

不同年龄观察者颜色匹配函数的测试及优化

黄敏¹, 何瑞丽¹, 郭春丽¹, 石冰洁¹, 史春洁², 刘浩学¹

¹北京印刷学院印刷工程与包装学院, 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 为了检验各颜色匹配函数(CMFs)计算不同年龄观察者锥细胞响应的表现,利用比较法实验得到 56 名观察者对 5 个色中心的 20 对近同色异谱色样对目视评价色差数据,与不同颜色匹配函数比较,分别计算标准化残差平方和因子与相关系数。结果表明,各颜色匹配函数测试不同年龄段观察者的结果差异较大。对年轻观察者,S2,S6 表现较好,CIE1931 的计算结果较差;而对老年观察者,CIE1931 表现较好,CIE1964 的计算结果较差。选用 CIE1964 颜色匹配函数优化 D65 光源照明下不同年龄段观察者锥细胞响应,优化后的 CIE1964 计算性能有所提高;同样,检验 LED 光源照明下的实验结果,测试性能也有所提高。

关键词 视觉光学; 颜色匹配函数; 年龄; 标准化残差平方和; 相关系数

中图分类号 O432.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0333001

Test and Optimization of Different Color Matching Functions for Different Aged Observers

Huang Min¹, He Ruili¹, Guo Chunli¹, Shi Bingjie¹, Shi Chunjie², Liu Haoxue¹

¹School of Printing and Packing Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China;

²College of Network Communication, Zhejiang Yuexiu University of Foreign Languages, Shaoxing, Zhejiang 312000, China

Abstract To test performances of different color matching functions (CMFs), we make 20 pairs of nearly metameric color patches based on 5 target colors (gray, brown, b-green, blue, and purple). The visual data from 56 observers is adopted to calculate the standardized residual sum of square and correlation coefficient. The behaviors of different CMFs from the young and old observers have large discrepancies. For young observers, S2 and S6 outperform others and CIE1931 has the worst performance. While, for old observers, CIE1931 outperforms others and CIE1964 has the worst performance. Visual data from observers under the D65 light source is used to optimize CIE1964 CMFs. After optimizing, performances for different age group improves not only for D65 light source, but also for light emitting diode source.

Key words vision optics; color matching functions; age; standardized residual sum of squares; correlation coefficient

OCIS codes 330.1715; 330.1720; 330.4595

1 引 言

观察者的颜色感觉受到照明光源、物体色的光谱特性以及观察者锥细胞响应的共同影响。随着现代颜色科学技术的发展和多样化呈色设备的出现,人们常会使用不同的光谱原色去混合、匹配、复制已

有的颜色样本,但两种颜色样本的光谱组成很有可能不同。这会使得同样的颜色样本对,在不同的光源照明下,呈现出不同的颜色外貌;不同的观察者评价,也会得到不同的颜色外貌,经常会出现某些观察者认为匹配的颜色,其他观察者却认为不匹配的现象^[1-3]。由于观察者之间存在个体差异,仅用现有的

收稿日期: 2017-06-27; 收到修改稿日期: 2017-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(61675029,61308081)、北京市科委科技新星人才计划(Z151100000315076)、北京市教委科技创新提升项目(PXM2017_014223_000061)

作者简介: 黄敏(1979—),女,博士,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

CIE1931^[4]和 CIE1964^[5]两套代表观察者平均颜色视觉特性和两种不同观察视场的颜色匹配函数已不足以表征不同观察者的锥细胞响应。2006年, CIE提出 CIE2006生理观察者模型^[6]。此后, Sarkar等^[7]研究发现观察者配色函数不仅受年龄影响, 同年龄段观察者的配色函数也可能不同, 并由此建立了8类观察者配色函数。

Sarkar^[8]测试分析了 CIE2006、CIE1964和 Stiles-Burch数据集三个年龄段(22~23, 27~29, 49~50)不同配色函数的表现, 发现 CIE2006函数的峰值位移有利于提高其预测性能(该位移并未包含在 CIE2006模型中), 同时进行 CIE2006函数长波段(LWS)和中波段(MWS)的峰值波长位移, 并对550 nm以上波段进行加权优化有利于提高预测宽带和窄带显示设备的匹配性能。Asano等^[9]组织了61名观察者开展LED光源混合5个颜色的匹配实验, 通过改变视觉模型中各参数的变化, 得到不同观察者的颜色匹配函数。然而, 上述对观察者个体的模型优化主要针对自发光色, 较少考虑观察者年龄的影响, 同时模型优化也主要在 CIE2006颜色匹配函数上进行。

本文选用不同颜色匹配函数测试56名不同年龄观察者对20对近同色异谱色样对的目视色差^[10], 一方面比较各颜色匹配函数测试不同年龄观察者色差评价的差异, 另一方面比较不同年龄观察者锥细胞响应的差异。

