

基于光散射概率函数的半色调反射率模型

刘萧豪, 王琪

(南京林业大学 江苏省制浆造纸科学与技术重点实验室, 南京 210037)

摘要: **目的** 以调幅和调频网点为研究对象, 针对2种网点分别建立半色调反射率模型, 并将网点结构的差异引入模型。 **方法** 基于 Murray-Davies 模型理论推导半色调反射率模型, 并以不同光散射概率函数体现不同网点结构。采用数学显微采集系统对半色调印品进行了数字化采集, 将数字图像灰度值转化为对应的反射率值, 通过分析反射率直方图极值特征得到半色调印品空白反射率和着墨部分反射率, 再经数据拟合确定理论推导模型中的参数。 **结果** 基于总反射率和光谱反射率的验证实验, 结果表明调幅和调频网点模型拟合优度判定系数 R^2 分别为 0.9821 和 0.9520。 **结论** 所建立模型能够体现网点结构的差异, 精度高, 适用性强。

关键词: 光散射概率函数; 调幅网点; 调频网点; 反射率模型

中图分类号: TS801

文献标识码: A

文章编号: 1001-3563(2014)01-0108-06

Halftone Printing Reflectance Model Based on Light Scattering Probability Function

LIU Xiao-hao, WANG Qi

(Jiangsu Provincial Key Lab of Pulp and Paper Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

ABSTRACT: **Objective** To establish reflectance models for AM and FM dots which take the difference of dot structure into account. **Methods** Based on light scattering probability function which describes the optical properties mathematically and the Murray-Davies model, reflectance models suit for different dots were inferred. Halftone printings' gray values digitized by microscopic acquisition system were transformed into reflectance values. Through the reflectance histogram, the reflectance of not printed paper and printed ink was obtained. By means of fitting measurement reflectance and model predicted reflectance, parameters of the model were determined. **Results** The evaluation based on total reflectance and spectral reflectance indicates that the R^2 of AM dots model and FM dots model is 0.9821 and 0.9520. **Conclusion** The models for AM and FM dots are accurate and applicable.

KEY WORDS: light scattering probability function; AM dots; FM dots; reflectance model

半色调网点反射率模型描述印刷呈色过程, 预测色彩再现。Murray-Davies 模型^[1]是最早的反射率模型, Yule-Nielsen 模型^[2]纳入边缘效应的影响, 通过引入修正参数 n , 对 Murray-Davies 模型进行了修正。在 Yule-Nielsen 模型基础上, Clapper-Yule 模型考虑了墨层与纸张间散射和界面反射现象。Kubelka-Munk 理论^[3]经过 Saunderson 修正, 在研究中引入了

光线在介质内多重反射产生的影响。除此之外, 点扩散函数 PSF^[4]、调制传递函数 MTF^[5] 也被运用到研究中。综合以往的研究成果, 各模型的建立与修正都各有其长, 但均忽略了网点结构形态对光反射率的影响, 未对不同形态网点及呈色模型的差异进行研究。文中通过对半色调印品光学信息的数字化采集, 以概率函数作为光散射现象的数学形式, 分别给出适用于

调幅和调频网点的光散射概率函数,在此基础上建立了不同结构网点的半色调反射率模型。

1 半色调印品光学特性

1.1 半色调印品数字化采集

数字化采集系统采集的图像信息是以 0 ~ 255 共 256 级的灰度再现,图像中像素灰度的变化体现了半色调印刷品微观明暗变化。将图像的灰度值转变成半色调印刷品反射率,需要对图像灰度数据进行处理。研究表明,数字化采集图像的灰度值与被采集物的反射率成线性关系^[6]。将灰度数据 G 转化为反射率 R 可采用式(1)^[7]:

$$R_{\text{object}} = R_{\text{relative}} \cdot R_{\text{paper}} = \frac{G - G_{\text{dark min}}}{G_{\text{white avg}} - G_{\text{dark min}}} \cdot R_{\text{paper}} \quad (1)$$

