

# 一种彩色喷墨打印机的颜色特性化方法

金崇超<sup>1</sup> 沈会良<sup>1</sup> 邵思杰<sup>2</sup> 忻浩忠<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)  
(<sup>2</sup> 香港理工大学纺织及制衣学系, 香港 999077)

**摘要** 为研究普通彩色喷墨打印机的颜色特性化,分析了打印过程中的两个主要步骤,即墨水分色过程和介质上的呈色过程,并提出较为精确的光谱预测模型。呈色过程采用基于简单点增益的(YNSN)模型和基于复杂点增益的改进型 YNSN 模型。为解决打印机的墨水分色无法直接控制的问题,构造了色度误差目标函数,利用非线性优化求解图像红绿蓝数值对应的青、品红、黄、黑(CMYK)喷墨量,并建立两者间的多项式回归关系。实验结果表明,进行非线性分色处理的模型能较好地预测打印的光谱和色度,相对于简单分色模型,其色度精度有明显提高。

**关键词** 光谱色彩学;彩色打印机;颜色特性化;分色;呈色

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1233001

## Color Characterization Method for Colorful Inkjet Printers

Jin Chongchao<sup>1</sup> Shen Huiliang<sup>1</sup> Shao Sijie<sup>2</sup> John H. Xin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University,  
Hangzhou, Zhejiang 310027, China  
<sup>2</sup> Institute of Textiles and Clothing, The Hong Kong Polytechnic University,  
Hong Kong 999077, China)

**Abstract** A novel color characterization method for general colorful inkjet printers is proposed. The method investigates the printer color separation and medium color rendering processes, based on which spectral reflectance can be predicted. The Yule-Nielsen special Neugebauer (YNSN) and enhanced YNSN models, which are based on simple and complicated dot gain respectively, are employed in the printer color separation process. As the color separation cannot be directly controlled, the colorimetric error objective function is designed. The mapping between RGB and CMYK is modeled using polynomial regression, and is resolved by nonlinear optimization. Experiment results show that the proposed method can characterize the color printer accurately. In comparison with existing techniques using simple color separation model, the proposed method produces improved colorimetric accuracy.

**Key words** spectral colorimetry; color printer; color characterization; color separation; color rendering

**OCIS codes** 330.1730; 330.1710; 330.1690

## 1 引 言

在计算机及其他电子媒介中,数字图像大多以红绿蓝(RGB)三基色模式存储和表示。一般来说,将 RGB 图像打印成为彩色硬拷贝<sup>[1]</sup>,要经过打印机内的墨水分色和介质上的呈色两个主要过程。在分

色过程中,打印机根据图像的 RGB 数据计算并输出相应的青、品红、黄和黑(CMYK)四种墨水。而呈色过程是指,输出的墨水在介质上按照一定规律扩散,最终形成彩色图片或照片的过程。

为在打印系统中准确再现颜色,不少学者对喷

收稿日期: 2011-06-13; 收到修改稿日期: 2011-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(60602027)资助课题。

作者简介: 金崇超(1987—),男,硕士研究生,主要从事颜色科学和图像技术等方面研究。E-mail: lucidjcc@163.com

导师简介: 沈会良(1974—),男,教授,博士生导师,主要从事图像处理、计算机视觉和颜色信息处理等方面研究。

E-mail: shenhl@zju.edu.cn(通信联系人)

墨打印机的颜色特性化展开了研究。颜色特性化是指打印系统对输入的颜色进行分色处理、打印输出以及呈色等整个工作过程在颜色空间的特性。现有方法有查找表、神经网络、多项式回归和基于Neugebauer方程的相关方法<sup>[2~14]</sup>。查找表方法<sup>[2,3]</sup>为了提高算法精度需要大量的颜色样本,且需用到耗时的插值计算;神经网络实现方式复杂且训练时间长<sup>[4~6]</sup>,不太适合实际应用;多项式回归法的优点在于所需样本数量相对较少,但较难得到理想的颜色精度<sup>[7,8]</sup>。

不同于上述的三种纯数学建模方法,Neugebauer方程建立在物理模型基础上,其所需的样本数较少,能较好地描述介质上的呈色过程<sup>[9]</sup>。但研究人员在采用该方法时,往往采用专业打印机或者对普通打印机添加特制的辅助设备来控制打印的喷墨量<sup>[10~13]</sup>,其算法模型不适用于普通打印机;而文献<sup>[14]</sup>中虽然使用普通喷墨打印机进行研究,但只采用简单模型来描述分色过程,其预测精度不高。

