

# 色貌模型在跨媒体图像复制中的应用研究

金洪勇

(天津现代职业技术学院, 天津 300352)

**摘要:** **目的** 研究 CIECAM02 和 iCAM 色貌模型颜色空间的均匀性, 以及应用于不同观察条件下的图像复制效果。**方法** 利用均匀颜色数据集测试色貌模型颜色空间的均匀性, 并通过视觉评价实验来测试 2 个色貌模型的图像复制效果。**结果** CIECAM02 的色貌空间具有更好的色差均匀性, iCAM 的色貌空间具有更好的色相、明度和彩度均匀性。在不同观察条件下的图像复制中, CIECAM02 有更好的表现。**结论** iCAM 的颜色空间适合于颜色色貌属性的计算, 而 CIECAM02 的颜色空间更适合于颜色色差的计算, 在不同观察条件下的图像复制中, CIECAM02 有更稳定的表现, 但并不是对所有图像都有更好的表现。**关键词:** 色貌模型; 颜色空间; 图像复制

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2018)23-0224-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.23.036

## Application of Color Appearance Model in Cross-media Image Reproduction

JIN Hong-yong

(Tianjin Modern Vocational Technology College, Tianjin 300352, China)

**ABSTRACT:** The work aims to investigate the uniformity of color space of CIECAM02 and iCAM and the effect of image reproduction applied in different viewing conditions. The uniform color data sets were used to test the color space uniformity of color appearance models, and the visual evaluation experiments were conducted to test the image reproduction effect of two color appearance models. The results showed that the color appearance space of CIECAM02 performed better in color difference, and the color appearance space of iCAM performed better in hue, lightness and chroma uniformity. CIECAM02 performed better in image reproduction under different viewing conditions. The color space of iCAM is suitable for calculating color appearance attributes, while the color space of CIECAM02 is more suitable for color difference calculation. In the image replication under different viewing conditions, CIECAM02 has a more stable performance, but it is not better for all the images.

**KEY WORDS:** color appearance model; color space; image reproduction

色貌模型是指能够对颜色的相关属性, 如明度、色相和彩度进行预测的数学模型<sup>[1]</sup>。具体来说就是指通过某一照明、背景以及观察环境等条件下的 CIE 色度参数(如三刺激值)进行颜色属性参数(如明度、彩度和色相)计算或预测的数学公式或数学模型<sup>[2]</sup>。它突破了传统 CIE 色度学系统必须在特定观察条件下进行计算的限制, 可用于解决不同媒体、不同背景和不同观察环境下的图像颜色真实再现问题。

在现代图像颜色复制过程中, 通常利用开放系统

中的色彩管理软件来建立不同设备颜色空间的颜色映射关系, 以实现不同设备间颜色传递的一致性。对于这种图像颜色复制方式, 如果复制图像与原稿的色度值相等, 而且观测条件与原稿一样, 那么它们在色貌上就能够匹配<sup>[3]</sup>。但值得注意的是, 复制品、原稿和中间图像很少是在一致的观测条件下观察的, 当观察条件不同时, 即使样品色和复制色三刺激值相等, 但它们的视觉感知效果也是不同的<sup>[4]</sup>, 这就需要将色貌模型引入到颜色复制系统中, 描述图像复制每一阶

收稿日期: 2018-04-25

基金项目: “十三五”天津市高等职业教育教学改革研究项目(津教委专函【2018】9号-16)

作者简介: 金洪勇(1979—), 男, 天津现代职业技术学院副教授, 主要研究方向为色彩管理与色貌模型。

段的色貌，以准确复制颜色外貌属性为目标，保证不同观察条件下的样品色和复制色视觉感知效果的一致性<sup>[5]</sup>。该要求所采用的色貌模型必须具有一个能够准确计算颜色外貌属性值的均匀颜色空间和一个能够描述光源变化的色适应变换。文中采用多个标准颜色数据集对目前应用比较广泛的 CIECAM02 和 iCAM 色貌模型的色貌空间进行测试评价，并将 2 个色貌模型应用到不同观察条件下的图像颜色复制中，通过心理物理实验来评价它们在颜色复制中的应用效果。

