

# 不同年龄段对比敏感度函数研究及模型建立

张镭<sup>1</sup>, 刘真<sup>1,2</sup>, 王琪<sup>1</sup>, 王茜<sup>2</sup>, 孔玲君<sup>2,3</sup>

(1.南京林业大学, 南京 210037; 2.上海理工大学, 上海 200093;  
3.上海出版印刷高等专科学校, 上海 200093)

**摘要:** **目的** 为了探讨不同年龄段人眼的对比度敏感视觉特性, 以获取对比度敏感函数模型。**方法** 基于 LCH 颜色空间, 利用显示器显示不同空间频率正弦波图像, 测量青年(18~25岁)、中年(30~45岁)、老年(50~70岁)共30位观察者的明度、彩度、色调角对比敏感度数据。**结果** 随着空间频率的增加, 人眼对比敏感度先增加后减小, 当空间频率在2~4周期/度时, 人眼最为敏感; 明度对比敏感度高于彩度、色调角; 青年组3种对比敏感度数据均高于中老年组。**结论** 采用指数函数对测量数据进行了拟合, 构建了对比敏感度函数模型, 可用于实现人眼视觉系统的建模, 能够用数学公式预测人眼对彩色图像质量的感知。

**关键词:** 对比敏感度; 视觉模型; 不同年龄段; LCH 颜色空间

中图分类号: TS801.3; O432.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)05-0231-13

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.05.033

## Contrast Sensitivity Function and Model Construction of Different Ages

ZHANG Lei<sup>1</sup>, LIU Zhen<sup>1</sup>, WANG Qi<sup>1</sup>, WANG Qian<sup>2</sup>, KONG Ling-jun<sup>2</sup>

(1.Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2.University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 3.Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to discuss visual characteristics of contrast sensitivity of different ages to get the contrast sensitivity function model. Based on the color space of LCH, 30 observers of three groups of youth (18~25 years old), middle age (30~45 years old) and old age (50~70 years old) were measured for lightness, chroma and hue angle contrast sensitivity curves. With the increase of the spatial frequency, the changes slowed slowly from low to high; the human eye was the most sensitive when the spatial frequency was 2~4 circles/degree. The lightness contrast sensitivity is higher than that of chroma and hue angle. The contrast sensitivity of the youth group is higher than the middle and old age groups. The exponential function is used to fit the measured data and a contrast sensitivity function model is established. The model can be used to realize the modeling of human visual system. It can use mathematical formulas to predict the human eye perception of the quality of color images.

**KEY WORDS:** contrast sensitivity; vision model; different ages; LCH color space

视觉系统对具有不同空间频率、微小颜色差异影像敏感程度的特性函数称为对比敏感度函数(CSF,

Contrast Sensitivity Function), 表征了人眼视觉系统对不同空间频率影像的响应能力。多名研究者建立基

收稿日期: 2018-05-19

基金项目: 上海理工大学科技发展项目(2018KJFZ023)

作者简介: 张镭(1985—), 女, 南京林业大学博士生, 主要研究方向为图文信息再现与控制。

于对比敏感度函数的人眼视觉模型,研究了人眼对明度和色度信息的空间频率响应。Cambell 和 Mannos 等<sup>[1-4]</sup>分别于 1968 和 1974 年建立人眼视觉函数模型,研究了半色调网点的视觉可辨性,提出了其专门针对半色调的 CSF 模型。J E Ross 等<sup>[5]</sup>于 1985 年研究了 20~30 岁和 50~87 岁年龄段人群人眼对比敏感度函数研究。Barten 等<sup>[6-7]</sup>于 1987 年综合考虑人眼各种因素构建了复合型函数模型。Mullen<sup>[8]</sup>于 1985 年论述了低层视觉效应对彩色 CSF 的影响,并对彩色 CSF 的低通峰值延伸到很低的空间频率进行了解释。Zhang X. M. 等<sup>[9-10]</sup>在 1996 年考虑 CSF 对图像中空间结构的影响,基于 CIELAB 空间建立了图像色差公式,提出一种采用 CSF 处理彩色图像的方法。Wandell 等<sup>[11]</sup>在 2000 年用颜色的非对称匹配方法研究人眼的彩色传递特性,提出了模式-彩色分离模型。Johnson 等<sup>[12]</sup>在 2003 年基于 CSF 模型建立 CIEDE2000 图像色差公式,对图像的主要色貌属性量与图像质量的关系进行了研究。金杨<sup>[13-16]</sup>于 2012 年基于 CIELAB 均匀颜色空间,进行视觉对比敏感度的测试,构建基于 LCH 色空间的对比敏感度函数模型。许向阳<sup>[17-18]</sup>于 2014 年基于 CSF 函数模型提出了一个基于颜色属性相关性的图像色差计算算法,可用于评价图像的颜色差别、评价压缩方式、图像增强算法、色域映射算法等的性能。文中基于 LCH 颜色空间,设计人眼视觉观察实验,获取不同年龄段对比度数据,采用指数函数类型对测量数据进行了拟合,构建对比敏感度函数模型,该函数模型可应用于视觉相关的彩色图像处理、图像质量评价、视觉成像机制、彩色视觉缺陷和眼病诊断等方面<sup>[19-26]</sup>。

## 1 对比敏感度函数

### 1.1 调制传递函数

调制传递函数(MTF=Modulation Transfer Function)是成像所获图像的对比度与原图像对比度的比值随空间频率 $f$ 变化的对应关系。对不同的空间频率 $f$ ,成像系统的 MTF 的数值不同。调制传递函数( $F_{\text{MTF}}$ )定义为:输出端与输入端调制度之比,见式(1)。

$$F_{\text{MTF}}(f) = \frac{M_{\text{OUT}}}{M_{\text{IN}}} \quad (1)$$

式中: $M_{\text{OUT}}$ 和 $M_{\text{IN}}$ 为输出端与输入端的调制度。

视觉观察实验可获取人眼的调制传递函数 $F_{\text{MTF}}(f)$ 。测试图像为刺激值(明度/彩度/色调角)按正弦波变化的图像,正弦波具有某种空间频率 $f$ ,图像的最大刺激值为 $S_{\text{max}0}$ ,最小刺激值为 $S_{\text{min}0}$ 。在某一空间频率 $f$ 下,通过改变正弦波刺激值的最大值和最小值,直到人眼恰能分辨出图像颜色出现差异,通过式(2)可计算出图像在频率 $f$ 下的调制度(对比

度) $M_0$ 值。

$$M_0(f) = \frac{S_{\text{max}0} - S_{\text{min}0}}{S_{\text{max}0} + S_{\text{min}0}} \quad (2)$$

输出端的调制度 $M_1$ 一般为常数 $K$ ,人眼视觉(像方)的调制传递函数值应正比于正弦波图像的输入端调制度 $M_0$ 的倒数:

$$F_{\text{MTF}}(f) = \frac{M_1}{M_0} = \frac{K}{M_0} = \frac{K}{\left( \frac{S_{\text{max}0} - S_{\text{min}0}}{S_{\text{max}0} + S_{\text{min}0}} \right)} \quad (3)$$

基于以上原理,人眼视觉的调制传递函数值可定义为被辨识图像调制度 $M_0$ 的倒数,见式(4)。

$$F_{\text{MTF}}(f)_{\text{Eye}} = \frac{1}{M_0} \quad (4)$$

视觉 $F_{\text{MTF}}(f)_{\text{Eye}}$ 是测量人眼对最低对比度的识别能力。

### 1.2 对比敏感度函数模型

眼睛对于人类认知和辨别颜色非常重要,就像一个空间滤波器,对明度和色度信息分别具有空间带通滤波和低通滤波功能。许多研究者基于空间滤波的原理建立人眼的空间特性模型,研究人眼对明度和色度信息的空间频率响应。现已建立了多种对比敏感度函数模型,典型模型有高斯型、指数型和 Barten 型。

1) 高斯型。人眼频率响应是多重窄带调谐滤波器的包络线, $F_{\text{MTF}}$ 可表示为:

$$F_{\text{MTF}}(f) = \exp(-2\pi^2 a^2 f^2) \quad (f \geq f_D \approx 0.1 \sim 0.4 \text{ 周期/mrad})$$

