

文章编号:1007-2780(2016)02-0222-07

# 用显示器测量人眼视觉的亮度最小可觉差

黄小乔,石俊生\*,邰永航

(云南师范大学 物理与电子信息学院,云南 昆明 650500)

**摘要:**最小可觉差是人眼视觉重要特性之一,随着计算机显示器的普及,显示器环境下的亮度最小可觉差对图像细节有重要的应用价值。利用 10 bit 图像显示卡和液晶显示器方便、精确控制亮度刺激,在显示器显示亮度范围内产生 27 个不同亮度背景,采样心理物理学亮度视觉匹配实验测得亮度最小可觉差。实验结果表明,在背景亮度为 11.89~142.3 cd/m<sup>2</sup> 中等亮度下人眼最小可觉差与背景亮度的比值约为 0.017,并遵守韦伯定律;在背景亮度为 0.38~9.36 cd/m<sup>2</sup> 的弱亮度情况下,人眼最小可觉差与背景亮度的比值随亮度的增加呈单调递减趋势。在显示器上测量的中等亮度下人眼亮度最小可觉差与 Koenig and Brodhun 采用传统光学方法得到的实验结果基本一致。

**关键词:**计算机视觉;视觉光学;韦伯定律;视觉匹配;最小可觉差;亮度

**中图分类号:**O432.2    **文献标识码:**A    **doi:**10.3788/YJYXS20163102.0222

## Measurement of just noticeable difference for luminance of human visual system on liquid crystal display

HUANG Xiao-qiao, SHI Jun-sheng\*, TAI Yong-hang

(School of Physics and Electronic Information Technology, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

**Abstract:** The just noticeable difference (JND) in luminance is one of important characteristics of the human visual system (HVS). With the popularity of computer display, the JND in luminance has important application value for viewing the image details under the computer display environment. In this paper, generated luminance stimuli using liquid crystal display (LCD) with 10 bit graphic card, the JND for 27 background luminances were measured by the psychophysical experiment on luminance matching. Experimental results show that the ratio of the JND and background luminance is about 0.017 at the moderate background luminance from 11.89 cd/m<sup>2</sup> to 142.3 cd/m<sup>2</sup>, that follows the Weber's law, and the ratio of the JND and background luminance is decreased with increase of the background luminance at lower background luminance from 0.38 cd/m<sup>2</sup> to 9.36 cd/m<sup>2</sup>. The measured results of JND for luminance of human visual system on liquid crystal display under moderate back-

**收稿日期:**2015-08-17; **修订日期:**2015-11-18.

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 61178054);云南省科技厅(No. 2011FB045);云南省教育厅科学研究基金(No. 2012Y171)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61178054); Natural Science Foundation of Yunnan Province(No. 2011FB045); Science Foundation of Yunnan Education Department(No. 2012Y171).

\* 通信联系人, E-mail: shi-js@263.net

ground luminance are consistent with Koenig and Brodhun’s results using traditional method.

**Key words:** computer vision; visual optics; Weber’s law; visual matching; just noticeable difference; luminance

1 引 言

人眼辨别的最小可觉差(just noticeable difference,JND)与背景亮度的关系对于颜色视觉匹配、人眼视觉特性(human visual system,HVS)的研究和对数字图像处理有着重要的意义<sup>[1-10]</sup>。

