

文章编号: 1007-2780(2013)03-0365-08

基于 CRT 显示器的人眼彩色视觉特性数学模型研究

黄新民¹, 申 静², 任亚杰¹, 姚军财^{1*}

(1. 陕西理工学院 物理与电信工程学院, 陕西 汉中 723000, E-mail: slgh@sohu.com;

2. 陕西理工学院 数学与计算机科学学院, 陕西 汉中 723000)

摘 要: 结合阴极射线管显示器的显色特性, 设计了用显示器显示目标光栅测量人眼红-绿和蓝-黄对立色对比度敏感的实验方案, 测量了 11 位观察者的人眼彩色对比度敏感视觉特性的数据, 并对测量数据进行了拟合, 通过理论分析和结合前人的经验, 提出了一种人眼彩色视觉特性的 CSF 数学模型, 且与国外拟合结果做了对比。结果表明, 基于显示器测量、拟合和理论分析提出的 CSF 模型能够较好地反映人眼空间视觉特性, 是一个具有一定科学性的人眼视觉特性数学模型。

关 键 词: 阴极射线管显示器; 人眼视觉特性; 颜色空间; 数学模型

中图分类号: TN941; O432.3

文献标识码: A

DOI: 10.3788/YJYXS20132803.0365

Research Mathematical Model of Human Color Vision Characteristics Based on CRT Display

HUANG Xing-ming¹, SHEN Jing², REN Ya-jie¹, YAO Jun-cai^{1*}(1. School of Physics and Telecommunication Engineering, Shaanxi University of Technology,
Hanzhong 723000, China, E-mail: slgh@sohu.com;

2. School of Mathematics and Computer Science, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China)

Abstract: Combined with color rendering characteristic of the cathode ray tube display, the experiment scheme in which the display shows target grating to measure red-green and blue-yellow color contrast sensitivity was designed. 11 observers were measured to obtain the characteristic data of color contrast sensitivity for human visual system, and the data were fitted. According to the experience of the former and theoretic analysis, the CSF mathematics model to reflect human color vision characteristics was put forward, and the results were compared with foreign ones. The results show that the CSF model based on the display measurement, fitting and theoretic analysis can better reflect the human visual system characteristics. The CSF model is a scientific mathematical model reflecting human visual system characteristic.

Key words: cathode ray tube display; human vision system; color space; mathematical model

1 引 言

人眼视觉系统特性是图像显示、处理、理解等

技术的重要依据, 对比度敏感函数(Contrast Sensitivity Functions: CSF)是反映人眼视觉系统空间特性的数学描述。CSF 已在图像编码、压缩、质

收稿日期: 2012-09-28; 修订日期: 2012-11-06

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(No. 2011JE012); 陕西省教育厅专项科研基金(No. 12JK0959)

作者简介: 黄新民(1956-), 男, 陕西洋县人, 教授, 主要从事光电图像和信息技术方面的研究。

* 通信联系人, E-mail: yjc4782@126.com

量评价等处理领域中得到了广泛地应用,而且已成为该研究领域的发展方向^[1-5]。

人眼对比度敏感函数是反映空间频率和不同条件下的对比度觉察阈值的倒数之间的关系。其数据的测量是一个心理物理学实验过程,测量的准确程度受到多种因素影响,如显示仪器性能、测量仪器精度、实验环境、实验方法、色度对比度定义、实验者等^[6-8]。通过实验测量获得准确的人眼对比度敏感函数一直吸引着视觉和图像技术的研究者们。早期的研究主要集中在人眼亮度 CSF 上,到目前为止,人眼彩色传递特性的研究和应用才刚刚起步,但彩色 CSF 在光电成像理论与系统应用上有更大的应用价值,以致彩色 CSF 的研究更是一个焦点^[5-10];随着计算机、网络和数字技术的发展,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,所以,用显示器测量人眼彩色 CSF 有着重要的实际应用价值^[1-4]。

显示器发展到今天,已出现多种品种和类型,如阴极射线管显示器(CRT)、液晶显示器(LCD)、等离子显示器(PDP)等,但在要求颜色控制精度较高的视觉研究、包装印刷和图像技术等领域中,CRT 显示器无论在颜色的表现和观察视角上都具有较大的优势,以致实验采用 CRT 显示器来控制 and 再现色彩来进行实验^[9-15]。本文结合 CRT 显示器的显色特性,提出了一种小范围内精确控制显示器色度与色差的方法;设计了测量人眼红-绿和蓝-黄对立色对比度敏感的实验方案,测量了 11 位观察者的人眼视觉特性数据,并进行了数据拟合,获得了人眼彩色视觉特性数学模型,为在 CRT 显示器上进行其他颜色和图像视觉评价的实验或研究提供参考。

