

不同环境参数下 CIECAM02 的跨媒体颜色复现性能

卢沧龙 徐海松 官睿

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 为研究 CIECAM02 三种环境参数(dark, dim, average)在三种相应照明环境下的跨媒体颜色复现性能,基于记忆匹配和成对比较的心理物理学实验方法,在灯箱照明打印样本与 Dark, Dim, Average 三种不同环境照明条件下液晶显示器显示色样之间进行了跨媒体颜色复现实验。实验数据分析表明,采用 dim 环境参数在三种照明条件下都能达到较优的颜色复现性能,而 dark 和 average 参数性能与测试颜色的明度和彩度存在一定相关性,较暗色样在 Dark 条件下采用 dark 参数设置复现良好,但在 Average 实验条件下采用 average 参数设置时性能很差;对于较亮色样的复现,dark 与 average 参数设置在其相应实验条件下的颜色复现性能无显著差异。

关键词 视觉与色彩;跨媒体颜色复现;心理物理学实验;CIECAM02;成对比较法

中图分类号 O432.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0733001

CIECAM02 Performance on Cross-Media Color Reproduction in Different Surround Conditions

Lu Canglong Xu Haisong Gong Rui

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

Abstract In order to investigate cross-media color reproduction performances on three surround parameters (dark, dim, average) of CIECAM02 color appearance model, color reproduction experiments under the three corresponding ambient lighting conditions are implemented between print samples viewed in a cabinet and reproduced samples presented on a self-luminous display. Memory matching and pair comparison methods are employed in psychophysical experiments. Detailed analysis and comparison of the experimental data indicate that the color samples reproduced by parameter “dim” performed well in all three conditions, while the performance of parameters “dark” and “average” are dependent, in some extent, on the lightness and chroma of color. The color samples with lower lightness work well when they are reproduced by parameter “dark” and viewed in Dark condition, but they perform poor when being viewed in Average condition and reproduced using parameter “average”. As for the relatively lighter color samples the reproduction performances are not statistically different between the cases of parameters “dark” and “average” when they are viewed in the corresponding Dark and Average lighting conditions.

Key words vision and color; cross-media color reproduction; psychophysical experiment; CIECAM02; pair comparison

OCIS codes 330.1710; 330.1715; 330.1720; 330.7310

1 引言

色貌模型是指能够预测明度、彩度和色调等色貌属性的数学模型。色貌模型作为颜色管理的关键环节,着重研究在不同照明及观察环境下颜色外貌跨媒体复现时在视觉感知上的一致性,使彩色图像

在跨媒体复现时保持颜色的可预测性和色貌一致性。由于 CIELAB 等颜色空间在预测色貌时存在诸多缺陷,无法解决亮度、背景、环境和不完全适应对色貌的影响,因此色貌模型被不断提出以解决跨媒体观察的颜色匹配问题,如 Hunt 模型、Nayatani

收稿日期: 2012-01-16; **收到修改稿日期**: 2012-02-13

作者简介: 卢沧龙(1988—),男,硕士研究生,主要从事跨媒体颜色复现方面的研究。E-mail: canglong.lu@gmail.com

导师简介: 徐海松(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事颜色科学与影像技术、光度学色度学和光辐射测量技术等方面的教学与研究工作。E-mail: chsxu@zju.edu.cn

模型、RLAB 模型^[1]和 LLAB 模型^[2]。国际照明委员会(CIE)在测试了各模型性能并权衡其复杂性后,于 2004 年推荐并发布了 CIECAM02^[3] 色貌模型用于颜色管理。

自 CIECAM02 发布以来,开展了大量相关应用研究,包括颜色空间均匀性、颜色刺激尺寸对色貌的影响、背景影响与同时对比、大亮度范围的色貌研究^[4]等,但对于 CIECAM02 模型自身不同参数设置下的跨媒体颜色复现性能研究较少。

由于色貌模型旨在将观察条件中的因素纳入到计算中去,从而使颜色预测直接与人眼视觉感知相关联,故本文分别采用 CIECAM02 模型的三种环境参数设置 dark、dim、average 作为模型输入,在 Dark、Dim、Average 三种相应的照明环境下,在软拷贝输出设备液晶显示器与硬拷贝输出彩色打印样品之间进行跨媒体颜色复现实验,以分析 CIECAM02 环境参数的预测特性,这对更科学有效地利用 CIECAM02 实施跨媒体颜色复现具有重要的意义。

