

图文信息技术

人眼明度视觉对比敏感度特性测量

杨晟炜¹, 方恩印¹, 郑亮¹, 许向阳²

(1.上海出版印刷高等专科学校, 上海 200093; 2.深圳职业技术学院, 广东 深圳 518055)

摘要: **目的** 研究人眼明度视觉感受野“中心-周边”的拮抗特征。**方法** 设计心理物理实验, 测量视觉感知颜色空间 CIELAB 明度轴上 5 个明度样本在 11 个空间频率上的对比敏感度数据; 分别采用一元分析法和主成分分析法对实验采集数据进行分析, 对比不同明度视觉、空间频率以及对比敏感度阈值之间的函数关系。**结果** 一元分析表明, 5 个明度样本的对比敏感度曲线表现为带通特性, 明度值越高带通特性越明显; 主成分分析表明, 以前 2 个主成分为新变量, 可描述人眼视觉感受野特性。**结论** 人眼视觉在低频 1~6 cpd 时表现出了“中心-周边”环绕的阶调传递特征; 在高频时人眼明度 CSF 与亮度 CSF 相似, 随着空间频率的升高, 人眼视觉对比敏感度降低。

关键词: 颜色视觉; 对比敏感度; 空间频率; CIELAB

中图分类号: TS801.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)19-0251-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.19.037

Measurement of the Lightness Contrast Sensitivity of Human Vision

YANG Sheng-wei¹, FANG En-yin¹, ZHENG Liang¹, XU Xiang-yang²

(1.Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China; 2.Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, China)

ABSTRACT: The work aims to study the antagonistic characteristics of human visual receptive field “center-surround”. Psychophysical experiments were designed to measure the contrast sensitivity data of 5 lightness samples on CIELAB lightness axis in visual perceptual color space at 11 spatial frequencies. The data collected from the experiments were analyzed by one-dimensional linear regression and principal component analysis, respectively. The functional relationship between different brightness vision, spatial frequency and contrast sensitivity threshold was compared. One-dimensional linear regression showed that, the contrast sensitivity curves of the five lightness samples showed band-pass characteristics, and the higher the lightness value, the more obvious the band-pass characteristics. Principal component analysis showed that, the former two principal components were new variables to describe the characteristics of human visual receptive field. The human vision shows a “center-surround” surrounding tone transfer characteristic at low frequencies of 1~6 cpd. At high frequencies, the brightness CSF of human eyes is similar to brightness CSF. As the spatial frequency increases, the contrast sensitivity of human vision decreases.

KEY WORDS: color vision; contrast sensitivity; spatial frequency; CIELAB

对比敏感度函数 (CSF) 是人眼颜色视觉一个重要属性, CSF 定义为人眼视觉对比敏感度阈值与空间频率的函数关系。早期的 CSF 研究多采用光学装置

测量人眼亮度 CSF, 建立亮度 CSF 模型^[1-4]。近年来显示器得到普及应用, 研究者采用显示器设计实验开展亮度或者彩色 CSF 的测量工作, 并取得了一些有

收稿日期: 2018-11-27

基金项目: “柔版印刷绿色制版与标准化实验室”招标课题 (ZBKT201804, ZBKT201705)