2 对比度定义

在工程光学和图像技术研究领域,仪器的光学传递函数理论已经比较成熟,而人眼是非常完美的成像仪器,实验研究表明人眼的光学传递函数也可以用于定量地描述人眼空间视觉特性,并且可以明确地探讨视觉信息处理机制的本质^[10]。对于人眼视觉系统,人眼的光学传递函数采用人眼对比度敏感函数来表示,其反映不同条件下的人眼对比度敏感与空间频率之间的关系;但是人眼对比度敏感值无法直接测定,通常根据韦伯定理采用心理物理学测定阈值的方法得到,结合人

的视觉系统结构和心理学特征规定:人眼的对比度觉察阈值指的是目标光栅刚能为人眼觉察时所需要的最低调制度,即人眼觉察处于阈值时光栅的对比度值^[10],取对比度觉察阈值的倒数即为人眼对比度敏感值。

2.1 亮度对比度定义

对于亮度光栅,对比度采用标准的 Michelson 对比度定义,其表达式如式(1)^[1, 10]。式中 L_2 和 L_1 分别为明暗条纹的亮度, \bar{L} 为整个条纹的平均亮度。

$$C = \frac{L_2 - L_1}{\bar{L}}, \quad \bar{L} = \frac{L_2 + L_1}{2} \quad (1)$$

2.2 红-绿和蓝-黄对立色对比度定义

彩色图像是亮度和色度的融合体,不同的亮度和色度,图像的对比度不同,因此,研究图像的彩色对比度时就要同时考虑亮度和色度两个方面的影响,以致到目前为止还没有一个统一的彩色对比度定义^[6-8]。

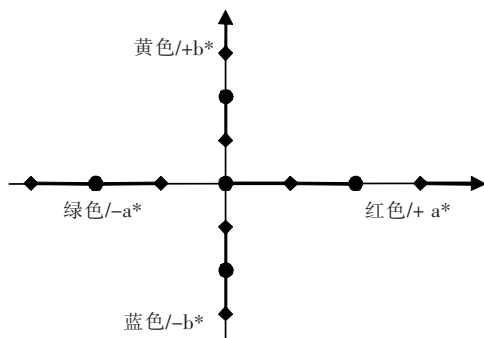


图 1 在 CIELAB 色空间任意选取以 $a^* = b^* = 0$ 的一白点为原点建立色度坐标系

Fig. 1 Founding color coordinate reference with origin of $a^* = b^* = 0$ selected in CIELAB color space

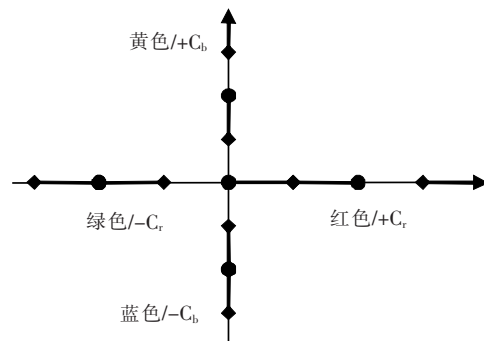


图 2 在 $YCrCb$ 色空间任意选取以 $Cr = Cb = 0$ 的一白点为原点建立色度坐标

Fig. 2 Founding color coordinate reference with origin of $Cr = Cb = 0$ selected in $YCrCb$ color space

(1) CIELAB 颜色空间是与设备无关的颜色空间。在色彩管理中,利用此特性,可沟通和推算出原稿色、屏幕色和印刷色在色空间中的对应关系,达到颜色在视觉上的一致,实现不同设备间的色彩转换^[11-15];根据此特点和前人研究对比度觉察阈值与亮度和色度之间关系的经验^[11-15],提出一种以 CIELAB 色空间作为表色系统、以色差定义对立色条纹的对比度。具体定义方法为:选择色度空间中的某一色点,记其色点的色度为 $a^* = 0, b^* = 0$,建立如图 1 的坐标系, $-a^*$ 表示颜色偏向绿色, $+a^*$ 表示颜色偏向红色; $+b^*$ 表示颜色偏向黄色, $-b^*$ 表示颜色偏向蓝色;彩色条纹做成红-绿条纹或蓝-黄条纹,表示红-绿或蓝-黄条纹的平均亮度;当测量红-绿颜色的对比度阈值时,保证 b^* 为零;当测量蓝-黄颜色的对比度阈值时,保证 a^* 为零。结合 CIE1976L* $a^* b^*$ 均匀色空间色差定义,则以色差定义对立色条纹的对比度可表述为式(2)。