$a$ 为关于人眼响应等效线扩展函数的标准偏差的系数。

2) 指数型。在热成像系统模型中提出的人眼频率响应用调制传递函数 $F_{\text{MTF}}$ 表示为:

$$F_{\text{MTF}}(f) = \exp(-kf) \quad (f \geq f_0)$$

式中: $k$ 为关于显示屏平均亮度的系数。

3) Barten 模型。Barten 模型属于带通滤波器,带通滤波器模型更符合人眼的视觉传递特性。Barten 模型是一个复杂的物理模型,具有明确的物理意义,可以解释人眼视觉系统的非线性特性,有公认的物理模型以及简化的数学拟合公式,各种实验条件下的数据都有很好的拟合度,应用广泛。Barten 模型的数学公式 $F_{\text{MTF}}$ 可表示为:

$$F_{\text{MTF}}(f) = af \exp(-bf)[1 + c \exp(bf)]^{1/2}$$

式中: $p_1, p_2, p_3$ 为参数,可根据实验数据进行调整。采用 Barten 公式进行拟合,都可达到较高的拟合精度,数学公式更便于计算和应用。

### 1.3 LCH 颜色空间下的对比敏感度函数

LCH 颜色空间是在 CIE1976  $L^*a^*b^*$ 均匀颜色空间的基础上,由色度值 $L^*, a^*, b^*$ 转换而来,采用明度 $L$ 、彩度 $C$ 和色调角 $H$ 3个变量对颜色进行描述,反

映人眼视觉对颜色的视觉感受，且各通道之间的相关性较小。在 LCH 颜色空间中，明度  $L$ 、彩度  $C$ 、色调角  $H$  转换公式见式 (5)。

$$L = L^*, C = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}, H = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (5)$$

在此颜色空间下，明度、彩度、色调角对比敏感度  $C_L, C_C, C_H$  定义见式 (6—8)。

$$C_L = \frac{1}{\left(\frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}\right)_{\min}} \quad (6)$$

$$C_C = \frac{1}{\left(\frac{C_{\max} - C_{\min}}{C_{\max} + C_{\min}}\right)_{\min}} \quad (7)$$

$$C_H = \frac{1}{\left(\frac{H_{\text{end}} - H_{\text{stprt}}}{\Delta H_{\text{endmax}} + \Delta H_{\text{startmax}}}\right)_{\min}} \quad (8)$$

式中： $L_{\max}, L_{\min}$  分别为正弦波图像明度最大值、最小值； $C_{\max}, C_{\min}$  分别为正弦波图像彩度最大值、最小值； $H_{\text{end}}, H_{\text{start}}$  分别为正弦波测试图像偏移色调角中心的色调角终止值和起始值； $\Delta H_{\text{endmax}}, \Delta H_{\text{startmax}}$  分别为偏移色调角中心的终止值最大值和起始值最大值<sup>[7-9]</sup>。

## 2 实验

### 2.1 设备及环境

显示器计算机主机为 DELL PRECISION T3500，在 CSF 视觉测试中，对彩色图像显示精度要求高，采用显示性能较好的彩色显示器 Eizo FlexScan SX2462W 以及高精度显示卡，显示软件为 Adobe Photoshop Lightroom4。

依据 Modelfest 组织对“空间标准观察者”的规定，依据刺激图像区像素行列数为 256×256，显示器的像素行列数为 1920 (列)×1200 (行)，显示器屏幕的横纵向尺寸为 519 mm×324 mm，计算可得视觉观察距离  $L \approx 1.86$  m，图像刺激测试区的视场为 2.1°×2.1°。

视觉观察实验是在一间面积约 4 m<sup>2</sup> 的实验室内，在暗室中进行观察实验。选取 30 名年龄在 18~70 岁色觉正常的观察者参与了观察实验，观察者无色盲及色弱，裸眼视力在 1.0~1.5 之间，双裸眼观察。都具有一定的色彩学基础知识。观察者分为 18~25 岁、30~45 岁、50~70 岁 3 个年龄段，每个年龄段观察人数为 10 位。

### 2.2 实验原理及方法

文中设定不同明度、彩度、色调角进行 CSF 的

视觉测试。测试图像为沿水平方向延伸的正弦波，设置固定空间频率，明度/彩度/色调角按正弦波变化。选定了中等明度水平  $L_{CT}=50$ 、中等彩度水平  $C_{CT}=50$ 、多种不同色调角 (为  $C_L$  和  $C_C$  选定 6 种  $H_{CT}$ 、为  $C_H$  选定 12 种  $H_{CT}$ ) ( $L_{CT}, C_{CT}, H_{CT}$  分别表示表示明度、彩度、色调角中心的位置)，进行 CSF 的视觉测试，共 24 组颜色设置，实验测试图像的色度范围设置见表 1。

表 1 CSF 视觉测试的色度范围  
Tab.1 Chromaticity range of CSF visual test

测试图	明度 $L$	彩度 $C$	色调角 $H/(^\circ)$
$C_L$	50 (中心)	50	30,90,150,210,270,330
$C_C$	50	50 (中心)	30,90,150,210,270,330
$C_H$	50	50	15,45,75,105,135,165,195,225, 255, 285, 315, 345 (中心)

CSF 视觉测试过程为：生成多个图像序列，每个序列中包含多幅图像。用经过色彩校准及特性化的液晶显示器显示图像序列。在 LCH 3 个变量中，2 个色彩变量恒定，而另一个变量按正弦波变化。测试图像的空间频率范围为 0.24~20 周期/度，共取 21 种不同的空间频率值进行测试，空间频率设置见表 2。

表 2 空间频率 ( $\theta=2.1$ )  
Tab.2 Spatial frequency ( $\theta=2.1$ )

周期 $N$	频率 $F$	周期 $N$	频率 $F$
0.5	0.238	15	7.143
1	0.476	18	8.571
2	0.952	21	10
3	1.428	24	11.428
4	1.904	27	12.857
5	2.381	30	14.285
6	2.857	33	15.714
7	3.333	36	17.142
8	3.809	39	18.571
9	4.285	42	20
12	5.714		

编程生成正弦波测试图像。每个中心图像，正弦波条纹数固定，对比度不同，生成若干不同空间频率的图像序列。每个周期中生成 10 个测试观察图像，用于观察者测试，图像数据量较大，24 组对比度数据共计 21×10×24=5040 个测试图像。

色调角为 30°时某空间频率下彩度对比敏感度观察测试图见图 1。每幅测试图中正弦波周期为 5，明度为 50，彩度中心值为 50，色调角为 30，彩度最大/最小值从左至右分别为 40/60, 45/55, 49/51，对比度依次降低。

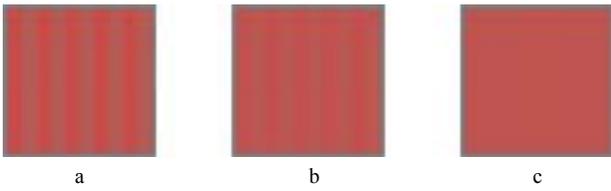


图1 彩度测试  
Fig.1 Chroma test

每个图像序列中的图像包含的条纹数目相同，对比度变化范围从视觉“不可见的条纹”逐渐过度到“完全可见的条纹”，直到观察者选出视觉恰可分辨出的条纹图像，记录该条纹图像信息，即条纹刺激值的最大最小值和对应的空间频率。继续观察下一组测试图像系列，直至完成所有观察实验。观察者在观察过程中分别按频率增加及降低的顺序进行辨认，以保证辨识可靠性。每位观察者分别对6组明度、6组彩度、12组色调角测试图进

行视觉观察实验，共计至少需观察  $5040 \times 30 \times 2 = 302\ 400$  次。

### 2.3 结果及分析

通过视觉观察实验，得到各空间频率下的测试图中视觉恰可分辨出的图像，该图像的对比度值为已知，即可获得该空间频率下的CS值，则可获得CS与空间频率对应的函数关系，该函数关系即为对比敏感度函数CSF。使用Origin软件绘制出对比敏感度随空间频率变化的曲线图，即CSF曲线。青年、中年、老年等3组6种色调角下（ $H$ 为 $30^\circ, 90^\circ, 150^\circ, 210^\circ, 270^\circ, 330^\circ$ ）彩色明度CSF曲线。

青年、中年、老年等3组6种色调角下（ $H$ 为 $30^\circ, 90^\circ, 150^\circ, 210^\circ, 270^\circ, 330^\circ$ ）彩度CSF曲线见图3。

青年、中年、老年等3组12种色调角中心下（ $H$ 为 $15^\circ, 45^\circ, 75^\circ, 105^\circ, 135^\circ, 165^\circ, 195^\circ, 225^\circ, 255^\circ, 285^\circ, 315^\circ, 345^\circ$ ）色调角CSF曲线见图4。