作者简介: 杨晟炜 (1984—), 男, 博士, 上海出版印刷高等专科学校讲师, 主要研究方向为图像处理、数字印刷。

价值的研究成果^[5-15]。Nadenau 为研究图像压缩技术,对亮度及 CIELAB, YCbCr 和 LMS 3 种不同色空间色度对比敏感度函数进行了测量^[5]; Johnson 为研究图像色差的计算,提出了对立色空间的 CSF 模型^[6];石俊生等测量了显示器在 3 种亮度等级条件下的对比敏感度^[8];徐海松等研究了 CIELAB 颜色空间等亮度面上不同颜色方向和空间频率的彩色对比灵敏度特性^[9];金杨测量了中等明度面上 CIELCH 颜色空间的不同色相角以及不同彩度的对比敏感度函数^[10]。张吉焱等研究了人眼对比敏感度函数测量方法^[11]。姚军财等测量了人眼明度对比敏感度函数特性等^[12-14]。在视觉对比敏感度函数测量中,研究者依据不同应用目标,采用的研究手段不同,早期的研究多是采用光学装置产生不同亮度对比度条纹刺激,系统设计复杂且不利于控制。近年来的 CSF 研究成果多采用显示器进行测试。目前与 CSF 测量相关的研究成果,或是针对亮度 CSF 的测量,或是针对等明度面上彩色 CSF 的测量。针对视觉感知颜色空间中明度 CSF 的测量稍有报导。人眼视觉颜色感知是以明度、色相、饱和度三属性来区分的。亮度是物理量,亮度 CSF 不能直接描述人眼明度视觉属性的空间频率响应。等明度面上彩色 CSF 也没有体现出明度属性变化的特性。明度 CSF 是人眼视觉明度颜色属性与空间频率的映射关系,即人眼视觉阶调传递函数。测量明度 CSF,对开发基于视觉感知颜色空间的图像处理算法有重要的理论指导意义。

1 视觉明度对比敏感度测量方法

明度视觉 CSF 定义为明度视觉恰可察觉对比度阈值与空间频率的函数关系。明度是人眼视觉颜色属性,是人眼视觉适应了观察环境亮度后的明暗感知。不同于亮度 CSF 的测量,明度 CSF 测量应基于视觉感知颜色空间的明度对比度阈值测量。文中选择 CIELAB 视觉感知颜色空间, CIELAB 颜色空间用 L 表示视觉明度, L 的取值范围为 0~100。不同于等明度面的彩色 CSF,这里的明度 CSF 应更全面地描述明度视觉的空间频率感知特性,在 CIELAB 明度轴上选取 5 个明度值 ($L=10, 25, 50, 75, 90$) 作为颜色样本点,代表人眼明度视觉的阶调反应,即低暗调、暗调、中间调、亮调、高亮调,对应于图像的阶调层次特征。

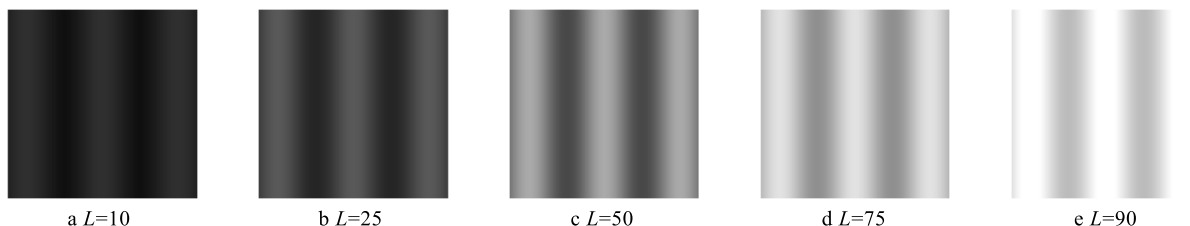


图1 测试图像实例

Fig.1 An example of the test image

CSF 的测量多采用心理物理实验方法,测量结果受到诸多因素的影响,包括视觉刺激图像、测试系统的稳定性、实验观察者及测试程序等^[5,9,10,15]。

1.1 视觉刺激

依据傅里叶分析理论,心理物理实验中的视觉刺激通常是正弦频率调制对比度变化的条纹图像。视觉刺激图像按式(1)制作。分别以所选的 5 个明度值为刺激图像的均值,称为明度中心或者背景色,对每个明度中心制作对比度按不同正弦波频率变化的图像序列,空间频率 f 的变化范围为 0~20 周期/°,用 cpd 表示,步长是 2。对比度按式(2)计算,对比度变化范围为 0~1。

$$I(x, y) = L(x, y) + \Delta L \sin 2\pi f x \quad (1)$$

式中: $I(x, y)$ 表示刺激图像颜色值; $L(x, y)$ 为明度中心值; f 表示空间频率变量; ΔL 表示明度变化量。图像序列的生成中, ΔL 的范围为 0~1, 步长为 0.001。

