

文章编号:1007-2780(2015)06-1063-07

用 LCD 显示器测量人眼亮度对比度敏感视觉特性

姚军财^{1*}, 申 静², 何军锋¹, 谭 毅¹
(1. 陕西理工学院 物理与电信工程学院, 陕西 汉中 723000;
2. 陕西理工学院 数学与计算机科学学院, 陕西 汉中 723000)

摘要:根据 LCD 显示器亮度的均匀性和显示光栅对比度的稳定性实验分析,提出了一种采用 LCD 显示器显示光栅测量人眼对比度敏感视觉特性的实验方法,并测量了 48 位青年对象对 3 种平均亮度光栅的对比度视觉特性,且与目前有代表性的测量方法和结果进行了对比分析。结果表明该测量方法是一种有效、实用和简便易行的人眼对比度敏感视觉特性测量方法。

关 键 词:人眼视觉系统; LCD 显示器; 对比度敏感; 空间频率
中图分类号: O432; TN919.81 **文献标识码:** A **doi:**10.3788/YJYXS20153006.1063

Measuring luminance contrast sensitivity characteristics of human visual system using LCD display

YAO Jun-cai^{1*}, SHEN Jing², HE Jun-feng¹, TAN Yi¹
(1. School of Physics and Telecommunication Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China)
(2. School of Mathematics and Computer Science, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China)

Abstract: According to the experiments analysis about the uniformity of luminance and stability of contrast of grating displayed on LCD display, a method is proposed to measure contrast sensitivity characteristics of human visual system by displaying the grating using LCD. The contrast sensitivity characteristics of 48 youngers who detect gratings with three kinds of luminance were measured, and it is compared with the typical measurement methods and results. The results show that the measuring method is effective, practical, simple and easy to measure the contrast sensitivity characteristics of human visual system.

Key words: human visual system; liquid crystal display; contrast sensitivity; spatial frequency

1 引 言

人眼视觉特性是图像显示、处理及质量评价

等研究的理论基础,其特性非常复杂和难以完全理解,但是随着光学、生物科学和信息技术的快速发展,越来越多的信息技术趋向于智能化,特别是人类视觉特性在多媒体技术中的应用,更是近

收稿日期:2015-04-28;修订日期:2015-07-01.
基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61301237);陕西省青年科技新星计划项目(No. 2015KJXX-42)
Supported by National Nature Science Foundation of China(No. 61301237);Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China(No. 2015KJXX-42)
* 通信联系人, E-mail: yaojc4782@163.com

些年研究的热点,以致吸引了较多的国内外研究工作者^[1-3]。

人眼对比度敏感视觉特性是非常重要的人类空间视觉特性之一,从上世纪 30 年代起国内外工作者就对其测量方法进行了较多的研究^[4-8]。目前国内有代表性的研究报道是由邓述移等人提出的采用三变仪显示光栅进行测量的方法^[5],但是其方法的测量过程中,需要不断调节仪器的象场亮度、颜色和对比度,实验过程比较复杂。国外 Van 和 Bouman 等人采用自制的光学亮度调制仪显示光栅的测量方法是目前公认的方法之一^[4],但是其设计的光栅显示仪器比较复杂,不易快捷和精确控制显示的光栅的亮度和对比度。以致截止目前没有一种高效易行的人眼视觉特性测量方法,致使得出的视觉模型不能较好的匹配、模拟人眼视觉功能,从而导致智能化信息处理技术进展缓慢,迫切需要一种有效和易行的人眼视觉特性测量方法^[9-10]。目前大部分数字信息采用 LCD 显示器显示和处理,则利用显示器显示光栅测量的人眼视觉特性进行信息处理将会达到更好的效果,其具有重要的实际研究价值^[11-12]。基于此,本文根据 LCD 显示器亮度均匀性和显示光栅的稳定性实验分析,提出了一种采用 LCD 显示器显示光栅测量人眼对比度敏感视觉特性的实验方法。且为了验证此方法,测量了 48 位青年对象的对比度视觉特性,并与目前公认的测量方法和结果进行了对比。结果表明采用 LCD 显示器显示光栅测量人眼对比度视觉特性是一种有效的、实用的和简便易行的测量方法。

