

## 基于波长分区的半色调色光谱估算模型

田全慧<sup>1,2</sup>, 刘真<sup>1</sup>, 张建青<sup>1</sup>, 刘士伟<sup>1</sup>

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

**摘要:** **目的** 研究半色调打印色的光谱呈色特性, 为半色调打印色的光谱复制提供估算模型。**方法** 分析不同阶调值的半色调打印色的光谱反射曲线特性, 根据半色调打印色的光谱微分找出特征波段, 并进行波长分区。在不同的波长分区分别使用网点增大补偿与多项式算法估算半色调打印机的光谱反射率。**结果** 提出的半色调光谱估算算法估算的光谱与实际测量的 sRMS 最大值为 0.02, 对应的估算色与测量色的平均色差小于  $1.5\Delta E_{76}$ 。**结论** 使用波长分区的光谱估算模型可提高半色调复制色的光谱估算精度, 半色调彩色输出设备的光谱特征化可以使用文中的估算模型作为正向特征化模型。

**关键词:** 光谱估算; 光谱分区; 半色调; 打印机特征化

**中图分类号:** TS801.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)23-0176-05

### Spectral Piecewise Partition Model(SPPM) for Predicting Halftone Printing Color

TIAN Quan-hui<sup>1,2</sup>, LIU Zhen<sup>1</sup>, ZHANG Jian-qing<sup>1</sup>, LIU Shi-wei<sup>1</sup>

(1.Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2.Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the spectral coloring characteristics of the halftone printing color so as to provide estimation model for the reproduction of spectrum of halftone printing color. The spectral reflection curve's characteristics of halftone printing color of different tone values were analyzed. The characterized bands were found out according to spectral derivative of halftone printing color and then wave-length partition was carried out. Dot gain compensation and polynomial algorithm in various wave-length partitions were respectively used to estimate the spectral reflectance of halftone printer. The maximum of spectrum estimated with the halftone spectrum estimation algorithm proposed and the measured sRMS was 0.02. The average color difference between the corresponding estimated color and measured color was less than  $1.5\Delta E_{76}$ . The accuracy of spectral estimation of halftone reproduction color can be improved with spectrum estimation model of wave-length partition. The spectral characterization of halftone colorful output device can use the estimation model herein as the forward characterization model.

**KEY WORDS:** spectrum estimation; spectrumpartition; halftone; printer characterization

打印机作为彩色复制流程中重要的成像设备, 在颜色复制技术中是重要的研究对象。2000 年以后, Wyble 等提出打印机光谱估算模型<sup>[1-2]</sup>包含基于数学模型的查找表算法<sup>[3]</sup>、神经网络算法<sup>[4]</sup>、遗传算法<sup>[5]</sup>等, 以及基于打印机物理成像原理的纽介堡算法<sup>[6-8]</sup>。在纽介堡算法基础上的尤尔-尼尔逊

修正<sup>[9-10]</sup>, 桑得森参数<sup>[11]</sup>, 克拉普光谱预测<sup>[12]</sup>以及 2007 年朱元泓教授提出的结合纽伦堡与克拉普算法的光谱预测新算法<sup>[13]</sup>。数学模型为通过将打印机驱动值与输出颜色样本的光谱值输入黑箱式的拟合计算器, 这样虽然可以获得较高预测的精度, 但由于光谱数据的维数高, 需要以复杂的运算以及

收稿日期: 2016-05-16

基金项目: 上海理工大学科技项目(16KJFZ017); 上海市教委创新项目 (13YZ149)

作者简介: 田全慧 (1974—), 女, 云南昆明人, 博士, 上海出版印刷高等专科学校副教授, 主要研究方向为颜色光学、印刷光学等。

漫长的计算时间才能得到理想结果，并不适合实际应用。基于打印机物理成像原理的算法考虑了半色调纸张与油墨层的光学吸收与反射特性，在实际应用中更实用。目前对理想的组介堡模型进行修正的预测模型，受承印材料的表面状态，测量仪器等的影响，光谱的拟合精度并不理想。该研究的算法以半色调颜色光谱物理建模方法为基础，在分析组介堡算法等物理估算模型基础上提出一种新的基于波长分区的半色调打印色光谱估算模型。