式中: R_{object} 为被采集物的反射率; R_{relative} 为相对反射率; R_{paper} 为纸张反射率; $G_{\text{dark min}}$ 为设备采集黑色标板所得图像灰度的最小值; $G_{\text{white avg}}$ 为设备采集白色标板所得图像灰度的平均值,其中白色标板为未印刷的纸张空白部分。

相对反射率 R_{relative} 可由图像灰度 G , 黑色标板最小灰度 $G_{\text{dark min}}$, 白色标板平均灰度 $G_{\text{white avg}}$ 计算得到。

1.2 半色调印品反射率直方图

理想状态下,半色调印刷品呈色由着墨图文部分和非着墨空白部分决定,着墨与空白二值体系是对半色调呈色的最简单认识。事实上,由于存在光散射现象,半色调网点周围存在光学网点扩大的有色区域,半色调印刷品呈色远比二值体系复杂^[8-9],半色调网点普遍存在光学网点扩大(见图 1)现象。

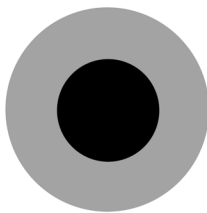


图 1 半色调网点光学网点扩大
Fig. 1 Diagram of optical dot gain

理想状态下,即以二值体系考查半色调印刷品,其反射率直方图只包含纸张空白部分的反射率 R_p 和图文着墨部分的反射率 R_i ,见图 2。如图 2a 所示,随着网点面积率的增加, R_p 和 R_i 为定值,改变的只是

R_p 和 R_i 所占的比例,对应 25% 的网点,其 R_i 占 25%, R_p 占 75%。

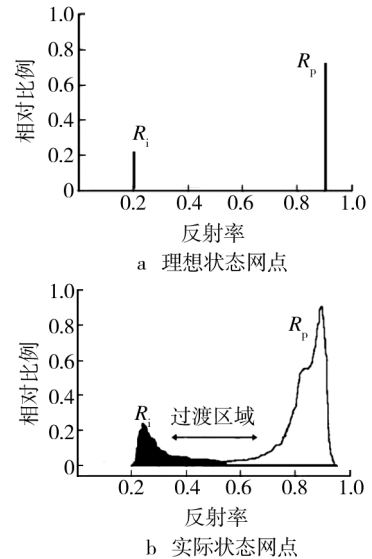


图 2 理想和实际状态网点的反射率直方图

Fig. 2 Reflectance histograms of ideal dot and actual dot

实际状态下,由于网点受到光散射和纸张油墨不均匀的影响,所以其反射率直方图分布会产生变化,见图 2b。实际半色调网点并非呈现二值分布,在 2 个峰值之间存在过渡区域。2 个峰值中一个代表墨部分的反射率 R_i ,另一个代表空白部分的反射率 R_p ^[7]。半色调印品数字化采集图像的灰度信息根据式(1)可计算出反射率,经统计分析得到反射率直方图,根据直方图峰值点确定 R_i 和 R_p ,以此作为建立模型的数据基础。

2 光散射现象的数学模型

2.1 光散射函数的建立

Murray-Davies 模型认为半色调反射率是关于网点面积率 F 、空白部分反射率 R_p 和着墨部分反射率 R_i 的函数。遵循 Murray-Davies 模型的基本思想,文中采用概率描述作为表征光在图文与空白之间散射传播行为的数学方法。由于入射和出射区域不同,入射光照射到半色调印刷品表面有 4 种不同的出射情况,见图 3。这 4 种情况分别为:着墨部分入射,空白部分出射;着墨部分入射,着墨部分出射;空白部分入射,空白部分出射;空白部分入射,着墨部分出射。对应地用概率表示这 4 种情况,分别为 $1 - P_i, P_i, 1 - P_p,$