1834 年,德国生理学家韦伯(Weber)在系统研究触觉的差别阈限时发现对两个刺激物的辨别能力不是取决于两者差异的绝对值,而是取决于差异的相对值,用公式表示为  $\Delta I/I=K$ ,其中  $I$  为原刺激量, $\Delta I$  为此时的差别阈限, $K$  为常数,又称为韦伯比(Weber ratio),即韦伯定律(Weber’s law)。1865 年,Aubert 采用“two-candles-and-a-shadow”方法第一次通过实验测量出人眼视觉的  $\Delta I/I$ 。1889 年,Koenig and Brodhun 采用穿过晶体的平面偏振光和普通光产生明暗刺激,在整个人眼可识别的亮度范围内测量了人眼视觉的  $\Delta I/I$ 。1924 年,Hecht 在 Aubert、Koenig and Brodhun 等前人工作的基础上,指出视觉上的最小可觉差与亮度的比值随着亮度的增加先减小后增大<sup>[11]</sup>。人们也对视觉感知明度与背景亮度的关系、亮度可见度阈值等方面进行了相关研究<sup>[12-16]</sup>。2006 年,汪哲弘等在显示器上研究颜色视觉匹配中的明度阈值时表明,视觉辨别明度阈值与背景明度之间相关性满足韦伯定律<sup>[1]</sup>。

亮度最小可觉差是人眼视觉重要特性之一,随着计算机显示器的普及,显示器环境下的亮度最小可觉差对研究各种图像处理算法、图像识别与理解有重要的应用价值。同时,用显示器代替早期光学设施测量人眼视觉特性,还可以降低难度和成本。本文利用 10 bit 图像显示卡和液晶显示器方便、精确控制亮度刺激,在显示器显示亮度范围内产生不同亮度背景,采样心理物理学亮度视觉匹配实验测得亮度最小可觉差,目的是得到在显示器环境下亮度最小可觉差,并与早期利用光学设施测量结果进行比较。

2 实验方案

2.1 实验设备

液晶显示器:三星 S23A550H,实验设置在频率 60 Hz,分辨率 1 920 pixels×1 080 pixels。使用 X-Rite 公司的 EYEOONE(i1)对显示器进行简单的校正处理。实际测量色温为 6 329~6 605 K(灰度值在 30~250 范围内变化),显示器具有较好的色温一致性。

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

屏幕亮度计(photometer):北京师范大学光电仪器厂生产的 ST286LA 型屏幕亮度计,测量范围(0.01~19.99×10<sup>3</sup>)cd/m<sup>2</sup>。

显示器开机后需要预热 2 h,让其稳定。

2.2 实验样本和实验条件

实验中,亮度刺激来自液晶显示器上产生的中性色块,如图 1 所示。显示器中央显示一个大小为 14 cm×14 cm、亮度为  $L$ 、视角为 8°×8°的背景色块,背景色块的中央显示一个大小为 7 cm×7 cm、亮度为  $L+\Delta L$ 、视角为 4°×4°的中性色块。大色块外的其他显示区域均为黑色。照明环境:墙壁为灰色的标准暗室,整个房间只有显示器屏幕产生亮度刺激。

测试者到显示器距离:1 m。

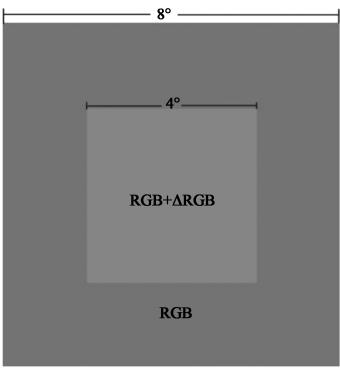


图 1 视觉匹配实验中的测试刺激图样

Fig. 1 Test stimulus arrangement used in visual matching experiment

测试者:男 12 名,女 5 名,年龄在 18~25 岁之间(其中研究生 6 名,本科生 11 名);视力正常或经过校正都在 1.2 以上。

2.3 亮度的精确控制

设置实验图案背景灰度 RGB 值分别为 0、5、10、20、30、⋯、250,共 27 个灰度亮度,利用屏幕亮度计测出这 27 个灰度所对应的亮度值。在测量过程中,固定屏幕亮度计的位置,以减小测量误差。27 组数据拟合出的灰度值——亮度值曲线(灰阶曲线, tone reproduction curve, TRC)近似于一个 gamma 函数。由于测量灰度值的间隔较小,可采用线性插值的方法求出该显示器不同的 RGB 值所对应的亮度值。

