

用异谱反射色检验 CIE 颜色匹配函数的表现

李钰¹, 黄敏^{1*}, 王宇¹, 史春洁², 李修¹, 刘瑜¹¹北京印刷学院印刷与包装工程学院, 北京 102600;²浙江越秀外国语学院网络传播学院, 浙江 绍兴 312000

摘要 为测试 CIE 推荐各颜色匹配函数(CMFs)CIE1931、CIE1964 和 CIE2006 的计算性能,首先使用前期研究中两组基于配对比较法实验采集到的年轻和老年观察者异谱反射色色差比较数据,检验了 CIE 现有各 CMFs 的表现。研究发现 CIE2006(22,4°)和 CIE1931 2° 的计算色差 ΔE_{00} 分别与 56 名年轻和 40 名老年观察者的目视色差 ΔV 间的 *STRESS* 值最小,一致性最好。在 RAL K5 色卡中选择了明度值 L_{10}^* 在 34.4~71.6 范围内的 5 个不同非彩色作为目标色,使用 Epson 喷墨打印机围绕每个目标色分别制作了 16 个异谱样本。组织了 26 名年轻观察者基于灰梯尺法进行 80 对样本的色差比较,结果表明目视色差 ΔV 与 CIE2006(22,2°)CMFs 的计算色差 ΔE_{00} 间 *STRESS* 值最小。本次实验的观察视场为 $8.17^\circ \times 16.26^\circ$,现有 CIE2006 CMFs 在大视场下对异谱反射色间色差的计算性能还需要进一步改进。

关键词 视觉光学; CIE 颜色匹配函数; 同色异谱样本对; 配对比较法; 灰梯尺法; *STRESS*

中图分类号 O432

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0533001

Performance of CIE Color Matching Functions Tested by Metamerism Reflected Samples

Li Yu¹, Huang Min^{1*}, Wang Yu¹, Shi Chunjie², Li Xiu¹, Liu Yu¹¹School of Printing and Packaging Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China;²College of Network Communication, Zhejiang Yuexiu University, Shaoxing, Zhejiang 312000, China

Abstract In order to test the performances of CIE recommended color matching functions, including CIE1931, CIE1964, and CIE2006, the visual color differences from young and aged observers in the previous study based on paired-comparison experiments are used to test the performances of CMFs. The results indicate that CIE2006 (22, 4°) and CIE1931 2° are recommended for young and aged observers with the minimum *STRESS* values, with the most consistent of the calculated color difference ΔE_{00} and the visual color difference ΔV of 56 young observers and 40 old observers, respectively. Further, we selected five neutral target colors from RAL K5 color chart with the L_{10}^* values ranging from 34.4–71.6, and 16 metamerism samples were prepared by the Epson inkjet printer around each target color sample. The target and compared samples were metamerism sample pairs. 26 young observers were organized to carry out the color difference experiment of the 80 sample pairs with the gray scale method. The results indicate that the computed color differences ΔE_{00} from CIE 2006(22, 2°) CMFs are accorded with the visual color difference ΔV with the minimum *STRESS* values, with the observation field of $8.17^\circ \times 16.26^\circ$. The existing CIE2006 CMFs are needed to improve in the calculation of large field of view in consideration of the color difference of metamerism reflected samples.

Key words visual optics; CIE color matching functions; metamerism sample pairs; paired-comparison method; gray scale method; *STRESS*

收稿日期: 2021-08-26; 修回日期: 2021-09-11; 录用日期: 2021-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(61675029)、北京市委组织部青年拔尖计划(2018)、北京印刷学院校级研发计划(Ec202003)、北京印刷学院科研创新团队(BIGC Ec202102)

通信作者: *huangmin@bigc.edu.cn

1 引言

为量化表征颜色感觉、计算不同颜色刺激间的差异, CIE 国际照明委员会推荐使用颜色匹配函数(CMFs) CIE1931^[1]、CIE1964^[1]和 CIE2006^[2]。其中 CIE1931 是基于同一个国家 17 名观察者的颜色匹配数据(Wright-1929)建立的^[3], 适用于 1°~4° 视场(FOV)的计算, 简称 CIE1931 2° CMFs。CIE1964 是基于 2 个国家近 60 名观察者的颜色匹配数据(Stiles&Burch-1959 和 Sperankaya)建立的^[4-5], 适用于大于 4° 视场的计算, 简称 CIE1964 10° CMFs。一直以来, CIE1931 2° CMFs 和 CIE1964 10° CMFs 被广泛应用于科学界和工业界的颜色刺激计算和评价。2006 年, CIETC1-36 分会在 Stiles&Burch^[4]数据的基础上提出了考虑到观察者年龄(20~80 岁)和视场(1°~10°)的 CIE2006 计算模型^[2]。2015 年, CIE^[6]进一步提出将观察者锥细胞响应 LMS(long, medium, short-wave sensitive)转换到 CMFs 的计算方法, 并推荐直接使用 CIE2006 2° 和 CIE2006 10° 两套 CMFs 用于颜色的色度计算。

