

文章编号: 0253-2239(2007)04-0744-5

# 用显示器测量人眼衬比度敏感函数\*

石俊生 姚军财 余鸿飞 云利军

(云南师范大学颜色科学与图像信息研究所, 昆明 650092)

**摘要:** 人眼视觉系统(HVS)特性是图像显示、处理和理解等理论与技术的重要依据, 衬比度敏感函数(CSF)是描述视觉系统空间特性的主要指标之一。显示器作为图像信息输出的主要设备, 显示器环境下人眼衬比度敏感函数数据更有实际应用价值。研究用阴极射线管(CRT)显示器测量人眼亮度衬比度敏感函数, 详细描述采用 10 bit 图像显示卡产生亮度条纹衬比度达到人眼阈值的方法, 提出采用多衬比度交互阈值确定(MITD)衬比度阈值的心理物理学实验方法。对矩形条纹的平均亮度  $10 \text{ cd/m}^2$ 、 $60 \text{ cd/m}^2$ 、 $90 \text{ cd/m}^2$  三个等级,  $0.41 \text{ cpd}$ 、 $0.82 \text{ cpd}$ 、 $1.23 \text{ cpd}$ 、 $1.97 \text{ cpd}$ 、 $3.08 \text{ cpd}$ 、 $3.79 \text{ cpd}$ 、 $4.93 \text{ cpd}$ 、 $7.04 \text{ cpd}$ 、 $9.86 \text{ cpd}$ 、 $16.43 \text{ cpd}$ 、 $24.64 \text{ cpd}$  11 个空间频率和 12 名正常视力的青年进行了测量。测量结果与国内外采用光学装置方法测量结果进行了比较和讨论。

**关键词:** 光度学; 人眼视觉系统; 衬比度敏感函数; 阴极射线管显示器; 多衬比度交互阈值确定

中图分类号: O432.2 文献标识码: A

## Measurement of Luminance Contrast Sensitivity Function of Human Visual System on Cathode Ray Tube Display

Shi Junsheng Yao Juncai Yu Hongfei Yun Lijun

(Institute of Color Science and Image Information, Yunnan Normal University, Kunming 650092)

**Abstract:** The characteristics of the human visual system (HVS) are the basis for image technology of display, processing and understanding, and the contrast sensitivity function (CSF) is one of important and special characteristics of HVS. CSF data under the computer display environment has practical applications to the image technologies. Luminance CSF was measured for square-wave patterns on a CRT display, and a psychophysical method for determination of contrast threshold "multi-contrast interactive threshold determination (MITD)" was presented and adopted. Measurements were done for three mean luminances of  $10 \text{ cd/m}^2$ ,  $60 \text{ cd/m}^2$ ,  $90 \text{ cd/m}^2$  and eleven spatial frequencies of  $0.41 \text{ cpd}$ ,  $0.82 \text{ cpd}$ ,  $1.23 \text{ cpd}$ ,  $1.97 \text{ cpd}$ ,  $3.08 \text{ cpd}$ ,  $3.79 \text{ cpd}$ ,  $4.93 \text{ cpd}$ ,  $7.04 \text{ cpd}$ ,  $9.86 \text{ cpd}$ ,  $16.43 \text{ cpd}$ ,  $24.64 \text{ cpd}$ . Measurement results were compared with previous ones that had been measured with the optical apparatus.

**Key words:** photometry; human vision system; contrast sensitivity functions; cathode ray tube display; multi-contrast interactive threshold determination

### 1 引言

人眼视觉系统(HVS)特性是图像显示、处理、理解等理论与技术的重要依据, 其中衬比度敏感函数(Contrast sensitivity functions, CSF)是描述视觉系统空间特性的主要指标之一。衬比度敏感函数已在图像增强、压缩编码、质量评价、图像比较和图理解等领域中得到广泛应用<sup>[1~3]</sup>。