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2)$$

式中: C 为对比度, 范围为 0~1, $I_{\max}$ 和 $I_{\min}$ 分别是 $I(x, y)$ 的最大值和最小值, $I_{\max} = L(x, y) + \Delta L$, $I_{\min} = L(x, y) - \Delta L$ 。按照空间频率的步长设定若干图像序列, 每个图像序列中包含若干不同对比度的图像, 每个图像序列中包含有“完全没有条纹的图像”到“有清晰条纹的图像”, 刺激图像代表见图 1, 图 1a 是背景明度 $L=10$ 、周期为 1、对比度为 0.5 的图像样本, 同样情况, 对于背景明度 $L=10$ 时, 改变空间频率和对比度可以得到该背景明度时的其他图像样本。背景明度 $L=25$ 、周期为 1、对比度为 0.5 的图像样本代表见图 1b。背景明度 $L=50, 75, 90$ 的图像样本代表分别见图 1c—e。

1.2 测试程序

心理物理实验平台建立在暗室环境, 整个环境中只有观察用显示器发光, 观察环境颜色为灰色, 测试系统相关参数见表 1。

为保证测试系统颜色显示稳定, 实验前对观察用显示系统进行色彩校正, 系统校正目标和校正结果见表 2。

表 1 测试系统参数
Tab.1 Parameters of testing system

项目名称	参数值	项目名称	参数值
亮度	$\geq 30\pm 5\text{ cd/m}^2$	对比度	1000 : 1
刷新频率	60 Hz	最大色域	99.3% Adobe RGB
刺激尺寸	512 × 512 Pixels	伽玛值	1.0~2.6
像点大小	0.233	视角	178°
观察距离	1.6 m	色温	3 000~15 000 K
要求	Eyesight	分辨率	2560×1440

表 2 显示系统校正结果
Tab.2 Display of correction results of the system

项目	亮度	对比度	色温	Gama 值
目标值	120 cd/m ²	1000 : 1	D65	2.2
实际值	119 cd/m ²	698 : 1	6515 K	2.2
ICC 精度	ΔE_{94} 最大明度差 1.8		ΔE_{94} 平均明度差 0.66	

每次实验前，显示系统开机预热半小时以上，保证颜色的正确显示；实验用显示器定期校正，保证颜色显示的一致性。共有 6 名视觉正常的观察者参与实验，男 2 人，女 4 人，年龄在 19~22 岁之间，观察者的视力或者矫正视力在 1.0 以上。每位观察者在观察之前先经过 2 min 的暗适应和 1 min 的亮适应，亮适应让观察者适应测试明度中心的亮度。每次观察时间不超过 40 min，测试时上身着灰色衣服。每个明度中心的图像序列均是以空间频率固定对比度变化的方式随机显示，观察者正视刺激图像，当发现“恰可分辨条纹对比度差异”的图像，点击鼠标为该图像“投票”，测试系统自动记录下该图像的空间频率值和对比值。整个实验要求每位观察者重复 1 次。

1.3 明度对比敏感度的计算

明度对比敏感度定义为明度对比度的倒数。不同观察者因自身视觉生理特性及文化背景等不同，对颜色的感知能力也不尽相同，对同一明度中心同一空间频率下的对比敏感度感知是不相同的。实验图像刺激内容实质上包含了 2 个参数：空间频率、对比度。实验发现观察者对同一空间频率刺激图像中“恰可分辨条纹对比度差异”的判断是一个概率事件，并非是固定值。实验选择的 5 个明度中心、11 个空间频率，每个频率约包含 80 幅图像，实验制作的观察图像约 4.4×10^3 幅。参与实验的 6 位观察者重复 1 次观察，人均约进行了 5.28×10^4 次观察，实验为期 20 周，测得了 5 个明度中心的对比度和空间频率数据对。明度是视觉颜色感知属性，不同于亮度对比敏感度的计算取亮度对比度倒数的常用对数，本实验测得数据对假设空间频率用 $f_i(i=1,2\cdots 11)$ 表示，6 位观察者的感知对比度用 $C_j(j=1,2\cdots 12)$ 表示，明度对比敏感度为 $1/C_j$ 。

