

基于荧光基 Clapper-Yule 光谱模型的墨层厚度变化预测

王庆娟¹, 张逸新¹, 田东文¹, 葛惊寰^{2,3}

(1. 江南大学, 无锡 214122; 2. 上海出版印刷高等专科学校, 上海 200093; 3. 上海理工大学, 上海 200093)

摘要: 由于荧光纸基会吸收紫外线, 激发可见蓝光或可见紫色荧光, 而影响墨层厚度, 为此基于荧光纸基的 Clapper-Yule 光谱反射色彩预测模型, 考虑了荧光纸张的光学特性、光在荧光纸内部横向传播等特性, 采用最小二乘参数估计方法, 通过印刷品光谱反射率反映荧光纸基的墨层厚度变化量。该模型可为彩色印刷品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一定的理论依据。

关键词: 墨层厚度; 荧光纸基; Clapper-Yule 光谱模型; 光谱反射率; 墨层厚度变化量

中图分类号: TS802.3; TS807 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2011)05-0090-04

Prediction of Ink Thickness Variation Based on Fluorescent Clapper-Yule Spectral Model

WANG Qing-juan¹, ZHANG Yi-xin¹, TIAN Dong-wen¹, GE Jing-huan^{2,3}

(1. Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China; 3. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Because paper with fluorescent additives will absorb ultraviolet light while excite visible blue ray or violet fluorescence, these will certainly affect the blue or violet ink thickness. The traditional methods do not accurately reflect ink thickness changes. Based on the Fluorescent Clapper-Yule spectral reflectance prediction model, considering the expansion of ink, optical properties of paper with fluorescent additives, the internal lateral spread of light in paper with fluorescent additives and other features, an ink thickness variation prediction model was established using least square method and by spectrum reflectance of prints. The model can make a coloring analysis for color prints and provide a theoretical basis for print quality inspection systems development.

Key words: ink thickness; paper with fluorescent additives; Clapper-Yule spectral model; spectrum reflectance; ink thickness variation

在彩色印刷过程中, 墨层厚度对色彩再现有很大的影响, 墨层厚度的一致性衡量印品质量的重要参数之一。在一定的范围内, 印刷品墨层厚度合适与否, 很大程度上决定着印刷品的色彩再现质量^[1]。而对于荧光纸基, 由于可以吸收紫外线, 激发可见蓝光或可见紫色荧光, 墨层厚度会有不同程度的变化, 因此, 严格控制荧光纸基中墨层厚度的变化, 实现色彩的准确复制就变得极为重要。

实地墨层厚度变化量通常由朗伯-比尔定律计算

估测, 半色调印刷墨层厚度则需要用半色调理论来估算, R. D. Hersch 提出了利用色彩模型测算半色调印刷品的墨层厚度变化^[2]。由于荧光纸基和油墨的相互作用所产生的荧光在纸张内部的散射与吸收等因素的影响, 使得原 Clapper-Yule^[3] 油墨预测理论不再适用。

笔者运用荧光纸基的 Clapper-Yule 光谱反射色彩预测模型^[4-5], 考虑光在含有荧光成分的印刷品内部横向传播和多重内反射效应, 以及荧光纸基对光线

收稿日期: 2010-12-13

基金项目: 上海高校选拔培养优秀青年教师科研专项基金(slg08049)