$$C_a = \frac{|a_2^* - a_1^*|}{Y} \quad C_b = \frac{|b_2^* - b_1^*|}{Y}$$

$$\Delta a^* = |a_1^* - a_2^*| \quad \Delta b^* = |b_1^* - b_2^*| \quad (2)$$

(2) 电视信号的色彩空间 $YC_r C_b$ 是国际通用的 BT. 601 数字电视信号中使用的色彩空间,它是由 YUV 色彩空间经过缩放和平移得到^[11-15]。实验要求用显示器测量人眼对比度敏感函数, $YC_r C_b$ 颜色空间是非常适合的。根据此色空间的特点和前人研究对比度觉察阈值与亮度和色度之间关系的经验,提出一种以 $YC_r C_b$ 色空间作为表色系统的对立色条纹的对比度定义,具体定义方法为:选择 $YC_r C_b$ 色空间中的某一色点,记其色点的色度为 $C_r = 0, C_b = 0$,建立如图 2 的坐标系, $-C_r$ 表示颜色偏向绿色, $+C_r$ 表示颜色偏向红色; $+C_b$ 表示颜色偏向黄色, $-C_b$ 表示颜色偏向蓝色;彩色条纹做成红-绿条纹或蓝-黄条纹,表示红-绿或蓝-黄条纹的平均亮度;当测量红-绿颜色的对比度阈值时,保证 C_b 为零,当测量蓝-黄颜色的对比度阈值时,保证 C_r 为零。则以 $YC_r C_b$ 色空间作为表色系统的对立色条纹的对比度可表述为式(3)。

$$C_{C_r} = \frac{|C_{r2} - C_{r1}|}{Y} \quad C_{C_b} = \frac{|C_{b1} - C_{b2}|}{Y}$$

$$\Delta C_r = |C_{r2} - C_{r1}| \quad \Delta C_b = |C_{b2} - C_{b1}| \quad (3)$$

3 实验仪器和实验参数

3.1 实验器材及性能

CRT 显示器:53 cm(21 in) SONY-G520,实验前已使用 2 年,约 4 500 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-86LA 型屏幕亮度计,测量范围 0.01~19 990 cd/m²;

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

采用 LUT(Look-up Table)方法对显示器进行特性化^[11-15],并根据测量对比度觉察阈值的需要,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”、“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 ± 0.01 cd/m²,色度 x 和 y 的精度均为 $\pm 0.000 1$ 。

3.2 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×8.5 cm;

条纹视角:2.434 7°;

条纹平均亮度:对立色亮度光栅平均亮度为 52.5 cd/m² 和 54.5 cd/m²;

条纹空间频率: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 cpd(周/度)10 个空间频率;

显示器白场设置为: D_{65} :实测值 $x=0.312 2, y=0.329 2, Y=100.36$;亮度调节范围为 0 176.8 cd/m²;

条纹背景:灰背景的色品坐标接近于 D_{65} , $x=0.313 3, y=0.330 1, Y=27.6$ cd/m²;

照明环境:墙壁标准灰的暗室,只有显示器屏幕产生的亮度;

实验者到显示屏距离:2 m。

4 实验方法

人眼彩色对比度敏感的数据是通过人眼视觉心理物理学实验测量得到的,其测量的准确程度受到如显示仪器性能、测量仪器精度和实验环境、方法等诸多因素的影响^[6-8]。其中最重要的一个因素是考虑显示器 3 个通道间相互抑制影响时,在“中期”内精确控制 CRT 显示器的色度和色差,以实现精确控制红-绿和蓝-黄色目标光栅的对比度;根据用显示器测量觉察阈值的要求,精确控制 CRT 显示器的色度和色差必须实现:①达到以色差定义的对立色条纹的对比度要求,即 a^* 或 b^* 改变时,对应的 b^* 或 a^* 值保证为零或趋近于零(C_r 或 C_b 是同样的要求);②实验需要在“中期”内才能完成,显示器必须在“中期”内精确控制;③显示器可以实现的对比度要低于人眼觉察阈值。为了解决以上问题,提出一种小范围内精确控制 CRT 显示器色度和色差的方法;其次是依据精确控制 CRT 显示器的可控精度制作目标光栅的方法。下面对这两个问题进行详细描述。

