

# 基于辐射传递理论的印刷品光谱反射预测模型

葛惊寰<sup>1</sup>, 王庆娟<sup>2</sup>

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

**摘要:** 准确预测印刷品的颜色一直是印刷复制中一个十分重要的课题。基于光能的辐射传递理论, 通过分析光在油墨层表面及内部传播过程中的散射与吸收等规律, 并引入荧光激发函数, 对 Kubelka-Munk 模型预测印刷品时蓝紫波段反射率偏差的问题进行了修正, 并建立了新的印刷品光谱反射预测模型。该模型可为计算机光谱配色和高精度仿真印刷系统的开发提供理论基础。

**关键词:** 辐射传递理论; Kubelka-Munk 模型; 荧光激发函数; 色彩预测

**中图分类号:** TS801.3; TS807 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2011)09-0077-04

## Spectral Reflection Prediction Model for Print Based on Radiant Transfer Theory

GE Jing-huan<sup>1</sup>, WANG Qing-juan<sup>2</sup>

(1. Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China; 2. Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** It is an important problem to predict the color of print accurately for printing. A new spectral reflection prediction model for print was established by introducing a fluorescence excited function based on radiant transfer theory which can describe the phenomenon of the flux scattering and absorbing on the surface of ink as well as in the ink layer. The new model corrected the problem of Kubelka-Munk model for error prediction on the reflectance of blue and violet wave band. The new model can be used for developing computer spectral color matching systems and high-quality simulated printing system.

**Key words:** radiant transfer theory; Kubelka-Munk model; fluorescence excited function; color prediction

随着颜色复制技术的发展, 对印刷复制的精度提出了新的要求。近年来, 光谱复制技术已经开始逐步取代三刺激值复制技术, 进入了高精度仿真印刷的研究领域, 而这些技术的研发都离不开印刷品色彩预测理论的发展。一直以来, 许多学者都在致力于建立印刷品的各类色彩预测模型, 其中, Kubelka-Munk 模型应用较为广泛<sup>[1]</sup>。

Kubelka-Munk 模型主要用于描述光能在分层介质内部传输过程中吸收和散射规律的模型。它在影像医学、涂料、纺织印染和印刷复制等领域都有极其广泛的应用, 后来也有很多学者针对其在不同领域的应用做了许多修正<sup>[2]</sup>。笔者基于光能的辐射传递理论<sup>[3]</sup>, 并针对 Kubelka-Munk 模型预测印刷品时蓝紫

波段反射率偏差的问题进行修正, 引入荧光激发函数<sup>[4]</sup>, 建立了新的印刷品光谱反射预测模型。

## 1 印刷品光谱预测模型的建立

设在标准印刷环境下, 印刷油墨均匀渗透进入纸张表面涂层, 光射入油墨层后均匀扩散, 并在向上和向下这 2 个方向被散射和吸收。定义向上为正, 其光能为  $J(z)$ , 向下的为  $I(z)$ , 见图 1。

由于光在油墨层中的吸收及散射现象, 其通过极薄的油墨层  $dz$  向上的光能  $J(z)$  的变化量包括 3 个部分:  $J(z)$  自身的一部分被油墨薄层吸收而降低的光能  $\epsilon k J(z)$ ;  $J(z)$  后向散射而降低的光能  $\epsilon(1-\zeta)sJ$

**收稿日期:** 2011-01-19

**基金项目:** 上海高校选拔培养优秀青年教师科研专项基金资助项目(51-08-509-003)

**作者简介:** 葛惊寰(1983—), 男, 江苏人, 硕士, 上海出版印刷高等专科学校助教, 主要研究方向为印刷品色彩预测及印刷质量控制等。

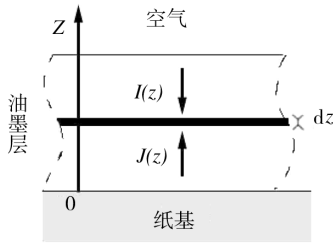


图1 光在油墨薄层中的传播

Fig. 1 Transmitting of light in thin ink layer

( $z$ ); 向下传播的光  $I(z)$  的后向散射光能  $\epsilon(1-\zeta)sI(z)$ , 其为增量。从而得到通过极微小的油墨层  $dz$  向上传播的光能  $J(z)$  的增加总量为:

$$\frac{dJ(z)}{dz} = \epsilon(1-\zeta)sI(z) - \epsilon[k + \epsilon(1-\zeta)s]J(z) \quad (1)$$

其中:  $k$  和  $s$  分别是油墨的吸收系数和散射系数;  $\zeta$  为光的前向散射概率系数;  $\epsilon$  为光子平均穿越距离校正系数, 表示光穿过厚度为  $dz$  的油墨层时, 其实际穿越距离是  $\epsilon dz$ <sup>[5]</sup>。

