

# 基于 iCAM 的印刷品在线颜色复制质量的检测与评价

樊丽娜<sup>1</sup>, 周世生<sup>2</sup>

(1. 义乌工商职业技术学院, 义乌 322000; 2. 西安理工大学, 西安 710048)

**摘要:** **目的** 为了提高印刷品在线检测中颜色复制质量评价的准确性, 构建基于 iCAM 图貌模型的印刷品在线检测色差计算模型。**方法** 将印刷品在线检测系统中 CCD 相机拍摄的待检测样张按照墨区进行分区, 基于 iCAM 图貌模型和 IPT 均匀颜色空间建立在线色差检测模型, 并计算样张各个墨区的色差; 设计视觉心理学实验评价样张各墨区颜色的复制质量; 采用 STRESS 值评价基于 iCAM 的色差检测模型计算出的色差与视觉感受色差的一致性, 并与基于 CIELAB 的色差进行比较, 验证该模型的在线色差检测精度。**结果** 基于 iCAM 的色差模型计算结果具有较高的视觉一致性, 更符合视觉评价结果, 且与传统色差模型相比, 具有更高的在线色差检测精度。**结论** 基于 iCAM 的印刷品在线检测色差计算模型考虑了人眼视觉的空间特性及色适应, 适用于复杂观察条件, 能提高印刷品在线检测中的色差检测精度, 可用于实际生产中印刷品在线颜色复制质量的检测与评价。

**关键词:** iCAM; 在线检测; 颜色复制; 色差; 视觉评价

**中图分类号:** TS801.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)01-0196-06

## Online Detection and Evaluation of Print Color Reproduction Quality Based on iCAM

FAN Li-na<sup>1</sup>, ZHOU Shi-sheng<sup>2</sup>

(1. Yiwu Industrial & Commercial College, Yiwu 322000, China; 2. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve the accuracy of color reproduction quality assessment in online detection, and construct color difference calculation model of online print detection based on iCAM model. The images of printing samples obtained by CCD camera in the online detection system were divided according to the ink zones. Online color difference detection model was established based on iCAM model and IPT uniform color space, and then the color difference of every ink zone was calculated. Visual psychophysical experiment was designed to evaluate the color reproduction quality of every ink zone. STRESS value was used to evaluate the consistency between the color difference calculated by iCAM color difference detection model and the visual perception color difference. The color difference was also compared with the one calculated by CIELAB model, in order to verify the online color difference prediction accuracy of the model based on iCAM. The color difference model calculations based on iCAM had higher visual consistency, more in line with the visual evaluation results, and it had higher accuracy of online color difference detection compared with the traditional color difference model. Online detection color difference calculation model based on iCAM takes into account the spatial characteristics of human vision and chromatic adaptation, suited for complex observation conditions. It can improve the accuracy of online color difference detection; therefore, it can be used for online detection and evaluation of print color reproduction quality in actual printing production.

**KEY WORDS:** iCAM; online detection; color reproduction; color difference; visual evaluation

印刷品质量检测内容主要包括<sup>[1]</sup>套准、色差、印刷品缺陷<sup>[2]</sup>3个方面。颜色还原是印刷品复制的根本, 色差检测是保证印刷品颜色复制质量的重要途径。大

多数印刷企业对颜色复制的检测, 依然是依靠工人师傅抽取样张, 凭经验目测检查, 或借助仪器测量印张边缘测控条进行检测, 这些离线检测方式效率低、不

收稿日期: 2017-08-08

基金项目: 浙江省教育厅科研项目 (Y201636873); 浙江省社科联研究课题项目 (2015N075)

