

# 阴极射线管显示器亮度范围内 对人眼视觉特性的实验研究<sup>\*</sup>

姚军财<sup>1)†</sup> 申 静<sup>2)</sup> 王剑华<sup>1)</sup>

1) 陕西理工学院物理系, 汉中 723003)

2) 陕西理工学院计算机科学与技术系, 汉中 723003)

(2007 年 10 月 23 日收到, 2007 年 12 月 23 日收到修改稿)

用 CRT 显示器显示 5 种频率的目标光栅, 通过改变矩形波光栅的平均亮度, 测量了 9 名男性青年在不同平均亮度条件下的对比度觉察阈值, 并得出亮度与对比度觉察阈值间的关系曲线, 从而探讨人眼在显示器亮度范围内的亮度视觉特性. 实验结果表明, 不同人眼对频率  $f = 3.79$  和  $4.97$  cpd (周/度) 的目标光栅的对比度觉察阈值非常相近, 而对频率  $f = 1.23, 1.97$  和  $9.86$  cpd 的目标光栅的对比度觉察阈值相差甚远, 提高显示器亮度可以降低对比度觉察阈值, 提高显示器显示图像分辨力, 但是随着亮度的增加 (达到 Weber 区域), 亮度对分辨力的提高达到一定限度, 而且, 当亮度在  $60 \text{ cd/m}^2$  左右时, 显示信息效果与人眼视觉特性最匹配. 基于对人眼在显示器亮度范围内的亮度视觉特性的研究, 为在显示器上进行图像处理、显示器制造、摄影、印刷、配色等研究和应用奠定基础.

关键词: 人眼视觉特性, 对比度觉察阈值, 视角, 空间频率

PACC: 0762, 8732S

## 1. 引 言

显示器是计算机组件中信息再现的重要设备, 其显示图像信息细节的效果直接通过人眼分辨力来判断, 显示器的亮度和图像的频率是影响人眼分辨力和显示信息细节至关重要的因素. 对于普通的显示器, 亮度能在约  $0-180 \text{ cd/m}^2$  之间调节, 因此, 要使显示器再现的图像达到最佳效果, 必须协调人眼视觉特性与显示器亮度、再显信息还原性和图像的空间频率间的关系<sup>[1, 2]</sup>.

人眼视觉系统特性是图像显示、处理、理解等技术的理论基础, 不同亮度、不同频率下的对比度觉察阈值是描述视觉系统空间特性的主要指标之一. 国内外在亮度对人眼视觉特性影响方面作了大量的实验研究<sup>[3-12]</sup>, 但是其研究实验普遍选取的亮度间隔较大, 不能精确地反映亮度在小范围内与人眼视觉特性之间的关系, 且不同的实验条件得出不同的亮度与人眼视觉特性之间的关系. 实验通过调节阴极射线管 (cathode ray tube, CRT) 显示器的亮度, 测量不

同亮度下 5 种频率光栅的人眼对比度觉察阈值, 研究显示器的亮度、图像的空间频率、显示器显示细节效果和与人眼视觉特性之间的关系, 从而为图像处理、显示器制造、摄影、印刷、配色等研究和应用奠定基础.

## 2. 实验仪器和实验参数

### 2.1. 实验器材及性能

CRT 显示器:  $53.34 \text{ cm}$  SONY-G520, 已使用 2 年, 约 4500 h, 效果基本保持新机状态. 图像采集卡: Matrox Millennium P650 10 bit 数字彩色显示型实时图像采集卡, 该卡图像清晰、稳定. 屏幕亮度计 (photometer): 北京师范大学光电仪器厂生产的 ST-861A 型屏幕亮度计, 测量范围  $0.01-19990 \text{ cd/m}^2$ . 屏幕色度计 (colorimeter): 美国 X-Rite 公司 Color Monitor optimizer.

采用最精确的 LUT 方法对显示器进行特性化<sup>[13-15]</sup>, 并根据测量对比度觉察阈值的需要, 实验研究了短期、中期、长期显示器及测量仪器系统的重

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金 (批准号: 10447005) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: yjc4782@yahoo.com.cn

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;长期是指在整個测量觉察阈值实验持续大约 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) 显示器需要开机后 2 h 达到特性化精度和测量觉察阈值实验所需要的稳定; 3) 显示器及色度计短期、中期、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  $\pm 0.01 \text{ cd/m}^2$ , 色度  $x$  和  $y$  精度均为  $\pm 0.001$ .