近年来, 随着窄带、宽色域呈色设备的日益普及, 为检验 CIE 推荐各 CMFs 的表现, 研究者们开展了不同的颜色匹配实验^[7-12]。Hu 等^[7]组织了 8 名年龄分布在 21~31 岁的观察者使用 11 通道的 LED 光源组成 16 种匹配原色, 将其与 iPad 显示的白色进行颜色匹配(FOV 约为 3.8°); Wu 等^[8]组织了 50 名年龄分布在 19~38 岁的观察者, 使用 4 台有机发光半导体显示器(OLED)和液晶显示器(LCD)上显示的 6 个颜色进行颜色匹配(FOV 约为 4.77°)。以上两组实验对 CIE1931 2°、CIE1964 10°、CIE2006 2° 和 CIE2006 10° CMFs 的检验结果均表明, 使用 CIE2006 2° CMFs 计算的颜色匹配精度最高。本课题组^[9]使用的 4 通道和 6 通道 LED 面板呈现目标色和匹配色, 组织了 39 名年龄分布在 19~24 岁的观察者对白色开展颜色匹配实验, 对 CIE1964 10°、CIE2006 10°、S2 和 B17 CMFs 的检验结果表明, S2 和 B17 的表现优于 CIE1964 10° 和 CIE2006 10° CMFs; 文中对 CMFs 的计算均是基于 10° 视场开展的, 并未对小视场, 特别是 CIE2006 2° 视场的适用性进行计算研究。Li 等^[10-12]分别组织了 9 名观察者[平均年龄(24±4)岁]和 54 名观察者[平均年龄(33±11)岁], 在 LED 观察箱中使用 6 通道^[10]、8 通道 LED 光源^[11-12]和灰色反射色进行颜色

匹配, 其中文献[10]中的目标视场和匹配视场分别为 5° 和 3°, 文献[11-12]的视场 FOV 约为 10°。研究发现 CIE1964 10° 和 CIE2006 10° CMFs 的预测性能较为接近; CIE1931 2° 和 CIE2006 2° CMFs 计算的颜色匹配精度和观察者间差异随着蓝原色的改变均会有较大变化。

从以上研究可以发现, 目标色和匹配色由带宽较窄的 LED 原色混合而成^[7-9], 或由 LED 原色和反射色组成^[10-12]。而在印刷领域, 印刷样和标样均为反射色, 且多为近同色异谱颜色对, 工业界常需以印刷标样(反射色)为参照进行油墨的配色、打样和印刷复制。同时, 文献[7, 8, 10]中的观察视场均在 4° 左右, 介于 CIE 推荐的大视场和小视场计算边界, 检验结果中的 CIE2006 2° 优于 CIE2006 10°, 这并不能很好地表明 CIE2006 CMFs 在大视场和小视场下的计算性能。本文进一步选用了大视场条件下的目视数据进行检验, 本课题组前期^[13-14]组织年轻和老年观察者基于近同色异谱的反射色开展了两组色差比较实验(FOV 约为 9.5°×28.1°), 且均使用 10° 视场的 CMFs 进行计算。为进一步检验现有 CIE 各 CMFs 的计算性能, 本文首先用 STRESS 因子检验了上述两组实验采集到的目视色差 ΔV 和 CIE 各 CMFs 计算色差 ΔE 间的一致性。进一步地, 围绕 5 个不同明度的非彩色, 打印制作了 80 对[5(目标色个数)×16(样本数)]异谱样本, 对 CIE 推荐 CMFs 的计算性能进行检验。

2 色差比较实验

2.1 已有实验

2018 年何瑞丽等^[13]以实用定名色卡中的灰、棕、蓝绿、蓝和紫色为标样, 使用 Epson 喷墨打印机制作了 20 对[5(标样个数)×4(比较样个数)]异谱颜色样本对, 组织了 30 名年龄分布在 19~25 岁的年轻观察者和 26 名年龄分布在 60~74 岁的老年观察者, 在 GretagMacbeth Judge II 标准观察箱的模拟日光 DAY 光源下开展了色差比较实验, 简称 EXP. I。

2019 年 Xi 等^[14]以实用定名色卡中的灰、棕、浅棕为标样(注: 这里的灰、棕色与 EXP. I 中的灰、棕色不同), 使用 Epson 喷墨打印机制作了 18 对[3(标样个数)×6(比较样个数)]异谱颜色样本对, 组织了 26 名年龄分布在 20~25 岁的年轻观察者和 14 名年龄分布在 62~75 岁的老年观察者, 在 THOUSLITE LED Cube 观察箱的 LED 白光照明下开展了色差比较实验, 简称 EXP. II。

上述两组实验中,标样和比较样的大小均为 5 cm×5 cm。实验时,标样在灯箱底部居中放置,将比较样 1 和比较样 2 无缝隙地随机放置于标样左

方和右方,观察者正坐在标准观察箱前 25~30 cm 进行观察(FOV 约为 9.5°×28.1°),这符合 CIE 推荐的大视场计算范围。实验的基本信息如表 1 所示。