作者简介: 樊丽娜 (1984—), 女, 硕士, 义乌工商职业技术学院讲师, 主要研究方向为颜色信息处理、数字印刷技术。

稳定、损耗大,无法满足高速高精度印刷生产的需求。为满足现代化印刷生产的需要和人们对印刷品日益增长的感官要求,近年来众多的学者、机构致力于研究开发印刷质量在线检测。国际先进的印刷设备生产商率先研制出了印刷质量在线检测系统<sup>[3]</sup>,并用于实际生产中,如德国海德堡公司的CPC系统,基于分光光度测量,实现油墨预置、遥控给墨、遥控套准、监控印刷品质量。三菱重工的彩色控制系统CCS采用分光光度计,测量印刷品上特殊的色彩条,将颜色控制情况显示在智能印刷检测器上。曼罗兰公司采用密度测定法测量测控条,来监测和控制印刷质量。国内对印刷质量在线检测的研究,主要集中在基于机器视觉搭建检测系统硬件平台,开发在线检测软件系统对印刷品质量进行判断。李文育<sup>[4]</sup>将印刷品颜色检测分为粗检和细检,粗检在RGB颜色空间进行,细检时将颜色转换到CIELab颜色空间计算颜色色差。范鹏飞<sup>[5]</sup>提出了采用基于HSV颜色空间色差检测和基于CIEL\*a\*b\*颜色空间色差检测算法相结合的方法,对印刷品色差进行在线检测。王文举<sup>[6]</sup>提出将CMOS工业相机采集到的RGB模式图像转换到CIEL\*u\*v\*,在此空间进行色彩不均、墨迹沾染等印刷质量缺陷检测。

研究表明,传统的色差公式<sup>[7]</sup>如CIELAB, CIEDE 2000, CIELUV以及基于色貌模型CIECAM02<sup>[8]</sup>的色差公式,都是基于单一均匀色块建立的,可以较好地预测简单观察环境下均匀大色样对之间的色差,而印刷品不再是均匀的色块,它是四色网点组成的半色调图像,工业相机扫描后转换为由大量不同颜色的像素点组成的彩色数字图像,人眼在观察图像时其视觉感受会受到邻近色的影响,因此,采用传统色差公式计算在线检测图像色差不太符合人眼实际视觉感受。Fairchild和Johnson提出了图像色貌模型iCAM<sup>[9]</sup>,该模型对图像进行低通滤波处理和色适应变换,考虑了像素点之间的相互影响及人眼视觉的空间特性,可用于预测色貌和计算图像色差<sup>[10]</sup>。文中基于iCAM图貌模型,构建印刷品在线色差检测模型,并采用视觉心理学实验验证该模型的精度。

## 1 基于 iCAM 的印刷品在线色差检测模型构建

### 1.1 印刷品在线检测系统搭建

文中设计并搭建了基于机器视觉的印刷品在线检测系统,该系统由光源、线阵CCD相机、镜头、图像采集卡、旋转编码器等组成,见图1。鉴于印刷企业业务繁忙,且实验成本较高,文中在模拟印刷实验平台上进行检测实验。模拟印刷实验平台采用圆柱形滚筒模拟压印滚筒,将待检测样张贴在模拟滚筒

上,电机带动滚筒旋转,模拟实际生产中印刷品的连续供给,线阵CCD相机扫描印刷品,由旋转编码器控制滚筒与相机采集的同步工作,采集到的图像通过图像采集卡传输到计算机,通过开发的在线检测系统软件程序实现印刷品颜色复制质量的检测与结果输出。其中滚筒的转速可根据实际需要由旋转编码器设置,文中将滚筒的转速设定为200~300 r/min,基本可以模拟实际印刷中检测速度需求。

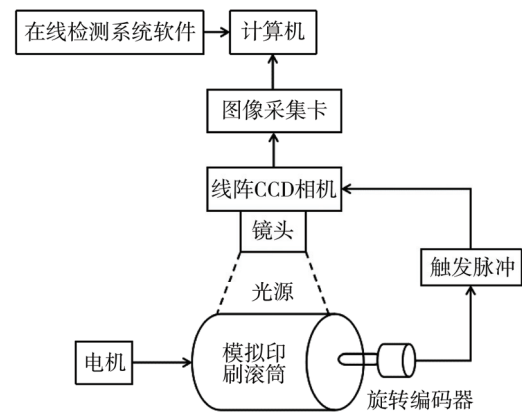


图1 在线检测系统组成及原理

Fig.1 Constitution and principle of the online detection system

### 1.2 实验样张准备

实验所用样张采用四色海德堡胶印机印刷,样张大小对开,对应印刷机上20个墨区。从装版开机至动态调整印刷机到印品质量与标准样一致过程中,匀速抽取印刷样张,每印刷15张抽取一张,共抽取26张,从中选出相互间有明显颜色变化的15张作为待检测样张,从1到15进行编号。

选用客户签字确认的样张作为标准样张,同时,考虑到合格样张间存在的误差,故选择多张合格样张进行在线采集、配准,采用统计平均的方法制作标准模板。

### 1.3 基于 iCAM 计算在线检测印刷品色差

1) 将CCD采集到的RGB模式图像转化到与设备无关的CIE-XYZ空间。

2) 对XYZ模式的原始图像进行低通滤波,去除噪声,保留人眼比较敏感的低频部分,获得iCAM的适应图像参数 $L_A$ ,  $F$ 等。按照人眼的视觉特性,文中选用高斯低通滤波器进行滤波。