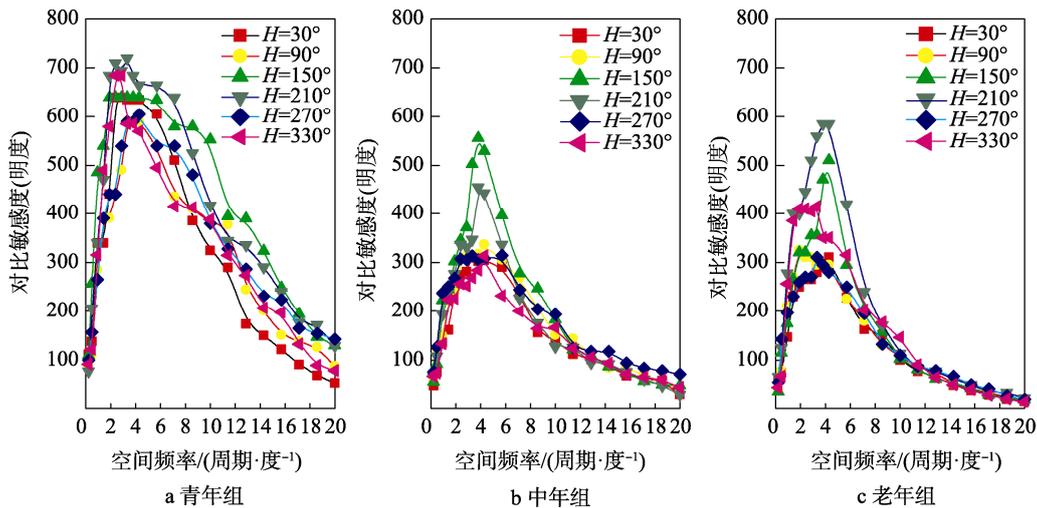


图2 彩色明度CSF曲线  
Fig.2 CSF curve of color lightness

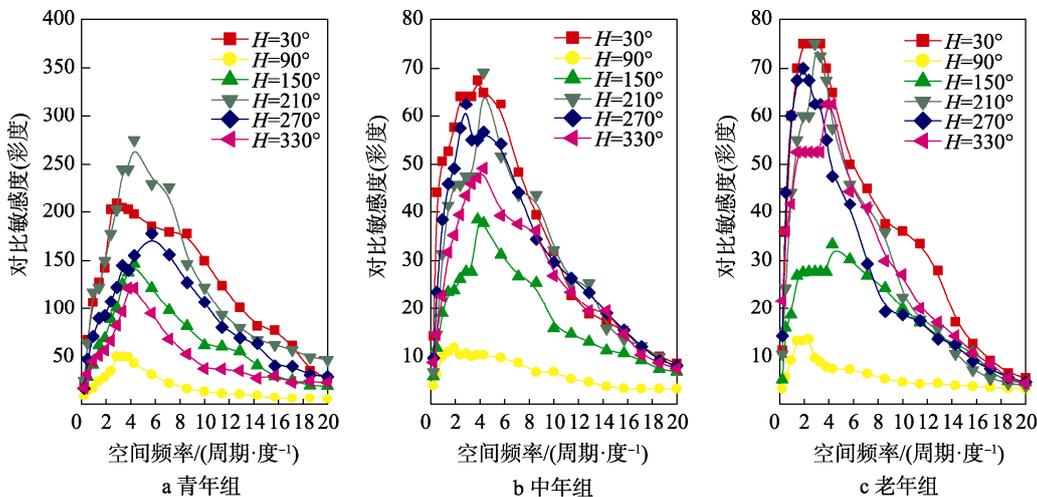


图3 彩度CSF曲线  
Fig.3 CSF curve of chroma

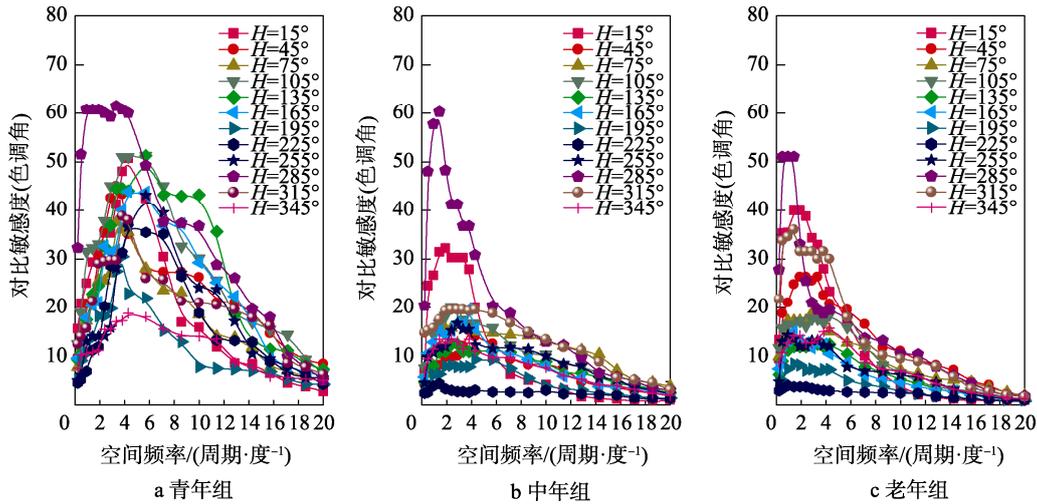


图 4 色调角 CSF 曲线  
Fig.4 CSF curve of hue angle

从图 2—4 中可看出，随着空间频率的增大，CS 值变化趋势一致，都为先升高后逐渐降低，当空间频率在 2~4 周期/度时，CS 值最大。3 组明度 CS 值较集中且高于彩度、色调角 CS 值。青年组各明度、彩度、色调角 CS 值均高于中老年组，中老年组各 CS 值接近。在不同的色调角下，青年、中年、老年组的彩度 CS 值存在差异明显，青年组彩度 CS 值明显大于中老年组。在空间频率大于 10 周期/度范围，青年组色调角对比敏感度对应的空间频率范围较宽，中老年组 CS 值较接近。

数仿真图，见图 5。

### 3 CSF 函数模型建立

#### 3.1 CSF 函数建立

对比敏感度函数反映对比敏感度与空间频率之间的关系，通过实验观察数据拟合获得数学模型，该模型反映人眼传递特性。文中参考前人对彩色图像 CSF 的测量方法及已有 CSF 数学模型的研究，结合文中实验用显示器在不同的明度、彩度、色调角下在不同空间频率下的对比度数据，依据 Rayleigh 函数和 Barten 函数<sup>[27]</sup>，采用非线性拟合建立明度、彩度、色调角 CSF 模型。Rayleigh 函数见式 (9)，Barten 函数见式 (10)。

$$CSF(x) = \frac{x}{a^2} \cdot e^{-\frac{x^2}{2a^2}} \quad (9)$$

$$CSF(x) = a \cdot x \cdot e^{-b \cdot x} (1 + c \cdot e^{-b \cdot x})^{0.5} \quad (10)$$

文中构建的 CSF 定义为 Ray 函数，见式 (11)。

$$CSF(x) = \frac{x}{a} \times e^{-\frac{x}{b}} \times (1 + d \times e^{-\frac{x}{c}}) \quad (11)$$

