关键词** 视觉与色彩; 均匀颜色空间; 色差等级; 光泽度; 色度椭圆; 标准化残差平方和

**中图分类号** O432.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0733002

## Testing Uniform Color Spaces Using Printed Samples with Different Gloss and Color Difference Magnitudes

Huang Min<sup>1</sup> Liu Haoxue<sup>1</sup> Cui Guihua<sup>2</sup> Luo M. Ronnier<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> VeriVide Limited, Leicester, LE19 4SG, UK

<sup>3</sup> Color and Image Technology Research Center, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

**Abstract** A series of experiments are conducted using printing samples to investigate the effects of different gloss and different color-difference magnitudes. The results are used to reveal these effects. In addition, seven different color spaces based on CIELAB, DIN99, OSA and CIECAM02 are tested using these data. It is found that comparing the performance of local uniformity and global uniformity, OSA-Gp-Eu and DIN99d always perform the best, and all spaces outperform CIELAB and OSA.

**Key words** vision and color; uniform color space; gloss effect; magnitude effect; chromaticity ellipse; standardized residual sum of squares

**OCIS codes** 330.1690; 330.1730; 330.1710; 330.1720

## 1 引 言

近年来,为了弥补颜色空间的不均匀性,色差公式变得越来越复杂,导致色差公式的发展遇到了前所未有的瓶颈,公认的突破方向是寻找更加均匀的

颜色空间。目前,国际上很多研究者已经开展了这方面的研究,收集了很多极有价值的视觉实验数据,评价并检验了现有的建立在 CIELAB<sup>[1]</sup>, DIN99<sup>[2]</sup>, OSA<sup>[3]</sup> 和 CIECAM02<sup>[4]</sup> 等颜色空间基础上的均匀

收稿日期: 2012-02-04; 收到修改稿日期: 2012-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(61078048)和北京市教委科技面上项目(KM201210015001)资助课题。

作者简介: 黄 敏(1979—),女,博士,副教授,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

\* 通信联系人。E-mail: guihua.cui@gmail.com

颜色空间和色差公式。但是大量的实验结果表明,对于不同色差等级(阈值微色差、小色差和大色差)和不同基底(纺织品、油漆、自发光色和印刷色等)的颜色样本,色差公式的表现各有差异,并与人眼的目视评价结果有着不同程度的不一致性<sup>[5]</sup>。Luo 等<sup>[6]</sup>用基于纺织色、陶瓷色、打印色和显示色的数据组对 CIELAB、CAM02-LCD、CAM02-SD、CAM02-UCS、DIN99d 颜色空间进行检验,发现 CAM02 颜色空间在用于计算相应等级的色差时表现较有优势。Oleari 等<sup>[7]</sup>用基于 BFD-P、Leeds、RIT-DuPont 和 Witt 的数据,即纺织品色、油漆色和喷墨色组成的 COM 数据组检测不同色空间,发现 OSA-Gp-Eu 色差公式计算结果在某种程度上优于目前表现较好的 CIEDE2000 色差公式。Wang 等<sup>[8]</sup>用油漆色对基于 CIELAB 和 CAM02 色空间的色差公式进行了检验,发现在小色差时 CIEDE2000 表现最好,阈值微色差时 CAM02-UCS 表现最好。汪哲弘<sup>[9]</sup>用阴极射线管(CRT)显示色对基于 CIELAB 色空间的色差公式进行了检验,发现 CIEDE2000 表现最好。不同的材质,不同的色差大小、颜色空间及相应的色差公式表现各有差异,但总体趋势较为一致。

表 1 阈值微色差和小色差实验及样本信息

Table 1 Sample information for TCD and SCD experiments

	Substrate	Gloss level	Color centers	Number of pair	$\Delta E_{\text{mean}}^*$	$\Delta E_{\text{max}}^*$	Observers×times	Visual method	Reference
TCD									
Exp. I	Semi-gloss	56	17	893	1.1	5.3	16×3	Pass/fail	[11, 12]
	Matt	36	5	399	0.7	2.7	23×3	Pass/fail	
Exp. II	Semi-gloss	56	5	446	0.9	4.3	23×3	Pass/fail	[13]
	Gloss	63	5	379	0.8	2.6	23×3	Pass/fail	
SCD									
Exp. III	Semi-gloss	56	17	446	3.1	8.0	9×3	Gray scale	[14]
	Matt	36	5	147	3.1	5.9	15×1+5×2	Pair-comparison	
Exp. IV	Semi-gloss	56	5	150	3.1	5.8	15×1+5×2	Pair-comparison	[15]

