

基于反射率的透明非吸收性材料分色模型

郭少东, 王晓红

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 以反射率为基准, 对透明非吸收性材料进行分色建模。**方法** 通过入射光照射到透明非吸收性材料后经历的多重内反射及透射, 建立基于 CYNSN 的透明非吸收性材料网点面积率, 预测光谱透射率的模型, 并确定优化后的 Yule-Nielsen 指数 n 和胞元等级数量, 在印有底白的透明非吸收性材料上打印检验样本数据, 以该数据为分色基准, 基于线性回归迭代算法, 建立透明非吸收性材料 CYNSN 透射稿分色模型。**结果** 该分色模型能够达到比较高的分色精度, 并且避免了分色过程中使用光谱透射率测量仪器, 降低了成本, 提高了数据测量效率, 使透明非吸收性材料分色效果更加接近于反射稿。**结论** 该模型是一种有效的透明非吸收性材料分色模型。

关键词: 透明非吸收性材料; 光谱透射率; 预测模型; 分色模型

中图分类号: TS206 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)07-0197-05

Color Separation Model of Transparent Non-absorbent Materials Based on Reflectance

GUO Shao-dong, WANG Xiao-hong

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to establish the color separation model for the transparent non-absorbent materials based on the reflectance. The model to predict the spectral transmittance based on the transparent non-absorbent materials' dot area percentage of CYNSN was established, and the optimized Yule-Nielsen exponent n (subscript n) and the number of cell levels were determined by the multiple internal reflection and transmission of incident light on the transparent non-absorbent materials. Based on the linear regression iterative algorithm, the color separation model for a transparent non-absorbent material CYNSN transmission draft was established by printing the test sample data on a clear, non-absorbent material with a white background. The experimental results showed that the color separation model could achieve high separation accuracy and avoid the use of spectral transmittance measurement instrument in the process of color separation, which reduced the cost, improved the data measurement efficiency and enabled the transparent non-absorbent material color separation effect to be closer to the reflection draft. The proposed model is an effective color separation model for the transparent non-absorbent materials.

KEY WORDS: transparent non-absorbent materials; spectral transmittance; prediction model; color separation model

国内光谱分色研究集中在对模型的应用及优化上, 主要的研究成果有打印机特征化模型的实现、多色打印机光谱分色模型、光谱匹配评价等。郭晋^[1]以 CYNSN 模型(胞元式 YNSN 模型)为基础, 构建了四色打印系统的特征化模型。金崇超等^[2]对喷墨打印机的呈色过程进行了分析, 提出了光谱预测模型。国外光谱分色研究集中在对光谱分色模型及分色算

法的实现上, 研究结果有 Murray-Davies 及改进模型、Yule-Nielsen 模型、光谱 Neugebauer 及其改进模型以及模型的迭代算法等。WYBLE D R 和 BERNIS R S^[3]对光谱分色模型的发展做了总结和回顾。URBAN P 和 GRIGAT R R^[4]运用线性回归迭代算法构建了 CMYKOG 六色打印系统的反向模型。

国内外现有的研究主要集中于纸张等吸收性材

收稿日期: 2016-11-10

作者简介: 郭少东(1992—), 男, 上海理工大学硕士生, 主攻色彩再现理论与应用。

通讯作者: 王晓红(1971—), 女, 上海理工大学教授, 主要研究方向为色彩管理和图像质量控制。

料以及光谱反射率,对于透明非吸收性材料和光谱透射率的研究甚少,因此,文中以透明非吸收性材料和光谱透射率为研究对象,在印有底白的透明非吸收性材料上打印检测样本,以该数据作为分色基准,建立了基于反射率的 CYNSEN 透明非吸收性材料分色模型。

1 透明非吸收性材料光谱透射率模型的建立

透明非吸收性材料光线反射与透射情况见图 1。可以看出,透明非吸收性材料的折射率 n_1 不同于周围空气的折射率 n_0 ,当入射光以入射角 θ_0 照射到透明非吸收性材料时,入射角 θ_0 和折射角 θ_1 满足折射定律,见式(1)。