2 颜色匹配函数

2.1 CIE颜色匹配函数

CIE1931和 CIE1964颜色匹配函数仅考虑到小视场(1°~4°)和大视场(>4°)对人眼色觉的影响, 并没有考虑不同年龄段观察者的色觉差异。CIE2006颜色匹配函数的大量工作建立在 Stockman等^[11]工作的基础上, 以 Stiles-Burch^[12]的10°视场47个颜色匹配函数为参考源数据, 以2°和10°视场颜色匹配函数为基础, 提供了可计算1°~10°任意视场角、20~80岁不同年龄段的观察者平均细胞响应函数, 即

$$\begin{cases} \bar{l}(\lambda) = [1 - 10^{-D_{vis,l}A_l(\lambda)}] \cdot 10^{-D_{mac}(\lambda)} \cdot 10^{-D_{ocul}(\lambda)} \\ \bar{m}(\lambda) = [1 - 10^{-D_{vis,m}A_m(\lambda)}] \cdot 10^{-D_{mac}(\lambda)} \cdot 10^{-D_{ocul}(\lambda)}, \\ \bar{s}(\lambda) = [1 - 10^{-D_{vis,s}A_s(\lambda)}] \cdot 10^{-D_{mac}(\lambda)} \cdot 10^{-D_{ocul}(\lambda)} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $D_{vis,l}$ 、 $D_{vis,m}$ 和 $D_{vis,s}$ 分别为观察者感红、感绿、感

蓝三种锥细胞视色素的峰值光学密度, 其中 $D_{vis,l}(\lambda) = 1 - 10^{-[0.38 + 0.54 \exp(-f_s/1.333) \cdot [10A_{lms1}(\lambda)]]}$, $D_{vis,m}(\lambda) = 1 - 10^{-[0.38 + 0.54 \exp(-f_s/1.333) \cdot [10A_{lms2}(\lambda)]]}$, $D_{vis,s}(\lambda) = 1 - 10^{-[0.38 + 0.54 \exp(-f_s/1.333) \cdot [10A_{lms3}(\lambda)]]}$, $D_{mac}(\lambda)$ 为观察者的黄斑色素的光学密度函数(与视场相关), $D_{mac}(\lambda) = RMD(l) \cdot 0.485 \exp(f_s/6.132)$, $D_{ocul}(\lambda)$ 为观察者的屈光介质光学密度函数(与年龄有关), 当观察者年龄 $a_{ge} \leq 60$ 时, $D_{ocul}(\lambda) = d_{ocul1}(\lambda) \cdot [1 + 0.02(a_{ge} - 32)] + d_{ocul2}(\lambda)$; 观察者年龄 $a_{ge} > 60$ 时, $D_{ocul}(\lambda) = d_{ocul1}(\lambda) \cdot [1.56 + 0.0667(a_{ge} - 60)] + d_{ocul2}(\lambda)$, $A_{lms1}(\lambda)$ 、 $A_{lms2}(\lambda)$ 、 $A_{lms3}(\lambda)$ 分别为长波段、中波段和短波段的低光密度光谱吸收率, $A_l(\lambda)$ 、 $A_m(\lambda)$ 、 $A_s(\lambda)$ 分别为长、中、短波段的低光密度吸收峰, $RMD(\lambda)$ 表示黄斑色素的相对密度, $d_{ocul1}(\lambda)$ 、 $d_{ocul2}(\lambda)$ 为屈光介质的密度, 上述函数均为 CIE 官方公布的已知数据, f_s 和 a_{ge} 分别为观察视场角和观察者年龄, 均为实验的变量。

随着观察者年龄的增长, 其颜色分辨能力将出现不同程度的变化^[13], 主要表现在屈光系统晶状体(透镜)光谱透过率的变化; 而随着观察视场的变化, 观察者感光系统视网膜中央凹黄斑区感光色素光谱密度也会发生变化。图1所示为代入不同观察视场和观察者年龄计算得到的黄斑色素与屈光系统光学密度变化。

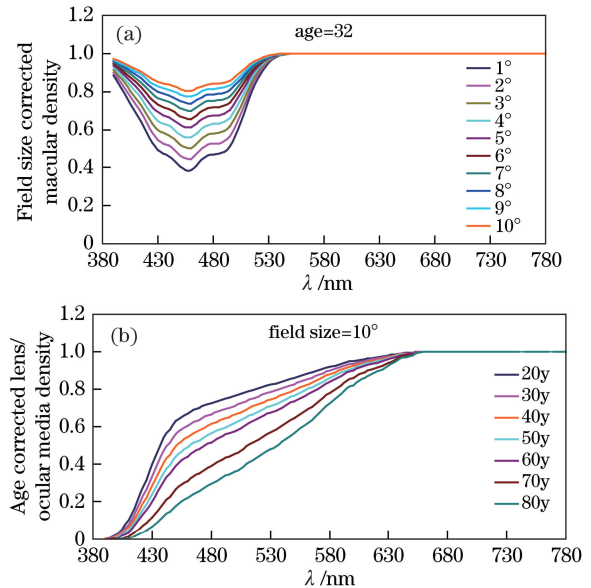


图1 CIE2006颜色匹配函数中的生理因子。
(a)黄斑色素变化; (b)屈光系统光学密度变化

Fig. 1 Physiological factors in CIE2006.