人眼衬比度敏感函数数据是通过人眼视觉心理物理学实验测量得到, 测量人眼衬比度敏感函数一

直吸引着视觉和图像技术的研究者们。从 20 世纪 50 年代开始, 对亮度和色度衬比度敏感函数的测量方法和人眼衬比度敏感函数数据做了大量研究<sup>[4~10]</sup>, 直到 1985 年 Mullen<sup>[11]</sup> 对色度衬比度敏感函数测量做了较详细研究, 给出了完整的衬比度敏感函数数据后, 人眼衬比度敏感函数测量及衬比度敏感函数数据的研究告一段落。中国科学院心理研究所邓述移等<sup>[12]</sup> 在 1982 年用自制的三变仪测量了亮度衬比度敏感函数。以上测量都是采用光学装置

\* 国家自然科学基金(60368001)、云南省科技厅(2004A0027M)和教育厅自然科学基金(03Y318D)资助课题。

作者简介: 石俊生(1960—), 男, 内蒙古人, 教授, 硕士生导师, 主要从事颜色科学与技术、图像视觉方面的研究。

E-mail: shi-js@263.net

收稿日期: 2006-05-11; 收到修改稿日期: 2006-08-15

产生条纹和精确控制条纹衬比度,不仅实验系统设计复杂,而且衬比度控制也不方便。近年来,一些人眼特性、色貌与图貌视觉实验等都是在阴极射线管(CRT)显示器上进行,控制阴极射线管显示器实现想要的亮度或颜色比一般光学装置方法更容易、更精确<sup>[13]</sup>。用显示器测量人眼衬比度敏感函数是一种经济、简单、方便的方法。另一方面,显示器成为信息最主要的载体,基于显示器的图像技术有着更广泛的应用。在显示器亮度范围、色度特性、使用环境下的人眼衬比度敏感函数有重要的应用价值,也就是说,显示器环境下测量出的人眼衬比度敏感函数数据对于图像技术具有更实际的应用价值。

Nadenau 在<sup>[2]</sup>2000 年研究图像压缩算法时,用显示器对亮度和 CIELAB、YCbCr 和 LMS 三种不同色空间色度衬比度敏感函数进行了测量;2001 年 Wenzel<sup>[14]</sup>用显示器测量了正常和近视眼亮度衬比度敏感函数的差异。这些都不是专门研究用显示器测量人眼衬比度敏感函数,没有给出详细的测量方法、测量条件和实验数据。本文用阴极射线管显示器测量黑环境下人眼亮度衬比度敏感函数,目的是研究用显示器测量衬比度敏感函数的过程与方法,不仅给出显示器环境和亮度范围条件下人眼的亮度衬比度敏感函数数据,而且为下一步测量色度衬比度敏感函数,得到全部衬比度敏感函数数据,以及用显示器进行其它视觉实验打下基础。

## 2 实验器材及性能

阴极射线管显示器: SONY CPD-G520 21", 实验设置在频率 85 Hz, 分辨力 768 pixel×1204 pixel。

显示卡: Matrox P650, 显存数字化位数 RGB 三通道分别 10 bit。

屏幕亮度计(photometer): 北京师范大学光电仪器厂生产的 ST-86LA 型屏幕亮度计, 测量范围 0.01 cd/m<sup>2</sup>~19990 cd/m<sup>2</sup>。

屏幕色度计(colorimeter): 美国 X-Rite 公司 Color Monitor optimizer。

采用查找表(LUT)方法对显示器进行了特性化,并根据测量衬比度敏感函数需要,实验研究了“短”、“中”、“长”期显示器及测量仪器系统的重复性和测量仪器的精度。其中,“短期”是指显示器达到稳定后连续不关机;“中期”是指一个月左右,显示器不同的开机状态;“长期”是指在整个测量衬比度敏感函数实验持续大约 1 年以上。实验结果表明:1) LUT 特性化精度在 CIELAB, CIE94 和 CIEDE2000 三种色差单