作者简介: 王庆娟(1983—), 女, 山东临沂人, 江南大学硕士生, 主攻纸张光学、印刷品墨层厚度控制、印刷品色彩预测模型及其色再现规律。

的吸收与散射,采用最小二乘参数估计的方法和荧光基 Clapper-Yule 光谱反射预测模型,来预测印刷品墨层厚度的变化。

1 荧光纸基半色调的 Clapper-Yule 色彩预测模型基础

经典 Clapper-Yule 色彩预测模型,描述了光在印刷品和空气界面发生的多重内反射和油墨的垂直透射以及光在纸基内部的散射、横向传播效应,见图 1。

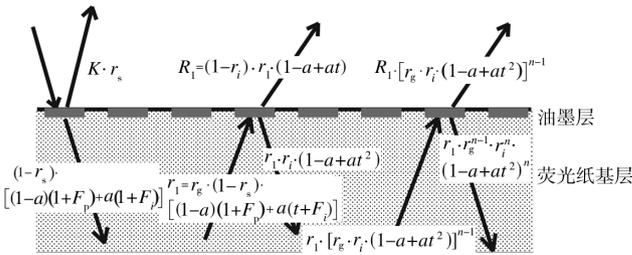


图 1 光在荧光纸基内部的多重内反射

Fig.1 Light multiple reflections in fluorescent paper substrate

在考虑荧光纸基的情况下,可以得到荧光纸基 Clapper-Yule 色彩预测模型的反射率。

非着墨区域的反射率: $R_p(\lambda) = r_g(\lambda) + F_p r_g(\lambda)$

着墨区域的反射率: $R_r(\lambda) = r_g(\lambda)t(1 + F_i)$

式中: r_g 是普通纸张的光谱反射率; F_i 为油墨区域的荧光强度(下标 i 代表各色油墨,下同); t 为油墨

的透射率; $F_p(\lambda)$ 是根据 $F_p = \frac{\int I_u(\lambda')f(\lambda, \lambda')d\lambda'}{I_v(\lambda)}$ 定义的荧光强度, I_u 为紫外光, I_v 为可见光。

因此,进入纸张的光量为 $(1 - r_s)[(1 - a)(1 + F_p) + a(1 + F_i)]$ 。其中: r_s 为印刷品首层表面反射; a 为网点面积率。

在经过一次内反射后,其反射率为:

$$R_1 = r_g(1 - r_s)[(1 - a)(1 + F_p) + a(1 + F_i)] \cdot (1 - a + at)(1 - r_i)$$

式中: $r_i = \int_0^{\frac{\pi}{2}} F_{1/n}(\theta_2) \sin 2\theta_2 d\theta_2$, 是空气 - 印刷品界面的内反射率^[6], $F_{1/n}(\theta_2)$ 是空气-印刷品界面的 Fresnel 反射系数; n 是油墨(纸张)的折射率。在经过 2 次内部反射后,其反射率为:

$$R_2 = r_g(1 - r_s)[(1 - a)(1 + F_p) + a(t + F_i)]r_i \cdot (1 - a + at^2)r_g(1 - r_i)(1 - a + at)$$

同理,经过 n 次内反射后,其反射率为:

$$R_n = r_g(1 - r_s)[(1 - a)(1 + F_p) + a(1 + F_i)] \cdot [r_i(1 - a + at^2)r_g]^{n-1}(1 - r_i)(1 - a + at) \quad (1)$$

当 n 趋向于无穷大时,得到荧光纸基的 Clapper-Yule 模型:

$$R_{F-CY} = Kr_s + \frac{1}{1 - r_g r_i (1 - a + at^2)} \{ r_g(1 - r_i) \cdot (1 - r_s)[(1 - a)(1 + F_p) + a(1 + F_i)](1 - a + at)^2 \} \quad (2)$$

对于三色荧光纸基半色调印刷品,根据 Demichel 方程,网点面积率 a_i 和油墨的透射率 t_i ^[7] 以及方程(2),可以得到三色荧光纸基 Clapper-Yule 色彩预测模型:

$$R(\lambda) = Kr_s + \frac{r_g(1 - r_i)(1 - r_s) \left[\sum_{i=1}^8 a_i(1 + F_i) \right] \left(\sum_{i=1}^8 a_i t_i \right)^2}{1 - r_g r_i \left(\sum_{i=1}^8 a_i t_i^2 \right)} \quad (3)$$