## 2.2. 实验参数及实验条件

条纹形状:矩形竖条纹.图片大小:8.5 cm  $\times$  8.5 cm.条纹视角:2.4347°.条纹平均亮度:0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 30, 50, 55, 60, 70, 90, 120, 150  $\text{cd/m}^2$  十四个等级.条纹空间频率:1.23, 1.97, 3.79, 4.97, 9.86 cpd (周/度)五种空间频率.显示器设置: $D_{65}$  白场(实测值  $x = 0.3122$ ,  $y = 0.3292$ ,  $Y = 100.36$ );亮度调节范围为 0—176.8  $\text{cd/m}^2$ .条纹背景:灰背景接近  $D_{65}$  白场( $x = 0.3133$ ,  $y = 0.3301$ ,  $Y = 27.6 \text{ cd/m}^2$ ).照明环境:墙壁标准灰的暗室,只有显示器屏幕产生的照度.实验者到显示屏距离 2 m.

## 3. 实验方法

### 3.1. 目标光栅的制起方法

实验采用明暗相间条纹的矩形波光栅作为观察目标.对于亮度光栅,对比度采用 Michelson 对比度

定义<sup>[6]</sup>,如方程式

$$C_L = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{\bar{L}}, \quad (1)$$

其中  $L_{\max}$  和  $L_{\min}$  分别为光栅明暗条纹的亮度,  $\bar{L} = (L_{\max} + L_{\min})/2$  为光栅的平均亮度.

根据人的视觉系统结构和韦伯定理,采用心理物理学测定阈值的方法即能得到人眼对比度觉察阈值.即目标刚能为人眼觉察时所需要的最低调制度<sup>[11]</sup>.由于人眼对比度觉察阈值的测量是一个心理物理学实验过程,其测量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、实验者等.首先,显示器可以实现的对比度要低于人眼阈值.一般计算机采用的三通道均为 8 bit 的图像显示卡不能满足要求,则在本实验中采用三通道均为 10 bit 的显示卡(国际上已有三通道均为 14 bit 的显示卡<sup>[6]</sup>).其次,显示器显示条纹的对比度的精确控制.按照本实验 CRT 特性化精度 0.84 或目前国际上最高精度 0.5 CIELAB 色差单位<sup>[14,15]</sup>,采用特性化方法预测或控制显示亮度及对比度不能满足测量觉察阈值的精度要求.本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  $\text{cd/m}^2$  为例说明亮度及对比度实现方法及数据.1) CRT 特性化预测产生约 60  $\text{cd/m}^2$  亮度所需要的 RGB 数字量(指  $R = G = B$ ),本实验中取值 198.以条纹大小显示亮度块,并用亮度计测量其亮度,如表 1 所示.2) 以 198 为中心,对 RGB 值左右间隔 1 亮度块进行实际测量,表 1 第二行黑体所示.3) 10 bit 显示卡,RGB 值间隔 1 之间可以显示 3 个值,这个小范围的显示亮度值采用线性插值的方法得到,表 1 第二行斜体所示.

表 1 产生平均亮度 60  $\text{cd/m}^2$  条纹的 RGB 和对应的亮度值

RGB 值	197	197.25	197.50	197.75	198	198.25	198.50	198.75	199
亮度测量值与插值值( $\text{cd/m}^2$ )	<b>59.80</b>	59.9325	60.0650	60.1975	<b>60.32</b>	60.4625	60.5950	60.7275	<b>60.86</b>

为了使 10 bit 显卡产生条纹对比度所能达到最小变化(即 RGB 间隔  $\Delta = 0.25$ )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.图中条纹编号 1—6 分别对应平均亮度基本不变,条纹对比度为 0.25—1.5 RGB 间隔.

从图 1 中可以看出,编号 1, 3, 5 条纹的中心是在 RGB 数值为 197.50 与 197.75 的中间,编号 2, 4, 6 条纹的中心是在 RGB 数值为 197.50.表 2 第二行列

出了两组条纹通过表 1 数据计算得到的平均亮度不同,可以看出,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 对比度的大小,结果表明,CRT 显示器用 10 bit 显示卡所能达到亮度的最小对比度 0.0022,完全可以满足测量人眼亮度对比度阈值的要求.如果平均亮度更高,所能实现的对比度会更低.

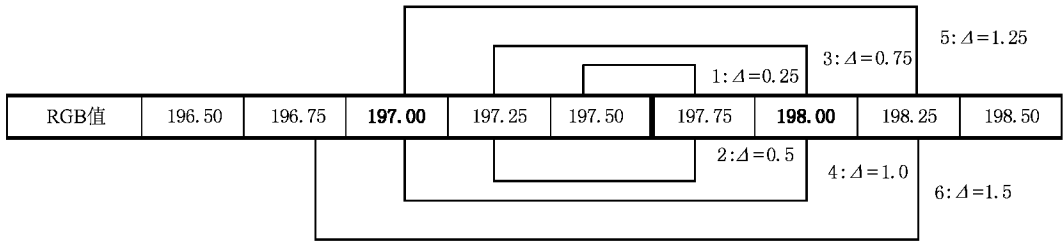


图 1 10 bit 显示卡所能达到的对比度最小和间隔最小方案

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

条纹编号	1	2	3	4	5	6	...
平均亮度 (cd/m <sup>2</sup> )	60.1312	60.0650	60.1312	60.0650	60.1312	60.0650	...
对比度值	0.0022035	0.004411	0.00661	0.00882	0.01101	0.013245	...