位分别是 0.84, 0.40 和 0.42;2) 显示器开机后需要 2 h 后达到特性化精度和测量衬比度敏感函数实验所需要的稳定;3) 显示器及色度计短、中、长期重复精度分别是 0.08, 0.15, 0.26 CIELAB 色差单位;4) 色度计亮度  $L$  精度为  $\pm 0.05$  cd/m<sup>2</sup>, 色度  $x$  和  $y$  精度为  $\pm 0.002$ 。

## 3 实验参量及实验条件

条纹形状: 矩形竖条纹。

条纹大小: 8 cm×8 cm。

条纹视角: 2.44°。

条纹平均亮度: 10cd/m<sup>2</sup>, 60 cd/m<sup>2</sup>, 90 cd/m<sup>2</sup> 三个等级。

条纹空间频率: 0.41 cpd, 0.82 cpd, 1.23 cpd, 1.97 cpd, 3.08 cpd, 3.79 cpd, 4.93 cpd, 7.04 cpd, 9.86 cpd, 16.43 cpd, 24.64 cpd(周/度)。

显示器白场设置: D65: 实测值  $x=0.3122$ ,  $y=0.3292$ , 最大亮度 100.28 cd/m<sup>2</sup>。

条纹背景: 灰背景接近 D65 白场:  $x=0.3133$ ,  $y=0.3301$ , 亮度 27.6 cd/m<sup>2</sup>。

照明环境: 墙壁标准灰的暗室, 只有显示器屏幕产生的亮度。

测试者到显示屏距离: 2 m。

测试者: 男 7, 女 5, 年龄在 23~30 之间; 视力正常或经过校正都在 1.2 以上。

## 4 实验方法

人眼衬比度敏感函数测量是一个心理物理学实验过程,用阴极射线管显示器测量的准确度受到多种因素影响,如显示器性能、测量仪器精度、实验环境、实验方法、测试者等。其中一个最基本的条件是,显示器显示条纹的衬比度要在人眼衬比度阈值以下。一般计算机采用的三通道分别 8 bit 图像显示卡不能满足这个要求,国际上已有三通道分别 14 bit 显示卡,本实验中采用三通道分别 10 bit 显示卡,下面提供的实验数据将证明达到这一基本条件。其次的重要条件是: 条纹衬比度的精确控制和视觉系统较准确地确定衬比度阈值的实验方法。下面对这两个问题做详细描述,其中提出的多衬比度交互阈值确定(Multi-contrast interactive threshold determination, MITD)方法,不仅降低了测试者的疲劳度,缩短了实验时间,而且测试者能较准确判断衬比度阈值。

### 4.1 亮度衬比度的精确控制

亮度衬比度采用迈克耳孙定义,如(1)式所示。

$$C = |L_1 - L_2| / \bar{L}, \quad (1)$$

按照阴极射线管特性化精度 0.84 CIELAB 或目前国际上最高精度 0.5 CIELAB 色差单位,采用特性化方法控制显示亮度及衬比度不能满足测量衬比度敏感函数的精度要求。实验采用小范围直接测量和线性插值的方法,下面以平均亮度 60 cd/m<sup>2</sup> 的条纹为例说明亮度及衬比度实现方法及数据: 1) 阴

表 1 产生平均亮度 60 cd/m<sup>2</sup> 条纹的 RGB 和对应的亮度值

Table 1 RGB values and corresponding luminances for producing the patterns with mean luminance of 60 cd/m<sup>2</sup>

RGB values	<b>196</b>	196.25	196.50	196.75	<b>197</b>	197.25	197.50	197.75	<b>198</b>
Values of luminance measurement and interpolation / (cd/m <sup>2</sup> )	<b>60.20</b>	60.34	60.49	60.65	<b>60.80</b>	60.96	61.11	61.26	<b>61.42</b>

为了使 10 bit 显卡产生条纹衬比度所能达到最小变化,即条纹的亮暗 RGB 间隔为最小  $\Delta = 0.25$  的目的,而且使条纹的平均亮度保持相同,采用如图 1 所示的条纹生成方法,即图中条纹编号 1~6 分别对应平均亮度基本不变,条纹亮暗的 RGB 间隔分别为 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5。