2 实 验

2.1 CIECAM02 颜色复现流程

实验中,硬拷贝反射媒介打印样本和软拷贝媒介自发光显示器显示色样之间的跨媒体颜色复现流程如图 1 所示。首先将硬拷贝样本的三刺激值 XYZ 在其观察条件下经由 CIECAM02 的正向模型得到明度 J 、彩度 C 、色调 h 等色貌参量,然后在观

察条件下经 CIECAM02 的反向模型在自发光显示器上得到复现颜色的三刺激值 $X'Y'Z'$,最后通过显示器的色度特征化模型显示对应的颜色。

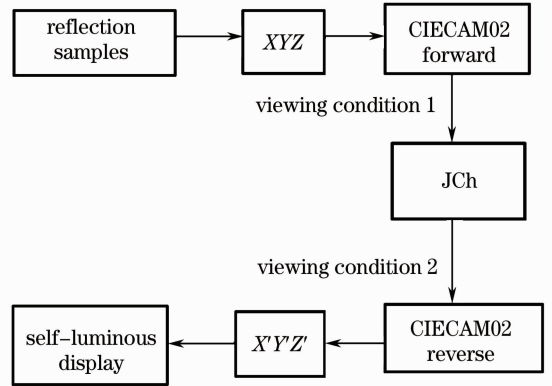


图 1 跨媒体颜色复现流程

Fig. 1 Flow chart of cross-media color reproduction

2.2 实验设置

采用的打印样本是根据 CIE 推荐用于色差研究的 5 个基本颜色中心及其 12 个扩展颜色中心^[5],分别是灰色(Gr)、红色(R)、高彩度红色(HC-R)、橙色(O)、高彩度橙色(HC-O)、黄色(Y)、高彩度黄色(HC-Y)、黄绿色(YG)、高彩度黄绿色(HC-YG)、绿色(G)、高彩度绿色(HC-G)、蓝绿色(BG)、高彩度蓝绿色(HC-BG)、蓝色(B)、高彩度蓝色(HC-B)、紫色(P)和高彩度紫色(HC-P)。将选定颜色样本的 CIELAB 参数 L^* 、 a^* 、 b^* 作为复现源目标值,经由打印机的查找表 LUT 获得打印样本,表 1 列出了实验所采用 17 个打印样本的 CIELAB 实测值。

表 1 17 个打印样本的 CIELAB 参数

Table 1 CIELAB chrominance parameters of 17 print samples

Color sample	L^*	a^*	b^*	C_{ab}^*	h_{ab}	Color sample	L^*	a^*	b^*	C_{ab}^*	h_{ab}
Gr	62.53	-0.19	1.5	1.51	97.7	G	56.42	-33.34	-0.03	33.34	180.1
R	42.74	37.86	24.83	45.28	33.3	HC-G	56.81	-43.19	0.74	43.20	179.0
HC-R	44.01	55.19	30.09	62.86	28.6	BG	52.45	-17.45	-11.74	21.03	214.0
O	63.69	11.98	20.64	23.86	59.9	HC-BG	50.03	-30.82	-24.95	39.65	219.0
HC-O	63.48	30.41	60.40	67.61	63.3	B	34.47	5.77	-35.13	35.60	279.3
Y	85.61	-7.53	44.32	44.95	99.7	HC-B	37.17	0.38	-44.38	44.38	270.5
HC-Y	85.19	-12.52	78.65	79.64	99.0	P	47.37	9.22	-7.91	12.14	319.4
YG	65.94	-10.16	12.01	15.73	130.2	HC-P	48.87	26.84	-22.58	35.07	320.0
HC-YG	65.94	-32.55	38.61	50.49	130.1						

将标准灯箱 GretagMacbeth SpectraLight III 下的打印样本作为跨媒体颜色复现源媒介,目标媒介采用 Eizo 液晶显示器(LCD) ColorEdge CG241W。表 2 列出了跨媒体颜色复现具体的照明

与观察条件及参数,其中三种照明环境 Dark、Dim、Average 是通过放置照度可调节式灯箱在 LCD 正后方,并且背对显示器照射暗室中白墙,依靠墙壁的漫反射来达到一定的环境照度,以此模拟相应的三

种照明环境,标准灯箱照明光源及 LCD 白场都设置为 D65,观察距离均为 60 cm。打印样本和显示器复现色样大小均为 6 cm×6 cm,其中打印样本的观察背景为明度(L^*)20 的中性灰,LCD 的色样背景设置为 20%白场亮度的中性灰。打印样本和液晶显示器分别放置在两个相邻分隔的暗室中,以避免

