

激光与光电子学进展

基于色貌模型 CIECAM02 和 CIECAM16 的 观察者色觉差异研究

史春洁*, 朱斐

浙江越秀外国语学院网络传播学院, 浙江 绍兴 312000

摘要 为研究现有 CIECAM02 和 CIECAM16 色貌模型对个体观察者颜色分辨的计算性能, 选用了 5 个光谱功率分布不同的照明光源和 GretagMacbeth ColorChecker 标准色卡的 24 个颜色, 代入 208 套个体观察者颜色匹配函数, 量化计算不同观察者的色觉差异。两个色貌模型中, 对于所有选用的照明光源和颜色中心, 个体观察者与标准观察者 CIE1964 的 CIECAM-UCS 色差平均值相同, 均为 1.29。同时, 两个色貌模型中, 观察者间离均色差表现较为一致, 在白光 LED 光源下观察者间差异性相对较大, 且在蓝色中心处获得最大值, 为 2.49(2.32), 表明在该观察条件下, 不同观察者间颜色感知偏差较大。研究结果可为色貌模型的修正提供基础数据和计算依据。

关键词 视觉光学; CIECAM02; CIECAM16; 颜色匹配函数; 色觉差异

中图分类号 O432.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1933001

Research on Color Vision Differences of Observers Based on Color Appearance Model CIECAM02 and CIECAM16

Shi Chunjie*, Zhu Fei

College of Network Communication, Zhejiang Yuexiu University, Shaoxing, Zhejiang 312000, China

Abstract In order to explore the computational performance of the existing CIECAM02 and CIECAM16 color appearance models on the color vision differences of individual observers, five lighting sources with different spectral power distribution and 24 colors of the GretagMacbeth ColorChecker standard color card are selected, and 208 sets of individual observer color matching functions are used. The color vision difference of individual observers is quantified. For all selected lighting sources and color centers, the average value of CIECAM-UCS color difference of individual observer and standard observer CIE1964 is the same, which is 1.29. At the same time, in the two color appearance models, the observer variability (the mean color difference from the mean) is relatively consistent, and the observer variability under the white LED light source is relatively large. In addition, the maximum value at color patch blue is 2.49 (2.32). It suggested that the individual differences were larger in this observation condition. The results can provide some basic data and calculation basis for the optimization of color appearance model.

Key words visual optics; CIECAM02; CIECAM16; color matching functions; individual differences

OCIS codes 330.1715; 330.1720; 330.1730

收稿日期: 2021-01-20; 修回日期: 2021-02-08; 录用日期: 2021-03-03

通信作者: *842980902@qq.com

1 引言

色度学中用标准色度观察者 CIE1931^[1] 和 CIE1964^[2] 表示观察者平均颜色视觉特性。近年来,随着发光二极管(LED)、激光和量子点等技术在照明设备和显示设备上的应用,观察者间颜色感觉差异明显^[3]。在实际应用中,测量大量的个体观察者颜色匹配函数是不现实的。2006年,国际照明委员会(CIE)推出了有代表性的生理观察者模型(CIE2006^[4]),可计算年龄为20~80岁和视场角为1°~10°的颜色匹配函数,代表特定年龄和视场的平均观察者。2016年,Asano等^[5]建立了个体色度观察者模型(简称Asano模型),模型采用蒙特卡罗模拟方法,可以计算出特定年龄和视场角下真实个体观察者LMS锥体细胞响应函数。Murdoch等^[6]通过对Asano模拟颜色匹配函数的研究发现,照明光源的色彩保真度值越高,则观察者间差异性越小,且观察者间差异受光源光谱特性的影响。Xie等^[7]根据Asano模拟观察者,提出了观察者同色异谱预测模型。现有研究^[7-9]已经对观察者的个体差异进行了量化。为了研究呈色介质、照明光源和色适应等因素对颜色感知的影响,国际照明委员会推出了色貌模型CIECAM02^[10]。2017年,Li等^[11]更改CIECAM02色貌模型的结构,简化原始模型,提出了新的色貌模型CIECAM16。然而,现有色貌模型