表 1 EXP. I 和 EXP. II 的基本信息

Table 1 Detailed information of EXP. I and EXP. II

Phase	Light source	Color center	Color sample size / (cm×cm)	Number of observers		Age range of observers		Total observations	Ref. No
				Young	Old	Young	Old		
EXP. I	Fluorescent	5	5×4	30	26	19-25	60-74	20160	[13]
EXP. II	LED	3	3×6	26	14	20-25	62-75	18000	[14]

对于这两组实验数据,2020 年本课题组^[15]用 CIE 10° CMFs(CIE1964 10°,CIE2006 10°,CIE1989 Standard Deviate Observer),S1~S8,A1~A10,以及 BIGC1~BIGC19 共 40 个 CMFs 对观察者的目视色差和计算色差 CIEDE2000 进行了 STRESS 检验。结果表明 S2 和 BIGC 5 分别适用于年轻和老年观察者。考虑到两组实验的视场 FOV 属于 CIE 推荐的大视场计算范围,文献[15]中未使用 CIE 2° CMFs 进行检验。进一步地,为检验 CIE 推荐各 CMFs 对于不同光谱组成的反射色间的计算性能,本文制作了不同明度、不同色差等级的非彩色样本进行检验研究。

2.2 非彩色异谱反射色实验

2.2.1 照明光源

目视评价实验在暗室进行。选取 Gretag Macbeth Judge II 标准观察箱中的 DAY 光源(与 EXP. I 中的照明光源相同)照明,用 Photo-Research PR655 光谱辐射度计测量光源的光谱功率分布,如图 1 所示。采用手持照度计 UPRtek MK350N 测量得到的光源的照度、色温和显色指数分别为 779 lx、6434 K 和 92.1。

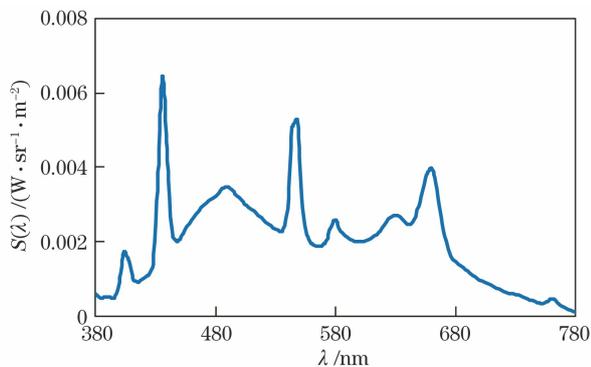


图 1 照明光源的光谱分布

Fig. 1 Spectral distribution of illumination light source

2.2.2 实验样本准备

选取 RAL K5 色卡中^[16]5 个不同明度的非彩

色为目标色,明度由低到高记为 NL1~NL5。围绕每个目标色,使用 Epson Stylus Pro7908 喷墨打印机在半哑光相纸上制作比较色样,要求比较色为非彩色(彩度 $C_{ab}^* < 10.0$),不同明度目标色间的 CIELAB 色差在 0~5 范围内均匀分布。在不同明度等级分别挑选了 16 个比较色样,其与目标色共组成了 80 对异谱样本对。目标色和比较色的大小均为 5 cm×5 cm。图 2 为用 X-Rite e-Xact 分光光度计测量的 85 个样本的光谱反射率 $\rho(\lambda)$ 。将测量得到的 $\rho(\lambda)$ 代入图 1 中的光源光谱分布 $S(\lambda)$,可计算得到目标色的色度值(明度 L^* 和色品指数 a^* 、 b^*),如表 2 所示。实验(以下简称 EXP. III)基本信息如表 3 所示,其中 ΔE_{ab}^* 为样本色差平均值。

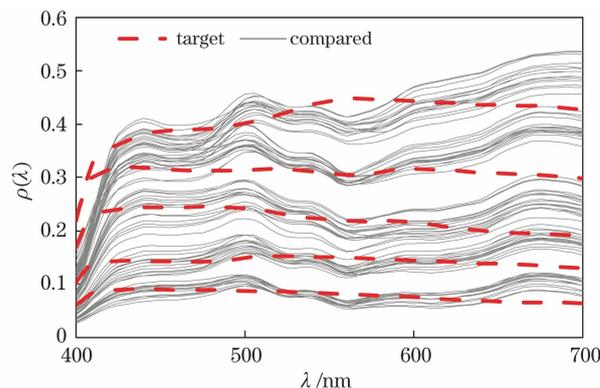


图 2 目标色和比较色的光谱反射率

Fig. 2 Spectral reflectivity of target color and compared color

表 2 不同明度目标色的色度值

Table 2 Colorimetric values of target colors with different lightness

Target color	NL1	NL2	NL3	NL4	NL5
L_{10}^*	34.36	45.38	54.48	62.65	71.61
a_{10}^*	-2.42	-1.82	-2.19	0.15	0.04
b_{10}^*	-2.82	1.14	-3.27	-0.58	5.72
C_{ab}^*	3.72	2.15	3.94	0.60	5.72