为对普通喷墨打印机的颜色特性化提出一个精

确的预测模型,本文分析了打印机内的墨水分色过程和介质上的呈色过程。对于呈色过程,根据点增益计算方式不同,分别采用基于简单点增益的 Yule-Nielsen Spectral Neugebauer(YNSN)模型和基于复杂点增益的改进型 YNSN 模型(EYNSN)<sup>[15,16]</sup>。在此基础上,通过非线性优化求解分色过程中图像 RGB 对应的 CMYK 喷墨量,并建立两者间多项式回归关系。实验中使用的打印机为普通的六色喷墨打印机,有青、品红、黄、黑、淡青和淡品红(CMYKLcLm)六种基色墨水。六色打印可以扩大色域,打印出的彩色图像更加鲜艳和细腻。由于该款打印机不能直接控制墨水的喷墨量,且淡青与青、淡品红与品红在光谱特性上很接近,故本文将该打印机视为四色打印机进行建模,并在实验结果中验证了其可行性。

## 2 呈色模型

### 2.1 YNSN 模型

YNSN 模型从打印机各基元墨水覆盖率估算打印色光谱反射率,其光谱形式模型<sup>[17]</sup>如下:

$$R_{\lambda} = \left( \sum_i a_i R_{i,\lambda}^{1/n} \right)^n, \quad (1)$$

$$a_i = \prod_j \begin{cases} b_j & \text{if ink } j \text{ in Neugebauer primary } i \\ (1 - b_j) & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $R_{\lambda}$  是根据墨水覆盖率估算出的打印色光谱反射率,下标  $\lambda$  表示波长; $R_{i,\lambda}$  表示第  $i$  个 Neugebauer 基元满覆盖时的光谱反射率; $a_i$  表示第  $i$  个 Neugebauer 基元的实际覆盖率; $n$  为 Yule-Nielsen 幂因子; $b_j$  表示打印机基色墨水 CMYK 的实际覆盖率  $c, m, y$  和  $k$ 。其中,  $b_j$  可由基色墨水理论覆盖率和实际覆盖率间的点增益计算获得。

### 2.2 EYNSN 模型

为提高对基色墨水实际覆盖率的估计,近些年, Hersch 等<sup>[15,16]</sup>提出了改进型 YNSN 模型(EYNSN)。在该模型中,点增益的估计考虑了墨水扩散过程中不同墨水间的相互影响。

## 3 分色模型

采用简单分色和多项式回归分色两种方法来描述打印机的分色过程。为方便描述起见,将 RGB 和 CMYK 的数值都归一化到  $0 \sim 1$  范围内,并通过引入阈值  $\mu$  将 CMYK 墨水空间分为含黑(K)墨水和

不含 K 墨水的两个子空间,即:当  $\min(R, G, B)$  小于等于  $\mu$  时,为含 K 墨水的子空间,否则为只含彩色墨水的子空间。

### 3.1 简单分色

对于简单分色过程,在只含彩色墨水的子空间,CMY 与 RGB 之间的转换关系可以用互补关系来描述:

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = 1 - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (3)$$

而对于含有 K 墨水的子空间,可通过灰色成分替代(GCR)算法来引入黑色墨水,用于替换部分彩色墨水。这也是当前大多数算法采用的分色模型<sup>[14]</sup>。

### 3.2 多项式回归分色

对于普通喷墨打印机,CMYK 与 RGB 之间是未知的非线性关系,在呈色模型中建立 CMYK 与 RGB 间的高阶多项式回归,并通过非线性优化求解:

$$\begin{aligned}
 g(C, M, Y, K) = & d_0 + d_1 R + d_2 G + d_3 B + d_4 R^2 + d_5 G^2 + d_6 B^2 + d_7 RG + d_8 RB + \\
 & d_9 GB + d_{10} R^3 + d_{11} G^3 + d_{11} B^3 + d_{13} R^2 G + d_{14} R^2 B + d_{15} RG^2 + \\
 & d_{16} G^2 B + d_{17} RB^2 + d_{18} GB^2 + d_{19} RGB + d_{20} R^2 G^2 + d_{21} R^2 B^2 + \\
 & d_{22} G^2 B^2 + d_{23} R^3 G^2 + d_{24} R^3 B^2 + d_{25} R^2 G^3 + d_{26} G^3 B^2 + \\
 & d_{27} R^2 B^3 + d_{28} G^2 B^3.
 \end{aligned} \quad (4)$$