的计算均是基于标准色度观察者进行的,未考虑个体观察者间色觉的差异,而计算和分析预测相应颜色范围,预测色适应差异对色貌模型的修正具有重要意义。

为研究不同观察者颜色匹配函数对色貌模型的计算结果影响,本文采用个体观察者颜色匹配函数计算色貌模型CIECAM02和CIECAM16中的色度值,选用208组个体观察者颜色匹配函数(包含Stiles和Burch实验的47套真实观察者函数,CIE2006生理观察者模型在10°视场角和年龄为20~80岁条件下的61套观察者函数,以及Asano观察者模型在10°视场角和年龄为2010年美国人口普查年龄分布条件下随机生成的100套观察者函数),用于分析色貌模型中个体观察者的色觉感知差异性,并比较两个色貌模型的表现。

2 计算方法

对于同一目标色,选用不同观察者颜色匹配函数(CMFs),计算得到个体观察者色度值XYZ和参考白场值 $X_w Y_w Z_w$,输入到色貌模型CIECAM02和CIECAM16中,可得到个体观察者颜色感觉参数值,进而研究色貌模型中观察者的色觉差异,计算时以CIECAM-UCS色差公式进行表征,比较两个色貌模型的表现。图1是研究色貌模型中观察者色觉差异的计算方法流程图。

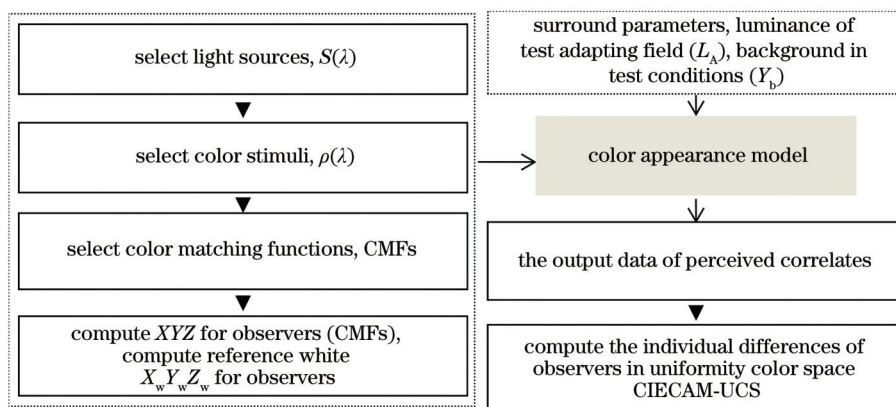


图1 计算方法流程图

Fig. 1 Flow chart of calculation method

2.1 照明光源

选择北美照明工程学会(IES)发布的光源颜色质量评价标准 IES TM-30-18 中的照明光源。选用的5个照明光源具有不同的光谱特性,包含标准照明体、白炽灯、RGB混合窄带LED光源、RGBA混合窄带LED光源和蓝色LED通过荧光粉涂片转换

为白光的LED光源。5个照明光源的编号与TM-30-18电子表格中照明光源编号相对应,见表1,并列出了相应的光源参数,包括光源类型、相关色温(CCT)、色偏差 D_w 、显色指数 R_a 、色彩保真度指数 R_i 和色彩饱和度指数 R_g 。照明光源的相对光谱能量分布见图2。

表 1 选用的照明光源色度参数
Table 1 Colorimetric of the selected light sources

Code	Source type	CCT /K	D_{uv}	R_a	R_t	R_g
82	Incandescent (60WA19)	2812	0.0001	100	100	100
123	RGB (465/535/590)	5023	0.0004	82	77	90
165	RGBA (460/530/575/625)	4995	0.0001	93	87	102
279	LED phosphor blue pump (111)	6811	0.0039	82	74	85
301	CIE D series 6500 K	6500	0.0032	100	100	100