2 人眼对比度敏感视觉特性及其测量方法

人眼对比度敏感视觉特性是重要的人眼视觉系统空间特性之一,一般采用不同条件下的人眼对比度敏感阈值来描述,其描述函数为人眼对比度敏感函数(Contrast Sensitivity Function;CSF),CSF 主要反映敏感阈值与目标空间频率之间的对应关系。但是人眼对比度敏感阈值不能直接测量,一般采用人眼观察目标时的对比度觉察阈值的倒数来描述。根据心里和生理物理学的方法,人眼对比度觉察阈值是指人眼处于临界分辨状态时观察目标的对比度值,

人眼分辨临界状态是指目标刚好能被觉察但又不能完全分辨时的分辨状态^[5,13]。则测量人眼对比度敏感视觉特性主要是测量不同条件下、不同空间频率的人眼对比度觉察阈值 C 。则采用 LCD 显示器测量觉察阈值的主要过程为:在暗室环境下,用 LCD 显示器每次显示 4 幅对比度依次减小的光栅,作为观察目标,每个目标显示时间为 1 分钟,观察者在 2 m 处觉察分辨,从而找出目标中人眼处于分辨临界状态时的光栅,以此光栅的对比度值为人眼对该光栅所具有的空间频率的对比度觉察阈值。测量方法的示意图如图 1。其明暗光栅的对比度定义如式(1),式中 L_1 和 L_2 是明暗条纹的亮度值。

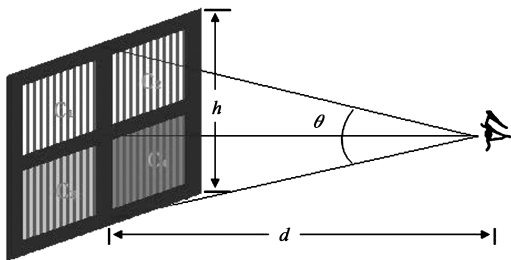


图 1 用显示器显示目标光栅测量人眼对比度觉察阈值示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measuring human contrast detection threshold using the LCD display to show gratings

$$C = \frac{|L_2 - L_1|}{(L_2 + L_1)/2} \quad (1)$$

3 用 LCD 显示器测量的实验方案

采用 LCD 显示器显示目标光栅测量人眼亮度对比度敏感视觉特性的实验方案,其主要是设计如何用 LCD 显示器精确和稳定的显示目标光栅。其中的难点是 LCD 显示器亮度的均匀性、显示光栅对比度的稳定性和光栅亮度的精确控制等问题。

3.1 LCD 显示器亮度均匀性及其对视觉特性测量的影响

为了研究显示器亮度的均匀性问题,实验采用颜色校准仪对显示器屏幕进行了测试,测试将屏幕均匀划分为 9 个区域,测试每个区域中心色块的亮度,色块 RGB 值均为 255。其结果如表 1。

表 1 LCD 显示器亮度均匀性测量结果

Tab.1 Measurement results of luminance uniformity of LCD display

区域	亮度	与中心块差/%
1	122.39	16.07%
2	126.26	13.42
3	132.62	9.06
4	129.57	11.15
5	145.83	0.00
6	142.08	2.57
7	129.11	11.47
8	133.69	8.32
9	141.86	2.72