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_1 \quad (1)$$

式中: n_0 和 n_1 分别为空气和透明非吸收性材料的折射率; θ_0 和 θ_1 分别为入射角和折射角。

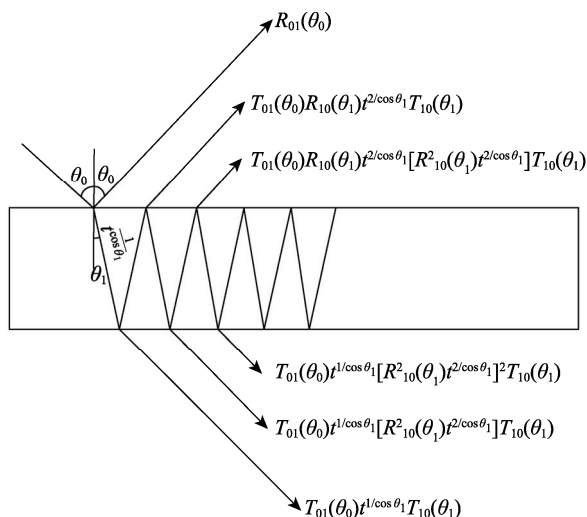


图 1 透明非吸收性材料光线反射与透射情况

Fig.1 Reflection and transmission of directional light by a transparent non-absorbent material

当光入射到透明非吸收性材料内时,会经历多重内反射以及透射,入射光穿过透明非吸收性材料时,会通过衰减因子 $t_{\frac{1}{\cos \theta_1}}(\lambda)$ 进行衰减, $t_i(\lambda)$ 表示透明非吸收材料的光谱透射率,衰减因子中的 $\frac{1}{\cos \theta_1}$ 则可以通过式(1)换算得到,计算见式(2)。

$$\frac{1}{\cos \theta_1} = \left(1 - \frac{\sin^2 \theta_0}{n_1^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

通过式(1)和式(2)得到了衰减因子 $t_{\frac{1}{\cos \theta_1}}(\lambda)$,接下来对非吸收性材料两边的出射光进行求和,就可以得到当入射光以入射角 θ_0 照射到透明非吸收性材料时的光谱反射率 $R(\theta_0, \lambda)$ 和光谱透射率 $T(\theta_0, \lambda)$,见式(3)和式(4)。

$$R(\theta_0, \lambda) = R_{01}(\theta_0) + \frac{T_{01}^2(\theta_0)R_{01}(\theta_0)t_{\frac{1}{\cos \theta_1}}^2(\lambda)}{1 - R_{01}^2(\theta_0)t_{\frac{1}{\cos \theta_1}}^2(\lambda)} \quad (3)$$

$$T(\theta_0, \lambda) = \frac{T_{01}^2(\theta_0)t_{\frac{1}{\cos \theta_1}}^2(\lambda)}{1 - R_{01}^2(\theta_0)t_{\frac{1}{\cos \theta_1}}^2(\lambda)} \quad (4)$$

式中: $R_{01}(\theta_0)$ 和 $T_{01}(\theta_0)$ 分别为透明非吸收性材料的反射率和透射率。

在实际生产当中,需要将色块打印在透明非吸收性材料上,所以当透明非吸收性材料上印有色块时,透明非吸收性材料的光谱透射率 $t_i(\lambda)$ 就需要替换成色块的光谱透射率 $t_k(\lambda)$,当入射光垂直入射时,入射角 θ_0 和折射角 θ_1 都变为 0,并且满足反射率和折射率的和为 1,得到式(5)和式(6)。

$$R_{01}(0) = r_0 = \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0}\right)^2 \quad (5)$$

$$T_{01}(0) = 1 - r_0 \quad (6)$$

式中: r_0 为光垂直入射到印有色块的透明非吸收性材料时的反射率。

将式(6)代入到式(4)中就可以得到透明非吸收性材料印有色块时的光谱透射率,见式(7),最后得到 YNSN 形式的透明非吸收性材料光谱透射率预测模型见式(8)。

$$T(0, \lambda) = \frac{(1 - r_0)^2 t_k(\lambda)}{1 - r_0^2 t_k^2(\lambda)} \quad (7)$$

$$T(\theta_0, a_k, \lambda) = \left[\sum_{k=1}^{16} a_k T^{\frac{1}{n}}(\theta_0, \lambda) \right]^n \quad (8)$$

