

基于 CIE1931 颜色匹配函数的 LED 显示设备颜色计算精度研究

高心愿, 黄敏*, 王宇, 李钰, 李修, 闫子墨, 徐艳芳, 刘瑜

北京印刷学院印刷与包装工程学院, 北京 102600

摘要 为检验现有色度管理系统中基于 CIE1931 2° 颜色匹配函数(CMFs)的颜色计算和校正精度:以 3 通道(636 nm, 524 nm, 452 nm)LED 发光面板为目标设备,显示 CIE 推荐的 5 个颜色(灰、红、黄、绿、蓝);以 6 通道(672 nm, 636 nm, 524 nm, 508 nm, 472 nm, 452 nm)LED 发光面板为比较设备,产生 8 种原色光谱组合。基于 CIE1931 2° CMFs 进行目标色和比较色的计算、调节,使其具有相近的 XYZ 色度值,共产生 40 对颜色。组织了 40 名色觉正常观察者开展不同观察视角(2.9°和 8.6°)下的色差评价实验,共采集到 6400 组目视色差数据。结果表明:在比较色和目标色为 L1 同谱组合和 L2 (仅改变红色通道)组合时,CIE1931 2° CMFs 可满足计算要求;在其他原色组合中,CIE1931 2° CMFs 的计算校正并不适用;且随着观察视角的增加,目视色差差异不显著。

关键词 视觉光学; 视觉色彩; 原色光谱组合; 颜色匹配函数; 观察视角; 色差评价

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2233001

Color Calculation Accuracy of LED Display Based on CIE1931 Color Matching Functions

Gao Xinyuan, Huang Min*, Wang Yu, Li Yu, Li Xiu, Yan Zimo, Xu Yanfang, Liu Yu

School of Printing and Packaging Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China

Abstract In order to check the accuracy of color calculation and correction based on CIE1931 2° color matching functions (CMFs) in the existing chromaticity management system, this paper selected an LED panel with three channels (636 nm, 524 nm, and 452 nm) as the target device to display five colors (gray, red, yellow, green, and blue) recommended by CIE and took an LED panel with six channels (672 nm, 636 nm, 524 nm, 508 nm, 472 nm, and 452 nm) for comparison. In total, there were eight primary sets. Furthermore, the paper calculated and adjusted the target color and compared color by CIE1931 2° CMFs to make them have similar XYZ chromaticity values, and forty color samples were obtained. In addition, forty observers with normal color vision were organized for color difference evaluation under fields of view (FOV) of 2.9° and 8.6°, respectively, and then 6400 groups of visual color difference data were collected in the experiments. The results indicate that when the compared color and the reference color stimuli are L1 (the same as the primary set used in the reference panel) and L2 primary sets (with the shift of red primary), CIE1931 2° CMFs are applicable for calculation while in other sets, they work poorly. As the FOV increases, the visual color difference from different FOVs is insignificant.

Key words visual optics; visual color; primary set; color matching function; field of view; color difference evaluation

1 引言

随着数字显示技术的发展,呈色设备逐渐趋向于更大色域范围的颜色再现。为实现 Adobe RGB、DCI-

P3 和 Rec. 2020 等颜色空间的色域再现,出现了如液晶、等离子、阴极射线管、数字光处理和硅晶体反射显示等多种新型呈色设备。不同设备在呈现或输出同一图像时,需进行色彩管理,实现“所见即所得

收稿日期: 2022-04-11; 修回日期: 2022-05-06; 录用日期: 2022-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(61675029)、北京印刷学院轻工技术与工程学科建设(21090122016)、北京印刷学院校级研发设计(BIGCEc202003, BIGCEc202102)

通信作者: *huangmin@bigc.edu.cn

(WYSIWYG)”。国际照明委员会(CIE)推荐的CIE1931^[1-2]颜色匹配函数(CMFs)是目前色彩校正和转换过程中使用的标准色度系统。当代影视、网络移动终端体系以及多光谱图像识别等对色彩准确性要求严格的行业,均需依靠CIE推荐使用的CIE1931 2° CMFs进行颜色校正。