人眼亮度最小可觉差是指人眼主观上刚刚可辨别亮度差别所需的最小亮度差值,其测量过程是一个心理物理学实验过程,其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。由于所有的亮度刺激都来自于显示器,所以一个最基本的条件是,显示器显示的亮度最小等级要在人眼最小可觉差以下。一般计算机采用的三通道分别为 8 bit 图像显示卡,则其 RGB 值的最小间隔为  $\Delta = 1$ ,精度不能满足实验的要求。本实验中采用三通道分别为 10 bit 显示卡,使得原来 RGB 值间隔 1 的中间还可以显示 3 个值,即 RGB 最小间隔  $\Delta = 0.25$ 。具体如图 2 所示,在 RGB 值为 100 与 101 之间还可以显示 100.25、100.50 和 100.75 的 3 个值。(为了显示的习惯,10 bit 显卡对应的 RGB 数据仍用 0~255 表示。)

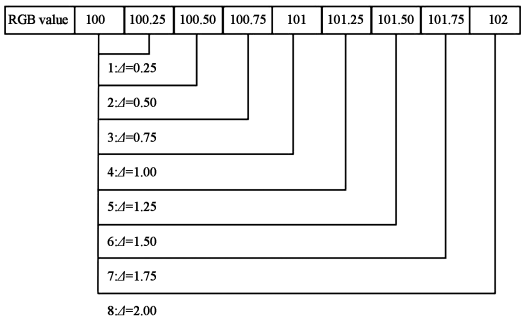


图 2 10 bit 显示卡所能达到的亮度最小可觉差方案  
Fig. 2 Scheme to generate luminance stimuli with the 10 bit graphic card

由于 RGB 最小间隔由 1 变为了 0.25,导致亮度等级变小,精度得到了提高,满足实验要求。

RGB+ $\Delta$ RGB 为 100.25、100.50 和 100.75 所对应的亮度值由实际测量的 100.00 和 102.00 的亮度采用线性插值的方法得到。本实验中 100.00 和 100.25 所对应的亮度值分别为 22.6 cd/m<sup>2</sup> 和 22.7 cd/m<sup>2</sup>,则它们之间的差值  $\Delta L = 0.10$  cd/m<sup>2</sup>,在亮度约为 22.6 cd/m<sup>2</sup> 的情况下,显示器能显示的最小亮度差为 0.10 cd/m<sup>2</sup>,人眼不能觉察到二者的差异。后面的实验结果将证实,10 bit 显卡所能显示的各个亮度值的最小亮度差均小于人眼最小可觉差。

2.4 实验过程

实验前,先制作如图 1 所示的实验样本。图 1 中 RGB 分别取 0、5、10、20、30、40、⋯、250 共 27 个数,对应 27 个亮度等级。每一个亮度分别按照图 2 中的方案制作一组含 8 幅图像的实验样本,编号 1 到 8 的实验样本的  $\Delta$ RGB 依次增加 0.25。

实验开始前,先对液晶显示器进行 2 h 左右的预热。之后,测试者首先在全黑屏情况下经过 3 min 的暗适应,然后液晶显示器上出现如图 1 所示的亮度刺激图样并进入 1 min 的亮适应过程。完成色适应后正式开始亮度视觉匹配。亮度视觉匹配采用心理物理学测定阈限的方法——极限法。测量某一亮度的可见度阈值时,实验人员在显示器上按照编号从小到大的顺序依次显示实验样本(逐渐增大  $\Delta$ RGB),测试者刚好能看见图 1 所示的中央色块时,实验人员记录下样本编号;然后实验人员按照从大到小的顺序显示实验样本,测试者刚好看不见样本中央的色块,记录样本编号。所得到的数据相当于一次阈上值和一次阈下值,取两次数据的平均值为该背景亮度下人眼最小可觉差。为了避免测试者“主观上去找图片”,每一个样本的测试时间约为 1 s,即要求测试者在第一时间内做出判断。一次性完成 27 组数据匹配大约需要 25~30 min,间隔一天重新进行 27 组数据的匹配,间隔一天后再次匹配。每个亮度总共测量 3 次,求其平均值。全部实验耗时 15 d。