主要的 4 个实验及其结果简介如下。

第一个实验(Exp. I)中<sup>[11,12]</sup>,16 名观察者(每人重复 3 次)用阈值法评价了围绕 17 个色中心平均色差为  $1.1\Delta E_{\text{ab},10}^*$  的 893 对半光纸质(光泽度为 56)的彩色印刷样本,用视觉数据来检验不同颜色空间的表现,得出 CIELAB 和 OSA 颜色空间在椭圆的椭圆度和椭圆尺寸的一致性上都表现较差的结论。OSA-Gp-Eu 有最好的椭圆度,DIN99d 颜色空间中椭圆尺寸的一致性最好,椭圆度仅次于 OSA-Gp-Eu,居于第二。CAM02-SCD 测试椭圆度的表现第三,椭圆尺寸的表现居第三。

鉴于上述缺陷和不足,2000 年,CIE 成立了 TC 1-55 分会(Uniform Colour Space for Industrial Colour Difference Evaluation)致力于找到一个均匀的颜色空间替代目前常用的 CIELAB 颜色空间<sup>[10]</sup>。本文在此基础上,制作不同色差和不同光泽的彩色印刷样品,针对不同色差等级的样本,设计对应的心理物理实验,对样本的色差进行评价,检验不同颜色空间的均匀性。

## 2 基于不同光泽纸张和色差等级的色差评价实验

本课题组在以前的研究中<sup>[11~15]</sup>,制作了不同色差等级和不同光泽的印刷样品,开展了大量的目视评价实验,按色差大小可分成两类:阈值微色差(TCD)和小色差(SCD),其相关信息如表 1 所示。表 1 中分别列出了 4 个实验(Exp. I~IV)所采用色样的信息,包括纸质及其光泽度、色中心个数、色样对数、平均色差( $\Delta E_{\text{mean},\text{ab}}^*$ )和最大色差( $\Delta E_{\text{max},\text{ab}}^*$ ),同时列出了实验信息包括观察者个数及重复观察次数和视觉实验方法,并列出了各个实验对应的参考文献。

第二个实验(Exp. II)中<sup>[13]</sup>,23 名观察者(每人重复 3 次)用阈值法对 5 个色中心、3 种纸质(哑光、半光和高光,光泽度分别为 36,56 和 63,分别记为 Matt, Semi-gloss 和 Gloss),平均色差为  $0.8\Delta E_{\text{ab},10}^*$  的 1224 对彩色印刷样本进行目视评价实验,并用所获取的实验数据测试了 7 个色差公式和颜色空间,包括 CIELAB、CIE94、CMC、CIEDE2000、CAM02-LCD、CAM02-SCD、CAM02-UCS。数据分析表明,对于阈值微色差来说,CIELAB 色差公式的表现最差,CAM02-SCD 和 CAM02-UCS 色差公式的表现较好。

第三个实验(Exp. III)中<sup>[14]</sup>,9 名观察者(每人

重复3次)用灰梯尺的方法评价了围绕17个色中心,平均色差为 $3.1\Delta E_{ab,10}^*$ 的446对半光纸质(光泽度为56)的彩色印刷样本,发现CIELAB和OSA颜色空间的表现较差,DIN99d和OSA-Gp-Eu颜色空间的均匀性较好。

第四个实验(Exp. IV)中<sup>[15]</sup>,20名观察者(其中15人评价1次,5人重复2次)用比较法对5个色中心、2种纸质(哑光和半光),平均色差为 $3.1\Delta E_{ab,10}^*$ 的297对彩色印刷样本进行目视评价实验,并同时比较了包括CIELAB、CIE94、CMC、CIEDE2000、CAM02-LCD、CAM02-SCD、CAM02-UCS在内的7个色差公式和颜色空间,数据表明,CIEDE2000色差公式表现最好,其次为CMC、CAM02-SCD和CAM02-UCS色差公式,表现最差的是CIELAB色差公式。