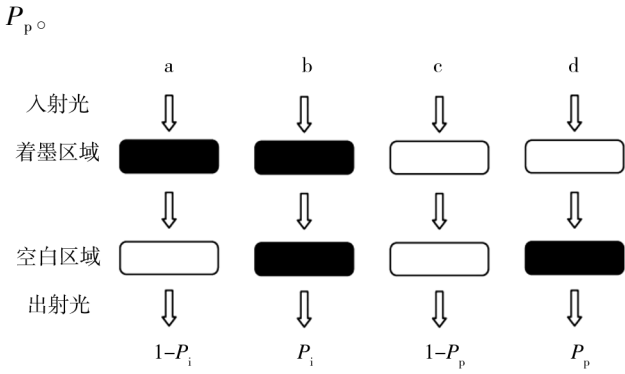


图3 半色调印刷品光散射概率分析

Fig. 3 Analysis of light scattering probability for halftone printing

假设印刷网点面积率为 F , 未印刷纸张自身反射率为 R_g , 油墨层透射率为 T_i , 当入射光量 I_0 照射到印刷品表面时, 其反射光量分布情况见图4。以图4b为例, 其代表着墨部分入射、着墨部分出射的情况。从着墨部分入射的光量为 I_0F , 经油墨层透射后, 到达纸张内部的光量为 I_0T_iF 。纸张自身的反射率为 R_g , 经纸张内部后, 光量变为 $I_0T_iFR_g$ 。由图3b可知, 该种情况下光散射概率为 P_i , 再经过一次油墨层, 最终由着墨部分入射, 着墨部分出射的光量为 $P_iI_0T_i^2FR_g$ 。同上, 可依次推导其他3种情况的反射光量分布。

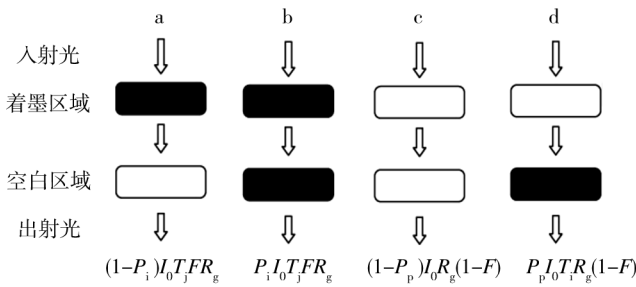


图4 半色调印刷品反射光量分布情况

Fig. 4 Reflectance distribution of halftone printing

由图4可知, 空白部分出射的光量 I_p 由图4a和图4c 2部分构成。

$$I_p = R_g I_0 [FT_i(1-P_i) + (1-F)(1-P_p)] \quad (2)$$

为了得到空白部分反射率 R_p , 可用空白部分出射光量 I_p 除以入射光量 $I_0(1-F)$ 。结果显示, R_p 是一个关于网点面积率 F 的函数^[10]:

$$R_p = R_g \left[T_i(1-P_i) \frac{F}{1-F} + (1-P_p) \right] \quad (3)$$

同理, 着墨部分反射率 R_i 可用着墨部分出射光量 I_i 除以着墨部分的入射光量 I_0F 得:

$$R_i = R_g T_i \left[T_i P_i + P_p \frac{1-F}{F} \right] \quad (4)$$

考虑一种特殊情况, 当 $T_i = R_g = 1$ 时, 即油墨层对光完全透射, 纸张对光完全反射, 此时 $R_p = R_i$ 。联立式(3)和式(4), 求解可得 P_i, P_p 和 F 之间的关系^[10]为:

$$P_i = 1 - P_p \left(\frac{1-F}{F} \right) \quad (5)$$

由式(5)可知, P_i 和 P_p 与入射光量、油墨层透射率、未印刷纸张反射率无关, 这与真实情况相吻合, 由此可认为式(5)对于 T_i 和 R_g 都具有通用性。将式(5)分别代入式(3)和式(4), 可得到 R_p 和 R_i 的表达式:

$$R_p = R_g [1 - P_p(1 - T_i)] \quad (6)$$

$$R_i = R_g T_i [1 - P_i(1 - T_i)] \quad (7)$$

Murray-Davies 给出了网点面积率与反射率之间的数学表达式为:

$$R(F) = FR_i + (1-F)R_p \quad (8)$$

至此, 式(5)-(8)共同构成了半色调反射率模型, 其中有3个未知量: 未印刷纸张自身反射率 R_g 、油墨层透射率 T_i 和光散射概率 P_p 。

2.2 调幅网点反射率模型

为了建立光散射概率函数, 借鉴 PSF 和 MTF 所采用的经验表达式方法。对半色调印刷品数字化采集数据后, 对文中的模型进行推算, 得到适用于调幅网点光散射概率 P_p 关于 F 的函数表达式^[11]为:

$$P_p = F [1 - (1-F)^w + (1-F^w)] \quad (9)$$

其中 w 表达式为^[11]:

$$w = 1 - e^{-Ak_p f} \quad (10)$$

式中: w 为功率系数; k_p 为平均光程; f 为半色调网点的网点频率。参数 A 作为实验参数, 已有研究表明参数 A 与网点形状和网点分布有关^[10]。

综上基于光散射概率函数的调幅网点反射率模型为:

$$\begin{cases} P_p = F [1 - (1-F)^w + (1-F^w)] \\ R(F) = FR_g T_i \left\{ 1 - \left[1 - P_p \left(\frac{1-F}{F} \right) \right] (1-T_i) \right\} + (1-F)R_g [1 - P_p(1-T_i)] \end{cases} \quad (11)$$

2.3 调频网点反射率模型

在建立调频网点的光散射概率函数时, 首先沿用调幅网点的光散射概率函数, 结果发现调幅网点模型

不适于调频网点。经过不断尝试,得到式(12)令人满意的结果^[11]:

$$P_p = w[1 - (1 - F)^B] \quad (12)$$

式中: B 为常数; w 为功率系数,表达式为^[11]:

$$w = 1 - e^{-Ak_p/\lambda} \quad (13)$$

式中: λ 为调频网点大小,即加网的精度。

综上基于光散射概率函数的调频网点反射率模型为:

$$\begin{cases} P_p = w[1 - (1 - F)^B] \\ R(F) = FR_g T_i \left\{ 1 - \left[1 - P_p \left(\frac{1 - F}{F} \right) \right] (1 - T_i) \right\} + \\ (1 - F) R_g [1 - P_p (1 - T_i)] \end{cases} \quad (14)$$

3 实验验证与分析

3.1 实验过程

3.1.1 反射率模型的建立

建立反射率模型的流程为:印刷获得符合要求的标准样张;调整反射显微镜的参数,保持参数不变,分别采集不同网点样张单色黑梯尺各阶调数字化图像;根据式(1)编写 Matlab 程序,由图像灰度数据获取不同形态网点单色黑梯尺各阶调的反射率;分析各阶调网点反射率直方图,确定各阶调所对应纸张空白部分反射率 R_p 和图文着墨部分反射率 R_i ,通过 Matlab 数据拟合确定 P_p 中参数。

3.1.2 反射率模型适用性验证

测量实验印刷样张单色黑梯尺各阶调的密度值,将其转化为测量反射率。将 3.1.1 节中得到的 P_p 代入反射率模型,计算得到各阶调的预测反射率,并与测量反射率进行比较验证。

3.1.3 基于光谱反射率的模型评价

根据 3.1.1 节中确定的 P_p 表达式,计算得到给定面积率下的对应光散射概率。测量得到各色实地的光谱反射率,计算得到各色油墨的透射率 T_i 。并将得到的 P_p, T_i 参数代入模型中,计算出预测光谱,与测量光谱进行比较验证。

3.2 实验结果

3.2.1 调幅网点模型参数确定

根据式(11),要建立调幅网点的反射率模型 $R(F)$,需要确定的参数包括 w, T_i, R_g 。实验中采用高

质量铜版纸,经测量未印刷的纸张表面反射率接近 1,近似取 $R_g = 1$ 。当图文部分为实地时,入射光经油墨层 2 次透射后出射,油墨层透射率 T_i 可由其反射率 R_s 求得:

$$R_s = T_i^2 \quad (15)$$

从而求得油墨透射率 T_i 与实地密度 D_s 的关系为:

$$T_i = 10^{-\frac{D_s}{2}} \quad (16)$$

经测量计算,油墨层透射率 $T_i = 0.1445$ 。

网点面积率为 50% 的圆形调幅网点数字显微采集图见图 5,分析反射率直方图可得 50% 网点面积率的实验测量值 R_p 和 R_i 。同理,可得各个网点面积率的实验测量值 R_p 和 R_i 。功率系数 w 是根据 R_p 和 R_i 理论推导值与实验测量值通过 Matlab 拟合得到的,求得 $w = 0.2669$ 。根据文献,铜版纸中 k_p 可取 $0.29 \text{ mm}^{[12-15]}$ 。 f 是网点频率,其单位为 dot/mm,可由加网线数计算得到,该实验中加网线数为 175 lpi,则 f 为 6.8898 dot/mm 。将 w, k_p, f 代入式(10)中,得到 $A = 0.1554$ 。将确定的参数代入反射率模型式(11),求得理论预测总反射率,将其与测量密度求得的总反射率进行比较,见图 6。经数据分析, R^2 为 0.9821, RMSE 为 0.034 36,说明反射率模型预测值与实际测量值吻合度较好。

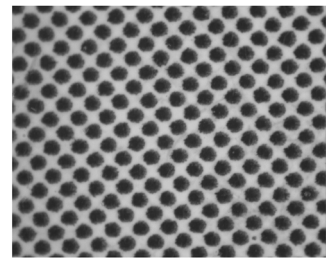


图 5 50% 圆形调幅网点显微采集

Fig. 5 Microscopic image of 50% AM dot

3.2.2 调频网点模型参数确定

调频网点反射率模型中的参数 T_i, R_g 与调幅网点中的相同,参数确定的方法也是一致的,区别在于调频网点的光散射概率函数需要确定 2 个参数 w, B ,网点面积率为 50% 调频网点数字显微采集图见图 7。与 3.2.1 节所述的调幅网点方法相同,根据 R_p 和 R_i 实验测量数据拟合 P_p ,求得 $w = 0.6203, B = 0.5$ 。调频网点的加网精度 λ 为 20,经计算 $A = 0.0668$ 。将确定的参数代入式(14)中,求得理论预测总反射率值,将其与实

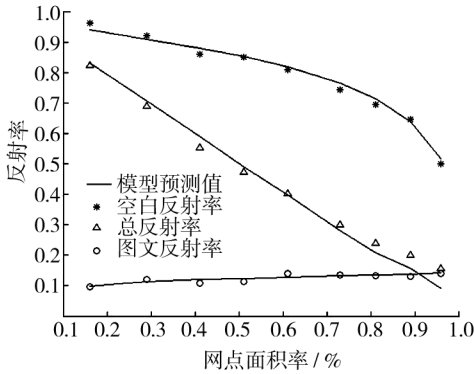


图6 调幅圆形网点理论预测值与实验测量值比较
Fig. 6 Comparison of AM dots' predicted values and measured values

验测量密度求得的总反射率进行比较,见图8。经数据分析, R^2 为0.9520, RMSE为0.06070,说明调频网点的反射率模型满足预测精度要求。

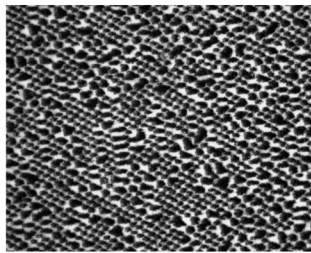


图7 50%调频网点显微采集
Fig. 7 Microscopic image of 50% FM dots

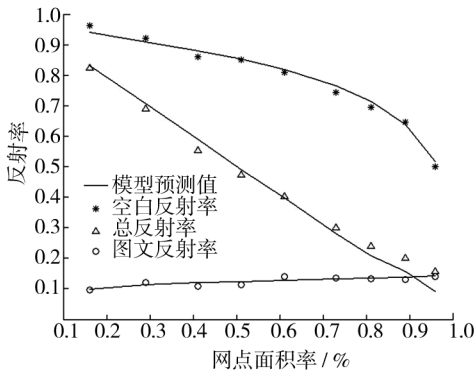


图8 调频网点理论预测值与实验测量值比较
Fig. 8 Comparison of FM dots' predicted values and measured values