2 测量结果与数据分析

2.1 测量数据的一元分析

通过心理物理实验测量，对于每个明度中心获得 12×11 个观察值，5 个明度中心获得 $12\times 11\times 5$ 个观察值。已有的 CSF 测量结果都表现为空间频率和对比敏感度阈值 2 个变量的映射关系，用一元线性分析能完成测量数据的拟合，建立 CSF 模型。文献[5—6，9—10]的对比敏感度函数模型多是以指数函数形式表示的。这里也采用指数函数作为基元函数拟合所有观察者的平均观察值，考虑到图像处理中滤波算子的设计方便，所不同的是采用高斯函数为基元函数进行拟合，高斯函数具有旋转对称性、卷积核可分离性等特征，无论是空域的图像滤波算子的设计，还是频域的图像滤波算子设计都很方便，拟合方程采用多项高斯函数和的形式：

$$CSF_{L(f)} = a_1 \exp\left(\frac{f-b_1}{c_1}\right) + a_2 \exp\left(\frac{f-b_2}{c_2}\right) \tag{3}$$

式中： f 表示空间频率； $CSF_{L(f)}$ 表示对比敏感度值； $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2$ 表示拟合参数。

表 3 参数 R -square 参数表征了函数与测量数据的拟合精度，拟合曲线见图 2。图 2 中 CSF 曲线的上下各有与其形状相仿的虚线，表示平均观察值的 95% 置信区间线，实验观察值大都分布在该区间内。考虑到实验实验样本数量还不足，重复 2 次还不足以精确确定阈值，还有待于进一步扩展实验，后期研究将精确确定阈值范围，所以这里以 95% 的置信区间进行估计。5 个明度对比敏感度函数可解释人眼明度视觉的空间辨色特性，在高频阶段（大于 6 cpd），随着明度值的升高 CSF 曲线升高，人眼视觉对高明度图像的细节分辨能力强，提高图像明度可观察到更多的

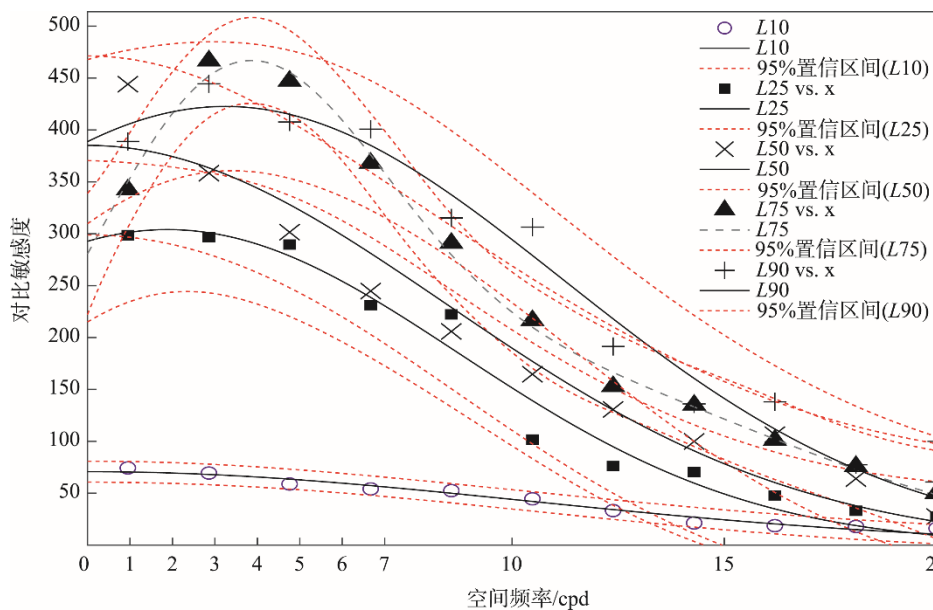


图2 5种明度的平均视觉对比敏感度曲线

Fig.2 Contrast sensitivity curve of average vision of 5 kinds of lightness

表3 不同明度中心对比敏感度函数曲线参数

Tab.3 Parameters of contrast sensitivity function curve of different lightness centers

拟合参数	a_1	b_1	c_1	a_2	b_2	c_2	R-square
$L=10$	70.79	0	14.53	0	0	0	0.98
$L=25$	304	1.89	9.72	0	0	0	0.969
$L=50$	385	0	11.89	0	0	0	0.94
$L=75$	333.9	3.36	4.77	178.7	8.90	9.73	0.997
$L=90$	422.6	3.25	11.23	0	0	0	0.9965

