

# 简易-环境光对比度与恰可察觉明度阈值建模

卢智平<sup>1</sup> 刘 真<sup>1</sup> 张建青<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 上海理工大学出版印刷与艺术设计学院, 上海 200093)  
(<sup>2</sup> 上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘要** 针对环境光对移动终端显示内容室外可读性的影响,以及移动终端设备亮度与环境光的相关性,用液晶显示器(LCD)的移动终端测量了人眼恰可察觉明度阈值。在不同环境光照度,不同设备亮度下,观察不同空间频率和不同平均明度的正弦灰色条纹,记录恰可察觉明度阈值。分析了环境光对不同频率和不同平均明度条纹的恰可察觉明度阈值的影响,建立了简易-环境光对比度与恰可察觉明度阈值模型。结果表明:环境光的影响与条纹的人眼对比敏感度成反比,所建模型可得到较为明确的函数关系,该研究成果可适用于不同环境光下移动终端亮度的优化设置。

**关键词** 视觉光学;环境光;恰可察觉明度阈值;简易-环境光对比度;移动终端

**中图分类号** O432.3 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0933002

## Model of Simplified Ambient Contrast and Just-Noticeable Lightness Threshold

Lu Zhiping<sup>1</sup> Liu Zhen<sup>1</sup> Zhang Jianqing<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Communication and Art Design, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

<sup>2</sup> School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

**Abstract** A mobile terminal-based method is established for testing the influence of ambient light on outdoor readability and the relevance of device brightness and ambient light. Gray sinusoidal fringes of different frequencies and different brightness centers are observed under different ambient light and different device brightness. According to the recorded just-noticeable lightness threshold, the influence of ambient light on the just-noticeable lightness threshold is analyzed and the model of simplified ambient contrast and just-noticeable lightness threshold is established. The results show that the influence of ambient light is inversely proportional to the contrast sensitivity of the observed sinusoidal fringes. A quite specific function can be got by the model and it can be applied to the setting of the device brightness under different ambient light.

**Key words** visual optics; ambient light; just-noticeable lightness threshold; simplified-ambient contrast; mobile terminal

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

## 1 引言

对比敏感度函数(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。CSF描述的是空间频率和用对比度阈值倒数表示的对比敏感度之间的关系<sup>[1]</sup>。亮度对比敏感度定义为黑白

收稿日期: 2014-04-28; 收到修改稿日期: 2014-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(41271446)

作者简介: 卢智平(1990—),男,硕士研究生,主要从事颜色科学和色彩管理方面的研究。E-mail: lu\_zhiping@126.com

导师简介: 刘 真(1953—),女,教授,博士生导师,主要从事数字印前图文信息、处理、颜色再现理论与应用、数字印刷计算机集成系统等方面的研究。E-mail: lunaprint@163.com

正弦条纹恰可察觉时沿亮度差值的倒数,而不同空间频率下的对比敏感度则形成对比敏感度的空间频率函数。关于 CSF 前人做了大量细致的研究,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数学拟合公式<sup>[2-4]</sup>。彩色对 CSF 的影响也在近几年开始备受关注,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等<sup>[6-10]</sup>。

然而,现有 CSF 测试实验基本都是在暗室之中完成,实验数据虽然精确可靠,但却没有考虑多变的实际应用场景。随着液晶显示技术的日趋成熟,移动终端市场占有率越来越高。据市场研究公司 Canals 发布的最新报告显示,2014 年平板电脑将占全球所有计算机出货量的 50%。与此同时,移动终端的轻便快捷也直接导致使用环境的千差万别,从黑暗的房间(0 lx)、日常生活环境(100~300 lx)、到晴天正午的阳光下( $10^4 \sim 10^6$  lx),环境光照度的差异非常大<sup>[11]</sup>。因此传统的 CSF 测试实验并不能反映人眼在不同环境光照下的视觉特性。

2010 年,姚军财等<sup>[12]</sup>利用阴极射线管(CRT)显示器获取了在暗室、3 种常见照明灯光和室内自然环境条件下的人眼对比度敏感视觉阈值。研究发现,对应相同的频率,在暗室、室内自然环境和灯光条件下的人眼对比度敏感值依次减小。2012 年,徐艳芳等<sup>[13]</sup>研究发现环境光对显示器的呈色有影响,主要表现在黑场和暗调区域明度的增加,造成该区域的色域压缩。上述两组研究一定程度上解释了为何在日常生活中,环境光的增加会导致手机、平板电脑上的内容难以辨清。然而,实验室中测试 CSF 时基本已经将屏幕亮度校正到一个定值,现有实验尚无法解释屏幕亮度增加后,环境光影响减小,屏幕上内容能够看清的现象。

