

一种基于散射理论的光学网点扩大算法

徐军飞, 周小凡

(南京林业大学, 南京 210037)

摘要: **目的** 研究一种基于纸基光散射理论的网目调光学网点扩大算法。**方法** 应用点扩散函数和概率方法, 分析网目调印刷品中光的散射和渗透效应, 推导出印刷品上空白部分、网点部分反射率和网目调印刷品反射率的精确表达式, 在此基础上, 分析了网点光学扩大与印刷品网点面积率、墨层光谱透射率以及纸基光谱反射率的依赖关系, 建立了一种新的光学网点扩大算法模型。将经典的光谱 Murray-Davis 模型与该算法修正后的光谱 Murray-Davis 模型分别预测的光谱反射率, 与印刷品实际测量的光谱反射率作对比验证实验。**结果** 提出算法修正后的光谱 Murray-Davis 模型与实测光谱反射率更加接近, 色差 ΔE_{2000} 最高为 1.53、最低为 0.89, 而人眼对 $\Delta E_{2000} < 2$ 的颜色在视觉上近似相等。**结论** 采用提出的模型修正经典的 Murray-Davis 公式, 进而预测光谱反射率, 达到了很好的效果, 具有更高的精度。

关键词: 概率模型; 光散射; 光学网点扩大; 网目调再现

中图分类号: TS805.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)03-0103-04

An Optical Dot Gain Algorithm Based on the Scattering Theory

XU Jun-fei, ZHOU Xiao-fan

(Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

ABSTRACT: To study a new algorithm for halftone optical dot gain based on the paper-based light scattering theory. Applying point spread function and probability methods, the light scattering and osmotic effect of halftone print were analyzed, and the exact expressions of the reflectivity of the blank part, the dot part and the halftone print were deduced. Furthermore, the dependence of the optical dot gain on the dot area coverage of the print, the ink layer spectral transmittance, and the paper-based spectral reflectivity was analyzed, and a new halftone optical dot gain algorithm model was established. Comparative verification experiments were conducted for the predicted spectral reflectivity and the measured spectral reflectivity of the print using the classical spectral Murray-Davis model and the Murray-Davis model amended using this algorithm. The Murray-Davis model amended using this algorithm gave a closer value with the measured spectral reflectivity, with a maximum chromatic aberration of $\max \Delta E_{2000}=1.53$ and a minimum chromatic aberration of $\min \Delta E_{2000}=0.89$. For colors with $\Delta E_{2000} < 2$, the human eyes showed visual approximate equality. Using the classical Murray-Davis amended by the proposed model, better prediction results of spectral reflectivity were obtained, with higher accuracy.

KEY WORDS: probability model; light scattering; optical dot gain; halftone reproduction

所谓印刷过程中的网点扩大, 是指印张上的网点面积率大于印版上的网点面积率, 使得实际印刷

收稿日期: 2014-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(31270629)

作者简介: 徐军飞(1988—), 男, 浙江衢州人, 南京林业大学硕士生, 主攻网目调颜色预测模型、光学网点扩大算法和纸张散射理论。

通讯作者: 周小凡(1965—), 男, 浙江绍兴人, 南京林业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为纸张散射理论、特种纸、纸制微滤膜、纸制超滤膜技术等。

图像变暗^[1]。M.H é bert 等^[2]认为是网点边缘的模糊以至于增加了油墨对光的吸收,从而造成墨层网点面积率比真实值大。网点扩大分为物理网点和光学网点扩大。物理网点扩大是在印刷压力作用下网点尺寸(大小)向四周扩张的现象,是网点的真实扩大^[3];而光学扩大是由印刷品表面的光渗现象而产生的,Brian^[4]认为光学网点扩大是赫尔曼错觉。GB/T 18720—2002《印刷技术印刷测控条的应用》中,把网点扩大定义为,印刷品的网目调阶调值与印版上同部位相对应的网目调阶调值之间的差值。但是长期以来,由于印版上的网目调阶调值测量困难,一般采用测量晒版原版的网目调阶调值取代印版的网目调阶调值。目前,已有精密仪器(如 iCPlate II)可以较精确地测量印版上的网点面积率,因此,这里的网点扩大值指印刷品的网点面积率与印版上的网点面积率的差值。