- (a) Change of macular pigment;
- (b) change of optical density of the ocular media

由图 1(a)可知,对于特定观察者年龄($a_{ge}=32$),黄斑色素的光学密度在 380~530 nm 波段随观察视场角的增大而增加;由图 1(b)可知,对于特定观察视场角($f_s=10^\circ$),屈光介质的光学密度在 380~650 nm 波段随观察者年龄的增长而下降。

图 2 为 $a_{ge}=32, f_s$ 分别为 $2^\circ, 5^\circ, 7^\circ$ 和 10° 时,计算得到的 CIE2006 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ 各通道的光谱响应。图 3 为 CIE1931、CIE1964 以及 CIE2006(不同的观察视场和不同年龄)对应的 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ 各通道光谱响应。其中 22 和 66 分别为实验中 30 名年轻观察者和 26 名老年观察者的平均年龄值。

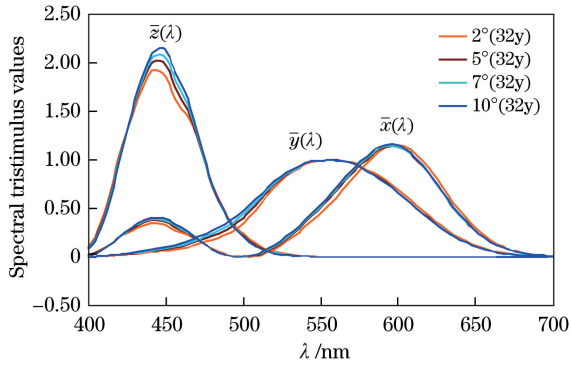


图 2 不同观察视场下的 CIE2006 颜色匹配函数
Fig. 2 CIE2006 CMFs for different viewing fields

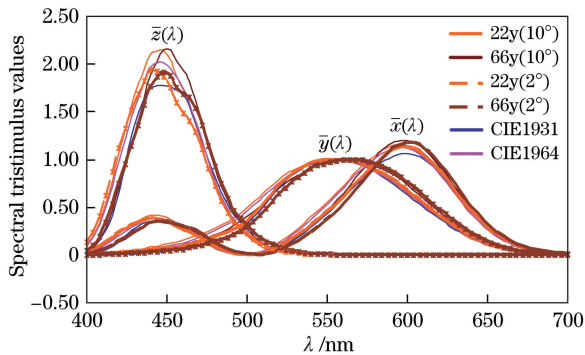


图 3 CIE1931, CIE1964 和 CIE2006 颜色匹配函数
Fig. 3 CIE1931, CIE1964, and CIE2006 CMFs

由图 2 和图 3 可知,随着观察者年龄的增长, CIE2006 颜色匹配函数中 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ 各通道的峰值光谱响应均向长波段移动,其中 $\bar{z}(\lambda)$ 通道最突出;随着观察视场的减小, $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ 各通道的峰值波长光谱响应均有所降低,同样 $\bar{z}(\lambda)$ 通道更突出。可见,当年长观察者小视场观察时, CIE2006 模型考虑到观察者的年龄和观察视场,各通道计算得到的颜色匹配函数变化规律与 CIE1931 较为一致;而年轻观察者大视场观察时,所得结果与 CIE1964 较为一致。图 3 的光谱响应中, CIE1931

的最低。Asano^[14]用不同颜色匹配函数计算 4 对蓝色近同色异谱色样对的色差变化其结果也与此规律变化一致。

2.2 Sarkar 分类颜色匹配函数

颜色匹配函数是定量描述、计算和评价颜色的基本要素,现有量化观察者锥细胞响应的函数有 CIE1931 和 CIE1964,其仅代表观察者的平均颜色视觉特性。实际上,即使是色觉正常的观察者,颜色分辨差异也很大。2010 年, Sarkar^[7]通过聚类分析法得到了 8 种不同的颜色匹配函数,记为 S1~S8 颜色匹配函数。表 1 给出了 S1~S8 颜色匹配函数的分布规律,其中, S7、S8 为适用于老年观察者光谱锥细胞响应的颜色匹配函数。

表 1 Sarkar 的 8 类颜色匹配函数
Table 1 8 categories of Sarkar's CMFs

$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$
S1=S6	S1=S7	S2=S5=S6
S2=S3	S2=S5=S6	S3=S7=S8
S4=S5	S3=S4=S8	S1
S7=S8		S4

将实验中 5 个标样在 D65 光源照明下的颜色刺激光谱数据 $S(\lambda)\rho(\lambda)[s(\lambda)$ 为照明光源的光谱分布, $\rho(\lambda)$ 为物体色的光谱反射率]分别代入上述不同颜色匹配函数计算 $L^* a^* b^*$ 色度值,并将结果绘制在 $a^* b^*$ 和 $L^* C^*$ 平面图上,如图 4 所示。可见,图中散点分布差异较大。其中 CIE1931 计算的饱和度在蓝色和紫色区域较高,在蓝绿色区域较低; S7 在大多数颜色区域表现出与其他颜色匹配函数不一样的计算结果。