目前亮度和彩色阈值的获取都基本依赖于传统 CRT<sup>[4,12]</sup>和发光二极管(LED)显示设备,使用移动终端进行 CSF 测量的相关文献还很少。相比于传统显示器可以进行精确的色彩管理,移动终端只能进行亮度设置。2012 年,李宏汀等<sup>[14]</sup>采用视觉搜索任务,从行为绩效、主观评价以及眼睛疲劳度指标来考察环境照度、手机屏幕亮度对视觉搜索绩效的影响,并提出在不同的环境照度下手机屏幕亮度的最优值设置参数,然而并没有建立模型说明手机屏幕亮度、环境照度与人眼视觉特性之间的关系。

调查发现,亮度较高的环境照度下,尤其是在室外,绝大多数情况,移动终端使用者只要求看清屏幕

上的内容,而对颜色并没有严格的要求。故使用移动终端在暗室中进行基础测试,检验使用移动终端进行人眼恰可察觉明度阈值测试的可行性。根据基础测试结果,制作 9 组正弦测试条纹,测试不同环境照度,不同屏幕亮度时这 9 组条纹的恰可察觉明度阈值。提出了一种简易环境光照度-恰可察觉明度阈值模型,并进行优化,分析验证了模型的效果,并给出如何使用该模型针对不同环境照度,设置移动终端屏幕亮度最小值,使人眼达到最佳分辨效果的方法。

## 2 前期基础测试

### 2.1 正弦条纹制作

测试图像为用 Matlab 软件生成的“tiff”图像,颜色信息用 Lab 三通道值表示,Lab 值为给定值,如( $L=20, a=0, b=0$ )。然后直接将这 Lab 格式的图片在 iPad 上进行显示,经测试不同屏幕亮度时, $L$  值偏差很小,对实验精度不造成影响。中心条纹尺寸为 256 pixel $\times$ 256 pixel。条纹背景为中性灰,背景亮度为中心条纹最大明度和最小明度的平均值。由于空间频率低于 0.5 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 0.5~11.5 cycle/( $^\circ$ )。屏幕白点的三刺激平均值为(90.63818, 97.33818, 105.0755),条纹平均明度为  $L=0 \sim 95$ ,明度间距为  $\Delta L=5$ 。图 1 为正弦测试条纹。

明度阈值由金杨<sup>[15]</sup>在博士论文中提出,他将明度对比度定义为:(最大明度-最小明度)/(最大明度+最小明度)。

使用明度阈值而不是亮度阈值建模的原因是:

1) 人眼视觉具有色适应能力,当显示器的绝对亮度发生变化时,经过短暂时间的适应,理论上同样



图 1 正弦测试条纹

Fig. 1 Sinusoidal fringe

明度的人眼视觉感受是一致的。在移动终端实际使用过程中,例如当观察一幅图像时,图像每一点的RGB已知,设备默认色空间已知(例如sRGB)。那么设备驱动值与中间色空间(PCS)Lab值之间存在一一对应的关系。当屏幕亮度不断在变的时候,绝对亮度值不断在变,相反能够反映人眼视觉感受的L值更适合应用于所建模型中;

2) 明度L更能反映人眼的观察效果,亮度Y值与人眼的视觉感受并不成线性关系。而明度L值与人眼视觉感受成线性关系。明度L值以均匀色空间CIE 1976L\*a\*b\*为基础,在颜色描述的视觉均匀性上可以达到较好的水平(尽管与色貌模型相比,其色差均匀性尚有差距);

3) 复杂程度较低,在软硬件支持方面,能够较方便地实现视觉测试所必需的影像及测试环境条件;

4) 为了实验数据的准确性,给出了各屏幕亮度的白点三刺激值。

## 2.2 实验设备及观察条件

条纹使用软件Matlab 7.11.0(R2010b)在HP Z400工作站上生成,最后使用iTunes导入观察设备iPad2。

由于对比敏感度受到视场大小、条纹平均亮度、条纹背景亮度、条纹数目以及环境照度等众多因素的影响。因此,实验在暗室中进行,只有iPad2屏幕产生的亮度。测试使用2.1°视场,且iPad屏幕与水平面成45°角。使用2.1°视场理由如下:

1) 视网膜的中央部位覆盖着一层黄色素,由于黄色素在中央窝的密度最大,到达视网膜边缘显著降低,这就造成观察小面积颜色和大面积颜色时颜色的差异。当观察大于4°视场的颜色时,在视线正中会出现一个略带红色的圆斑,叫做麦克斯韦圆斑。麦克斯韦圆斑出现在大面积颜色的均匀表面上,直径大约占4°视角,总的来说黄色素对视觉的影响甚小,所以在日常生活中并不能察觉麦克斯韦圆斑,但在观察高亮度的颜色时,常会出现麦克斯韦圆斑。因此在视觉颜色实验中,观察小视场(2°)颜色和观察大视场(10°)颜色会得出不同的结果。因此在要求高清晰度、高分辨力的场合,应该使用2°视场,使物像直对视轴,而其影像恰好聚焦在中央窝内<sup>[16]</sup>;

2) 根据美国光学学会(OSA)建立的ModelFest组织对“空间标准观察(SSO)”规定的对比敏感度测试条件<sup>[17]</sup>,刺激图像像素数为256 pixel×256 pixel,观察距离为每个像素点对人眼形成0.5'的视角。整

个刺激区对眼睛形成的角度为:(256×1/120°) = 2.1°。

实验在暗室中进行,共有6名观察者参与视觉评估,均为上海理工大学在读研究生,男3人,女3人,年龄均在23~25岁之间,色觉正常,视力正常或经过校正后都在1.0以上,并在实验前均经过2 min暗适应和1 min亮适应。每位观察者每天测试1~2次,每次测试时间不超过30 min,以避免长时间观察产生疲劳。实验采用2AFC心理物理学交叉阶梯法,对被试的操作要求较低,测试精度高,且有稳定的测试步骤。

## 2.3 实验结果与讨论

### 2.3.1 不同明度中心下的对比敏感度函数

图2为不同明度下的对比敏感度函数曲线。

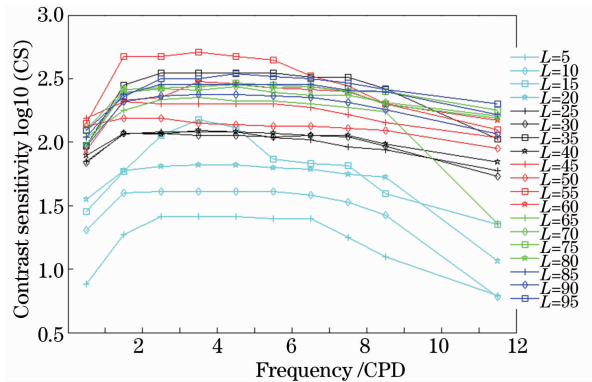


图2 环境照度为0时,不同明度中心下的对比敏感度函数

Fig. 2 Contrast sensitivity function of different lightness centers when in dark room

由图2可知,不同明度中心下,对比敏感度函数之间存在差异,但规律基本一致:人眼敏感度随频率增加先增大后减小。由于实验设备和采样精度的限制,曲线并不平滑。在人眼敏感的空间频率F=3~6 CPD之间,由于设备显示的最小精度大于人眼所能分辨的最小对比度,所以该部分函数表征为一条水平线,但总体趋势依然明显。此结果与金杨获取的中等明度下,中等彩度时的明度对比敏感度曲线结果趋势基本一致。

为了更好地与前人的研究结果相比较,选取明度L=90时,根据白点三刺激值计算亮度对比敏感度。结果如图3所示。

由图3可知,当明度L=90时,亮度对比敏感度随空间频率增大呈现先增大后减小的趋势,与前人的研究结果较为一致。

2.3.2 固定空间频率、明度变化时对比敏感度曲线  
将图2经过处理可以得到,不同空间频率时,对

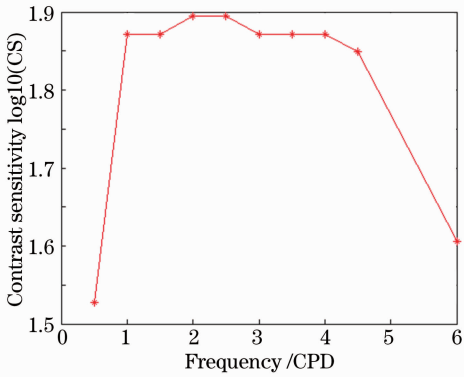


图 3 明度  $L=90$  时,亮度对比敏感度函数曲线  
Fig. 3 Contrast sensitivity function of luminance when  $L=90$

