

文章编号:1004-4213(2010)11-1982-6

双面半色调图像的光谱反射率色彩精确预测模型

田东文^a,张逸新^{b,†},王庆娟^a

(江南大学 a. 信息工程学院; b. 理学院, 江苏 无锡 214122)

摘要:为了准确地预测双面半色调图像的光谱反射率,并考虑光在纸张内的散射和油墨在纸基上的扩展渗透,建立了一个统一的双面半色调图像光谱反射率精确色彩预测模型.在油墨是非散射介质,纸张为强散射体以及油墨和纸张具有相同的折射率的条件下,引入 Williams-Clapper 模型中光在油墨中斜程传播的思想,考虑进入纸基层的光线横向传播和油墨扩展导致的网点扩大效应以及光在纸基和印刷品-空气界面间的多重内反射,利用多重内反射的网状结构分析法和最小二乘曲线拟合方法,确定了各种不同叠印条件下的理论网点面积率和有效网点面积率的函数关系,得出彩色双面图像的光谱反射色彩精确预测模型.新模型的预测值和测量值达到了较好的匹配,同时这也为彩色双面图像的呈色规律分析和印刷品质量检测系统的研制与开发提供了理论依据.

关键词:色彩预测;双面半色调图像;光谱反射率;网点面积率;网点扩大;多重反射

中图分类号: O433.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103911.1982

0 引言

现有的彩色图像成色理论可以分为两种.一种是直接针对半色调图像过程的,如 Neugebauer 方程、Yule-Nielsen 模型以及 Clapper-Yule 多重内反射效应模型等.另一种理论是基于连续调减色原理的 Kubelka-Munk 理论.这些理论为图像处理领域准确控制图像的色差提供了强而有力的理论依据.

1953 年 Clapper 和 Yule 在 Neugebauer 方程的基础上,提出了经典的 Clapper-Yule 模型.此模型考虑了光线进入着色品后与纸张、着色剂的相互作用以及光线的横向漫射传播.同年,Williams 与 Clapper 提出了经典的 Williams-Clapper 模型^[1-2],对光子在着色层中的传播进行了微观分析.但是,Clapper-Yule 与 Williams-Clapper 模型一样,都没有考虑到纸基层、着色层以及空气-着色界面对光反射与透射的影响.当多色油墨叠印时,计算变得复杂而且容易出错,导致预测准确度下降.随着 Simon 和 Trachsler 将随机过程论中 Markov 链引入到光子在墨层中的效应,2006 年 Mathieu Hebert 将 Markov 链进一步扩展,假设光子由油墨(纸张)入射后仍由油墨(纸张)出射,建立了颜色复制中的双面半色调印刷品的混合预测模型^[3].2008 年张逸新等将经典的单面半色调印刷品 Clapper-Yule 模型推广到可用于预测双面半色调图像的 Clapper-Yule

色彩预测分程模型^[4-5],同时给出了单面墨像经典 Clapper-Yule 色彩预测修正新模型.该模型是基于纸张两面印有同色墨像条件下建立的,不能用于两面印有不同色和不同加网分辨率的双面半色调图像色彩的预测.此外上述两个模型没有考虑到空气-油墨界面对反射和透射的影响以及油墨铺展引起的物理性网点扩大对半色调图像质量的影响.

本文基于描述纸基层和印刷品-空气界面间的多重内反射,考虑进入纸基层的光线横向传播以及由于油墨铺展导致的物理性网点扩大,在 Clapper-Yule 模型的基础上引入 Williams-Clapper 模型所提出的光在油墨层中斜程传播的思想,应用最小二乘曲线拟合方法确定有效网点面积率,提出了双面半色调图像的光谱反射率色彩精确预测模型.

1 着色层的反射与透射理论

根据实际测量得知油墨的折射率为 1.5,纸张的折射率为 1.53,这与文献[3]中的测量结果一致.为简化模型,假设着色剂印到纸上以后,着色剂和纸张有相同的折射率 n_p .下标 0 和 1 分别代表空气和纸张. θ_i 为照射光与半色调图像表面法线的夹角(入射角), $\theta'_i = \arcsin((\sin \theta_i)/n_p)$ 为光线进入着色层时的折射角.记实地着色层反射率为 $R_{01}(\theta_i)$, 折射率为 $T_{01}(\theta_i)$,如图 1.图中, t 为着色层正透射率,描述了着色层对光的吸收能力;光在着色介质中传播的路径为 $1/\cos \theta'_i$,根据比尔定律需要乘以 $1/\cos \theta'_i$ 次幂,即光线在此斜程传播时的着色剂透射率应为 $t^{1/\cos \theta'_i}$.