从图 1 可以看出,编号 1、3、5 条纹的中心是在 RGB 数值为 197 与 197.25 的中间,编号 2、4、6 条纹的中心是在 RGB 数值为 197。表 2 第二行给出

极射线管特性化预测产生 60 cd/m<sup>2</sup> 亮度所需要的 RGB 数字量,实验中取值  $R=G=B=197$ 。用该数字量显示一个亮度块,并用亮度计测量其亮度;2) 以 197 为中心,对 RGB 值上下间隔为 1 的亮度块进行测量,如表 1 中黑体字所示;3) 10 bit 显示卡的 RGB 值间隔 1 之间可以显示 3 个值,即 RGB 间隔  $\Delta = 0.25$ ,这个小范围的显示亮度值采用线性插值的方法得到,如表 1 中白体字所示。

了两组条纹通过表 1 亮度数据计算得到的平均亮度,可以看出,两组条纹平均亮度稍有不同,但它们的差距很小。这样小的平均亮度差距不会影响测量结果,而且也超过了仪器测量亮度精度范围。表 2 第三行列出了条纹编号 1~6 衬比度大小,这个结果告诉我们,阴极射线管显示器用 10 bit 显卡所能达到亮度的最小衬比度 0.0026,低于人眼亮度衬比度阈值,可以满足测量人眼亮度衬比度敏感函数的要求。如果平均亮度更低,所能实现的衬比度更低。

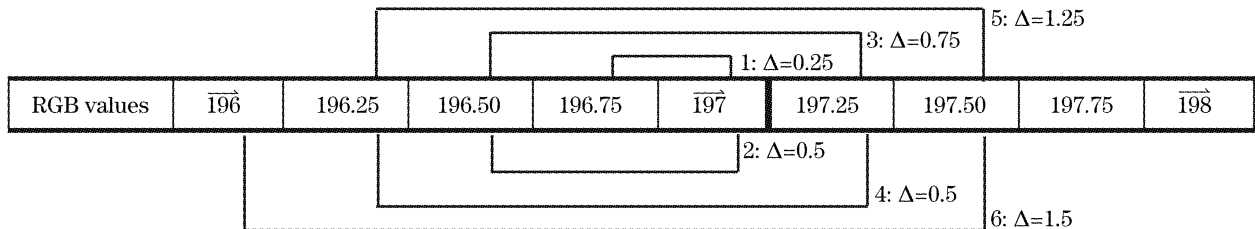


图 1 10 bit 显卡所能达到的衬比度最小和间隔最小方案

Fig. 1 Scheme to minimize contrast values and contrast spaces for a display card with 10 bit for each channel

表 2 显示器可以显示的衬比度,编号 1~6 分别对应图 2 中  $\Delta = 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.50$

Table 2 Minimal contrast values that the CRT display can display, and numbers 1~6 indicate

$\Delta = 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.50$  respectively in Fig. 2

Numbers	1	2	3	4	5	6
Mean luminance / (cd/m <sup>2</sup> )	60.88	60.81	60.88	60.80	60.88	60.80
Contrast values	0.0026	0.0051	0.0076	0.0102	0.0125	0.0148

### 4.2 多衬比度交互阈值确定方法

首先,由于条纹衬比度不能连续变化,测量某一平均亮度、不同的空间频率衬比度阈值时,要在该空间频率阈值附近预先制作好不同衬比度条纹图像。利用显示器屏幕可以同时显示多幅测量条纹的优点,提出采用多衬比度交互阈值确定衬比度阈值的心理物理学方法。该方法的核心是在显示器屏幕上一次同时显示 4 幅测量条纹,并且从开始第一次显

示到最后显示,条纹衬比度的 RGB 间隔  $\Delta$  由大逐渐变小,参看图 2 条纹图像,下面用图 3 说明该方法: 1) 实验开始同时显示的 4 幅衬比度图像,如图 3 最上面衬比度直线上的 4 个点。其中某一衬比度如  $C_1$  较大,而且 RGB 间隔  $\Delta = 0.75$  较大。此时,4 种衬比度条纹可能都可以分辨出条纹,测试者很容易确定一个“最不清楚”的条纹,如点  $C_2$ ; 2) 下一步显示衬比度更低,且包括  $C_2$  和衬比度降低、间隔变小