## 1 实验方法

### 1.1 色貌模型颜色空间的均匀性测试

颜色空间的均匀性包含色相、明度、彩度和色差均匀性<sup>[6]</sup>。对于一个均匀颜色空间来说，在其空间中的任何部位，相等的明度差别对应相等的视觉明度差，同样的距离差应该对应相等的视觉差别<sup>[7]</sup>。在色品图上，同一色相的颜色应该在同一条直线上，同一彩度的颜色应该在同一圆上，而且彩度差别相等的颜色应该分布在半径等距递增的同心圆上<sup>[8-9]</sup>。

2 个色貌模型颜色空间明度标尺的均匀性可以采用 Munsell 颜色系统 (Munsell Color System) 的 9 级明度标尺来测试，Munsell 系统明度轴上的 9 个等级经过视觉实验证明被认为是视觉上等距的，根据孟塞尔明度与色貌模型颜色空间明度值之间的线性关系来判断，两者的线性关系越接近说明色貌模型颜色空间的明度均匀性越好<sup>[10]</sup>。

检测 2 个色貌模型颜色空间色相的均匀性，只需检测恒定色相的颜色在色貌模型颜色空间色品图上的分布是否在一条直线上<sup>[11-12]</sup>。这里选择了 Ebner 和 Fairchild 的均匀色相数据集。Ebner 和 Fairchild 的恒定色相数据集包含 15 个色相，每组恒定色相的颜色具有很好的视觉色相均匀性，每组恒定色相有 20 多个颜色，共 321 个样品颜色。

对于色貌模型颜色空间彩度均匀性的检测，则包括 2 个方面：相同彩度的颜色分布是否构成一个圆和彩度圆的间距是否均匀<sup>[13]</sup>。这里采用 Munsell 表色系数据集来检测 2 个色貌空间彩度的均匀性，选择了 Munsell 图册中明度值为 5 的所有颜色，共 390 个颜色，来评价色貌空间彩度的均匀性。

检测 2 个色貌模型颜色空间的色差均匀性采用 MacAdam 色分辨椭圆数据集来检测，在颜色空间里面，色分辨椭圆的形状越接近圆形，大小彼此越接近相等，该颜色空间就越均匀<sup>[14-15]</sup>。MacAdam 色分辨椭圆数据集是 MacAdam 在视觉实验的基础上得到的，他在 CIE 色品图的不同位置选择了 25 个颜色点，来确定人的视觉对于不同颜色的辨别差异，因而该色

分辨椭圆数据集包含 25 个颜色中心，每个颜色中心有 100 个颜色，共 2500 个颜色<sup>[16]</sup>。

用于颜色空间均匀性检测的所有数据集都需要利用色貌模型转换到色貌模型的颜色空间，由于不同的颜色数据集是在不同的观察条件下得到的，因此，在将颜色数据集转换到色貌模型颜色空间中计算色度坐标值时，环境条件及一些输入数据的选取要符合各数据集的实验条件。计算各颜色数据集在 CIECAM02 颜色空间坐标值的环境条件参数输入值见表 1，其中  $L_A$  为适应区域的照度， $Y_b$  为背景参数， $c$  为环境影响参数， $N_c$  为色诱导因子， $F$  为明度对比因子。iCAM 色貌模型的 IPT 颜色空间的输入值要求必须是 D65 光源下的 XYZ 值，因此，在将 4 个颜色数据集转换到 IPT 颜色空间时，需要先将 Munsell 和 MacAdam 这 2 个颜色数据集中的颜色三刺激值通过色适应变换转换为 D65 光源下的 XYZ 值，这里采用 CAT02 色适应模型通过式 (1) 来实现这个转换。

