

# 基于 Kubelka-Munk 理论的光谱配色算法研究

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2017.01.008

赵德方<sup>1</sup> 黄新国<sup>1,2,3</sup>

1. 武汉大学  
印刷与包装系  
湖北 武汉 430079
2. 湖南工业大学  
包装与材料工程学院  
湖南 株洲 412007
3. 时代出版传媒股份有限公司  
安徽 合肥 230071

**摘要:** 为了计算出更为精确的专色油墨配方, 保证专色油墨在提高印刷速度与印刷质量的同时, 保持色彩再现的一致性。选取 Pantone297C、Pantone273C、Pantone450C 3 个专色作为标样, 建立 C、M、Y、BK 四色油墨的基础数据库, 并对标样、底基以及四色油墨的样条进行桑德森修正。根据 Kubelka-Munk 单常数光谱配色算法, 在 Matlab 中建立单常数的光谱配色模型, 确定标样的油墨配方, 通过比较目标色与配方色样的光谱反射率以及色差, 验证油墨配方的准确性。实验结果表明 Pantone297C、Pantone273C、Pantone450C 目标色与配方色样反射率曲线基本吻合: 对于 Pantone297C, 标样与配样的色差为  $\Delta E=1.21$ ; 对于 Pantone273C, 标样与配样的色差为  $\Delta E=0.96$ ; 对于 Pantone450C, 标样与配样的色差为  $\Delta E=2.65$ 。从而验证了四色油墨基础数据库的准确性以及基于 Kubelka-Munk 单常数光谱配色算法的实用性。

**关键词:** 专色油墨; 油墨配方; Kubelka-Munk 理论; 基础数据库; 配色模型

**中图分类号:** TS801.3; TS807 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2017)01-0046-07

## 1 研究背景

随着包装印刷业的蓬勃发展, 采用独特的色彩应用可以给人留下深刻的印象, 增加产品的诱惑力。如今仅凭 C、M、Y、K 四色叠印的颜色已经不能满足市场发展的要求<sup>[1-5]</sup>。为了满足人们对印刷质量的要求, 包装印刷企业已经开始大量使用专色油墨。专色油墨因其本身所具有的特点, 不仅可以复制出比四色叠印更为广泛的颜色, 而且其应用范围更广泛, 能够更好地展示产品丰富的色彩, 保证色彩再现的一致性, 具有防伪效果。

在测色仪普及之前, 印刷包装企业大都采用人工经验配色, 即通过目测, 不断调配、调整油墨配方直至满意。它不仅要求操作人员具有丰富的配色经验, 而且配墨过程耗时较长, 容易浪费材料。人

工经验配色经常受配色者生理、心理及其他主客观因素的影响, 产品质量难以稳定, 不适合印刷包装企业的现代化生产流程。仪器配色是用印刷适性进行配色打样, 然后利用分光光度计等测色仪器测量所配的专色油墨与标准油墨的色差, 再根据目标色与配色的色差进行调配, 直至目标色与配色的色差满足所要求的色差。计算机配色技术是将油墨的基础颜色数据库预先储存在电脑中, 然后利用储存在电脑中的基础数据库和配色软件, 计算出匹配目标色的 C、M、Y、BK 基础油墨颜色的混合比例, 以此来获得油墨配方<sup>[6-9]</sup>。可见, 计算机配色是提高配色精度的必然方向。

计算机配色速度快, 效果稳定, 可保持多批次产品的一致性, 并且具有利用剩余油墨的功能, 节约印刷成本, 是今后印刷包装企业的发展方向之一。随着

收稿日期: 2016-08-10

基金项目: 湖南省教育厅科学研究基金资助项目(14C0324), 安徽省博士后研究人员科研基金资助项目(2015B060)

作者简介: 赵德方(1992-), 男, 江苏徐州人, 武汉大学硕士生, 主要研究方向为颜色科学,

E-mail: 1206026342@qq.com

计算机配色的应用范围越来越广, 其效果明显优于人工配色和仪器配色, 专色配色模型的研究也越来越成熟。如周春霞等<sup>[9]</sup>分析了基于 Kubelka-Munk 单常数方程进行专色油墨三刺激值匹配的计算机配色实现原理、算法流程及配方评价指标。于蒙蒙等<sup>[10]</sup>基于新双常数 Kubelka-Munk 理论, 推导出三刺激值配色模型, 并详细介绍了模型的算法实现过程。然而, 已有研究提出的专色配色模型, 都是根据 Kubelka-Munk 理论的三刺激值匹配算法(这种配色模型的原理只要两个颜色的三刺激值相等, 就能够给人的颜色感觉相同), 但是仍然缺乏对基于 Kubelka-Munk 理论的光谱配色模型的研究。Kubelka-Munk 理论有单常数和双常数算法 2 种。其中, 双常数算法一般被用于油漆、塑料、涂料等工业中, 而单常数算法主要被用于纺织品印染工业中<sup>[11-12]</sup>。