式中: a_k 为 16 个基色的有效网点面积率。

2 透明非吸收性材料 CYNSEN 光谱透射率预测模型建模

2.1 实验样本制备与测量

采用 Arizona Océ UV 平板打印机打印实验样本,该 UV 平板打印机为四色打印机,所以共有 16 个 Neugebauer 基元(见图 2)。



图 2 打印机的 16 个 Neugebauer 基元

Fig.2 The 16 Neugebauer primitives of the printer

设计一组测试图, c, m, y, k 按照网点面积率(0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%)组合成 1296 个色块作为训练样本(见图 3)。c, m, y, k 按照网点面积率(25%, 45%, 65%, 85%)组合成 256 个色块作为检验样本。

以图 3 为原稿,采用 Arizona Océ UV 四色平板

打印机输出。打印时关掉色彩管理，承印介质为透明亚克力。所有的训练样本和检验样本都用 Barbieri LFP S3 来测量光谱透射率数据，取 400 ~ 700 nm 波长范围内的数据，以 10 nm 为间隔，共 31 个光谱数据。

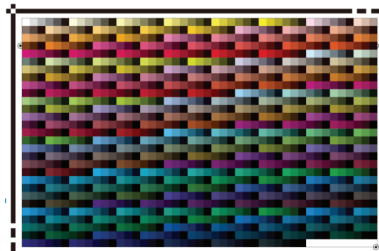


图 3 1296 个色块组成的训练样本
Fig.3 1296 patches of training samples

2.2 CYNSN 光谱透射率预测模型建模

文中已经建立了 YNSN 形式的透明非吸收性材料光谱透射率预测模型，在此基础上可以构建 CYNSN 模型，对于 CYNSN 正向预测模型的建立，需要优化 Yule-Nielsen 指数 n 和胞元等级数量 2 个参数。

2.2.1 Yule-Nielsen 指数 n 的确定

为了选取最佳的模型指数 n ，首先要固定胞元的等级数量，因此，构建的 CYNSN 模型胞元等级数量为 5，然后选取最佳的指数 n ，并将 1296 个样本光谱数据作为训练样本。在此模型基础上，将指数 n 在 1 ~ 4 之间取值，把检测样本在不同的 n 值下分别用胞元等级数量为 5 的 CYNSN 模型预测光谱透射率数据，然后与测量得到的光谱透射率数值进行分析比较，分析两者之间的 CIEDE2000 色差（采用 ΔE_{00} 表示色差， $\Delta E_{00\max}$ 表示色差最大值， $\overline{\Delta E_{00}}$ 表示色差平均值）进行评判，从而选取最优的 n 值，见表 1。

表 1 Yule-Nielsen 指数 n 取值及对应 5 胞元等级模型预测精度

Tab.1 Yule-Nielsen coefficient n value and corresponding 5-cell level model

指数 n	$\Delta E_{00\max}$	$\overline{\Delta E_{00}}$
1	2.7261	0.8769
2	2.5195	0.6943
2.1	2.5880	0.6917
2.3	2.6941	0.6887
2.5	2.7885	0.6856
3	2.9683	0.6837
4	3.1865	0.6864

由表 1 可以看出，当 $n=1$ 时，该光谱透射率预测模型的 CIEDE2000 色差的均值为 $0.8769\Delta E_{00}$ ；当 n 值不为 1 时，平均色差有所改善；当 n 值大于 2 时，其平均色差随着 n 值的变化并没有明显的改变；在 n

值大于 3 时，平均色差呈上升趋势，综合考虑，把最佳的指数 n 定为 2.5。

2.2.2 胞元等级数量的确定

取定值 n 为 2.5，以 1296 个训练样本为基础，构建 CYNSN 模型的胞元等级数量定为 2—10，然后用模型来预测检测样本的光谱透射率数据，将预测值与测量值进行比较，计算 CIEDE2000 色差进行评价，并确定最佳的胞元等级数量，不同胞元等级数量 CYNSN 模型预测精度见表 2。

表 2 不同胞元等级数量 CYNSN 模型预测精度
Tab.2 CYNSN model predicting accuracy of different cell grade number