上述Exp. II和Exp. IV实验中<sup>[13,15]</sup>,为了揭示光泽度对色差评价的影响,对TCD和SCD的印刷样本分别进行色差公式的 $k_L$ 加权因子优化,发现随着光泽度的增加, $k_L$ 因子都在逐渐减小,即明度差在总体色差中的比重随光泽度的增加而逐步增加。该结果与Pan等<sup>[16]</sup>用灰梯尺方法得到的不同光泽、平均色差为3.0 CIELAB的打印样本数据与色差公式优化的 $k_L$ 因子结果一致。同时比较阈值微色差和小色差的 $k_L$ 加权因子,发现对所有色差公式,阈值微色差的 $k_L$ 加权因子小于小色差的 $k_L$ 加权因子。

Exp. II和Exp. IV实验主要针对CIELAB颜色空间的4个色差公式(CIELAB、CIE94、CMC、CIEDE2000)和CAM02-(LCD、SCD、UCS)颜色空间的3个色差公式进行了比较分析。本文将对CIELAB颜色空间,CAM02-(LCD、SCD、UCS)颜色空间以及DIN99d、OSA和OSA-Gp-Eu共7个均匀颜色空间的表现用色度椭圆的形式进行检测。综合以上4个实验建立的不同色差和不同光泽彩色印刷样品色差数据集拟合色度椭圆,检验现有不同均匀颜色空间的均匀性,研究印刷样品的色差等级和光泽度差异对印刷品色差计算的影响,研究结果可为新的均匀颜色空间的建立提供理论依据。

### 3 用色度椭圆检验色空间的局部和全局均匀性

为直观起见,常常把围绕某一颜色中心的视觉实验数据拟合成某一三维颜色空间的一个色度椭球

(圆)。椭球(圆)上任意两点到椭球(圆)中心的距离,无论其空间距离是否相同在视觉上是等色差的。对于一个理想的均匀颜色空间来说,任意局部位置的椭球(圆)均应该无限接近于球(圆)型,并且不同位置椭球(圆)的大小应当保持一致。因此,通过分析椭球(圆)的形状和大小可以检验颜色空间的局部和全局均匀性。

#### 3.1 椭圆方程的建立

上述实验的原始实验数据均已按不同目视评价方法转换为目视评价的视觉色差数据 $\Delta V$ 值<sup>[11~15]</sup>。将这些实验数据分别在CIELAB和CIECAM02系列的3个颜色空间<sup>[6]</sup>CAM02-SCD、CAM02-UCS、CAM02-LCD和DIN99d<sup>[17]</sup>以及OSA系列2个颜色空间OSA和OSA-Gp-Eu<sup>[6]</sup>共7个颜色空间拟合色度椭球。CIELAB颜色空间的色度椭球方程为

$$\Delta E^2 = g_{11}\Delta a^{*2} + 2g_{12}\Delta a^*\Delta b^* + g_{22}\Delta b^{*2} + g_{33}\Delta L^2 + 2g_{13}\Delta a^*\Delta L^* + 2g_{23}\Delta b^*\Delta L^*, \quad (1)$$

式中 $g_{ij}$ 是椭球方程的系数, $\Delta L$ 、 $\Delta a$ 、 $\Delta b$ 分别为不同颜色空间中标样与测试样的明度差和色度差。通过计算得到的 $\Delta E$ 值和目视评价 $\Delta V$ 值间的标准化残差平方和(STRESS)值,给出最优化的 $g_{ij}$ 值,优化的目标是获取最小的STRESS值。拟合色度椭球时,为使(1)式中的计算色差和视觉色差 $\Delta V$ 有相同的量级,STRESS计算式中的缩放因子 $f$ 设为1。其它颜色空间的椭球方程与(1)式类似,只是代入不同的色度坐标。

交叉项 $\Delta a^*\Delta L^*$ 和 $\Delta b^*\Delta L^*$ 在整个色差计算过程中的权重较小,可略去。若去除(1)式中的 $g_{33}$ 因子,椭球就退化为椭圆方程。

用Exp. II和Exp. IV中不同光泽纸张的阈值微色差数据拟合的色度椭圆如图1所示,除OSA颜色空间外,其他颜色空间的色度椭圆均被放大3倍绘制。Exp. I和Exp. III两个实验的椭圆图均在相应的文献中<sup>[11,14]</sup>有所介绍。

#### 3.2 颜色空间的局部均匀性和全局均匀性

对色度椭圆的椭圆度(局部均匀性)和各椭圆尺寸一致性(全局均匀性)进行评价,可以揭示不同颜色空间的整体均匀性。颜色空间的局部均匀性可通过计算椭圆的长短半轴的比值( $A/B$ )和圆的半径比值( $A/B=1$ )之间的均方根 $\sigma_{RMS}$ 来评价:

$$\sigma_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{A}{B} - 1\right)_i^2}{N}}, \quad (2)$$