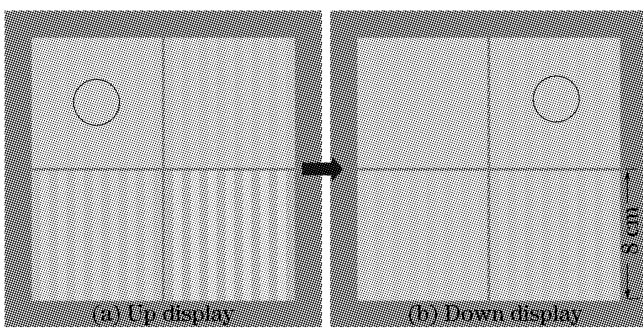


图2 条纹形状与多衬比度交互阈值确定方法示意图。  
(a)和(b)分别是前后两屏测量条纹,其中带有圆圈的条纹衬比度相同

Fig.2 Shape of patterns and sketch for the psychophysical method multi-contrast interactive threshold determination. (a) and (b) are up and down two displays of test patterns, and there are same contrast values in the patterns with circles

为  $\Delta=0.50$  的 4 幅条纹图像,如图 3 中间直线。测试者再确定一个“最不清楚”的条纹,如点  $C_3$ ; 3) 最后显示衬比度更低,且包括  $C_3$  和衬比度降低、间隔为  $\Delta=0.25$  的 4 幅条纹图像,如图 3 最下面直线。此时,条纹衬比度间隔  $\Delta=0.25$  已经达到显示器能够达到的最小衬比度,测试者再确定一个“刚好能够分别”的条纹,这个条纹对应的衬比度即是该空间频率的衬比度阈值。对于不同频率的条纹,衬比度阈值可能在  $\Delta=0.50, \Delta=0.75$  或更大的 4 幅条纹图像中,并且在包含衬比度阈值的 4 幅条纹图像中,测试者采用“刚好能够分别”确定衬比度阈值,而不是“最不清楚”。另外,对于每一位测试者进行的每一个频率的条纹,需要测量 2 次取平均。

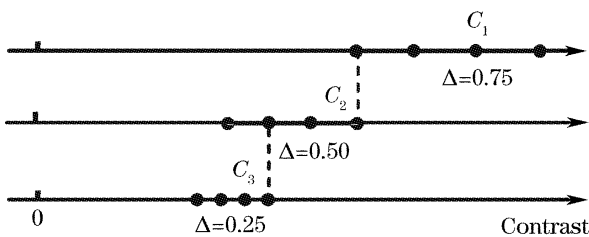


图3 多衬比度交互阈值确定心理物理学方法示意图  
Fig.3 Sketch for the psychophysical method multi-contrast interactive threshold determination

### 5 测量结果

图 4 给出了三种平均亮度下的衬比度阈值随条纹空间频率的变化,三条实线从上到下平均亮度依次为  $10 \text{ cd/m}^2, 60 \text{ cd/m}^2$  和  $90 \text{ cd/m}^2$ 。同时图中也给出了国内邓述移等采用光学装置方法测量平均亮度为  $10 \text{ cd/m}^2$  和  $100 \text{ cd/m}^2$  的实验结果<sup>[12]</sup>,如图中

虚线表示。从实验结果可以看出,我们的结果和邓述移等采用光学装置方法测量结果基本一致,包括形状和大小:1)在形状上,平均亮度  $10 \text{ cd/m}^2$  比较吻合;2)在最敏感频率上,平均亮度  $60 \text{ cd/m}^2$  和  $90 \text{ cd/m}^2$  最敏感空间频率都是  $3.8 \text{ cpd}$  左右,而邓述移等平均亮度  $100 \text{ cd/m}^2$  所对应的最敏感频率是  $3.7 \text{ cpd}$ ,非常一致;3)在最低阈值上稍有差异,平均亮度为  $60 \text{ cd/m}^2$  和  $90 \text{ cd/m}^2$  的最小阈值分别为  $0.0054$  和  $0.0049$ ,邓述移等在  $100 \text{ cd/m}^2$  的最小阈值是  $0.0068$ 。