根据实验需要,目标光栅做成 5 种频率的不同平均亮度级别、不同亮度对比度的图片库.图片的亮度对比度从 10 bit 显示卡能实现的最小值依次增大,且图片间的对比度间隔为对比度最小值的整数倍.

### 3.2. 实验过程和实验对象

测定人眼对比度觉察阈值是用心理物理学中的极限调整法.被测试者暗适应 30 min 后(每次测量时每人都必须要暗适应 30 min)在 2 m 处观察显示器显示的目标光栅.像场的平均亮度、目标光栅的对比度和空间频率分别通过预先做好的图片来进行自行调节.实验时,选取目标光栅的空间频率,被试者自行调节目标光栅的亮度和目标光栅的对比度以觉察目标,一次逐渐增大对比度到刚好能看见条纹,一次逐渐降低至条纹刚好看不见,取其平均为一次对比

度觉察阈值.实验时对每个亮度测量三次,全过程重复测一次.求其平均值作为这一频率光栅在不同亮度下的对比度觉察阈值.

实验对象为 9 名年龄在 20—30 岁的健康男性青年(SJ,ZXQ,HXQ,SB,ZJG,SCJ,YJC,YJ,ZXZ),校正后眼科检查视力均为正常(视力均为 1.2 以上),暗适应情况良好,色觉无异常.

## 4. 实验结果

根据心理物理学极限调整法进行测量,得到 9 位观察者对 5 种空间频率、14 种平均亮度光栅的对比度觉察阈值数据.采用 SPSS 进行统计分析,其结果如表 3.

表 3 采用 SPSS 对 9 位观察者对比度觉察阈值数据统计分析的标准偏差、极差和检验 P 值

平均亮度 (cd/m <sup>2</sup> )	0.5	1	2	3	5	10	30	50	55	60	70	90	120	150
9.86 cpd	.00326	.00262	.00201	.00183	.00204	.00165	.00150	.00176	.00162	.00151	.00165	.00138	.00166	.00134
4.97 cpd	.00301	.00132	.00105	.00072	.00039	.00042	.00051	.00043	.00043	.00037	.00044	.00057	.00072	.00071
标准偏差	3.79 cpd	.00252	.00100	.00088	.00077	.00051	.00050	.00066	.00039	.00029	.00026	.00044	.00043	.00054
1.97 cpd	.00410	.00372	.00172	.00125	.00175	.00174	.00188	.00232	.00230	.00181	.00204	.00164	.00194	.00213
1.23 cpd	.00306	.00365	.00107	.00227	.00229	.00221	.00168	.00232	.00244	.00199	.00239	.00185	.00170	.00182
9.86 cpd	.0100	.0090	.0065	.0058	.0070	.0051	.0053	.0062	.0054	.0050	.0055	.0050	.0057	.0044
4.97 cpd	.0100	.0030	.0030	.0025	.0010	.0012	.0016	.0012	.0012	.0011	.0015	.0020	.0019	.0018
极差	3.79 cpd	.0070	.0025	.0025	.0026	.0017	.0020	.0010	.0008	.0006	.0011	.0010	.0018	.0014
1.97 cpd	.0150	.0130	.0055	.0042	.0045	.0054	.0049	.0066	.0064	.0055	.0064	.0047	.0058	.0060
1.23 cpd	.0075	.0113	.0039	.0058	.0058	.0050	.0042	.0067	.0064	.0051	.0062	.0052	.0046	.0051
9.86 cpd	.4430	.3710	.1390	.1190	.0970	.0280	.0500	.0450	.0330	.0970	.1010	.0490	.0050	.0040
4.97 cpd	.1070	.4350	.4410	.1770	.2700	.1500	.1930	.1010	.1010	.2890	.1150	.0810	.0410	.0600
检验 P 值	3.79 cpd	.2310	.1970	.5010	.1820	.2810	.1540	.1510	.9870	.5100	.7590	.3830	.106	.0860
1.97 cpd	.2250	.1680	.0580	.1640	.0340	.0110	.0090	.0680	.0260	.0390	.0250	.0020	.0040	.0090
1.23 cpd	.3030	.0450	.4980	.0180	.0090	.0020	.0090	.0020	.0020	.0010	.0020	.0020	.0020	.0140