表 3 EXP. III 基本信息

Table 3 Detailed information of EXP. III

Light source	Target color	Sample number	CIELAB	ΔE_{ab}^*	Number of observers	Total observations
Fluorescence	5	80	0.54-5.15	2.53	26	52

2.2.3 灰梯尺

使用心理物理实验方法中的灰梯尺法进行标样和比较样的色差比较,灰梯尺与比较样的制作方法相同,由 Epson Stylus Pro7908 喷墨打印机在半哑光相纸上制作完成(图 3)。灰梯尺的目视色差等级(GS)范围为 1.0~8.0,大于本次实验样本间的 CIELAB 色差,且相邻灰梯尺的色差间隔约为 1 个 CIELAB 色差单位, $\Delta L^*/\Delta E_{ab}^* \approx 1.0$ 。对灰梯尺的目视等级 GS(用 L_{GS} 表示)和 CIELAB 色差值进行线性拟合:

$$\Delta E_{ab}^* = 0.8967 \times L_{GS} + 0.3399, \quad (1)$$

得到拟合系数 $R^2 = 0.992$ 。将实验采集到的观察者目视色差等级 GS 代入(1)式,计算得到目视色差 ΔV 。

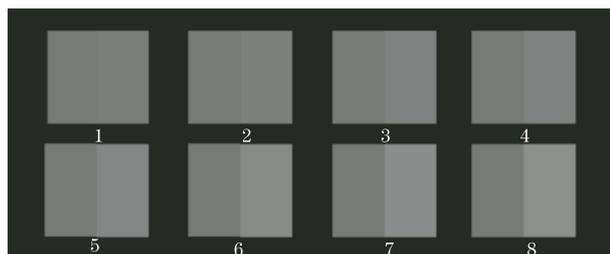


图 3 灰梯尺示意图

Fig. 3 Diagram of gray scale

2.2.4 心理物理实验

观察者开始实验前,实验组织者先随机给出几对样本,让观察者使用灰梯尺法进行预实验。图 4 中,灰梯尺、标样和比较样均放置于观察箱的中央,使用开窗为 5 cm×10 cm 的黑卡纸($L_{10}^* = 22.8$, $a_{10}^* = 0.26$, $b_{10}^* = -0.95$)覆盖在目标色和比较色上进行色差比较。观察距离约为 35 cm,FOV 为 $8.17^\circ \times 16.26^\circ$ 。观察条件为:照明光源垂直于样本照明,观察者在与样本法线 45° 夹角方向观看。观察者需参照灰梯尺间的色差给出比较样和标样的色差(建议观察者给出的目视色差保留一位小数)。正式开始实验前,观察者需适应灰背景约 1 min,将样本对随机呈现给观察者。为避免视觉疲劳,色差评价实验需分组进行,实验每进行 10~15 min,观察者需休息约 5 min。

26 名[女性 21 名,男性 5 名,年龄在 19~24 岁之间,平均年龄(22 ± 1.47)岁]观察者参与了本次实



图 4 灰梯尺法目视评价示意图

Fig. 4 Diagram of visual evaluation with gray scale method

验,均为北京印刷学院学生,具备色彩学基础理论知识,且通过了《新编色觉检查图》色觉测试,色觉正常。观察者对 80 对样本在不同时间段进行了 2 次色差评价,共采集到 4160[5(目标色个数)×16(样本数)×26(观察者人数)×2(实验次数)]个色差判断。

3 数据处理及分析

3.1 观察者精度

对本文 EXP. III 中的观察者精度进行计算,观察者精度包括观察者重复性(intra-observer)和观察者准确性(inter-observer)。观察者重复性是指观察者每次判断与两次判断平均值间的差异;观察者准确性是指每名观察者的判断与所有观察者 52 个判断平均值间的差异。用 STRESS 因子进行观察者精度评价^[17],STRESS 值越小,表示观察者精度越高。计算得到:观察者重复性变化范围为 12.7~24.9,平均值为 17.1;观察者准确性变化范围为 17.1~44.4,平均值为 27.3。该结果与同类实验结果^[18-19]有很好的 consistency,说明本次实验采集的数据可靠、有效。

3.2 CIE CMFs 计算性能检验

本次检验将同时考虑 CIE 推荐的小视场计算条件,将实验测量得到的标样和比较样的光谱反射率 $\rho(\lambda)$ 、照明光源光谱分布 $S(\lambda)$ 代入图 5 所示的 8 个 CIE CMFs 进行样本对间的 CIEDE2000 色差计算。其中,CIE2006 CMFs 考虑了年轻和老年观察者各自的平均年龄(分别为 22 岁和 68 岁),视角