$$\begin{bmatrix} X_{D65} \\ Y_{D65} \\ Z_{D65} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.7328 & 0.4296 & -0.1624 \\ -0.7036 & 1.6975 & 0.0061 \\ 0.0030 & 0.0136 & 0.9834 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} R_{W2} & 0 & 0 \\ 0 & G_{W2} & 0 \\ 0 & 0 & B_{W2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/R_{W1} & 0 & 0 \\ 0 & 1/G_{W1} & 0 \\ 0 & 0 & 1/B_{W1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.7328 & 0.4296 & -0.1624 \\ -0.7036 & 1.6975 & 0.0061 \\ 0.0030 & 0.0136 & 0.9834 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： $X_C, Y_C, Z_C$  为 C 光源下的颜色数据集中颜色的三刺激值； $X_{D65}, Y_{D65}, Z_{D65}$  为颜色数据集中颜色转换到 D65 光源下的三刺激值； $R_{W1}, G_{W1}, B_{W1}$  和  $R_{W2}, G_{W2}, B_{W2}$  分别为 C 光源和 D65 光源下白点的锥体响应值。

表 1 计算色貌坐标值的观测条件参数  
Tab.1 Viewing condition parameters for calculating the coordinate value of color appearance

数据集	白点	$L_A$	$Y_b$	$c$	$N_c$	$F$
Ebner 和 Fairchild	D65	14.2	35	0.525	0.8	0.9
OSA	D65	64	20	0.69	1	1
Munsell	C	64	20	0.69	1	1
MacAdam	C	24	20	0.69	1	1

### 1.2 色貌模型应用于跨媒体图像复制效果测试

为了检测 CIECAM02 和 iCAM 在不同观察条件下的图像复制效果，选取了 5 种颜色和不同的具有代表性的 ISO 标准彩色数字图像作为测试图像，见图 1。先利用 157 g 晨鸣铜版纸在经过特性化的富士施乐 color 800i 数码印刷机上输出测试图像，输出图像大小为 8 cm×10 cm，然后采用经过特性化的扫描仪（扫描平均色差为 1.9）将输出图像数字化，并转

换为 XYZ 图像，然后分别用 2 个色貌模型的变换公式进行不同观察条件的色适应变换，适应后的 XYZ 三刺激值再经过色貌模型的逆变换到经过特性化的显示器上进行显示，显示器的色温选择 D50, D65, D90 3 种，3 种色温条件下显示器特性化后的显示平均色差均小于 1.5，人眼基本上分辨不出来颜色差异，采用心理物理实验，让观察者通过视觉评价来检测 2 个色貌模型的图像复制效果，色貌模型应用于不同观察条件下的图像复制过程见图 2。实验条件如下所述。

主要仪器：富士施乐 color 800i，艺卓 EIZO-CG211LCD 显示器，华利 CPC-8 标准灯箱，中晶 Phantom 9900xl 扫描仪，Eye-One。

观察者：20 名受过色彩学基本教育、视觉正常的大学生。

观察距离：30 cm。

适应时间：色适应时间至少 1 min。

图像记忆时间：90 s。

观察条件 标准灯箱和显示器的色温设定见表 2。



图 1 标准测试图像  
Fig.1 Standard test images

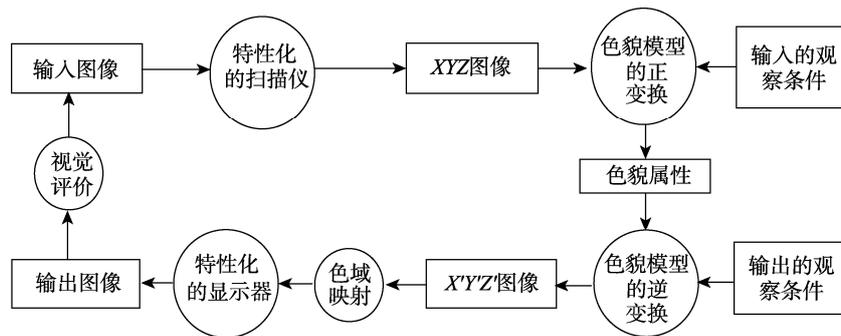


图 2 色貌模型应用于不同观察条件下的图像复制  
Fig.2 Color appearance model applied to image reproduction under different viewing conditions

表 2 标准灯箱与显示器白点和亮度值  
Tab.2 White point and brightness value of standard light box and display