式中： $a, b, c, d$  为参数，调整 Ray 函数中各参数值，当  $a=1, b=0.8, c=1, d=1$  时，可得 Ray 函

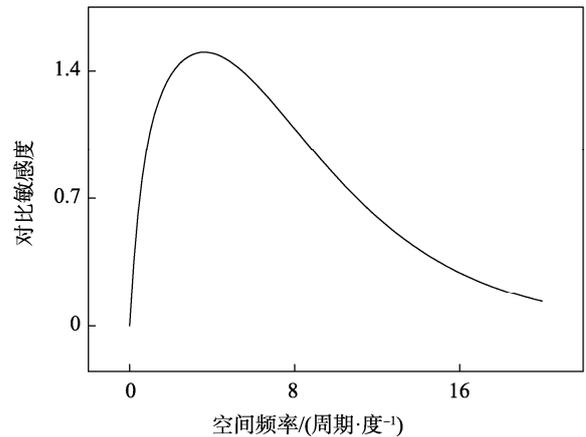


图 5 Ray 函数模型仿真曲线  
Fig.5 Simulation curve of Ray function model

#### 3.2 明度 CSF 拟合

将实验获取的青年、中年、老年 3 组彩色明度对比敏感度数据采用 Ray 函数模型进行拟合，获得明度 CSF 拟合曲线。青年组彩色明度 CSF 曲线拟合见图 6。

中年组彩色明度 CSF 曲线拟合见图 7。

老年组彩色明度 CSF 拟合曲线见图 8。

#### 3.3 彩度 CSF 拟合

将实验获取的青年、中年、老年 3 组彩度对比敏感度数据采用 Ray 函数模型进行拟合，获得彩度 CSF 拟合曲线。青年组彩度 CSF 拟合曲线见图 9。

中年组彩度 CSF 曲线拟合见图 10。

老年组彩度 CSF 拟合曲线见图 11。

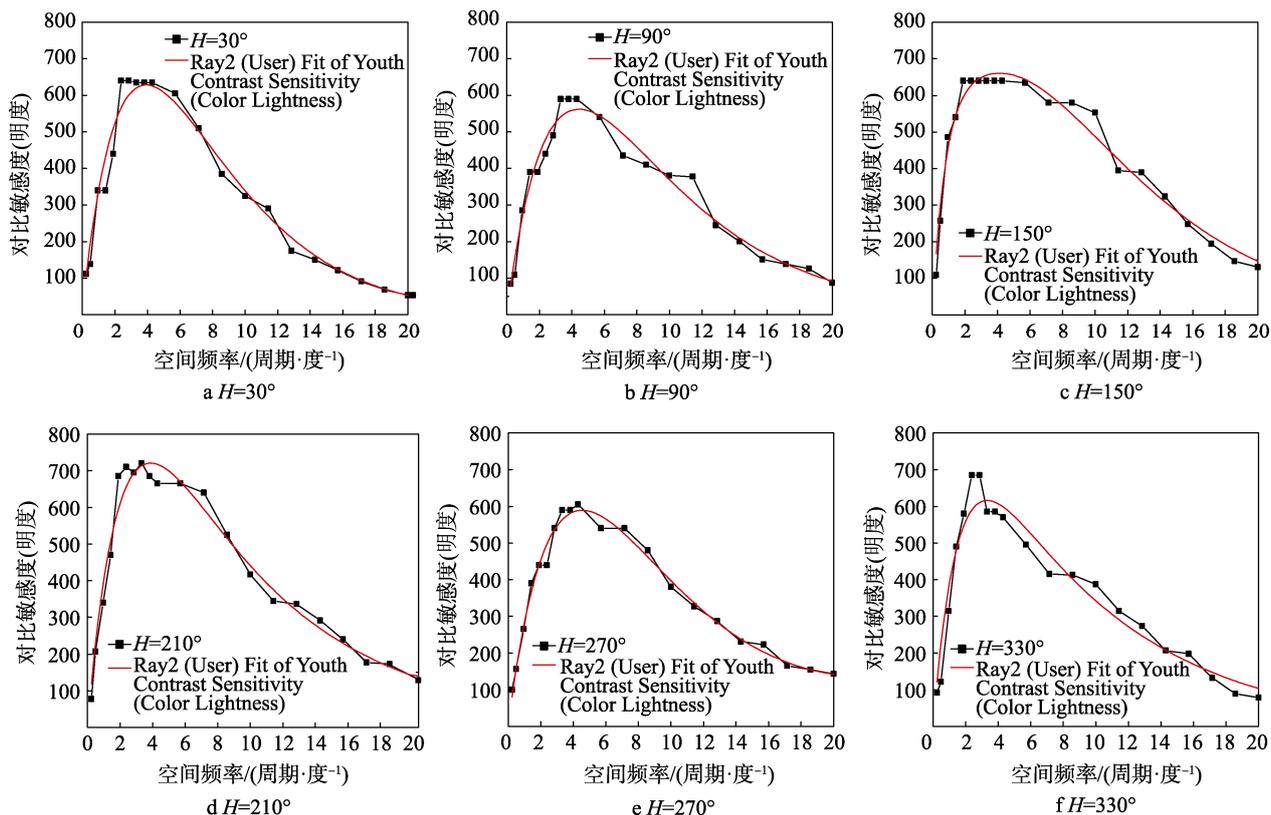


图6 青年组彩色明度 CSF 拟合曲线  
Fig.6 Color lightness CSF fitting curves of Youth group

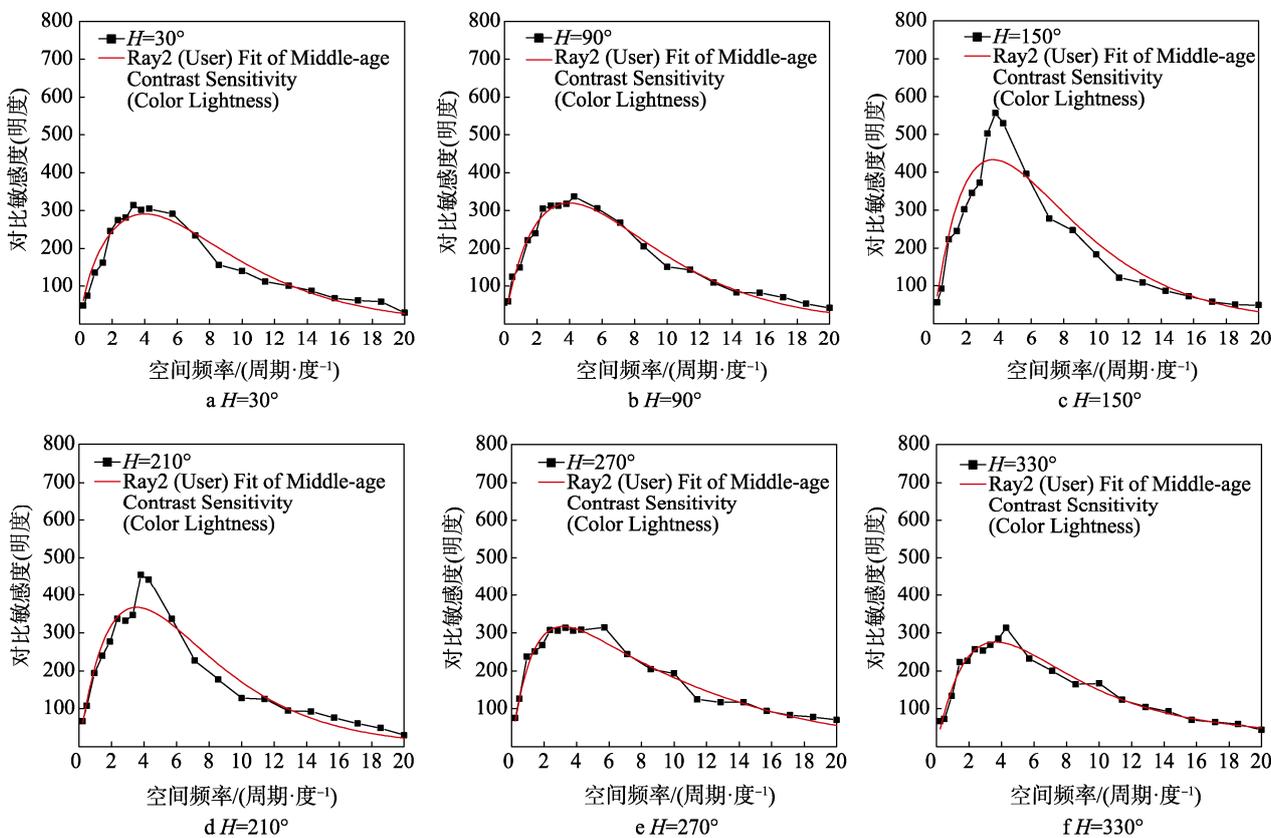


图7 中年组彩色明度 CSF 曲线拟合  
Fig.7 Color lightness CSF fitting curves of Middle-age group