### 1 模型算法结构

当光线从半色调颜色样品表面入射时，从能量守恒角度分析，其经过了纸张表面的反射、半色调色元的吸收、半色调色元的反射、纸张内部的散射、纸张的吸收、纸张与色元的多次吸收、纸张与色元的多重吸收后的反射、纸张的透射等，见图 1。因此半色调颜色的光学呈色原理十分复杂，也很难用一个单一的算法模型来计算。

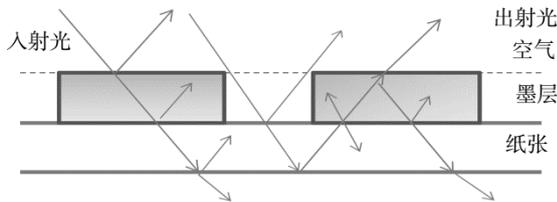
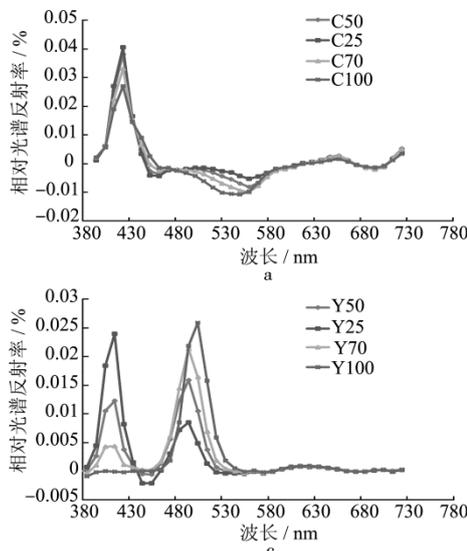


图 1 半色调打印颜色样的光学示意  
Fig.1 The reflection of Halftone printing color

在实际输出过程中，由于受墨水的渗透铺展等影响，半色调色元的面积率存在增大的趋势，因此使用理论的色元面积率，即预设的半色调阶调，不



能准确地进行半色调色的光谱估算，因此该算法光谱估算模型中使用网点增大补偿计算来解决估算过程中色元面积率的问题。文中提出的按波长分区的半色调色的光谱估算模型的结构见图 2。其中  $R_s$  为实地色光谱反射率， $T_c, T_m, T_y$  为不同色的半色调值，这 3 个值由图中式(1)计算得到，式(1)中的  $X_p, Y_p, Z_p$  为纸张的三刺激值的， $X_t, Y_t, Z_t$  为各半色调阶对应的三刺激值， $X_s, Y_s, Z_s$  为实地色的三刺激值， $\lambda_i (i=1,2,\dots,n)$  为特征波段， $f_i(t) (i=1,2,\dots,n)$  为各特征波段对应的转换关系。