## 4 颜色特性化模型

### 4.1 基于非线性分色的 YNSN 模型

实验中,介质上的呈色过程首先采用 YNSN 模型进行建模,并在此模型中通过非线性优化求解图像 RGB 对应的 CMYK 喷墨量,建立两者在分色过程中的多项式回归关系。实验的训练色块在 RGB 颜色空间的每一维按 $[0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1]$ 等间距地选取,共 216 个训练色块。

首先计算 YNSN 模型的点增益函数。对于 C, M, Y 三种彩色墨水,选取 R, G, B 分别等于 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 和 1 时的  $6 \times 3 = 18$  个单色打印色块,视为基色墨水 C, M, Y 部分覆盖时的训练色块,而 K 墨水通过灰度级打印方式获取相同等间距覆盖率的 6 个训练色块。

根据文献[18],光谱反射率估计墨水点增益可计算为

$$b_{\text{eff}} = \frac{R_{\lambda=\min, \text{eff}}^{1/n} - R_{\lambda=\min, s}^{1/n}}{R_{\lambda=\min, t}^{1/n} - R_{\lambda=\min, s}^{1/n}}, \quad (5)$$

式中  $b_{\text{eff}}$  表示基色墨水的实际覆盖率,分别代表  $c, m, y$  和  $k$ 。 $R_{\lambda=\min, \text{eff}}$  表示基色墨水部分覆盖时的光谱反射率, $R_{\lambda=\min, t}$  表示基色墨水满覆盖时的光谱反射

率,而  $R_{\lambda=\min, s}$  表示打印介质的光谱反射率, $n$  表示 Yule-Nielsen 幂因子。此处, $\lambda = \min$  指的是基色墨水满覆盖时光谱反射率最小所对应的波长。

建立 YNSN 模型的墨水点增益函数:

$$b = F_b(B), \quad (6)$$

式中  $b \in \{c, m, y, k\}, B \in \{C, M, Y, K\}, F(\cdot)$  简单取线性插值。根据(6)式,可以估计任意基色墨水理论覆盖率对应的实际覆盖率。

根据点增益函数,在 YNSN 模型中优化每个训练色块的理论覆盖率 C, M, Y 和 K,使得目标函数 CIELAB 色差  $\Delta E_{\text{ab}}^*$  最小, $\Delta E_{\text{ab}}^*$  选用在三种典型光源 D65, A 和 F11 下的色差均值。采用 Matlab 的 fminsearch 函数进行非线性优化求解。优化求得训练色块的理论覆盖率 C, M, Y, K 后,利用最小二乘法建立 RGB 和 CMYK 两个颜色空间如(4)式的多项式回归关系。

### 4.2 基于非线性分色的 EYNSN 模型

为建立更加准确地打印模型,呈色过程中需考虑墨水间的相互作用。对于只含 CMY 的颜色子空间,呈色过程采用 EYNSN 模型。Hersch 等<sup>[15,16]</sup>在此模型中采用的墨水点增益计算公式为

$$\bar{c} = (1 - \bar{m})(1 - \bar{y})f_c(C) + \bar{m}(1 - \bar{y})f_{c/m}(C) + (1 - \bar{m})\bar{y}f_{c/y}(C) + \bar{m}\bar{y}f_{c/my}(C), \quad (7)$$

$$\bar{m} = (1 - \bar{c})(1 - \bar{y})f_m(M) + \bar{c}(1 - \bar{y})f_{m/c}(M) + (1 - \bar{c})\bar{y}f_{m/y}(M) + \bar{c}\bar{y}f_{m/cy}(M), \quad (8)$$

$$\bar{y} = (1 - \bar{c})(1 - \bar{m})f_y(Y) + \bar{c}(1 - \bar{m})f_{y/c}(Y) + (1 - \bar{c})\bar{m}f_{y/m}(Y) + \bar{c}\bar{m}f_{y/cm}(Y), \quad (9)$$