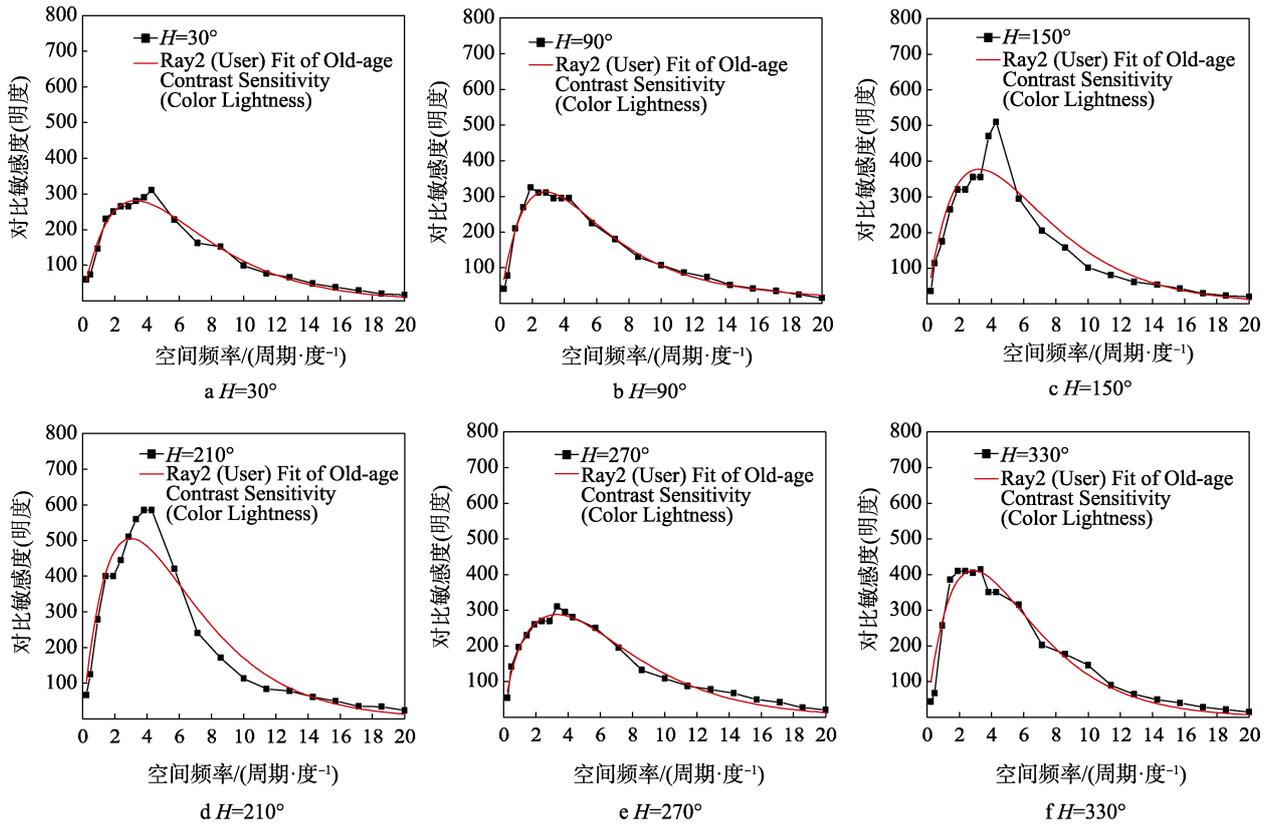


图 8 老年组彩色明度 CSF 曲线拟合  
Fig.8 Color lightness CSF fitting curves of Old-age groups