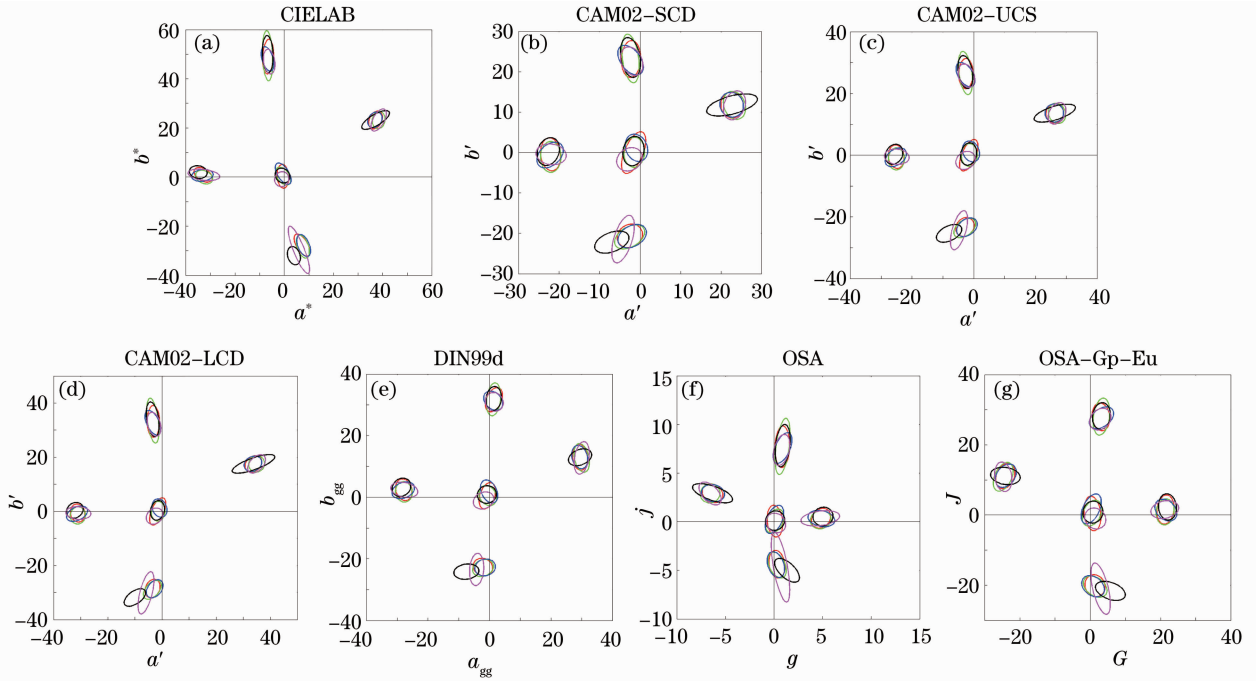


图 1 不同颜色空间色度图上辨色阈值椭圆[阈值微色差哑光(红线),半光(绿线),高光(蓝线);小色差哑光(黑线),半光(品红线)]

Fig. 1 Chromaticity-discrimination ellipses plotted in different chromaticity diagrams [TCD matt (red line), semi-gloss (green line), gloss (blue line); SCD matt (black line), semi-gloss (magenta line)]

式中  $N$  为颜色空间测试椭圆的个数。

颜色空间的全局均匀性即椭圆尺寸的一致性评价颜色空间不同位置椭圆尺寸间的大小关系,可由各椭圆尺寸  $S = \sqrt{\pi AB}$  间的标准偏差  $\sigma_{CV}$  计算,计算公式为

$$\sigma_{CV} = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(S_i - \bar{S})^2}{N}}}{\bar{S}}, \quad (3)$$

式中  $N$  为颜色空间中测试椭圆的个数,  $\bar{S}$  为所有椭圆大小的平均值。

理想的均匀颜色空间,计算的椭圆度和椭圆尺寸的标准偏差均应为零,  $\sigma_{RMS}$  和  $\sigma_{CV}$  值越小,颜色空间的局部和全局均匀性越好。