3) 色适应变换。将XYZ模式的原始图像和低通滤波后的图像均转换到人眼视觉系统的锥响应空间RGB,即:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = M_{CAT02} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} R_w \\ G_w \\ B_w \end{bmatrix} = M_{CAT02} \begin{bmatrix} X_{low} \\ Y_{low} \\ Z_{low} \end{bmatrix} \quad (2)$$

计算色适应后的锥响应值为:

$$\begin{cases} R_C = \left( \frac{100D}{R_W} + 1 - D \right) R \\ G_C = \left( \frac{100D}{G_W} + 1 - D \right) G \\ B_C = \left( \frac{100D}{B_W} + 1 - D \right) B \end{cases} \quad (3)$$

其中,适应因子 $D$ 由式(4)计算得到<sup>[10]</sup>:

$$D = F \left[ 1 - \left( \frac{1}{3.6} \right) \exp \left( \frac{-L_A - 42}{92} \right) \right] \quad (4)$$

4) 色适应后的锥响应 $R_C G_C B_C$ 变换到IPT均匀颜色空间。

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4002 & 0.7075 & -0.0807 \\ -0.2280 & 1.1500 & 0.0612 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.9184 \end{bmatrix} (M_{CAT02}^{-1}) \begin{bmatrix} R_C \\ G_C \\ B_C \end{bmatrix} \quad (5)$$

采用亮度因子 $F_L$ 调节变换中的非线性。

$$F_L = 0.25k^4(5L_A) + 0.1(1-k^4)^2(5L_A)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

$$k = 1 / (5L_A + 1) \quad (7)$$

$$\begin{cases} L' = L^{0.43F_L} & L \geq 0 \\ L' = -|L|^{0.43F_L} & L < 0 \\ M' = M^{0.43F_L} & M \geq 0 \\ M' = -|M|^{0.43F_L} & M < 0 \\ S' = S^{0.43F_L} & S \geq 0 \\ S' = -|S|^{0.43F_L} & S < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} I \\ P \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4000 & 0.4000 & 0.2000 \\ 4.4550 & -4.8510 & 0.3960 \\ 0.0000 & 0.3572 & -1.1628 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L' \\ M' \\ S' \end{bmatrix} \quad (9)$$

5) 计算色差。实际印刷中,每个墨区图案不同,开机前机台师傅根据图案的颜色凭经验设置各墨区青品黄黑的初始墨量,因此,开机至印张达到OK样过程中,以及后续印刷过程中,各个墨区的色差并不相同,不能将整个画面的色差平均值作为各墨区墨量调整的依据,因此,文中在检测色差时,将样张按照墨区进行分区计算色差。同时,为降低计算量,提高检测效率,在各墨区二维平面中采用随机函数,选择20个点通过步骤3),4),计算其相应的IPT值,与标准样张上相对应的点根据式(10)计算各取样点色差,并求平均值,将此平均值作为各墨区的色差值。待检测样张上各墨区的色差值为:

$$\Delta E_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ (100I_{\text{样}i} - 100I_{\text{标}i})^2 + (150P_{\text{样}i} - 150P_{\text{标}i})^2 + (150T_{\text{样}i} - 150T_{\text{标}i})^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

式中: $N$ 为取样点数; $I_{\text{样}i}, P_{\text{样}i}, T_{\text{样}i}$ 为待检测样张第*i*个取样点的 $I, P, T$ 值; $I_{\text{标}i}, P_{\text{标}i}, T_{\text{标}i}$ 为标准样张第*i*个取样点的 $I, P, T$ 值。虽然IPT色空间与CIELAB色空间的色彩属性值相同,但量化范围不同, IPT色空间的

取值范围为<sup>[11]</sup>:  $I$ 为(0~1),  $P$ 与 $T$ 为(-1~1), 为了将基于IPT颜色空间的色差值与基于CIELAB空间的色差单位相对应,式(10)计算色差时,分别将 $I \times 100, P \times 150, T \times 150$ 。同时,计算每个墨区20个取样点色差分量 $\Delta I_{\text{样}i}, \Delta P_{\text{样}i}, \Delta T_{\text{样}i}$ 的平均值,结合 $\Delta E_m$ 值将其作为判断每个墨区青、品、黄、黑墨量调节的依据。

