

# 基于不同颜色方向和空间频率的彩色对比 灵敏度特性研究

吕玮阁<sup>1</sup> 徐海松<sup>1</sup> 汪哲弘<sup>2</sup> M. Ronnier Luo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

<sup>2</sup> 杭州电子科技大学新闻出版学院, 浙江 杭州 310037

<sup>3</sup> Department of Color Science, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK

**摘要** 为了研究不同空间频率和颜色方向的彩色对比灵敏度特性,在 0.5~11.7 cycle / (°) 的空间频率范围内分别在 6° 和 10° 视场下以灰色或红色为颜色中心,在 CIELAB 颜色空间的等亮度面上选取 6 个颜色方向,采用交叉阶梯法通过心理物理视觉实验测得以色差阈值倒数定义的彩色对比灵敏度。基于实验数据比较了不同颜色方向上低通形式的彩色对比灵敏度函数(CSF)曲线,并拟合得到不同空间频率下的彩色对比度阈值椭圆。随空间频率增大,阈值椭圆的面积变大,长短半轴比变化,同时发生旋转,导致彩色对比灵敏度随空间频率和颜色方向而改变,即色貌随空间频率的变化;视场增大使椭圆方位角的峰值以及长短半轴比的波动区间向低频方向移动,且红色中心的变化趋势与相应视场的灰色中心相似,只是总体数值偏低。

**关键词** 视觉与色彩;彩色对比灵敏度;对比度阈值椭圆;空间频率;颜色方向

**中图分类号** O432.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0133002

## Investigation of Chromatic Contrast Sensitivity Based on Different Color Directions and Spatial Frequencies

Lü Weige<sup>1</sup> Xu Haisong<sup>1</sup> Wang Zhehong<sup>2</sup> M. Ronnier Luo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

<sup>2</sup> College of Printing Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310037, China

<sup>3</sup> Department of Color Science, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK

**Abstract** Based on the interleaved staircase method, the psychophysical visual experiment is carried out to investigate the spatial and color directional characteristics of chromatic contrast sensitivity. For the spatial frequencies from 0.5 to 11.7 cycle / (°) under the viewing field of 6° and 10°, the chromatic contrast sensitivity which is defined as the reciprocal of the color-difference threshold is measured in 6 color directions in the iso-luminance plane of CIELAB color space at the two color centers of gray and red. The low-pass chromatic contrast sensitivity functions (CSF) of different color directions are compared, and the chromatic contrast threshold ellipses of different frequencies are fitted. With the increase of spatial frequency, the ellipse rotate with larger sizes and change ratio of semi-axis, which results in the change of chromatic contrast sensitivity with spatial frequencies and color directions, and implies the change of color appearance with the spatial frequencies. With the increase of viewing field, the ellipses' peak azimuths and the fluctuation bands of semi-axis ratio shift to the lower frequencies, the tendency of which for red center is similar, but with lower values, to that of gray center under the same viewing field.

**Key words** vision and color; chromatic contrast sensitivity; contrast threshold ellipse; spatial frequency; color direction

**OCIS codes** 330.1710; 330.1720; 330.1800; 330.5510

**收稿日期**: 2010-04-26; **收到修改稿日期**: 2010-06-13

**基金项目**: 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室开放课题资助项目。

**作者简介**: 吕玮阁(1981—),女,博士研究生,主要从事颜色科学及图像技术等方面的研究。E-mail: lvweige@163.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、光度学与色度学和光辐射测量等方面的研究。E-mail: chsxu@zju.edu.cn(中国光学学会会员号: S040111212S)