分别代入 2° , 4° 和 10° 。

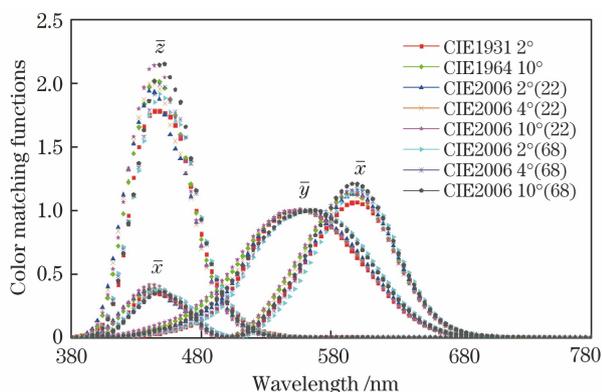


图 5 CIE 推荐的 8 个颜色匹配函数

Fig. 5 CIE recommended eight CMFs

表 4 为基于上述 8 个 CIE CMFs 计算得到的 EXP. I ~ EXP. III 中异谱样本对的 CIEDE2000 色差与观察者目视色差 ΔV 间的 *STRESS* 值(加粗字体表示计算最优值)。*STRESS* 的变化范围为 0~100, *STRESS* 值越小, 表明 CMFs 的计算色差与观

表 4 利用 *STRESS* 值检验 CIE CMFs 计算色差与观察者目视色差间的一致性

Table 4 Consistency between color difference calculated by CIE CMFs and visual color difference of observer in terms of *STRESS* value

Experiment	Group	CIE1931	CIE1964	CIE2006 (22)			CIE2006 (68)		
				2°	4°	10°	2°	4°	10°
EXP. I	Young	63.6	37.0	46.3	32.0	42.9	68.0	65.0	56.9
	Old	31.4	62.6	33.6	54.1	67.7	44.3	33.8	34.3
EXP. II	Young	61.5	19.6	45.3	12.8	23.5	59.0	63.1	51.2
	Old	14.7	66.4	27.6	61.2	67.3	16.7	17.7	20.0
EXP. III	Young	30.5	29.8	26.4	28.1	30.5	32.5	30.2	27.8

表 4 中 8 个 CIE CMFs 计算得到的 EXP. III 的 *STRESS* 值变化范围为 26.4~32.5, 相较于 EXP. I 和 EXP. II 的 *STRESS* 值的变化范围不是很大。这与 EXP. III 样本的制作、选取有一定的关系, EXP. I 和 EXP. II 的样本是用于放大年轻和老年观察者间的颜色分辨差异, 挑选时要求 CIE2006 (20° , 10°) 和 CIE2006 (70° , 10°) 代入计算的目标色和比较色间色差具有相反的变化规律^[13-14]; 而本次实验主要是基于非彩色的异谱样本对, 以在不同明度等级标样和比较样间的 CIELAB 色差在 0~5 范围均匀分布为目标进行挑选。EXP. III 中 $8.17^\circ \times 16.26^\circ$ 实验视场为 CIE 推荐的大视场计算条件, 而表 4 中, CIE2006 (22° , 2°) CMFs 的计算性能最佳, 随着观察视场的增加, CIE2006 (22°) 2° , 4° 和 10° CMFs 的计算性能逐渐降低, 这与 CIE 2006 CMFs 推荐的视场计算条件不符。CIE2006 (68) CMFs 中, 随着观察

观察者的目视色差间一致性越好。

由表 4 可见, EXP. I 和 EXP. II 中 CIE2006 (22° , 4°) 的计算色差与年轻观察者的目视色差一致性最好, CIE1931 的计算色差与老年观察者的目视色差一致性最好。在大视场计算条件下, CIE2006 (22° , 10°) 并没有较好的计算性能, 这与 CIE 推荐的视场计算条件不符。对于老年观察者, 随着年龄的增长, 其在 \bar{x} 和 \bar{z} 通道的光谱响应值会有所降低, 同时 \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} 的峰值波长位置均向长波段偏移, 因此图 5 中 CIE1931 2° 的计算性能优于 CIE2006 (68° , 10°)。CIE2006 (22° , 2°) 得到的针对老年观察者的实验结果较优。这与以往研究中提到的 CIE2006 CMFs 视场变小 (\bar{x} 和 \bar{z} 通道光谱响应值降低) 和年龄增长 (峰值波长位置向长波移动) 具有相近的表现性能结论较一致^[20-21]。随着年龄的增长, 晶状体色素的光学密度会增加; 随着视场角的减小, 黄斑色素的光学密度增加, 以上光学密度的增加均相当于在眼睛中增加了一个“黄化”的过滤器。

视场的增加, CIE2006 (68) 2° , 4° 和 10° CMFs 的计算性能有所提升, 这也与 CIE2006 CMFs 视场变大 (\bar{x} 和 \bar{z} 通道光谱响应增大) 和年龄减小 (峰值波长位置向短波移动) 具有相近的表现性能结论较一致^[20-21]。

总体来说, 对于年轻观察者, CIE2006 (22) CMFs 的计算性能整体上优于 CIE2006 (68) CMFs。这表明 CIE 2006 CMFs 在年龄和视角两个因素的评价中, 针对年轻和老年观察者的计算结果与目视结果较相符, 但在视角的计算性能方面需要进一步优化改进。