从表 1 的测试结果上看,LCD 显示器中心区域的亮度差异为零,均匀性非常好,其余区域的均匀性比较差。但是在测量视觉特性的实验中,人眼觉察的是光栅条纹,关注的是其亮度相对变化,则在上述屏幕中 9 个区域的中心位置放置同一光栅条纹,屏幕背景的亮度值为 $27.63\text{cd}/\text{m}^2$,分别测量其明暗条纹的亮度,并计算其对比度值,结果如表 2。从表 2 中可以看出,虽然各个位置条纹的亮度有所不同,但其对比度值差异非常小,其相对偏差最大只有 2.4%。表明 LCD 显示器亮度的不均匀性对光栅对比度值的影响较小。

表 2 9 个区域中心光栅条纹的亮度测量和对比度值计算结果

Tab.2 Results of measuring luminance and calculating contrast of the gratings displayed on the center of 9 regions

区域	L_1	L_2	C	C 的相对偏差/%
1	50.83	52.32	0.0289	0.7359
2	52.52	54.01	0.0280	2.4012
3	55.01	56.58	0.0281	2.0527
4	53.85	55.45	0.0293	2.1301
5	60.58	62.34	0.0286	0.3098
6	58.99	60.72	0.0289	0.7359
7	53.60	55.18	0.0290	1.0844
8	55.58	57.23	0.0293	2.1301
9	58.85	60.53	0.0281	2.0527

3.2 LCD 显示器亮度稳定性及其对视觉特性测量的影响

实验需要测量大量对象的视觉特性,设计的实验必须要有长期性和重复性,则需要研究 LCD 显示器亮度的稳定性及其对测量特性的影响。为了研究此影响,在显示器屏幕中心位置显示同一对条纹,对其亮度 L_1 和 L_2 在 1 个月内进行测量。图 2 是间隔 3 天测量 1 次,在 1 个月内的测量结果;图中 L_{1i} 和 L_{2i} 是两个条纹 8 次测量的结果,每次测量在开机后第 2、10、30、60、120、240、360、480、

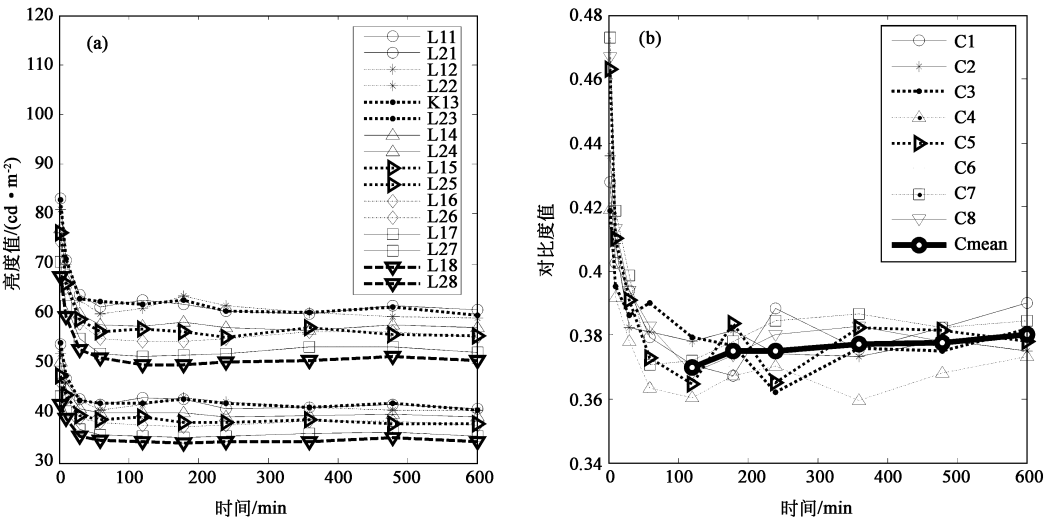


图 2 LCD 显示器亮度和光栅对比度稳定性测试结果

Fig.2 Stability test of brightness and contrast of gratings on LCD display

600 min 时进行测量, C_i 是 8 次两条纹的对比度值, $i = 1, 2, 3 \cdots 8$, C_{mean} 是显示器相对稳定后(120 min 后) 8 次各个时刻测量后计算的平均对比度值。