在 SPSS 统计分析中,标准偏差是测量值与其平均值之差,用来反映测量值偏离中心的程度;极差是测量最大值与最小值之差,用来反映测量值波动性的大小;显著水平是检验统计量的观测值在不同分布中的概率  $P$  值,用来判断分类型自变量对数值型因变量的显著性影响,习惯上  $P$  小于 5% 时,称检验结果为“显著”。从表 3 中可以发现,在亮度大于  $3 \text{ cd/m}^2$  时,1)标准偏差、极差按频率 3.79、4.97、9.86、1.97、1.23 cpd 的顺序依次增加,且频率  $f = 1.23$ ,

1.97、9.86 cpd 的标准偏差比频率  $f = 4.97$ 、3.79 cpd 的几乎高出一个数量级;2)频率为 3.79 和 4.97 cpd 时各平均亮度的  $P$  值均大于 0.05,频率为 1.97 和 1.23 cpd 时的  $P$  值均小于 0.05,频率为 9.86 cpd 时,当平均亮度大于  $5 \text{ cd/m}^2$  且除去 60 和  $70 \text{ cd/m}^2$  外,其余各平均亮度的  $P$  值均小于 0.05.表明频率为 3.79 和 4.97 cpd 时,观察平均亮度大于  $3 \text{ cd/m}^2$  的各平均亮度光栅得到的对比度觉察阈值不存在显著性差异,波动较小,频率为 1.97 和 1.23 cpd 时,存在显

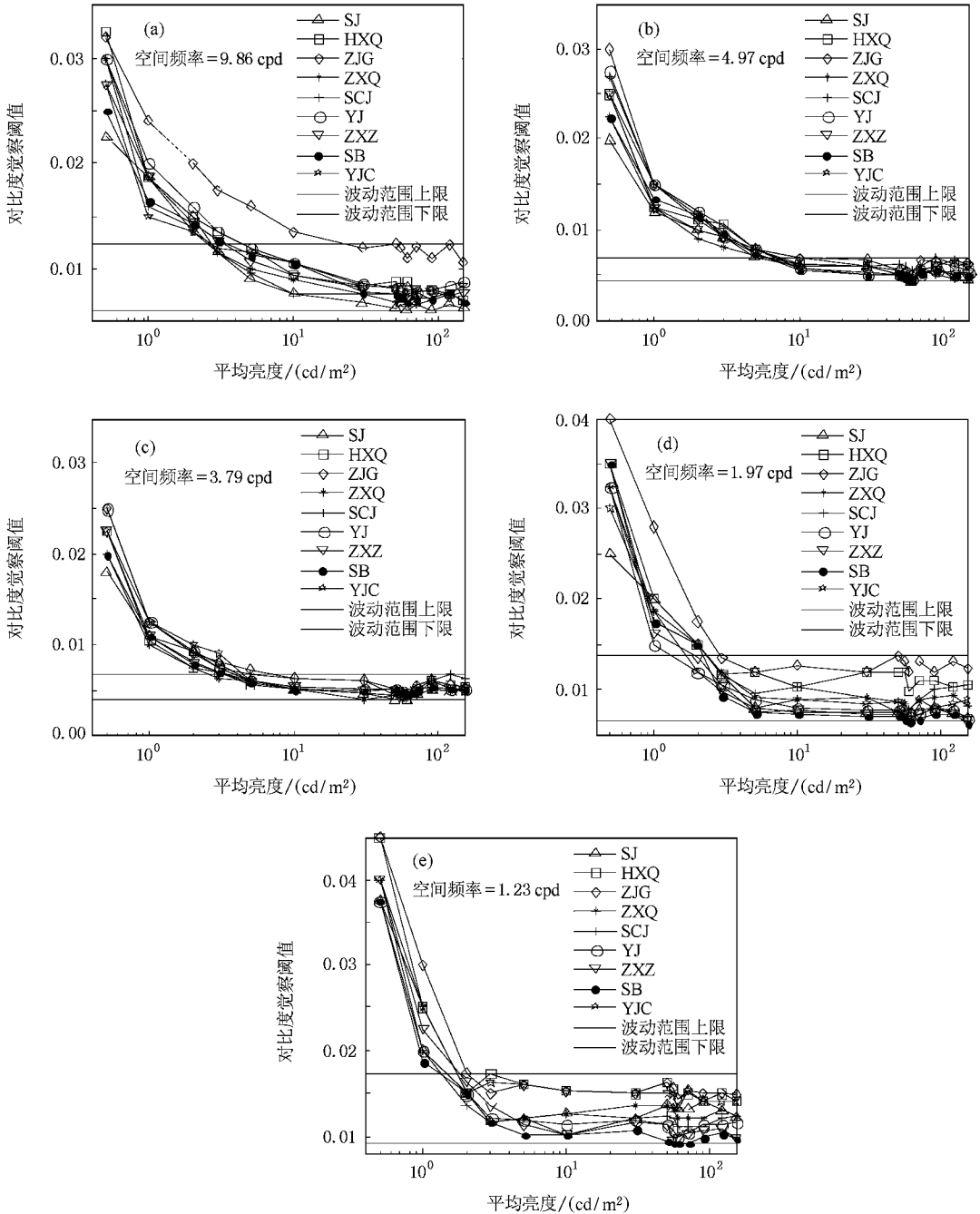


图 2 9 名被测试者对 5 种频率光栅在不同像场亮度下观测到的人眼觉察阈值

著性差异,波动较大;而频率为 9.86 cpd 时,观察当平均亮度大于  $5 \text{ cd/m}^2$  且除去 60 和  $70 \text{ cd/m}^2$  外其余各平均亮度光栅得到的对比度觉察阈值存在显著性差异,波动较大。