3 数据分析

3.1 颜色匹配函数性能测试

将 56 名观察者在 D65 光源照明下的目视色差数据分别与上述不同颜色匹配函数的计算结果进行比较,利用标准化残差平方和 (STRESS) 因子^[15]评价不同颜色匹配函数的表现(如表 2 所示,其中 CIE2006 为代入观察者真实年龄计算的结果)。其计算公式为

$$S_{\text{STRESS}} = \left[\frac{\sum (\Delta E_i - F_1 \Delta V_i)^2}{\sum F_1^2 \Delta V_i^2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

式中 $F_1 = \sum \Delta E_i^2 / \sum \Delta E_i \Delta V_i$, ΔV_i 为每名观察者评价 20 对色样对的目视色差值, ΔE_i 为不同颜色匹配函数计算得到的 CIEDE2000 色差值。

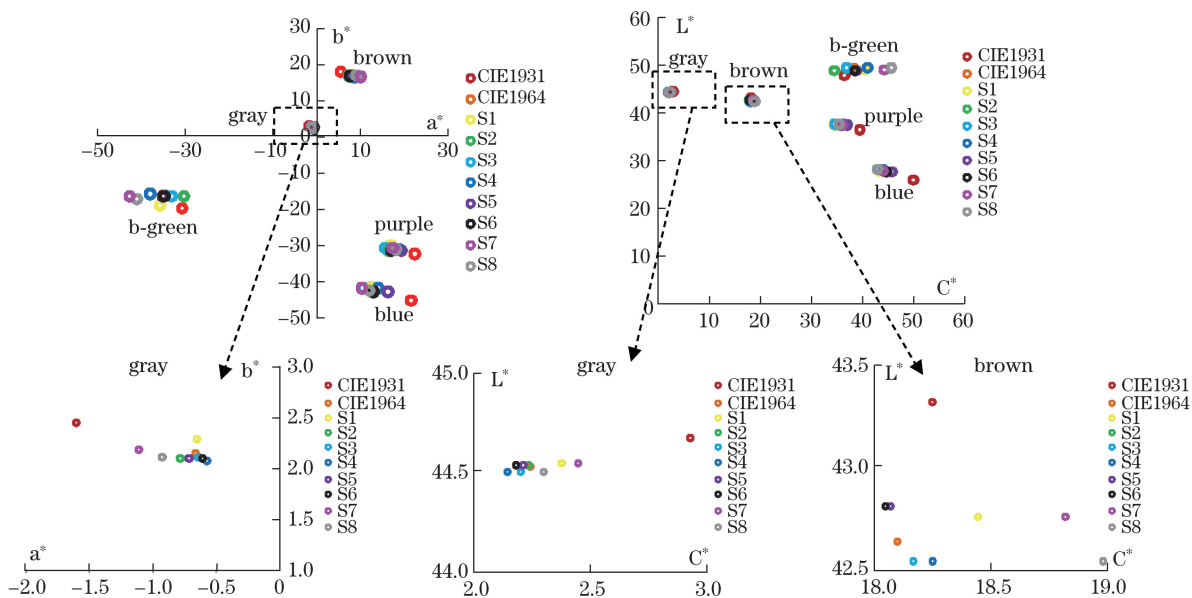


图 4 不同颜色匹配函数计算的标样在 a^*b^* 和 L^*C^* 散点图分布

Fig. 4 Distributions of 5 target colors from different CMFs in a^*b^* and L^*C^* plane

表 2 利用 STRESS 评价不同颜色匹配函数计算年轻和老年观察者表现

Table 2 Performance of different CMFs for young and old observers in terms of STRESS

CMFs	CIE			Sarkar								
	1931	1964	2006	1	2	3	4	5	6	7	8	
Young	Min	41.4	28.4	29.5	33.1	30.6	31.4	30.1	28.4	27.7	33.8	33.3
	Max	70.1	58.8	63.0	62.6	49.6	55.1	62.3	59.2	58.7	56.5	52.5
	Mean	57.9	42.5	44.6	47.8	40.3	43.1	44.6	42.2	41.6	45.7	43.2
Old	Min	21.2	34.7	29.8	38.7	28.0	32.7	36.7	33.8	34.3	24.6	28.8
	Max	52.8	75.6	57.9	80.2	64.6	69.9	77.8	75.5	76.6	50.5	64.0
	Mean	32.9	61.5	39.6	65.5	50.0	54.8	64.1	61.4	62.5	39.1	49.9

STRESS 值的变化范围为 0~100,其值越小,表示两组数据集之间的一致性越好;反之,表明差异越大。表 2 中黑色加粗标注为计算最小的 STRESS 值。

由表 2 可知,不同颜色匹配函数计算得到的 CIEDE2000 色差值与年轻/老年观察者目视色差值相比较,具有完全不同的表现:代入 CIE1931 计算得到的 CIEDE2000 色差值与年轻观察者的目视色差值比较,具有最大的 STRESS 值(57.9),评价性能不好;而在与老年观察者目视色差值比较时,具有最优的表现(32.9);与年轻观察者的目视色差比较时,S2 和 S6 具有较好的表现;与老年观察者的目视色差比较时,CIE1931 具有最好的表现,其次是 S7。该结果与 Sarkar 提出的 S7 适合于计算老年观察者的锥细胞响应的结论较为一致。同时,考虑到每名观察者真实年龄的 CIE2006 颜色匹配函数,并没有表现出其优势,在与年轻观察者的目视色差比较时,计算性能劣于 CIE1964,在与老年观察者的目视色