细节；在低频阶段（1~6 cpd）， $L75$ 的 CSF 曲线最高，人眼视觉对中等偏上明度对比度变化分辨能力高，中等明度及以下时人眼视觉随着明度的提高辨色能力增强。 $L75$ 的 CSF 曲线走势与国内外相关研究中的亮度 CSF 形状相似^[3,4,8,10,12]，表现了人眼明度视觉的带通特性。早期的 CSF 实验多是在中等亮度背景条件下完成，本实验中 $L=75$ 的 CSF 曲线走势与金杨^[10]中等明度条件下测得的 CSF 曲线相近，由于测量设备存在差异，曲线的峰值不同。选择 5 个不同明度值作为背景色进行的 CSF 测试实验表明：人眼对不同明度背景条件下的对比敏感度响应是不同的，一条 CSF 曲线不能代表人眼明度视觉的对比敏感度特性。

2.2 测量数据的多元分析

一元分析的结果表明：一个明度值对应一条 CSF 曲线，不同明度 CSF 曲线不同，说明单个明度 CSF 不能表达人眼明度视觉阶调传递特性。人眼明度视觉是连续的，理论上明度 CSF 是要能够描述人眼明度视觉的阶调传递特性，应包含明度变化的特征。明度 CSF 的研究表现为研究明度变化、对比敏感度变化、空间频率变化等多个变量之间的多元关系。每个

明度 CSF 都可描述人眼视觉系统的一个特征，多个明度 CSF 共同作用描述人眼视觉系统更多的特征，这些明度 CSF 之间存在一定的关联，可通过特征变换的方法寻找这些变量的内在关系。因此，这里取 5 个明度中心获得的 $12 \times 11 \times 5$ 个观察值，以空间频率为行变量，每个空间频率的不同明度观察值为列变量，组成 60×11 的观察值矩阵。

使用主成分分析的方法对观察矩阵进行分析，寻找多个变量之间的内在关系，研究决定明度 CSF 的新变量，新变量更容易表达人眼视觉的阶调传递特性。主成分分析的数学模型为：设 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, X_3, \dots, X_p)^T$ 是一个 p 维的随机向量，数学期望 $\mu = E(\mathbf{X})$ ，方差 $\Sigma = D(\mathbf{X})$ ， Σ 的特征值及相应的正交单位化特征向量分别为 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$ 和 $e_1, e_2, \dots, e_p$ ，则：

$$Y_1 = l_1^T \mathbf{X} = l_{11}X_1 + l_{12}X_2 + \dots + l_{1p}X_p$$

$$Y_2 = l_2^T \mathbf{X} = l_{21}X_1 + l_{22}X_2 + \dots + l_{2p}X_p$$

...

$$Y_p = l_p^T \mathbf{X} = l_{p1}X_1 + l_{p2}X_2 + \dots + l_{pp}X_p$$

当 $\mathbf{l}_i^T \mathbf{l}_i = 1$ 且 $\text{Cov}(Y_i, Y_k) = 0$ 时, 使 $\text{Var}(Y_i)$ 最大, 得到的随机变量:

$$Y_i = \mathbf{l}_i^T \mathbf{X}$$

称 Y_i 是 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_p$ 的第 i 个主成分, 即可表达为:

$$Y_i = \mathbf{e}_i^T \mathbf{X} = e_{i1} X + e_{i2} X + \dots + e_{ip} X$$

($i = 1, 2, \dots, p$)

主成分的累积贡献率为:

$$\frac{\lambda_k}{\sum_{i=1}^p \lambda_i}$$

人眼视觉有相同的生理结构, 对颜色处理过程是相同的。实验数据却显示不同人眼对不同的空间频率有不同的对比敏感度的现象, 说明人眼视觉的对比敏感度反应有一定的主观性, 这里假设人眼视觉系统对比敏感度感知模型是相同的, 不同人眼的主观感受表现为不同的权重系数, 并假设实验中人眼主观感受的权重值服从 0~1 的随机分布。