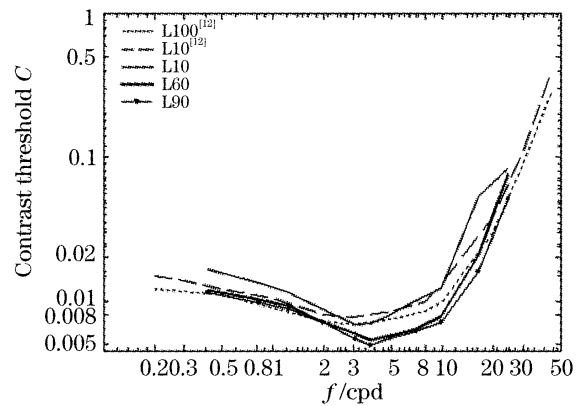


图4  $10 \text{ cd/m}^2, 60 \text{ cd/m}^2$  和  $90 \text{ cd/m}^2$  三种平均亮度下的衬比度阈值测量结果与邓述移等采用光学装置方法测量结果

Fig.4 Contrast threshold measured under mean luminance of  $10 \text{ cd/m}^2, 60 \text{ cd/m}^2$  and  $90 \text{ cd/m}^2$  and that measured by Deng Shuyi under mean luminance of  $10 \text{ cd/m}^2, 100 \text{ cd/m}^2$

图 5 是与国外 Mullen 等<sup>[11]</sup>采用光学装置方法测量的结果的比较。图中虚线是 Mullen 采用单色绿光(波长= $526 \text{ nm}$ )测量亮度衬比度敏感函数

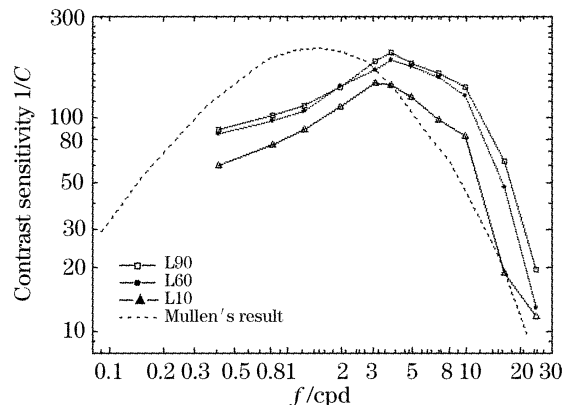


图5  $10 \text{ cd/m}^2, 60 \text{ cd/m}^2$  和  $90 \text{ cd/m}^2$  三种平均亮度下亮度衬比度敏感函数与 Mullen 采用光学装置方法测量结果

Fig.5 Luminance contrast sensitivity function under mean luminance of  $10 \text{ cd/m}^2, 60 \text{ cd/m}^2$  and  $90 \text{ cd/m}^2$  and Mullen's result measured with an optical apparatus

的结果,文中没有明确给出平均亮度数值。可以看出,形状基本一致,但我们的实验结果相比 Mullen 结果,整个衬比度敏感函数曲线向高的空间频率移动,使得最敏感频率区别较大,Mullen 的实验结果为 1.5 cpd,我们在平均亮度为  $10 \text{ cd/m}^2$  时所对应的频率为 3.1 cpd,在平均亮度为  $60 \text{ cd/m}^2$  和  $90 \text{ cd/m}^2$  时为 3.8 cpd。

## 6 结 论

本文详细描述了采用阴极射线管显示器测量人眼衬比度敏感函数的方法和过程,提出采用多衬比度交互阈值确定确定衬比度阈值的心理物理学方法。实验测量了显示器黑环境下平均亮度为  $10 \text{ cd/m}^2$ 、 $60 \text{ cd/m}^2$ 、 $90 \text{ cd/m}^2$  的亮度衬比度敏感函数。