3 实验结果与讨论

3.1 测试者的重复性和精确度

采用重复性标准差(the repeatability standard deviation)和标准差来衡量测试者的重复性

和精确度。重复性标准差公式如下：

$$\delta_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad , \quad (1)$$

公式中  $\delta_r$  表示重复性标准差,  $n$  表示重复观测的次数,  $\bar{x}$  表示  $n$  次观测结果的算术平均值,  $x_i$  表示第  $i$  次观测结果。在本实验中, 有 17 名测试者对 27 个样本各进行了 3 次重复的视觉观察, 其人眼最小可觉差( $\Delta L$ )的最大重复性标准差为 0.166, 最小重复性标准差为 0, 平均重复性标准差为 0.029。  $\delta_r$  较小, 这说明实验较为稳定, 重复性较好; 但同时也说明, 实验中相邻两个样本间的差异还是比较明显的, 以后的实验中, 可以采用 14 bit 的显示卡进一步提高实验精度。对 27 种不同亮度每一个亮度所对应的 17 名测试者观察得到人眼最小可觉差( $\Delta L$ )求标准差, 27 组标准差中, 最大值为 0.7616, 最小值为 0.002 9, 平均值为 0.170 5。人眼最小可觉差的视觉匹配实验重复性和精确度满足实验要求。

3.2 人眼最小可觉差与背景亮度关系

表 1 给出了背景 RGB 为 0、5、10、20、30、40、…、250 共 27 组实验样本所对应的实际亮度值(单位:  $\text{cd}/\text{m}^2$ )及 17 名测试者在不同亮度下对应的平均人眼最小可觉差( $\Delta L$ )。

表 1 27 种不同背景亮度下人眼最小可觉差  
Tab.1 Just noticeable difference under 27 background luminances

| 背景<br>RGB 值 | $L/$<br>( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ) | $\Delta L$ | $\Delta L/L$ |
|-------------|---------------------------------------------|------------|--------------|
| 0.00        | 0.38                                        | 0.031 2    | 0.082 0      |
| 5.00        | 0.41                                        | 0.034 3    | 0.083 6      |
| 10.00       | 0.55                                        | 0.040 5    | 0.073 7      |
| 20.00       | 1.35                                        | 0.061 8    | 0.045 8      |
| 30.00       | 3.08                                        | 0.087 5    | 0.028 4      |
| 40.00       | 4.99                                        | 0.121 3    | 0.024 3      |
| 50.00       | 7.20                                        | 0.151 2    | 0.021 0      |
| 60.00       | 9.36                                        | 0.150 7    | 0.015 9      |
| 70.00       | 11.89                                       | 0.200 6    | 0.016 9      |
| 80.00       | 15.0                                        | 0.262 1    | 0.017 5      |
| 90.00       | 18.7                                        | 0.305 4    | 0.016 3      |

(续表)

| 背景<br>RGB 值 | $L/$<br>( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ) | $\Delta L$ | $\Delta L/L$ |
|-------------|---------------------------------------------|------------|--------------|
| 100.00      | 22.6                                        | 0.382 3    | 0.016 9      |
| 110.00      | 27.1                                        | 0.463 2    | 0.017 1      |
| 120.00      | 32.3                                        | 0.566 2    | 0.017 5      |
| 130.00      | 38.1                                        | 0.694 9    | 0.018 2      |
| 140.00      | 44.7                                        | 0.788 6    | 0.017 6      |
| 150.00      | 52.1                                        | 0.935 2    | 0.018 0      |
| 160.00      | 60.6                                        | 0.992 6    | 0.016 4      |
| 170.00      | 69.5                                        | 1.095 6    | 0.015 8      |
| 180.00      | 79.5                                        | 1.320 2    | 0.016 6      |
| 190.00      | 90.8                                        | 1.525 7    | 0.016 8      |
| 200.00      | 101.4                                       | 1.764 7    | 0.017 4      |
| 210.00      | 113.6                                       | 1.873 5    | 0.016 5      |
| 220.00      | 127.9                                       | 2.147 4    | 0.016 8      |
| 230.00      | 142.3                                       | 2.514 7    | 0.017 7      |
| 240.00      | 161.6                                       | 3.179 4    | 0.019 7      |
| 250.00      | 184.6                                       | 4.068 8    | 0.022 0      |