## 1 引言

对比灵敏度函数(CSF)是描述人眼视觉系统空间特性的主要指标之一,在眼科医学、视觉研究以及图像处理与质量评价等领域都有重要意义。其中亮度 CSF 经过大量实验测量及理论研究,已获得相对成熟的物理模型及其数学拟合公式<sup>[1~4]</sup>;而颜色对 CSF 的影响还存在诸多问题有待探讨,如彩色背景下亮度 CSF 的模型<sup>[5]</sup>、彩色 CSF 的不同定义及其在不同颜色方向的特性测量<sup>[6~10]</sup>等。目前对彩色 CSF 的测量多集中于颜色空间的坐标轴方向上,而其他颜色方向的特性研究少有报道。亮度对比度的调制方向只有一个,但是彩色对比度的调制方向却可以在任意颜色方向上进行,因此仅用颜色轴上的 CSF 曲线来描述人眼彩色视觉的空间特性缺乏完整性和系统性。

本文基于 CIELAB 颜色空间,在等亮度面上选取不同颜色中心作为彩色正弦条纹的平均颜色,选取多个不同颜色方向调制彩色正弦条纹的色度参数,对不同视场下的彩色对比灵敏度在  $0.5 \sim 11.7 \text{ cycle}/(^{\circ})$  的空间频率范围内进行视觉测量,以分析颜色方向对彩色 CSF 的影响。同时,通过对实验数据的拟合而得到不同空间频率下的彩色对比度阈值色度椭圆,进一步讨论了彩色对比灵敏度的影响因素及其变化趋势。

## 2 实验方案

彩色对比灵敏度定义为彩色正弦条纹恰可察觉

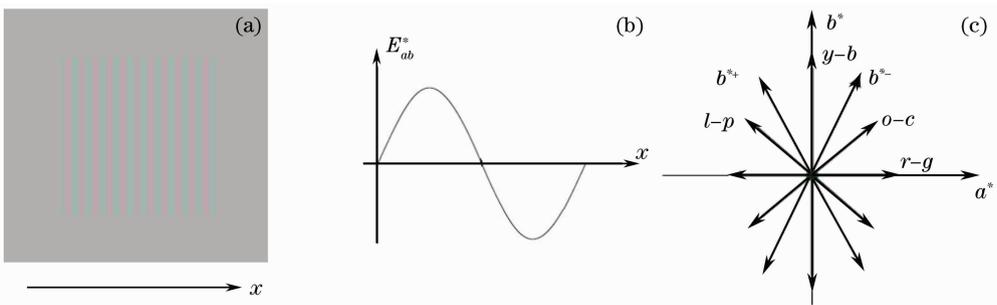


图 1 测试图样及其色度调制

Fig. 1 Test pattern and its chrominance modulation

共有 6 名观察者参与视觉评估,均为浙江大学在读研究生,男 4 人,女 2 人,年龄在  $23 \sim 30$  岁之间,色觉正常,视力正常或经过校正后都在 1.2 以上,并在实验前均经过 2 min 暗适应和 1 min 亮适应过程,其中亮适应时仅显示与条纹平均颜色一致的均匀背景色。每位观察者每天测试不超过 2 次,每次测试时间不超过 30 min,以避免长时间观察产生视觉疲劳。实验采用 2AFC(2-alternative forced

choice)心理物理学交叉阶梯法<sup>[8,12]</sup>,对被试的操作要求较低,测试精度高,且有稳定的测试步骤。实验设备包括阴极射线管(CRT)显示器 Neso FD570A,分辨率设在 85 Hz 时为  $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ ,白场色温接近 D65(实测 CIE1931 色品坐标  $x=0.3122, y=0.3292$ ),白点亮度  $104.53 \text{ cd}/\text{m}^2$ ,黑点亮度  $0.75 \text{ cd}/\text{m}^2$ 。实验采用抖动技术提高显示器的幅度分辨率,通过色品坐标可变的线性分段