同理, 通过油墨薄层  $dz$  向下的光能  $I(z)$  的变化量为:

$$\frac{dI(z)}{dz} = \epsilon[k + \epsilon(1-\zeta)s]I(z) - \epsilon(1-\zeta)sJ(z) \quad (2)$$

把式(1)和(2)写成矩阵形式, 并在油墨层  $z=0$  到  $z=Z$  内积分, 可得:

$$\begin{bmatrix} I(Z) \\ J(Z) \end{bmatrix} = \exp \left\{ \begin{bmatrix} \epsilon[k + \epsilon(1-\zeta)s] & -\epsilon(1-\zeta)s \\ \epsilon(1-\zeta)s & -\epsilon[k + \epsilon(1-\zeta)s] \end{bmatrix} (Z-0) \right\} \cdot \begin{bmatrix} I(0) \\ J(0) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中  $I(0)$  和  $J(0)$  分别表示  $I(z)$  和  $J(z)$  在  $z=0$  时的光能量, 可以用矩阵  $\mathbf{M}$  来表示。

$$\mathbf{M} = \exp \left\{ \begin{bmatrix} \epsilon[k + \epsilon(1-\zeta)s] & -\epsilon(1-\zeta)s \\ \epsilon(1-\zeta)s & -\epsilon[k + \epsilon(1-\zeta)s] \end{bmatrix} Z \right\}$$

考虑到光在空气与油墨层交界面上的反射和折射现象<sup>[6]</sup>, 见图2, 可以得到微分方程(1)和(2)的一个边界条件。

假设由空气入射的光能总量为  $I$ , 从油墨层出射的光能总量为  $J$ , 光在交界面的外表面的反射系数为  $r_s$ , 在内表面的反射系数为  $r_i$ , 两者与光的波长和油墨的折射率有关。

根据空气和油墨层界面上光能量的平衡, 见图

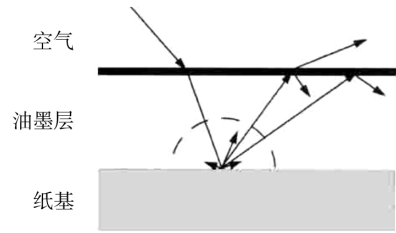


图2 光在空气与油墨层交界面上的反射与折射

Fig. 2 Reflection and refraction of light on the interface between air and ink layer

3, 可分别得到入射光  $I$  和出射光  $J$  的方程, 并联立后

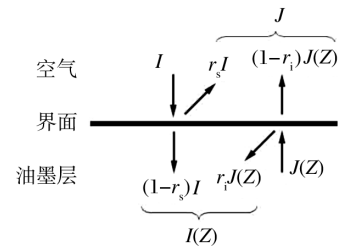


图3 光在空气和油墨层交界面上能量的变化

Fig. 3 Change of light energy on the interface between air and ink layer

化为矩阵形式, 可得:

$$\begin{bmatrix} I \\ J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-r_s} & \frac{-r_i}{1-r_s} \\ \frac{r_s}{1-r_s} & 1-r_i - \frac{r_s r_i}{1-r_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I(Z) \\ J(Z) \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} I(Z) \\ J(Z) \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{C}$  称为边界校正矩阵, 可作为方程(1)和(2)的一个边界条件。

结合方程组(3)和(4), 可以得到经边界条件校正后的方程组:

$$\begin{bmatrix} I \\ J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-r_s} & \frac{-r_i}{1-r_s} \\ \frac{r_s}{1-r_s} & 1-r_i - \frac{r_s r_i}{1-r_s} \end{bmatrix} \cdot \exp \left\{ \begin{bmatrix} \epsilon[k + \epsilon(1-\zeta)s] & -\epsilon(1-\zeta)s \\ \epsilon(1-\zeta)s & -\epsilon[k + \epsilon(1-\zeta)s] \end{bmatrix} Z \right\} \begin{bmatrix} I(0) \\ J(0) \end{bmatrix} = \mathbf{CM} \begin{bmatrix} I(0) \\ J(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \omega & \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I(0) \\ J(0) \end{bmatrix} \quad (5)$$

为了进一步简化方程组, 式中的矩阵积元用  $\alpha, \beta, \omega, \psi$  来替代。

除了在油墨层表面得到一个边界条件之外, 另一个边界条件可由油墨层底部与纸张交界处反射后的光

能量的变化而得到。

在造纸过程中,为了提高纸张的白度,常常添加荧光剂对纸张进行增白处理。在纸张与油墨层的界面上,部分进入纸张内部的紫外光经过荧光剂的激发,其一部分就会转化为可见光。进一步假设印刷品表面接受的荧光光强为  $I_u$ , 油墨层的荧光吸收因子为  $\phi$ , 则经过墨层到达纸张内部的荧光为  $\phi I_u Z^{[4]}$ 。从而可知,由纸面反射出来的可见光包括 2 部分:一部分是紫外光转化而来;另一部分由原来的可见光反射得到。