3.2.3 基于光谱反射率的模型评价

3.2.1和3.2.2节所确定的参数都是在对单色黑版进行数据采集和分析的基础上得到的,模型对CMYK各色版的适用性仍需进行验证。分别对2种

网点所对应的CMYK 25%, 50%, 75%色块的光谱反射率进行预测,并与仪器测量光谱进行对比,见图9。

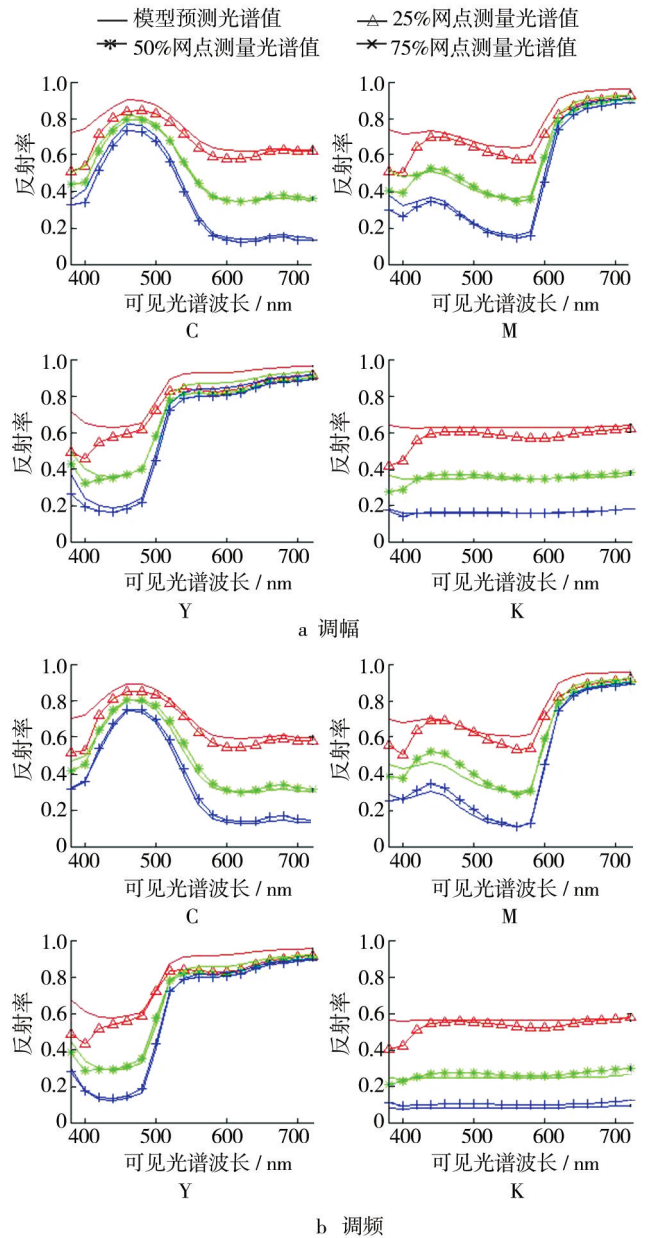


图9 调幅和调频网点CMYK不同阶调预测与测量光谱比较
Fig. 9 Comparison of AM and FM dots' predicted values and measured values for cyan, magenta, yellow and black plates

总体来说,用亮调、中间调和暗调模型预测光谱特性与实际测量光谱特性有较高的吻合度,说明调幅调频网点反射率模型适用性强,具有理论及实用价值。观察发现,25%网点的模型预测光谱与实际测量光谱相差较大,但随着网点面积的增加,模型的预测精度越高,即该模型对于中暗调有更高的适用性。该模型的适用性还与墨色有关,模型对于黄色油墨光谱

预测结果普遍比其他墨色差,而对黑油墨预测精度较高。光谱反射率实验结果反映出2方面问题:当网点面积率较小时,模型预测准确度较差;在短波长区域,模型预测值总会大于测量值,特别是对于亮调区域,预测值与测量值差异较明显。分析认为以上2方面问题分别由计算中纸张表面反射率取值为1和测色设备所带UV滤镜对反射光谱有校正作用引起。如要进一步提高模型预测精度,需考虑纸张对光的吸收,并去除UV滤镜对实验结果的影响。