$$\begin{cases} a^*(x) = a_0^* + E_{ab}^* \sin(2\pi fx/D) \cos \theta_{rg} \\ b^*(x) = b_0^* + E_{ab}^* \sin(2\pi fx/D) \sin \theta_{rg} \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $a_0^*, b_0^*$  为颜色中心的色度参数,  $\theta_{rg}$  为  $rg$  颜色方向与  $a^*$  轴的夹角,  $f$  是以  $\text{cycle}/(^{\circ})$  为单位的空间频率,  $D$  为观察距离;测试的颜色方向  $rg, oc, b^{*-}, yb, b^{*+}$  和  $lp$  与  $a^*$  轴的夹角分别为  $0, 45^{\circ}, 67.5^{\circ}, 90^{\circ}, 112.5^{\circ}$  和  $135^{\circ}$ ;颜色中心选用灰色( $L^* = 76, a^* = b^* = 0$ )和红色( $L^* = 44, a^* = 37, b^* = 23$ ),均为 CIE 推荐用于辨色特性评价的基本颜色中心<sup>[11]</sup>,而背景与条纹的平均颜色(即颜色中心)一致。参考相关文献<sup>[2, 3, 5~10]</sup>并考虑到图像应用中视场通常较大,故采用  $6^{\circ}$  和  $10^{\circ}$  视场进行对比;由于空间频率低于  $0.5 \text{ cycle}/(^{\circ})$  时条纹数目较少难以得到准确的测量结果,故测量的空间频率范围选为  $0.5 \sim 11.7 \text{ cycle}/(^{\circ})$ 。

choice)心理物理学交叉阶梯法<sup>[8,12]</sup>,对被试的操作要求较低,测试精度高,且有稳定的测试步骤。

实验设备包括阴极射线管(CRT)显示器 Neso FD570A,分辨率设在 85 Hz 时为  $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ ,白场色温接近 D65(实测 CIE1931 色品坐标  $x=0.3122, y=0.3292$ ),白点亮度  $104.53 \text{ cd}/\text{m}^2$ ,黑点亮度  $0.75 \text{ cd}/\text{m}^2$ 。实验采用抖动技术提高显示器的幅度分辨率,通过色品坐标可变的线性分段

插值 (PLVC) 模型进行 CRT 的色度特征化标定<sup>[13~15]</sup>, 实测特征化精度的平均值为  $0.48 \Delta E_{cb}^*$ 。

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 彩色 CSF 曲线

一般认为彩色 CSF 呈低通形式, 但其数学模型较少。采用指数模型<sup>[9]</sup>对实验数据进行拟合, 得到  $6^\circ$  视场下灰色中心 (记为 Gray- $6^\circ$ ) 在 6 个测试颜色方向上的拟合曲线如图 2 所示。其中彩色对比灵敏度定义为彩色对比度阈值  $C_t$  的倒数, 即

$$S_{\text{CSF}}(f) = \frac{1}{C_t} = a \exp(bf^c), \quad (2)$$

式中  $f$  是以  $\text{cycle}/^\circ$  为单位的空间频率,  $a, b, c$  都是拟合参数。

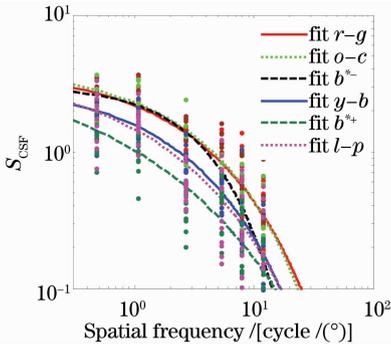


图 2 gray- $6^\circ$  的彩色 CSF

Fig. 2 Chromatic CSF for gray- $6^\circ$

可见, 所有颜色方向的彩色 CSF 曲线符合低通形式, 即空间频率越高, 对颜色对比度越不敏感。在  $0.5 \sim 11.7 \text{ cycle}/^\circ$  的空间频率范围内,  $o-c$  和  $r-g$  方向上的 CSF 最大, 即颜色对比度感知最灵敏, 其次是  $y-b$  和  $l-p$  方向,  $b^{*-}$  方向的灵敏度低频时接近  $r-g$  方向, 高频时接近  $y-b$  方向, 最不灵敏的是  $b^{*+}$  方向。