图 2 以目标光栅的空间频率为参数,以原始测量的人眼对比度觉察阈值作为平均亮度的函数,给出它们之间的关系曲线.由图 2 可以直观地发现,对应于同一亮度下,无论是同一频率还是不同频率光栅,9 名观察者观察到的对比度觉察阈值都有较大的不同.对频率  $f = 3.79$  和  $4.97 \text{ cpd}$  的光栅,9 名观察者观察到的阈值非常接近(如图 2(b)(c)),而对频率  $f = 9.86, 1.23$  和  $1.97 \text{ cpd}$  的光栅,无论是同一频率还是不同频率光栅,9 名观察者观察到的阈值差别都较大(如图 2(a)(d)(e)).

分析其原因可得,根据邓述移、Kathy 等人的研究<sup>[3,40]</sup> 频率  $f = 3.79, 4.97 \text{ cpd}$  是处在人眼最敏感的频率范围  $2\text{—}8 \text{ cpd}$  间,频率  $f = 9.86, 1.97, 1.23 \text{ cpd}$  是处在人眼最敏感的频率范围  $2\text{—}8 \text{ cpd}$  两外端.即暗示,视力正常的人在同一亮度下对处于人眼最敏感频率范围的物体的对比度觉察阈值非常相近,即分辨物体细节的能力非常相近;而当成像于视网膜上所对应的物体的频率不处于人眼最敏感频率范围时,不同的人对无论是同一频率还是不同频率物体的敏感程度都有较大的不同,且空间频率  $f$  越是远离人眼最敏感的频率范围,不同人眼在相同亮度条件下对同一频率或不同频率的物体观测到的觉察阈值差别就越大。

图 3 是 5 种不同频率下的平均人眼对比度觉察阈值与亮度的关系曲线.这一组曲线的形状大致相同,但是 5 条曲线随亮度变化的趋势是有很大的不同.各条曲线大致上可分为两段:在亮度比较低的范围,曲线波动大;在较高的范围,曲线趋于平滑,曲线的斜率接近于零;即在色度学里把亮度分为两个区域:DeVries-Rose 区域和 Weber 区域<sup>[6]</sup>,两区域之间的交接亮度称为转折亮度.对图 3 中的数据点进行三次多项式插值,根据插值的数据和当曲线的斜率  $K \leq 0.05$  时认为斜率为零,对 DeVries-Rose 区域和 Weber 区域分别进行拟合,其拟合曲线如图 4.由图 4 可见,频率  $f = 1.23, 1.97, 3.79, 4.97, 9.86 \text{ cpd}$  5 条曲线的转折亮度依次约为  $2.6, 4.2, 6.1, 10.4, 15.2 \text{ cd/m}^2$ ,即表明曲线的 Weber 区域随着频率的减小而变宽,且区域的起始点向亮度较低处平移。

对比分析图 3 和图 4 中 5 种频率曲线的 DeVries-Rose 区域和 Weber 区域的觉察阈值,在 DeVries-Rose 区域,对比度阈值  $C$  变化非常快,且频率  $f$  越小,对比度阈值  $C$  变化越快;而亮度处于 Weber 区域,从图 3 中的原始数据上看,对比度阈值  $C$  变化缓慢.即表明,在 DeVries-Rose 区域,提高显示器亮度可以降低对比度觉察阈值,提高显示器显示图像分辨力,但是随着亮度增加达到转折亮度时,亮度对分辨力的提高达到一定限度,且不同的频率  $f$ ,对分辨力的提高达到极限时所需要的亮度是不同的,约为各频率的转折亮度。

分析图 3 中 5 条曲线平滑部分的原始数据可见,不论空间频率  $f$  是高或是低,在亮度为  $60 \text{ cd/m}^2$  时,人眼的对比度觉察阈值最小.即表明,当显示器亮度处于  $60 \text{ cd/m}^2$  时,图片显示的细节最清楚,即显示图片的效果处于最佳状态,显示信息效果与人眼视觉特性最匹配。