## 2 基于视觉心理学实验评价印刷品颜色复制质量

印刷品到达客户乃至最终的用户手中,评价印刷品颜色复制质量的最终依据是人眼的视觉感知,所以检验在线色差检测模型的优劣的方法是进行视觉心理学<sup>[12]</sup>评价实验,依据视觉实验的评价结果与模型计算结果是否一致来判断该模型是否符合人眼视觉感知。

### 2.1 实验方法

为提高视觉评价的准确性,实验挑选的观察者均为印刷企业中有一定年限工作经验的,日常工作涉及印刷质量评价的员工。实验挑选了6名平均年龄为32岁颜色视觉正常的观察者,其中4名为在印刷机台工作3年以上的男性,2名为在QC岗位工作2年以上的女性。将标准样张和待评价样张同时放在标准印刷看样台上(看样台使用D65标准光源灯管,显色指数 $\geq 95$ ,看样台周围墙壁和地板呈中灰色),观察者站立于看样台前,视线与看样台面呈 $45^\circ$ 角,通过移动样张位置配合不同墨区颜色的对比观察,每个观察者依次对15张样张分墨区进行色差评价,每评价3张,休息1 min。实验共重复2次,第2次隔2天后进行。实验采用类别判定法和量值估计法<sup>[13]</sup>,将样张间视觉感受色差分为6类(见表1),观察者将待检测样张各个墨区与标样对比产生的颜色视觉感受差别参照表1进行分类,再在此类别中给出对应色差值的大小。将类别判断和色差判断相结合,而不是直接判断色差大小,是因为观察者根据工作经验可以比较准确地判断颜色复制色差类别,但不能非常准确地建立视觉感受色差与真实色差值之间的对应关系。后续对类别判断和色差判断数据进行处理,转化为相应的视觉感受色差值,提高视觉判断数据的精度。

表1 视觉感受色差类别判定

Tab.1 Judgment of visual perception color difference types

视觉感受	对应色差范围	类别
颜色基本无差别	0 ~ 0.5	1
刚好察觉色差	0.5 ~ 1.5	2
颜色有差别,但可接受	1.5 ~ 3.0	3
颜色有明显差别,但勉强可以接受	3.0 ~ 6.0	4
颜色有强烈差别,不可接受	6.0 ~ 12.0	5
色差太强烈,完全不可接受	12.0以上	6

### 2.2 视觉实验数据有效性分析

由于人眼视觉系统和心理感受复杂性，且观察者之间相互独立，为评价实验数据的有效性和可靠性，采用变异系数 $R^{[14]}$ 评价观察者内精度和观察者间精度。

$$R = \frac{\sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X_{ij} - Y_{ij})^2}}{\bar{Y}} \times 100\% \quad (11)$$

式中： $M$ 为待评价样张数； $N$ 为墨区数。当评估观察者的重复性精度，即观察者内精度时， $X_{ij}$ 、 $Y_{ij}$ 分别指观察者对某一样张上某一墨区第1次和第2次的视觉感受色差类别数据；评估观察者间实验数据的一致性，即观察者间精度时， $X_{ij}$ 为某一位观察者的视觉数据， $Y_{ij}$ 为所有观察者的视觉数据平均值， $\bar{Y}$ 为所有 $Y_{ij}$ 的平均值。观察者内精度和观察者间精度计算见表2，观察者间精度和观察者内精度均小于20%，说明实验的视觉观察数据具有较好的一致性和重复性，实验数据可靠有效。

表 2 观察者精度的 CV 值  
Tab.2 CV value of observer accuracy %

观察者	观察者间精度	观察者内精度
1	14.2	11.5
2	17.4	15.2
3	18.1	13.9
4	13.5	12.4
5	23.6	18.3
6	19.1	16.7
平均值	17.7	14.6

### 2.3 视觉评价数据处理

观察者对于待检测样张各墨区颜色复制质量的视觉评价数据包括色差类别和近似色差大小2部分。色差类别数值是视觉感受变化较显著的分割点，但并不是等间隔点。由于没有经过专门的训练，观察者并不能非常准确的建立视觉感受色差与真实色差值之间的对应关系，但观察者根据工作经验，可以比较准确地将视觉感受色差进行分类，因此，为保证实验数据的精确性，文中结合色差类别和近似色差大小采用加权平均法计算待检测样张每个墨区的视觉感知色差 $\Delta V_m$ 。

$$\Delta V_m = \sum_{i=1}^6 \frac{n_i}{6} \times \bar{a}_i \quad (12)$$

式中： $i$ 为色差类别； $n_i$ 为6名观察者对某一墨区视觉评价类别是第 $i$ 类的数量； $\bar{a}_i$ 为视觉评价类别是 $i$ 的观察者所评价的近似色差值的算数平均值。