仪器	光源	$X_w$	$Y_w$	$Z_w$	亮度	背景亮度
标准灯箱	D50	96.42	100	82.51	92.64	24.14
	D50	96.38	100.00	82.41	92.03	20
显示器色温	D65	95.02	100.00	108.75	97.24	20
	D90	95.19	100.00	138.68	70.12	20

视觉评价方法见图 3，原始图像置于标准灯箱中，照明光源为 D50，右边显示器显示应用 2 种色貌模型转换后的图像，观察者先对标准灯箱的白点进行色适应，并对灯箱里的图像进行颜色的记忆，等观察者能够记忆下灯箱内的图像颜色后，再对右边显示器的白点进行色适应，等适应白点后，便根据记忆中灯箱内图像的颜色，对右边显示器上的 2 幅图像进行比较，判断哪一幅与灯箱内的图像最接近，并对 2 幅图像与灯箱内图像的接近程度按给定的评分标准进行打分，评分标准见表 3。



图 3 视觉评价  
Fig.3 Visual evaluation

表 3 视觉评价尺度  
Tab.3 Visual evaluation scale

评定等级	1	2	3	4	5
相似程度	完全相似	相似	可接受	尚可接受	不可接受

## 2 实验结果与分析

### 2.1 色貌空间均匀性测试结果与分析

#### 2.1.1 明度标尺均匀性

将孟塞尔 9 级明度值转换到 CIECAM02 和 iCAM

2 个色貌空间的明度坐标轴上，并分别将它们与 Munsell 明度值作线性回归，分别得出 2 个色貌空间明度坐标值与孟塞尔明度值的关系式：

$$J=9.0636 \times V \quad (2)$$

$$I=10.1038 \times V \quad (3)$$

其中 IPT 空间的  $I$  值被放大了 100 倍，以便与  $J$  值比较，计算出的 2 个色貌空间明度标尺的均方根误差见表 4。

表 4 2 个颜色空间明度标尺的均方根误差  
Tab.4 Root mean square error of two color spatial brightness scales

明度标尺	$K$	均方根误差
$J$	9.0636	3.7313
$I$	10.1038	1.9141

$J$  明度坐标和  $I$  明度坐标与 Munsell 明度值的关系见图 4。

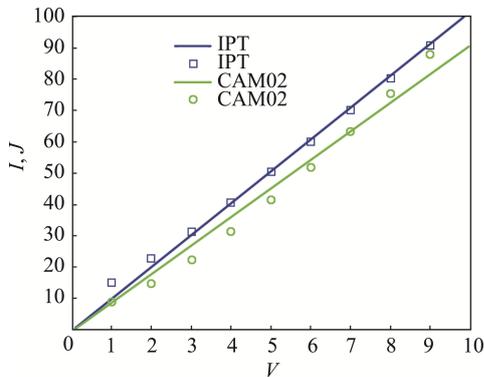


图 4  $J$  和  $I$  与 Munsell 明度值  $V$  的关系

Fig.4 Relationship between two lightness scales ( $J$  and  $I$ ) and Munsell brightness  $V$

从表 4 的均方根误差数据和图 4 拟合的直线可以看出，对于 Munsell 颜色体系 9 级明度等级来说，IPT 颜色空间的明度标尺的均匀性明显优于 CIECAM02 颜色空间明度标尺的均匀性。

### 2.1.2 色相均匀性

利用颜色空间转换公式分别将 Ebner 和 Fairchild 均匀颜色数据集转换到 2 个色貌空间中，并作出这 2 个数据集在各色貌空间的色度分布图，为了便于比较，分别将 IPT 空间的  $p$  和  $t$  值乘以 150，Ebner 和 Fairchild 均匀颜色数据集中各颜色在 CIECAM02 和 IPT 颜色空间中的色度分布见图 5—6。

为了更加准确地分析 2 个颜色空间的色相均匀性，分别统计恒定色相数据集中各恒定色相的平均色相偏差值和最大色相偏差值，见图 7—8。

从恒定色相数据集中颜色在 2 个颜色空间的分布以及统计的平均色相角偏差、最大色相角偏差结果可以看出：在 IPT 颜色空间中，数据集中相同色相的

颜色在色度图中的排列非常接近直线，各色相角上颜色的平均色相偏差和最大色相偏差均比较小。CIECAM02 的  $Jab$  颜色空间中，恒定颜色数据集在有些色相角上相同色相的颜色偏离于直线，统计得到的平均色相角偏差和最大色相角偏差要比 IPT 颜色空间大，因此，IPT 颜色空间的色相均匀性要优于 CIECAM02。