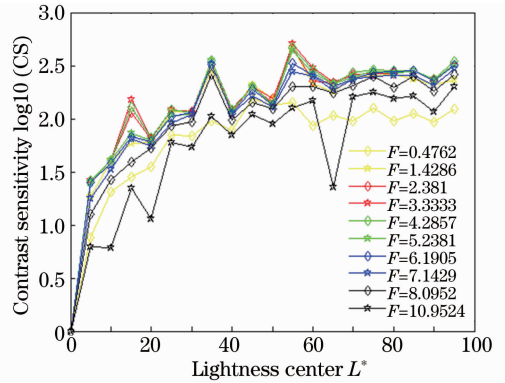


图 4 不同频率的明度对比敏感度  
Fig. 4 Contrast sensitivity of different frequencies under different lightness centers

比敏感度随条纹明度中心的变化情况。结果如图 4 所示。由图 4 可知,当条纹空间频率一定时,明度对比敏感度随条纹平均明度值增大基本呈现先增大后趋于平缓的趋势。

综上所述,由于实验设备的精度限制,在移动终端上无法精确地获取人眼最敏感频率时人眼明度对比敏感度,但基本可以反映人眼 CSF 的趋势。由于需要考虑环境光的影响,考虑环境光后,明度阈值增

加,移动终端显示精度足以表征人眼明度阈值。

### 3 移动终端环境光影响测试

#### 3.1 测试条纹制作

选取空间频率  $F1=3.5$  CPD,  $F2=6$  CPD,  $F3=9$  CPD, 条纹中心明度  $L1=20, L2=55, L3=75$ , 制作  $3 \times 3=9$  组不同空间频率,不同明度中心的正弦测试条纹。

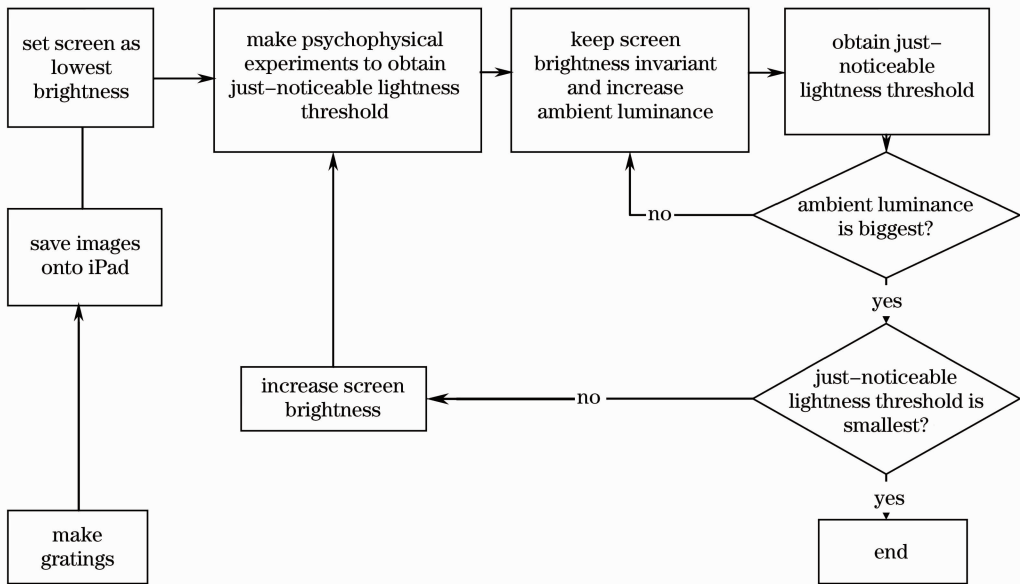


图 5 iPad 环境光影响测试流程图

Fig. 5 Flow chart of testing the influence of ambient illumination on iPad

#### 3.2 实验设备及观察条件

条纹制作使用 HP Z400, 软件使用 Matlab 7.11.0(R2010b), 观察设备为 iPad2, 分光辐射度计使用 Konica Minolta CS2000, 照度计, 可调节亮度式灯箱。观察时, iPad 屏幕与水平面成  $45^\circ$  角。