[†]Tel:0510-859112271

Email:zyx@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2010-04-20

修回日期:2010-06-06

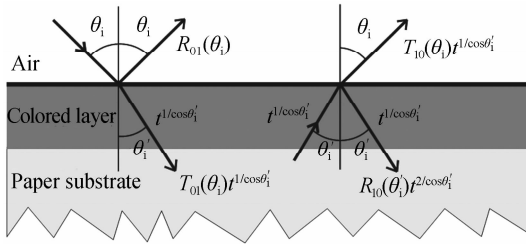


图1 平行光线在空气-着色剂界面的反射率和透射率
Fig.1 Reflection and transmission of directional light at the air-colorant interface

当照射光源为 Lambertian 光源时,总反射率和透射率分别是相应入射光线的反射率和透射率的积分^[6-8].

在纸张侧光线两次通过着色层,所以,此时的着色剂-空气内界面的漫反射率为

$$r_{10}(t) = \int_{\theta_i=0}^{\pi/2} [R_{10}(\theta_i) t^{2/\cos \theta_i'} \sin 2\theta_i'] d\theta_i' \approx r_{10}(e^\beta - 1)/(e - 1) \quad (1)$$

纸张到空气的漫透射率为

$$t_{10}(t) = \int_{\theta_i=0}^{\pi/2} [T_{10}(\theta_i) t^{1/\cos \theta_i'} \sin 2\theta_i'] d\theta_i' \approx t_{10} t^\mu \quad (2)$$

式中, r_{10} 为当 $t=1$ 时 $r_{10}(t)$ 的值, t_{01} 为当 $t=1$ 时 $t_{01}(t)$ 的值, t_{10} 为当 $t=1$ 时 $t_{10}(t)$ 的值, β 和 $\mu = t^{1/\cos \theta_i'}$ 是和纸张、着色剂的折射系数 n_p 相关的常量. 当 $n_p=1.5$ 时, $\beta=2.95, \mu=1.13$.

当纸张用 N 种着色剂以半色调形式叠印时,可以得到 2^N 种颜色,每一种颜色 k 由其在纸上的网点面积率 a_k 和着色剂的透射率 t_k 决定. 相应叠印后颜色的总反射率或总透射率等于每种着色剂的反射率或透射率与相应的网点面积率的乘积之和.

对于 Lambertian 光源,根据式(2)的近似值,可以得到着色界面纸张到空气的漫射透射率为

$$t_{10}(a_k, t_k) = \sum_k a_k t_{10}(t_k) \approx t_{10} \sum_k a_k t_k^{1/\cos \theta_i'} \quad (3)$$

纸张-着色剂内界面的漫射反射率为

$$r_{10}(a_k, t_k) = \sum_k a_k r_{10}(t_k) \quad (4)$$

2 四色双面半色调图像光谱反射率色彩预测模型

图2给出了光强为 I_0 的光从正面进入印品后且从正反两面任一面出射前,光在纸基内经历多次散射的过程. 入射项 T_{in} 描述了从光源到纸张-油墨界面的光量通过量,它是和照明条件以及光线的角分布相关的变量. 出射项 T_{ex} 描述了从纸张-油墨界面到达探测器的光量衰减量. 它是从纸张到空气的透射量,其值与测量条件有关. 考虑到界面的连续性,假设纸基层的反射率和透射率与光线的角分布无关,纸基层整体向上的反射率记为 ρ_1 , 纸基层整

体向下的反射率记为 ρ_2 , 正空气-油墨界面的内反射率记为 r_1 , 反空气-油墨界面的内反射率记为 r_2 , 光在纸基内传播的透射率为 τ . 光从印刷品出射前的多次散射路径可以用图3所示的网状结构图来表示. 图中水平方向的箭头表示光在纸基内的反射(ρ_1 或 ρ_2), 垂直方向的箭头表示光在纸基内的透射(τ), 结点部分表示光在正反面处的内反射(r_1 或 r_2). 起始结点 I_0 表示穿过界面进入着色品的入射光强, I_{rk} 为光从正面着色品-空气界面第 k 次出射的光强, I_{lk} 为光从反面着色品-空气界面第 k 次出射的光强.

