

基于三刺激权重的专色油墨配色模型研究

许昌, 王琪, 张琳

(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: 以平版印刷方式配制专色油墨为例, 建立了以库贝尔卡-芒克理论为基础的三刺激权重单常数配色数学模型, 然后利用 Matlab 软件对其和 Allen 提出的常规三刺激配色算法进行程序设计。通过配色实验证实了三刺激权重单常数配色法适用于胶印专色油墨配色, 且与常规的三刺激配色相比, 减少了迭代修正次数, 得到的匹配色样与目标色样间的色差值更小, 同色异谱程度有较大幅度的降低, 表明新建的三刺激权重配色模型具备了较高的配色精度。

关键词: 专色油墨; 库贝尔卡-芒克理论; 三刺激权重; 数学模型

中图分类号: TS801.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)11-0010-05

Study on Color Matching Mathematical Model of Spot-color Ink Based on Tristimulus Weights

XU Chang, WANG Qi, ZHANG Lin

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

Abstract: Tristimulus weights single-constant mathematical model of computer color matching of spot-color printing ink used in offset printing was established based on Kubelka-Munk theory. The new mathematical model and Allen's conventional tristimulus mathematical model were programmed using Matlab software. Computer color matching experiments showed that the tristimulus weights single-constant mathematical model is applicable to offset printing spot-color ink; the number of iterative correction is reduced; color difference is smaller, and metamerism degree is reduced compared with the conventional tristimulus mathematical model. It was concluded that the new mathematical model has higher color matching accuracy.

Key words: spot-color ink; Kubelka-Munk theory; tristimulus weights; mathematical model

专色油墨的应用日益广泛, 专色配色正在从传统的人工调墨配色向依靠计算机和测色仪器的计算机配色发展。三刺激值配色法因其理论简单易懂, 并具有实用意义, 在计算机配色中已广泛应用, 笔者在 Allen 提出的三刺激配色模型的基础上引入相应的权重值, 建立了三刺激权重配色模型, 最后通过多组配色实验进行了验证。

1 Kubelka-Munk 单常数理论

Kubelka-Munk(K-M)理论是以半透明介质为例

推导得出的二光通理论, 除了适用于半透明介质以外, 同样适用于不透明介质等混沌介质, 通过对 K-M 理论数学推导, 给出了适于配色计算的函数最简形式^[1]:

$$K/S = (1 - R_{\infty})^2 / (2R_{\infty}) \quad (1)$$

式中: K 为油墨的吸收系数; S 为油墨的散射系数; R_{∞} 为介质厚度趋向于无穷大时的波长反射率。

为方便理论推导, 将式(1)改写成函数形式, 即:

$$f(R) = (1 - R)^2 / (2R) \quad (2)$$

式中: 函数 $f(R)$ 为不透明样品的 K/S 值; R 为光谱反射率。

收稿日期: 2012-01-08

基金项目: 南京林业大学江苏省制浆造纸科学与技术重点实验室基金项目

作者简介: 许昌(1988—), 男, 浙江人, 南京林业大学硕士生, 主攻计算机专色油墨配色理论及实现。

通讯作者: 王琪(1971—), 女, 河南人, 硕士, 南京林业大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为数字化印前及色彩控制技术。

根据 K-M 理论,其吸收和散射系数适用加和性原理,得 K-M 单常数方程^[2]:

$$\frac{K}{S} = \left(\frac{K}{S}\right)_t + C_1 \left(\frac{K}{S}\right)_1 + C_2 \left(\frac{K}{S}\right)_2 + \cdots + C_n \left(\frac{K}{S}\right)_n \quad (3)$$

式中: $C_1, C_2, \dots, C_n$ 为 n 种基础油墨的浓度。

2 三刺激权重配色算法

2.1 三刺激权重配色法初始配方

三刺激权重配算法是在传统三刺激配色算法的基础上引入三刺激权重推导得出的。CIE 配色函数统一规定波长从 360 nm 以 1 nm 的波长间隔直到 830 nm 进行求和计算^[3]。理想情况下,光源和物体的测量应该具有相同的波长范围和波长间隔,事实上测色光度计的波长范围在 400~700 nm 左右,波长间隔为 10 nm 或 20 nm。为了正确计算物体三刺激值,内插和外推没有的值是很有必要的,ASTM(American Society for Testing and Materials,美国试验与材料协会)于 2001 年公布了一种引入内插和外推的最新计算三刺激值的方法——ASTM E308-01^[4]。该方法预先计算出不同照明体的三刺激权重,再将物体的光谱反射率值和一组三刺激权重按逐个波长相乘,最后将乘积相加,就能得到误差最小的三刺激值。引入三刺激权重计算物体三刺激值的公式如下^[5]:

$$\begin{cases} X = \sum_{\lambda=400}^{700} W_x(\lambda)R(\lambda) \\ Y = \sum_{\lambda=400}^{700} W_y(\lambda)R(\lambda) \\ Z = \sum_{\lambda=400}^{700} W_z(\lambda)R(\lambda) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $W_x(\lambda) = kE(\lambda)\bar{x}(\lambda)\Delta\lambda$, $W_y(\lambda) = kE(\lambda)\bar{y}(\lambda)\Delta\lambda$, $W_z(\lambda) = kE(\lambda)\bar{z}(\lambda)\Delta\lambda$; k 为归一化常数,其数值等于 $100/\sum E(\lambda)\bar{y}(\lambda)\Delta\lambda$; λ 为相应波长; E 为 CIE 标准光源的相对光谱功率分布; $R(\lambda)$ 为相应波长的光谱反射率; $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ 为标准色度观察者光谱三刺激值; $\Delta\lambda$ 为波长间隔;

建立以青、品红、黄三原色基本油墨的配色模型,模型推导建立过程中,为规范统一作如下定义:

分光光度计反射率测量波长在 400~700 nm 范围内,测量间隔为 10 nm。为色样的三刺激值,上标 s, m 分别表示目标色样和匹配色样, $r^{(s)}, r^{(m)}$ 分别为

目标色样和匹配色样的光谱反射率。

$$t = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, r^{(s)} = \begin{bmatrix} R_{400}^{(s)} \\ R_{410}^{(s)} \\ \vdots \\ R_{700}^{(s)} \end{bmatrix}, r^{(m)} = \begin{bmatrix} R_{400}^{(m)} \\ R_{410}^{(m)} \\ \vdots \\ R_{700}^{(m)} \end{bmatrix}$$

根据三刺激值配色理论,为达到理想状态的匹配,需满足以下条件^[6]:

$$t = Wr^{(s)} = Wr^{(m)} \quad (5)$$

移项整理得到:

$$W[r^{(s)} - r^{(m)}] = 0 \quad (6)$$

下面具体分析在某一波长目标色和匹配色之间的光谱反射率之差 ΔR_i :

$$\Delta R_i = R_i^{(s)} - R_i^{(m)} = [dR/df(R)]_i \Delta f(R)_i = [dR/df(R)]_i [f(R)_i^{(s)} - f(R)_i^{(m)}] \quad (7)$$

式中: $f(R) = (1-R)^2/(2R)$ 。

定义:

$$f^{(s)} = \begin{bmatrix} f(R)_{400}^{(s)} \\ f(R)_{410}^{(s)} \\ \vdots \\ f(R)_{700}^{(s)} \end{bmatrix}, f^{(m)} = \begin{bmatrix} f(R)_{400}^{(m)} \\ f(R)_{410}^{(m)} \\ \vdots \\ f(R)_{700}^{(m)} \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} d_{400} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & d_{410} & & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & d_{700} \end{bmatrix}$$

其中, $d_i = [dR/df(R)]_i$ 。因此,得到如下公式:

$$r^{(s)} - r^{(m)} = D[f^{(s)} - f^{(m)}] \quad (8)$$

将公式(8)代入式(6)移项整理后可得

$$WDf^{(s)} = WDf^{(m)} \quad (9)$$

再定义:

$$C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix}, \Phi = \begin{bmatrix} \phi_{400,1} & \phi_{400,2} & \phi_{400,3} \\ \phi_{410,1} & \phi_{410,2} & \phi_{410,3} \\ \vdots & & \vdots \\ \phi_{700,1} & \phi_{700,2} & \phi_{700,3} \end{bmatrix}$$