对不同观察者的观察值矩阵进行主成分分析, 主成

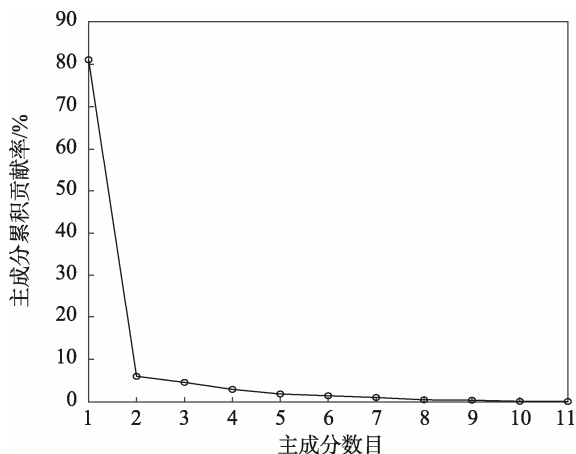


图 3 主成分累积贡献率

Fig.3 Cumulative contribution rate of principal components

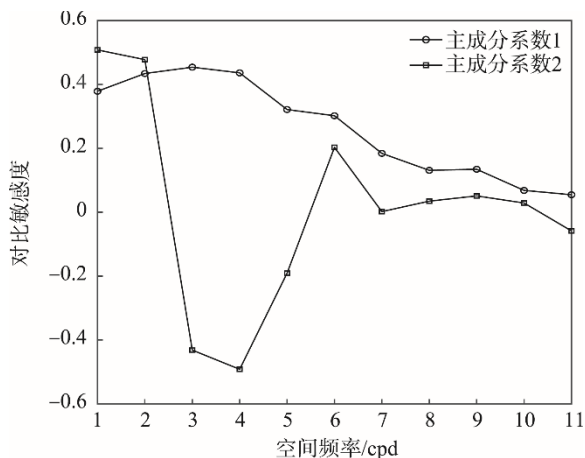


图 4 人眼明度视觉中心-周边拮抗特性

Fig.4 Characteristic of "center-surround" of human lightness vision

分的累积贡献率见图 3, 前 2 个主成分的累积贡献率达到了 80% 以上, 说明前 2 个主成分可以解释原始数据的 80% 以上的特征。因此, 前 2 个主成分构成人眼视觉明度阶调传递特性的新变量, 见图 4, 主成分 1 与主成分 2 共同作用构成人眼明度视觉 CSF 曲线。多元分析的明度 CSF 曲线的特征表现为: 在低频 (1~6 cpd), 人眼明度视觉对空间频率反应表现出了“中心-周边”的环绕机制。人眼视觉的“中心-周边”拮抗机制在生理上表现为同心圆的拮抗感受野, 可用 DOG 高斯函数模拟, 本实验结果取前 2 个主成分在 1~6 cpd 的空间频率范围内, 也表现出类似的结果, 因此文中实验验证了低频阶段人眼明度视觉感受野“中心-周边”拮抗机制。人眼对视觉中心的颜色感知受周围颜色的影响, 距离中心越近, 影响权重越大, 距离中心越远, 影响权重越小; 在高频 (≥ 6 cpd), 主成分 1 起主要作用, 人眼明度视觉随空间频率的升高对比敏感度降低, 与亮度 CSF 的研究结论相似。

3 结语

证实了不同明度下人眼明度视觉对比度函数 CSF 曲线不同, 因此一条明度 CSF 曲线不能直接描述人眼明度视觉的空间频率感受野特性, CSF 曲线仅表达了某个颜色背景下空间频率与视觉对比敏感度之间的映射关系。由此, 在视觉感知颜色空间 CIELAB 中, 选择 5 个明度值作为颜色样本点, 设计心理物理实验, 测量了人眼不同明度视觉对比敏感度数据。对数据进行一元分析, 拟合了 5 个明度 CSF 曲线, 结果表明不同明度的 CSF 曲线不同, 中等偏上的明度 CSF 曲线与亮度 CSF 曲线具有相似的走势, 表现出人眼视觉的低通滤波特性。单个明度 CSF 仅表达了人眼视觉等明度情况下的阶调传递特性, 不能代表人眼明度视觉的阶调传递特性。相反, 人眼明度视觉的阶调传递特性, 是人眼对整个明度感知的综合反映, 明度 CSF 不仅是空间频率域视觉对比敏感度的映射关系, 也应体现视觉明度变化的特性, 由此, 将不同观察者的不同明度的对比敏感度反应进行多元分析, 结果表明: 人眼明度视觉在低频阶段表现出了“中心-周边”环绕的视觉感知特性; 在高频阶段人眼视觉与亮度 CSF 的特征相似。