式中,当 $i=1$ 时,即 $a_i = a_1$, 代表非着墨区(纸张空白区)的网点面积率,此时, $F_1 = F_p$ 。

当网点面积率 $a_1 = 0$ 时,根据方程(2) 以及空白纸张表面的光谱反射率 $R_w(\lambda)$, 可以得出荧光纸基的光谱反射率 $r_g(\lambda)$:

$$r_g(\lambda) = \frac{R_w - Kr_s}{R_w r_i - Kr_i r_s + (1 - r_s)(1 - r_i)(1 + F_p)} \quad (4)$$

将 $a=1, R(\lambda) = R_i(\lambda)$ 代入式(2),可以得到荧光基上各色油墨的透射率:

$$t_i(\lambda) = \sqrt{\frac{R_i - Kr_s}{r_g r_i (R_i - Kr_s) + r_g(1 - r_i)(1 - r_s)(1 + F_i)}} \quad (5)$$

式中: i 代表 W(白), C(青), M(品), Y(黄), R(红), G(绿), B(蓝), BK(黑)。

2 基于荧光纸基 Clapper-Yule 光谱预测模型的墨层厚度变化预测

墨量的变化一般是由印刷机运作过程中的放墨量引起的。油墨量的增加或减少都能引起油墨的墨层厚度和网点面积率变化^[8]。在此,假设油墨半色调的网点面积率不发生变化,只有墨层的厚度发生变化,来推导油墨量的变化。假设油墨量等于网点面积率乘以墨层厚度,保持油墨的网点面积率不变,通过

油墨的光谱反射测量值和相应的光谱预测值的最小二乘差值,来推导墨层厚度的变化系数,因此可以用墨层厚度变化系数表示油墨量的变化,见图2。

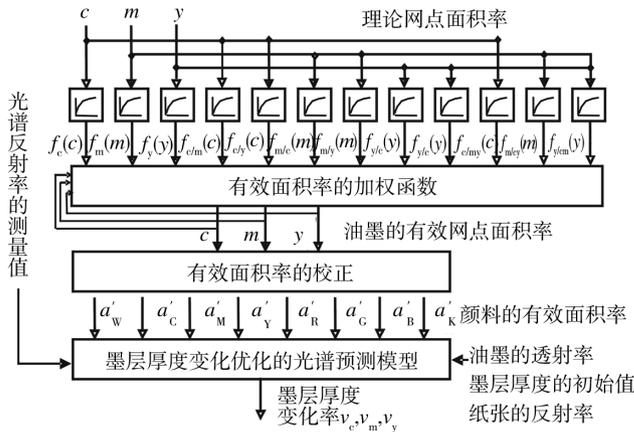


图2 荧光纸基墨层厚度变化量的推导框架

Fig. 2 Ink thickness variations deduction framework for paper with fluorescent additives

根据朗伯-比尔定律,对于非散射油墨,当透射率为 $t(\lambda)$ 的油墨墨层厚度增加 d 时,油墨的透射率变为 $t(\lambda)^d$ 。首先把组成颜料的透射率,即一种油墨或多种油墨叠印得到的油墨的透射率表示出来,然后根据相应的油墨透射率函数,利用最小二乘参数估计方法推导出相对墨层厚度值,然后再根据相对墨层厚度值以及模型预测值和反射光谱测量值,采用最小二乘法计算出墨层厚度的变化量。

对于每一种颜料都需要计算墨层厚度的初始值。单色油墨形成的染料,墨层厚度的初始值只有一个,根据式(5)可以直接推导出它们的透射率。油墨 A 和 B 叠印形成的颜料 AB 的透射率等于它们各自的透射率的乘积^[2]。对于 3 种或更多种油墨也是如此:

$$t_{AB} = t_{A^d}^{Ab} \cdot t_{B^d}^{Ab}; t_{ABC} = t_{A^d}^{Abc} \cdot t_{B^d}^{Abc} \cdot t_{C^d}^{abc} \quad (6)$$