式中: C_1, C_2, C_3 是黄墨、品红墨、青墨的浓度; ϕ 值指匹配用上述 3 种油墨的单位 K/S 值,下标为波长,上标为相应油墨编号。因此式(3)可改写为:

$$f^{(m)} = f^{(t)} + \Phi C \quad (10)$$

将式(8),(10)一起代入(6)式,并移项整理得:

$$C = (WD\Phi)^{-1}WD[f^{(s)} - f^{(t)}] \quad (11)$$

式(11)得到的是三刺激权重配色法的初始配方,用它进行初始配方的预测计算,再将预测配方与目标

色样进行色差计算,若符合要求则输出配方,若不符,则用下面的迭代算法进行配方改善。

2.2 迭代法修正配方

定义:

$$\Delta t = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}, \quad \Delta C = \begin{bmatrix} \Delta C_1 \\ \Delta C_2 \\ \Delta C_3 \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} E_{400} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & E_{410} & & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & E_{700} \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} \bar{x}_{400} & \bar{x}_{410} & \cdots & \bar{x}_{700} \\ \bar{y}_{400} & \bar{y}_{410} & & \bar{y}_{700} \\ \bar{z}_{400} & \bar{z}_{410} & \cdots & \bar{z}_{700} \end{bmatrix}$$

式中: $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 为目标色样与初次配方得到的匹配色样之间的三刺激值差; $\Delta C_1, \Delta C_2, \Delta C_3$ 是为 Δt 使减小至 0 所需初始配方的变化量; T 为标准色度观察者光谱三刺激值; E 为 CIE 标准光源的相对光谱功率分布。可得到如下方程组:

$$\begin{cases} \Delta X = (\partial X / \partial C_1) \Delta C_1 + (\partial X / \partial C_2) \Delta C_2 + (\partial X / \partial C_3) \Delta C_3 \\ \Delta Y = (\partial Y / \partial C_1) \Delta C_1 + (\partial Y / \partial C_2) \Delta C_2 + (\partial Y / \partial C_3) \Delta C_3 \\ \Delta Z = (\partial Z / \partial C_1) \Delta C_1 + (\partial Z / \partial C_2) \Delta C_2 + (\partial Z / \partial C_3) \Delta C_3 \end{cases}$$

将其写成矩阵形式:

$$\Delta t = B \Delta C \quad (12)$$

式中:

$$B = \begin{bmatrix} \partial X / \partial C_1 & \partial X / \partial C_2 & \partial X / \partial C_3 \\ \partial Y / \partial C_1 & \partial Y / \partial C_2 & \partial Y / \partial C_3 \\ \partial Z / \partial C_1 & \partial Z / \partial C_2 & \partial Z / \partial C_3 \end{bmatrix}$$

此外,矩阵 B 可写成 2 个矩阵的乘积:

$$B = PQ \quad (13)$$

式中:

$$P = \begin{bmatrix} \partial X / \partial R_{400}^{(m)} & \partial X / \partial R_{410}^{(m)} & \cdots & \partial X / \partial R_{700}^{(m)} \\ \partial Y / \partial R_{400}^{(m)} & \partial Y / \partial R_{410}^{(m)} & & \partial Y / \partial R_{700}^{(m)} \\ \partial Z / \partial R_{400}^{(m)} & \partial Z / \partial R_{410}^{(m)} & \cdots & \partial Z / \partial R_{700}^{(m)} \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} \partial R_{400}^{(m)} / \partial C_1 & \partial R_{400}^{(m)} / \partial C_2 & \partial R_{400}^{(m)} / \partial C_3 \\ \partial R_{410}^{(m)} / \partial C_1 & \partial R_{410}^{(m)} / \partial C_2 & \partial R_{410}^{(m)} / \partial C_3 \\ \partial R_{700}^{(m)} / \partial C_1 & \partial R_{700}^{(m)} / \partial C_2 & \partial R_{700}^{(m)} / \partial C_3 \end{bmatrix}$$

由于 $X = k \bar{x}_{400} E_{400} R_{400}^{(m)} + \cdots + k \bar{x}_{700} E_{700} R_{700}^{(m)}$, 则:

$$\partial X / \partial R_{400}^{(m)} = k \bar{x}_{400} E_{400}, \partial X / \partial R_{410}^{(m)} = k \bar{x}_{410} E_{410}$$