### 3 基于 iCAM 的在线色差检测模型性能评价

理想的色差检测模型应该是基于真正视觉感知均匀的颜色空间，且其计算的色差应与目视判断具有良好的一致性<sup>[15]</sup>。为分析模型计算色差和视觉感知色差 $\Delta V$ 之间的一致性，文中采用标准化残差平方和 STRESS<sup>[16]</sup>值来进行分析比较。利用式（13）计算基于 iCAM 色差模型计算的色差值和视觉感知色差的标准化残差平方和 $S_{iCAM}$ 值。

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta E_i - F \Delta V_i)^2}{\sum_{i=1}^N F^2 \Delta V_i^2}} \times 100 \quad (13)$$

$$F = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta E_i^2}{\sum_{i=1}^N \Delta E_i \Delta V_i} \quad (14)$$

式中： $\Delta E_i$ 为样张各墨区模型计算色差值； $\Delta V_i$ 为样张各墨区的视觉感知色差值； $N$ 为墨区数。同时为了验证基于 iCAM 的色差检测模型在印刷品颜色复制质量检测中精度更高，更符合人眼的视觉感受，文中还与基于 CIELAB 颜色空间的色差值进行了比较，首先采用多项式回归法<sup>[17]</sup>将 CCD 扫描的待检测样张和标准样张的 RGB 值转化到 CIELab 空间，计算每个样张上各墨区色差 $\Delta E^*_{Lab}$ 值，然后计算基于 CIELAB 色差公式计算的色差值和视觉感知色差的标准化残差平方和 $S_{CIELAB}$ 值，计算结果见表3和图2。

表 3 计算色差和视觉感知色差的 STRESS 值  
Tab.3 STRESS value of calculated color difference and visual perception color difference

样张	$S_{iCAM}$	$S_{CIELAB}$
1	24.2	42.1
2	23.1	39.7
3	21.7	38.9
4	17.3	29.9
5	16.9	32.6
6	15.8	33.8
7	12.6	29.6
8	14.3	30.3
9	13.1	28.4
10	12.5	23.4
11	9.2	25.9
12	11.7	22.3
13	10.6	19.1
14	13.8	26.6
15	14.3	25.7
平均值	15.4	29.9

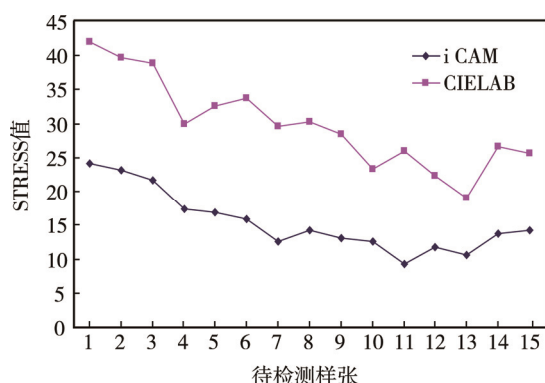


图2 基于 iCAM 色差模型的视觉一致性和基于 CIELAB 色差模型的视觉一致性对比

Fig.2 Visual consistency contrast of color difference model based on iCAM and based on CIELAB

从表3和图2中可以看出,由于前3张印张采集于刚开机印刷时,色差非常大,观察者对于这个色差类别内的样张视觉感知色差值评价差别会比较大,因此,这3张待检测样张的计算色差和视觉感知色差的STRESS值比较大。总体来看,15张待检测样张的 $S_{iCAM}$ 最大值为24.2,最小值为9.2,平均值为15.4,小于 $S_{CIELAB}$ 值,因此,与基于CIELAB的色差模型相比,基于iCAM的在线色差检测模型计算的色差值与视觉感知色差之间的一致性更高,能够更好地反应人眼的视觉感受,对在线检测印刷品色差预测精度更高。