随着宽色域、窄带显示设备的普及,在颜色校正过程中观察者同色异谱现象日益明显^[3-6]。2021年,Wu等^[4,7]基于1个目标有机LED(OLED)显示器和4个比较显示器(1个LCD和3个OLED),组织了50名观察者在4.77°视角(FOV)下进行了6个颜色的匹配实验。用CIE1931 2° CMFs计算、校正LCD和OLED显示屏不同亮度下的白点,发现OLED呈现的颜色较LCD呈现的颜色偏绿,与目视效果不符。进一步地,采用CIE1964 10° CMFs^[8-9]进行计算、校正,OLED呈现颜色偏绿的现象得到改善,与目视结果较为一致。Shi等^[10]基于1个目标LCD显示器和4个比较显示器(2个LCD和2个OLED),组织了20名观察者在4°视角下进行了18种颜色的匹配实验,发现使用CIE1931 2° CMFs代入计算校正,两个OLED匹配设备与目标设备间产生了较明显的观察者同色异谱现象。

目前较多研究基于颜色匹配实验开展^[3-4,7,10-11],观察视角变化范围为3°~6°,对现有CIE1931 2°、CIE1964 10°、CIE2006 2°和CIE2006 10°^[12-13]CMFs的检验表明,CIE1931 2° CMFs与人眼目视结果的一致性最差。不同显示设备间存在较严重的观察者同色异谱现象,颜色匹配实验结果受显示设备原色光谱的影响较大。现有彩色输入/输出设备的色彩管理体系都

是基于CIE标准照明体D50和CIE1931 2° CMFs进行的颜色色度计算转换,而目前对检验现有色度色彩管理系统(D50/2°)的计算缺陷及这种缺陷的影响因素研究较少。本文以3通道LED发光面板为目标设备,再现CIE推荐的5个颜色(灰、红、黄、绿、蓝),选用6通道LED发光面板分别与目标设备组成8种不同的原色光谱组合,包括1组同谱和7组异谱的光谱组合。在实验中将比较设备与目标设备白场的色温设定为5000 K(D50的标准色温),使用CIE1931 2° CMFs进行校正,制作了40对样本色(8种原色组合×5个颜色刺激)。组织40名年轻观察者在不同视角(2.9°和8.6°)下基于分类法开展样本对间的目视色差评价实验,研究、检验现有色度色彩管理系统中D50/2°(即D50标准照明体,CIE1931 2° CMFs)的颜色校正、转换精度。

2 实验设计

2.1 呈色设备

实验分别选取常州千明智能照明科技有限公司生产的三通道(R1G2B1)和六通道(R1R2G1G2B1B2)LED发光面板作为目标设备和比较设备。图1为使用PR-655(美国Photo Research公司产品)光谱辐射度计测量得到6个原色通道的光谱功率分布(SPDs),分别包括两组红色(R1和R2)、两组绿色(G1和G2)和两组蓝色(B1和B2)通道。其中,目标设备的R1G2B1三原色与本课题组前期开展的颜色匹配实验^[14]所用的三原色相同,且与Stiles和Burch^[8]使用的原色(645.2 nm、526.3 nm和444.4 nm)接近,实验表明该光谱组合可产生较小的观察者同色异谱^[3,14-15]。

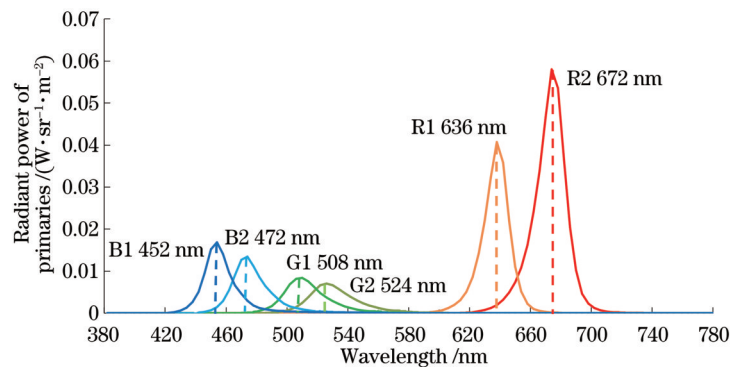


图1 Photo Research PR-655光谱仪测量的原色SPDs

Fig. 1 SPDs of primaries measured using Photo Research PR-655 spectroradiometer

LED发光面板的呈色区域尺寸为5 cm×5 cm。本课题组在前期颜色匹配实验^[14]中对LED发光面板进行了D50白场再现的时间稳定性和空间均匀性测试,基于采集到的光谱能量,代入CIE1964 10° CMFs进行计算,得到LED发光面板的空间均匀性为 $0.0013\Delta(u'_{10}v'_{10})$ [基于CIE1964 10° CMFs,以CIE1976 $u'v'$ 色度参数计算得到的样品间在 $u'v'$ 色品图上的距离为 $\Delta(u'_{10},v'_{10})$],时间稳定性小于 $0.0011\Delta(u'_{10}v'_{10})$,均在1个恰可察觉色差阈值范围($\approx 0.004 u'v'$)内^[16],表明