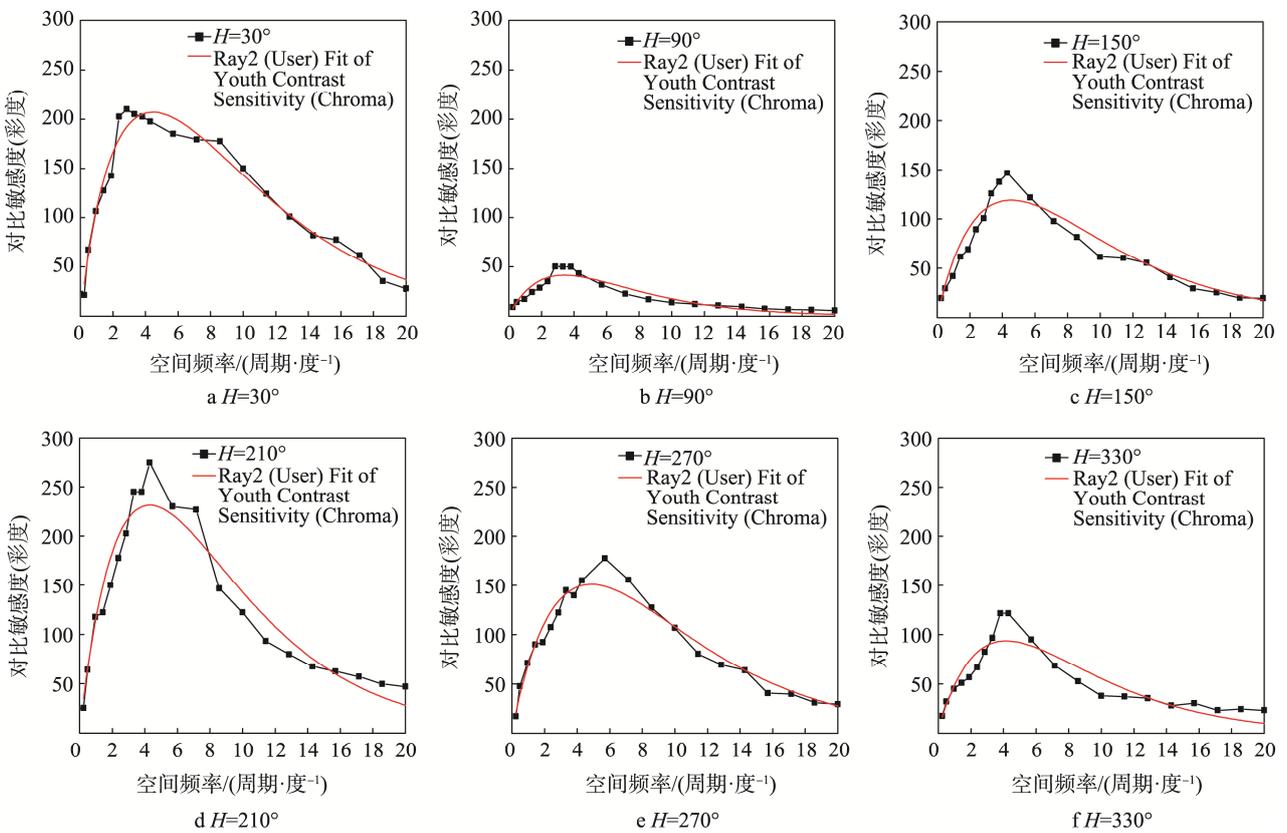


图 9 青年组彩度 CSF 拟合曲线  
Fig.9 Chroma CSF fitting curves of Youth group

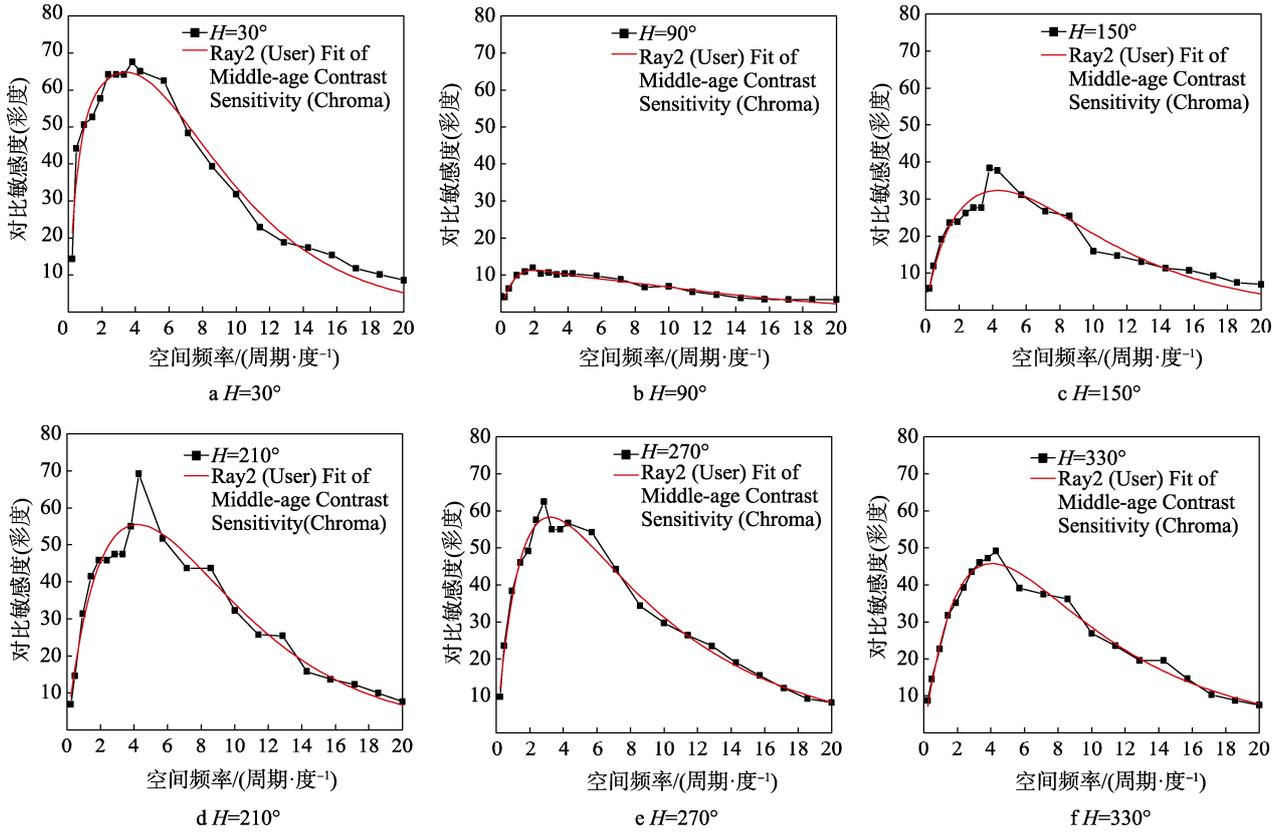


图 10 中年组彩度 CSF 拟合曲线  
Fig.10 Chroma CSF fitting curves of Middle-age group

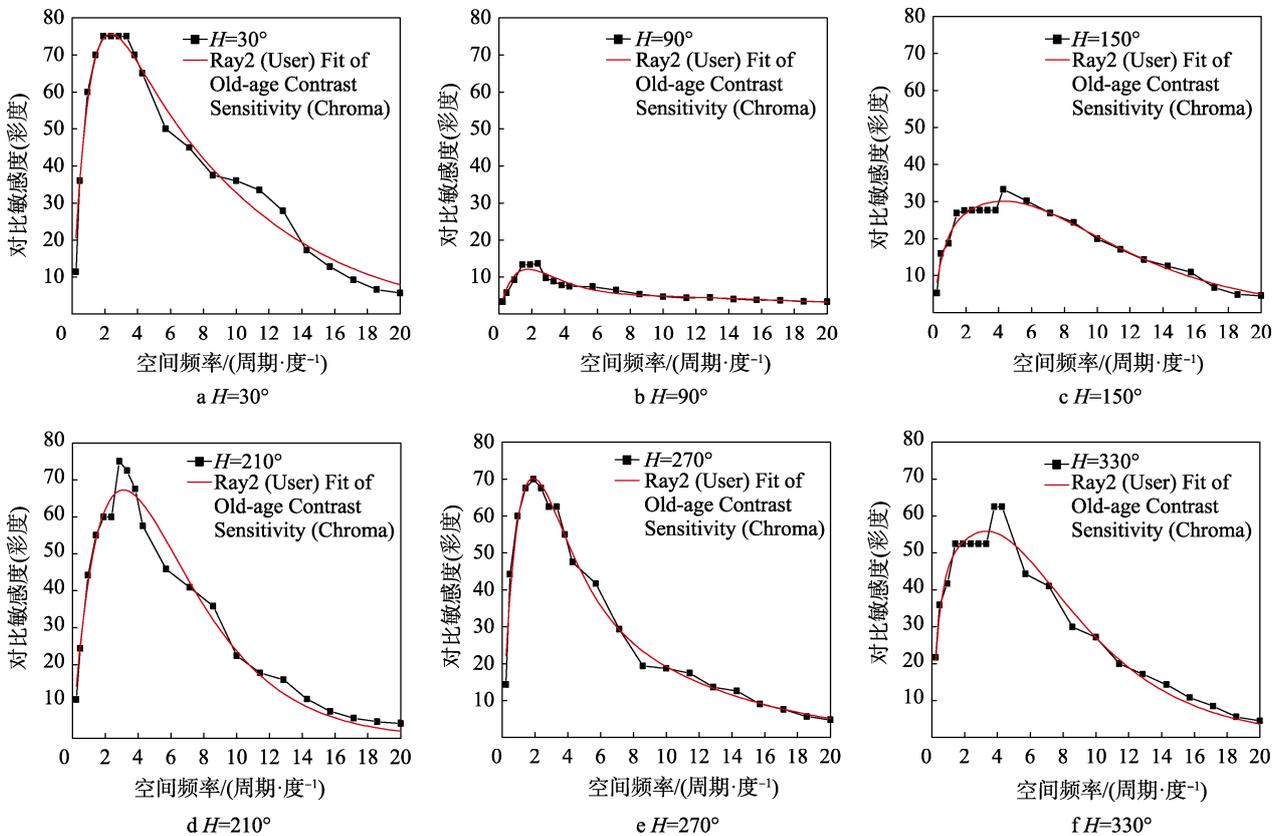


图 11 老年组彩度 CSF 拟合曲线  
Fig.11 Chroma CSF fitting curves of Old-age group

### 3.4 色调角 CSF 拟合

将实验获取的青年、中年、老年等 3 组色调角对比敏感度数据采用 Ray 函数模型进行拟合，获得

色调角 CSF 拟合曲线。青年组色调角 CSF 拟合曲线见图 12。

中年组色调角 CSF 拟合曲线见图 13。

老年组色调角 CSF 拟合曲线见图 14。

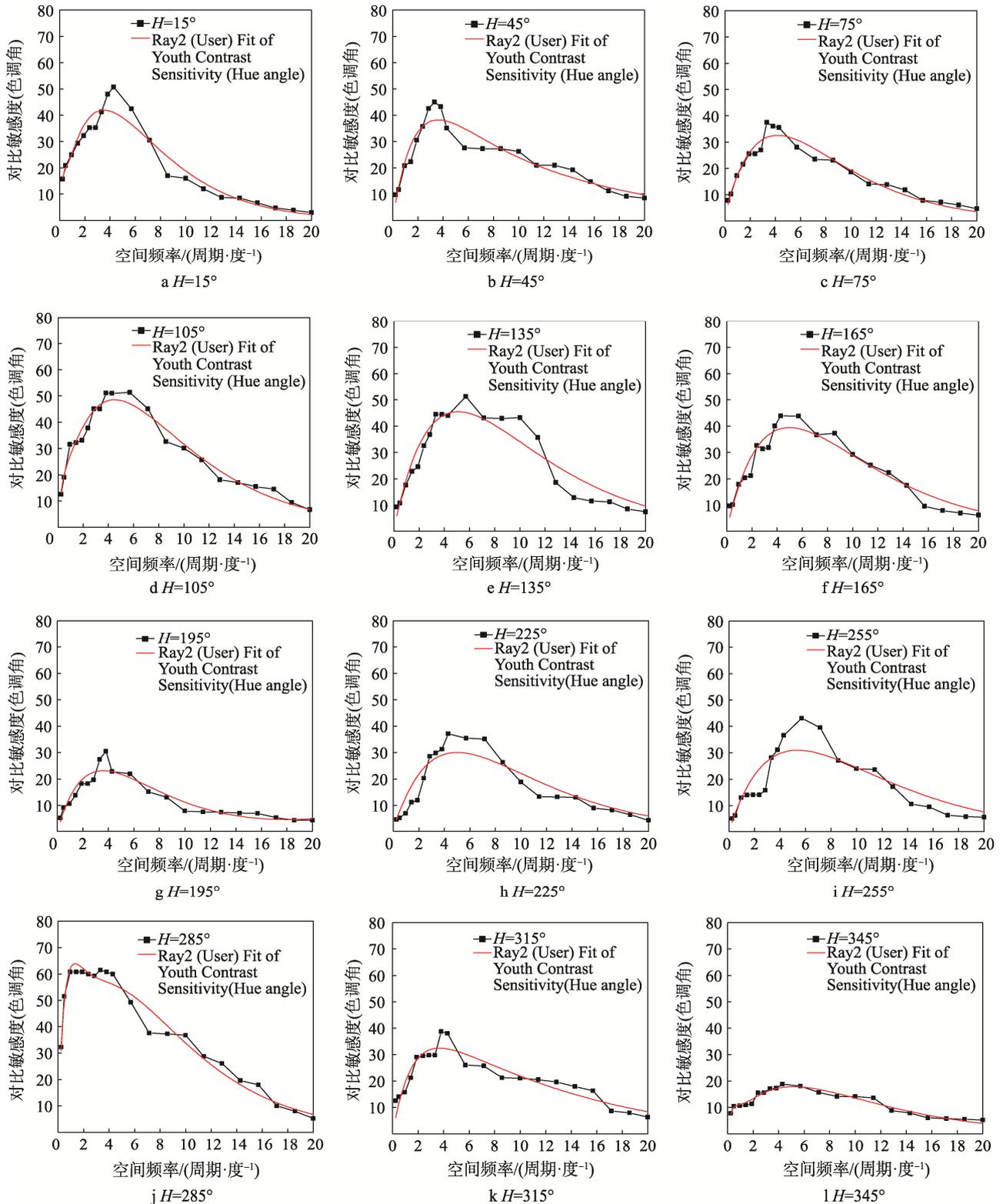