幂指数 d_{Ab} 表示油墨 A 和油墨 B 叠印后油墨 A 的厚度, d_{ab} 表示油墨 A 和油墨 B 叠印后油墨 B 的厚度。引入油墨的相对墨层厚度 d_i 和墨层厚度变化系数 v_i , 在黄、品、青三色印刷过程中,各色油墨的透射率的表达式如下:

$$t_C = t_C^d \cdot v_C; t_M = t_M^d \cdot v_M; t_Y = t_Y^d \cdot v_Y$$

$$t_{CM} = t_{CM}^d \cdot v_C; t_{CY} = t_{CY}^d \cdot v_C \cdot t_{CY}^d \cdot v_Y \quad (7)$$

$$t_{MY} = t_{MY}^d \cdot v_M \cdot t_{MY}^d \cdot v_Y; t_{CMY} = t_{CMY}^d \cdot v_C \cdot t_{MY}^d \cdot v_M \cdot$$

$$t_{CMY}^d \cdot v_Y$$

式中: v_C, v_M, v_Y 分别为青、品、黄油墨对应的墨

层厚度变化的系数。

把上式(7)中等式左边的透射率 t_i 代入到方程(3)中,可以实现半色调印刷品墨层厚度变化量的预测,见图2。与求初始墨层厚度值类似,根据各色的反射光谱测量值和模型预测值之间的最小二乘差值,可以得到墨层厚度变化系数 v_C, v_M, v_Y 。

用相对的墨层厚度值来计算时,单色油墨的初始墨层厚度值 d_C, d_M, d_Y 为 1。下面用最小二乘参数估计法来求解油墨叠印时的相对初始墨层厚度参数 $d_{Cm}, d_{cM}, d_{Cy}, d_{cY}, d_{My}, d_{mY}, d_{Cmy}, d_{cMy}, d_{cmY}, v_C, v_M$ 。

假设 $M(\lambda)$ 为测得的光谱反射率,反射测量的几何条件为: $45^\circ/0^\circ$ 。 t_i 为实地墨层 i 的透射率, d 为墨层厚度, a 为相应的有效面积率,根据式(3)可以得到印刷色块的反射率:

$$R(\lambda) = Kr_s +$$

$$\frac{r_g(1-r_i)(1-r_s) \left[\sum_{j=1}^8 a_j(1+F_j) \right] \left(\sum_{j=1}^8 a_j t_j^{d_i v_i} \right)^2}{1 - r_g r_i \left(\sum_{j=1}^8 a_j t_j^{d_i v_i} \right)^2} \quad (8)$$

由测量的光谱反射率 $M(\lambda)$ 和预测的光谱反射率 $R(\lambda)$ 最小二乘误差可得出 d_i, v_i , 即求 d, v 使总误差:

$$E = E(d/v) = \| M(\lambda) - R(\lambda) \|_2^2 = \sum_{\lambda=400}^{700} [M(\lambda) - R(\lambda)]^2 \quad (9)$$

为最小,由微积分求极值的方法,系数 d, v 应满足 $\frac{\partial E}{\partial d} = 0, \frac{\partial E}{\partial v} = 0$, 然后通过解方程可得出有效初始墨层厚度值 d, v 。

3 实验验证与数据模拟

为了验证结论的有效性,用胶印机印刷一系列的色块来验证基于荧光基 Clapper-Yule 光谱模型的墨层厚度变化预测模型。实验中分别把校正色块和测试色块印在含有荧光成分的非涂布新闻纸上,其中,半色调色块的加网线数为 100 线/英寸。同时,印刷过程中改变各个相应色块的墨量来印刷。墨量增加用“+”来表示,墨量减少用“-”来表示,见表1。

在印刷时为了核实印刷品的质量,对于每一种印刷品制作了相应的油墨扩展改进的荧光纸基的 Clapper-Yule 光谱预测模型,并证实了光谱反射预测的准确性。

表 1 墨量变化及相应的荧光纸基

Clapper-Yule 光谱预测模型精度的验证

Tab.1 Ink flow variation and verification of corresponding Fluorescent Clapper-Yule spectral prediction accuracy