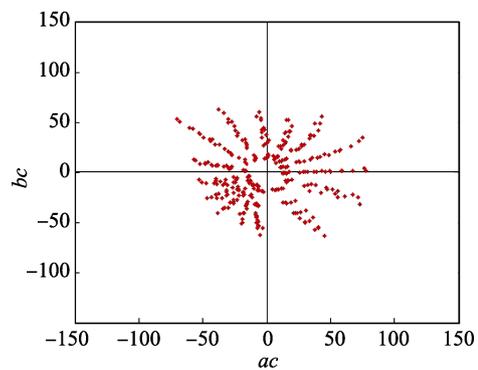


图 5 Ebner 和 Fairchild 恒定色相数据在 CIECAM02 颜色空间的分布

Fig.5 Distribution of Ebner and Fairchild constant hue data in CIECAM02 color space

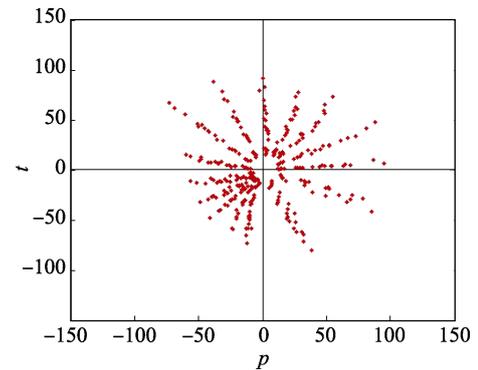


图 6 Ebner 和 Fairchild 恒定色相数据在 IPT 颜色空间的分布

Fig.6 Distribution of Ebner and Fairchild constant hue data in IPT color space

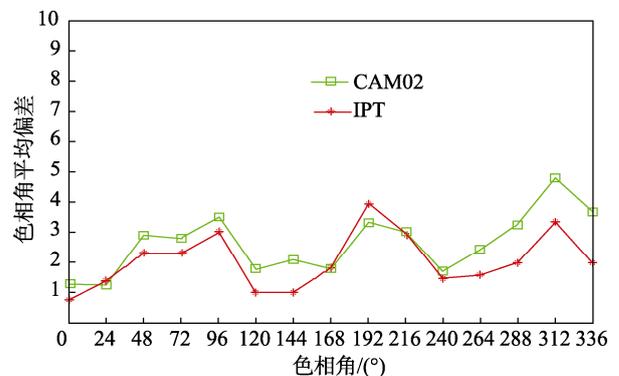


图 7 CIECAM02 和 IPT 颜色空间的平均色相角偏差  
Fig.7 Average hue angle deviation of CIECAM02 and IPT color spaces

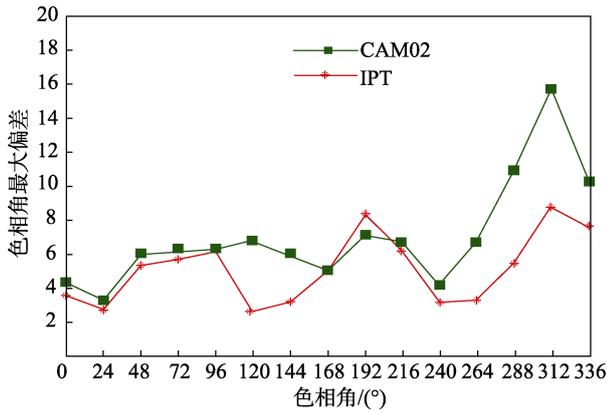


图8 CIECAM02 和 IPT 颜色空间的最大色相偏差  
Fig.8 Maximum hue deviation in the color space of CIECAM02 and IPT