图 12 青年组色调角 CSF 拟合曲线  
Fig.12 Hue angle CSF fitting curves of Youth group

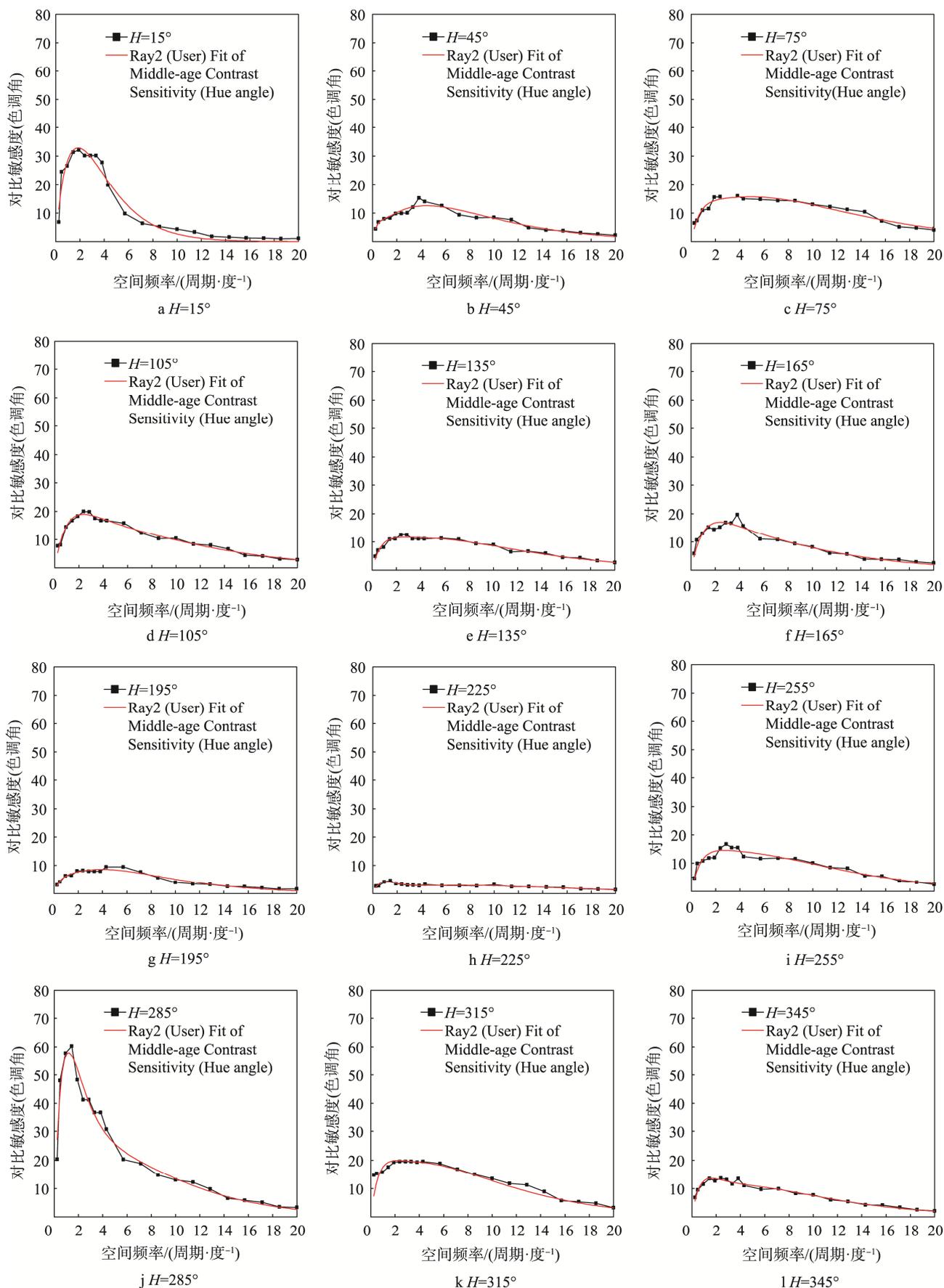


图 13 中年组色调角 CSF 拟合曲线  
Fig.13 Hue angle CSF fitting curves of Middle-age group

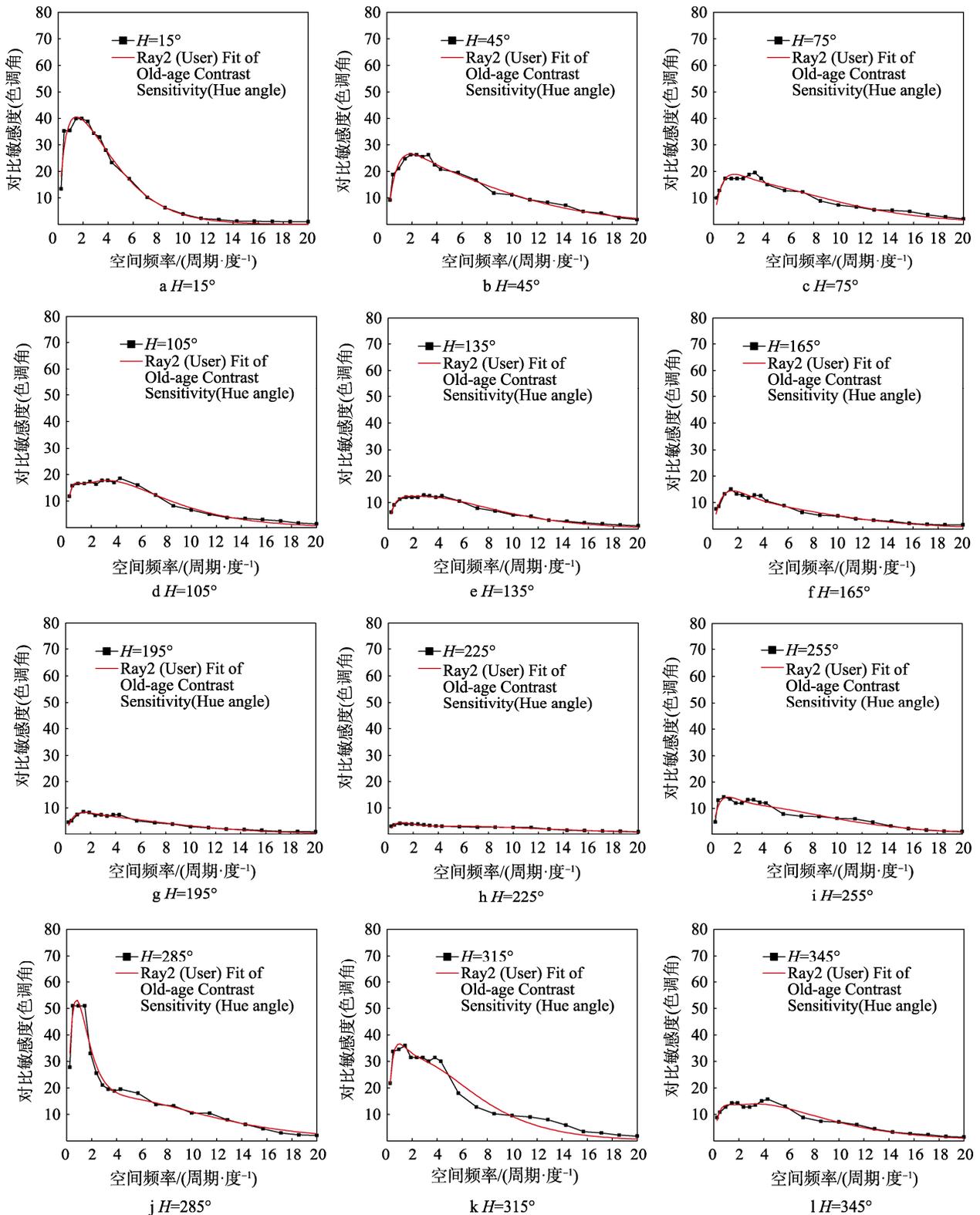


图 14 老年组色调角 CSF 曲线拟合  
 Fig.14 Hue angle CSF fitting curves of Old-age group

#### 4 结语

在 LCH 颜色空间基础上，设计并生成不同空间频率正弦波图像，选取青年（18~25 岁）、中年（30~45

岁）、老年（50~70 岁）共 30 位观察者进行明度/彩度/色调角对比敏感度视觉观察实验，获得 3 个年龄段人眼明度/彩度/色调角对比敏感度数据。统计并分析数据，得出不同年龄段人眼明度、彩度、色调角对比敏感度有共性，也有差异，主要表现在：3 组年龄