胞元等级数量	$\Delta E_{00\max}$	$\overline{\Delta E_{00}}$
2	13.4846	3.9358
3	7.5137	1.6134
4	4.9965	1.0836
5	2.7849	0.7095
6	2.1574	0.6912
7	2.2367	0.6887
8	2.2358	0.6879
9	2.2342	0.6871
10	2.2335	0.6866

由表 2 可以看出，当胞元数量为 2 时，预测模型的 CIEDE2000 色差的最大值为 $13.4846\Delta E_{00}$ ，平均值为 $3.9358\Delta E_{00}$ 。当胞元数量从 3 到 10 进行变化时，模型的预测精度有明显提高；当胞元数量为 6 时，模型预测精度的 CIEDE2000 色差最大值为 $2.1574\Delta E_{00}$ ，平均值为 $0.6912\Delta E_{00}$ ；当胞元数量大于 6 后，色差的变化已经不再明显。综合考虑，当胞元数量为 6 时 CYNSN 模型预测精度达到最佳。

2.2.3 CYNSN 光谱透射率预测模型性能评价

评价光谱匹配精度的光谱均方根误差 (RRMS) S 见式 (9)。

$$S = \sqrt{\frac{(T_1 - T_2) \times (T_1 - T_2)^T}{N}}$$
 (9)

式中： T_1 、 T_2 为 2 组光谱透射率数据； N 为光谱透射率数据中的元素数量。

将对 CYNSN 光谱透射率预测模型的预测精度进行分析，最佳指数 n 为 2.5，胞元数量为 6。使用该 CYNSN 光谱透射率预测模型对 256 个检测样本预测其光谱透射率数据，并计算与测量值之间的 RRMS 误差与 CIEDE2000 色差。通过计算可以得到，光谱透射率预测模型预测结果的 RRMS 误差最大值为 0.0146，平均值为 0.0023，CIEDE2000 色差最大值为 $1.8763\Delta E_{00}$ ，平均值为 $0.4376\Delta E_{00}$ ，说明所构建的光谱透射率预测模型具有较为优秀的预测性能。

3 透明非吸收性材料分色模型建模

将建立透明非吸收性材料 CYNSEN 分色模型, 预测精确复现该颜色所需的 CMYK 输入值。首先需要建立光谱组介堡模型逆向求解算法, 然后确定颜色所在胞元, 最后在该胞元内部运用逆向求解算法优化得到 CMYK 值。在正向预测模型建立的过程中, 使用光谱透射率测量仪器来获取光谱透射率数据, 由于光谱透射率测量仪器成本较高, 测量时间较长, 故在建立反向分色模型时, 把检验样本打印在印有底白的透明亚克力上, 并用 Eyeone Pro 测量光谱反射率数据, 既可以降低成本, 提高数据测量效率, 又可以提高透明非吸收性材料的分色效果, 使其更加接近于反射稿呈色效果。

3.1 基于线性回归迭代的反向方法

光谱组介堡方程是不可逆的, 故在逆向求解的过程中, 主要借助于线性回归迭代算法。将矩阵 A 和向量 W 分别见式(10)和式(11)。

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1^n}, \frac{1}{R_2^n}, \frac{1}{R_3^n}, \frac{1}{R_4^n} \cdots \frac{1}{R_{16}^n} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$W^T = (w_1, w_2, w_3, w_4 \cdots w_{16}) \quad (11)$$

式中: A 为组介堡基元的光谱透射率数据; W 为组介堡模型的系数向量。

以 R 表示预期光谱反射率数据, $r = R^{\frac{1}{n}}$, 定义函数见式(12)。

$$f(c, m, y, k) = (AW - r)^T (AW - r) \quad (12)$$

式(12)表示预测值与测量值之间的最小二乘差, 以最小化 $f(c, m, y, k)$ 为基准, 通过迭代算法得最优化的 CMYK 值。具体求解方法步骤如下所述。

1) 选择 $x^{(0)} = (c^{(0)}, m^{(0)}, y^{(0)}, k^{(0)})^T = (0.5, 0.5, 0.5, 0.5)^T$ 作为初始值, 将误差容限 τ 设定为极小的正整数 (10^{-5}), 将最大迭代次数 $k_{\max}$ 设定为较大正整数。