差比较时,计算性能劣于 CIE1931。

统计各颜色匹配函数计算不同年龄段观察者得到的 STRESS 值最小值出现的次数。30 名年轻观察者中,分别有 14 人、11 人与 S2、S6 计算结果一致,有 5 名观察者得到的结果与 S7 计算结果的一致性最好;26 名老年观察者中,有 11 人与 1931 计算结果较为一致,6 人与 S7 计算结果较为一致,有 1 名观察者得到的结果与 S2 计算结果的一致性最好。表明在相同的年龄段,观察者的个体差异会导致异常的锥细胞光谱响应,这是正常现象,该现象并不会影响整体实验结果和实验结论。

将 30 名年轻观察者和 26 名老年观察者评价 20 对色样对的目视色差值与不同颜色匹配函数的色差计算结果代入计算两者的相关系数^[14],计算公式为

$$r(X, Y) = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{Var}(X)\text{Var}(Y)}}, \quad (3)$$

式中 X 、 Y 分别代表观察者的目视色差值和不同颜色匹配函数计算的色差值, $Cov(X, Y)$ 为 X 、 Y 的协方差, $Var(X)$ 和 $Var(Y)$ 分别为 X 、 Y 的方差。 $r(X, Y)$ 的变化范围为 $-1 \sim +1$, -1 表示两组数据变化趋势相反, 呈负相关; $+1$ 表示两组数据变化趋势完全相同, 呈正相关; 0 表示两组数据变化

趋势不相关。统计各颜色匹配函数计算协方差系数 >0 的观察者个数, 即颜色匹配函数的计算结果与观察者目视评价结果的变化趋势一致的情况, 同时统计各颜色匹配函数计算不同年龄段观察者数据得到的 $r(X, Y)$ 最大值出现的次数, 结果如表 3 所示。

表 3 相关系数 r 测试各颜色匹配函数的表现

Table 3 Performance of different CMFs in terms of correlation coefficient

r_{Cov}	Observer	CIE			Sarkar								
		1931	1964	2006	1	2	3	4	5	6	7	8	
>0	Young	3	22	22	22	26	22	22	22	22	26	5	22
	Old	24	2	18	2	3	1	2	2	2	2	23	2
No.(max)	Young	2	0	0	0	12	0	0	0	0	14	2	0
	Old	21	0	0	0	2	0	0	0	0	1	2	0

由表 3 可知, 相关系数测试的结果与 STRESS 值的计算结果较为一致。年轻观察者中, 除 CIE1931 和 S7 颜色匹配函数外, 大多数观察者的目视色差结果与颜色匹配函数的计算结果变化趋势较为一致; 反之, 老年观察者中, 大多数观察者的目视色差结果与 CIE1931、CIE2006 和 S7 颜色匹配函数的计算结果变化趋势较为一致。可见考虑观察者真实年龄的 CIE2006 颜色匹配函数, 虽然在年轻和老年观察者年龄段的表现并非最优, 但与各年龄段观察者中大多数观察者的目视色差结果变化趋势较为一致。

S6、S2 颜色匹配函数与年轻观察者, CIE1931 颜色匹配函数与老年观察者的目视色差一致性最好, 大多数观察者的相关系数最大值都出现在相应颜色匹配函数计算的结果处。

3.2 CIE1964 颜色匹配函数的优化

CIE 国际照明委员会推荐的 CIE1931 和 CIE1964 颜色匹配函数分别代表小视场 ($1^\circ \sim 4^\circ$) 和大视场 ($>4^\circ$) 观察条件下人眼的平均颜色视觉特性。本次实验的色样大小为 $5\text{ cm} \times 15\text{ cm}$, 观察距离为 $25 \sim 30\text{ cm}$, 观察视场角约为 $11^\circ \times 33^\circ$ 属于 CIE 规定的大视场。考虑到 CIE2006 的计算过程较 CIE1931、CIE1964 繁琐, 其需代入观察者的真实年龄和观察视场角; 同时, 在相同年龄的观察者也存在个体差异, 如在表 2 的计算结果中, CIE2006 整体上并没有表现出比 CIE1931 或 CIE1964 更优的计算趋势; 另外, CIE1964 普适性较强, 因此选用 CIE1964 颜色匹配函数进行不同年龄段观察者锥细胞响应的优化。

3.2.1 年轻观察者

由表 2 结果可知, 对年轻观察者, 颜色匹配函数 S2、S6 的计算性能较好, 大多数观察者获得的结果都属于 S2 和 S6。表 1 所示 S2 和 S6 的 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 通道锥细胞光谱响应相同, 仅 $\bar{x}(\lambda)$ 通道具有较大的差异, 主要区别在于 S2 在 $450 \sim 520\text{ nm}$, $560 \sim 620\text{ nm}$ 波段的光谱响应高于 S6 和 CIE1964, 如图 5 所示。