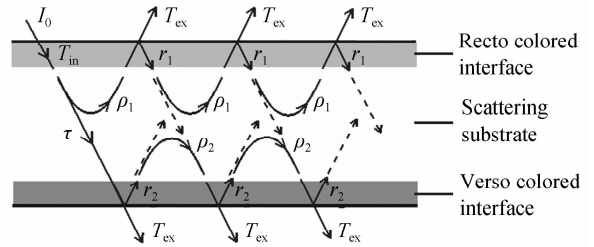


图2 光在双面印刷品里的多重内反射过程
Fig.2 Multiple reflections of light in the recto-verso prints

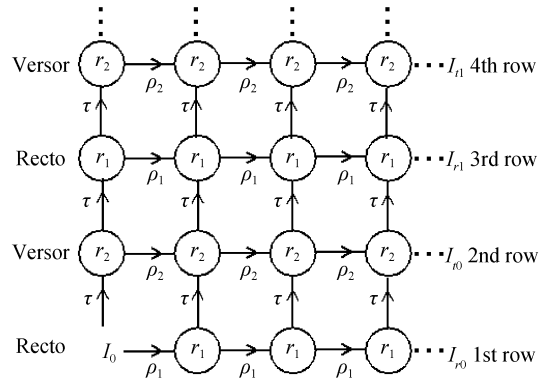


图3 光在双面印刷品里的多重内反射透射的网状结构图
Fig.3 The network structure of multiple reflections and transmissions in the recto-verso prints

综合所有的行和列,应用数学归纳法可以得到

$$\begin{cases} I_{r0} = T_{in} T_{ex} I_0 \frac{\rho_1}{1 - r_1 \rho_1}, & k=0 \\ I_{rk} = T_{in} T_{ex} I_0 \frac{r_1^{k-1} r_2^k \tau^{2k}}{(1 - r_1 \rho_1)^{k+1} (1 - r_2 \rho_2)^k}, & k=1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (5)$$

$$I_{lk} = T_{in} T_{ex} I_0 \frac{r_1^k r_2^k \tau^{2k+1}}{(1 - r_1 \rho_1)^{k+1} (1 - r_2 \rho_2)^{k+1}}, \quad k=1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可得印刷品的整体反射率与透射率分别为

$$R = \frac{I_r}{I_0} = T_{in} T_{ex} \frac{\sum_{k=0}^{\infty} I_{rk}}{I_0} = T_{in} T_{ex} \frac{\rho_1 - r_2 (\rho_1 \rho_2 - \tau^2)}{(1 - r_1 \rho_1) (1 - r_2 \rho_2) - r_1 r_2 \tau^2} \quad (7)$$

$$T = \frac{I_t}{I_0} = T_{in} T_{ex} \frac{\sum_{k=0}^{\infty} I_{tk}}{I_0} = T_{in} T_{ex} \frac{\tau}{(1-r_1\rho_1)(1-r_2\rho_2) - r_1r_2\tau^2} \quad (8)$$

式中,表达式 T_{in} 和 T_{ex} 的值如表 1 和表 2^[9], r_1 和 r_2 值由式(1)和式(4)可求得.

表 1 表达式 T_{in}

Table 1 Expressions for T_{in}

Light source	Ink layer status		
	No ink	Solid layer	Halftone layer
Directional light source	$T_{01}(\theta_i)$	$T_{01}(\theta_i) t^{1/\cos\theta'_i}$	$T_{01}(\theta_i) \sum_k a_k t_k^{1/\cos\theta'_i}$
Lambertian light source	t_{01}	$t_{01}(t) \approx t_{01} t''$	$t_{01}(a_k, t_k) \approx t_{01} \sum_k a_k t_k''$

式中, θ_i 为入射角, θ'_i 为着色剂介质中的折射角.