2) $k = 1, 2, 3 \dots k_{\max}$, 计算步骤见式(13)—(16)。

$$c^{(i)} = \frac{\left(P \frac{\partial W(c^{(i-1)}, m^{(i-1)}, y^{(i-1)}, k^{(i-1)})}{\partial c} \right)^T \left[r - PW_{myk}(c^{(i-1)}, m^{(i-1)}, y^{(i-1)}, k^{(i-1)}) \right]}{\left(P \frac{\partial W(c^{(i-1)}, m^{(i-1)}, y^{(i-1)}, k^{(i-1)})}{\partial c} \right)^T \left(P \frac{\partial W(c^{(i-1)}, m^{(i-1)}, y^{(i-1)}, k^{(i-1)})}{\partial c} \right)} \quad (13)$$

$$m^{(i)} = \frac{\left(P \frac{\partial W(c^{(i)}, m^{(i-1)}, y^{(i-1)}, k^{(i-1)})}{\partial m} \right)^T \left[r - PW_{cyk}(c^{(i)}, m^{(i-1)}, y^{(i-1)}, k^{(i-1)}) \right]}{\left(P \frac{\partial W(c^{(i)}, m^{(i-1)}, y^{(i-1)}, k^{(i-1)})}{\partial m} \right)^T \left(P \frac{\partial W(c^{(i)}, m^{(i-1)}, y^{(i-1)}, k^{(i-1)})}{\partial m} \right)} \quad (14)$$

$$y^{(i)} = \frac{\left(P \frac{\partial W(c^{(i)}, m^{(i)}, y^{(i-1)}, k^{(i-1)})}{\partial y} \right)^T \left[r - PW_{cmk}(c^{(i)}, m^{(i)}, y^{(i-1)}, k^{(i-1)}) \right]}{\left(P \frac{\partial W(c^{(i)}, m^{(i)}, y^{(i-1)}, k^{(i-1)})}{\partial y} \right)^T \left(P \frac{\partial W(c^{(i)}, m^{(i)}, y^{(i-1)}, k^{(i-1)})}{\partial y} \right)} \quad (15)$$

$$k^{(i)} = \frac{\left(P \frac{\partial W(c^{(i)}, m^{(i)}, y^{(i)}, k^{(i-1)})}{\partial k} \right)^T \left[r - PW_{cmy}(c^{(i)}, m^{(i)}, y^{(i)}, k^{(i-1)}) \right]}{\left(P \frac{\partial W(c^{(i)}, m^{(i)}, y^{(i)}, k^{(i-1)})}{\partial k} \right)^T \left(P \frac{\partial W(c^{(i)}, m^{(i)}, y^{(i)}, k^{(i-1)})}{\partial k} \right)} \quad (16)$$

3) 如果满足式(17)—(18)的 2 个条件:

$$\|F(x^{(i)}) - F(x^{(i-1)})\| < \tau(1 + F(x^{(i)})) \quad (17)$$

$$\|x^{(i)} - x^{(i-1)}\| \leq \sqrt{\tau}(1 + \|x^{(i)}\|_2) \quad (18)$$

则停止迭代, 并把 $x^{(i)} = (c^{(i)}, m^{(i)}, y^{(i)}, k^{(i)})^T$ 作为最终解。得到光谱组介堡逆向求解方法后, 接下来在全部胞元中分别运用该逆向求解法得到每个胞元的最优解, 然后以计算预测得到的光谱数据与测量值之间的

差异，当差异达到最小时，即得到了全部胞元中的最优解。

3.2 CYNSN 分色模型的光谱匹配和色度匹配性能分析

对于预期印有底白的光谱反射率数据，通过透明非吸收性材料 CYNSN 分色模型得到 CMYK 网点百分比，然后通过 CYNSN 光谱透射率预测模型得到光谱透射率数据，最后计算目标光谱反射率数据与预测光谱透射率数据之间的 RRMS 误差、CIEDE2000 色差来评价该分色模型的精度。分色前后精度对比见表 3。

表 3 分色前后精度对比
Tab.3 Comparison of accuracy before and after color separation

	ΔE_{00max}	$\overline{\Delta E_{00}}$
RRMS	0.2862	0.0331
ΔE_{00} (D50/2°)	95.8978	17.1921
RRMS (分色)	0.0423	0.0069
ΔE_{00} (D50/2°) (分色)	9.4437	2.3114