在已有为数不多的彩色 CSF 研究中, 彩色 CSF 的定义及其测量的颜色空间等并不统一。但是, 绝大多数文献<sup>[6~10]</sup>的实验数据都表明, 对于灰色中心, 红/绿方向 ( $r-g$ ) 的灵敏度大于黄/蓝方向 ( $y-b$ )。此外, 参照均匀色块的颜色辨别阈值实验结果<sup>[11]</sup>, 其红/绿方向的辨色阈值小于黄/蓝方向, 这与彩色 CSF 在 0 的情况相对应, 因此本文的测量结果与之吻合。

#### 3.2 彩色对比度阈值椭圆

在基于均匀色块测量人眼视觉系统辨色特性的研究中<sup>[12]</sup>, 常用色度椭圆拟合颜色中心在多个颜色方向的视觉色差阈值。而本文的彩色 CSF 正是通

过色差阈值来定义的, 因此为了更加直观形象地表现彩色对比灵敏度随颜色方向的变化趋势, 本研究采用色度椭圆拟合一定频率下不同颜色方向上对抗色条纹的对比度阈值, 以进一步分析彩色对比灵敏度的空间频率特性及其随颜色方向的变化规律, 并对不同视场及颜色中心的情况进行对比。

##### 3.2.1 彩色对比度阈值椭圆拟合及特性分析

彩色对比度阈值椭圆表示对应颜色中心区域具有一定空间频率的对抗色条纹的对比度阈值轮廓线, 其参量包括长半轴  $A$ 、长短半轴比  $A/B$ 、方位角  $\theta$  以及面积平方根  $\sqrt{\pi AB}$ 。由  $6^\circ$  视场下灰色中心不同空间频率的彩色对比度阈值实验数据分别拟合得到的椭圆如图 3 所示, 其参数如表 1 所示。

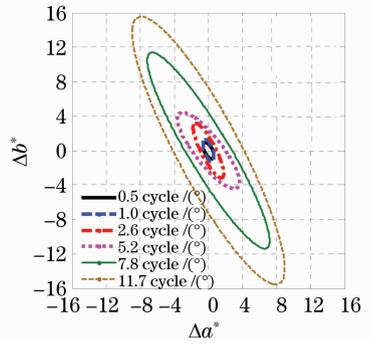


图 3 gray- $6^\circ$  的彩色对比度阈值椭圆

Fig. 3 Chromatic contrast threshold ellipses for gray- $6^\circ$

表 1 gray- $6^\circ$  的彩色对比度阈值椭圆参量

Table 1 Parameters of the chromatic contrast threshold ellipses for gray- $6^\circ$

Spatial frequency / [cycle/°]	$A$	$A/B$	$\theta$	$\sqrt{\pi AB}$
0.5	1.04	2.17	118.11	1.25
1.0	1.34	2.61	110.04	1.47
2.6	3.55	4.16	117.43	3.09
5.2	5.52	3.45	128.33	5.27
7.8	13.26	5.54	121.30	9.98
11.7	17.56	4.73	118.33	14.30

可见, 人眼对灰色中心的彩色对比度阈值椭圆的大小、形状和方位角均随空间频率而变化, 在同一空间频率下的彩色对比度阈值随颜色方向而不同, 从而形成阈值椭圆。椭圆的长轴方向代表了当前空间频率下彩色对比度感知最不灵敏的颜色方向, 而短轴方向则对应于最灵敏的方向, 从而直观地表明了各颜色方向的灵敏度变化情况。彩色椭圆的长轴和面积随空间频率的增加而变大, 体现了人眼彩色对比灵敏度的低通特性; 椭圆的长短半轴比基本也呈现了随空间频率而增大的趋势, 说明空间频率越