#### 3.3 实验方法及流程

实验方法为先固定屏幕亮度, 由小到大调节灯箱亮度, 用照度计测量此时屏幕位置的环境照度, 人眼观察条纹, 记录恰可察觉明度阈值。然后增加屏幕亮度, 重复上述实验, 实验流程图如图 5 所示。

屏幕亮度总共为 7 组,三刺激值分别为(6. 65 46. 064 52. 264),(73. 57 76. 154 87. 048),(98. 444 6. 892 7. 956),(9. 716 10. 06 11. 726),(18. 074 101. 852 116. 302)。明度阈值部分实验数据记录如表 1,表 2 所示。

表 1 屏幕亮度固定、环境光增加时恰可察觉明度阈值

Table 1 Just-noticeable lightness threshold when ambient luminance increases

Ambient luminance /lx	L=20	L=20	L=20	L=55	L=55	L=55	L=75	L=75	L=75
	F=3, 5	F=6	F=9	F=3, 5	F=6	F=9	F=3, 5	F=6	F=9
0	0.4	1.2	2.4	0.5	1	2.4	0.5	1.2	2.1
301	2.2	3.5	7.2	0.5	1.5	3.3	1.2	1.7	3.2
495	3	5	7.4	0.5	1.7	3.3	1.2	1.6	3.2

表 2 暗室时,恰可察觉明度阈值随屏幕亮度增加变化情况

Table 2 Just-noticeable lightness threshold when device brightness increases in dark room

Device white /black points (cd/m <sup>2</sup> )	L=20	L=20	L=20	L=55	L=55	L=55	L=75	L=75	L=75
	F=3, 5	F=6	F=9	F=3, 5	F=6	F=9	F=3, 5	F=6	F=9
6. 892/0. 018	0.4	1.2	2.4	0.5	1	2.4	0.5	1.2	2.1
18. 704/0. 125	0.3	0.3	1	0.2	0.2	1.1	0.6	1	1
46. 064/0. 266	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.2	0.6	0.6	0.7
101. 852/0. 462	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.6	0.6	0.5

由表 1 可知:1)当屏幕亮度固定时,随环境光照度增加,人眼观察各条纹时恰可察觉明度阈值增加;2)对照第二章基础测试的结论可以得知,恰可察觉明度阈值增加量和人眼对该频率的敏感程度成反比,敏感程度越高,恰可察觉明度阈值增量越小。

由表 2 可知:1)随屏幕亮度增大,恰可察觉明度阈值减少。这也从理论上验证了屏幕亮度增大,可以使强光下屏幕上看不清的内容重新清晰的现象;2)随着屏幕亮度的增大,恰可察觉明度阈值的减少量与人眼敏感程度成反比,人眼越不敏感的条纹,恰可察觉明度阈值减少越大;3)随着屏幕亮度逐渐增大到某一亮度,恰可察觉明度阈值减小到某一定值,此时该定值为设备所能显示的最小精度。

## 4 环境光对比度-人眼明度阈值模型建立

### 4.1 简易-环境光对比度的提出

环境光对比度测量一般有 VESA Flat Panel Display Measurement Standard (Version 2. 0)<sup>[18]</sup> 和 NISTIR 6738 Proposed Diffuse Ambient Contrast Measurement Methods for Flat Panel Display<sup>[19]</sup> 两种测试标准。

但是两种公式比较复杂,需要测试量较多,且测试条件要求较高,故提出一种结合环境光照度、显示器黑白场亮度的计算公式。

环境光对比度可用分式表示:其中分子为环境光照度与白场环境影响因子乘积再加上白场亮度;

分母为环境光照度与黑场环境影响因子的乘积再加上黑场照度。

其中,白场亮度定义为暗室环境下,显示器全屏显示白色块( $R=255, G=255, B=255$ )时的亮度值。黑场亮度暗室环境下,显示器全屏显示黑色块( $R=0, G=0, B=0$ )时的亮度值。

白/黑场环境影响因子定义为环境光照对屏幕白/黑场的影响系数。影响系数由屏幕白/黑场增量计算获得。屏幕白场增量定义为在暗室条件与非暗室条件下,全屏显示白色块时的屏幕亮度差值。黑场增量定义为在暗室条件与非暗室条件下,全屏显示黑色块时的屏幕亮度差值。