3.3 观察者颜色匹配函数分类

进一步地, 利用每名观察者的目视色差 ΔV 与 CIE 推荐的各 CMFs 的计算色差 CIEDE2000 分别进行 *STRESS* 值计算。对于特定观察者, 当由某一 CMFs 计算得到的 *STRESS* 值最小时, 则可将这名观察者的锥细胞光谱响应归类于该 CMFs, 认为其

与该 CMFs 最接近。图 6 为三组实验的观察者分类结果,其与表 4 中的 *STRESS* 值计算结果具有较好的一致性。EXP. I 和 EXP. II 中有 31 名年轻观察者被分类到 CIE2006(22, 4°) CMFs, 23 名老年观察者被分类到 CIE1931 CMFs; EXP. III 中有 32 名观察者被分类到 CIE2006(22, 2°) CMFs。

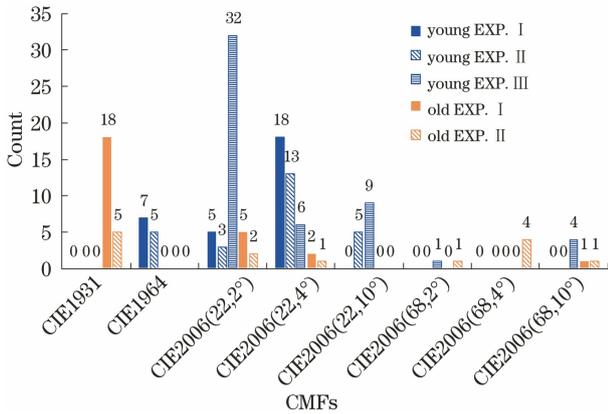


图 6 不同实验的观察者 CMFs 分类结果

Fig. 6 Categorical results of CMFs of observers in different experiments

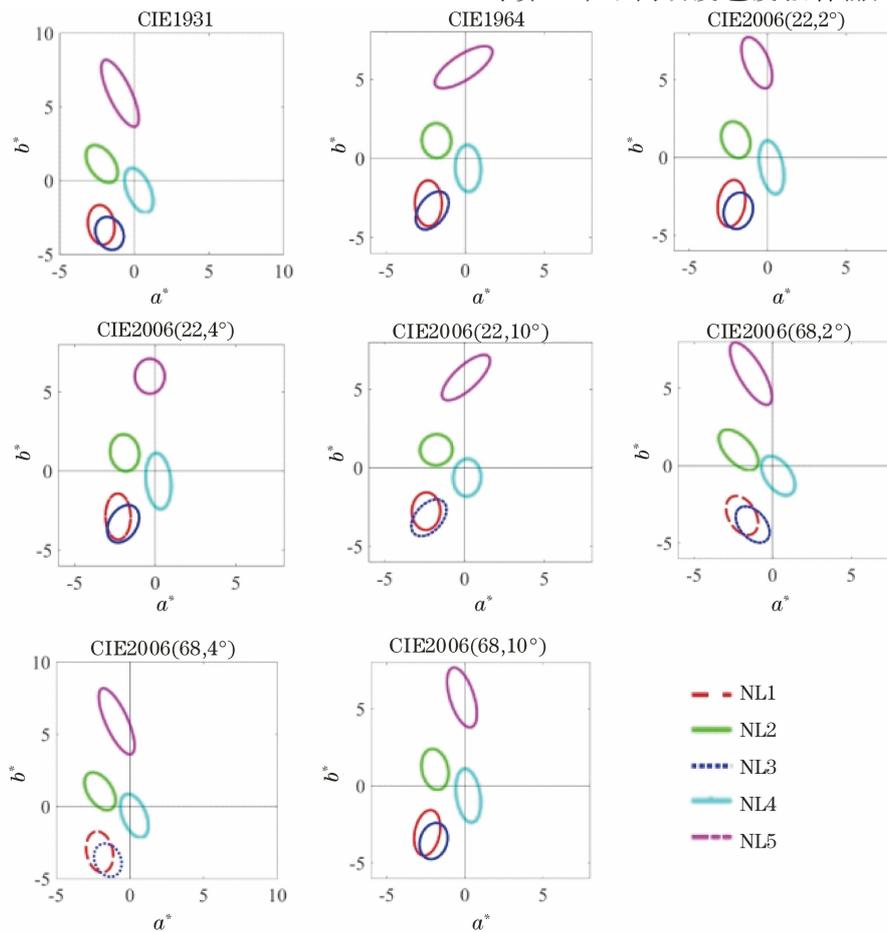


图 7 基于不同 CMFs 的色度椭圆

Fig. 7 Colorimetric ellipses based on different CIE CMFs

3.4 色度椭圆

基于上述 CIE 推荐的 8 个 CMFs,并将实验采集到的目视色差 ΔV 代入(2)式中的色度椭圆方程计算色差 ΔE ,并在 CIELAB 颜色空间拟合色度椭圆。