参考文献:

- [1] ROVAMO J M, KANKAANPÄÄ M I, KUKKONEN H. Modelling Spatial Contrast Sensitivity Functions for Chromatic and Luminance Modulated Gratings[J]. Vision Research, 1999, 39(14): 2387—2398.
- [2] BARTEN P. Physical Model for the Contrast Sensitivity of the Human Eye[J]. Proceedings of SPIE: The In-

- ternational Society for Optical Engineering, 1992, 1666: 57—72.
- [3] DALY S. The Visible Differences Predicree: An Algorithm for the Assessment of Image Fidelity, Ch.13 in Digital Images and Human Vision, A.B. Watson, ED, MIT Press, Cambridge MA(1993).
- [4] STEPHEN WESTLAND. Model of Luminance Contrast Sensitivity Function for Application to Image Assessment[J]. Col Res Appl, 2006, 31(4): 315—319.
- [5] NADENAU M. Integration of Human Color Vision Models into High Quality Image Compression[D]. Switzerland: École Polytechnique Fédérale De Lausanne, 2000: 1—216.
- [6] JOHNSON G M, FAIRCHILD M D. On Contrast Sensitivity in Image Difference Model[C]. IS & TPICS 2002, Portland, 2002: 18—23.
- [7] 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.
WANG Zhe-hong, XU Hai-song. 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.
- [8] 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.
SHI Jun-sheng, YAO Jun-cai, YU Hong-fei, et al. Measurement of Luminance Contrast Sensitivity Function of Human Visual on Cathode Ray Tube Display[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(4): 744—748.
- [9] 吕伟阁, 徐海松, 汪哲弘, 等. 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[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 1—6.
LYU Wei-ge, XU Hai-song, WANG Zhe-hong, et al. Investigation of Chromatic Contrast Sensitivity Based on Different Color Directions and Spatial Frequencies[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 1—6.
- [10] 金杨, 刘真, 王鹏飞. CIEL*a*b*色空间色调角对比敏感度函数研究[J]. 北京理工学报, 2013, 33(8): 824—828.
JIN Yang, LIU Zhen, WANG Peng-fei. Research on Contrast Sensitivity Function of Hue in CIE1976L*a*b* Color Space[J]. Transactions of Beijing Institute of technology, 2013, 33(8): 824—828.
- [11] 张吉焱, 董金昕, 周桃庚, 等. 人眼对比敏感度函数测量方法研究[J]. 计量学报, 2018, 39(1): 20—23.
ZHANG Ji-yan, DONG Jin-xin, ZHOU Tao-geng, et al. Measurement Method for Contrast Sensitivity Function of the Human Eye[J]. Acta Metrologica Sinica, 2018, 39(1): 20—23.
- [12] 姚军财. 人眼亮度和色度对比敏感视觉特性的测量及其模型研究[J]. 应用光学, 2016, 37(6): 880—886.
YAO Jun-cai. Study on Measuring Human Luminance and Color Contrast Sensitivity Visual Characteristic and Their Model[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(6): 880—886.
- [13] 张治亚, 蔡锦达. 测量长期光辐射下人眼对比度敏感函数及模型[J]. 电子科技, 2015, 28(8): 167—170.
ZHANG Zhi-ya, CAI Jin-da. Function and Model of Human Contrast Sensitivity Measurement Under Long Term Optical Radiation[J]. Electronic Sci & Tech, 2015, 28(8): 167—170.
- [14] 姚军财, 申静, 任亚杰, 等. 周围环境对人眼对比度敏感视觉特性的影响[J]. 液晶与显示, 2010, 25(3): 444—448.
YAO Jun-cai, SHEN Jing, REN Ya-jie, et al. Effect of Ambience Luminance on Luminance Contrast Sensitivity of Human Vision System[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2010, 25(3): 444—448.
- [15] 许向阳. 与视觉认知过程相关的图像色貌建模的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
XU Xiang-yang. A Research of Image Color Appearance Modeling Based on Cognition Processing of Human Vision[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.