表 2 表达式 T_{ex}

Table 2 Expressions for T_{ex}

Detector	Ink layer status		
	No ink	Solid layer	Halftone layer
Radiance detector	$T_{10}(\theta_x) n_p^{-2}$	$T_{10}(\theta_x) n_p^{-2} t^{1/\cos\theta'_x}$	$T_{10}(\theta_x) n_p^{-2} \sum_k a_k t_k^{1/\cos\theta'_x}$
Integrating detector	t_{10}	$t_{10}(t) \approx t_{10} t''$	$t_{10}(a_k, t_k) \approx t_{10} \sum_k a_k t_k''$

表中, θ_x 为探测器的探测角度, θ'_x 为介质中与 θ_x 对应的折射角.

纸基层的反射率 ρ_1, ρ_2 和透射率 τ 可以通过间接测量空白纸张的整体反射率和透射率后求解数值方程得到^[10].

四色着色剂以半色调形式叠印在纸张的正反两面上,根据 Demichel 方程计算出每种着色剂在单位面积上所占的比例 a_k . 其中,反射测量的几何条件为 $45^\circ/0^\circ$. 由式(7)和表 1、表 2 中在 $\theta_x = \theta'_x = 0$ 的条件下的 T_{in}, T_{ex} ,可以得到四色双面半色调图像的光谱反射率色彩预测模型

$$R = \frac{t_{01} \sum_{k=1}^{16} a_k t_k'' \cdot T_{10}(0^\circ) \cdot n_p^{-2} \sum_{k=1}^{16} a_k t_k \cdot [1 - \rho_1 \sum_{k=1}^{16} a_k r_{10}(t_k)] [1 - \rho_2 \sum_{k=1}^{16} a_k r_{10}(t'_k)] - [\rho_1 - \sum_{k=1}^{16} a_k r_{10}(t'_k) \cdot (\rho_1 \rho_2 - \tau^2)]}{[\sum_{k=1}^{16} a_k r_{10}(t_k)] [\sum_{k=1}^{16} a_k r_{10}(t'_k)] \tau^2} \quad (9)$$

3 四色双面半色调图像光谱反射率色彩预测模型的修正

在图像印刷过程中,由于印刷压力的作用以及油墨本身的流平性,网点会有不同程度的扩展,其扩展量的大小取决于印刷设备、油墨性能以及承印材料的特性. 这种物理网点扩大的存在,使得印刷后的油墨网点面积率实际值比理论值偏大. 同时,油墨单

独印在纸上的网点扩大率和油墨叠印在其它墨层上的网点扩大率也不相同. 为此,本文以网点面积率为 25%、50% 和 75% 的色块分别印在纸上和实地墨层上,并测量它们与之对应的光谱反射率. 对于每一种油墨均需要进行四次测定,例如以青、品、黄、黑四色油墨印刷时,对于青墨是把青墨分别以半色调形式印在白纸、实地品红墨层、实地黄色墨层和实地红色墨层上;对于品红墨是把品红墨分别以半色调形式印在白纸、实地青色墨层、实地黄色墨层和实地绿色墨层上;黄墨则把半色调的黄墨分别印在白纸、实地青色墨层、实地品红墨层和实地蓝墨层上;黑墨则是把黑墨以半色调的形式分别印在实地青品黄墨层、实地红绿蓝色墨层和灰色墨层上.

假设 $M(\lambda)$ 为测得的光谱反射率,反射测量的几何条件为: $45^\circ a/0^\circ$ (45° 环形照明, 0° 测量). t_s 为实地墨层 s 的透射率, $t_{d/s}$ 为油墨 d 以网点形式印在实地油墨上 s 的透射率, a 为相应的有效面积率. 印刷色块的反射率由式(12)给出,由于反面没有墨层,故

$$T_{in} = T_{01}(\theta_i) \sum_k a_k t_k^{1/\cos\theta'_i} \approx T_{01}(45^\circ) [a \tilde{t}_{d/s} + (1-a) \tilde{t}_s]$$

$$T_{ex} = T_{10}(\theta'_x) n_p^{-2} \sum_k a_k t_k^{1/\cos\theta'_x} = [a \tilde{t}_{d/s} + (1-a) \tilde{t}_s] T_{10}(0^\circ) n_p^{-2}$$

$$\tilde{r}_1 = a r_{10}(\tilde{t}_{d/s}) + (1-a) r_{10}(\tilde{t}_s)$$

$$r_2 = r_{10}$$

为方便记录简化为

$$\tilde{A} = \frac{T_{10}(45^\circ) T_{10}(0^\circ) n_p^{-2} \tilde{\tau} [\tilde{\rho} - r_2 (\tilde{\rho}^2 - \tilde{\tau}^2)]}{(1 - \tilde{r}_1 \tilde{\rho}) (1 - r_2 \tilde{\rho}) - \tilde{r}_1 r_2 \tilde{\tau}^2}$$