注：D50/2°表示在 D50 标准光源，2°测量视场下进行测量。

由表 3 可以看出，基于反射率的 CYNSN 透明非吸收性材料分色模型，相较分色前达到了较为优秀的呈色效果，RRMS 误差平均值为 0.69%，CIEDE2000 色差平均值为 2.3114，实现了较为满意的光谱匹配和色度匹配，而且使分色后的呈色效果更加接近反射稿。

4 结语

建立了基于反射率的透明非吸收性材料分色模型。设计并打印了 1296 个训练样本，通过数据测量得到了训练样本的光谱透射率数据，并得到了优化后正向预测模型的各项参数。然后以打印在印有底白的透明非吸收性材料上的 625 个检测样本为分色基准，建立了基于反射率的透明非吸收性材料 CYNSN 分色模型。实验结果表明，基于反射率的透明非吸收性材料分色模型较分色前有了较大的提高，并且在分色时不再使用光谱透射率测量仪这种昂贵而且耗时的设备，直接用反射稿对透明非吸收性材料进行分色，使分色效果更加优秀。

参考文献：

[1] 郭晋一. 基于光谱匹配法 Neugebauer 方程的彩色打印系统特征化模型研究[D]. 杭州：浙江大学, 2011.
GUO Jin-yi. Developing the Characterization Model of Color Printing System Using Spectral-based Neugebauer Equations[D]. Hangzhou: Zhejiang University,

2011.
[2] 金崇超, 沈会良, 邵思杰. 一种彩色喷墨打印机的颜色特性化方法[J]. 光学学报, 2012, 31(12): 308—312.
JIN Chong-chao, SHEN Hui-liang, SHAO Si-jie. Color Characterization Method for Colorful Inkjet Printers[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 31(12): 308—312.
[3] WYBLE D R, BERN S R. A Critical Review of Spectral Models Applied to Binary Color Printing[J]. Color Research and Application, 2000, 25(1): 4—19.
[4] URBAN P, GRIGAT R R. Spectral-based Color Separation Using Linear Regression Iteration[J]. Color Research & Application, 2006, 31(3): 229—238.
[5] 徐瑞敏. 二元非线性方程组求根的牛顿迭代法[J]. 山东轻工业学院学报, 2009, 23(4): 89—91.
XU Rui-min. Newton's Method for the Nonlinear Function of Two Independent Variables[J]. Shandong Institute of Light Industry, 2009, 23(4): 89—91.
[6] HERSCH R D. Spectral Neugebauer-based Color Halftone Prediction Model Accounting for Paper Fluorescence[J]. Applied Optics, 2014, 53(24): 5380—5390.
[7] BABAEI V, HERSCH R D. Yule-Nielsen Based Multi-angle Reflectance Prediction of Metallic Halftones[J]. Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering, 2015, 9395.
[8] 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.
WANG Ying, ZENG Ping, WANG Yi-feng, et al. Spectral-based Color Separation for Multi-spectral Images[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(8): 2122—2127.
[9] KIM S H, ALLEBACH J P. Impact of HVS Models on Model-based Halftoning[J]. IEEE Transactions on Image Processing a Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2002, 11(3): 258—269.
[10] HERSCH R D. Spectral Neugebauer-based Color Halftone Prediction Model Accounting for Paper Fluorescence[J]. Applied Optics, 2014, 53(24): 5380—90.
[11] HÉBERT M, HERSCH R D. Analyzing Halftone Dot Blurring by Extended Spectral Prediction Models[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2010, 27(1): 6—12.
[12] MAHY M, DELABASTITA P. Inversion of the Neugebauer Equations[J]. Color Research & Application, 1996, 21(6): 404—411.
[13] LI C, LUO M R. Further Accelerating the Inversion of the Yule-Nielsen Modified Neugebauer Model[C]// The Color Imaging Conference, Is & t and Sid, 2008(5): 84—88.
[14] TAPLIN L, IMAI F, BERN S R, et al. Desktop Spectral-based Printing[J]. Color Desktop Printer Technology: 255—263.
[15] ROGERS G L. Neugebauer Revisited: Random Dots in Halftone Screening[J]. Color Research & Application, 1998, 23(2): 104—113.