本次实验选用的LED发光面板的均匀性和稳定性符合要求。

2.2 颜色刺激

改变匹配设备的RGB原色单通道、双通道和三通道,共产生了8种原色组合(L1~L8),如表1所示。图2为不同原色光谱组合在CIE1931 $u'v'$ 色品图中的色域分布,可见CIE推荐的5个颜色均在显示设备的色域范围内,且选择不同的蓝原色(B1和B2)对色域范围的影响较大,这是因为在色度图上,蓝色区域的宽容量较小。

表 1 原色光谱组合
Table 1 Summary of the primary sets

Primary sets	Shifted primaries	Correlated color temperature (CIE 1931 2°)	Color gamut area	
			CIE1931 xy chromaticity diagram	CIE1976 $u'v'$ chromaticity diagram
L1 (R1-G2-B1)	—	5002	0.1889	0.1087
L2 (R2-G2-B1)	R2	4996	0.1969	0.1204
L3 (R1-G1-B1)	G1	5003	0.1813	0.1109
L4 (R1-G2-B2)	B2	4997	0.1773	0.0789
L5 (R1-G1-B2)	G1 and B2	5003	0.1648	0.0780
L6 (R2-G2-B2)	R2 and B2	4994	0.1849	0.0874
L7 (R2-G1-B1)	R2 and G1	5001	0.1874	0.1218
L8 (R2-G1-B2)	R2, G1, and B2	5006	0.1705	0.0857

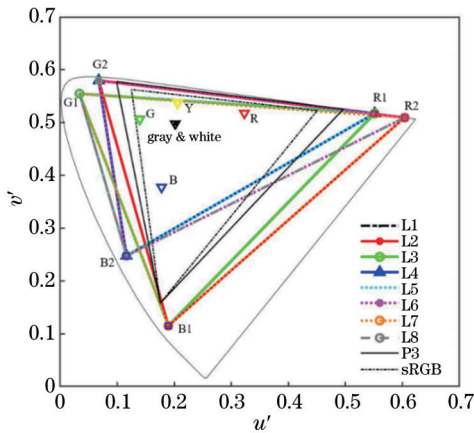


图 2 CIE1931 $u'v'$ 色度图中 8 个原色组合色域
Fig. 2 Color gamut enclosed by the eight primary sets in the CIE1931 $u'v'$ chromaticity diagram

在目标显示设备上再现 CIE 推荐的 5 个颜色(灰、红、黄、绿、蓝),实验组织者调节比较设备上的 RGB 比例产生不同的颜色刺激,使用 PR-655 光谱辐射度计测量目标色和比较色的光谱分布,代入 CIE1931 2° CMFs 计算,使得目标色和比较色的 XYZ, $u'v'$ 色度值尽可能接近,计算得到 40 对颜色的 CIELAB 平均色差

为 0.66,变化范围为 0.15~1.48; $\Delta u'v'$ 值的变化范围为 0.0001~0.0019,平均值为 0.009。基于 8 种原色光谱组合,共制作了 40 个样本对(8 种原色组合 \times 5 个颜色刺激)。

2.3 观察者

40 名(13 男和 27 女)年龄分布在 19~25 岁(平均年龄为 20.3 岁)的志愿观察者参加了本次色差评价实验,所有观察者均为北京印刷学院的学生,参加过类似心理物理实验。观察者实验前均进行了 Ishihara 色觉测试和 Munsell-100 色棋测试,全部色觉正常且具有良好的颜色分辨能力。