此时印刷色块的反射率为

$$\tilde{R} = R(\lambda) = T_{01}(45^\circ) [a \tilde{t}_{d/s} + (1-a) \tilde{t}_s]^2 \cdot \frac{T_{10}(0^\circ) n_p^{-2} \tilde{\tau} [\tilde{\rho} - r_2 (\tilde{\rho}^2 - \tilde{\tau}^2)]}{(1 - \tilde{r}_1 \tilde{\rho}) (1 - r_2 \tilde{\rho}) - \tilde{r}_1 r_2 \tilde{\tau}^2} \tilde{A} [a \tilde{t}_{d/s} + (1-a) \tilde{t}_s]^2 \quad (10)$$

式中,带符号“~”的项为波长 λ 的函数.

由测量值 $M(\lambda)$ 和式(10)的预测值 \tilde{R} 的最小二乘误差 E ,可以得出有效网点面积率 a ,即求 a 使总误差

$$E = E(a) = \| M(\lambda) - R(\lambda) \|_2^2 = \sum_{\lambda=400}^{700} [M(\lambda) - R(\lambda)]^2 \quad (11)$$

为最小,由微积分求极值的方法,参量 a 应满足

$$\frac{\partial E}{\partial a} = 4 \sum_{\lambda=400}^{700} \tilde{A} [M(\lambda) - R(\lambda)] [a \tilde{t}_{d/s} + (1-a) \tilde{t}_s] (\tilde{t}_{d/s} - \tilde{t}_s) = 0 \quad (12)$$

通过求解式(12)即可得出有效网点面积率 a .

当理论网点面积率分别为 0% 和 100% 时,假设

有效网点面积率分别为 0 和 1. 对 0%、5%、25%、50%、75%、95% 和 100% 这七个理论网点面积率根据式 (12) 分别求出四种叠印条件下对应的有效网点面积率, 对每种叠印条件下的理论网点面积率和有效网点面积率采用最小二乘法进行曲线拟合, 得到理论网点面积率 a_0 与有效网点面积率 a 对应函数

关系 $a = f(a_0)$. 图 4 所示为青墨印在空白纸张上的理论网点面积率与有效网点面积率的函数关系. f_c 、 $f_{c/m}$ 、 $f_{c/y}$ 和 $f_{c/my}$ 表示青墨分别与空白纸张、品红、黄和红叠印时的有效网点面积率函数. 品、黄和黑的有效网点面积率函数以此类推. 图 4 中横轴代表理论网点面积率, 纵轴代表有效(实际)网点面积率.