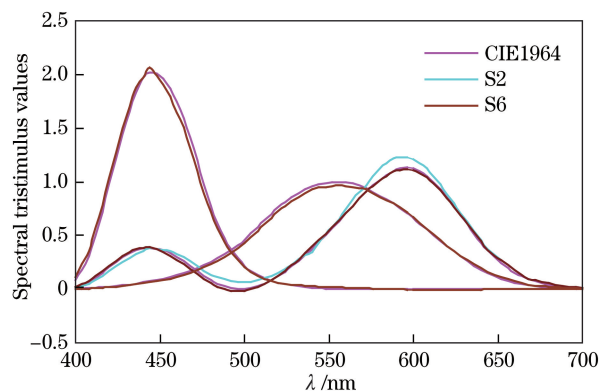


图 5 CIE1964, S2, S6 颜色匹配函数
Fig. 5 CIE1964, S2, and S6 CMFs

考虑到利用 STRESS 值和相关系数 r 计算结果较为一致, 因此优化目标为计算 30 名年轻观察者 STRESS 值的最小平均值, 具体优化步骤为:

1) 假定优化后的颜色匹配函数 $\bar{x}(\lambda)$ 通道光谱响应为: S2 和 S6 颜色匹配函数的 $\bar{x}(\lambda)$ 通道光谱响应分别乘以相应的权重因子, 即 $S2 \times k_2 + S6 \times k_6$, $k_2 + k_6 = 1$, 取最优解结果为 $k_2 = 0.55259$, $k_6 = 0.44741$ 。

2) 将步骤 1) 中加权的 $\bar{x}(\lambda)$ 通道与 S2, S6 原始的 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 通道, 作为新的颜色匹配函数 S_{new} 。

3) 利用 CIE1964 颜色匹配函数与 S_{new} 进行不同通道的 $\omega(\lambda)$ 加权计算, $\omega(\lambda)$ 的加权因子如图 6 所示。

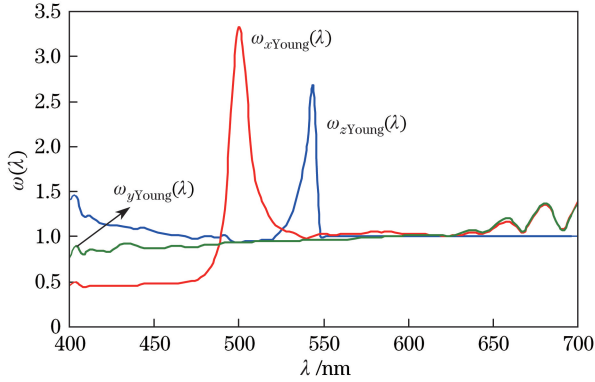


图 6 CIE1964 颜色匹配函数计算年轻观察者不同通道的加权因子

Fig. 6 Weighting factors of different channels for young observers calculated by CIE1964 CMFs

因此,对年轻观察者,CIE1964 优化后的 $\text{BIGC}_{\text{Young}}$ 颜色匹配函数为

$$\begin{cases} \text{BIGC } \bar{x}_{\text{Young}}(\lambda) = \bar{x}_{10}(\lambda) \times \omega_{x\text{Young}}(\lambda) \\ \text{BIGC } \bar{y}_{\text{Young}}(\lambda) = \bar{y}_{10}(\lambda) \times \omega_{y\text{Young}}(\lambda) \\ \text{BIGC } \bar{z}_{\text{Young}}(\lambda) = \bar{z}_{10}(\lambda) \times \omega_{z\text{Young}}(\lambda) \end{cases} \quad (4)$$

3.2.2 老年观察者

同样由表 2 可知,对老年观察者,CIE1931 的计算性能最好,大多数观察者均属于 CIE1931 颜色匹配函数。比较图 3 所示的 CIE1931 和 CIE1964 的锥细胞响应可知,CIE1931 较 CIE1964 在 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 通道的光谱响应有不同程度的降低;CIE1931 较 CIE1964 的峰值波长向长波方向均产生一定程度的偏移。CIE2006 颜色匹配函数计算不同年龄观察者 ($a_{\text{ge}} = 22, 66$) 的锥细胞响应时,随着 a_{ge} 的增大,各通道的光谱响应峰值波长也向长波方向产生一定程度的偏移。

对老年观察者的 CIE1964 颜色匹配函数优化目标为,计算 26 名老年观察者 STRESS 值的平均值最小,具体优化步骤为:

1) 将 CIE1964 各通道的锥细胞响应均向长波方向平移 4 nm,发现平移后的 CIE1964 颜色匹配函数计算性能较原始 CIE1964 具有明显提升,平均 STRESS 值从 61.5 下降到 38.8,说明针对老年观察者该平移有效。

2) 利用 1) 中平移后的 CIE1964 颜色匹配函数与 CIE1931 颜色匹配函数各通道进行 $\omega(\lambda)$ 的加权计算,对应于 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 通道, $\omega(\lambda)$ 的加权因子如图 7 所示。