荧光纸基表面反射光能的变化见图 4, 可得纸基表面出射的可见光能为:

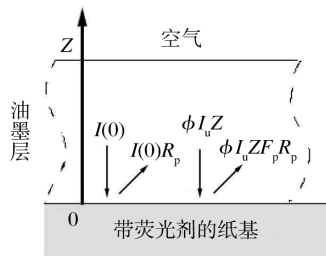


图 4 荧光纸基表面反射光能的变化

Fig. 4 Change of light energy on the surface of fluorescent paper

$$J(0) = [I(0) + \phi I_u Z F_p] R_p \quad (6)$$

其中:  $R_p$  为纸张的反射率;  $F_p$  是纸张内荧光增白剂的荧光激发函数<sup>[5]</sup>。

由式(4)和(6)作为边界条件,可以计算印刷品的反射率:

$$R = \frac{J}{I} = \frac{(\omega + \phi R_p) I(0) + \phi \phi I_u Z F_p R_p}{(\alpha + \beta R_p) I(0) + \beta \phi I_u Z F_p R_p} \quad (7)$$

对于彩色印刷品,设其由  $f$  层不同颜色的油墨印刷,并且不同油墨层之间的渗透可以忽略不计,则模型可以转化为<sup>[7]</sup>:

$$\begin{bmatrix} I \\ J \end{bmatrix} = C_f M_f, \dots, C_n M_n, \dots, C_1 M_1 \cdot \begin{bmatrix} I(0) \\ J(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha' & \beta' \\ \omega' & \phi' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I(0) \\ J(0) \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中:

$$M_n =$$

$$\exp \left\{ \begin{bmatrix} \epsilon_n [k_n + \epsilon_n (1 - \zeta_n) s_n] & -\epsilon_n (1 - \zeta_n) s_n \\ \epsilon_n (1 - \zeta_n) s_n & -\epsilon_n [k_n + \epsilon_n (1 - \zeta_n) s_n] \end{bmatrix} Z_n \right\}$$

$$C_n = \begin{bmatrix} \frac{1}{1 - r_{s,n}} & \frac{-r_{i,n}}{1 - r_{s,n}} \\ \frac{r_{s,n}}{1 - r_{s,n}} & 1 - r_{i,n} - \frac{r_{s,n} r_{i,n}}{1 - r_{s,n}} \end{bmatrix}$$

其中各个参数附加下标  $n$ , 表示为第  $n$  层油墨的各项参数。

同理,根据不同相邻层界面的边界条件,即可求出彩色印刷品的反射率。

## 2 理论分析与数值模拟

为了论证新模型的精度,以青、品、黄三色实地色块的光谱反射预测为例,对新建模型及经典 Kubelka-Munk 模型的预测结果和实际测量结果作比较。根据文献[2,6,9]的实验数据,可以得到油墨层表面的  $r_s$  值及  $r_i$  值,油墨的吸收系数  $k$  和散射系数  $s$ ,纸基的反射率  $R_p$ ,而荧光吸收因子  $\phi$  和荧光激发函数  $F_p$  可取文献[4]中的实验数据,它们都是入射光波长的函数。已知通常情况下紫外线的比例大约为 5%,则可取  $I_u = 0.05I$ 。取印刷油墨层厚为  $Z = 6 \mu\text{m}$ 。为进一步简化计算,可设油墨内部为完全均一的,即  $\epsilon = 2, \zeta = 0.5$ 。

将所有数据代入式(7)和 Kubelka-Munk 模型中<sup>[2]</sup>,并结合式(5)和(6),可用软件数值运算后画出青、品、黄三原色实地色块的总的反射率  $R$  的数值模拟结果,见图 5。其中虚线为新模型预测结果,实线

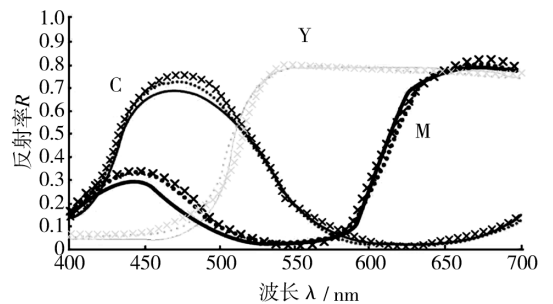


图 5 新模型和 Kubelka-Munk 模型的光谱反射率预测值和测量值的比较

Fig. 5 Comparison between measured reflectance value and predicted value by the Kubelka-Munk model and the new model