人们对网点扩大的研究历史已久。1956年,Yule-Nielsen 对基材上的光渗现象发表了其重要研究工作,在经典 Murray-Davis 公式的反射率指数上增加了修正系数 n ,以此来修正光学扩大(光渗现象)的影响,因此光学网点扩大也常被称作 Yule-Nielsen 效应^[5-6]。但在实际应用中,采用 Yule-Nielsen 修正系数修正后预测的光谱精度还不能达到要求,而且由于系数 n 在反射率的指数上,求解十分困难。通常,得到参数 n 仅仅只能通过实验,在 Yule 和 Nielsen (1951)^[6]、Pearson (1980)^[7]、William 和 Compton (1989)^[8] 的研究中,以及在 ANSI/CGATS 4-1993^[9] 中均说明,Yule-Nielsen 修正参数 n 无法利用数学运算方式计算出来。也就说,参数 n 对于具体的印刷条件很难得到。后来,许多学者另辟蹊径解决光学网点扩大现象,并求解光学网点扩大值,G. Rogers 是首次采用点扩散方法求解光学扩大的研究者,但从实验结论看并未取得较好的结果。L. Yang 也进行了相关的研究,在他们的研究中,网点面积率这个参数并没有具体定义,很难进行试验结果验证。

鉴于此,避开 Yule-Nielsen 参数 n 的求解,基于前人的研究,建立一个理论方法研究光学网点扩大。同样,从散射和概率角度研究光学网点扩大,但在具体求解中研究的思路不同,对于光出射和入射的概率理解不同,并建立新的概率等式,且在模型的光通量求解中考虑了反射率参数 R_p ,给出了网点面积率的具体定义和求解方法,最后通过试验证实建立的模型取得了更精确的结果。

1 基于点扩散函数的概率方法印刷品光学分析

点扩散函数是评价光学系统成像质量的基本工具,对于衍射受限成像系统,点扩散函数即是计算 Fraunhofer 衍射积分的值^[10]。单色印刷品基本几何分析见图1,印刷部分表面被划分为2部分: $\Sigma S_1 d\sigma_1$ 表示网点部分; $\Sigma S_2 d\sigma_2$ 表示空白部分。同时为了简单起见,假设网点部分墨层厚度是一致的。

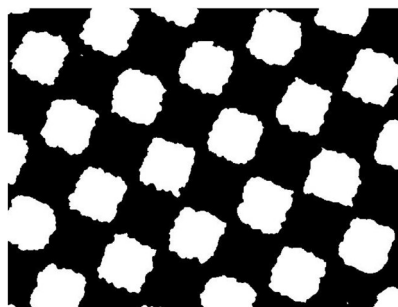


图1 半色调印刷品灰度图像

Fig.1 Grayscale image of halftone print

Rogers^[11]分析了微观网点光散射的过程。假设 x 是网点部分 ΣS_1 的任意位置, y 是空白纸基 ΣS_2 的任意位置,设光量为 $I_0 d\sigma_1$ 的光子照射到网点 x 上,在 y 区域放置探测器测试出射光量。同样,也可设光量为 $I_0 d\sigma_2$ 的光子照射到网点 y 上,在 x 区域放置探测器测试出射光量。在不考虑油墨渗透的影响下,根据光路可逆原理,在光照一致下,光从区域 ΣS_1 到 ΣS_2 的散射和从区域 ΣS_2 到 ΣS_1 的散射是相等的。散射光量表达式为:

$$J_{12}=J_{21}=I_0 T_p \bar{P} f (1-f) R_p \quad (1)$$

式中: I_0 为入射光强; f 为物理网点面积率; T_p 为油墨透射率; R_p 为纯基材的反射率。根据文献[12],点扩散参数 $\bar{P}$ 可以近似计算为:

$$\bar{P}=R_p(1-f^m(1-f)^{1-m}) \quad (2)$$

式中, m 的建议值为0.7。

采用 Murray-Davis 公式求解,得到的网点面积率已经包含了光学扩大。Koopipat 研究发现,采用透射光谱得到的网点面积率没有发生散射,因此可以作为物理网点面积率。其中,透射的 Murray-Davis 公式^[13]为:

$$f = \frac{T_m - T_p}{T_s - T_p} \quad (3)$$

式中: T_m 为印刷品网点透射率; T_s 为印刷品实地透射率; T_p 为纸张透射率。

1997年,Huntsman首次介绍了概率模型^[14],Arney为了分析光的散射又扩展了概率模型^[15,16],在此,综合了他们的研究方法来分析光散射原理。

众所周知,光照射在印刷品上,由于纸基和油墨等因素,印刷品上的光会发生光渗现象,造成光学网点扩大。定义 p_{11}, p_{12} 为光从 ΣS_1 区域入射、从 ΣS_1 区域和 ΣS_2 区域出射的概率。同理,定义 p_{21}, p_{22} 为光从 ΣS_2 区域入射,从 ΣS_1 区域和 ΣS_2 区域出射的概率。众所周知,油墨为半透明体,设油墨透射率为 T_i ,网点部分和空白部分的面积率分别为 f 和 $(1-f)$,整个系统的光照强度为 I_0 ,光照射到区域 ΣS_1 和 ΣS_2 的光通量分别为 $I_0 f$ 和 $I_0(1-f)$ 。显而易见:

$$p_{11}+p_{12}=1 \quad (4)$$

$$p_{21}+p_{22}=1 \quad (5)$$

由于照射在网点部分的光线穿过油墨层,由墨层下的纸基将透射光反射回来,再次穿过油墨层反射回来,其经过了2次油墨的透射。故有:

$$J_{11}=T_i^2 I_0 f p_{11} R_p \quad (6)$$

从墨层入射,由纸基出射,或从纸基入射,由墨层出射的光线,只经过1次油墨层,因此都可以写成:

$$J_{12}=T_i I_0 f p_{12} R_p \quad (7)$$

$$J_{21}=T_i I_0 (1-f) f_{21} R_p \quad (8)$$

而从纸基入射又从纸基出射的光,没有经过墨层吸收,故有:

$$J_{22}=I_0 (1-f) f_{22} R_p \quad (9)$$

来自空白部分射出总的光通量(包括由网点入射从基材部分出射和由纸基入射又从纸基出射的光)为:

$$J_p=I_0 [T_i p_{12} f + p_{22} (1-f)] R_p \quad (10)$$

光在区域 ΣS_1 总的光通量为:

$$J_i=T_i I_0 [T_i p_{11} f + p_{21} (1-f)] R_p \quad (11)$$

那么,从空白部分射出总的反射率(包括从网点入射从基材部分出射和从纸基入射又从纸基出射的光)为:

$$\rho_p = \frac{J_{12} + J_{22}}{(1-f)f_0} = [p_{22} + p_{12} \frac{f}{1-f} T_i] R_p \quad (12)$$

$$\rho_i = \frac{J_{11} + J_{21}}{f I_0} = [p_{11} T_i^2 + p_{21} \frac{1-f}{f} T_i] R_p \quad (13)$$