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

式中: g_{ij} 是椭圆方程的系数, $i=1,2,3, j=1,2,3$; ΔL^* 为颜色空间中标样与比较样的明度差, Δa^* 、 Δb^* 为颜色空间中标样与比较样的色度差。色度椭圆的建立目标为:使得(2)式中的 ΔE 和目视色差 ΔV 间具有最小的 *STRESS* 值。考虑到交叉项在色差计算过程中的权重较小,可将其忽略,优化后的色度椭圆如图 7 所示。

由图 7 可见,使用 CIE CMFs 在不同明度拟合的色度椭圆大小和偏转方向有较大的不同。基于 CIE1964 和 CIE2006(22,10°) 计算得到的椭圆偏转方向较一致,除 CIE2006(22,4°) 外,其他 5 个 CMFs 拟合的色度椭圆偏转方向较一致。基于图 7 中不同 CMFs

计算 5 个不同明度色度拟合椭圆尺寸 $S = \sqrt{\pi AB}$

(其中 A 为长半轴长度, B 为短半轴长度)的平均值,如图 8 所示。可见,CIE2006(22, 4°)和 CIE2006(22, 10°)计算的椭圆尺寸较小。

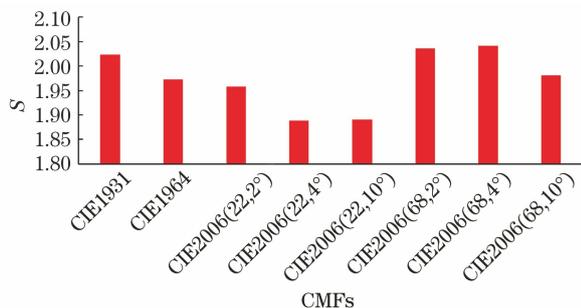


图 8 CIE CMFs 拟合色度椭圆的平均尺寸

Fig. 8 Averaged sizes of colorimetric ellipses fitted by CIE CMFs

进一步地,按照文献[22-24]中的方法,计算图 7 中由各 CIE CMFs 拟合的色度椭圆的椭圆度(局部均匀性) σ_{RMSE} 和椭圆尺寸一致性(全局均匀性) σ_{CV} ,以评价其在 CIELAB 空间的计算均匀性, σ_{RMSE} 和 σ_{CV} 越小,表明该 CMFs 的计算性能越好。

局部均匀性可通过计算椭圆的长短半轴比值(A/B)和圆的半径比值($A_0/B_0=1$)的均方根 σ_{RMSE} 来评价:

$$\sigma_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{A}{B} - 1\right)^2}{N}}, \quad (3)$$

式中: N 为颜色空间测试椭圆的个数, $N=5$ 。

全局均匀性是评价颜色空间不同位置椭圆尺寸间的大小关系,由各椭圆尺寸 $S = \sqrt{\pi AB}$ 间的标准偏差 σ_{CV} 表示:

$$\sigma_{\text{CV}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2}{\bar{S}}}, \quad (4)$$

式中: S_i 为每个椭圆的尺寸; \bar{S} 为颜色空间 5 个椭圆尺寸的平均值。计算结果如表 5 所示。

表 5 基于 CIE 推荐的 CMFs 计算的椭圆局部和全局均匀性

EXP. III	CIE1931	CIE1964	CIE2006 (22)			CIE2006 (68)		
			2°	4°	10°	2°	4°	10°
σ_{RMSE}	1.19	0.94	0.91	0.75	0.82	1.08	1.20	1.06
$\sigma_{\text{CV}} / \%$	22.7	20.7	16.2	16.9	22.9	20.4	22.0	19.4

可见,由 CIE2006(22, 4°)和 CIE2006(22, 2°) CMFs 拟合计算的色度椭圆局部均匀性 σ_{RMSE} 和全

局均匀性 σ_{CV} 最优,均优于 CIE CMFs 在 10° 视场条件下的计算结果。CIE1931 和 CIE2006(68)适用于老年观察者的 CMFs,均未体现出较高的计算性能。由上述检验结果可见,不仅对于前期研究中自发光设备呈现的颜色样本对,对于反射色组成的颜色样本对,CIE2006 CMFs 在计算大视场时的评价性能均需要进一步改进。

4 结 论

对三组具有不同光谱组成的反射色样对 [EXP. I (20 对), EXP. II (18 对), EXP. III (80 对)] 进行实验,并进行目视色差 ΔV 和计算色差 CIEDE2000 的 *STRESS* 值检验。进行色差计算时,分别代入 CIE 推荐的 CIE1931 2°、CIE1964 10°、CIE2006 2°、CIE2006 4°、CIE2006 10° CMFs。结果均表明,对于异谱反射样本对,在大视场条件下现有 CIE2006 10° 均未体现出较好的计算性能,除拟合的色度椭圆尺寸计算外,CIE2006 2° 和 CIE2006 4° CMFs 对年轻观察者的计算性能均优于 CIE2006 10° CMFs; CIE1931 2° CMFs 对老年观察者的计算性能最优,优于现有 CIE2006 CMFs。研究结果表明,对于年轻观察者在在大视场条件下进行颜色刺激间的色差计算时,现有 CIE2006 CMFs 的计算性能需要进一步优化、改进。今后也仍需进一步补充老年观察者的实验数据,进行 CIE2006 CMFs 对年龄计算性能的检验。