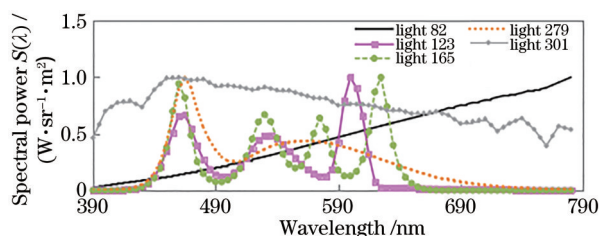


图 2 照明光源光谱曲线

Fig. 2 Spectral curves of light sources

2.2 颜色刺激

GretagMachbeth ColorChecker 标准色卡包含肤色和树叶色等 24 种自然物体的颜色,其在摄影摄像、印刷等对颜色再现要求高的行业得到了广泛应用。24 个颜色的反射率光谱^[12](实际测量)见图 3。颜色块 1~18 是彩色,19~24 是非彩色。

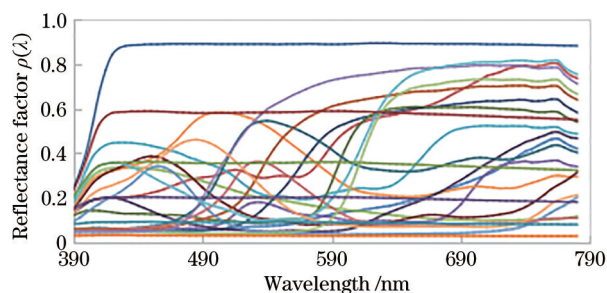


图 3 GretagMachbeth ColorChecker 标准 24 色卡的光谱反射率分布

Fig. 3 Spectral reflectance distribution of GretagMachbeth ColorChecker standard 24 color card

2.3 观察者颜色匹配函数(10°视场)

选用 10°视场角下的 208 套颜色匹配函数,包含 47 套 S&BCMFs、61 套 CIE2006CMFs 和 100 套 Asano CMFs。其中,47 套 S&B CMFs 是 Stiles 和 Burch 组织 47 名观察者在 10°视场条件下,通过实验获得的真实观察者颜色匹配函数(共 49 名观察者参与实验,其中 2 名观察者数据缺失)。61 套

CIE2006CMFs 是个体色度观察者模型 CIE2006 生成 10°视场角下 20~80 岁观察者的颜色匹配函数。100 套 Asano CMFs 是由 Asano 等提出的个体色度观察者模型利用 2010 年美国人口普查年龄分布随机生成的 10°视场下的颜色匹配函数(模型中生成的观察者个数可自行设置,此处设置为 100)。上述 208 套颜色匹配函数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 见图 4。从图中可以看出,在主要波段内, $\bar{x}(\lambda)$ 和 $\bar{z}(\lambda)$ 函数标准偏差值较大, $\bar{y}(\lambda)$ 函数标准偏差值最小,即选用的 208 套颜色匹配函数的主要差异在红通道和蓝通道的光谱响应。

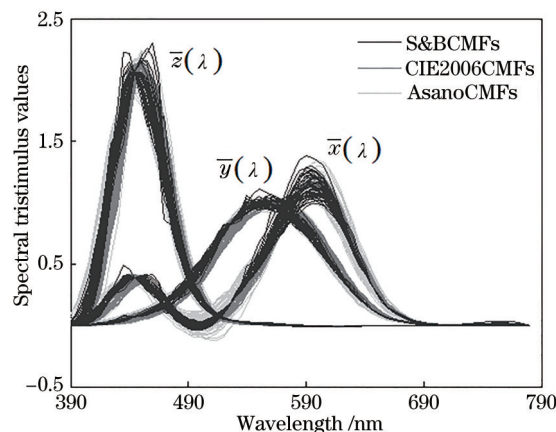


图 4 208 套颜色匹配函数

Fig. 4 208 sets of color matching functions

2.4 色貌模型(CIECAM02, CIECAM16)