大, CIELAB 颜色空间等亮度面上灰色区的局部视觉均匀性越差, 但在某些频段出现较大波动, 如在 5.2 cycle / (°) 附近的 A/B 值突然降低 (虽然此处观察者精度相对较低, 但在实验中其下降的趋势是相同的)。椭圆方位角的变化表明对比度阈值椭圆随空间频率的变化所产生的旋转, 即彩色对比灵敏度的方向特性随空间频率的变化趋势。对于 6° 视场下灰色中心, 椭圆方位角变化不大, 在 0.5~11.7 cycle / (°) 的空间频率范围内其值在 5.2 cycle / (°) 附近达到峰值 128° (接近  $l-p$  方向), 而后椭圆随空间频率的增大较缓慢地顺时针旋转, 方位角降至 118° (接近  $b^{*+}$  方向), 最灵敏的颜色方向在 70° (接近  $b^{*-}$  方向) 到 52° (接近  $o-c$  方向) 之间变化。

表 2 gray-6° 的观察者测试重复性和准确度 (STRESS 表示)

Table 2 Observer's test repeatability and accuracy in terms of STRESS for gray-6°

Spatial frequency / [cycle / (°)]	Observer repeatability			Observer accuracy		
	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min
0.5	20	24	17	24	28	21
1	21	32	11	25	43	17
2.6	15	20	13	19	24	13
5.2	14	19	8	29	47	8
7.8	17	23	8	30	42	11
11.7	15	22	9	28	50	10

### 3.2.3 不同视场和颜色中心的空间频率和颜色方向特性比较

为了进一步研究视场及颜色中心对彩色对比灵敏度空间及方向特性的影响, 实验还测量了 6° 视场下红色中心 (red-6°) 以及 10° 视场下灰色中心 (gray-10°) 的彩色对比度阈值, 以便与 6° 视场下灰色中心 (gray-6°) 的特性进行对比, 其拟合椭圆分别如图 4 和图 5 所示。

由图 3 与图 4 和图 5 的比较可知, 阈值椭圆的方位角、面积和形状均随空间频率而变化, 并受到视

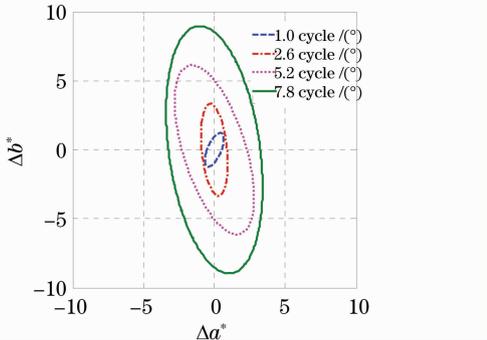


图 4 red-6° 的彩色对比度阈值椭圆

Fig. 4 Chromatic contrast threshold ellipses for red-6°

### 3.2.2 观察者精度

采用色差研究中常用的统计参数 (STRESS) 值评价各观察者的测试重复性和准确度。以每个观察者在每个空间频率下的全部测试数据拟合得到相应的色度椭圆, 并以各测试颜色方向上的数据作为参照值, 计算出每个观察者的测试重复性; 以全部观察者在每个空间频率下的测试数据拟合色度椭圆, 并以各颜色方向上的测量数据为参照值, 计算出每个观察者的测试准确度, 其中对 6° 视场下灰色颜色中心的统计数据如表 2 所示。与经典实验数据比较<sup>[12,16~18]</sup>可知, 实验的观察者精度均在可接受的范围内, 一致性较好, 因此可认为研究的实验数据是有效的。

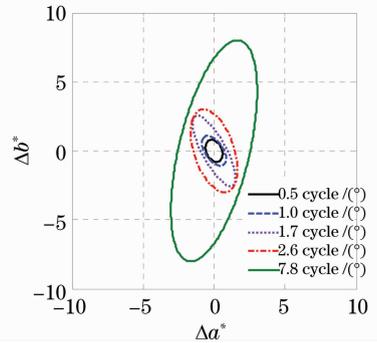


图 5 gray-10° 的彩色对比度阈值椭圆

Fig. 5 Chromatic contrast threshold ellipses for gray-10°

场及颜色中心的影响。图 6 给出了上述三种情况下椭圆参数随空间频率的具体变化趋势, 其中椭圆的长轴和面积均随空间频率的增加而变大, 而视场大小和作为视觉刺激的测试条纹的平均颜色对其几乎没有影响。