通过拟合环境光照增量和白/黑场增量可以获得环境光照对显示器白场和黑场的影响系数,根据拟合函数可以计算出不同环境照度下,屏幕白场和黑场的增量值。

### 4.2 白场和黑场环境影响因子测试

为了测试环境光对移动终端黑场和白场的影响因子,使用柯尼卡美能达分光辐射度计 CS2000,柯尼卡美能达照度计 T-10A 在 GTI cmlite 灯箱中进行了一系列相关实验,使用 CS2000 在标准观察距离下,测试在暗室环境和不同环境光下,屏幕白场和黑场亮度的变化情况。部分实验数据如表 3 所示。

最后对不同环境照度下,白场和黑场增量以及环境照度增量之间进行了拟合。拟合结果如图 6 所示。



表 3 不同屏幕亮度时白场增量随环境照度变化情况

Table 3 White incremental changes with the ambient luminance at different device brightness

Ambient luminance /lx	0	100	200	300	400	500	560
Device white incremental / (cd/m <sup>2</sup> )							
Device brightness 1	0	0.28	0.63	0.98	1.38	1.84	2.09
Device brightness 2	0	0.38	0.65	0.99	1.23	1.86	2.28
Device brightness 3	0	0.27	0.62	1.03	1.24	1.57	1.8
Device brightness 4	0	0.31	0.62	1	1.19	1.62	1.92
Device brightness 5	0	0.35	0.73	1.07	1.35	1.87	2.22
Device brightness 6	0	0.32	0.73	0.99	1.31	1.8	2.22

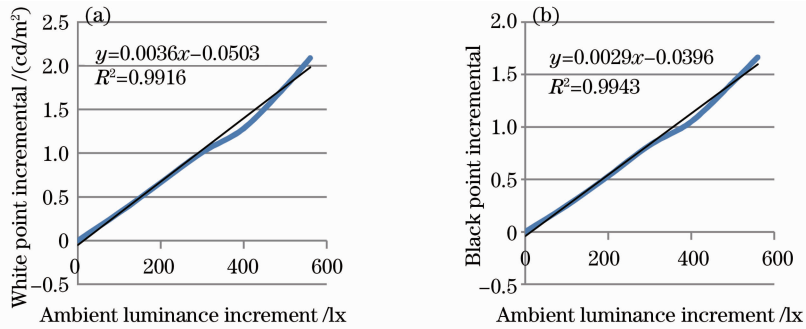


图 6 环境光增量-白场/黑场增量拟合效果图

Fig. 6 Fit of ambient light incremental and white/black point incremental

由此可见,屏幕白场/黑场的亮度增加与环境照度增量之间基本成线性关系。白场增量与环境光增量之间的拟合函数  $y = 0.0036x - 0.0503$ ,  $R^2 = 0.9916$ ;黑场增量与环境光增量之间的拟合函数  $y = 0.0029x - 0.0396$ ,  $R^2 = 0.9943$ 。通过以上实验可以得出移动终端白/黑场的环境影响因子。

### 4.3 模型分析、优化与验证

#### 4.3.1 明度不变中心,频率变化

固定条纹明度中心不变,而频率变化,选取  $L1 = 20 \& F1 = 3.5$  CPD,  $L1 = 20 \& F2 = 6$  CPD,  $L1 = 20 \& F3 = 9$  CPD 这三组来进行模型效果验证。模型效果如散点图 7(a)。

由图 7(a)可知恰可察觉明度阈值与简易-环境光对比度基本成反比,由于测试误差,设备精度以及

模型精度的影响,层次明显但曲线并不平滑。故对这三组数据进行平滑处理,使用 Matlab 软件拟合工具箱中的 smooth 选项,平滑方法使用 Lowess(局部加权散点平滑数据),原理是采用线性最小二乘法和一阶多项式拟合得到的数据来替换源数据,根据经验当 Span(平滑计算数据点的数目)设置为 0.5 时效果较好。平滑效果图如图 7(b)所示。

#### 4.3.2 频率不变,明度中心变化

固定频率不变,而条纹明度中心变化,选取  $L1 = 20 \& F3 = 9$  CPD,  $L2 = 55 \& F3 = 9$  CPD,  $L1 = 75 \& F3 = 9$  CPD 这三组来进行模型效果验证。模型效果如散点图 8(a)。用相同方法对这三组数据进行平滑处理,得到图 8(b)。