表 2 实验中所用的观察条件

Table 2 Viewing conditions in experiment

	Surround	Illuminance /lx	White point (x,y)	Luminance /(cd/m ²)
Eizo LCD	Dark	0.1		
	Dim	65	D65(0.3102,0.3264)	118
	Average	350		
GretagMacbeth SpectraLight III	Average	1000	D65(0.3176,0.3297)	318

实验前液晶显示器预热 2 h 以确保显示颜色的充分稳定,然后采用 Konica-Minolta 光谱辐射计 CS-2000 进行三色通道测试以得到色度特征化训练样本。基于假设色品坐标可变的线性分段插值(PLVC)模型对 LCD 进行色度特征化^[6],以精确显示目标复现颜色^[7]。对于 51 个复现颜色样本,其在 LCD 上显示颜色的实测值与目标复现值之间的平均色差为 0.87 个 CIELAB 色差单位,最大色差为 1.33,最小色差为 0.43,该颜色特征化精度对于色貌的观察评判是可以接受的。

2.3 心理物理学评价实验

视觉评估实验采用记忆匹配和成对比较的心理物理学方法,观察者为 11 名色觉正常者,其中 7 男 4 女,平均年龄为 25 岁。实验开始前,观察者先在暗室中进行 1 min 暗适应,然后在灯箱照明环境中进行 1 min 亮适应^[8]。接着分别在目标媒介显示器的 Dark、Dim、Average 观察环境下,评价比较基于 CIECAM02 三种环境参数 dark、dim、average 计算的 LCD 复现颜色与源媒介目标颜色的视觉匹配程度。对于每个打印样本,采用成对比较法可组合产生三对复现颜色,打印样本及其复现颜色对均以随机排列的方式呈现。在实验中,观察者需观察并记忆打印样本的色貌,然后再观察比较液晶显示器上显示的复现颜色,最后选择其中最符合打印样本色貌的复现颜色并作记录。

3 数据处理及分析

3.1 成对比较法的等距量表数据获取

采用成对比较心理物理学方法获取的原始实验数据并不是等距量表,故需采用 Thurstone 比较判断数据处理方法^[9]获得标准正态分布的等距量表

观察时相互干扰。每个打印样本的颜色经由 CIECAM02 反向模型生成三个复现颜色,分别对应于显示器端的三种观察环境(Dark, Dim, Average),因此 17 个打印样本总共生成 51 个 LCD 复现颜色。

z -score。根据 11 名观察者的视觉评价数据,统计得到显示器每个复现颜色在每种观察环境下的频数矩阵 F_{ij} ,然后根据观察者人数计算频率矩阵 p_{ij} ,最后将频率矩阵通过标准正态分布的反函数转换成 z -score 矩阵。表 3 列出了不同参数环境设置在不同观察条件下由实验获得的等距量表值,其数值反映了采用该环境参数设置的复现颜色与源打印样本颜色的接近程度,数值越大表示其颜色复现性能越优。图 2 是根据表 3 数据绘制的柱状图,其中 3(a)~(c) 分别对应 Dark、Dim、Average 三种观察环境,误差棒表示了 95% 置信区间,即

$$I_{CI} = \pm 1.96 \times \frac{1}{\sqrt{2n}}, \quad (1)$$

式中 n 表示观察者人数,由(1)式求得置信区间为 0.417。

3.2 实验数据有效性分析

为分析实验数据的有效性,进行了实验数据拟合度的卡方检验。根据每个复现颜色在每种观察环境下的等距量表值,可由 Mosteller 数学方法求得其对应的频率矩阵 p'_{ij} ,在理想状况下 p'_{ij} 和观察者频率矩阵 p_{ij} 应当十分接近。采用检验统计量 χ^2 检验 p'_{ij} 和 p_{ij} 之间的拟合度^[10],即

$$\chi^2 = n \sum (\theta'_{ij} - \theta_{ij})^2 / 821, \quad (2)$$

式中 $\theta_{ij} = \arcsin(p_{ij})^{1/2}$, $\theta'_{ij} = \arcsin(p'_{ij})^{1/2}$ 。零假设 H_0 设置为 p'_{ij} 和 p_{ij} 之间不存在显著差异,若统计量 χ^2 小于 $\chi^2_{\alpha,v}$,则认为 H_0 成立,其中 α 为显著性水平, v 是自由度,由刺激数目 s 计算得到,即 $v = (s-2)(s-1)/2$,实验中显著性水平 $\alpha = 0.05$, $s = 3$ 。由表 3 可见,所有卡方值都小于临界值 $\chi^2_{0.05,1} = 7.879$,都通过了卡方拟合度检验,并与相关研究^[11]比较可知,实验数据是有效可靠的。