椭圆的长短半轴比基本也呈现了随空间频率而增大的趋势, 但在某些频段出现较大波动, 而且不同视场下其出现波动的频段也不同, 如灰色中心在 6° 视场下 5.2 cycle / (°) 附近及 10° 视场下 2.6 cycle / (°) 附

近的  $A/B$  值突然降低。在相同视场 ( $6^\circ$ ) 下, 红色中心的  $A/B$  值变化趋势与灰色中心类似, 但数值略低

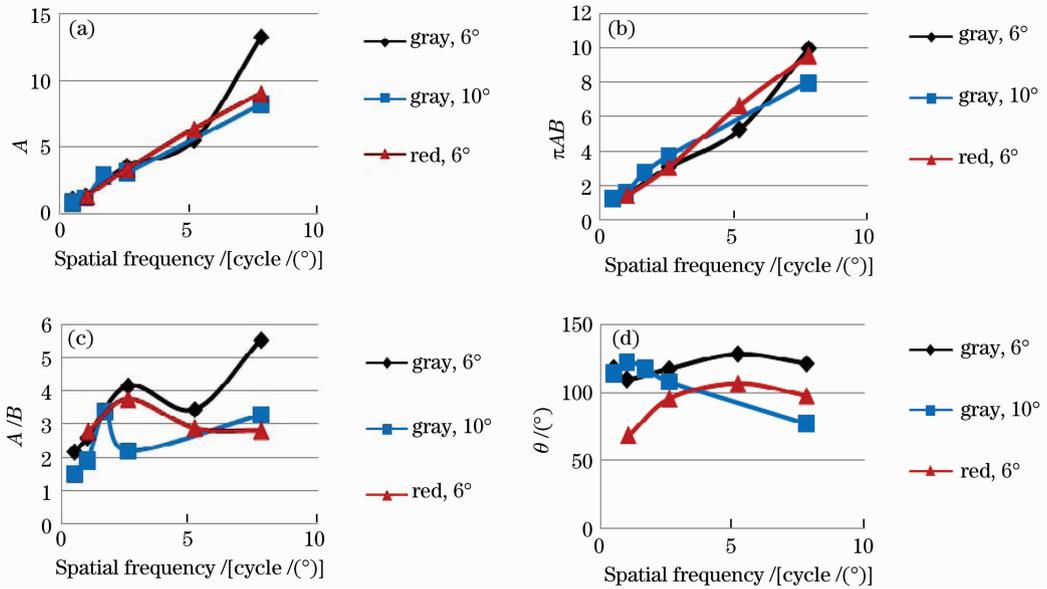


图6 椭圆参数随空间频率的变化

Fig. 6 Change of ellipse parameters with spatial frequencies

椭圆方位角随空间频率基本呈先增加再减小的变化趋势。不同视场下方位角出现峰值的频段以及方位角的变化范围不同, 如灰色中心在  $6^\circ$  视场下于  $5.2 \text{ cycle}/^\circ$  附近达到峰值  $128^\circ$ , 在  $0.5 \sim 7.8 \text{ cycle}/^\circ$  的空间频率范围内其值在  $110^\circ$  (接近  $b^{*+}$  方向) 到  $128^\circ$  (接近  $t-p$  方向) 之间变化; 而  $10^\circ$  视场下则在  $1 \text{ cycle}/^\circ$  附近出现峰值约  $123^\circ$ , 在同样的空间频率范围内其值从  $114^\circ$  增大到  $123^\circ$  ( $b^{*+}$  方向与  $t-p$  方向之间), 而后持续降至  $77^\circ$  (接近  $b^{*-}$  方向), 故而在高频段旋转了较大的角度。红色中心方位角的变化趋势与相应视场 ( $6^\circ$ ) 的灰色中心相似, 也在  $5.2 \text{ cycle}/^\circ$  附近达到峰值  $107^\circ$ , 只是总体数值偏低, 在  $1.0 \sim 7.8 \text{ cycle}/^\circ$  的空间频率范围内其值在  $68^\circ$  (接近  $b^{*-}$  方向) 到  $107^\circ$  (接近  $b^{*+}$  方向) 之间变化。由基于均匀色块的辨色阈值实验<sup>[11]</sup> 可知, 灰色中心阈值椭圆的方位角 (约  $114^\circ$ ) 高于红色中心的方位角 (约  $79^\circ$ ), 与实验的相关结果一致。