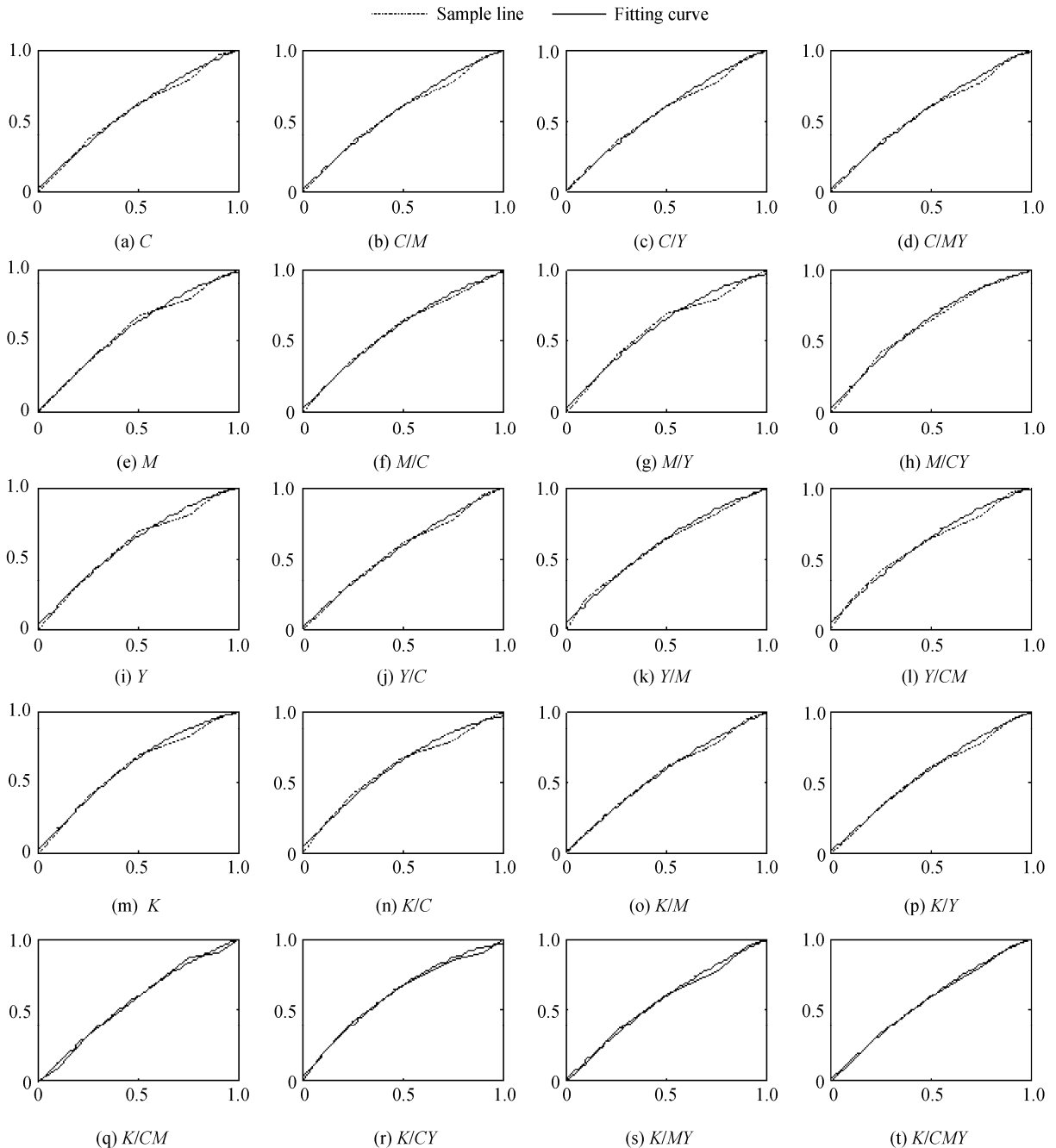


图 4 理论网点面积率 a_0 与有效网点面积率 a 对应函数关系

Fig. 4 The function of the nominal dot area coverage a_0 and the effective dot area coverage a in all superpose conditions

令 c_0 、 m_0 、 y_0 、 k_0 为四色油墨(青、品、黄、黑)的理论网点面积率, c 、 m 、 y 、 k 为相应的有效网点面积率, 总的有效网点面积率可以通过迭代法求解式

(13) 得到, 迭代的初始值为

$$c^{(0)} = c_0, m^{(0)} = m_0, y^{(0)} = y_0, k^{(0)} = k_0$$

有效网点面积率 c 、 m 、 y 、 k 的迭代关系为

$$\begin{cases}
 c = (1-m)(1-y)f_c(c_0) + m(1-y)f_{c/m}(c_0) + \\
 (1-m)yf_{c/y}(c_0) + myf_{c/my}(c_0) \\
 m = (1-c)(1-y)f_m(m_0) + c(1-y)f_{m/c}(m_0) + \\
 (1-c)yf_{m/y}(m_0) + cyf_{m/cy}(m_0) \\
 y = (1-c)(1-m)f_y(y_0) + c(1-m)f_{y/c}(y_0) + \\
 (1-c)m f_{y/m}(y_0) + cm f_{y/cm}(y_0) \\
 k = (1-c)(1-m)(1-y)f_k(k_0) + c(1-m) \cdot \\
 (1-y)f_{k/c}(k_0) + m(1-c)(1-y)f_{k/m}(k_0) + \\
 y(1-c)(1-m)f_{k/y}(k_0) + cm(1-y)f_{k/cm}(k_0) + \\
 cy(1-m)f_{k/cy}(k_0) + m^{(k)}y^{(k)}(1-c^{(k)}) \cdot \\
 f_{k/my}(k_0) + c^{(k)}m^{(k)}y^{(k)}f_{k/cm_y}(k_0) \\
 (k=0, 1, 2, \dots)
 \end{cases} \quad (13)$$

根据式(13)求得有效网点面积率 c, m, y, k 后, 由 Demichel 方程^[11-12]可得 16 种不同颜色的网点在单位面积上所占的比例 $a_k (k=1, 2, \dots, 16)$.