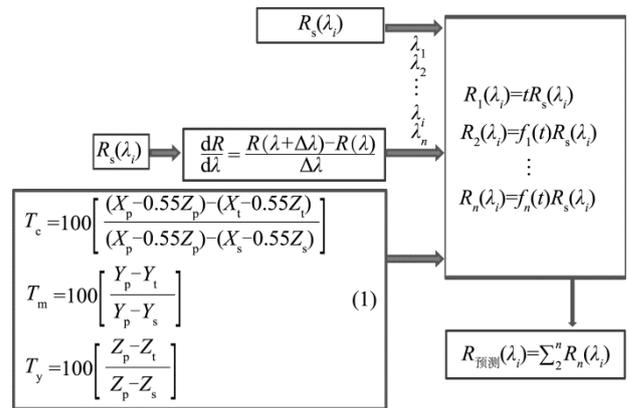


图 2 算法结构  
Fig. 2 The framework of SPPM

### 2 波长分区的光谱估算

#### 2.1 波长分区

对半色调颜色的反射光谱进行一阶微分计算，通过一阶微分计算，提取半色调颜色光谱的光谱特征，不同单色的半色调阶调光谱一阶微分的结果见图 3。

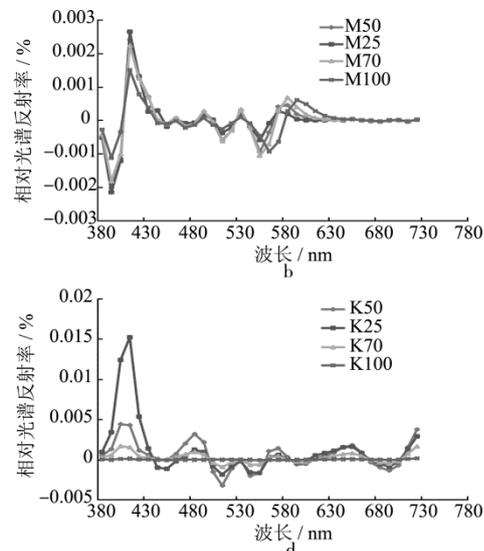


图 3 青、品红、黄、黑半色调颜色光谱的一阶微分  
Fig.3 The differential of spectral reflectance of cyan, magenta, yellow and black

从各半色调颜色的一阶微分中,找出微分分布中出现峰值的位置,作为特征波长。这些特征波长对应的光谱反射率的光谱估算值与测量值存在明显偏差,因此将光谱值按特征波长进行分区,波长分区结果见表1。

表1 青、品红、黄、黑的特征光谱波段  
Tab.1 The proper wavelength of cyan, magenta, yellow and black

色别	特征波长 1/nm	特征波长2/nm
青色	410	460, 510, 540, 560, 660
品红色	410	450, 490, 510, 530, 550, 580, 590
黄色	410	440, 500, 620
黑色	410	450, 470, 510, 540, 570, 630

### 2.2 半色调颜色的估算

设青、品红、黄3种原色的色元的光谱反射率为 $\rho_c(\lambda)$ ,  $\rho_m(\lambda)$ ,  $\rho_y(\lambda)$ 以及纸张的光谱反射率为 $\rho_p(\lambda)$ 。根据光谱叠加原理,半色调色元呈色过程是由色元的墨层对光吸收的减色过程和色元反射色光加色混合过程共同形成的,根据Murray-Davies公式,

半色调颜色光谱是由色元的光谱与纸张的光谱按不同的权重求和的结果,其中权重值即半色调阶调值或网点面积率,见式(1)<sup>[6-8]</sup>。

$$\begin{cases} \rho_c(\lambda) = a\rho_c(\lambda) + (1-a)\rho_p(\lambda) \\ \rho_m(\lambda) = a\rho_m(\lambda) + (1-a)\rho_p(\lambda) \\ \rho_y(\lambda) = a\rho_y(\lambda) + (1-a)\rho_p(\lambda) \end{cases} \quad (1)$$

在实际输出过程中,由于受打印机墨水的渗透与铺展等因素的影响,半色调色元的实际面积率与输入的理论色元面积率不相等,往往较理论值大,因此光谱估算时需要对此进行修正,才能准确地估算出半色调颜色的光谱。ISO 13655中提供计算有效网点面积率<sup>[14]</sup>的公式见式2。

$$\begin{cases} a_c = 100 \left[ \frac{(X_p - 0.55Z_p) - (X_t - 0.55Z_t)}{(X_p - 0.55Z_p) - (X_s - 0.55Z_s)} \right] \\ a_m = 100 \left( \frac{Y_p - Y_t}{Y_p - Y_s} \right) \\ a_y = 100 \left( \frac{Z_p - Z_t}{Z_p - Z_s} \right) \end{cases} \quad (2)$$