由公式(1)(7)(8)有:

$$p_{12} f = p_{21} (1-f) \bar{p} f (1-f) \quad (14)$$

从而求出概率 p_{22} :

$$p_{22} = 1 - p_{21} = 1 - \bar{p} f \quad (15)$$

同理,可以得到 p_{11} :

$$p_{11} = 1 - p_{12} = 1 - \bar{p} (1-f) \quad (16)$$

根据公式(12)(14)(15),可得半色调空白纸基的反射率:

$$\rho_p = [1 - \bar{p} f + \bar{p} f T_i] R_p \quad (17)$$

由公式(13)(14)(16),可得精确半色调网点部分反射率为:

$$\rho_i = T_i^2 R_p + \bar{p} (1-f) T_i R_p (1-T_i) \quad (18)$$

2 光学网点扩大模型

式(17)(18)表明, ρ_i 和 ρ_p 不再是经典的Murray-Davis公式中的常数 R_i 和 R_p ,而是考虑光的散射作用(光学扩大)的精确的光谱反射率。由此,可以得到精确的半色调印刷品的反射率(包含光学网点扩大)为:

$$\rho(f) = \rho_p (1-f) + \rho_i f = R_p (1-f) + R_i - \bar{p} f (1-f) (1-T_i)^2 R_p \quad (19)$$

式(19)是这里研究的重要成果。当假设光照射在印刷品上不发生折射、散射现象时,则有 $\bar{p}=0$,式(19)则成为经典的Murray-Davis公式:

$$\rho(f) = R_p (1-f) + R_i f = R_{MD}(f) \quad (20)$$

由此可见,经典的Murray-Davis公式是概率模型的特殊形式。

根据式(19)(20)可以得出:

$$\rho(f) = R_{MD}(f) - \Delta R_{opt} \quad (21)$$

采用经典Murray-Davis方法求解的半色调反射率小于实测反射率,其中的差值就是众所周知的光学网点扩大的反射率。由光学网点扩大引起的反射率减小部分为:

$$\Delta R_{opt} = \bar{p} f (1-f) (1-T_i)^2 R_p \quad (22)$$

如果使用Murray-Davis公式预测光谱反射率时,为了使预测的光谱反射率与视觉效果更加接近,那么光学网点扩大部分就应该被考虑进去,则必须用 $f + \Delta f_{opt}$ 代替物理的网点面积率 f ,即:

$$\rho(f) = R_{MD}(f + \Delta f_{opt}) \quad (23)$$

最终的光学扩大表达式为:

$$\Delta f_{opt} = \frac{\bar{p} f (1-f) (1-T_i)^2}{(1-T_i^2)} \quad (24)$$

3 结果及分析

将上述推导的概率模型和网点扩大计算公式在

MATLAB 软件上进行编程计算,根据式(24)求解实验印刷品样张的光学网点扩大值,得到光学网点扩大曲线,见图2。

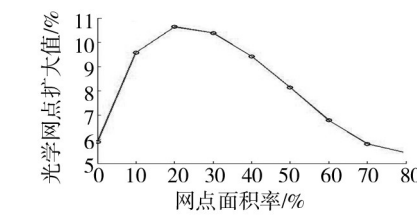


图2 光学网点扩大曲线
Fig.2 The optical dot gain curve

分别采用 $R_{MD}(f)$, $R_{MD}(f+\Delta f_{opt})$ 计算印刷品的光谱反射率,与实测光谱反射率对比,见图3。限于篇幅,

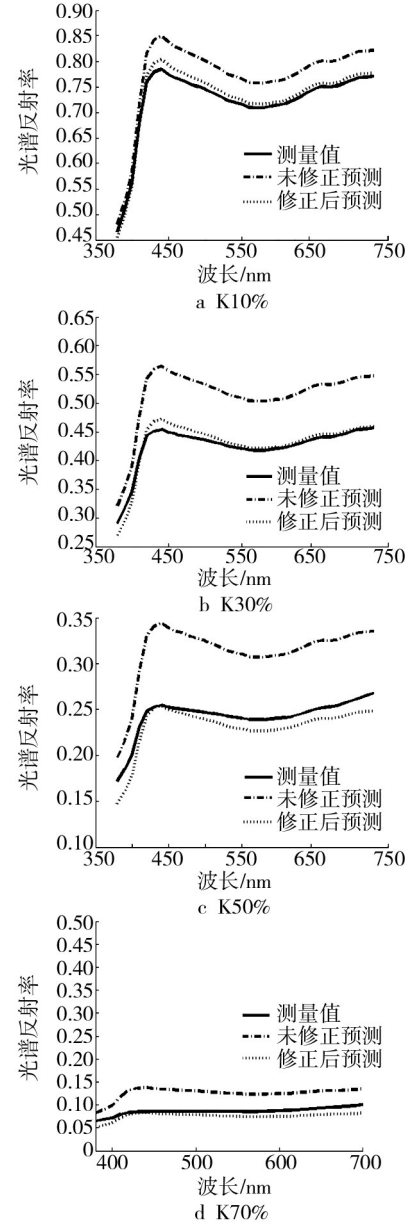


图3 印刷品的 $R_{MD}(f)$, $R_{MD}(f+\Delta f_{opt})$ 预测光谱与光谱实测值比较
Fig.3 Comparison of the and predicted spectra and the actual measured values

仅采用黑色油墨网点面积率 K 的10%,30%,50%和70%作为实验数据。经过验证,该模型推导出的表达式,对青、品红、黄油墨的各网点梯尺样张同样适用,可以通过试验进行验证。其中,透射率 T_i 采用分层的Clapper-Yule模型计算^[17]。

由图3可见,采用建立的光学网点扩大 Δf_{opt} 模型修正Murray-Davis公式,预测的光谱反射率与实测值达到了很好的匹配效果。

为了评估预测的半色调印刷品光谱反射率与实测值的误差,分别采用G.Sharma精确改进的色差公式 ΔE_{00} ^[18]计算两者的色差,见表1。

表1 预测的光谱反射率与实测值的色差 ΔE_{2000}
Tab.1 The chromatic aberration between the predicted spectral reflectance and the actual measured values

网点面积率/%	$R_{MD}(f)$	$R_{MD}(f+\Delta f_{opt})$
10	2.51	1.53
30	2.71	1.24
50	3.42	1.02
70	3.47	0.89

4 结语

以点扩散函数和概率模型为基础,建立了网点光学扩大与网点面积率、墨层透射率、点扩散参数及纸基光谱反射率的关系式。研究中证实了采用提出的模型修正经典的Murray-Davis公式,进而预测光谱反射率达到了很好的效果,说明建立的光学网点扩大模型是精确的。该模型仅针对单色半色调印刷品的研究,且着重研究光散射对网点扩大的光学影响,至于多色叠印和油墨渗透的影响,以及网点光学扩大公式与Yule-Nielsen效应的关系,有待进一步研究。

参考文献:

[1] YANG L, LENZ R, KRUSE B. Light Scattering and Ink Penetration Effects on Tone Reproduction[J]. Opt Soc Am A, 2001, 18(2):360—366.
[2] HÉBERT M, HERSCH R D. Analyzing Halftone Dot Blurring by Extended Spectral Prediction Models[J]. Opt Soc Am, 2010, 27(1):6—12.
[3] YANG L. A Unified Model of Optical and Physical Dot Gain in Print Color Reproduction[J]. J Imaging Sci Technol, 2004, 48(4):347—353.
[4] LAWLER R. Know the Enemy: Understanding Dot Gain and

- in Printing Machine[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
- [12] ELMARAGHY H A, ALGEDDAWY T, AZAB A, et al. Change in Manufacturing—research and Industrial Challenges[C]// Proceedings of 4th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV), Montreal, Canada, 2011.
- [13] 武吉梅, 王伟鹏, 王月英. 印刷机张力控制系统的建模与仿真[J]. 包装工程, 2007, 28(6): 66—68.
WU Ji-mei, WANG Wei-peng, WANG Yue-ying. Modeling and Simulating of the Tension Control System of Printing Press [J]. Packaging Engineering, 2007, 28(6): 66—68.
- [14] 陈文革, 蒋文燕, 黄学林. 我国凹版印刷机的现状及发展方向[J]. 包装工程, 2008, 29(4): 169—171.
CHEN Wen-ge, JIANG Wen-yan, HUANG Xue-lin. Present Situation and Development Direction of Gravure Press in Our Country[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(4): 169—171.
- [15] 张家硕. 凹版印刷机无轴套印系统控制策略的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
ZHANG Jia-shuo. Research on Control Strategy of Gravure Printing Machine Shaftless Chromatography System[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.
- [16] 朱剑. 自动套印伺服控制系统的设计与实现[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2012.
ZHU Jian. Study and Design on Auto-register Servo Control System[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2012.
- [17] 康芳芳. 无轴传动控制器的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
KANG Fang-fang. Research on Shaftless Drive Controller[D]. Xi'an: Xidian University, 2009.