### 2.1.3 彩度均匀性

将 Munsell 颜色系统中明度值为 5 彩度均匀分布的颜色数据分别转换到 2 个颜色空间后得出图 9,10 这 2 个色品图,其中 IPT 颜色空间中  $p$  和  $t$  值放大了 150 倍。

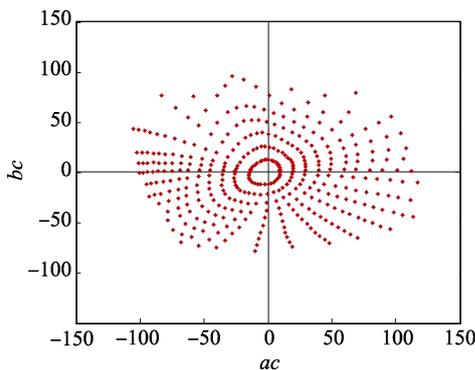


图9 Munsell 颜色数据在 CIECAM02 颜色空间的分布  
Fig.9 Distribution of Munsell color data in CIECAM02 color space

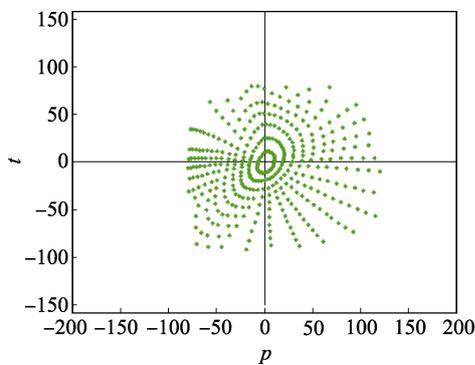


图10 Munsell 颜色数据在 IPT 颜色空间的分布  
Fig.10 Distribution of Munsell color data in IPT color space

从 Munsell 颜色数据在 2 个颜色空间的分布图可以看出: CIECAM02 颜色空间的彩度圆圈接近圆形,

但在彩度较大的蓝色和绿色区域,等彩度差颜色构成的圆圈的间距不太均匀,且低彩度圆圈增大过快,圆圈的大小明显比 IPT 颜色空间里的大。在 IPT 颜色空间里,相同彩度的颜色构成的圆圈在横向上比较扁,且在绿色部分的间距比较小,但综合起来其彩度均匀性略优于 CIECAM02 颜色空间。

### 2.1.4 色差均匀性

将 MacAdam 色分辨椭圆数据转换到 2 个颜色空间中,为了方便比较, IPT 颜色空间的  $p$  和  $t$  值均被放大了 150 倍。转换后色分辨椭圆拟合结果见图 11—12。

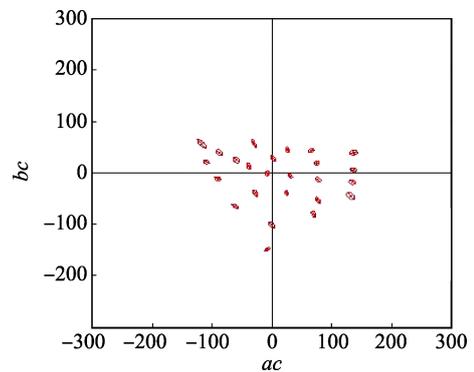


图11 McAdam 色分辨椭圆在 CIECAM02 颜色空间里的分布  
Fig.11 Distribution of McAdam chromatic resolution ellipse in CIECAM02 color space

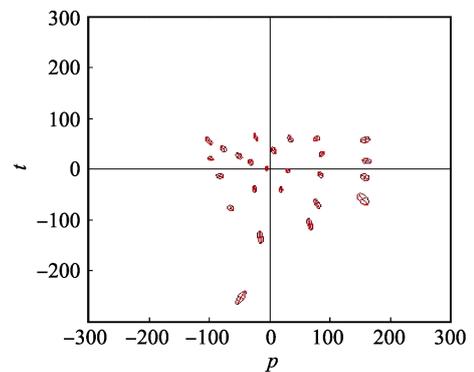


图12 McAdam 色分辨椭圆在 IPT 颜色空间里的分布  
Fig.12 Distribution of McAdam chromatic resolution ellipse in IPT color space