从图 2 的实验结果可以看出, 显示器在开机 120 min 之后基本达到相对稳定。计算相对稳定后相应各时刻的对比度的标准方差和偏差(用百分比表示), 其最大值为 0.030 8 和 4.576 2%。从图 2 的实验结果和计算的方差和偏差, 表明 LCD 显示器的亮度稳定性在中期内虽然较差, 但是其显示条纹的对比度值上下浮动不大, 比较稳定, 较好的符合了测量视觉特性时保证光栅对比度稳定和精确再现的实验要求。而且实验过程中, 只需要调节显示器的亮度保证光栅的平均亮度不变, 其光栅的对比度值基本不变。

3.3 目标光栅制作方法

实验需要通过显示器显示大量不同频率、不同对比度值的光栅。则需要解决以下两个问题: (1) 目前真实人眼观察目标的最小对比度阈值为 0.003^[5], 则要求制作的光栅的最小对比度值必须小于 0.003。(2) 目前显示器显示的灰度级为 0~255, 且只能显示整数灰度级对应的亮度值, 要实现多种对比度, 则必须获得灰度级是小数时的亮度值。其具体的解决方法说明如下。

目前常用的显示器是采用 8 bit 的显卡, 即其显示的灰度级为 2⁸ 等级, 即 256 级。本实验采用的显示器是 10 bit 的显卡, 则可以显示 1 024 灰

度级, 即是在灰度级 0~255 的每个整数级之间插于 3 个小数灰度级, 即 0.25、0.50、0.75。但是目前的亮度计和色度计均不能精确测量灰度级为小数时的亮度值。鉴于此, 根据普通显示器的显色特性, 在间隔为 1 的灰度级内的亮度值基本符合线性变化, 则在实验中采用整数值测量和小数值线性插值的方法获得不同灰度级对应的亮度值。具体的方法为: (1) 依据实验中光栅的平均亮度值, 初步大致估计其对应的灰度级 RGB(R=G=B) 值, 并根据 RGB 值制作亮度块, 测量其真实的亮度值。(2) 依据第一步中的 RGB 值, 上下间隔 1 个灰度级制作亮度块, 并测量其亮度值。(3) 利用线性插值的方法依次得到每个间隔 1 个灰度级内小数 0.25、0.50、0.75 对应的亮度值。任意选取以上获得的两组 RGB 值, 以其对应的亮度值作为光栅条纹中明暗条纹的亮度, 从而来制作光栅, 并计算其对比度值。以平均亮度 90 cd/m² 为例进行说明, 如图 3。

通过图 3 的结果表明, 制作的光栅的最小对比度值可达到 0.00195, 完全满足目前真实人眼观察目标的最小阈值为 0.003 的要求。由于实验通过显示器显示光栅, 则光栅的大小不变, 人眼观察光栅的视角不变, 但光栅中条纹宽度可以通过改变像素的多少来实现, 从而达到改变光栅的空间频率。实验过程中需要大量目标光栅图片, 按照以上方法, 编写了如图 4 界面所示的程序, 用以快捷的制作光栅。