(上接第 106 页)

- Its Effects[R]. 1997.
- [5] RUCKDESCHEL F R, HAUSER O G. Yule-Nielsen Effect in Printing: a Physical Analysis[J]. Appl Opt, 1978, 17(21): 3376—3383.
- [6] YULE J A C, NIELSEN W J. The Penetration of Light into Paper and Its Effect on Halftone Reproduction[C]// Proc TAGA, 1951: 65—76.
- [7] PEARSON M. Value for General Conditions[C]// Proc TAGA, 1980: 415—425.
- [8] WILLIAM W P. A Practical Approach to N-Value[C]// Proc TAGA, 1989: 142—151.
- [9] ANSI: CGATS.4—1993, Graphic Technology—graphic Arts Reflection Densitometry Measurements—terminology, Equations, Image Elements and Procedures Reston[S].
- [10] 赵晨飞, 韩卿, 邹晨, 等. 尤尔-尼尔森光谱介堡模型中修正指数的研究[J]. 包装工程, 2013, 34(3): 113—115.
ZHAO Chen-fei, HAN Qing, ZOU Chen, et al. Research on Correction Factor of Yule-Nielsen Spectral Neugebauer Model [J]. Packaging Engineering, 2013, 34(3): 113—115.
- [11] 徐军飞, 徐锦林. 光学网点增大研究综述及网点面积率探讨[J]. 中国印刷与包装研究, 2012, 4(1): 1—6.
XU Jun-fei, XU Jin-lin. Review of Optical Dot Gain and Discussion of Dot Percentage[J]. China Printing and Packaging Study, 2012, 4(1): 1—6.
- [12] 江月松, 邱志伟, 李铮. 点扩散函数的一维数值计算及其 Matlab 实现[J]. 红外与激光工程, 2004(8): 405—408.
JIANG Yue-song, QIU Zhi-wei, LI Zheng. One-dimensional Digital Computation and Realization on Matlab of Point Spread Function[J]. Infrared Laser Engineering, 2004(8): 405—408.
- [13] ROGERS G. Optical Dot Gain: Lateral Scattering Probabilities [J]. J Imaging Sci Technol, 1998(42): 341—345.
- [14] YANG L, LENZ R, KRUSE B. Light Scattering and Ink Penetration Effects on Tone Reproduction[J]. J Opt Soc Am A, 2001(18): 360—366.
- [15] KOOPIPAT C, TSUMURA N, FUJINO M. Effect of Ink Spread and Optical Dot Gain on the MTF of Ink Jet Image[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2007, 46(4): 321—325.
- [16] HUNTSMAN J. A New Model of Dot Gain and Its Application to a Multilayer Color Proof[J]. J Imaging Sci Technol, 1987(13): 136—145.
- [17] ARNEY J. A Probability Description of the Yule-Nielsen Effect[J]. J Imaging Sci Technol, 1997(41): 633—636.
- [18] 徐咏驰, 周世生, 徐锦林. 单色实地印刷品颜色预测模型[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(3): 56—60.
XU Yong-chi, ZHOU Shi-sheng, XU Jin-lin. Color Prediction Model for Single Color Solid Prints[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(3): 56—60.
- [19] SHARMA G, DALAL E N. The CIEDE2000 Color-difference Formula: Implementation Notes, Supplementary Test Data, and Mathematical Observations[J]. Color Res Appl, 2005, 30(1): 21—30.