4.1 小范围内精确控制 CRT 显示器色度 LAB 值和色差方法

CRT 显示器遵循的是加法呈色原理的 RGB 色空间,它依赖于设备材料,并且由于存在通道间的相互抑制影响,要实现开放式的色彩管理,必须将它与一个跟设备无关的 CIEXYZ 颜色空间建立关系,再转换为 CIELAB 色空间,目前普遍采用 LUT 方法或 GOG 模型来实现^[11-15],其 CRT 特性化方法包括两个步骤:一是由显示器 3 个通道显示的数字量得到电子枪产生亮度的非线性过程。二是由 3 个电子枪亮度得到 CIEXYZ 色度^[11-15]。实验研究显示,采用的 LUT 方法和 GOG 模型特性化 CRT 精度为 0.42 和 0.54 ΔE^* ab,精度虽然非常高,但是,步骤一没有直接考虑 3 个通道间相互抑制影响,如果直接采用步骤二,则达不

到实现更小精度控制的要求^[11-13]。且一般计算机采用的三通道分别为 8 bit 图像显示卡,不能满足显示器可以实现的对比度低于人眼觉察阈值的要求。本实验中采用三通道均为 10 bit 显示卡,即在常用间隔为 1 的 8 bit 显示器色度 RGB 或 R、G、B 值中间还可插入 3 个值 0.25、0.50、0.75,根据显示器亮度 γ 特性和显示器的显色特性,基于线性插值的方法,提出一种新的考虑三通道相互影响的小范围内精确控制 CRT 显示器色度和色差的方法,从而实现显示器任意 R、G、B 组合值、CIEXYZ 与 CIELAB 色度值之间的相互转化,以实现在“中期”内精确控制和更小目标光栅的对比度值。具体方法描述如下:

首先在显示器色域范围内选择小范围颜色数字量 R、G、B 值,间隔为 1,分别对每个通道数字量上下小范围改变,测量其单独显示时的三刺激值 $X_R, Y_R, Z_R, X_G, Y_G, Z_G, X_B, Y_B, Z_B$ 。同时对三枪共同显示(即 $R=G=B$)时数字量上下小范围改变,测量其三刺激值 $X_{R=G=B}, Y_{R=G=B}, Z_{R=G=B}$ 。再:①求出三枪共同显示时的三刺激值与 $X_R + X_G + X_B, Y_R + Y_G + Y_B, Z_R + Z_G + Z_B$ 间的差值,如式(4)所示;并根据以上的测量值,分别得出单独显示时的三刺激值与三枪共同显示时的三刺激值的比值,并得到各自的平均比值;②把所得到的差值按单独显示时的三刺激值与三通道共同显示时的三刺激值的比重加在单独显示时的三刺激值 $X_R, Y_R, Z_R, X_G, Y_G, Z_G, X_B, Y_B, Z_B$ 上(如式(5)所示)。计算得到的值即是单独显示时的三刺激值 $X_{R1}, Y_{R1}, Z_{R1}, X_{G1}, Y_{G1}, Z_{G1}, X_{B1}, Y_{B1}, Z_{B1}$ 。从而考虑了显示器 3 个通道间相互抑制影响;③根据得到的三刺激值,结合 10 bits 显卡的显色特性,对 R、G、B 各自间隔 0.25 进行线性插值,建立每个通道插值表 LUT。最后,根据颜色的加色原理,3 个单通道数字量任意组合,实现建立 3 个通道任意组合的数字量与 CIEXYZ 间查找表,再根据方程(6)转换为 CIELAB 色空间。