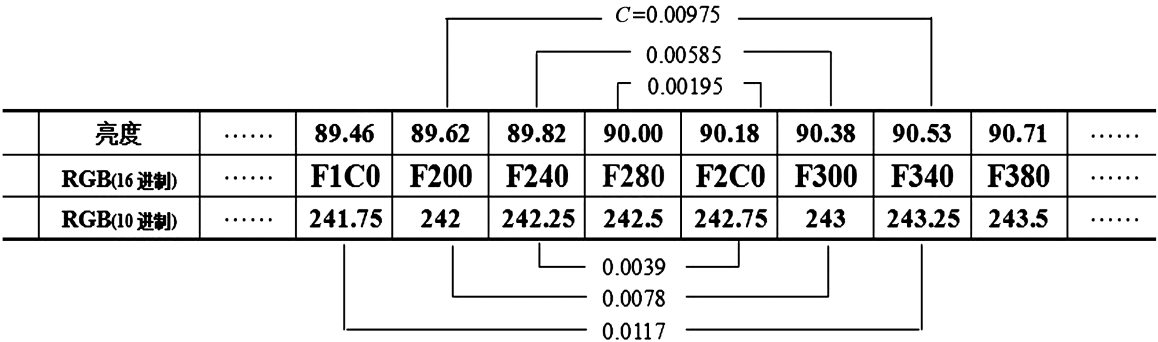


图 3 任意组合两个灰度级 RGB 对应的亮度条纹的对比度值

Fig. 3 Luminance contrast value of two gray stripes corresponding to the RGB combined arbitrarily



图 4 光栅制作程序界面

Fig. 4 Procedure interface to make gratings

3.4 实验仪器及其参数

实验采用 53.3 cm(21 in)DELL 品牌的 LCD 显示器,其分辨率为 1 920×1 080。屏幕色度计为 X-Rite Color 色度计,其亮度精度为 0.01 cd/m²。显示色块为边长 85 mm 的正方形,呈现在显示屏的中心位置,其背景为黑色(亮度为:0.33 cd/m²,趋近于零),色块间距 10 pixels。视角 $\theta=2.4347^\circ$,观察距离 $L=200$ cm。空间频率依次取为 0.410 7、0.821 5、1.232 2、1.971、3.080 1、3.791 3、4.929、7.041、9.857、16.429、24.64 cpd (cycle/degree)。

3.5 阈值确定方法和被测试对象

实验采用心理物理学中的极限调整法测量人眼对比度觉察阈值^[5,13]。即测试对象暗适应半小时后,在 2 米处观察显示屏幕中心的光栅,通过自行调节预先做好的光栅的对比度、平均亮度和空间频率,一次逐渐增大对比度至条纹刚好能被分辨,一次逐渐降低到恰好不能区分,取二者之平均作为本次测量的觉察阈值。测试过程中,对每个空间频率测量 3 次,全过程重复测一次,取其平均值作为该频率的对比度觉察阈值。实验对象为 48 名在校大学生,校正后视力均达到 1.2 以上,暗适应情况良好,色觉无异常。

4 实验结果和讨论

4.1 实验结果

通过测试对象对平均亮度为 10、60、90 cd/m²

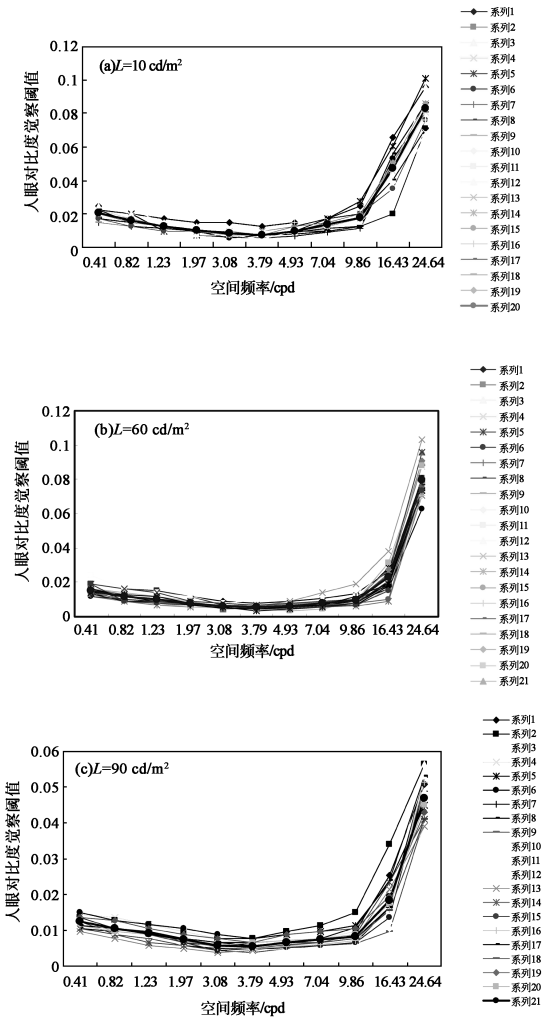


图 5 采用 LCD 显示器显示光栅测量人眼对比度觉察阈值实验结果

Fig. 5 Experimental results of measuring human contrast detection threshold using the LCD display to show gratings