虽然取得了与国内邓述移等和国外 Mullen 用光学装置方法基本一致的测量结果,但衬比度觉察阈值有一定的差异,如与邓述移等的最小阈值不同;与 Mullen 的最敏感频率不同,这是很正常的结果。因为,人眼衬比度敏感函数测量是一个心理物理学实验过程,其测量结果受到多种因素影响,如实验方法和测量过程中不同的条件、环境和实验设置参量<sup>[11,12]</sup>。Mullen 与邓述移等的方法相似,都采用光学装置方法测量;而本实验采用阴极射线管显示器。Mullen 实验用显示屏来显示目标光栅(即条纹),周围为黑背景,视角从  $2.2^\circ \sim 23.5^\circ$  变化,以致观察距离发生变化;本实验条纹置于亮度为  $27.6 \text{ cd/m}^2$  的灰背景中,视角  $2.44^\circ$  不变,观察距离不变。采用光学装置方法,如邓述移等使用的三变仪可以使环境照度很低;而本实验没有采取措施对阴极射线管显示器屏幕的环境照度进行控制,这些对衬比度敏感函数都会产生影响。不同的实验条件、环境、参量设置、实验方法对衬比度阈值的影响是非常复杂的,但是它在研究人眼衬比度敏感特性中具有重大的理论和应用价值。

**致谢** 感谢黄小乔和杨健同学在实验调试、测试中付出的辛勤劳动和提出的有益建议并感谢接受测试的同学们。

## 参 考 文 献

- 1 Christian J. van den Branden Lambrecht. *Vision Models and Application to Image and Video Processing* [M]. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands, 1997. 1~224
- 2 M. Nadenau. *Integration of Human Colour Vision Models into High Quality Image Compression* [D]. PhD thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, 2000. 1~216
- 3 Eli Peli. Contrast sensitivity function and image discrimination [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2001, **18**(2): 283~293
- 4 O. H. Schade. Optical and photoelectric analog of the eye[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1956, **46**(9): 721~739
- 5 J. J. DePalma, E. M. Lowry. Sine-wave response of the visual system. II. Sine-wave and square-wave contrast sensitivity[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1962, **52**(3): 328~335
- 6 F. L. van Nes, M. A. Bouman. Spatial modulation transfer in the human eye[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1967, **57**(3): 401~406
- 7 Gerard J. C. van der Horst, Charles M. M. de Weert, M. A. Bouman. Transfer of spatial chromaticity-contrast at threshold in the human eye[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1967, **57**(10): 1260~1266
- 8 Gerard J. C. van der Horst, M. A. Bouman. Spatiotemporal chromaticity discrimination[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1969, **59**(11): 1482~1488
- 9 D. H. Kelly. Spatio-temporal frequency characteristics of color vision mechanism[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1974, **64**(7): 983~990
- 10 D. H. Kelly. Spatiotemporal variation of chromatic and achromatic contrast thresholds[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1983, **73**(6): 742~750
- 11 K. T. Mullen. The contrast sensitivity of human colour vision to red-green and blue-yellow chromatic gratings[J]. *J. Physiology*, 1985, **359**: 381~400
- 12 Deng Shuyi, Xu Zhimin, Du Lianfang *et al.*. Modulation transfer function of human visual system[J]. *Acta Armamentar*, 1982, (2): 24~33 (in Chinese)  
邓述移,徐智敏,杜连芳等. 人眼调制传递函数[J]. 兵工学报, 1982, (2): 24~33
- 13 Garrett M. Johnson, Mark D. Fairchild. Measuring images: differences, quality, and appearance[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5007**: 51~60
- 14 K. Wenzel, K. Ladunga, K. Samu. Measurement of color defective and normal color vision subjects' color and luminance contrast threshold functions on CRT[J]. *Periodica Polytechnica Ser. Mech. Engng.*, 2001, **45**(1): 103~108