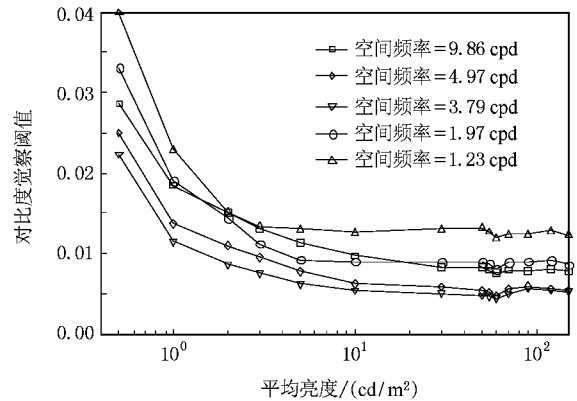


图 3 不同像场亮度下 5 种频率光栅的平均人眼觉察阈值

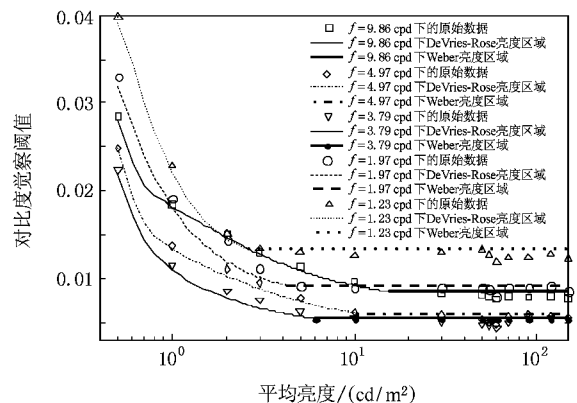


图 4 拟合不同像场亮度下 5 种频率光栅的平均人眼觉察阈值

### 5. 结论与讨论

对于在不同亮度条件下测量对比度觉察阈值，邓述移, Eva, Kathy 等人做了大量的研究<sup>[3, 6, 10, 13, 16]</sup>。图 5 是邓述移等人采用光学装置显示条纹在不同频率、不同亮度条件下测得的平均觉察阈值结果。对比分析本实验和邓述移等人实验的结果可得：1) 两实验的结果基本一致，包括曲线形状、对比度觉察阈值。2) 对于转折亮度，邓述移等人实验的结果表明，当频率  $f$  低于 3.7 cpd 的光栅时，转折亮度为  $1 \text{ cd/m}^2$ ，而本实验具体得出了频率  $f = 1.23, 1.97, 3.79, 4.97, 9.86 \text{ cpd}$  的光栅的转折亮度。3) 在亮度较低时，邓述移等人实验得出的对比度变化趋势几乎没有差异，而本实验结果表明，频率  $f$  越小，对比度变化越快。

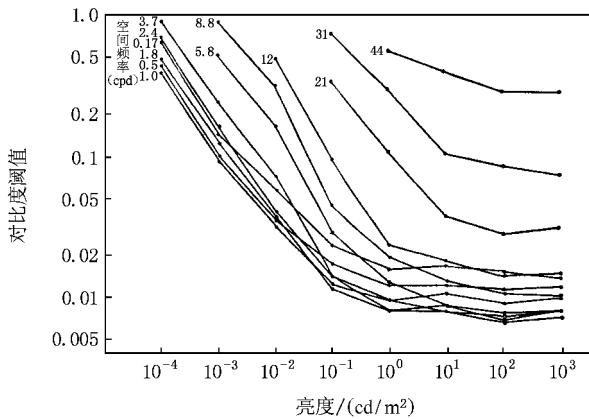


图 5 不同频率光栅在不同亮度条件下的觉察阈

图 6 是 Eva 等人用 Sony-CPD17SF2 彩色显示器显示光栅测量频率  $f = 0.5 \text{ cpd}$  的光栅在不同亮度条件下 3 名青年的对比度阈值结果，由图 6 可见，三人的阈值相差较大，与本实验的结论（即空间频率  $f$  越是远离人眼最敏感的频率范围，不同人眼在相同亮度条件下对同一频率的物体观测到的觉察阈值越相差较大）基本一致。图 7 是其测量三种频率（0.5, 1, 2 cpd）光栅在不同亮度条件下的平均对比度阈值结果。由图 7 得出，频率  $f = 0.5, 1, 2 \text{ cpd}$  的光栅的转折亮度依次为  $1.15, 1.79, 3.09 \text{ cd/m}^2$ ，而图 4 得出的转折亮度普遍稍偏高。

通过同邓述移和 Eva 等人实验结果的对比，三实验结果基本一致，但还存在差异。这主要是因为人眼对比度觉察阈值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、环境和实验设置参数的不同。