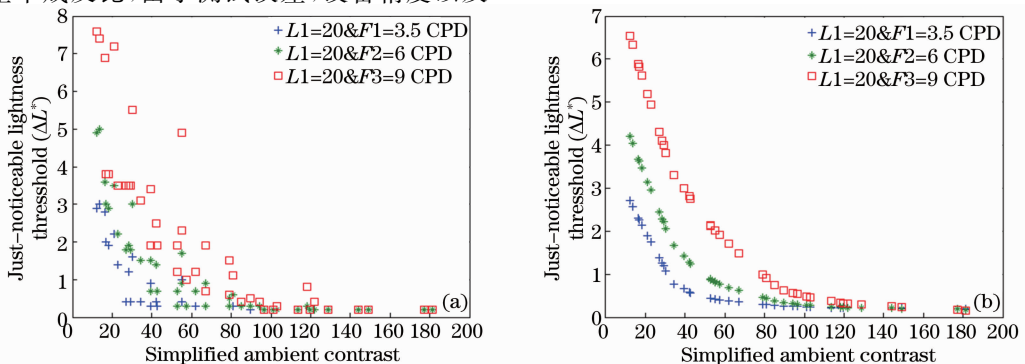


图 7 频率变化时,恰可察觉明度阈值随简易-环境光对比度的变化关系

Fig. 7 Just-noticeable lightness threshold versus simplified ambient contrast when frequency changes

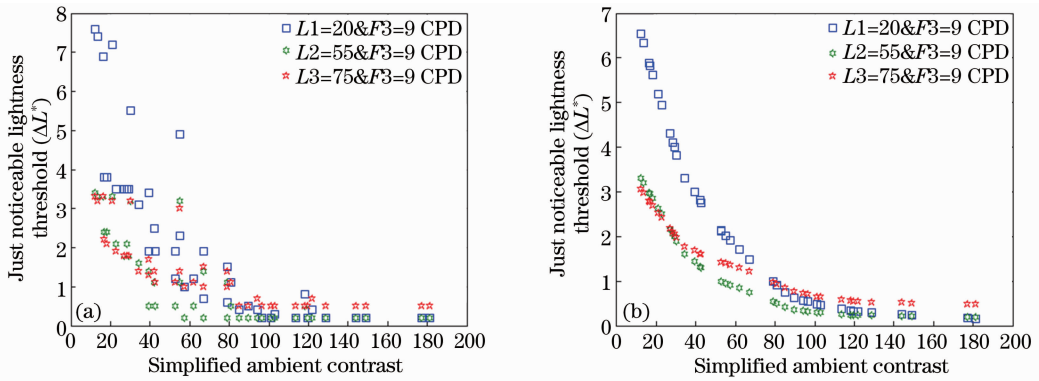


图 8 条纹明度中心变化时,人眼明度阈值随简易-环境光对比度的变化

Fig. 8 Just-noticeable lightness threshold versus simplified ambient contrast when lightness center changes

使用所建模型,计算简易-环境光对比度,绘制“简易环境光对比度-恰可察觉明度阈值”散点图,由散点图可知:

1) 随着简易-环境光对比度增大,人眼恰可察觉明度阈值减小,直到减小为某一定值,并不再变化;

2) 环境光对各种条纹的影响不一,人眼最敏感的条纹,影响小于不敏感的条纹。具体来说,当我们观察一副图像时,增大环境光,首先从眼帘中“消失”的应该是人眼最不敏感的部分。这恰恰验证了当在强光下观察屏幕时,暗调部分的损失尤其严重;

3) 当简易-环境光对比度大于某一定值时,人眼恰可察觉明度阈值会达到定值,但不同空间亮度和空间频率的定值并相同。针对模型进行平滑处理,处理后的图像满足反比例函数。对该模型可以进行拟合,再根据前期测得的显示设备在某频率,某条纹平均明度所能显示的最小精度,就可以求出人眼观察该条纹时应该设置的最小简易-环境光对比度,从而可以计算出不同环境光亮度下屏幕最小亮度;

4) 根据第 3 节和第 4 节的结论,在有环境光情况下显示一幅图像时,只需解析出人眼最不敏感部分的频率和亮度,便可根据所建模型计算出能看清图中内容的所需的最小屏幕亮度。

## 5 结 论

分析了移动设备测试人眼恰可察觉明度阈值的可行性,基于实验数据分析了环境光对人眼观察不同空间频率和不同明度中心条纹时恰可察觉明度阈值的影响,发现环境光对恰可察觉明度阈值的影响与人眼在暗室下观察相同条纹时的敏感程度成反比。建立了简易-环境光对比度与恰可察觉明度阈值预测模型,并使用 Lowess 算法对模型进行优化。