表 3 不同照明环境下的成对比较实验数据(z-scores)以及 χ^2 检验

Table 3 Results of pair comparison for various viewing conditions (z-scores) and of Chi-Square test

Color samples	Dark				Dim				Average			
	dark	dim	average	χ^2	dark	dim	average	χ^2	dark	dim	average	χ^2
Gr	0.35	0.13	-0.48	0.2182	0.84	0.28	-1.12	0.0028	0.76	0.15	-0.91	0.1844
R	-0.72	0.61	0.11	0.9719	-0.63	0.51	0.11	0.1135	0.25	-0.25	0	0.0200
HC-R	-1.74	1.38	0.37	0.2395	-1.52	1.01	0.51	1.17	-0.76	0.76	0	0.0479
O	0	0.91	-0.91	0.3976	-0.61	0.84	-0.23	0.64	0.48	0.28	-0.76	0.2344
HC-O	-0.84	0.72	0.12	0.3989	-0.51	0.51	0	0.27	0.12	0.11	-0.23	0.0763
Y	0.36	0	-0.36	0.0863	-0.11	0.23	-0.11	0.0763	0.23	0.25	-0.48	0.0824
HC-Y	0.11	0.14	-0.23	0.0763	0.23	0.49	-0.72	1.3474	0.36	0.61	-0.97	0.3625
YG	-0.12	0.25	-0.13	0.7041	0.35	0	-0.35	0.0743	0.35	0.90	-1.24	2.7012
HC-YG	0.23	0	-0.23	0.2119	0.23	0.40	-0.63	0.2613	0.35	0.49	-0.84	0.9433
G	-0.36	0.25	0.11	0.2242	-0.48	0.36	0.12	0.0121	-0.12	0.48	-0.36	0.012
HC-G	-0.55	0.55	0	0.1135	-0.36	0.60	-0.25	0.0076	0	1.24	-1.24	1.3644
BG	-1.12	0.61	0.51	0.1393	-1.52	1.12	0.40	0.8924	-0.13	1.00	-0.84	0.0721
HC-BG	-0.51	-0.12	0.63	0.1135	-0.35	0.35	0	0.0743	-0.23	0.63	-0.40	0.2613
B	-2.13	0.61	1.52	0.6337	-0.63	0.63	0	0.025	-0.35	0.35	0	0.0743
HC-B	-0.91	0.15	0.76	0.1844	-0.84	0.72	0.12	0.3989	-0.36	0.36	0	0.0863
P	-0.76	0.76	0	0.0479	-1.74	0.49	1.25	0.343	-1.12	0.84	0.28	0.0028
HC-P	-0.60	0.48	0.13	0.0701	-1.37	1.13	0.25	1.3175	-0.60	0.48	0.13	0.0071