2.4 实验过程

实验在暗室进行,通过改变 LED 发光面板的呈色范围和观察距离产生不同的观察视角。实验过程中,两个 LED 发光面板并排放置,目标色和比较色间的距离为 5 cm,开窗为 4.5 cm \times 4.5 cm 或 3.5 cm \times 3.5 cm 大小的黑色卡纸分别覆盖在 LED 发光面板上。观察者正坐于屏幕前方,待观察者将托腮支架的观察高度调整好后,观察者下颏固定在托腮支架上,开展实验。目视方向与两个颜色刺激间的中心对齐,观察距离分别为 30 cm 或 70 cm,使得单个颜色刺激对人眼约形成 8.6° \times 8.6° 和 2.9° \times 2.9° 两组不同的观察视角,图 3 所

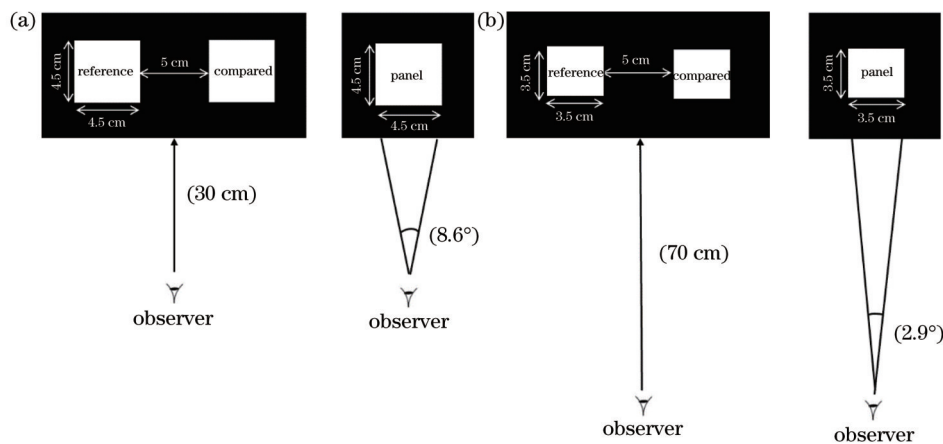


图 3 实验装置示意图。(a) FOV 为 8.6°; (b) FOV 为 2.9°
Fig. 3 Experimental setup diagrams. (a) FOV is 8.6°; (b) FOV is 2.9°

示为观察视角的实验示意图。

正式实验前,观察者需通过完成一次预实验以熟悉实验要求,实验指令如表 2 所示。观察者在进行色差评价时,40 对色样(不同原色组合和不同颜色刺激)随机呈现。当切换样本对时,需用黑色挡板遮挡眼睛,待观察者完成 3~5 s 的色适应后,下一对色样随机呈

现在目标设备和比较设备上,实验继续进行。观察者完成每组实验(40 对样本的色差评价)约用时 12~15 min。为评价观察者的重复性,每名观察者在不同时间段分别在两种视角下进行了重复实验。共采集到 6400 组目视色差数据(40 名观察者×2 次重复实验×8 种原色组合×5 个颜色刺激×2 个视角)。

表 2 目视色差评价实验的评分规则

Table 2 Scoring rules for visual color-difference evaluation experiments

Color perception	Category	Visual color difference
No difference	0	0-1
Just perceptible difference	1	1-2
Weak difference, which is ensured to exist	2	2-3
A little obvious difference, which is acceptable	3	3-4
Obvious difference, which is not acceptable	4	4-5

3 数据分析

将所有观察者对每个样本的 80 个目视色差判断取平均值,作为每对样本的最终目视色差 ΔV ,进行后续数据分析。

3.1 观察者精度

观察者精度分为观察者重复性(intra-observer)和观察者准确性(inter-observer)。观察者重复性是指特定观察者的色差评价结果的稳定性,是指观察者的每次色差判断与 n 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判断的平均色差间的差异,用标准化残差平方和(STRESS)值评价^[17]:

$$V_{\text{STRESS}} = 100 \sqrt{\frac{\sum(\Delta V_i - f\Delta E_i)^2}{\sum \Delta V_i^2}}, \quad (1)$$

式中: ΔV_i 为每名观察者对每对样本的目视色差判断结果; ΔE_i 为使用不同 CMF 得到的每对样本对间的计算色差; $f = \frac{\sum \Delta E_i \Delta V_i}{\sum \Delta E_i^2}$; $i=1, 2, \dots, 40$,代表样本数量。