墨量的变化	平均色差	最大色差	色差大于 3 的比率/%
理论值	1.80	5.47	15.02
C+	1.31	4.28	2.95
C+ M+	1.27	5.11	1.51
M+ Y+	1.46	6.44	4.06
Y+	1.48	5.76	3.75
Y+ K+	1.52	6.93	6.48
K+	1.46	5.94	3.19
C+ K+	1.42	5.21	2.05
C+ M+ K+	1.62	5.23	10.02
C+ M+ Y+ K+	1.57	5.71	5.05
M- K+	1.99	5.62	20.76
C- M- K+	1.42	5.77	2.65
C- K+	1.85	6.24	15.19
C-	1.36	5.42	2.93
C- M-	1.32	5.80	3.26
M-	1.31	5.11	2.37
M- Y-	1.30	4.51	2.21
Y-	1.27	4.81	1.36
Y- K-	1.21	5.06	1.51
K-	1.31	5.57	2.04
C- M-	1.19	5.12	1.38
C- M- K-	1.23	4.51	1.82
C- M- Y- K-	1.13	5.32	2.67

4 结论

通过荧光基 Clapper-Yule 光谱反射预测模型来预测荧光纸基印刷品的墨层厚度变化。根据光在荧光纸基内部的多重内反射以及墨层厚度和油墨透射率的关系,对荧光纸基 Clapper-Yule 光谱预测模型进行了扩展,同时引入相对墨层厚度参数和墨层厚度变

化系数来表示墨层厚度的增加和减少量。最后,采用最小二乘参数估计法求出了相应的相对墨层厚度以及墨层厚度变化量。此模型为实现色彩的精确控制与调节提供了一个理论模型,为彩色印刷品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一定的理论依据。

参考文献:

- [1] 胡成发. 印刷色彩与色度学[M]. 北京:印刷工业出版社, 1993.
- [2] HERSCH R D. Deducing Ink Thickness Variations by a Spectral Prediction Model[J]. Color Research and Application, 2009, 34(6): 432-442.
- [3] ROGERS G. A Generalized Clapper-Yule model of Half-tone Reflectance[J]. Color Research and Application, 2000, 25: 402-407.
- [4] 杜艳君, 张逸新. 经典色彩呈色模型[J]. 包装工程, 2006, 27(2): 99-101.
- [5] 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] HEBERT M. HERSCH R D. Extending the Clapper-Yule Model to Rough Printing Supports[J]. Journal of the Optical Society of American, 2005, 22(9): 1952-1967.
- [7] HERSCH R D. Spectral Prediction Model for Color Prints on Paper with Fluorescent Additives[J]. Applied Optics, 2008, 47(36): 6710-6722.
- [8] HERSCH R D F. Improving the Yule-Nielsen Modified Spectral Neugebauer Model by Dot Surface Coverages Depending on the Ink Superposition Conditions[J]. Color Imaging X: Processing, Hardcopy and Applications, 2005, 5667(2): 434-445.
- [5] 陈伊凡. 新型印刷工艺方法——G7[J]. 印刷世界, 2009(2): 33-34.
- [6] 谢铁生. 色彩管理新视点[J]. 印刷技术, 2005(5): 8-12.
- [7] International Digital Enterprise Alliance, Inc. The G7® Specification 2008[EB/OL]. (2008-09-12)[2010-10-15]. http://www.idealliance.org/industry_resources/branding_media_and_color/g7/specification/g7_specification_2009_draft.
- [8] ELLIS Ron. Good G7 is not Cheap; Cheap G7 is not Good[EB/OL]. [2010-10-15]. <http://www.freeprocesscontrol.com/goodg7.html>.
- [9] GERLACH Gerry. Bringing GRACoL Around the World[EB/OL]. [2010-10-15]. http://www.pine.org/nepp/2009/01_09/lead_7.html.

(上接第 83 页)