为了更直观清楚地描述表 1 中各种关系, 将实验测得的人眼最小可觉差和背景亮度的关系作图, 如图 3 所示。从图 3 可以看出, 亮度在 0.38~184.6  $\text{cd}/\text{m}^2$  的实验测量范围内, 人眼最小可觉差随着亮度的增加而增加, 且二者呈线性关系。

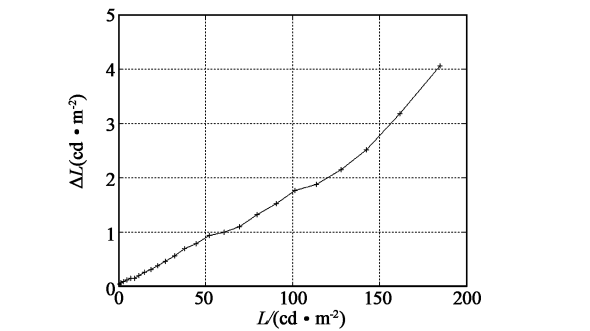
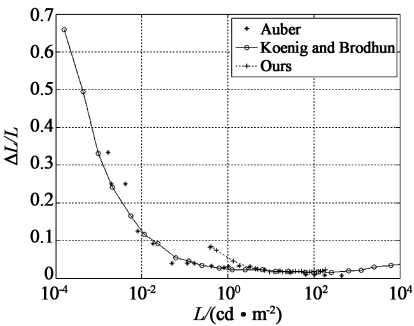


图 3 人眼最小可觉差与背景亮度的关系  
Fig. 3 Relationship between the just noticeable difference and background luminances

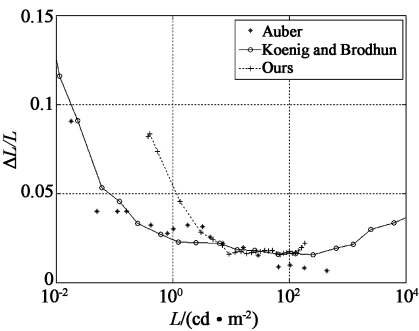
将人眼最小可觉差与对应亮度的比值称为对比度灵敏度阈( $\Delta L/L$ ), 对比度灵敏度阈即视觉上的“韦伯比”。对比度灵敏度阈与背景亮度的关系

如图 4 所示。

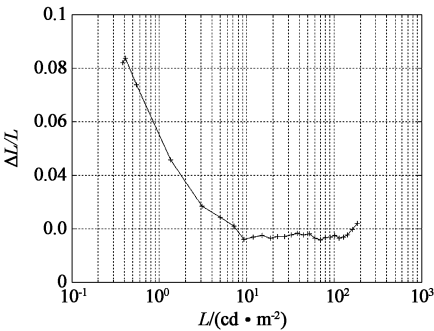
图 4(a)是 Aubert、Koenig and Brodhun 和本实验测量出的对比度灵敏度阈与背景亮度的关系图。图中“\*”为 Aubert 的数据,“○”为 Koenig and Brodhun 数据,“+”为本实验数据。从图中可以看出,Koenig and Brodhun 数据亮度范围几乎涵盖了人眼可觉察的全部亮度,从  $10^{-4}$   $\text{cd}/\text{m}^2$  到  $10^4$   $\text{cd}/\text{m}^2$ <sup>[11]</sup>。



(a) 本实验数据和 Aubert, Koenig 和 Brodhun 的数据  
(a) Data comparison of Aubert, Koenig, Brodhun and ours