$$\begin{bmatrix} X_{dif} \\ Y_{dif} \\ Z_{dif} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{R=G=B} \\ Y_{R=G=B} \\ Z_{R=G=B} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_R + X_G + X_B \\ Y_R + Y_G + Y_B \\ Z_R + Z_G + Z_B \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} X_{dif} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{dif} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{dif} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r & x_g & x_b \\ y_r & y_g & y_b \\ z_r & z_g & z_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{R1} & X_{G1} & X_{B1} \\ Y_{R1} & Y_{G1} & Y_{B1} \\ Z_{R1} & Z_{G1} & Z_{B1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \text{if } Y/Y_n \geq 0.008\ 856, \text{ or } X/X_n \geq 0.008\ 856, \text{ or } Z/Z_n \geq 0.008\ 856 \\ L = 116(Y/Y_n)^{\frac{1}{3}} - 16, a^* = 500[(X/X_n)^{\frac{1}{3}} - (Y/Y_n)^{\frac{1}{3}}], b^* = 200[(Y/Y_n)^{\frac{1}{3}} - (Z/Z_n)^{\frac{1}{3}}] \\ \text{else if } Y/Y_n \leq 0.008\ 856, \text{ or } X/X_n \leq 0.008\ 856, \text{ or } Z/Z_n \leq 0.008\ 856 \\ L = 903.3(Y/Y_n), a^* = 3\ 893.5[(X/X_n) - (Y/Y_n)], b^* = 1557.4[(Y/Y_n) - (Z/Z_n)] \end{cases} \quad (6)$$

其中: $X_n=95.04; Y_n=100.0; Z_n=108.89$ 。

根据上面提出的方法,设计实验,测试能否实现达到精确控制 CRT 显示器色度和色差。实验结果表明,在“中期”内,可控制色度 Y, L^*, a^*, b^* 的精度分别是 0.171 1、0.278 2、0.110 8、0.113 4,可控制色差精度是 0.354 3 $\Delta E^* ab$ 。比现有的 LUT 方法和 GOG 模型方法更精确。

4.2 目标光栅的制作方法

由于光栅对比度不能连续变化,要测量某一亮度、不同的空间频率的对比度阈值,要在该空间频率阈值附近预先制作好不同对比度的条纹光栅。

(1)CIELAB 色空间以色差定义对比度时目标光栅的制作方法。根据小范围内精确控制 CRT 显示器色度和色差的方法,得到显示器任意

R、G、B 组合值、CIEXYZ 色度值与 CIELAB 色度值之间的相互转化值,再依据显示器可控精度,选取:① $b^*=0, \pm a^*$ 从 $\pm 4 \sim 0$ 依次间隔 0.25 时与之对应的 RGB 和 XYZ,② $a^*=0, \pm b^*$ 从 ± 4 到 0 依次间隔 0.25 时与之对应的 RGB 和 XYZ,保持亮度 52.50 cd/m^2 不变。根据对比度定义式(2),计算得到实验需要的对比度值,对应选取组合的 R、G、B 数字值,制作大量的不同空间频率、不同对比度值的图片。图片的空间频率利用调节条纹的宽度来实现。图片的最小对比度值可实现达到 0.009 5。

(2) $Y C_r C_b$ 色空间定义对比度时目标光栅的制作方法。对于显示器色度 RGB 值和 $Y C_r C_b$ 值间的转换,前人已做了大量的研究^[9],得出了精确的转换关系,如式(7)。

$$\begin{cases} Y = (77/256)R + (150/256)G + (29/256)B \\ C_r = (131/256)R - (110/256)G - (21/256)B + 128 \\ C_b = -(44/256)R - (87/256)G + (131/256)B + 128 \end{cases} \quad (7)$$

根据显示器色度 RGB 与 $Y C_r C_b$ 之间的转化值,选取(1) $C_r=0, \pm C_b$ 从 $\pm 4 \sim 0$ 依次间隔 0.25 时与之对应的 RGB 和 $Y C_r C_b$, (2) $C_b=0, \pm C_r$ 从 $\pm 4 \sim 0$ 依次间隔 0.25 时与之对应的 RGB 和 XYZ,保持亮度 54.5 cd/m^2 不变。根据 $Y C_r C_b$ 色空间对比度定义式(3),计算得到实验需要的对比度值,对应选取 R、G、B 数字值,制作大量的不同空间频率、不同对比度值的图片。图片的最小对比度值可实现达到 0.009 2。

4.3 人眼对比度觉察阈值确定方法和测试对象

人眼视觉特性的测量是一个心理物理学过程,人眼敏感阈值一般根据极限调整法进行测量和确定,具体的实验方法为:人眼需要一定的时间适应周围环境,因此要求每次测量时每位被测试者必须暗适应 30 min,暗适应后,在离显示屏 2.0 m 处(视角为 2.434 7°)观察显示的目标光栅图片;实验时被试者通过自行调节目标光栅图片的