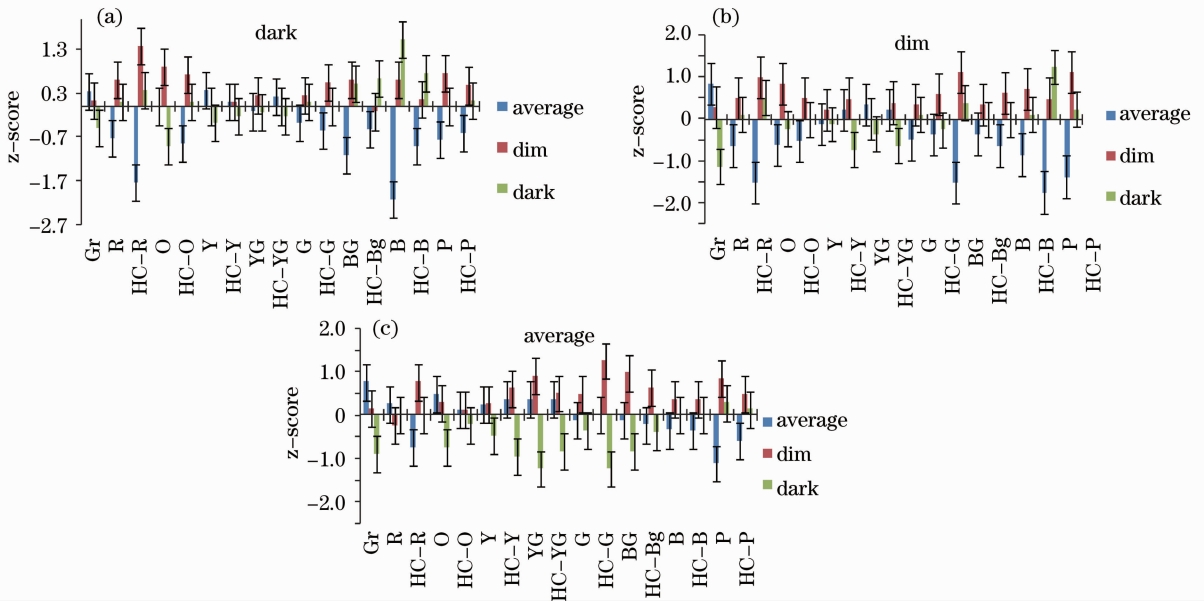


图 2 不同观察环境下 17 个颜色的 z-score 值

Fig. 2 z-score values of 17 colors results in three viewing conditions

3.3 实验结果分析及讨论

图 2(a) 表示在观察环境 Dark 条件下基于 CIECAM02 的三种环境参数设置计算的复现颜色 z-score 值,可见对于大部分颜色来说,采用 dim 和 dark 环境参数计算的颜色复现性能没有显著差别,仅有少部分颜色采用 dim 环境参数设置时的复现性能略优于 dark 的情况,这说明观察者难以区分这两种环境参数设置下复现的颜色;使用 average 环

境参数设置计算的复现颜色 z-score 得分最低,意味着其复现性能最差,这与色貌模型各环境参数性能的最初预期相符合。由图 2(b)可知,采用 dim 环境参数设置复现的颜色普遍与源打印色样匹配较好,average 参数设置时复现颜色的匹配较差,同时,相对于 Dark 环境下的结果,dim 环境参数设置的复现性能与 dark 环境参数设置具有较明显的区别。图 2(c)中 Average 观察环境下的实验结果表明,采

用 dark 环境参数时所有测试色样的复现性能均很差,而对于如 Gr、O、Y、YG 等一些明度较高的颜色,用 average 参数复现都有不错的表现;但对于 HC-R、HC-B、B、P、HC-P 等低明度颜色,采用 average 环境参数时的复现性能较差。这类色样在显示器上显示颜色的饱和度均低于源打印样本,使颜色看起来变浅,对蓝紫区颜色尤其如此,其原因在于 Brill 等^[12]所指出的 CIECAM02“黄-蓝问题”及“P 问题”,CIECAM02 采用的色适应转换 CAT02 其色品图中的 R、G 基元在 HPE 三角形之外,故使饱和和紫色等颜色被排除在 CAT02 三角形之外,所以在复现相关色区的颜色时会出现误差。为此,计算 dim、average 环境参数复现的颜色以及打印样本在 CIELUV 空间的饱和度 S_{uv} 以作深入分析,结果如图 3 所示,可见 HC-R、B、HC-B、P、HC-P 等明度相对较低的颜色由 average 环境参数复现后饱和度变低;另一方面,由于观察者对低明度颜色的饱和度变化更为敏感,故这几种复现颜色在 Average 环境下与源打印样本的色貌匹配很差。而对其他中等明度的颜色,观察者倾向于选择 dim 环境参数对应的复现颜色。

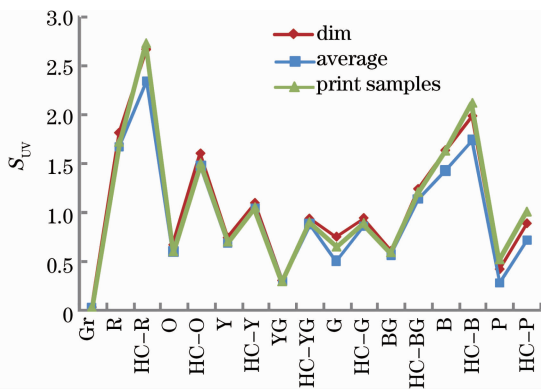


图 3 复现颜色和打印样本的饱和度比较

Fig. 3 Saturation comparison between reproductions and print samples

综合三种环境参数在三种相应观察环境下色貌的复现性能,总体上 dim 环境参数相较于其他两种环境参数具有较大优势,但具体而言,各环境参数的性能表现仍与颜色的明度和彩度存在一定相关性:明度较高的颜色如 Gr、Y、O、YG 等,其采用 average 环境参数和 dim 环境参数在三种环境下的复现性能均无显著差异;而低明度颜色如 B、HC-B、P、HC-P 等,即使在 Average 观察环境下,average 参数设置对应的复现颜色其 z-score 得分仍然最低,这是因为使用 average 参数对这几种颜色复现后其饱和