色貌模型 CIECAM02 和 CIECAM16 中输入颜色三刺激值 XYZ、参考白 $X_w Y_w Z_w$ 、背景色亮度 Y_b 、适应场亮度 L_A (单位为 cd/m^2)和环境光条件(适应度 F 、环境光系数 c 、色感应系数 N_c),从而输出最终颜色感觉(亮度 Q 、明度 J 、绝对彩度 M 、彩度 C 、饱和度 s 、色调 H 、色调角 h),计算方法类似,计算流程如图 1 所示,具体输入参数见表 2。

表 2 色貌模型输入参数

Table 2 Input parameters of color appearance model

Input parameters	CIECAM02/CIECAM16
XYZ	$(XYZ)_{\text{individual, 208CMFs}}$
$X_w Y_w Z_w$	$(X_w Y_w Z_w)_{\text{individual, 208CMFs}}$
Y_b	$Y_b = 20\% \times Y_w = 20$
L_A	$L_A = L_w \times Y_b / Y_w$
Surround parameters	$F=1, c=0.69, N_c=1.0$

3 结果和分析

3.1 个体观察者与标准观察者 CIE1964 间差异

分别计算出 208 套个体观察者颜色匹配函数和标准色度观察者 CIE1964 在色貌模型 CIECAM02 和 CIECAM16 中的颜色感觉(明度 J 、绝对彩度 M 和色调角 h)。每个个体观察者与 CIE1964 标准色

度观察者之间的色觉差异采用均匀色空间 CIECAM-UCS 色差公式(Huang 等^[13]优化的色差公式 $\Delta E = 1.41 \left[\sqrt{(\Delta J')^2 + (\Delta a')^2 + (\Delta b')^2} \right]^{0.63}$, 其中, $J'a'b'$ 是均匀色空间感知的色度值)。对每个色块, 取所有个体观察者与 CIE1964 标准色度观察者色差值的平均值, 表示每个色块处个体观察者与标准观察者间的色觉差异。CIECAM-UCS 的色差计算结果见表 3。从表中可以看到, CIECAM02 和 CIECAM16 色貌模型中, 对于所有选用的照明光源和颜色中心, 个体观察者与标准观察者 CIE1964 的 CIECAM-UCS 色差平均值相同, 均为 1.29。对于彩色中心, CIECAM16 模型中的色差较大; 对于非彩色中心, CIECAM02 模型中的色差较大。这可能是因为 CIECAM16 模型在 CIECAM02 模型的基础

表 3 不同颜色中心的色差值

Table 3 Color differences of different color centers

Color	Lights_CIECAM02							Lights_CIECAM16					
	82	123	165	279	301	Average	82	123	165	279	301	Average	
1	1.27	1.16	1.12	1.15	1.20	1.18	1.28	1.24	1.18	1.25	1.28	1.25	
2	1.22	1.18	1.14	1.13	1.17	1.17	1.18	1.22	1.17	1.17	1.23	1.20	
3	1.05	1.39	1.35	1.58	1.39	1.35	1.19	1.49	1.43	1.64	1.50	1.45	
4	0.90	0.96	0.97	1.09	0.95	0.97	0.97	1.01	1.01	1.17	1.03	1.04	
5	1.08	1.38	1.36	1.69	1.37	1.38	1.16	1.41	1.39	1.73	1.44	1.43	
6	1.40	1.40	1.34	1.48	1.51	1.43	1.48	1.42	1.33	1.43	1.53	1.44	
7	1.89	1.93	1.84	1.95	1.91	1.90	1.85	2.04	1.93	2.09	2.04	1.99	
8	1.26	1.80	1.76	2.09	1.80	1.74	1.46	1.96	1.90	2.23	1.95	1.90	
9	1.74	1.62	1.55	1.48	1.56	1.59	1.71	1.67	1.57	1.53	1.60	1.62	
10	1.39	1.04	1.12	1.26	1.27	1.22	1.38	1.02	1.09	1.23	1.28	1.20	
11	1.04	1.24	1.26	1.48	1.23	1.25	1.07	1.30	1.32	1.58	1.32	1.32	
12	1.63	1.77	1.69	1.88	1.78	1.75	1.63	1.89	1.80	2.03	1.92	1.86	
13	1.35	2.01	1.98	2.31	2.02	1.93	1.60	2.22	2.15	2.48	2.19	2.13	
14	1.32	1.31	1.37	1.42	1.33	1.35	1.35	1.34	1.40	1.46	1.38	1.39	
15	2.01	1.58	1.72	1.59	1.69	1.72	1.94	1.64	1.74	1.65	1.75	1.74	
16	1.39	1.58	1.50	1.75	1.54	1.55	1.37	1.68	1.59	1.88	1.67	1.64	
17	1.56	1.17	1.37	1.41	1.47	1.40	1.55	1.16	1.35	1.36	1.45	1.37	
18	1.79	1.95	1.86	2.16	2.06	1.96	2.03	2.11	2.00	2.28	2.20	2.12	
19	0.67	0.82	0.78	1.22	0.90	0.88	0.52	0.56	0.52	0.83	0.73	0.63	
20	0.60	0.75	0.73	1.15	0.76	0.80	0.42	0.50	0.49	0.78	0.62	0.56	
21	0.54	0.69	0.68	1.06	0.65	0.72	0.37	0.47	0.47	0.72	0.50	0.51	
22	0.49	0.63	0.62	0.96	0.57	0.65	0.33	0.43	0.43	0.65	0.42	0.45	
23	0.41	0.63	0.64	0.84	0.51	0.60	0.27	0.49	0.47	0.58	0.38	0.44	
24	0.33	0.63	0.61	0.73	0.44	0.55	0.22	0.44	0.43	0.53	0.36	0.40	
Average	1.18	1.28	1.27	1.45	1.30		1.18	1.28	1.26	1.43	1.32		
All average						1.29						1.29	