STRESS 值的范围为 0~100。STRESS 评价方法是用来计算两组数间的线性相关性,STRESS 的值越小表示两组数据间的相关性越好,反之则越差。计算得到基于不同视角下的观察者精度如表 3 所示。

由表 3 可见,观察者在 8.6°视角实验中的目视色差评价精度均优于 2.9°视角实验中的观察者精度。这

表 3 色差评价实验中的观察者精度

Table 3 Intra-observer and inter-observer variations in color difference evaluation experiments

Parameter	Intra-observer		Inter-observer	
	8.6	2.9	8.6	2.9
FOV / (°)	8.6	2.9	8.6	2.9
Minimum	9.5	12.2	12.6	18.7
Maximum	24.2	34.6	51.2	59.6
Mean	16.3	22.6	28.3	36.9

表明不同观察者在 8.6°视角下较易对样本对进行稳定和准确的色差评价,本次实验观察者精度与同类心理物理实验的目视评价实验精度^[18-19]结果均在可接受范围之内,说明实验采集到的目视色差数据合理、可靠。

3.2 目视色差影响分析

3.2.1 观察视角的影响

将观察者在不同观察视角(FOV 为 8.6°和 2.9°)下对 40 对样本评价得到的两组目视色差 ΔV 绘制成折线图,研究不同观察视角对目视色差评价结果的影响,如图 4 所示。其中编号为 1~8、9~16、17~24、25~32、33~40 的样本分别表示灰、红、黄、绿、蓝色样本对在 L1~L8 组合下的色差评价结果。

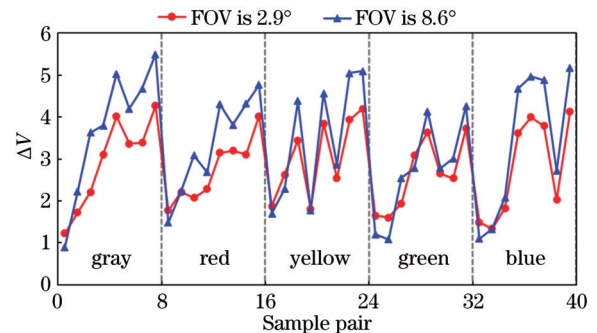


图 4 8.6°和 2.9°视角下采集到的 40 对样本目视色差折线分布
Fig. 4 Distribution of visual color difference from 40 sample pairs for FOVs of 8.6° and 2.9°

由图 4 可见,在 8.6°和 2.9°两种视角下采集到的目视色差变化趋势较为一致,且基于 2.9°视角实验采集到的目视色差(平均值为 2.7)小于 8.6°视角实验采集到的目视色差(平均值为 3.1)。观察者在 2.9°视角实验中的 ΔV 相对集中,变化范围为 1.23~3.99;在 8.6°视角实验中 ΔV 的变化范围为 0.85~4.83。进一步地,将观察者在不同视角下对 40 对样本的目视色差绘制成散点图,进行线性拟合,如图 5 所示。

由图 5 的线性拟合结果也可以看出:随着观察视角的增大,观察者对颜色色差感知更为明显。这说明

在大视角的观察条件下,观察者较易分辨出样本对间的色差,且色差分辨能力会增强。事实上,这与视网膜上的锥体细胞的分布有关,中央凹黄斑区(3°~4°视角)集中了大量的锥细胞,人眼在中央凹能感受到各种颜色,随着观察视角的增加,物体成像区域超过中央凹,杆体细胞也会参与作用,降低颜色的饱和度。

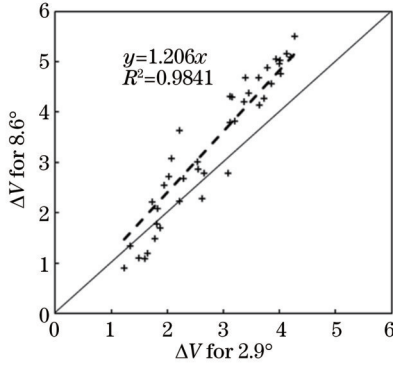


图 5 8.6°和2.9°视角下的40对样本目视色差散点分布和线性拟合
Fig. 5 Visual color difference scattering dot distribution and linear fitting of 40 pair samples for FOVs of 8.6° and 2.9°