度变低,且观察者的记忆色会比真实颜色更加饱和^[13-14],因而导致了 average 环境参数的复现颜色与源打印样本色貌匹配很差。此外,彩度较高的颜色如 HC-R、HC-O、HC-G、HC-B、HC-BG 等,在三种观察条件下均为 dim 环境参数设置时的复现性能最好。

4 结 论

基于记忆匹配和成对比较的心理物理学视觉实验方法,评价并比较了 CIECAM02 三个环境参数设置 dark、dim、average 在三种相应观察环境下的颜色复现性能。研究表明,dim 环境参数在三种观察环境下都有不错的复现性能,但各环境参数性能与颜色的明度和彩度存在一定相关性。实验验证了 CIECAM02 在蓝紫色区存在的问题,需要对 CAT02 色适应矩阵和 HPE 矩阵做更多的改进,同时进一步的分析表明 CIECAM02 所定义的三种环境参数并不能精确描述其在给定观察环境下的颜色复现情况,难以达到跨媒体颜色复现的精确色貌预测。因此,色貌模型的研究尚待完善,仍需对 CIECAM02 在颜色空间和色适应等方面的问题进行改进,同时对其环境参数设置的应用做进一步的深入探讨。

参 考 文 献

- 1 M. D. Fairchild. Refinement of the RLAB color space[J]. *Color Res. Appl.*, 1996, **21**(5): 346~388
- 2 M. R. Luo, M. C. Lo, W. G. Kuo. The LLAB (1;e) color model [J]. *Color Res. Appl.*, 1996, **21**(6): 412~429
- 3 N. Moroney, M. D. Fairchild, R. W. G. Hunt *et al.*. The CIECAM02 color appearance model [C]. IS&TISID 10th Color Imaging Conference, Scottsdale, 2002
- 4 Shi Junsheng. Review of problems in CIECAM02 and solutions [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(4): 15~22
- 5 石俊生. CIECAM02 色貌模型应用存在的问题及建议解决的方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(4): 15~22
- 6 Xu Haisong. Color Information Engineering [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2005. 88~89
- 7 徐海松. 颜色信息工程 [M]. 杭州:浙江大学出版社, 2005. 88~89
- 8 Gong Rui, Xu Haisong, Zhang Xiandou *et al.*. Sub-space compensation model for accurate colorimetric characterization of liquid crystal displays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0433001
- 9 宫睿, 徐海松, 张显斗等. 液晶显示器色度特征化的分空间补偿模型[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0433001
- 10 J. B. Thoma, J. Y. Hardeberg, I. Foucherot. The PLVC display color characterization model revisited [J]. *Color Res. Appl.*, 2008, **33**(6): 449~460
- 11 M. D. Fairchild, L. Reniff. Time course of chromatic adaptation for color-appearance judgments [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(5): 824~833
- 12 L. L. Thurstone. A law of comparative judgment [J]. *Psychol.*

- Rev., 1994, **101**(2): 266~270
- 10 F. Mosreller. Remarks on the method of paired comparisons: III. A test of significance for paired comparisons when equal standard deviations and equal correlations are assumed [J]. *Psychometrika*, 1951, **16**(2): 207~218
- 11 K. M. Braun, M. D. Fairchild. Testing five color-appearance models for changes in viewing conditions[J]. *Color Res. Appl.*, 1997, **22**(3): 165~173
- 12 H. Brill Michael, Sabine Susstrunk. Repairing gamut problems in CIECAM02: a progress report[J]. *Color Res. Appl.*, 2008, **33**(5): 424~426
- 13 K. Uchikawa. Purity discrimination: successive vs. simultaneous comparison method[J]. *Vision Res.*, 1983, **23**(1): 53~58
- 14 S. M. Newhall, R. W. Burnharm, J. R. Clark. Comparison of successive with simultaneous color matching[J]. *JOSA*, 1957, **47**(1): 43~56

栏目编辑: 李文喆