式中 C, M, Y 表示基色墨水的理论覆盖率, $\bar{c}, \bar{m}, \bar{y}$  表示基色墨水的实际覆盖率, $f_{i/j}(\cdot)$  表示墨水  $i$  在与墨水  $j$  混合时的扩散曲线,比如  $f_{c/my}(C)$  表示青色墨水在与品红、黄色墨水混合时的扩散曲线, $f_c(C)$  表示青色墨水单独喷在白纸上的扩散曲线。文中通过迭代的方法来求解方程组中  $\bar{c}, \bar{m}, \bar{y}$ , 其初始值分别为 C, M, Y, 迭代 4 次左右即可获得收敛。

首先假设简单分色过程,即训练色块的理论覆盖率 C, M, Y 可由(3)式直接计算获得,然后通过以下几个步骤求解墨水的扩散曲线:

1) 获得训练色块的实际覆盖率  $\bar{c}, \bar{m}, \bar{y}$ 。同样

采用 fminsearch 函数来非线性优化求解,使目标函数  $\Delta E_{\text{ab}}^*$  最小。与 4.1 节中的优化变量不同, EYNSN 模型的优化变量为墨水的实际覆盖率  $\bar{c}, \bar{m}, \bar{y}$ 。

2) 将优化结果  $\bar{c}, \bar{m}, \bar{y}$  代入到(7)~(9)式。比如将青色墨水 C 等于 0.2 的一组 36 色块的优化结果  $\bar{c}, \bar{m}, \bar{y}$  代入(7)式建立方程组,利用最小二乘法求解  $f_c(0.2), f_{c/m}(0.2), f_{c/y}(0.2), f_{c/my}(0.2)$ 。同理可求得其余墨水理论覆盖率所对应的函数  $f$  值。

3) 通过一维线性插值分别获得 12 条墨水扩散曲线  $f_{i/j}(\cdot)$ 。

在此基础上,非线性优化求解分色过程中 RGB 与 CMY 之间的对应关系。将上述步骤得到的已知量  $\bar{c}, \bar{m}, \bar{y}$  和墨水扩散曲线  $f_{i,j}(\cdot)$  再次代入(7)~(9)式优化求解理论覆盖率  $C, M, Y$ , 使下列目标函数最小:

$$\Delta = \sqrt{(\bar{c} - \hat{c})^2 + (\bar{m} - \hat{m})^2 + (\bar{y} - \hat{y})^2}, \quad (10)$$

式中  $\bar{c}, \bar{m}, \bar{y}$  表示基色墨水实际覆盖率,  $\hat{c}, \hat{m}, \hat{y}$  表示根据优化量  $C, M, Y$  计算得到的基色墨水覆盖率。优化求得理论覆盖率  $C, M, Y$  后, 建立 RGB 和 CMY 两个颜色空间的多项式回归关系。

对于含有 K 墨水的颜色子空间, 由于打印过程中存在复杂的灰色成分替换过程, 很难通过实验计算获得普通打印机 K 墨水的扩散曲线。为此, 对于该颜色子空间的模型进行简化, 直接建立 RGB 和实际覆盖率  $\bar{c}, \bar{m}, \bar{y}, \bar{k}$  之间的多项式回归关系, 根据该空间的训练色块数目, 采用多项式:

$$g(\bar{c}, \bar{m}, \bar{y}, \bar{k}) = d_0 + d_1R + d_2G + d_3B + d_4R^2 + d_5G^2 + d_6B^2 + d_7RG + d_8RB + d_9GB. \quad (11)$$

## 5 实验结果

采用 Epson Stylus Photo 1390 喷墨打印机进行实验, 虽然该打印机有 CMYK+LcLm 六个基色, 但实验中将该打印机视为四色打印机, 从实验结果可以验证这一简化的有效性。打印介质选用 Epson

原装光泽照片纸 S042067, 打印模式选用无色彩管理模式。

实验的训练色块如 4.1 节所述, 共有 216 块。验证色块在 RGB 颜色空间的每一维按 [0.05, 0.15, 0.25, 0.35, 0.45, 0.55, 0.65, 0.75, 0.85, 0.95] 等间距地选取 10 个采样点, 共有 1000 个验证色块, 且与训练色块无重复。用分光光度计测得每个色块在 400~700 nm 之间的光谱反射率。对于该打印机, 根据实验确定选取划分 CMYK 颜色空间的阈值  $\mu$  为 0.25, Yule-Nielsen 幂因子  $n$  为 10 较为合适。