4 结语

文中以调幅网点、 20μ 调频网点为研究对象,提取其微观图像特征,分别对半色调图像的光散射概率进行数学描述,建立了基于网点形态的半色调反射率模型,并验证了其适用性。与原模型相比,基于网点分类的光散射概率表达式简单适用,便于理解。在光散射概率对半色调印品的呈色过程进行描述时,不同形态网点所适用的光散射概率函数表达式不同,使模型体现出了来自网点形态所产生的影响。

参考文献:

- [1] 白春燕,张逸新,秦承红,等. Murray-Davies 网点面积率预测模型[J]. 包装工程,2008,29(8):39—49.
BAI Chun-yan, ZHANG Yi-xin, QIN Cheng-hong, et al. Murray-Davies Dot Coverage Prediction Model[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(8):39—49.
- [2] 张彦,唐正守. 基于 Yule-Nielsen 的半色调印刷品的光谱预测模型[J]. 包装工程,2008,29(3):81—83.
ZHANG Yan, TANG Zheng-shou. Spectral Prediction Model for Half Tone Prints Based on Yule-Nielsen Equation[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(3):81—83.
- [3] 李中正,张逸新,宁元元. Kubelka-Munk 色彩预测模型在印刷行业中的应用[J]. 包装工程,2008,29(5):43—45.
LI Zhong-zheng, ZHANG Yi-xin, NING Yuan-yuan. Application of Kubelka-Munk Color Prediction Model in Printing Industry[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(5):43—45.
- [4] 吴俊芳,刘桂雄,韦宁. 散焦含噪图像的点扩散函数估计与边缘检测[J]. 华南理工大学学报,2010,38(6):119—133.
WU Jun-fang, LIU Gui-xiong, WEI Ning. PSF Estimation and Edge Detection of Defocused Noisy Image[J]. Journal of South China University of Technology, 2010, 38(6):119—133.
- [5] 李娟娟. 基于调制传递函数的印品质量分析[D]. 无锡:江南大学,2009.
LI Juan-juan. Analysis of Print Quality Based on MTF[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009.
- [6] ARNEY J S, ENGELDRUM P G, ZENG H. An Expanded Murray-Davies Model of Tone Reproduction in Halftone Imaging[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 1995, 36(6):502—508.
- [7] MICHAEL L, ALBER. Modeling the Effect of Ink Spread and Ink Penetration on Tone Reproduction[D]. Rochester: Rochester Institute of Technology, 1991.
- [8] 葛惊寰,刘振. 基于光学网点扩大的光谱反射率模型研究[J]. 光散射学报,2011,23(2):109—113.
GE Jing-huan, LIU Zhen. Research on the Spectral Reflectance Model Based on Optical Dot Gain[J]. Chinese Journal of Light Scattering, 2011, 23(2):109—113.
- [9] 徐锦林,徐军飞. 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—5.
XU Jin-lin, XU Jun-fei. Review of Optical Dot Gain and Discussion of Dot Percentage[J]. China Printing and Packaging Study, 2012, 4(1):1—5.
- [10] ARNEY J S. A Probability Description of the Yule-Nielsen Effect I: Tone Reproduction and Image Quality in the Graphic Arts[J]. The Journal of Imaging Science and Technology, 1997, 41(6):633—636.
- [11] ARNEY J S. A Probability Description of the Yule-Nielsen Effect II: The Impact of Halftone Geometry[J]. The Journal of Imaging Science and Technology, 1997, 41(5):637—642.
- [12] ARNEY J S, ARNEY C D, KATSUBE M, et al. An MTF Analysis of Papers[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 1996, 40(1):19—25.
- [13] MASAYUKI U, HITOMI K, TOSHIYA N, et al. A Simple Method to Measure MTF of Paper and Its Application for Dot Gain Analysis[J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2009(12):3328—8508.
- [14] ROGERS G L. Measurement of the Modulation Transfer Function of Paper[J]. Applied Optics, 1998, 37(31):7235—7240.
- [15] LI Yang, BJORN K, REINER L. Light Scattering and Ink Penetration Effects on Tone Reproduction[J]. J Opt Soc Am A, 2001, 18(2):360—366.