经过修正后的光谱估算结果较之前的估算结果有改进,见图4。

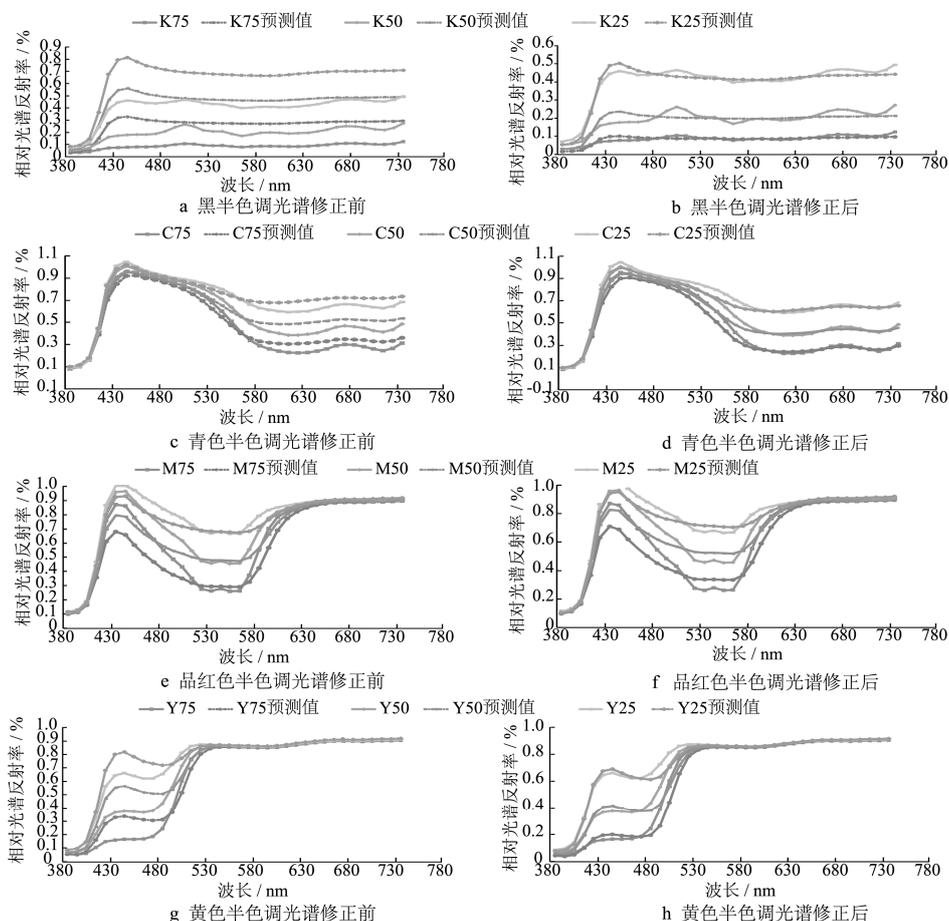


图4 半色调光谱测量与估算曲线

Fig.4 Prediction and measurement of halftone spectral reflectance

### 2.3 特征波长分区内的算法

位于特征波长处的半色调色的光谱反射率与特征波长阶调值成复杂的非线性关系（见图 5），因

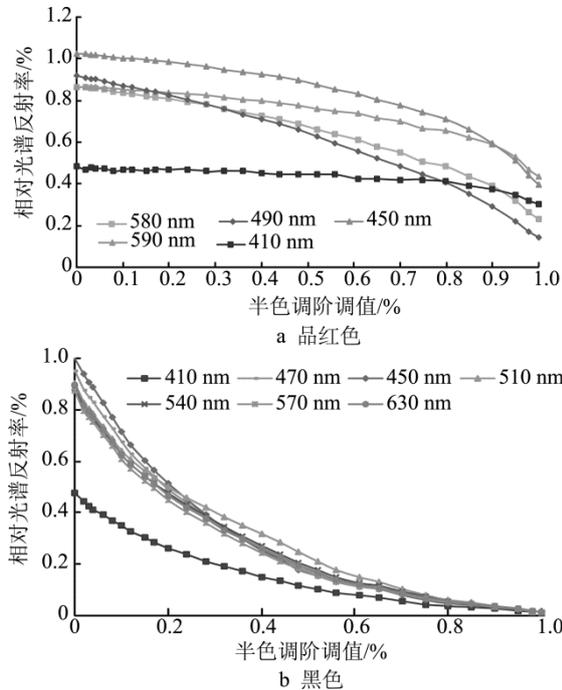


图 5 半色调特征波长的光谱反射率与阶调的关系  
Fig.5 Relationship of spectral reflectance of proper wavelength and tone value