的光栅反复觉察,得到暗室环境下不同空间频率的人眼亮度对比度觉察阈值。如图 5 所示,图中的红色粗线为各空间频率下的平均人眼对比度觉察阈值。从图 5 中可得:(1)随着光栅平均亮度的增加,各对应空间频率的觉察阈值减小,表明在亮度范围 $10\sim 90\text{ cd/m}^2$ 内,人眼敏感程度随亮度的增加而有所提高。(2)空间频率在 $2\sim 8\text{ cpd}$ 之间,觉察阈值上下浮动较小,而空间频率在 10 cpd 之后,觉察阈值波动较大,表明不同人眼对低频目标敏感程度非常接近,而对高频目标敏感程度差异较大。

4.2 讨 论

人眼对比度敏感视觉特性的测量一直是光学和图像处理研究者非常感兴趣的课题,国内外进行了较多的研究。目前国内对其研究的代表性报道是由邓述移等人采用自制的三变仪显示光栅进行的测量,其结果如文献[5]中的图 3^[5]。国外 Van 和 Bouman 采用光学仪器显示光栅的方法,在视角为 6.1° 下觉察,测量了 7 个平均亮度光栅下的人眼对比度觉察阈值,取其倒数作为人眼对比度敏感阈值,并归一化,同时采用 Barten 及复合模型拟合了其数据,其结果如文献[4]中的图 4^[4]。但采用 LCD 显示器显示光栅测量的相关报道非常少。

对比分析邓述移、Van 和 Bouman 等人的实验结果与图 5 的实验结果,可以发现:(1)无论是光学仪器显示光栅测量还是采用显示器显示光栅测量,其测量的人眼对比度觉察阈值变化趋势基本一致,而且在对应的平均亮度和空间频率处,阈值大小比较接近。(2)在相近的平均亮度时,三者的测量结果均表现为对空间频率为 $2\sim 4\text{ cpd}$ 的目标最敏感。表明采用 LCD 显示器显示光栅测量视觉特性是一种有效的方法。

从实验的设计和测试过程上分析, Van、Bouman 和邓述移等人均是采用光学仪器显示光栅进行测量,其设计的光学仪器比较复杂,不易较好

的精确控制显示的光栅的亮度和对比度,且实验过程中,需要不断人为的调节仪器的象场亮度、颜色 and 对比度,实验过程复杂且花费时间较长,不易大量和快捷测量。而相对来说,采用 LCD 显示器显示光栅测量人眼视觉特性的实验设计和光栅控制均比较容易,且操作简单、快捷。

更重要的是目前图像和视频等大部分信息采用 LCD 显示器显示和处理,而人眼视觉特性是其处理的基础和最终评价标准,则利用显示器显示光栅测量的人眼视觉特性进行图像和视频处理将会达到更好的视觉效果^[14-15]。所以采用 LCD 显示器测量视觉特性是一项非常有实际研究意义和价值的工作。