(b) a 图的部分放大图  
(b) The enlarged drawing of (a)



(c) 本实验数据  
(c) Data of ours

图 4 对比度灵敏度阈与背景亮度的关系

Fig. 4 Relationship between the threshold of contrast sensitivity and background luminances

为了更好地与前人的研究结果相比较,将图 4(a)中对比度灵敏度阈小于 0.15 的部分进行放大,结果如图 4(b)所示。从图 4(a)和 4(b)可以看出:(1)本实验测得的人眼对比度灵敏度阈随着背景亮度的变化趋势与 Aubert、Koenig and Brodhun 的实验结果基本一致。但是,在亮度  $0.38\sim4.99$   $\text{cd}/\text{m}^2$  范围内,本实验测得的人眼对比度灵敏度阈相比 Aubert、Koenig and Brodhun 的结果明显偏大;(2)本实验中亮度在  $0.38\sim9.36$   $\text{cd}/\text{m}^2$  范围内,人眼对比度灵敏度阈随着背景亮度的增加而降低,这与文献[1]中“当刺激明度较小 $<10$  时,韦伯比呈单调下降趋势”结论相符合,但在此亮度范围内,Aubert、Koenig and Brodhun 数据的人眼对比度灵敏度阈几乎保持不变;(3)本实验中亮度在  $11.89\sim142.3$   $\text{cd}/\text{m}^2$  范围内,人眼对比度灵敏度阈随着背景亮度的增加几乎保持不变,满足韦伯定律。(虽然亮度在  $11.89\sim142.3$   $\text{cd}/\text{m}^2$  范围内的 17 组数据的对比度灵敏度阈  $\Delta L/L$  并不完全相同,有一定的波动性,但 17 组数据的标准差仅为 0.000 7,仍然可以认为对比度灵敏度阈  $\Delta L/L$  在此范围内保持不变。)实验得到的对比度灵敏度阈(约等于 0.017)与 Koenig and Brodhun 的结果基本相同。

由于实验设备的限制,亮度低于  $0.38$   $\text{cd}/\text{m}^2$  时人眼最小可觉差本实验无法测量;虽然实验选用的液晶显示器最大亮度约为  $230$   $\text{cd}/\text{m}^2$ ,但在此亮度下,显示器的灰阶曲线不能满足实验要求,最终实际可用最大亮度约为  $190$   $\text{cd}/\text{m}^2$ ,并且在  $161.6$   $\text{cd}/\text{m}^2$  和  $184.6$   $\text{cd}/\text{m}^2$  两个亮度等级时,测试者匹配误差较大,出现了图 4(c)中“上翘”的两个点,其具体原因还有待进一步探讨。

仔细观察分析图 4(c)和表 1,发现在亮度为  $60.6$   $\text{cd}/\text{m}^2$  和  $69.5$   $\text{cd}/\text{m}^2$  时,对比度灵敏度阈  $\Delta L/L$  出现了一个波谷,说明人眼对此亮度下的对比度灵敏度阈比较敏感,能分辨出较低的阈值。可能是因为在暗室观察环境下,实验样本周围全是黑色,人眼感觉此亮度下舒适性较好,因而能分辨较低的阈值。这个问题还有待于进一步探讨。

4 结 论

本文对显示器上产生的 27 个不同亮度背景下的人眼最小可觉差进行了心理物理学的亮度视

觉匹配实验,结果表明在亮度为  $11.89 \sim 142.3 \text{ cd/m}^2$  的中等亮度范围内视觉上人眼最小可觉差与背景亮度的关系满足韦伯定律,其比值约等于 0.017,与 Koenig and Brodhun 采用传统光学方法测量的比值几乎相同;在背景亮度为  $0.39 \sim$