上对明度计算公式进行了优化。

从表 3 中可看到,不同颜色中心和不同的照明条件对个体观察者与标准观察者的色差计算结果影响较大。依据表 3 绘制柱状图 5,图中实体柱图表示 CIECAM02-UCS 计算色差,空心柱图表示 CIECAM16-UCS 计算色差。总体来看,对非彩色中

心的计算结果小于彩色中心,这与 Fairchild^[14]的计算结果一致。对于彩色中心,颜色中心 7(橙色)、13(蓝色)和 18(青色)处,个体观察者与标准观察者偏差较大;而彩色中心 4(绿植色)处,偏差较小。同时,在选用的 5 个照明光源下,编号 279 光源下的偏差最大,这与照明光源的色温和光谱能量分布曲线有关。

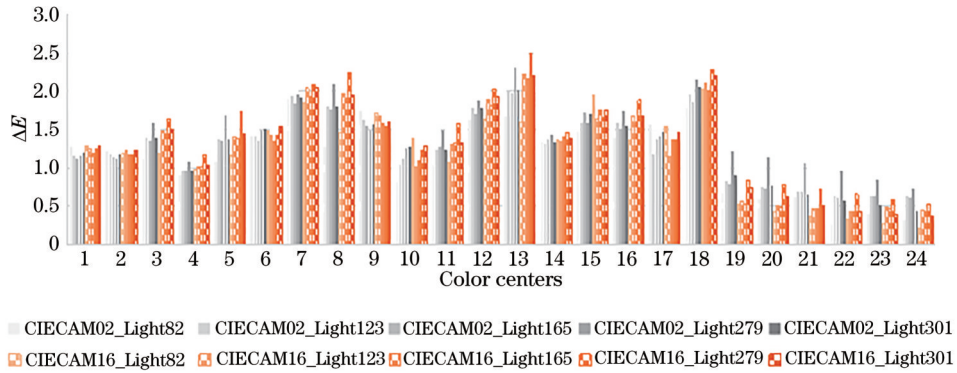


图 5 CIECAM-UCS 中个体观察者与标准色度观察者 CIE1964 色差的平均值

Fig. 5 Average value of color difference between individual observer and the CIE1964 standard observer in CIECAM-UCS