在 CIECAM02 颜色空间的色平面中,椭圆近似成圆形,椭圆大小分布比较均匀,随着彩度的增加,椭圆大小有增大的趋势,但颜色空间的整体均匀性比较好。在 IPT 颜色空间的色平面里面,椭圆也近似成圆形,在低彩度区域,椭圆大小分布比较均匀,当彩度增大时,尤其在高彩度的红色和蓝色区域,椭圆比较大,因此,相对来说 CIECAM02 颜色空间的色差均匀性要优于 IPT 颜色空间。

### 2.2 图像复制效果测试结果与分析

通过视觉评价实验,测试了当标准灯箱照明光源为 D50,显示器色温分别为 D50, D65 和 D90 时,CIECAM02 和 iCAM 2 种色貌模型应用于不同观察条件下的图像复制效果,视觉评价结果见图 13—15。

可以看出,原稿置于以 D50 为参考光源的标准灯箱下,经色貌模型转换至不同色温条件下的显示器显示,CIECAM02 与 iCAM 2 种色貌模型的图像复制效果均在“可接受”和“恰可接受”之间,都能被观察者接受,除了“家具”图像外,CIECAM02 的图像复制效果均优于 iCAM。

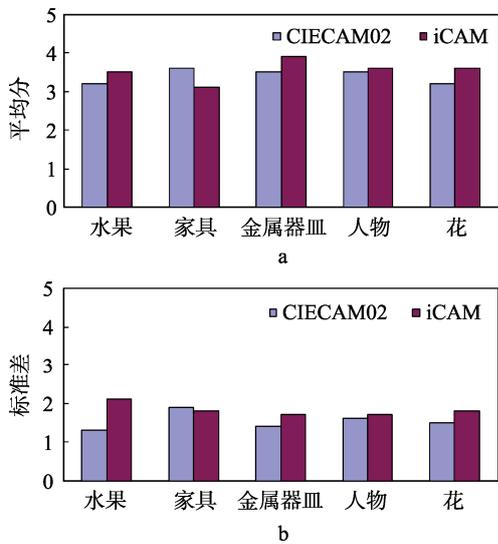


图 13 D50-D50 观察条件下 2 个色貌模型的图像复制测试结果

Fig.13 Image reproduction test results of two color appearance models under D50-D50 viewing condition

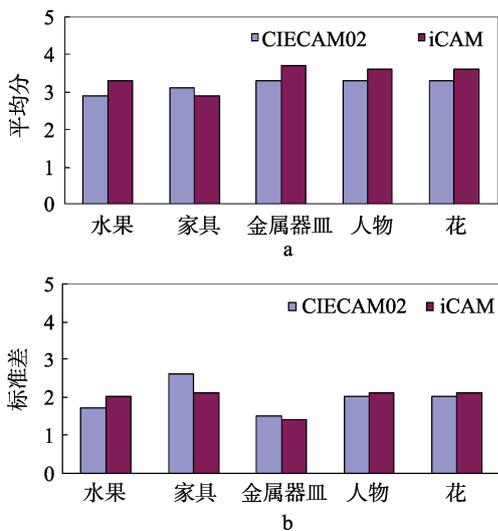


图 14 D50-D65 观察条件下 2 个色貌模型的图像复制测试结果

Fig.14 Image reproduction test results of two color appearance models under D50-D65 viewing condition

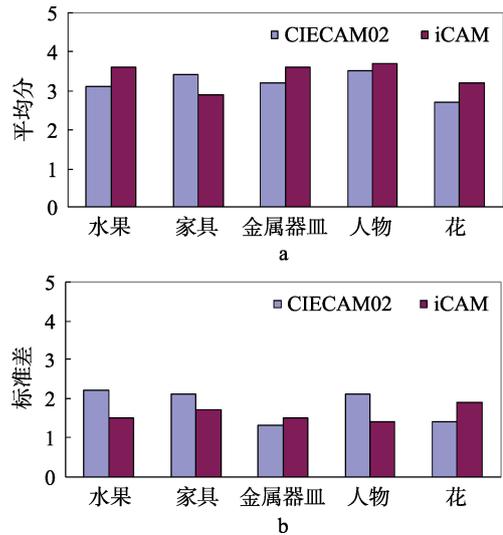


图 15 D50-D90 观察条件下 2 个色貌模型的图像复制测试结果

Fig.15 Image reproduction test results of two color appearance models under D50-D90 viewing condition