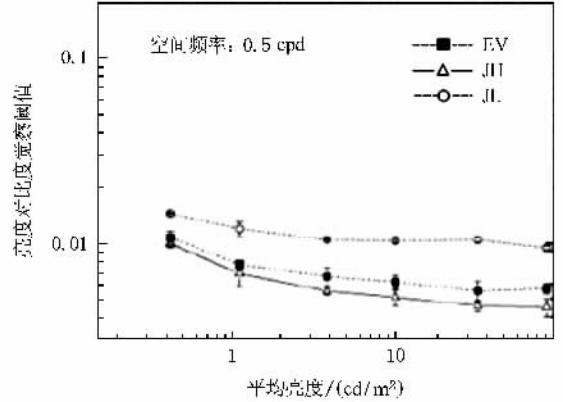


图 6 三名观察者对频率 0.5 cpd 光栅在不同象场亮度下观察到的阈值

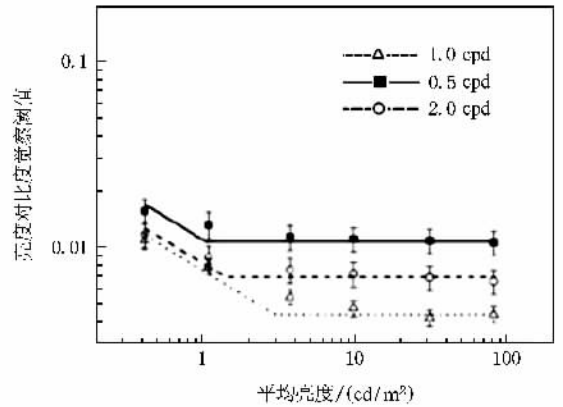


图 7 三种频率光栅在不同亮度条件下的觉察阈值

人的视觉是由光、目标和视觉系统共同决定。人眼观察物体时，进入到人眼刺激感觉细胞的光线强度决定着人眼的分辨力，光线强度越大，人眼的分辨力越强，观察所得到的阈值越小，相反则人眼的分辨力越差，观察所得到的阈值越大。当观察目标的亮度处于 DeVries-Rose 区域时，进入到人眼刺激感觉细胞的光线强度随着图片亮度的增加而增加，但是当亮度达到 Weber 区域时，不论亮度增加与否，进入到人眼刺激感觉细胞的光线强度基本保持不变且接近最大，从而使眼分辨力受到限制，光线强度还与空间频率有关：1) 空间频率越大，开始使光线强度接近最大且保持不变所需要的亮度（即转折亮度）越高。2) 当频率  $f$  处于人眼最敏感范围时，光线强度非常相近，而当频率  $f$  不处于人眼最敏感范围时，同一频率或者不同频率的光栅下，进入到不同人眼刺激感觉细胞的光线强度都相差较大，且频率  $f$  越是远离人眼最敏感的频率范围，刺激不同人眼感觉细胞的

光线强度差别就越大.

从人眼对目标亮度的响应上,可以把亮度对人眼的照明水平分为暗视觉水平(低于  $10^{-3}$  cd/m<sup>2</sup> 亮度水平)、明视觉水平(3 cd/m<sup>2</sup> 亮度水平以上)及处于明视觉和暗视觉之间的中间视觉水平.而显示器的亮度范围刚好处于中间视觉水平和明视觉水平<sup>[1,2]</sup>.在中间视觉水平,杆体细胞和锥体细胞都产生响应,杆体细胞在亮度较低时对亮度比较敏感,甚至对非常暗的光也能响应,而锥体细胞在亮度足够高时对颜色比较敏感,但是当亮度达到一定高度时,亮度对颜色的影响比较小,杆体细胞和锥体细胞对亮度的敏感趋于饱和,使得亮度对比度觉察阈值变化非常小,人眼对亮度的敏感达到极限<sup>[1,3,4]</sup>,即如图3中的曲线,在亮度处于 DeVries-Rose 区域时,由于杆体细胞的作用对图像因亮度引起的对比度具有非常好的敏感性而使曲线的波动比较大,而在亮度达到 Weber 区域时,杆体细胞和锥体细胞对亮度的响应趋于饱和,曲线趋于平滑.

在人眼视觉特性研究中常采用不同的显示目标光栅的仪器,本实验采用 Sony G520 显示器显示矩形波光栅.对于彩色显示器,还原的等信号白色品等于标准光源  $D_{65}$  的色品,那么其还原的图像色品也近似等于景物在标准光源  $D_{65}$  照明下的色品.当还

原白的相关的色温升高时,显示图像的亮度也增加,对图像的颜色和对比度的影响也越大<sup>[1]</sup>.但是随着亮度达到足够高时,亮度对颜色的贡献和对亮度引起的对比度敏感的贡献(即显示器显示图像分辨力)都受到限制,且当亮度达到一定高度时,觉察阈值开始回升,人眼对图像的分辨力降低.且人眼视网膜上的照度水平过高,使得观察显示器的人主观上感到眩目.由图3可得,在亮度达到 60 cd/m<sup>2</sup> 时,人眼的对比度觉察阈值最小.基于以上,协调人眼视觉特性与显示器亮度、再显信息还原性间的关系,认为当亮度为 60 cd/m<sup>2</sup> 附近时,显示信息细节效果与人眼视觉特性最匹配.