尽管人眼视觉系统的彩色对比灵敏度呈低通特性, 但通过实验发现在某些频段 (接近于人眼视觉系统在同样观察条件下对亮度对比度最灵敏的空间频段), 彩色对比度阈值椭圆往往表现出特别的性质, 如其方位角在此出现峰值、长短半轴之比突然降低等, 但因实验所测空间频率范围所限, 尚需在后继研究中对此进行深入探讨。

且在高频时相差甚大, 即高频时红色区的视觉均匀性明显优于灰色区。

### 3.3 空间频率对色貌的影响

Poirson 和 Wandell 在 1996 年提出的对抗颜色空间 (Poirson | | Wandell Opponent Space)<sup>[7,8]</sup> 是基于 LMS 视锥空间的实验数据, 以频率和色彩的可分离性为优化目标设计的, 其不同空间频率下的阈值椭圆主轴方向基本一致。而本文实验结果表明, 在 CIELAB 空间等亮度面上同一个颜色中心的彩色对比度阈值椭圆的形状和主轴方向均随空间频率而变化, 这意味着频率和色彩的可分离性在 CIELAB 颜色空间并非严格成立。

空间频率会改变颜色的外貌, 同时对比效应、扩散效应都是与颜色刺激的空间结构直接相关的色貌现象。此外, 空间频率增大, 往往使颜色的感知彩度降低, 这导致彩色对比灵敏度随空间频率的增大而减小。彩色对比度阈值椭圆随空间频率的旋转及变形, 也是空间频率变化引起的一种色貌偏移现象, 其复杂的内在机理可能与上述效应有关, 有待进一步研究。空间频率是彩色复杂图像的重要特性, 因此在色貌理论研究中继 CIECAM02 模型后提出了图像色貌模型 (iCAM), 考虑了人眼的空间视觉特性, 即在 IPT 颜色空间中采用相应的 CSF 函数进行滤波。这应该是色貌模型改进和发展的方向之一, 我们将在下一步的工作中结合 iCAM 对图像色貌进行分析研究。

## 4 结 论

采用交叉阶梯法测量了  $6^\circ$  和  $10^\circ$  视场下 CIELAB 颜色空间等亮度面上灰色中心和  $6^\circ$  视场下红色中心在多个颜色方向上不同空间频率下的人眼彩色对比度阈值。基于实验数据采用指数模型获得了不同颜色方向上的 CSF 曲线,并拟合得到不同空间频率下的彩色对比度阈值椭圆。彩色 CSF 曲线在所有颜色方向上均符合低通形式,各颜色方向的彩色对比灵敏度与此方向上的彩色对比度阈值椭圆截距成反比。随空间频率增大,阈值椭圆的面积均变大,同时发生旋转和变形,导致彩色对比灵敏度的颜色方向特性随之改变。同时,视场增大使椭圆方位角  $\theta$  的峰值以及长短半轴比  $A/B$  的波动区间向低频方向移动,而红色中心下  $\theta$  及  $A/B$  的变化趋势与相应视场的灰色中心相似,只是总体数值偏低。尽管人眼视觉系统的彩色 CSF 呈低通特性,但在对应观察条件下亮度 CSF 的某些带通频段附近,彩色对比度阈值椭圆的方位角及长短半轴比表现出特别的性质。因此,为了建立更加完善的色貌模型以适用于包含丰富颜色和空间频率的复杂图像色貌的评价,尚需对彩色对比灵敏度的空间频率和颜色方向等相关特性进行更多的深入研究。