段各色调角下对比敏感度变化趋势一致,都为先升高到最大值,再缓慢下降到零的共同规律;CS最大值集中在2~4周期/度;3组年龄段明度CS值较集中,差异不明显,且高于彩度、色调角CS值;3组年龄段彩度、色调角CS值差异较大,青年组CS值高于中老年组,中老年组对彩度和色调角变化差异的辨别能力差异不大;在不同的色调角下,彩度CS值存在差异,黄色(90°)的CS值显著低于其他色调;色调角CS值存在差异,红色(15°)和蓝绿色调(195°)的对比敏感度显著低于其他色调。

文中在前人研究的CSF模型基础上,构建了一种新的指数型CSF模型,并使用该函数模型对文中实验获取数据进行了拟合。3个年龄段明度/彩度/色调角CSF拟合度较高,效果较好。通过不同年龄段人眼视觉观察实验,获取对比敏感度与空间频率之间的函数关系,分析了不同年龄段人眼彩色视觉特性,并构建一种新的CSF模型,可用于实现人眼视觉系统的建模,用数学公式预测人眼对彩色图像质量的感知等方面,具有一定的基础研究价值。

#### 参考文献:

- [1] CAMPBELL F, ROBSON J. Application of Fourier Analysis to the Visibility of Gratings[J]. *Journal of Physiology*, 1968, 197: 551—556.
- [2] MANNOS J L, SKARISON D J. The Effects of a Visual Fidelity Criterion on the Encoding of Image[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1974, 20(4): 525—536.
- [3] DALY S J. Visible Differences Predictor: An Algorithm for the Assessment of Image Fidelity[C]// *Proceeding of the SPIE, Human Vision, Visual Processing, and Digital Display III*, 1992, 1666: 2—15.
- [4] NADENAU M. Integration of Human Color Vision Models into High Quality Image Compression[D]. Switzerland: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen de Nationalitéallemande, 2000.
- [5] ROSS J E, CLARKE D D, BRON A J. Effect of Age on Contrast Sensitivity Function: Uniocular and Binocular Findings[J]. *British Journal of Ophthalmology*, 1985, 69: 51—56.
- [6] BARTEN P G J. The SQRI Method: a New Method for the Evaluation of Visible Resolution on a Display[J]. *Proc Soc Inf Dispel*, 1987, 28: 253—262.
- [7] BARTEN P G J. Evaluation of Subjective Image Quality with the Square-root Integral Method[J]. *J Opt Soc Am A*, 1990, 7(10): 2024—2031.
- [8] MULLEN K T. The Contrast Sensitivity of Human Color Vision to Red-green and Blue-yellow Chromatic Gratings[J]. *J Physiol*, 1985, 359: 381—400.
- [9] ZHANG X M, WANDELL B A. A Spatial Extension to CIELAB for Digital Color Image Reproduction[C]// *Symposium Proceeding of Society for Information Display*, 1996.
- [10] ZHANG X M. Color Image Quality Metric S-CIELAB and Its Application to Halftone Texture Visibility[C]// *Symposium Proceedings of IEEE Compcon 97*, 1997.
- [11] WANDELL B A. Color Appearance and the Digital Imaging Pipeline[C]// *International Conference on Pattern Recognition*, 2000.
- [12] JOHNSOV G M. Measuring Images: Differences, Quality and Appearance[D]. Carlson Center for Imaging Science of the College of Science Rochester Institute of Technology, 2003.
- [13] 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研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.  
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, 2012.
- [14] 金杨, 刘真, 王鹏飞, 等. LCH 色空间视觉彩色频率响应特性研究[J]. *包装工程*, 2012, 33(21): 125—129.  
JIN Yang, LIU Zhen, WANG Peng-fei, et al. Research on Frequency Response Characteristic of Color Vision in LCH Color Space[J]. *Packaging Engineering*, 2012, 33(21): 125—129.
- [15] 金杨, 刘真, 王鹏飞. CIEL\*a\*b\* 色空间色调角对比敏感度函数研究[J]. *北京理工大学学报*, 2013, 33(8): 824—828.  
JIN Yang, LIU Zhen, WANG Peng-fei. Research on Contrast Sensitivity Function of Hue in CIE 1976L\*a\*b\* color space[J]. *Transaction of Beijing Institute of Technology*, 2013, 33(8): 824—828.
- [16] 王鹏飞, 金杨, 刘真. 图像颜色空间及其分量自相关研究[J]. *中国印刷包装研究*, 2011, 3(5): 34—39.  
WANG Peng-fei, JIN Yang, LIU Zhen. Study on Contrasts of Color Space and Their Auto-correlation of Image[J]. *China Printing and Packaging Study*, 2011, 3(5): 34—39.
- [17] 许向阳. 与视觉认知过程相关的图像色貌建模的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.  
XU Xiang-yang. A Research of Image Color Appearance Modeling Based on Cognition Processing of Human Vision[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [18] 许向阳, 陈广学. 基于多尺度叠加的视觉距离模糊算法的研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 334—338.  
XU Xiang-yang, CHEN Guang-xue. Research of Visual Distance Blur Algorithm Based on Multi-Scale Overlay[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 334—338.
- [19] 徐书欣, 葛洪央. 形态小波和对比敏感度函数结合的图像融合算法[J]. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 2017, 30(3): 449—453.  
XU Shu-xin, GE Hong-yang. MW and CSF-based Image Fusion Algorithm in Fault Diagnosis[J]. *Journal of Xinyang Normal University(Natural Science Edition)*,

- 2017, 30(3): 449—453.
- [20] 姚军财. 基于人眼对比敏感视觉特性的彩色图像盲水印算法[J]. 液晶与显示, 2017, 32(8): 642—649.  
YAO Jun-cai. Blind Watermarking Algorithm for Colour Image Based on Human Visual Contrast Sensitivity Characteristics[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2017, 32(8): 642—649.
- [21] 雷季东. 人眼对比度阈值测量系统光学设计及软件开发[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.  
LEI Ji-dong. Optical Design and Software Development of The Human Eye Contrast Threshold Measurement System[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [22] 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): 1—5.  
ZHANG Jian-yong, JIN Wei-qi, ZHOU Yan. The Color and Luminance Transfer Characteristic and Modeling of Human Visual System[J]. Journal of Applied Optics, 2003, 24(4): 1—5.
- [23] 于跃飞, 许旭萍, 周吉清. 基于 LAB 空间的 LCD 显示器 CSF 模型构建[J]. 包装工程, 2015, 36(1): 134—138.  
YU Yue-fei, XU Xu-ping, ZHOU Ji-qing. Construction of CSF Model for LCD Display Based on LAB Color Space[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(1): 134—138.
- [24] 汪哲弘, 徐海松. 基于视觉容差与色调角相关性的色差公式评价[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1838—1841.  
WANG Zhe-hong, XU Hai-song. Evaluation of Color Difference Formulae Based on the Correlation Between Visual Tolerances and Hueangles[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7): 1838—1841.
- [25] 宋明珠, 曲宏松, 金光. 含噪光学遥感图像海面弱小舰船目标检测[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 161—168.  
SONG Ming-zhu, QU Hong-song, JIN Guang. Weak Ship Target Detection of Noisy Optical Remote Sensing Image on Sea Surface[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 161—168.
- [26] 祁媛媛, 张丰菊. 人眼对比敏感度的相关影响因素及评价分析[J]. 眼视光学杂志, 2007, 9(5): 328—331.  
QI Yuan-yuan, ZHANG Feng-ju. Analysis of Influential Factor to the Contrast Sensitivity on Human Eyes[J]. Chinese Journal of Optometry & Ophthalmology, 2007, 9(5): 328—331.
- [27] BARTEN P G J. Contrast Sensitivity of the Human Eye and Its Effects on Image Quality[M]. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington USA, 1999.