实验中, 分别采用基于简单分色的 YNSN 和 EYNSN 模型及本文提出的基于非线性分色的 YNSN 和 EYNSN 模型对训练色块进行颜色特性化。检验验证色块时, 其色度误差用 D65、A 和 F11 三种 CIE 标准光源衡量; 而光谱误差则采用均方根 (RMS) 误差描述。对 YNSN 和 EYNSN 两组颜色特性化模型的色度误差和光谱误差进行比较, 其中色度误差的比较结果如表 1 和表 2 所示, 光谱误差的比较结果如表 3 所示。

由表 1 和表 2 可见, 与简单分色相比, 非线性分色在 YNSN 和 EYNSN 模型中的色度误差分别下降了 3.2 和 0.9。表 3 显示, 在 EYNSN 模型中, 两种分色方法的光谱误差相近, 而在 YNSN 模型中, 非线性分色降低了光谱预测误差。

表 1 YNSN 模型的色度误差比较

Table 1 Comparison of colorimetric errors using YNSN model

Color separation	$\Delta E_{ab}^*$ under D65			$\Delta E_{ab}^*$ under A			$\Delta E_{ab}^*$ under F11		
	Mean	Std	Max	Mean	Std	Max	Mean	Std	Max
Simple	6.053	2.886	16.377	6.322	2.938	19.100	5.512	2.575	14.220
Nonlinear	2.721	1.437	9.480	2.717	1.422	9.439	2.803	1.432	9.954

表 2 EYNSN 模型的色度误差比较

Table 2 Comparison of colorimetric errors using EYNSN model

Color separation	$\Delta E_{ab}^*$ under D65			$\Delta E_{ab}^*$ under A			$\Delta E_{ab}^*$ under F11		
	Mean	Std	Max	Mean	Std	Max	Mean	Std	Max
Simple	2.773	1.581	9.307	2.827	1.513	10.011	2.879	1.701	9.910
Nonlinear	1.791	0.873	6.863	2.079	1.055	7.231	1.934	0.976	6.777

表 3 不同分色方法的光谱均方根误差比较

Table 3 Comparison of spectral RMS errors using different color separation methods

Color separation (YNSN model)	Spectral RMS error			Color separation (EYNSN model)	Spectral RMS error		
	Mean	Std	Max		Mean	Std	Max
Simple	0.035	0.019	0.134	Simple	0.024	0.010	0.057
Nonlinear	0.024	0.011	0.066	Nonlinear	0.023	0.010	0.058

图 1 给出了某典型验证色块的光谱反射率真实值和预测值。可以看出,对于 YNSN 模型,经过非线性分色处理的预测光谱比简单分色明显接近于实

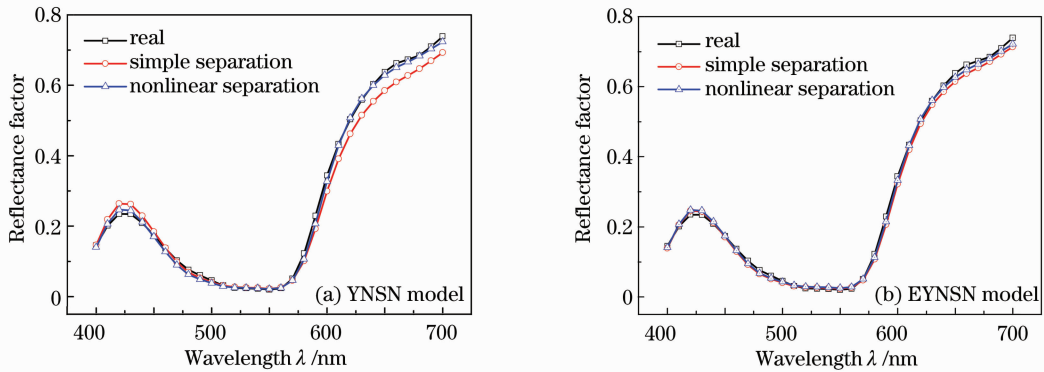


图 1 不同分色模型的光谱预测对比

Fig. 1 Comparison of spectral reflectance accuracy using different color separation models

## 6 结 论

通过对普通喷墨打印机工作流程中墨水分色过程和呈色过程的分析,从整个系统角度提出喷墨打印机的颜色特性化模型,在 YNSN 和 EYNSN 呈色模型基础上进行非线性分色处理。实验结果表明,相比于简单分色,非线性分色具有更高的色度和光谱精度。与已有研究相比,在不使用特定设备控制墨水喷墨量的前提下,对普通喷墨打印机进行了有效地颜色特性化,其算法模型具有较高的实用性。