## 参 考 文 献

- 1 J. M. Rovamo, M. I. Kankaanpää, H. Kukkonen. Modelling spatial contrast sensitivity functions for chromatic and luminance-modulated gratings [J]. *Vision Research*, 1999, **39** (14): 2387~2398
- 2 Peter G. J. Barten. Formula for the contrast sensitivity of the human eye[C]. *SPIE*, 2004, **5294**: 231~238
- 3 Shi Junsheng, Yao Juncai, Yu Hongfei *et al.*. Measurement of luminance contrast sensitivity function of human vision system on cathode ray tube display[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 744~748  
石俊生,姚军财,余鸿飞等.用显示器测量人眼对比度敏感函数[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 744~748
- 4 G. M. Johnson, M. D. Fairchild. On contrast sensitivity in an image difference model[C]. IS & T PICS 2002, Portland, 2002: 18~23
- 5 Stephen Westland. Model of luminance contrast sensitivity function for application to image assessment [J]. *Col. Res. Appl.*, 2006, **31**(4): 315~319

- 6 K. T. Mullen. The contrast sensitivity of human colour vision to red-green and blue-yellow chromatic gratings[J]. *J. Physiol.*, 1985, **359**: 381~400
- 7 Allen B. Poirson, Brian A. Wandell. Pattern-color separable pathways predict sensitivity to simple colored patterns [J]. *Vision Res.*, 1996, **36**(4): 515~526
- 8 M. Nadenau. Integration of Human Colour Vision Models into High Quality Image Compression[D]. Switzerland: école Poly technique Fédérale de Lausanne, 2000: 49~86
- 9 H. C. Owens, S. Westland, K. Van de Velde *et al.*. Contrast sensitivity for lime-purple and cyan-orange gratings[C]. IS & T/SID Tenth Color Imaging Conference, 2002: 145~148
- 10 Shi Junsheng, Yu Hongfei. Color difference sensitivity of human vision system for red-green and yellow-blue directions[C]. *SPIE*, 2005, **6033**: 60330M-1
- 11 A. R. Robertson. CIE guidelines for coordinated research on colour-difference evaluation[J]. *Col. Res. Appl.*, 1978, **3**(3): 149~151
- 12 Wang Zhehong, Xu Haisong. Study on color discrimination threshold using CRT display part I: analysis of experimental data and human color vision characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1139~1144  
汪哲弘,徐海松.用阴极射线管显示器研究辨色阈值 I: 实验数据及人眼颜色视觉特性分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1139~1144
- 13 Jean-Baptiste Thomas, Jon Y. Hardeberg, Ire`ne Foucherot *et al.*. The PLVC display color characterization model revisited[J]. *Col. Res. Appl.*, 2008, **33**(6): 449~460
- 14 Liao Ningfang, Shi Junsheng, Zeng Hua *et al.*. Analysis of interactive errors in conventional CRT colorimetric prediction model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(1): 133~138  
廖宁放,石俊生,曾华等.传统阴极射线管色度预测模型的相干误差分析[J]. *光学学报*, 2000, **20**(1): 133~138
- 15 Zhang Ziyang, Shi Junsheng, Yu Hongfei *et al.*. Accuracy of visual estimating gamma value for CRT monitor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1746~1750  
张子扬,石俊生,余鸿飞等.视觉估计阴极射线管显示器伽玛值精度研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1746~1750
- 16 Manuel Melgosa, Rafael Huertas, Roy S. Berns. Performance of recent advanced color-difference formulas using the standardized residual sum of squares index[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, **25**(7): 1828~1834
- 17 Wang Han, Xu Haisong, Guihua Cui *et al.*. Evaluation of very large colour difference based on object surface colours[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1801~1806  
王寒,徐海松,Guihua Cui等.基于物体表面色的超大色差评价[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1801~1806
- 18 Wang Zhehong, Xu Haisong. Evaluation of color-difference formulae based on the correlation between visual tolerances and hue angles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1838~1841  
汪哲弘,徐海松.基于视觉容差与色调角相关性的色差公式评价[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1838~1841