此使用多项式算法来拟合半色调阶调值与特征波长的关系<sup>[15-17]</sup>。

## 3 实验及结果分析

### 3.1 实验过程

采用 HP Design jet Z3200 Photo 彩色喷墨打印机，打印输出 C, M, Y, K 的 0~100%半色调阶，以及 IT8.7/4 组合色块。选用 X-Rite 公司的分光光度计 i1 作为测量设备，测量色块的光谱反射率，取 380~730 nm 范围内的光谱，间隔为 10 nm，测量与计算 36 维的颜色反射光谱。

### 3.2 结果分析

使用光谱均方根误差（sRMS）比较测量值与光谱估算模型的光谱拟合度。 $\Delta E_{76}$  比较计算测量值与估算值的色度误差，比较结果见表 2（其中算法 1 基于 Murray-Davies 公式的估算，算法 2 基于 ISO 网点增大修正的估算，算法 3 为文中提出的基于波长分区的估算算法）。表 2 中可以看出无论从光谱估算的结果还是从色度误差分析，波长分区的算法都有较高的精度。

表 2 不同算法精度比较

Tab.2 Accuracy of different predicting algorithm

		sRMS			$\Delta E_{76}$		
		最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
青色	算法1	0.0675	0.00712	0.0414	10.7707	0.8715	6.2236
	算法2	0.0486	0.004 117	0.0280	6.8186	0.6432	4.1380
	算法3	0.0165	0.0073	0.0112	1.5869	0.2198	0.6527
品红色	算法1	0.0969	0.0028	0.0531	12.9319	0.0002	6.2623
	算法2	0.0824	0.0050	0.0431	15.4813	0.5983	7.5793
	算法3	0.0186	0.0013	0.0092	2.3929	0.0483	0.8656
黄色	算法1	0.0873	0.0087	0.0490	20.4896	0.9286	10.5246
	算法2	0.0478	0.0066	0.0280	4.1900	0.4440	2.4095
	算法3	0.0186	0.0020	0.0086	1.4988	0.1933	0.5258
黑色	算法1	0.2883	0.0151	0.1769	25.8147	2.5984	14.8022
	算法2	0.0345	0.0007	0.015 34	7.4795	0.2669	3.1333
	算法3	0.0234	0.0025	0.0130	3.7843	0.2432	1.5468
二次色 (青+品)	算法1	0.1080	0.0445	0.0746	8.3490	3.2228	5.8586
	算法2	0.1080	0.0335	0.0746	10.2282	2.4347	5.0879
	算法3	0.0198	0.0096	0.0148	1.3459	0.2199	0.6999
二次色 (青+黄)	算法1	0.0873	0.0445	0.0655	10.4083	4.4228	7.4662
	算法2	0.0690	0.0295	0.0480	6.6322	2.2181	4.4980
	算法3	0.0187	0.0089	0.0141	1.1090	0.3376	0.6320
二次色 (黄+品)	算法1	0.0874	0.0383	0.0542	13.1461	1.1308	4.862
	算法2	0.0835	0.0295	0.0588	12.6293	2.2534	5.6114
	算法3	0.0176	0.0056	0.0107	1.3991	0.1341	0.7086
三次色 (青+品+黄)	算法1	0.1041	0.0000	0.0687	7.8272	1.1444	4.3738
	算法2	0.1794	0.0000	0.0765	10.2945	1.9271	4.2970
	算法3	0.0223	0.010 44	0. 0167	1.7548	0.2565	0.8898

## 4 结语

研究了半色调颜色光谱估算的方法,根据打印输出不同阶调值的半色调色的光谱反射率与波长、半色调阶调值之间的非线性关系,利用光谱微分,提取半色调颜色光谱反射率曲线的特征波长,进行光谱波长分区,然后使用多项式结合半色调网点面积修正的算法估算打印半色调色的光谱。实验结果表明,预测色与实际测量色在色度与光谱精度上都远远高于颜色复制的标准,即预测色与实际测量色间的平均色差小于 $1.5\Delta E_{76}$ ,最大色差不超过 $4\Delta E_{76}$ ,sRMS的最大值仅为0.0234。文中提出的基于波长分区的半色调色光谱估算的模型对光谱颜色的正向估算精度很高,可以作为打印机的光谱特征化中正向光谱的预测模型。