将编号 279 光源下不同观察者的 CIECAM-UCS 色差绘制在图 6 中,可见同一颜色中心处,左侧圈(黑色)和右侧圈(灰色)分别表示色貌模型 CIECAM02 和 CIECAM16 中 24 个颜色中心 i 处所有观察者 j 的色差值 $\Delta E_{i,j}$ ($i=1, 2, \dots, 24; j=1, 2, \dots, 208$), 偏差线(图中线段)是标准偏差 $D_{st}(\Delta E_{i,j})$, 偏差线中心的三角形和正方形是相应的平均色差值 $\overline{\Delta E_{i,j}}$ 。从图 6 中可以看出,个体观察者与标准观察者 CIE1964 颜色感知差异大,颜色中心 13(蓝色)处, CIECAM16-UCS 色差最大值是 6.92, CIECAM02-UCS 色差最大值是 5.99。其中,色貌模型 CIECAM02(CIECAM16)中,颜色中心 7、8、13

和 18 处,色差值大于 2 的占比分别为 40%(44%)、46%(50%)、55%(61%)和 47%(53%)。结果表明,两个色貌模型中,对多数个体观察者来说,真实感知的颜色与 CIE1964 标准观察者量化的颜色值间色差感觉明显。

3.2 观察者间色觉感知差异

对于色貌模型 CIECAM02 和 CIECAM16,分别用离均色差(MCDM, M_{CDM})^[15]表征观察者感知颜色值之间的差异性,计算公式为

$$M_{CDM} = \frac{\sum_{j=1,N} [\Delta E(C_j, C_{ave})]}{N}, \quad (1)$$

式中: N 表示个体观察者的个数; C_j 表示每名个体观察者在均匀色空间 CIECAM-UCS 感知的色度值 $J'a'b'$; C_{ave} 表示所有个体观察者感知的平均色度值; ΔE 表示此处采用均匀色空间 CIECAM-UCS 色差公式计算 M_{CDM} , 结果见表 4。

从表 4 中可以看到,两个色貌模型中,观察者间离均色差表现较为一致,在编号 279 光源下观察者

表 4 两个色貌模型中的观察者间差异

Table 4 Individual differences in the color appearance model

Color appearance model	Light 82	Light 123	Light 165	Light 279	Light 301
CIECAM02	1.15	1.27	1.27	1.46	1.29
CIECAM16	1.15	1.28	1.26	1.43	1.32

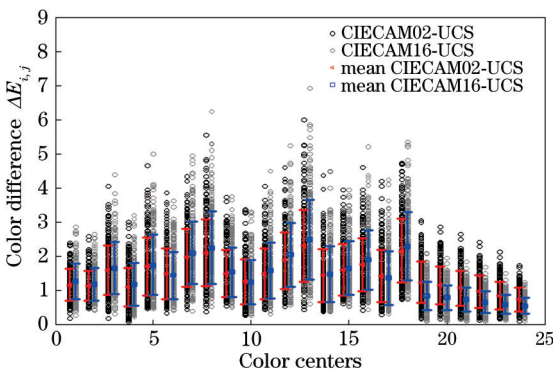


图 6 CIECAM-UCS 中个体观察者与标准色度观察者 CIE1964 的色差

Fig. 6 Color difference between individual observer and the CIE1964 standard observer in CIECAM-UCS

间差异性相对较大,为 1.46(1.43)。该光源下,24 个颜色中心处观察者间差异见图 7。从图 7 中还可以发现,两个色貌模型中,颜色中心 13(蓝色)处观察者间离均色差值最大,2.32(2.49),即该观察条件下,不同观察者间颜色感知偏差较大。同时,非彩色中心处,CIECAM02 色貌模型中的观察者间差异大于 CIECAM16 色貌模型。