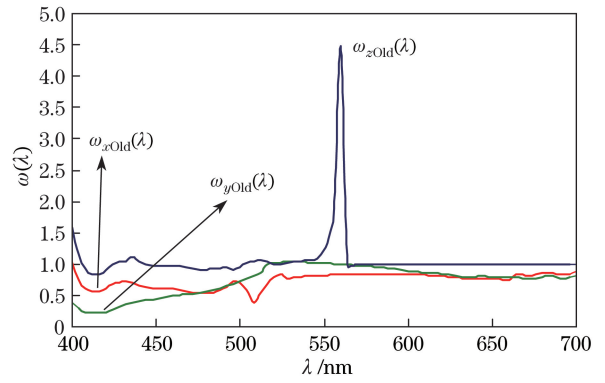


图 7 CIE1964 颜色匹配函数计算老年观察者不同通道的加权因子

Fig. 7 Weighting factors of different channels for old observers calculated by CIE1964 CMF

因此,对老年观察者,CIE1964 优化后的 BIGC_{Old} 颜色匹配函数为

$$\begin{cases} \text{BIGC } \bar{x}_{\text{Old}}(\lambda) = \bar{x}_{10}(\lambda) \times \omega_{x\text{Old}}(\lambda) \\ \text{BIGC } \bar{y}_{\text{Old}}(\lambda) = \bar{y}_{10}(\lambda) \times \omega_{y\text{Old}}(\lambda) \\ \text{BIGC } \bar{z}_{\text{Old}}(\lambda) = \bar{z}_{10}(\lambda) \times \omega_{z\text{Old}}(\lambda) \end{cases} \quad (5)$$

图 8 给出了原始的 CIE1964 颜色匹配函数和针对各年龄段目视色差,优化后的 BIGC 颜色匹配函数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 各通道的光谱响应分布。可见,老年观察者的光谱响应除了具有一定的长波段方向平移外,在峰值波长处的光谱响应也较年轻观察者有所下降。

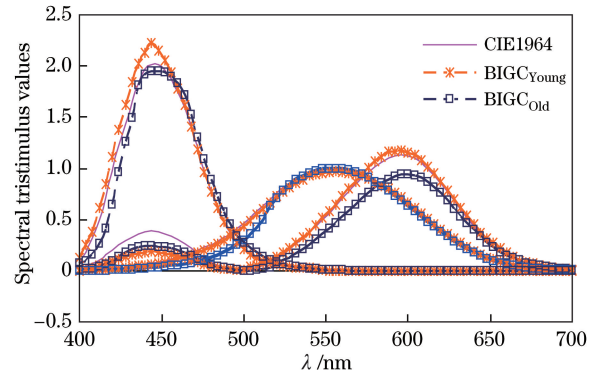


图 8 优化前、后不同年龄观察者锥细胞响应的 CIE1964 颜色匹配函数

Fig. 8 CIE1964 CMFs for different age-group observers before and after optimization

利用优化后的 $\text{BIGC}_{\text{Young}}$ 计算 30 名年轻观察者所得结果的平均 STRESS 值为 37.7, BIGC_{Old} 计算 26 名老年观察者所得结果的平均 STRESS 值为 28.2。表 4 给出了优化前、后 56 名观察者对应的最佳匹配颜色匹配函数(最小 STRESS 值)人数分布。

由表 4 可知,优化后,年轻观察者中有 19 人,老

表 4 不同颜色匹配函数计算不同年龄观察者的表现
Table 4 Performance of different CMFs for young and old observers

Observer	CIE				S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
	1931	1964	2006	BIGC								
Young	Original					14				11	5	
	Modified				19					7	4	
Old	Original	19				1					6	
	Modified				20	1					5	

年观察者中有 20 人所得结果与 BIGC CMFs 匹配。同时,年轻观察者中仍有 4 人与 S7,老年观察者中仍有 1 人所得结果与 S2 的计算结果匹配。说明不同年龄段观察者中仍有部分观察者与该年龄段的大多数观察者锥细胞响应存在差异。

4 优化后的 BIGC CMFs 检验

利用优化后 BIGC 颜色匹配函数检验其在 LED 光源照明下的表现,共有 6 名年轻和 4 名老年观察者参与目视评价实验(实验精度满足要求)。结果如表 5 所示,第一列为在 D65 光源照明下观察者的编号和测试颜色匹配函数分类,表中加粗字体为计算最小 STRESS 值对应的颜色匹配函数。

可见,利用优化后的 BIGC 颜色匹配函数计算 LED 光源照明下不同观察者评价 20 对色样对目视色差结果,较原始颜色匹配函数具有较明显的改善。计算年轻观察者所得结果的平均 STRESS 值由 45.5 降低到 36.1,计算老年观察者所得结果的平均

STRESS 值由 55.0 降低到 30.5。优化后的 CIE1964 颜色匹配函数表现优于其他 11 个颜色匹配函数的计算结果,有最小的 STRESS 值。同时,D65 光源照明下的观察者分类,与 LED 光源照明下的观察者分类并非完全一致,这也验证了观察者个体的颜色匹配函数分类并非完全固定,其会随着外界观察条件和实验测试样本等发生变化^[16]。