参 考 文 献

- [1] CIE. Colorimetry, 4th edition [R]. Vienna: CIE Technical Report, 2018.
- [2] CIE. Fundamental chromaticity diagram with physiological axes-part I[R]. Vienna: CIE Technical Report, 2006: 170-171.
- [3] Wright W D. A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours [J]. Transactions of the Optical Society, 1929, 30(4): 141-164.
- [4] Stiles W S, Burch J M. N. P. L. colour-matching investigation: final report (1958) [J]. Optica Acta: International Journal of Optics, 1959, 6(1): 1-26.
- [5] Speranskaya N I. Determination of spectral color coordinates for twenty-seven normal observers [J]. Optics and Spectroscopy, 1959, 7: 424-428.
- [6] CIE. CIE 170-2: 2015 fundamental chromaticity diagram with physiological axes-part 2: spectral luminous efficiency functions and chromaticity diagrams [J]. Color Research & Application, 2016, 41(2): 216.

- [7] Hu Y, Wei M, Luo M R. Observer metamerism to display white point using different primary sets [J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 20305-20323.
- [8] Wu J L, Wei M C, Fu Y, et al. Color mismatch and observer metamerism between conventional liquid crystal displays and organic light emitting diode displays [J]. *Optics Express*, 2021, 29(8): 12292-12306.
- [9] Huang M, Wang Y, Li Y, et al. Performances of different color matching functions with metamerism samples by LED primary colors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(16): 1633001.
黄敏, 王宇, 李钰, 等. 用 LED 原色的同色异谱样本检验不同颜色匹配函数的表现 [J]. *光学学报*, 2021, 41(16): 1633001.
- [10] Li J, Hanselaer P, Smet K A G. The impact of matching primary peak wavelength on color matching accuracy and observer variability [J]. *Color and Imaging Conference*, 2019, 2019(1): 220-224.
- [11] Li J Y, Hanselaer P, Smet K A G. Impact of color-matching primaries on observer matching: part I—accuracy [J]. *LEUKOS*, 2021: 1-23.
- [12] Li J Y, Hanselaer P, Smet K A G. Impact of color matching primaries on observer matching: part II—observer variability [J]. *LEUKOS*, 2021: 1-18.
- [13] He R L, Huang M, Guo C L, et al. Color-difference discrimination between young and old observers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 033301.
何瑞丽, 黄敏, 郭春丽, 等. 年轻和老年观察者的色差分辨差异研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 033301.
- [14] Xi Y H, Huang M, He R L, et al. Testing cone-cell response of young and old observers by using nearly metameric samples [M] // Zhao P F, Ouyang Y, Xu M, et al. *Advances in graphic communication, printing and packaging. Lecture notes in electrical engineering*. Singapore: Springer, 2019, 543: 80-86.
- [15] Huang M, Xi Y H, Pan J, et al. Colorimetric observer categories for young and aged using paired-comparison experiments [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 219473-219482.
- [16] The new 2021 RAL K5 color card—fan and high lights edition. [2021-06-06]. <https://www.qtccolor.com/Product/RAL-K5.aspx>.
- [17] CIE. Recommended method for evaluating the performance of colour-difference formulae [R]. Vienna: CIE Technical Report, 2016.
- [18] Kulappurath S K, Shamey R. The effect of luminance on the perception of small color differences [J]. *Color Research & Application*, 2021, 46(5): 929-942.
- [19] Huang M, Liu H X, Cui G H, et al. Testing uniform colour spaces and colour-difference formulae using printed samples [J]. *Color Research & Application*, 2012, 37(5): 326-335.
- [20] Huang M, He R L, Shi C J, et al. Test the performances of different color matching functions with the method of comparison [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(7): 2241-2249.
黄敏, 何瑞丽, 史春洁, 等. 比较法测试不同颜色匹配函数的性能 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(7): 2241-2249.
- [21] Asano Y, Fairchild M D, Blondé L. Observer variability experiment using a four-primary display and its relationship with physiological factors [C] // 21st Color and Imaging Conference, Society for Imaging Science and Technology, November 4-8, 2013, Albuquerque, New Mexico, USA. Springfield: The Society for Imaging Science and Technology, 2013 (1): 171-176.
- [22] Huang M, Liu H X, Cui G H, et al. Testing uniform color spaces using printed samples with different gloss and color difference magnitudes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0733002.
黄敏, 刘浩学, 崔桂华, 等. 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 [J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0733002.
- [23] Zhao B Y, Xu Q, Luo M R. Color difference evaluation for wide-color-gamut displays [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2020, 37(8): 1257-1265.
- [24] Xu Q, Zhao B, Cui G, et al. Testing uniform colour spaces using colour differences of a wide colour gamut [J]. *Optics Express*, 2021, 29(5): 7778-7793.