$\cdots \partial X / \partial R_{700}^{(m)} = k \bar{x}_{700} E_{700}$, 故:

$$P = k \begin{bmatrix} \bar{x}_{400} E_{400} & \bar{x}_{410} E_{410} & \cdots & \bar{x}_{700} E_{700} \\ \bar{y}_{400} E_{400} & \bar{y}_{410} E_{410} & & \bar{y}_{700} E_{700} \\ \bar{z}_{400} E_{400} & \bar{z}_{410} E_{410} & \cdots & \bar{z}_{700} E_{700} \end{bmatrix}$$

亦可写成矩阵形式:

$$P = kTE = W \quad (14)$$

关于矩阵 Q , 计算如下:

$$\frac{\partial R_{400}^{(m)}}{\partial C_1} = \left(\frac{dR}{df(R)} \right)_{400} \frac{\partial f(R)_{400}^{(m)}}{\partial C_1} = d_{400} \frac{\partial f(R)_{400}^{(m)}}{\partial C_1}$$

式中: $f(R)_{400}^{(m)} = f(R)_{400}^{(t)} + C_1 \phi_{400,1} + C_2 \phi_{400,2} + C_3 \phi_{400,3}$; $f(R)_{400}^{(t)}$ 是承印物纸张在波长 400 nm 处 $f(R)$ 的值。

显然: $\partial f(R)_{400}^{(m)} / \partial C_1 = \phi_{400,1}$, 因此得到:

$$\partial R_{400}^{(m)} / \partial C_1 = d_{400} \phi_{400,1}$$

同样,对于其他波长和基础油墨能够得到相应的结果,得到:

$$Q = \begin{bmatrix} d_{400} \phi_{400,1} & d_{400} \phi_{400,2} & d_{400} \phi_{400,3} \\ d_{410} \phi_{410,1} & d_{410} \phi_{410,2} & d_{410} \phi_{410,3} \\ \vdots & & \vdots \\ d_{700} \phi_{700,1} & d_{700} \phi_{700,2} & d_{700} \phi_{700,3} \end{bmatrix}$$

将其写成 2 个矩阵乘积得:

$$Q = D\Phi \quad (15)$$

将式(14)和式(15)代入式(13)得:

$$B = WD\Phi \quad (16)$$

再将式(16)代入式(12)可得:

$$\Delta t = WD\Phi \Delta C \quad (17)$$

将式(17)移项整理得:

$$\Delta C = (WD\Phi)^{-1} \Delta t \quad (18)$$

那么将得到新的油墨配方 C_{new} :

$$C_{\text{new}} = C_{\text{old}} + \Delta C \quad (19)$$

2.3 油墨配方评价方法

在上述配色数学模型建立过程中,由式(19)计算出新的配方浓度比,再由此确定出目标色样和匹配色样三刺激值之差以及它们的色差和同色异谱程度,判断是否满足匹配要求。若满足匹配要求,则确认此新配方,若不满足匹配要求,则再次进入下一轮迭代修正直至满足要求。

由新的配方浓度比矢量 C_{new} 可得^[7]:

$$f_{\text{new}}^{(m)} = f^{(t)} + \Phi C_{\text{new}} \quad (20)$$

由式(2)得:

$$R = 1 + f(R) - [f^2(R) + 2f(R)]^{1/2} \quad (21)$$

将式(21)表示成矩阵形式,可得:

$$r^{(m)} = 1 + f_{\text{new}}^{(m)} - [(f_{\text{new}}^{(m)})^2 + 2f_{\text{new}}^{(m)}]^{1/2} \quad (22)$$

根据式(20),(22)和(4)可以计算出配方色样的

三刺激值。目标色样的三刺激值可直接用测色仪器得到。有了目标色样和配方色样的三刺激值,就可以计算两个色样的色差及同色异谱程度,文中的色差计算公式采用 CIE1976 色差公式。

根据三刺激配色理论和上述配色模型的推导过程可看出,配色样品只在特定的照明体和观察者下是同色的,只要条件稍有改变,同色的性质就破坏。在实际生产中进行配色时,希望配出的颜色与要求的颜色在不同的观察者观察时都认为是同色的;希望样品在不同光源下都是同色的。为了评价目标色样和配方色样的同色异谱程度,引入拟合优度法。