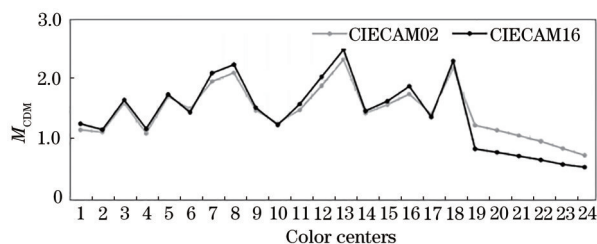


图 7 279 光源下观察者间差异

Fig. 7 Individual differences under the light 279

4 结 论

为了比较研究色貌模型 CIECAM02 和 CIECAM16 中不同个体观察者的色觉差异,选用 IES TM-30-18 中 5 个光谱功率分布不同的照明光源,采用 GretagMacbeth ColorChecker 标准色卡的 24 个颜色,通过 208 套颜色匹配函数计算量化观察者间色觉差异。通过分析可以得出以下结果:

1) CIECAM02 和 CIECAM16 色貌模型中,个体观察者与标准观察者 CIE1964 的 CIECAM-UCS 色差平均值相同,均为 1.29。对于彩色中心, CIECAM16 模型中的色差更大,对于非彩色中心, CIECAM02 模型中的色差更大。这可能是因为 CIECAM16 模型在 CIECAM02 模型的基础上对明度计算公式进行了优化。同时,对彩色色差的计算结果大于非彩色的计算结果。

2) 两个不同色貌模型中,不同颜色中心处个体观察者间色觉差异(离均色差 M_{CDM})呈现的变化趋势基本一致。观察者间差异最大值出现在颜色中心 13(蓝色)处,观察者间色觉差异最大。而颜色中心 24(近白色)处的观察者间色觉差异最小。

3) 两个不同色貌模型中,不同照明光源下个体观察者与标准观察者 CIE1964 的 CIECAM-UCS 色差大小变化趋势基本一致,编号 279 光源(白光 LED 光源)下的偏差更大,且个体观察者间色觉差异也最大,这与照明光源的色温和光谱能量分布曲线有关。

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, 1931, 230(681/682/683/684/685/686/687/688/689/690/691/692/693): 149-187.
- [2] Speranskaya N I. Determination of spectral color coordinates for twenty-seven normal observers[J]. Optics and Spectroscopy, 1959, 7: 424-428.
- [3] 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.
- [4] CIE. Fundamental chromaticity diagram with physiological axes[R]. Vienna: CIE Technical Report, 2006: 170-171.
- [5] Asano Y, Fairchild M D, Blondé L. Individual colorimetric observer model[J]. PLoS One, 2016, 11(2): e0145671.
- [6] Murdoch M J, Fairchild M D. Modelling the effects of inter-observer variation on colour rendition[J]. Lighting Research & Technology, 2019, 51(1): 37-54.
- [7] Xie H, Farnand S P, Murdoch M J. Observer metamerism in commercial displays[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2020, 37(4): A61-A69.
- [8] Huang M, Shi C J, Li Z Y, et al. Influences on observers color discrimination with normal color vision[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0933001. 黄敏, 史春洁, 李泽阳, 等. 色觉正常观察者辨色差异影响研究[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0933001.
- [9] 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): 304021-3040214.
- [10] CIE. CIE publication 159: a colour appearance model for colour management systems: CIECAM02[S]. Vienna: CIE Central Bureau, 2004.
- [11] Li C J, Li Z Q, Wang Z F, et al. Comprehensive color solutions: CAM16, CAT16, and CAM16-UCS[J]. Color Research & Application, 2017, 42(6): 703-718.
- [12] Munsell Color Science Laboratory, Macbeth Colorchecker Spectral Data[EB/OL]. [2021-01-15]. https://www.rit.edu/cos/colorscience/rc_useful_data.php.

- [13] 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.
- [14] Fairchild M. Individual differences in color matching and adaptation: theory and practice[C]//Color and Imaging Conference, 24th Color and Imaging Conference, November 7, 2016, Cambridge, USA. Cambridge: IS&T, 2016: 115-120.
- [15] Shi C J, Xi Y H, Guo C L, et al. Study on the difference of color discrimination on display colors between young and old observers[J]. *Digital Printing*, 2019, (1): 26-31.
- 史春洁, 习永惠, 郭春丽, 等. 年轻观察者和老年观察者对显示色的辨色差异研究[J]. *数字印刷*, 2019, (1): 26-31.