通过把修正后的 a_k 回代到式(9)中即可得到修正后的四色双面半色调印刷品光谱反射色彩预测模型.

对于印刷品的反面与正面类似, 所不同的是理论网点面积率分别记为: c'_0, m'_0, y'_0, k'_0 . 16 种颜色在单位面积上所占的比例为 $a'_k (k=1, 2, \dots, 16)$.

4 实验与讨论

为了验证结论的有效性, 在纸张的反面以理论网点面积率分别为 0%、25%、50%、75% 和 100% 的青品黄 (CMY) 和理论网点面积率分别为 0%、25%、50% 和 75% 的黑 (K) 进行印刷, 通过色彩叠合可以得到 500 个不同色彩的色块, 外加一个实地黑 (K) 共为 501 个色块; 纸张的正面则分别印刷表 3 所列的 22 种不同的颜色. 这样就有 $501 \times 22 = 11\ 022$ 种不同的正反面颜色. 根据预测模型得到的光谱反射和仪器测量得到的光谱反射率, 通过 MATLAB 软件计算它们分别对应的 LAB 值, 并求出预测值和测量值的色差. 对于正面的每一种颜色可以得到 501 个不同的色差, 它们对应的色差平均值以及色差最大值如表 3.

实验中所用到的测量仪器为: X-Rite 530 分光光度计; 印刷设备: 小森 S40 印刷机; 加网线数为 200LPI; 纸张: 金东太空梭 157 g; 印刷色序: KCMY; 油墨: BEST SG(快干型).

从表 3 可以看出, 模型修正之前的平均色差为 3.02 dE, 修正后的平均色差为 0.92 dE, 最大色差 1.91 dE, 这比文献[9]的平均色差 1.3 dE, 最大色差 2.5 要小的多. 因此, 修正后的模型可以更好地预

测彩色双面半色调印刷品的光谱反射率, 实现预测值和测量值的最佳匹配.

表 3 光谱反射率的预测值和测量值的平均色差 $\Delta E00$
Table 3 Average color difference in $\Delta E00$ between measured and predicted reflectance spectra

Recto/ (%)	No calibration	Average $\Delta E00$ over the 501 different verso patches after calibration	The maximum value of 501 group ($\Delta E00$)
No ink	3.1	0.68	1.2
C50	4.2	0.89	1.6
C75	3.6	0.92	2.1
C100	3.9	1.02	2.5
M50	3.1	0.96	1.9
M75	2.8	0.98	3.1
M100	2.6	0.88	1.8
Y50	3.4	1.01	1.7
Y75	2.8	0.73	1.2
Y100	2.9	0.71	1.9
K50	3.0	1.08	2.6
K75	3.7	0.97	2.0
K100	3.6	1.12	1.5
M50Y50	2.6	0.96	1.3
M75Y75	2.5	0.86	1.8
M100Y100	3.2	0.88	2.9
C50Y50	3.1	1.02	1.4
C75Y75	2.8	1.09	1.3
C100Y100	2.2	1.12	2.2
C50M50	2.3	0.87	1.6
C75M75	3.1	0.79	1.5
C100M100	2.0	0.76	3.0
Total average	3.02	0.92	1.91

5 结论

本文通过采用多重内反射的网状结构图分析了光线在正反油墨-空气内界面间的多重内反射、透射, 引入了光在油墨层中斜程传播的思想, 并考虑进入纸基层的光线横向传播以及油墨扩展引起的网点扩大, 对网点面积率进行修正, 确定了在各种不同叠印条件下的理论网点面积率和有效网点面积率的油墨扩展曲线, 得出彩色双面图像的光谱反射色彩精确预测模型. 这个模型可以更加准确地预测彩色双面半色调印刷品的光谱反射率. 与双面半色调图像的 Clapper-Yule 色彩预测分程模型不同的是这个模型由于不涉及到分程系数 b . 因此, 预测的准确度与加网频率无关, 适用于预测双面印刷不同色彩, 不同加网频率的颜色. 这可为双面印刷品的色彩再现规律分析与印刷品质量检测系统的研制提供了理论依据.