拟合优度法是采用 Cauchy-Schwarz(柯西-许瓦兹)不等式 $(\mathbf{X}^T\mathbf{Y})\leq(\mathbf{X}^T\mathbf{X})(\mathbf{Y}^T\mathbf{Y})$,对光谱反射率曲线进行近似程度评估,理论上,当 $GFC=1$ 时,就认为两条光谱反射率曲线是完全一致的^[8]。

$$GFC = \frac{\left| \sum_{i=1}^{31} R_s(\lambda) R_m(\lambda) \right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^{31} [R_s(\lambda)]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{31} [R_m(\lambda)]^2}} \quad (23)$$

式中: $R_s(\lambda)$ 为目标色样在波长为 n 时的光谱反射率; $R_m(\lambda)$ 为配方色样在波长为 λ 时的光谱反射率。

3 实验与分析

3.1 实验仪器及材料、实验条件

实验仪器及材料:X-Rite Spectro-eye 分光光度计(D_{65} 光源、 2° 视场),电子天平(精度 0.001 g),IGT-C1

印刷适性仪,杭华胶印快干型油墨(黄色、品红色、青色),铜版纸(157 g/m^2),调墨工具(玻璃、调墨刀),洗车水。

实验条件:印刷压力 200 N,印刷速度:2 m/s,温度 $\pm 23\text{ }^\circ\text{C}$ 。

3.2 配色模型验证及结果分析

用杭华牌胶印快干型三原色油墨任意调配 3 个专色油墨作为目标色,记为 h_1, h_2, h_3 。对每目标色用印刷适性仪各印刷 2 条,选择印刷效果好的作为目标色样条,并在每种目标样条上选取 5 个测试点,用分光光度计测量其反射率和色度值,取平均值,目标色样的 Lab 值,见表 1。

表 1 目标色样的 Lab 值
Tab.1 Lab of target color samples

	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
h_1	48.25	61.26	45.46
h_2	43.80	6.78	34.43
h_3	29.36	17.94	-54.33

用印刷适性仪印刷三原色油墨样条,测量其反射率,经过桑得森修正以及 K-M 单常数理论公式计算出基础油墨的 K/S 值(即基础油墨数据库)用以配色计算^[9]。最后利用 Matlab 分别对 Allen 的常规三刺激值配色算法和三刺激权重配色算法进行程序设计,计算各自的初始匹配色浓度比例、迭代修正后的配色浓度比例、迭代次数以及匹配色和目标色的色差。配色结果如表 2。

表 2 常规三刺激配色和三刺激权重配色法的预测配方

Tab.2 Prescription of conventional tristimulus color matching and tristimulus weights color matching algorithm

	C_{y0}	C_{m0}	C_{c0}	C_y	C_m	C_c	<i>N</i>	色差 ΔE
h_1	0.730 0	0.322 0	0.001 0	0.681 0	0.371 0	0.001 0	5	2.967 8
	0.741 0	0.322 0	0.001 0	0.569 0	0.456 0	0.001 0	1	1.479 2
h_2	0.107 5	0.009 9	0.005 5	0.110 7	0.010 8	0.005 9	4	2.767 1
	0.108 7	0.009 9	0.005 6	0.116 9	0.012 8	0.006 7	1	0.552
h_3	0.000 0	0.008 7	0.072 8	0.000 0	0.009 1	0.078 5	3	2.957 8
	0.000 0	0.008 7	0.073 1	0.000 0	0.010 0	0.095 3	1	0.532 4

其中: $C_{y0}, C_{m0}, C_{c0}, C_y, C_m, C_c$ 表示配色算法得到的初始配方浓度比例和迭代修正后的配方浓度比例; N 是指配方迭代修正次数;色差 ΔE 是指目标色与匹配色之间的色差,每一匹配色组的上边一行是常规三刺激配色结果,下一行是三刺激权重配色结果。

1) 从表 2 中 2 种配色算法得到的预测配方中发

现,对于利用常规三刺激配色算法和三刺激权重配色算法得到的初始配方结果几乎一致,原因是三刺激权重中归一化常数是比例系数,其值对计算初始配方的影响不大,而迭代修正后的配方结果相差较大,是因为在迭代修正过程中,需要计算匹配色样在相应浓度 C 下的三刺激值,以及它与目标色样三刺激值的差