### 3 结语

通过均匀颜色数据集对 CIECAM02 和 iCAM 2 个色貌模型颜色空间的均匀性进行测试,在明度、色相和彩度均匀性方面,iCAM 的 IPT 颜色空间要优于 CIECAM02 色貌空间,但在色差均匀性方面,CIECAM02 的颜色空间要优于 iCAM 的 IPT 颜色空间,因此,iCAM 的 IPT 颜色空间更适合用于计算颜色的色貌属性,而 CIECAM02 的颜色空间更适合用于计算颜色的色差。将 CIECAM02 和 iCAM 2 个色貌模型应用于不同观察条件下的图像复制,经由 5 种不同类型图像的测试后,2 种色貌模型的图像复制效果均能被观察者接受,而 CIECAM02 有更稳定的表现,但不是对于所有的图像都有更好的表现。

#### 参考文献:

- [1] SHARMA A. Understanding Color Management[M]. New York: Thomson, 2004.
- [2] 徐向阳. 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.
- [3] RICH D C. Publication CIE 159: A Color Appearance Model for Color Management Systems: CIECAM02[J]. Color Research and Application, 2010, 31(2): 158.
- [4] FAIRCHILD M D, JOHNSON G M. Color Appearance Reproduction: Visual Data and Predictive Modeling[J]. Color Research and Application, 2015, 24(2):

- 121—131.
- [5] 全清芬. 基于 iCAM 框架的彩色数字图像色差评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.  
TONG Qing-fen. Study of Color Difference Evaluation for Color Digital Images Based on iCAM Framework[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [6] MICHAEL H. Definition of Chromaticity Coordinates[J]. Color Research and Application, 2014(3): 317—318.
- [7] 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.
- [8] IKEDA K, OBARA K. Linear Uniform Color Space Composed of Simple Transformation of Tristimulus Values X, Y and Z[J]. J Light & Vis Env, 2001, 25(1): 49—59.
- [9] 王东, 周世生. OSA-UCS 模型在色空间检测中的应用[J]. 武汉大学学报, 2008, 54(3): 321—324.  
WANG Dong, ZHOU Shi-sheng. Application of OSA UCS Model in Color Space Detection[J]. Journal of Wuhan University, 2008, 54(3): 321—324.
- [10] WYBLE D R, FAIRCHILD M D. Prediction of Munsell Appearance Scales Using Various Color Appearance Models[J]. Color Research and Application, 2000, 25: 132—144.
- [11] 刘真, 孟凡亚, 谢娴婷. CIECAM02 色貌模型的视觉均匀性分析与模型优化[J]. 影像科学与光化学, 2009, 27(2): 128—134.  
LIU Zhen, MENG Fan-ya, XIE Xian-ting. Visual-Uniformity Analysis of CIECAM02 Color Appearance Model Optimization[J]. Imaging Science And Photochemistry, 2009, 27(2): 128—134.
- [12] EBNER F, FAIRCHILD M D. Development and Testing of a Color Space (IPT) with Improved Hue Uniformity[C]// Proceedings of the 6th Color Imaging Conference, New York: SPIE Press, 1998: 8—13.
- [13] LUO M R, CUI G, LI C. Uniform Color Spaces Based on CIECAM02 Color Appearance Model[J]. Color Research and Application, 2006, 31: 320—330.
- [14] MACADAM D L. Uniform Color Scales[J]. J Opt Soc Am, 1978, 64: 1691—1702.
- [15] 郑元林. CIE1976 色差公式的均匀性研究[J]. 包装工程, 2005, 26(2): 48—49.  
ZHENG Yuan-lin. Research on Uniformity of CIE1976LAB Color Difference Formula[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(2): 48—49.
- [16] LUO M R, RIGG B. Chromaticity-Discrimination Ellipses for Surface Color[J]. Color Research and Application, 1986, 11(1): 24—42.