由于算法中需要经过光谱微分,再对波长分区,并且估算时对不同分区的波段采用不同的算法,因此相对其他算法较为复杂,在后续的研究中需要进一步简化算法。此算法目前是基于喷墨输出的半色调色的光谱估算,对于印刷半色调色的光谱估算的效果还需要进一步验证。

## 参考文献:

- [1] WYBLE D R, BERNS R S. A Critical Review of Spectral Models Applied to Binary Color Printing[J]. *Color Res & Appl*, 2000, 25(1): 4—19.
- [2] HEBERT M. Compositional Model for Predicting Multilayer Reflectance and Transmittances in Color Reproduction[D]. Lausanne Switzerland: School for Computer and Communication Sciences Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland, 2006.
- [3] WANG Y, XU Hai-song. Spectral Characterization of Scanner Based on PCA and BPANN[J]. *Chinese Optics Letters*, 2005, 3(12): 725—728.
- [4] 于海琦, 刘真, 田全慧. GA-BP神经网络结合PCA的多基色颜色预测模型[J]. *发光学报*, 2015, 36(6): 711—717.  
YU Hai-qi, LIU Zhen, TIAN Quan-hui. Multi-color Prediction Model Based on BP-NN Optimized by GA and PCA[J]. *Chinese Journal Of Luminescence*, 2015, 36(6): 711—717.
- [5] MURRAY A. Monochrome Reproduction in Photoengraving[J]. *Journal of Franklin Institute*, 1936, 221(6): 721—724.
- [6] NEUGEBAUER H E J. Die Theoretischen Grundlagen des Mehrfarbendrucks[J]. *Zeitschrift Fur Wissenschaftliche Photographie und Photochemie*, 1937, 36 (4): 36—73.
- [7] YULE J A C, NIELSEN W J. The Penetration of Light into Paper and Its Effect on Halftone Reproductions[C]//Proceedings of Technical Association of the Graphic Arts Conference. Sewickley, PA: Technical Association of the Graphic Arts, 1951(3): 65—76.
- [8] 王颖, 柯能, 何晓敏, 等. 荧光纸基的双面彩色半色调印刷品 Clapper-Yule 正面反射率模型[J]. *包装工程*, 2015, 36(19): 110—114.  
WANG Ying, KE Neng, HE Xiao-min, et al. Clapper-Yule Front Reflectance Model of for Recto-verso Halftone Image Printed on Fluorescent Paper Substrate[J]. *Packaging Engineering*, 2015, 36(19): 110—114.
- [9] 张彦, 唐正宁. 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-ning. Spectral Prediction Model for Half Tone Prints Based on Yule-Nielsen Equation[J]. *Packaging Engineering*, 2008, 29(3): 81—83.
- [10] HERSCH R D, COLLAUD F, CRETE F, et al. Spectral Prediction and Dot Surface Estimation Models for Halftone Prints[C]//IS&T/SPIE Electronic Imaging Symposium, Conference Imaging IX: Processing. Hardcopy and Applications, Mutenz, Switzerland, 2004.
- [11] 朱元泓. 一种新的网目调印刷光谱预测模型[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2007, 32(7): 654—657.  
ZHU Yuan-hong. A New Spectral Prediction Model for Halftone Prints[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(7): 654—657.
- [12] ISO/TC 130, DIN, Graphic Technology-spectral Measurement and Colorimetric Computation for Graphic Arts Images[S].
- [13] 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.  
TIAN Dong-wei, ZHANG Yi-xin. Reflectance and Transmittance Prediction Model of Recto-verso Multi-ink Halftone Print[J]. *Packaging Engineering*, 2009, 30(7): 56—58.
- [14] NÉBOUY D, HÉBERT M, FOURNEL T, et al. Prediction of the Spectral Reflectance of Laser-generated Color Prints by Combination of an Optical Model and learning Methods[J]. *Optical Society of America*, 2015, 32(9): 1661—1671.
- [15] HÉBERT M, HERSCH R D. Yule-nielsen Based Recto-verso Color Halftone Transmittance Prediction Model [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(4): 519—525.