RGB 值,达到自行调节目标光栅的对比度值,以觉察目标;测试过程中,首先从小到大逐渐增大光栅的对比度,直到人眼刚好能看见条纹而又不清晰,再从大到小逐渐降低条纹的对比度值,刚好看不到而又不清晰,取二者的平均值为该次对比度觉察阈值。实验中每一频率和每一亮度下的敏感阈值重复测量三次,取其平均值作为该频率光栅在不同亮度下的人眼对比度敏感阈值。

测试对象为 11 名健康的在校大学生和研究生,经过视力矫正后,视力均在 1.2 以上,眼科检查均为正常,无色觉异常,暗适应情况良好。

5 结果与讨论

5.1 实验结果

采用人眼对比度觉察阈值确定方法对 11 位观察者进行实验测试,得出了在两色空间定义对比度的人眼平均对比度敏感与空间频率间的关系

曲线,并且给出了每个频率 11 位观测者相对于其平均值的最大偏离值,如图 3。通过图 3 表示:① 4 条曲线的形状基本一致,但对比度敏感值有较

大差距;②当频率小于 3.79 cpd 时,不同观察者的对比度敏感值偏差较大;当频率大于 7.04 cpd 时,不同观察者的对比度敏感值基本一致。

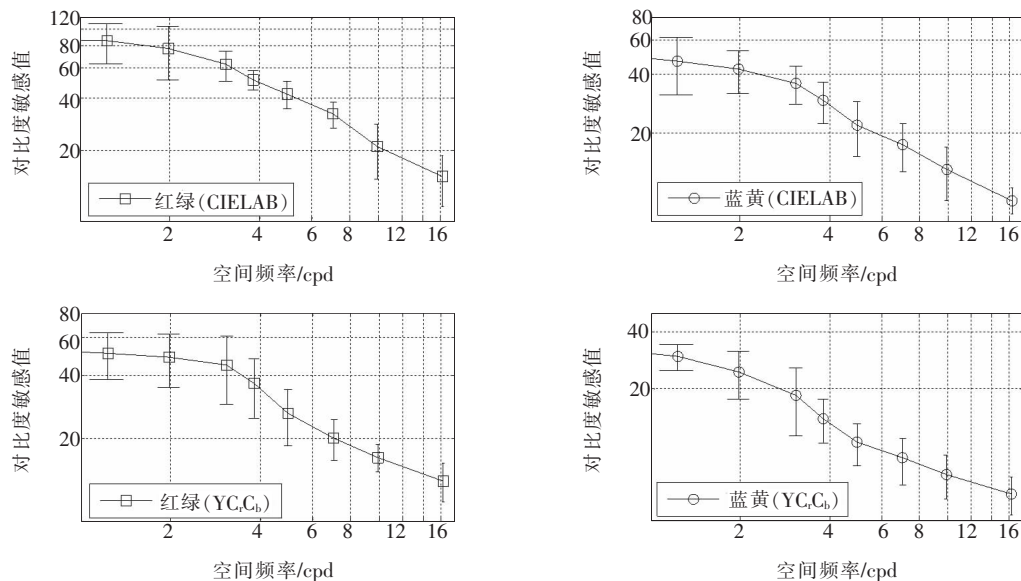


图 3 在 CIELAB 和 Y_CrCb 色空间下测量得到的红-绿和蓝-黄色敏感结果

Fig. 3 Results of contrast sensitivity to opposite color of red-green and yellow-blue measured in CIELAB and Y_CrCb color spaces

5.2 人眼视觉特性数学模型

人眼彩色对比度敏感函数(CSF_C)是反映人眼彩色对比度觉察阈值和空间频率间的关系。根据人眼具有带通和低通性的视觉特性以及实验数据,结合前人的经验和理论分析^[5-8],提出一种

CSF_C 的数学模型,其方程式(F)表述如式(8)。依据实验测量的数据,代入模型中进行拟合,得出其待定的参数值如表 1。

$$F(f) = a_1 \times f^{b_1} \times \exp(c_1 f) \quad (8)$$

表 1 彩色 CSF 模型式 8 中的参数值

Table 1 Parameters of the color CSF model Formula 8

Color-space	$L/(cd \cdot m^{-2})$	Red-Green			Blue-Yellow		
		a_1	b_1	c_1	a_1	b_1	c_1
YCrCb	54.5	58.294 3	-0.056 1	-0.109 1	33.550 2	-0.14	-0.115 1
CIELAB	52.5	55.327 5	0.075 3	-0.177 4	95.723 7	0.043 5	-0.159