### 3.3 颜色空间的均匀性检验

Exp. I 和 Exp. III 中基于半光纸建立的 17 个色中心印刷品阈值微色差和小色差数据以及拟合的色度椭圆在不同颜色空间中的表现在文献[11, 14]中已有分析,为便于比较同样在表 2 列出(下划线表明计算结果较差,黑体表明计算结果较好)。

表 2 7 个颜色空间的局部和全局均匀性比较

Table 2 Comparison of local and global uniformity of seven uniform colour spaces

Uniform color space	TCD				SCD			
	Exp. I $\Delta E_{mean}^* = 1.1$		Exp. II $\Delta E_{mean}^* = 0.8$		Exp. III $\Delta E_{mean}^* = 3.1$		Exp. IV $\Delta E_{mean}^* = 3.1$	
	Local $\sigma_{RMS}$	Global $\sigma_{CV}/\%$	Local $\sigma_{RMS}$	Global $\sigma_{CV}/\%$	Local $\sigma_{RMS}$	Global $\sigma_{CV}/\%$	Local $\sigma_{RMS}$	Global $\sigma_{CV}/\%$
CIELAB	<u>1.76</u>	<u>21.2</u>	<u>1.41</u>	<u>12.0</u>	<u>1.59</u>	23.9	<u>1.71</u>	<u>16.3</u>
DIN99d	1.21	<b>10.7</b>	<b>0.64</b>	4.5	0.92	<b>17.7</b>	<b>0.73</b>	<b>6.2</b>
CAM02-LCD	1.55	15.9	1.05	6.5	1.19	20.7	1.45	14.1
CAM02-SCD	1.26	11.0	0.79	5.0	0.98	23.0	0.96	8.9
CAM02-UCS	1.31	12.2	0.85	6.1	0.97	20.0	1.10	10.0
OSA	1.39	19.9	1.16	10.4	1.18	<u>25.2</u>	1.72	<u>16.3</u>
OSA-Gp-Eu	<b>1.00</b>	15.9	0.68	<b>4.4</b>	<b>0.70</b>	21.9	0.92	9.7

综上 4 个实验数据拟合的色度椭圆检验均匀颜色空间的实验结果, CIELAB 和 OSA 颜色空间无论在局部均匀性还是全局均匀性上都表现较差。OSA-Gp-Eu 和 DIN99d 颜色空间每个色中心(不同位置)处, 椭圆度  $\sigma_{RMS}$  值最小, 色度椭圆的圆度最好, 即局部均匀性最佳, 表明对不同颜色的色品指数(色调和饱和度)度量和差异计算与人眼视觉的符合度最高。椭圆尺寸  $\sigma_{CV}$  值最小, 即全局均匀性较好, 表明 OSA-Gp-Eu 和 DIN99d 颜色空间对不同色中心之间量化关系的评价均匀性最好。同时, 综合表 2, CAM02-SCD 和 CAM02-UCS 颜色空间的表现仅次于 OSA-Gp-Eu 和 DIN99d 颜色空间。

#### 4 用色度椭圆检验光泽度的影响

不同光泽度的影响主要反映在 Exp. II 和 Exp. IV 的实验数据中。在作者以前的研究<sup>[13,15]</sup>中, 在对 TCD 和 SCD 的印刷样本进行色差公式的  $k_L$  加权因子优化时, 发现不同色差等级样本计算的  $k_L$  因子, 随着光泽度的增加, 都在逐渐减小。同时, 阈值微色差的  $k_L$  加权因子小于小色差的  $k_L$  加权因子。这表明在阈值微色差计算时, 光泽度在明度权重上的影响要大于小色差计算时的影响。

用  $k_L$  加权因子的方法可以得到光泽度对色差

表 3 在 CIELAB 颜色空间比较哑光纸和其他材质 5 个色中心印刷品色度椭圆的差别(STRESS 因子)

Table 3 Comparing ellipses in CIELAB space between matt and other substrates for 5 CIE color centers in terms of STRESS value

		Gray	Red	Yellow	Green	Blue	Mean
Exp. II	Semi-gloss versus matt	22.2	8.8	9.1	5.8	10.3	11.2
	Gloss versus matt	22.7	6.4	20.9	22.5	7.2	15.9
Exp. IV	Semi-gloss versus matt	8.2	25.7	10.9	17.3	25.1	17.4
							14.8