可以通过所提模型计算不同环境光下,显示器可显示最小对比度时的最小亮度。由于移动设备硬件的限制,尚无法精确获得环境光对人眼对比敏感度函数的影响,由于实验室灯箱的亮度限制,尚无法获高环境照度(>1000 lx)下的人眼明度对比敏感度,这都有待于在以后的工作中解决。

## 参 考 文 献

- 1 Lü Weige, Xu Haisong, Wang Zhehong, *et al.*. Investigation of chromatic contrast sensitivity based on different color directions and spatial frequencies [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0133002.  
吕玮阁, 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): 0133002.
- 2 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.
- 3 P G J Barten. Formula for the contrast sensitivity of the human eye [C]. *SPIE*, 2004, 5294: 231-238.
- 4 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. 用显示器测量人眼衬比度敏感函数[J]. *光学学报*, 2007, 27(4): 744-748.
- 5 G M Johnson, M D Fairchild. On contrast sensitivity in an image difference model [C]. *IS&T PICS*, 2002, 18-23.
- 6 S Westland, H Owens, V Cheung, *et al.*. Model of luminance contrast sensitivity function for application to image assessment [J]. *Col Res Appl*, 2006, 31(4): 315-319.
- 7 K T Mullen. The contrast sensitivity of human colour vision to red-green and blue-yellow chromatic gratings [J]. *J Physiol*, 1985, 359(1): 381-400.
- 8 Allen B Poirson, Brian A Wandell. Pattern-color separable pathways predict sensitivity to simple colored patterns [J]. *Vision Res*, 1996, 36(4): 515-526.
- 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 J S Shi, H F Yu, S Q Jiang, *et al.*. Color difference sensitivity of human vision system for red-green and yellow-blue directions [C]. *SPIE*, 2005, 6033: 60330M-1.

- 11 Wu Weihua, Li Qiang. Argumentation on measurement method for ambient contrast ratio of display [J]. Video Engineering, 2012, 36(6): 84-86.  
吴蔚华, 李 强. 关于显示屏环境光对比度测量的讨论[J]. 电视技术, 2012, 36(6): 84-86.
- 12 Yao Juncai, Shen Jing, Ren Yajie, *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.  
姚军财, 申 静, 任亚杰, 等. 周围环境对人眼对比敏感视觉特性的影响[J]. 液晶与显示, 2010, 25(3): 444-448.
- 13 Xu Yanfang, Liu Xiaoning. Investigation of the impact of surrounding light on monitor's color showing, part II: impact on color gamut [J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2012, 20(2): 5-8.  
徐艳芳, 刘晓宁. 环境光照对显示器呈色的影响研究(2): 环境光对显示色域的影响[J]. 北京印刷学院学报, 2012, 20(2): 5-8.
- 14 Li Hongting, Zhang Yanxia, Xu Weidan, *et al.*. Research of optimal parameters of the phone screen brightness under different environmental illumination [J/OL]. <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/content/4480026>, 2012-06-05/2014-04-22.  
李宏汀, 张艳霞, 徐伟丹, 等. 不同环境照度下手机屏幕亮度最优参数研究[J/OL]. <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/content/4480026>, 2012-06-05/2014-04-22.
- 15 Jin Yang. Study on Contrast Sensitivity Function of Human Color Vision Under Uniform-Scaled Color Space-Principle, Testing and Application [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013. 46.  
金 杨. 基于均匀颜色空间的彩色视觉对比敏感度函数及其应用[D]. 南京: 南京林业大学, 2013. 46.
- 16 Zheng Yuanlin, Qi Yonghong. Analysis of visual field application in color measurement [J]. Packing Engineering, 2008, 29(9): 68-69.  
郑元林, 戚永红. 色彩测量中的视场应用分析[J]. 包装工程, 2008, 29(9): 68-69.
- 17 Model Fest Methods [EB/OL]. (1999-11-01) [2014-03-10]. <http://vision.arc.nasa.gov/modelfest/methods.html>.
- 18 VESA, Flat Panel Display Measurement Standard, VER. 2.0 [S]. Milpitas, USA: Video Electronics Standards Association, 2001. 135-152.
- 19 E F Kelly. Proposed diffuse ambient contrast measurement methods for flat panel displays [J]. NISTIR, 2001, 6138(6): 308-2.

栏目编辑: 张浩佳