为研究本次实验观察视角改变对观察者目视色差感知差异的影响程度,对两组目视色差数据进行 F 检验,在 Excel 的数据分析工具里选用单因素方差分析,分别选择置信度 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$,此时因素自由度为 1,误差项自由度为 78,即 40(每种观察角度下的样本数) \times 2(两种观察角度) - 因素数 2,可计算得到相应的 F 值和 F_{crit} (检验临界值 F_c) 值。当 $F \leq F_c$ ($\alpha=0.05$) 时,表明两组数之间的差异不显著;当 F_c ($\alpha=0.05$) $< F < F_c$ ($\alpha=0.01$) 时,表明两组数之间的差异显著;当 $F \geq F_c$ ($\alpha=0.01$) 时,表明两组数之间的差异极显著。计算得到 $F=3.13 < F_c$ ($\alpha=0.05$) = 3.96,表明基于不同原色光谱组合呈现的颜色,在使用现有 CIE1931 2° CMFs 校正的情况下,8.6°和2.9°两种视角下的目视色差差异不显著。

3.2.2 原色光谱组合的影响

将在 L1~L8 原色光谱组合下观察者对 5 种颜色刺激的目视色差 ΔV 取平均值,研究不同原色光谱组合对颜色目视色差评价结果的影响,结果如图 6 所示。

由图 6 可见,观察者在 L1 同谱组合的目视色差 ΔV 最小,其次是 L2 组合(改变 R 通道),且在这两种组合下,2.9°视角下的目视色差略高于 8.6°视角下的结果。这与之前的色差评价实验结果较为一致^[20]:在涉及微小色差的评价中,如本次实验中由 L1 同谱组合、L2 异谱组合呈现的样本间的色差较小,观察者较难进行色差判断,在评价过程中更倾向于避免给出接近零的目视色差 ΔV ,因此往往会高估不同样本对间的色差。图 6 中,观察者在 L5(G+B 双通道改变)和 L8(R+G+B 三通道改变)组合的 ΔV 最大,该结果与本课题组前期颜色匹配实验^[14]的结果一致,当 R 通道改变时,显示设备呈现的异谱样本对目视色差影响不大,

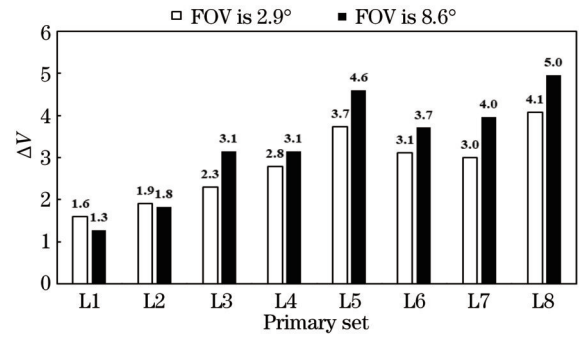


图 6 不同原色组合下的观察者目视色差比较
Fig. 6 Averaged visual color differences of observers in different primary sets

而 G 通道和 B 通道改变的影响较大,这与显示设备的原色光谱分布、人眼不同视锥细胞的光谱响应分布、色度图中蓝色区域的宽容量均有一定的关系。这说明基于现有色彩管理系统,以 CIE1931 2° CMFs 进行计算校正,在 L1 同谱和 L2 异谱组合(仅改变 R 通道)下可基本满足计算精度要求,人眼目视色差感知不明显;而在其他原色组合,特别是在 G+B 双通道和 R+G+B 三通道改变时,对于基于不同显示设备呈现的样本对,这种颜色校正并不适用,会引起较大的视觉色差感知。

为研究显示设备间原色通道改变对观察者目视色差感知差异的影响程度,以 L1 组合为参照,用 F 检验的方法计算 L2~L8 组合下采集到的目视色差与 L1 组合目视色差间的差异,在置信度 α 为 0.05 和 0.01、因素自由度为 1、误差项自由度为 8[5(每种原色组合下的颜色刺激数) \times 2(两种原色光谱组合) - 2(因素数)] 时,结果如表 4 所示,其中 F_c ($\alpha=0.05$) = 5.32, F_c ($\alpha=0.01$) = 11.26。

表 4 F 检验计算的不同原色组合对目视色差的影响
Table 4 F test of influences of different primary sets on visual color difference