5.3 讨论

采用最小二乘法对原始数据进行拟合,获得拟合曲线,将其与基于模型拟合的曲线以及原始数据进行对比,结果如图 4。对比结果表明两种拟合方法拟合的曲线基本一致,拟合曲线与测量数据非常吻合,表明提出的 CSF_C 模型是有效的,能够较好的反映人眼视觉特性。

彩色对比度敏感函数的测量和研究到目前为止国内外还没有提出较好的数学模型,且用显示器测量彩色 CSF 的则更少。近些年,国外做了部

分的研究工作,其研究主要集中在红绿对立色上,蓝黄对立色的研究相对较少。Nadenau 在 2000 年研究图像压缩算法时,对 LAB、 Y_CrCb 和 LMS 三种不同色空间的色度 CSF 进行简单地测量^[1],其提出的数学模型如方程式(9),在各种不同色空间中拟合的参数值如表 2,拟合结果如图 5。

$$F(f) = a_2 \exp(b_2 f^2) \quad (9)$$

对比 Nadenau 和本实验提出的彩色 CSF 数学模型,结果表明:(1)拟合的 CSF 形状基本一致,只是本实验拟合 CSF 所对应的对比度敏感值比

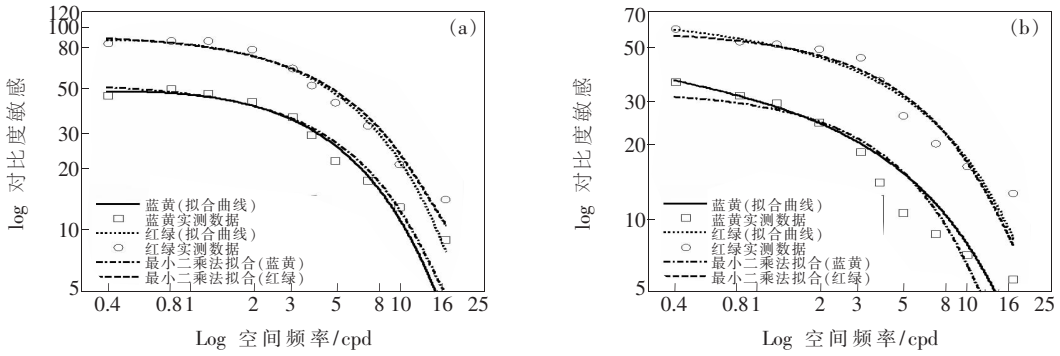


图 4 基于小波变换和提出的模型分别拟合的 CSF 曲线与测量数据的对比结果

Fig. 4 Comparison of the CSF curve fitted based on the wavelet transform and the model with measured data

表 2 Nadenau 提出的彩色 CSF 模型式 9 中的参数

Table 2 Parameters of the color CSF model Formula 9 put forward by Nadenau

Color-space	Red-Green			Blue-Yellow		
	a_2	b_2	c_2	a_2	b_2	c_2
Opponent	1.000	-0.098 4	1.094	1.000	-0.099 1	1.100
$YCrCb$	1.000	-0.152 1	0.893	1.000	-0.204 1	0.900
$L^*a^*b^*$	1.000	-0.210 7	0.873	1.000	-0.203 7	0.905