5 结 论

为了获得一种实用的、简便易行的人眼对比度敏感视觉特性测量方法,本文根据 LCD 显示器显示光栅对比度的稳定性和亮度均匀性实验分析,设计了一种采用 LCD 显示器显示光栅测量人眼对比度敏感视觉特性的实验方案。方案中,观察视角为 2.434 ° ,光栅的平均亮度设置为 3 种: 10 、 60 cd/m^2 和 90 cd/m^2 ,光栅的空间频率设置为 11 种,观察距离为 2 m 。同时为了验证该方法的有效性,测量了 48 位青年对象的对比度觉察阈值,且与目前有代表性的测量方法和结果进行了对比分析。结果表明该测量方法简便易行,测量结果基本与采用公认的测量方法测量的结果基本一致。综合表明该测量方法是一种有效的、实用的和易操作的人眼对比度敏感视觉特性测量方法。当然,人眼视觉特性非常复杂,其测量还受到人的心理、生理和环境等诸多方面的影响,但是视觉特性在人工智能方面的应用非常广泛,其测量方法的研究是一项非常有意义和实用价值的科研工作,需要开展大量的探索。

参 考 文 献:

- [1] Benoit A, Caplier A, Durette B, *et al.* Using human visual system modeling for bio-inspired low level image processing [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2010, 114(7): 758-773.
- [2] Zhang Y F, Cao H H, Jiang H X, *et al.* Visual distortion sensitivity modeling for spatially adaptive quantization in remote sensing image compression [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(4): 723-727.

- [3] 申静. 一种利用人眼视觉特性的数字图像水印技术[J]. 液晶与显示, 2011, 26(2): 234-240.
Shen J. Digital image watermarking technology based on human vision characteristics [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(2): 234-240. (in Chinese)
- [4] 周燕, 金伟其. 人眼视觉的传递特性及模型[J]. 光学技术, 2002, 28(1): 57-59, 62.
Zhou Y, Jin W Q. The transfer characteristic of human visual system and models [J]. *Optical Technique*, 2002, 28(1): 57-59, 62. (in Chinese)
- [5] 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.
Deng S Y, Xu Z M, Tu L F, *et al.* Modulation transfer function of human visual system [J]. *Acta Armamentarii*, 1982(2): 24-33. (in Chinese)
- [6] Wooten B R, Renzi L M, Moore R, *et al.* A practical method of measuring the human temporal contrast sensitivity function [J]. *Biomedical Optics Express*, 2010, 1(1): 47-58.
- [7] Nadenau M. Integration of human color vision models into high quality image compression [D]. Switzerland: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2000.
- [8] Avidan G, Harel M, Hendler T, *et al.* Contrast sensitivity in human visual areas and its relationship to object recognition [J]. *J. Neurophysiol.*, 2002, 87(6): 3102-3116.
- [9] Neta M, Miezin F M, Nelson S M, *et al.* Spatial and temporal characteristics of error-related activity in the human brain [J]. *The Journal of Neuroscience*, 2015, 35(1): 253-266.
- [10] Marques O. 实用 MATLAB 图像和视频处理[M]. (章毓晋译). 北京: 清华大学出版社, 2013.
Marques O. *Practical Image and Video Processing Using MATLAB* [M]. (translated by ZHANG Y J). Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)
- [11] Ou Y F, Xue Y Y, Wang Y. Q-STAR: A perceptual video quality model considering impact of spatial, temporal, and amplitude resolutions [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, 23(6): 2473-2486.
- [12] O'Connor Z. Colour, contrast and gestalt theories of perception: The impact in contemporary visual communications design [J]. *Color Research & Application*, 2015, 40(1): 85-92.
- [13] Yao J C. Measurements of human vision contrast sensitivity to opposite colors using a cathode ray tube display [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(23): 2425-2432.
- [14] Wang X, Jiang G Y, Zhou J M, *et al.* Visibility threshold of compressed stereoscopic image: effects of asymmetrical coding [J]. *The Imaging Science Journal*, 2013, 61(2): 172-182.
- [15] Tanchenko A. Visual-PSNR measure of image quality [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2014, 25(5): 874-878.

作者简介: 姚军财(1979—), 男, 湖北黄冈人, 硕士, 副教授, 主要从事视觉光学和显示器颜色管理方面的研究。

E-mail: yaojc4782@163.com