FOV / (°)	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
8.6	2.86	17.08	15.26	266.13	30.95	27.66	234.70
2.9	1.34	4.87	11.85	116.95	34.48	15.83	273.64

由表 4 可见:在 8.6° 视角下,除 L2 组合(R 通道改变)外,其他原色组合下的目视色差与 L1 组合均有极显著的差异;在 2.9° 视角下,L4~L8 组合下的目视色差与 L1 组合有极显著的差异, F 值均大于 F_c ($\alpha=0.01$) = 11.26。上述结果进一步说明,在 8.6° 视角时,观察者较易分辨异谱样本间的色差;而在 2.9° 视角,仅在双通道改变时,观察者的目视色差感知才会较同谱组合间的色差感知差异显著。这说明在大视角下由于更多的锥体细胞参与感光感色,人眼对颜色的分辨能力会有所提升。

3.2.3 颜色刺激的影响

在两种观察视角下,对 L1~L8 原色光谱组合下所

有观察者对每种颜色刺激的目视色差 ΔV 取均值,研究不同颜色刺激对观察者目视色差评价结果的影响,如表5所示。

表5 实验中5个颜色的目视色差比较

FOV / (°)	Gray	Red	Yellow	Green	Blue	Mean
8.6	3.7	3.5	3.4	2.7	3.3	3.3
2.9	2.9	2.7	3.0	2.6	2.8	2.8

由表5可见,不同颜色间的目视色差差异较小, F 检验表明,不同颜色间的目视色差差异均不显著,在置信度 α 为0.05、因素自由度为1、误差项自由度为14[8(每种颜色刺激的原色组合数) \times 2(两种颜色)-2(因素数)]时,计算得到的 F 值均小于 $F_c(\alpha=0.05)=4.60$ 。这也可由图4中40对样本的色差分布折线图看出,观察者对不同组合、不同颜色刺激的色差评价趋势较为一致。当不同颜色的样本对由CIE1931 2° CMFs计算校正后,观察者在两个视角下对绿色的目视色差均最小(ΔV 小于3.0),且在两个视角下的 ΔV 近似相等,属于表2中“有微弱色差感觉但确定存在的”色差感知;观察者在8.6°视角下对灰色的目视色差最大,且在8.6°视角下对灰色的目视色差较其他颜色大,说明观察者对不同原色光谱组合呈现的灰色色差分辨能力较强,对绿色色差的分辨能力相对较弱,这主要是由于人眼对绿色的颜色宽容量较大。基于现有色度色彩管理系统,使用CIE1931 2° CMFs进行计算,在完成40个样本对的计算、校正的情况下,观察者对绿色的目视色差较小,但其对灰色的校正效果并不好,观察者目视色差感知较为明显。

4 结 论

为对现有色度管理系统中D50/2°(即D50标准照明体,CIE1931 2° CMFs)计算条件下不同显示设备间颜色再现的计算精度进行比较、分析,进而研究不同因素(原色光谱组合、观察视角和颜色刺激)对颜色计算精度的影响程度,本文选取两个LED发光面板,基于CIE推荐的5个颜色(灰、红、黄、绿、蓝),制作了5对同谱和35对异谱色样对;使用CIE1931 2° CMFs计算得到40对颜色间的CIELAB平均色差为0.66,变化范围为0.15~1.48,属于微小色差。组织了40名观察者在8.6°和2.9°观察视角下分别对40对样本开展了目视色差评价实验,进行不同观察条件下的目视色差影响分析,结果表明:

1) 观察者在8.6°和2.9°视角下的色差评价结果差异不显著,两种视角下的变化趋势一致;在大视角下观察者之间能够更准确和稳定地分辨不同样本对间的色差,说明随着视角的增加(10°视角以内),由于更多的视细胞参与感光感色,人眼对色差的分辨能力增强。

2) 除L2组合(仅改变R通道)下的目视色差与L1同谱组合相近, F 检验差异不显著外,其他组合下的目

视色差与L1组合均具有显著差异,特别是L5(改变G+B通道)和L8(改变R+G+B通道)组合下的目视色差与L1组合的差异极显著。L1组合的原色光谱与现有CIE推荐的颜色匹配函数建立时使用的原色光谱峰值最为接近,这也是L1下差异不明显的原因。人眼视网膜上的蓝色锥体细胞数量较少,锥细胞的光谱响应是其中的重要影响因素,在RGB原色通道间峰值波长发生变化时,B通道的峰值波长位置改变影响大于其他两个通道,参与计算时会引起较大的色差,且人眼对蓝色的变化在色品图上的颜色宽容量也是较小的。