在 4 个实验中, 因实验方法不同仅有 Exp. III 中<sup>[14]</sup>可用 STRESS 因子表示观察者的不确定性, 观察者自身的不确定性为 19.1, 观察者之间的不确定性为 31.7。将光泽度影响大小(14.8)与观察者的不确定性(19.1 和 31.7)相比, 可见光泽度对均匀颜色空间的影响并不是很大。

#### 5 用色度椭圆检验色差等级的影响

与分析光泽度对印刷样品色差的影响类似, 用同样的方法来评价不同的色差等级对印刷样品色差计算的影响。不同色差等级的影响主要反映在 Exp. I 与 Exp. III、Exp. II 与 Exp. IV 的实验数据对比中。对于 Exp. I 和 Exp. III, 半光纸制作的 17

评价的影响趋势, 但不能量化影响的大小程度。光泽度的影响大小可用色度椭圆的差别来表示, 通过对不同纸质同一颜色中心、同一色差等级的样本, 用相同实验方法获得的实验数据拟合的色度椭圆进行比较, 可以揭示不同颜色空间中光泽度的变化对椭圆的影响大小。如以 Exp. II 中哑光纸为基底实验数据绘制的阈值微色差色度椭圆为参照, 分别将半光纸和高光纸颜色样本实验数据绘制出的色度椭圆与之比较。同理, 在 Exp. IV 中, 可以比较用哑光纸和半光纸制作的颜色样本实验数据拟合的色度椭圆。在比较椭圆时, 参照 Cui 等<sup>[18]</sup>的方法随机产生围绕椭圆中心的 500 对模拟色样, 并用(1)式计算相应的色差值  $\Delta E$ , 用 STRESS 因子比较两组椭圆方程计算得到的  $\Delta E$  值的相关性<sup>[19]</sup>, 作为两个椭圆之间的差别。

如表 3 所示, 不同基底得到的 5 个颜色中心计算的色度椭圆间的差别为 14.8。光泽度的影响在阈值微色差的表现 13.6, 在小色差的表现 17.4。同时, 在阈值微色差的实验中可以发现, 随着光泽度的增加椭圆的差别增大, 如随着光泽度由半光增加到高光时, 椭圆的差别由 11.2 增大到 15.9, 这一结论与用优化  $k_L$  加权因子所得结论一致。

个颜色中心 TCD 和 SCD 样本数据绘制的色度椭圆差异为 14.4<sup>[11]</sup>。表 4 所示为用 Exp. II 和 Exp. IV 中的同一颜色中心、同一基底、不同色差大小样本色差评价实验数据绘制色度椭圆, 并对色度椭圆计算的色差值进行 STRESS 因子的比较。如红颜色中心的样本, 同样用哑光纸制作, 分别为 TCD 实验和 SCD 实验不同的色差等级。

由表 4 可见, 哑光和半光 5 个颜色中心不同色差等级的色度椭圆制作的颜色样本 STRESS 因子比较结果为 14.6, 与 Exp. I 和 Exp. III 中比较半光纸 17 个色中心的计算结果 14.4 较为一致。同样, 与观察者自身的不确定性(19.1)和观察者之间的不确定性(31.7)比较, 色差等级对均匀颜色空间

表 4 在 CIELAB 颜色空间比较阈值微色差和小色差 5 个色中心印刷品色度椭圆的 STRESS 因子  
Table 4 Comparing ellipses between TCD and SCD for 5 CIE color centers in terms of STRESS value

	Gray	Red	Yellow	Green	Blue	Mean
Matt (Exp. IV versus Exp. II)	22.5	25.6	6.3	12.0	14.2	16.1
Semi-gloss (Exp. IV versus Exp. II)	19.6	18.4	4.8	6.5	15.9	13.0

在微色差到小色差范围内的影响并不大。

## 6 结 论

用基于不同色差大小(阈值微色差和小色差)和不同光泽度(哑光、半光和高光)的彩色印刷品建立的目视评价数据集,检验现有 CIELAB、DIN99d、CAM02-LCD、CAM02-SCD、CAM02-UCS、OSA 和 OSA-Gp-Eu 7 个颜色空间的均匀性、色差等级和光泽度大小对不同颜色空间色差评价的影响,结论如下:

1) 用  $\sigma_{RMS}$  和  $\sigma_{CV}$  因子量化表示颜色空间局部均匀性和全局均匀性,结果表明,CIELAB 和 OSA 颜色空间的表现最差,OSA-Gp-Eu 和 DIN99d 颜色空间在评价印刷品颜色差异的表现上较为接近,同时优于其他的颜色空间,CAM02-SCD 和 CAM02-UCS 颜色空间其次。