5 结 论

利用 STRESS 因子和相关系数 r 评价各颜色匹配函数计算不同年龄观察者锥细胞响应的表现。结果表明,针对年轻观察者和老年观察者的计算结果具较大差异。选用 CIE1964 颜色匹配函数进行了 D65 光源照明下不同年龄段观察者目视评价测试的优化,优化后的 BIGC 颜色匹配函数的计算性能有所提高,检验 LED 光源照明下不同年龄观察者的实验结果,测试性能也有所提高。优化后其计算性能为所有颜色匹配函数中的最优,有最小的 STRESS

表 5 各颜色匹配函数在 LED 光源照明下的表现
Table 5 Performance of different CMFs under LED light source

Number of observer	CIE				S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	
	1931	1964	2006	BIGC									
No. 7(S6)	38.3	34.1	33.4	28.5	36.8	31.8	34.8	36.4	34.2	30.9	32.8	33.7	
No. 10(S6)	45.2	37.2	34.9	31.6	41.4	34.8	38.0	39.0	36.7	33.2	38.8	38.3	
No. 13(BIGC)	53.8	52.4	49.1	48.4	55.3	50.5	53.1	52.4	51.5	49.0	54.9	54.0	
Young	No. 16(BIGC)	43.7	40.3	48.8	30.9	44.7	36.4	39.7	41.9	39.7	36.8	41.0	40.0
No. 18(BIGC)	50.3	53.7	53.6	44.7	57.1	48.1	51.8	55.9	53.9	52.1	48.9	50.5	
No. 27(S6)	40.8	43.1	41.6	32.6	46.4	37.9	41.8	45.3	43.1	40.0	38.6	40.1	
Mean	47.0	45.5	43.6	36.1	48.7	42.3	45.4	46.9	45.1	42.4	44.8	45.1	
No. 3(BIGC)	57.2	68.7	60.6	39.7	70.9	64.0	66.7	68.8	68.2	68.5	65.5	66.5	
No. 4(BIGC)	49.8	60.6	46.1	35.7	63.7	55.9	59.8	60.3	59.4	58.1	58.5	59.7	
Old	No. 9(S7)	32.3	41.0	38.7	22.4	43.9	33.5	37.4	42.3	41.1	41.8	36.3	37.2
No. 10(BIGC)	38.3	49.5	48.4	24.3	52.2	43.0	46.7	50.3	49.3	49.9	44.9	46.1	
Mean	44.4	55.0	48.5	30.5	57.7	49.1	52.6	55.4	54.5	54.6	51.3	52.4	

值和最多的观察者分布人数。课题组后期将主要研究 LED 光源下不同年龄观察者的辨色差异,并进一步研究不同颜色匹配函数的表现性能。

参 考 文 献

- [1] Long D L, Fairchild M D. Modeling observer variability and metamerism failure in electronic color displays[J]. *Journal of Imaging Science & Technology*, 2014, 58(3): 030402.
- [2] Ramanath R. Minimizing observer metamerism in display systems[J]. *Color Research & Application*, 2009, 34(5): 391-398.
- [3] Sarkar A, Blondé L, Callet P L, *et al.* A color matching experiment using two displays: design considerations and pilot test results[C]. *2010 Final Program and Proceedings of Colour in Graphics, Imaging, and Vision (CGIV)*, 2010: 414-422.
- [4] Guild J. The colorimetric properties of the spectrum[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 1931, 230: 149-187.
- [5] Speranskaya N I. Determination of spectrum color coordinates for 27 normal observers[J]. *Optics & Spectroscopy*, 1959, 7: 424-428.
- [6] CIE. Fundamental chromaticity diagram with physiological axes[R]. *CIE Technical Report*, 2006: 170-171.
- [7] Sarkar A. Identification and assignment of colorimetric observer categories and their applications in color and vision sciences[D]. Nantes: Université de Nantes, 2011.
- [8] Sarkar A, Autrusseau F, Viénot F, *et al.* From CIE 2006 physiological model to improved age-dependent and average colorimetric observers[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2011, 28(10): 2033-2048.
- [9] Asano Y, Fairchild M D, Blondé L, *et al.* Multiple color matches to estimate human color vision sensitivities[C]. *International Conference on Image and Signal Processing*, 2014: 18-25.
- [10] He R L, Huang M, Guo C L, *et al.* Chromatism 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.
- [11] Stockman A, Sharpe L T. The spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype[J]. *Vision Research*, 2000, 40(13): 1711-1737.
- [12] Stiles W S, Burch J M. N. P. L. color-matching investigation: final report[J]. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 1959, 6(1): 1-26.
- [13] Kraft J M, Werner J S. Aging and the saturation of colors. 1. Colorimetric purity discrimination[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1999, 16(2): 223-30.
- [14] Asano Y, Fairchild M D, Blondé L. Observer variability experiment using a four-primary display and its relationship with physiological factors[C]. *International Conference on Color and Imaging Conference*, 2013: 171-176.
- [15] García P A, Huertas R, Melgosa M, *et al.* Measurement of the relationship between perceived and computed color differences[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2007, 24(7): 1823-9.
- [16] Asano Y. Individual colorimetric observers for personalized color imaging[D]. Rochester: Munsell Color Science Laboratory, Rochester Institute of Technology, 2015.