3) 观察者对CIE推荐5个颜色(灰、红、黄、绿、蓝)的目视色差感知差异不显著。总体来说,观察者对绿色的分辨能力较弱,对灰色的分辨能力较强,这与人眼对不同颜色的宽容量有关。

在现有色彩管理系统(即D50标准照明体,CIE1931 2° CMFs)完成校正的情况下,具有不同原色光谱组合的显示设备间的颜色色差仍明显存在,现有CIE1931 2° CMFs对于LED呈色设备间的颜色校正存在明显的计算缺陷,这是在颜色管理系统、彩色输入/输出设备特性化等实际应用领域应该加以考虑的因素。今后需要针对不同原色呈色设备开展相应的心理物理实验,更全面深入地研究适用于光谱色度色彩管理系统的颜色匹配函数,并加强工程应用研究。

参 考 文 献

- [1] Guild J. The colorimetric properties of the spectrum[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A: Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, 1932, 230: 149-187.
- [2] CIE. CIE 015: 2018 colorimetry, 4th edition[R]. Vienna: International Commission on Illumination (CIE), 2018.
- [3] Li J Y, Hanselaer P, Smet K A G. Impact of color-matching primaries on observer matching: part I: accuracy [J]. LEUKOS, 2022, 18(2): 104-126.
- [4] 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.
- [5] Asano Y, Fairchild M D, Blondé L, et al. Color matching experiment for highlighting interobserver variability[J]. Color Research & Application, 2016, 41(5): 530-539.
- [6] Long D L, Fairchild M D. Modeling observer variability and metamerism failure in electronic color displays[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2014, 58(3): 030402.
- [7] 魏敏晨, 吴佳露. CIE颜色匹配函数对LCD和OLED显示屏校准的影响[J]. 数字印刷, 2021(1): 77-80. Wei M C, Wu J L. Effect of CIE color matching functions on LCD and OLED displays[J]. Digital Printing, 2021(1): 77-80.
- [8] 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.

- [9] Speranskaya N I. Determination of spectral color coordinates for twenty-seven normal observers[J]. *Optics and Spectroscopy*, 1959, 7: 424-428.
- [10] Shi K Y, Luo M R. Methods to improve colour mismatch between displays[C]//Color and Imaging Conference, 29th Color and Imaging Conference Final Program and Proceedings, November 1, 2021, London. Springfield: Society for Imaging Science and Technology, 2021, 29: 37-41.
- [11] 郭春丽, 黄敏, 习永惠, 等. LED 原色光谱对颜色匹配精度的影响分析[J]. *光学学报*, 2020, 40(16): 1633001.
Guo C L, Huang M, Xi Y H, et al. Influence of LED primary colors on color matching accuracy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(16): 1633001.
- [12] CIE. CIE 170-1: 2006 fundamental chromaticity diagram with physiological axes: part I[R]. Vienna: International Commission on Illumination (CIE), 2006.
- [13] 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.
- [14] Huang M, Li Y, Wang Y, et al. Effect of primary peak wavelength on color matching and color matching function performance[J]. *Optics Express*, 2021, 29(24): 40447-40461.
- [15] Hu Y, Wei M C, Luo M R. Observer metamerism to display white point using different primary sets[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 20305-20323.
- [16] Wyszecki G W, Stiles W S. Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae[M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1982.
- [17] Kirchner E, Dekker N. Performance measures of color-difference equations: correlation coefficient versus standardized residual sum of squares[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2011, 28(9): 1841-1848.
- [18] Liu H X, Huang M, Cui G H, et al. Color-difference evaluation for digital images using a categorical judgment method[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2013, 30(4): 616-626.
- [19] Xin J H, Lam C C, Luo M R. Investigation of parametric effects using medium colour-difference pairs [J]. *Color Research & Application*, 2001, 26(5): 376-383.
- [20] Huang M, Cui G H, Melgosa M, et al. Power functions improving the performance of color-difference formulas [J]. *Optics Express*, 2015, 23(1): 597-610.