值 Δt , 常规三刺激配色算法中计算色样三刺激值产生的误差较大, 但是利用三刺激权重恰能提高计算匹配色样三刺激值的准确性, 减小了它与目标色样的差值 Δt , 当多次迭代修正后, 两者的计算结果就会逐渐拉大。

2) 表 2 中常规三刺激配色得到的油墨配方的迭代修正次数 N 大于等于 3, 而三刺激权重配色得到的油墨配方的 N 都等于 1, 由此可见, 三刺激权重配色算法的迭代修正更快, 究其原因是在迭代修正过程中引入三刺激权重使得匹配色三刺激值的计算更加准确, 减少了迭代次数, 此外也说明利用三刺激值配色得到的初始配方基本都需要进一步迭代改善。

3) 表 2 中利用常规三刺激配色得到的目标色与匹配色之间的色差值都大于 2, 有些基本接近 3, 而用三刺激权重配色得到的色差值都小于 2, 有些小于 1, 说明应用三刺激权重配色算法得到的匹配色样与目标色样的色差值更小。

除了从颜色的色差角度评价配色效果外, 还采用拟合优度法 GFC 从定量方面对目标色样和配方色样的同色异谱程度进行评估, GFC 值越接近 1, 同色异谱程度越低^[8], 计算结果见表 3。从表 3 中可以看出, 与常规三刺激配色相比, 三刺激权重配色对匹配色样与目标色样的同色异谱程度有不同幅度的降低。

表 3 匹配色样与目标色样的同色异谱程度

配色色组	拟合优度法 GFC	
	三刺激权重配色	常规三刺激配色
h_1	0.997 8	0.997 3
h_2	0.944 5	0.943 5
h_3	0.985 4	0.984 8

4 结论

使用简单和易于理解的 K-M 单常数配色理论进行专色油墨配色, 并在常规的三刺激值配色模型基础上引入三刺激权重, 推导得到三刺激权重配色算法。通过 Matlab 软件对上述 2 种配色算法的程序化设计, 进行多组配色对比, 结果表明: 与常规三刺激配色

相比, 三刺激权重配色算法得到匹配色样和目标色样的色差值更小, 且同色异谱程度都有较小幅度的降低。

参考文献:

[1] KUBELKA P, MUNK F. Ein Beitrag Zur Optik Der Farbanstriche[J]. Z Tech Phys, 1931(12):593.

[2] 郝文静, 赵秀萍. Kubelka-Munk 单常数配色理论与实践[J]. 中国印刷与包装研究, 2009(1):43-47.

HAO Wen-jing, ZHAO Xiu-ping. Study on Kubelka-Munk Theory with Single Constant and Practice of Computer Color Matching[J]. China Printing and Packaging Study, 2009(1):43-47.

[3] BILLMEYER F W, FAIRMAN H S. CIE Method for Calculating Tristimulus Values[J]. Color Research and Application, 1987, 12(1):27-36.

[4] ASTM E 308-01, Standard Practice for Computing the Colors of Objects Using the CIE System[S].

[5] 伯恩斯. 颜色技术原理[M]. 李小梅, 译. 北京: 化学工业出版社, 2002.

BERNS R. Principles of Color Technology [M]. LI Xiao-mei. BeiJing: Chemical Industry Press, 2002:262-267.

[6] ALLEN Eugene. Basic Equations Used in Computer Color Matching [J]. Journal of the Optical Society of America, 1966, 56(9):1256-1259.

[7] 陈翠琴, 唐正宁. 专色油墨计算机配色模型研究[J]. 包装工程, 2008, 29(3):75-77.

CHEN Cui-qin, TANG Zheng-ning. Study of Computer Color Matching Model for Spot Color Ink[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(3):75-77.

[8] FRANCISCO H, ROSEN R, BERNS R S. Comparative Study of Metrics for Spectral Match Quality[C]//The First European Conference on Color Graphics, Imaging, and Vision. 2002:492-496. (余不详)

[9] 白卫国, 胡新月, 严岩. 基于墨量计算专色配色系统的研究[J]. 中国印刷与包装研究, 2010(2):88-97.

BAI Wei-guo, HU Xin-yue, YAN Yan. Research on the Spot Color Matching System Based on Ink Volume[J]. China Printing and Packaging Study, 2010(2):88-97.