对于人眼视觉特性与空间频率和亮度间的关系,有许多研究者用人眼调制传递函数的高频衰减和低频衰减来解释,而对于高频衰减和低频衰减主要是因为光学限制、解剖学限制和神经系统的作用.近些年,以傅里叶变换为工具来研究视觉信息加工做了大量的工作.有人认为,视觉系统是由许多各自对不同空间频率调谐的通道对信息进行加工,从而获得图像视觉的.对于这些方面的研究还没有足够的实验证据,但它的研究具有重大的理论和实践意义<sup>[3]</sup>.

- [1] Li H 1997 *Principle and application of color technology* (Beijing: Science Press) p224 (in Chinese) [李亨 1997 颜色技术原理及其应用(北京:科学出版社)第224页]
- [2] Roy S B 2002 *Principle of color technology* (Beijing: Chemistry Industry Press) p18
- [3] Deng S Y, Xu Z M, Du L F, Yang L H 1982 *Acta Armamentar* II, 2, 24 (in Chinese) [邓述移、徐智敏、杜连芳、杨俭华 1982 兵工学报 2, 24]
- [4] Liu W Q, Fong R, Zhou F K 1999 *Acta Opt. Sin.* **19** 1426 (in Chinese) [刘伟奇、冯睿、周丰昆 1999 光学学报 19 1426]
- [5] Klára W, Károly L, Krisztián S 2001 *Periodic Polytechnica Ser Mech Eng.* **45** 103
- [6] Eva M V, Juan L N, Jose A G 2004 *Col. Res. Appl.* **29** 18
- [7] Cui G, Luo M R, Rigg B, Li W 2001 *Col. Res. Appl.* **26** 394
- [8] Hong Z 2004 *Advanced Display* **42** 48 (in Chinese) [洪震 2004 现代显示 42 48]
- [9] Zhang J Y, Jing W Q, Zhou Y 2003 *Journal of Applied Optics* **24** 441 (in Chinese) [张建勇、金伟其、周燕 2003 应用光学 24 441]
- [10] Kathy T M 1984 *Journal of Physiology* **359** 381
- [11] Mai W L 1979 *Optics transfer function and mathematics base* (Beijing: National Defence Industry Press) p341 (in Chinese) [麦伟麟 1979 光学传递函数及其数理基础(北京:国防工业出版社)第341页]
- [12] Guo J X, Guo H C 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1995 (in Chinese) [郭建新、郭海成 2000 物理学报 49 1995]
- [13] Yan C C, Xue G G, Liu C, Gao S M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3058 (in Chinese) [闫长春、薛国刚、刘诚、高淑梅 2005 物理学报 54 3058]
- [14] Roy S B 1996 *Displays* **16** 173
- [15] Roy S B 1997 *Col. Res. Appl.* **22** 318
- [16] Zhou X C, Chen X S, Zhen H L, Lu W 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4247 (in Chinese) [周旭昌、陈效双、甄红楼、陆卫 2006 物理学报 55 4247]

# Experimental research of human vision characteristic in the range of luminance of cathode ray tube display<sup>\*</sup>

Yao Jun-Cai<sup>1)†</sup> Shen Jing<sup>2)</sup> Wang Jian-Hua<sup>1)</sup>

1) *Department of Physics ,Shaanxi University of Technology ,Hanzhong 723003 ,China )*

2) *Department of Compute Science and Technology ,Shaanxi University of Technology ,Hanzhong 723003 ,China )*

( Received 23 October 2007 ; revised manuscript received 23 December 2007 )

## Abstract

The goal gratings of five frequencies with different mean luminance were displayed on a CRT display ,the contrast detection thresholds under different condition were measured for 9 young observers ,and the curve reflecting the relationship between luminance and contrast detection threshold was obtained. Thus ,human vision characteristic for transferring luminance was discussed in the range of luminance of CRT. The experimental results showed that the contrast thresholds of different observers were very similar for gratings with frequencies of 3.79 and 4.97 cpd ,while they were quite different for gratings with frequencies of 1.23 ,1.97 and 9.86 cpd ,and the contrast detection threshold could be lowered by increasing the luminance of grating ,but the resolving power went to a limit with the luminance increasing ,and effect of the CRT display matched with human vision characteristic very well when the luminance was 60 cd/m<sup>2</sup> . The results would make a good foundation for research and application in image manipulation ,display manufacture ,photography ,printing ,color matching and so on .

**Keywords** : human vision characteristic , contrast detection threshold , visual angle , spatial frequency

**PACC** : 0762 , 8732S

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 10447005 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : yjc4782@yahoo.com.cn