### 参 考 文 献

- 1 Xiandou Zhang, Haisong Xu. An adaptively spatial color gamut mapping algorithm [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(9): 873~877
- 2 I. Jang, C. Son, T. Park *et al.*. Hi-fi printer characterization method using color correlation for gamut extension [C]. IEEE International Conference on Image Processing, 2006, 1517~1520
- 3 Deng Jiabin, Hu Juanli, Wu Juebo. A study of color space transformation method using nonuniform segmentation of color space source [J]. *J. Computers*, 2011, **6**(2): 288~296
- 4 Guo Maozu, Wang Yadong, Su Xiaohong *et al.*. Research of color matching method based on BP network [J]. *Chinese J. Computers*, 2000, **23**(8): 819~823
- 5 郭茂祖, 王亚东, 苏晓红 等. 基于 BP 网络的色彩匹配方法研究 [J]. *计算机学报*, 2000, **23**(8): 819~823
- 6 N. Fdhal, M. Kyan, D. Androustos *et al.*. Color space transformation from RGB to CIELAB using neural networks [C]. Lecture Notes in Computer Science, 2009, **5879**: 1011~1017
- 7 Cao Congjun, Sun Jing. Color space conversion algorithm of generalized regression neural network based on digital proof [J]. *J. Computer Applications*, 2010, **30**(8): 2108~2110
- 8 曹从军, 孙 静. 基于广义回归神经网络的数码打样色彩空间转换方法 [J]. *计算机应用*, 2010, **30**(8): 2108~2110
- 9 D. Littlewood, G. Subbarayan. Maintaining an accurate printer characterization [C]. IS&T/SID Conference on Color Imaging,

实际光谱;在 EYNSN 模型中,两种分色的预测光谱都非常接近实际值,且非线性分色的预测光谱略好于简单分色。

- 2004, 203~210
- 8 M. Xia, E. Saber, G. Sharma *et al.*. End-to-end color printer calibration by total least squares regression [C]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, **8**(5): 700~716
- 9 Cheng Ganghu, Xiong Kangpeng. Study on theoretical value and limitations of neugebauer equation [J]. *Chinese Printer and Packaging Study*, 2010, **2**(5): 24~28
- 10 成刚虎, 熊康鹏. 纽介堡方程的理论价值及局限性研究 [J]. *中国印刷与包装研究*, 2010, **2**(5): 24~28
- 11 P. Urban, M. R. Rosen, R. S. Berns. Accelerating spectral-based color separation within the neugebauer subspace [J]. *J. Electronic Imaging*, 2007, **16**(4): 043014
- 12 M. Hébert, R. D. Hersch. Yule-nielsen based recto-verso color half-tone transmittance prediction model [C]. IS&T/SID Conference on Color Imaging, 2009, 155~158
- 13 L. A. Taplin, R. S. Berns. Spectral color reproduction based on a six-color inkjet output system [C]. IS&T/SID Conference on Color Imaging, 2001, 209~213
- 14 Jinyi Guo, Haisong Xu, M. Ronnier Luo. Novel spectral characterization method for color printer based on the cellular neugebauer model [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(11): 1106~1109
- 15 S. Zuffi, R. Schettini, G. Mauri. Spectral \ based printer modeling and characterization [J]. *J. Electronic Imaging*, 2005, **14**(2): 023008
- 16 R. D. Hersch, P. Emmel, F. Collaud *et al.*. Spectral reflection and dot surface prediction models for color halftone printers [J]. *J. Electronic Imaging*, 2005, **14**(3): 33001
- 17 R. D. Hersch, F. Crété. Improving the yule-nielsen modified spectral neugebauer model by dot surface coverages depending on the ink superposition conditions [C]. IS&T/SPIE Conference on Electronic Imaging Symposium, 2005, **5667**: 434~445
- 18 Wang Ying, Zeng Ping, Wang Yifeng *et al.*. Spectral-based color separation for multi-spectral images [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2122~2127
- 19 王 莹, 曾 平, 王义峰 等. 一种面向多光谱图像的打印分色方法 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2122~2127
- 20 D. R. Wyble, R. S. Berns. A critical review of spectral models applied to binary color printing [J]. *Color Research and Application*, 2000, **25**(1): 4~29