为 Kubelka-Munk 模型预测结果,而叉状线是文献[9]中给出的实验测量结果<sup>[9]</sup>。

为验证光谱反射率模型的准确性,通过光谱均方根误差 RMS 和色差公式  $E_{Lab}$  来评价光谱预测值与测量值之间的匹配效果。其中,光谱均方根误差 RMS 可表示为:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{\lambda=400}^{700} \Delta X(\lambda)^2}{n}} \quad (9)$$

式中: $\Delta X(\lambda)$ 为测量值与预测值之间的光谱误差; $n$ 为数据采样波段数,波长范围为400~700 nm,采样点以10 nm为间隔,测量每个色块对应的31个采样点的光谱反射率。

根据式(9),原有经典 Kubelka-Munk 模型和新模型相对于实际测量值的光谱均方根误差均可根据图5中的数据计算得出,见表1;而相应的色差亦可计算得到,见表2。

表1 不同模型的光谱均方根误差

Tab.1 The spectral RMS between different models

RMS	C	M	Y
经典 Kubelka-Munk 模型	0.383 1	0.403 9	0.348 2
新模型	0.251 2	0.177 1	0.191 5

表2 2种模型预测结果的色差分析

Tab.2 The color difference between the predictions of the two different models

RMS	$\Delta E_C$	$\Delta E_M$	$\Delta E_Y$
经典 Kubelka-Munk 模型	3.632 5	4.367 1	3.184 0
新模型	2.460 3	1.830 9	2.045 7

可见新模型的预测精度要高于原有模型。这主要是由于在蓝紫波段,新模型预测的反射率要略高于原有模型的预测值,这一部分的增加量主要是由于照射光中的紫外线受纸基内部荧光剂激发所致。

### 3 结语

以光能的辐射传递理论为基础,通过分析光在印刷品内部传播过程中的散射和吸收规律,并引入荧光激发函数,建立了新的印刷品光谱反射预测模型,修正了原有模型预测印刷品时蓝紫波段反射率偏小的

问题,提高了预测精度,具有一定的创新性和实用性。但是,印刷品的呈色机理是极其复杂的,如不同颜色油墨之间的相互渗透以及底层油墨向纸基内部的非线性渗透现象,在新模型中也都没有考虑到,这些有待于进一步的研究。

### 参考文献:

- [1] 杜艳君,张逸新. 经典色彩呈色模型[J]. 包装工程,2006,27(2):99-101.
- [2] 葛惊寰. 印刷品色彩预测模型[D]. 无锡:江南大学,2008.
- [3] 梁文懂,肖时钧. 传递现象基础[M]. 北京:冶金工业出版社,2006.
- [4] HERSCH R D. Spectral Prediction Model for Color Prints on Paper with Fluorescent Additives[J]. Applied Optics,2008,47(36):6710-6722.
- [5] VARGAS W E, NIKLASSON G A. Generalized Method for Evaluating Scattering Parameters Used in Radiative Transfer Models[J]. J Opt Soc Am,1997,14(9):2243-2252.
- [6] RAVEL B. A Practical Introduction to Multiple Scattering Theory[J]. Journal of Alloys and Compounds,2005,401(2):118-126.
- [7] VIGGIANO J A S. Modeling the Color of Multi-Colored Halftones[J]. Proc TAGA,1990,44(62):19-26.
- [8] MOURAD S, EMMEL P. Extending Kubelka-Munk's Theory with Lateral Light Scattering[J]. Internal Conference on Digital Printing Technologies, USA,2001:469-473.
- [9] PACKARD H, DIVISION B. Spectral Modelling of Large-Format Ink-jet Printers, Research and Development Final Report[M]. RIT Press,1996.
- [3] Intelligence Recognition of Reconnaissance Objective Based on INN Pattern Recognition[C]. Proceedings of the 5th International Symposium on Test and Measurement (Volume 1), 2003. (余不详)
- [4] ZHANG Luo Z. Automatic Color Printing Inspection by Image Processing[J]. Journal of Materials Technology, 2003(139):373-378.
- [5] 于佳,张二虎. 基于全画面的印刷品在线色差检测模型[J]. 包装工程,2009,30(3):85-87.
- [6] 刘武辉,胡更生,王琪. 印刷色彩学[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [7] china-vision. BLOB 算法简述[EB/OL]. (2003-06-12) [2011-03-01]. <http://www.china-vision.net/bbs7/2003-9/29/155940867.html>.
- [8] RAFAEL C, RICHARD E. 数字图像处理[M]. 阮秋琦,阮宇智,译. 北京:电子工业出版社,2008.
- [9] 斯特劳斯特鲁普. C++ 程序设计语言[M]. 北京:高等教育出版社,2009.

(上接第23页)