2) 随机产生 500 对模拟色样,拟合色度椭圆检验色差等级对印刷品颜色空间的影响程度,用 STRESS 因子表示计算结果,17 个颜色中心半光纸阈值微色差和小色差的结果为 14.4,5 个色中心哑光纸和半光纸的结果为 14.6,说明对彩色印刷样品而言,不同色差等级在同一颜色空间的表现有所不同,但在微色差(平均色差为 1 CIELAB)到小色差(平均色差为 3 CIELAB)范围内差别不大。

3) 随机产生 500 对模拟色样,拟合色度椭圆检验纸张光泽对印刷品颜色空间的影响程度,用 STRESS 因子表示计算结果,对不同基底得到的色度椭圆,5 个和 17 个颜色中心计算的平均值大约为 14.8,说明对彩色印刷样品而言,不同颜色空间中光泽度对色差计算有一定的影响,但影响也不是很大,且光泽度越高,影响越明显。

## 参 考 文 献

- 1 A. R. Robertson. The CIE1976 color-difference formulae [J]. *Color Res. Appl.*, 1977, **2**(1): 7~11
- 2 DIN. Farbmétrische Bestimmung von Farbständen bei Körperfarben nach der DIN99-Formel [R]. Berlin: DIN Deutsche Institut für Normung e. V. 2000
- 3 D. L. MacAdam. Uniform color scales [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1974, **64**(12): 1691~1702
- 4 CIE. A Colour Appearance Model for Colour Management Systems: CIECAM02 [R]. Vienna: CIE Central Bureau, 2004
- 5 S. S. Guan, M. R. Luo. Investigation of parametric effects

- using small colour differences [J]. *Color Res. Appl.*, 1999, **24**(5): 331~343
- 6 M. R. Luo, G. Cui, C. Li. Uniform colour spaces based on CIECAM02 colour appearance model [J]. *Color Res. Appl.*, 2006, **31**(4): 320~330
- 7 C. Oleari, M. Melgosa, R. Huertas. Euclidean colour difference formula for small-medium color differences in log-compressed OSA-UCS space [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2009, **26**(1): 121~133
- 8 H. Wang, G. Cui, M. R. Luo *et al.*. Evaluation of colour difference formulae for different colour-difference magnitudes [J]. *Color Res. Appl.*, doi: 10.1002/col.20693
- 9 Wang Zhehong. Study of Color Vision Discrimination Characteristics and Colour Difference Evaluation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009  
汪哲弘. 颜色视觉辨别特性及色差评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009
- 10 M. Melgosa. Request for existing experimental datasets on colour differences [J]. *Color Res. Appl.*, 2007, **32**(2): 159
- 11 M. Huang, H. Liu, G. Cui *et al.*. Evaluation of threshold colour differences using printed samples [J]. *Accepted by J. Opt. Soc. Am. A*, 2012
- 12 Huang Min, Liu Haoxue, Liao Ningfang. Study on just-noticeable colour 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
- 13 Huang Min, Wang Lili, Liu Haoxue. Study on small colour 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
- 14 M. Huang, H. Liu, G. Cui *et al.*. Testing uniform colour spaces and colour-difference formulae using printed samples [J]. *Color Res. Appl.*, doi: 10.1002/col.20689
- 15 Huang Min, Wang Lili, Liu Haoxue. Study on the influence of gloss on printed samples medium-small colour difference with the psychophysical method of comparison [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3356~3366  
黄敏, 王丽丽, 刘浩学. 用比较法研究光泽度对印刷样品的中小色差影响 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3356~3366
- 16 Y. Pan, G. Cui, M. R. Luo. Gloss effect on colour difference evaluation [C]. AIC 2007 Color Science for Industry, 2007, 199~202
- 17 G. Cui, M. R. Luo, B. Rigg *et al.*. Uniform colour space based on the DIN99 colour-difference formula [J]. *Color Res. Appl.*, 2002, **27**(4): 282~290
- 18 G. Cui, M. R. Luo, B. Rigg *et al.*. Colour-difference evaluation using CRT colours. Part II: parametric effects [J]. *Color Res. Appl.*, 2001, **26**(5): 403~412
- 19 P. A. García, 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