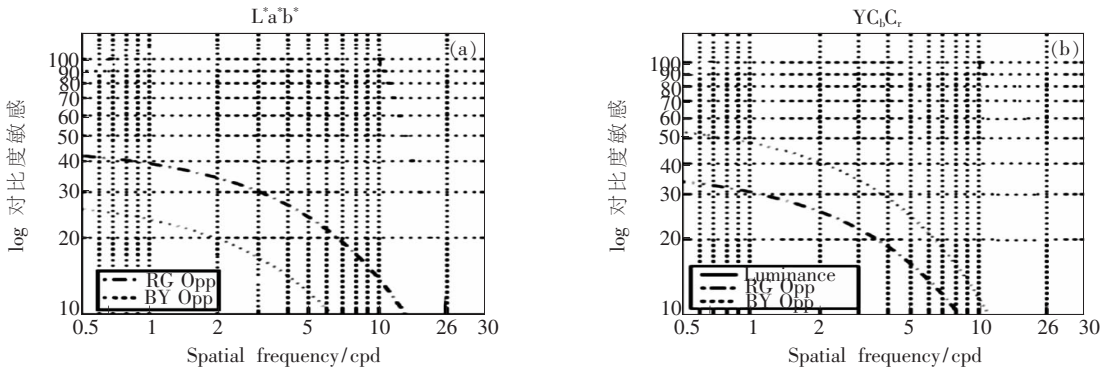


图 5 Nadenau 拟合得出的 CIELAB 和 $YCrCb$ 色空间红-绿和蓝-黄 CSFs

Fig. 5 Opposite color of red-green and yellow-blue CSFs fitted by Nadenau in CIELab and $YCrCb$ color spaces

Nadenau 的偏高;(2)Nadenau 提出的模型只是一个指数形式,而人眼对光的调制作用是非常复杂的,需要采用多种形式来描述,本实验提出的 CSF 数学模型是采用线性和指数相结合的形式,从而更符合实际的人眼视觉特性。(3)Nadenau 拟合的 CSF 是只对 3 个观测者的测量数据进行拟合的结果,测量数据有限,且没有与原始测量数据进行对比;(4)在拟合的来源数据上,本实验测量数据是在条纹置于亮度为 27.6 cd/m^2 灰背景中、

视角为 2.434° ,观察距离不变的条件下测量的结果;而 Nadenau、Wenzel 的测量中,没有给出详细描述实验者、测量条件、测量过程;(5)亮度对人眼视觉敏感的影响比较大,Nadenau 拟合的 CSF 没有说明是在何种亮度下的拟合结果,而本实验拟合的 CSF 是在对立色亮度光栅平均亮度为 52.5 cd/m^2 和 54.5 cd/m^2 下拟合的结果。综合表明本实验提出的人眼视觉特性数学模型比 Nadenau 提出的模型更具有可靠性、科学性。

6 结 论

通过与 Nadenau 的对比,表明基于显示器测量、拟合和分析提出的 CSF 数学模型比 Nadenau 提出的数学模型更能反映人眼空间视觉特性,是一个更具有科学性的人眼视觉特性模型。但是人

眼视觉特性的研究是一个复杂的课题,涉及到人的生理和心理因素,其数据的测量和拟合结果受到多种因素影响,需要进行大量的实验和理论研究,对于实验中的不同结果是很正常的,但是它在研究人眼对比度敏感特性中是有重大的理论和应用价值,是一项非常有意义的研究工作。

参 考 文 献:

- [1] Nadenau M. Integration of human colour vision models into high quality image compression [D]. Switzerland:École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2000.
- [2] 姚军财. 基于人眼对比度敏感视觉特性的图像质量评价方法 [J]. 液晶与显示, 2011, 26(3):390-396.
- [3] 黄敏,廖宁放,刘浩学,等. 颜色视觉匹配中显示器颜色色差阈值的评价 [J]. 光学学报, 2008, 28(3): 599-603.
- [4] 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.
- [5] 张建勇,金伟其,周燕. 人眼的彩色和亮度传递特性及模型化 [J]. 应用光学, 2003, 24 (4):441-443.
- [6] Mullen K T. The contrast sensitivity of human color vision to red-green and blue-yellow chromatic grating [J]. *Journal of Physiology*, 1984, 359:381-382.
- [7] Elliott S L, Choi S S, Doble N, *et al.* Role of high-order aberrations in senescent changes in spatial vision [J]. *Journal of Vision*, 2009, 9(2):1-16.
- [8] Peli E. Contrast sensitivity function and image discrimination [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2001, 18(2):283-293.
- [9] 李亨. 颜色技术原理及其应用 [M]. 北京:科学出版社, 1997:233-224.
- [10] 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 (1): 24-25.
- [11] 许宝卉,李言. 基于 ICC 标准的 CRT 色空间转换方法的研究与比较 [J]. 液晶与显示, 2009, 24(3):438-442.
- [12] 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.
- [13] Berns R S. Methods for characterizing CRT displays[J]. *Displays*, 1996, 16(4):173-182.
- [14] Berns R S. A generic approach to color Modeling [J]. *Color Res. Appl.*, 1997, 22(5):318-32.
- [15] 杨卫平,廖宁放,黄庆梅,等. 基于孟塞尔系统的阴极射线管特性化新方法[J]. 光学学报, 2004, 24(8): 1039-1045