$9.36 \text{ cd/m}^2$  的弱亮度情况下人眼最小可觉差与背景亮度的比值随亮度的增加呈单调递减趋势。同时实验还发现,在本实验的暗室环境下,背景亮度在  $60 \sim 70 \text{ cd/m}^2$  时,人眼最小可觉差的分辨本领较高,能分辨出较小的亮度差异。

## 参 考 文 献:

- [1] 汪哲弘,徐海松.颜色视觉匹配中明度阈值的评价[J].光学学报,2006,26(8):1274-1278.  
WANG Z H, XU H S. Lightness threshold evaluation in visual color matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(8): 1274-1278. (in Chinese)
- [2] 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.  
SHI J S, YAO J C, YU H F, *et al.* Measurement of luminance contrast sensitivity function of human visual system on cathode ray tube display[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(4): 744-748. (in Chinese)
- [3] CHOU C H, LI Y C. A perceptually tuned subband image coder based on the measure of just-noticeable-distortion profile[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 1995, 5(6): 467-476.
- [4] MA L, NGAN K N, ZHANG F, *et al.* Adaptive Block-size transform based just-noticeable difference model for images/videos[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2011, 26(3): 162-174.
- [5] CHENG I, BOULANGER P. A 3D perceptual metric using just-noticeable-difference[C]. *Proc. of Eurographics*, 2005: 97-100.
- [6] LI M S, CHEN M J, TAI K H, *et al.* Fast mode decision based on human noticeable luminance difference and rate distortion cost for H.264/AVC[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2013, 2013: 60.
- [7] QIN S L, GE S, YIN H C, *et al.* Just noticeable difference in black level, white level and chroma for natural images measured in two different countries[J]. *Displays*, 2010, 31(1): 25-34.
- [8] 叶程,刘真,张建青,等.环境照度对手机亮度最优值的影响[J].液晶与显示,2014,29(6):1042-1049.  
YE C, LIU Z, ZHANG J Q, *et al.* Effect of environmental illumination on optimal value of mobile phone brightness[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(6): 1042-1049. (in Chinese)
- [9] 王晓燕,王世刚,姜秀红,等.亮度优化立体视频视觉舒适度评价[J].中国光学,2015,8(3):394-400.  
WANG X Y, WANG S G, JIANG X H, *et al.* Evaluation of stereo video visual comfort based on luminance optimization[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 394-400. (in Chinese)
- [10] 范媛媛,沈湘衡,桑英军.基于对比度敏感度的无参考图像清晰度评价[J].光学精密工程,2011,19(10):2485-2493.  
FAN Y Y, SHEN X H, SANG Y J. No reference image sharpness assessment based on contrast sensitivity[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(10): 2485-2493. (in Chinese)
- [11] HECHT S. The visual discrimination of intensity and the Weber-Fechner law[J]. *The Journal of General Physiology*, 1924, 7(2): 235-267.
- [12] RIESZ R R. Differential intensity sensitivity of the ear for pure tones[J]. *Physical Review*, 1928, 31(5): 867-875.
- [13] SEMMELROTH C C. Prediction of lightness and brightness on different backgrounds[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1970, 60(12): 1685-1689
- [14] 陈文熙.韦伯比的拟合公式[J].心理学报,1996,28(4):419-424.  
CHEN W X. An analytical expression of Weibo Ratio[J]. *Acta Psychologica Sinica*, 1996, 28(4): 419-424. (in Chinese)
- [15] BRILLM H, CARTER R C. Does lightness obey a log or a power law Or is that the right question[J]. *Color Re-*

*search & Application*, 2014, 39(1): 99-101.

[16] LANZARA R G. Weber's law modeled by the mathematical description of a beam balance[J]. *Mathematical Bio-sciences*, 1994, 122(1): 89-94.

**作者简介:**黄小乔(1981—),男,湖北长阳人,硕士,讲师,主要研究方向为颜色科学与图像视觉. E-mail: hxq@ynnu.edu.cn  
石俊生(1960—),男,内蒙古包头人,博士,教授,主要研究方向为颜色科学与图像视觉. E-mail: shi-js@263.net