参考文献

- [1] HÉBERT M, HERSCH R D. Classical print reflection models: a radiometric approach[J]. *J Imaging Sci Tech*, 2004, **48**(4): 363-374.
- [2] SHORE J D, SPOONHOWER J P. Reflection density in photographic color prints-generalizations of the Williams-Clapper transform[J]. *J Imaging Sci Tech*, 2001, **45**(5): 484-488.
- [3] HÉBERT M. Compositional model for predicting multilayer reflectances and transmittances in color reproduction [D]. Saint Etienne: University Jean Monnet, 2006.
- [4] ZHANG Yi-xin, DU Yan-jun. Clapper-Yule spectral reflection and transmission of halftone color fluorescent image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 365-370.
张逸新,杜艳君. 半色调荧光图像的光谱反射与透射预测模型[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 365-370.
- [5] ZHANG Yi-xin, YI Li-fang. Clapper-Yule reflectivity of halftone color-imaging on fluorescent supports [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12): 2386-2389.
张逸新,易丽芳. 荧光基半色调彩色图像的 Clapper-Yule 光学反射率[J]. *光子学报*, 2007, **36**(12): 2386-2389.
- [6] ROGERS G. A generalized clapper-Yule model of halftone reflectance[J]. *Color Res Appl*, 2000, **25**(6): 402-407.
- [7] YANG Li. Spectral model of halftone on a fluorescent substrate[J]. *J Imaging Sci Tech*, 2005, **49**(2): 179-184.
- [8] ZHANG Yi-xin, ZANG Dong-juan, GE Jing-huan. Clapper-Yule color prediction model of recto-verso halftone images[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(10): 2124-2125.
张逸新,臧冬娟,葛惊寰. 半色调双面图像的 Clapper-Yule 色彩预测模型[J]. *光子学报*, 2008, **37**(10): 2124-2125.
- [9] HÉBERT M, HERSCH R D. Reflectance and transmittance model for recto-verso halftone prints[J]. *JOSA A*, 2006, **23**(10): 2415-2432.
- [10] TIAN Dong-wen, ZHANG Yi-xin. Reflectance and transmittance prediction model of recto-verso multi-ink halftone print[J]. *Packaging Engineering*, 2009, **30**(7): 56-58.
田东文,张逸新. 彩色双面半色调印刷品光谱反射率与透射率预测模型[J]. *包装工程*, 2009, **30**(7): 56-58.
- [11] YANG Li, LENZ R KRUSE B. Light scattering and ink penetration effects on tone reproduction[J]. *JOSA A*, 2001, **18**(2): 360-366.
- [12] EMMEL P, HERSCH R D. Modeling ink spreading for color prediction[J]. *J Imaging Sci Tech*, 2002, **46**(3): 237-246.

Color Precise Prediction Model of Spectral Reflectance for Recto-verso Halftone Images

TIAN Dong-wen^a, ZHANG Yi-xin^b, WANG Qing-juan^a

(a. School of Information Technology; b. School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: In order to predict the spectral reflectance of recto-verso halftone images, the scattering of light within paper and the ink penetration in the substrate are considered and the color spectral reflectance precise prediction model for recto-verso halftone images is proposed. Based on the assumption that ink is a non-scattering medium, paper is a strong scattering substrate, both of which have the same refractive index, the Williams-Clapper model is proposed. The ink-spreading model includes nominal-to-effective dot area coverage functions for each of the different ink overprint conditions by the least square curve fitting method and the network structure of multiple reflection. It turned out that the modeled and the measured colors agree very well, confirming the validity of the used model. The new model provides a theoretical foundation for color prediction analysis of recto-verso halftone images and the development of prints quality detection system.

Key words: Color prediction; Recto-verso halftone image; Spectral reflectance; Dot area coverage; Dot gain; Multiple reflection



TIAN Dong-wen was born in 1983 and is pursuing the M. S. degree in graphic arts at Jiangnan University. His research interests focus on color prediction, color printing, color management and paper optics.



ZHANG Yi-xin was born in 1956 and is a professor of Jiangnan University. He received the Ph. D. degree from Chinese Academy of Sciences. His current research interests focus on laser communication, color management, offset printing, paper optics and light propagating in an atmospheric turbulence.