#### 4 结语

基于iCAM图貌模型和IPT均匀颜色空间,建立印刷品分墨区在线色差检测模型。设计视觉心理学实验分墨区来评价印刷品颜色复制质量,采用STRESS值验证模型计算色差与视觉感知色差的一致性。实验结果表明,基于iCAM的在线色差检测模型预测的色差与目视判断具有良好的一致性,且比基于CIELAB的色差预测精度更高。这是因为iCAM模型对在线采集的图像进行了低通滤波预处理和色适应变换,考虑了人眼视觉的空间混合效应,避免把复杂的图像当成简单色块来处理,更符合人眼的视觉特性,因此,此模型可用于实际印刷生产中印刷品在线颜色复制质量检测与评价。

#### 参考文献:

- [1] LUNDSTROM J, VERIKAS A. Assessing Print Quality by Machine in Offset Colour Printing[J]. Knowledge-Based Systems, 2013, 37: 70—79.
- [2] DING Jian-hua. A Background Subtraction Method for Defect Detection of Printed Image[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 462/463: 421—427.
- [3] TSAI D, CHIANG I, TSAI Y. A Shift-tolerant Dissimilarity Measure for Surface Defect Detection[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 8(1): 128—137.
- [4] 李文育, 张二虎, 于佳, 等. 基于机器视觉的印刷图像色彩在线检测系统设计[J]. 西安理工大学学报, 2013, 29(2): 159—164.  
LI Wen-yu, ZHANG Er-hu, YU Jia, et al. The Design of Online Detection System for Printing Image Color Based on Machine Vision[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2013, 29(2): 159—164.
- [5] 范鹏飞. 基于机器视觉的色差检测系统研究与设计[D]. 无锡: 江南大学, 2016.  
FAN Peng-fei. Research and Design of Color Difference Detection System Based on Machine Vision[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.
- [6] 王文举, 赵萍, 陈伟, 等. 彩色印刷品缺陷快速精确检测方法研究[J]. 包装工程, 2015, 36(17): 112—130.  
WANG Wen-ju, ZHAO Ping, CHEN Wei, et al. A Fast and Accurate Method of Defect Detection of Color Printing Image[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(17): 112—130.
- [7] 郑元林, 杨淑蕙, 周世生, 等. 色差公式 CMC(1:c), CIE94 和 CIEDE2000 的对比研究[J]. 包装工程, 2006, 27(5): 127—128.  
ZHENG Yuan-lin, YANG Shu-hui, ZHOU Shi-sheng, et al. Comparative Studies on CMC(1:c), CIE94 and CIEDE2000 Color Difference Formulae[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(5): 127—128.
- [8] WANG H Z, XU H S. Evaluation of Small Suprathreshold Color Differences under Different Background Colors[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(2): 1—5.
- [9] FAIRCHILD M D, JOHNSON G M. Meet iCAM: A Next-generation Color Appearance Model[C]// IS&T/SID 10th Color Imaging Conf, 2002: 33—38.
- [10] FAIRCHILD M D, JOHNSON G M. iCAM Framework for Image Appearance, Differences, and Quality[J]. Elec Imaging, 2004, 13(1): 126—138.
- [11] 黄小乔, 石俊生. IPT 色空间及其均匀性研究[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2170—2174.  
HUANG Xiao-qiao, SHI Jun-sheng. Study on the Uniformity of IPT Color Space[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 2170—2174.
- [12] 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.
- [13] 汪哲弘. 颜色视觉辨别特性及色差评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- WANG Zhe-hong. Study of Color Vision Discrimination Characteristics and Color-difference Evaluation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
- [14] MELGOSA M. Testing CIELAB-Based Color-Difference Formulas[J]. Color Research and Application, 2000, 25(1): 49—55.
- [15] 范彩霞, 陈亚军. 颜色空间的感知均匀性评价及其在图像处理中的应用[J]. 西安理工大学学报, 2016, 32(3): 191—198.
- FAN Cai-xia, CHEN Ya-jun. Evaluation of Perceptual Uniform Color Spaces and Application in Image Processing[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2016, 32(3): 191—198.
- [16] GARCIA P A, HUERTAS R, MELGOSA M, et al. Testing CIELAB-Based Color-Difference Formulas[J]. Journal of the Optical Society of America a-Optics Image Science And Vision, 2007, 24(7): 1823—1829.
- [17] SON C H, PARK H M. Improved Color Separation Based on Dot-Visibility Modeling and Color Mixing Rule for Six-Color Printers[J]. Imaging Science and Technology, 2011, 55(1): 16.