为此, 本文拟根据 Kubelka-Munk 理论, 建立单常数光谱配色算法模型, 并且计算目标色的油墨配方; 建立一个基于铜版纸的 C、M、Y、BK 四色油墨的基础数据库, 并且分析目标色与配方色样的色差以及光谱反射率吻合情况, 以验证给出的光谱配色基础数据库的准确性, 为计算机配色系统的发展提供一定的理论参考。

## 2 理论分析

### 2.1 Kubelka-Munk 理论

Kubelka-Munk 理论中, 假设膜层界面的折射率连续发生变化, 因而只需要考虑漫射光线在上下两个方向穿越膜层的情景, 故可以根据色料膜层的吸收系数  $K$  和散射系数  $S$  描述光在色料膜层的吸收情况和散射情况, 被广泛用于专色配色的光谱预测模型<sup>[13-14]</sup>如下:

$$\rho_{\infty} = 1 + K/S - [(K/S)^2 + 2(K/S)]^{1/2}, \quad (1)$$

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

式中:  $\rho_{\infty}$  为不透明介质的反射率;

$K$  为色料粒子的吸收系数;

$S$  为色料粒子的散射系数。

### 2.2 Saunderson 修正

由于 Kubelka-Munk 理论假设膜层界面的折射率是连续变化的, 然而在实际的空气-膜层界面通常都会发生折射率的突变, 这种不连续性使得 Kubelka-Munk 光谱配色模型无法取得与实际测量值近似一致的光谱反射率<sup>[15-16]</sup>。因此, 需对其进行 Saunderson(桑

德森)修正, 修正后的模型为

$$\rho_{\text{corr}, \infty} = (\rho_{\infty} - k_1) / (1 - k_1 - k_2(1 - \rho_{\infty})). \quad (3)$$

式中:  $k_1$  为平行光的菲涅耳反射系数, 约为 0.04;

$k_2$  为从内部射向表面的漫射光的菲涅耳反射系数, 约为 0.4~0.6。

### 2.3 单个色墨的单常数光谱匹配法

作为透明材料的油墨, 其散射性质与底基的散射性质相比可忽略不计, 故  $S$  为常数,  $K/S$  就可作为一个数来处理。单个油墨的  $K/S$  值与浓度存在着如下线性关系式:

$$(K/S)_{\lambda, i} = (K/S)_{\lambda, w} + c_j \phi_{\lambda, i} \quad (4)$$

式中:  $(K/S)_{\lambda, i}$  为第  $i$  种墨的  $K/S$  值;

$(K/S)_{\lambda, w}$  为基底  $K/S$  值;

$c_j$  为第  $i$  种色料的第  $j$  个浓度;

$\phi_{\lambda, i}$  为第  $i$  种色料单位浓度的  $K/S$  值。

可知单常数色料混合公式为:

$$(K/S)_{\text{mix}} = (K/S)_w + c_1(K/S)_1 + c_2(K/S)_2 + \dots + c_n(K/S)_n \quad (5)$$

式中:  $(K/S)_w$  为基底的吸收和散射系数;

$(K/S)_{\text{mix}}$  为混合后的吸收和散射系数;

$c_n$  为第  $n$  种色料的浓度。

由 Kubelka-Munk 理论的单常数加和性原理知:

$$\left(\frac{K}{S}\right)^s = \left(\frac{K}{S}\right)^w + \sum_{i=1}^3 c_i \left(\frac{K}{S}\right)_i \quad (6)$$

现今

$$f = \begin{bmatrix} (K/S)_{380} \\ (K/S)_{390} \\ \vdots \\ (K/S)_{730} \end{bmatrix}, \quad c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix},$$

$$\phi = \begin{bmatrix} (K/S)_{380}^1 & (K/S)_{380}^2 & (K/S)_{380}^3 \\ (K/S)_{390}^1 & (K/S)_{390}^2 & (K/S)_{390}^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ (K/S)_{730}^1 & (K/S)_{730}^2 & (K/S)_{730}^3 \end{bmatrix},$$

则式(6)可改写为:

$$f^s = f^w + \phi c \quad (7)$$

以上各式中:  $f^w$  为基底  $\left(\frac{K}{S}\right)$  列阵;

$f^s$  为标样的  $\left(\frac{K}{S}\right)$  列阵;

$\phi$  为单位浓度下不同波长的各配方染料的  $\left(\frac{K}{S}\right)$  矩阵;

$c$  为各配方染料的浓度值列阵。

$c_1, c_2, c_3$  为配色处方, 对于三拼色, 求得  $c_1, c_2, c_3$ , 最后把浓度归一化为  $c_1+c_2+c_3=1$ , 求出的浓度是其在总色料中的百分比。

### 3 实验方案

#### 3.1 仪器与材料

1) 实验仪器。IGT C1-5 印刷适性仪, 荷兰生产; FA/MA 系列智能化电子分析天平(精确到 0.000 1 g), 瑞士生产; X-rite SpectroEye 分光光度计, 美国生产。

2) 实验材料。①玻璃皿; ②刮刀; ③注墨器(量程为 2 mL); ④密度为 1 g/mL 的黄色、品红、青色、黑色的基色油墨、密度为 1.5 g/mL 的冲淡剂(白色墨); ⑤铜版纸(70 mm × 320 mm)。

#### 3.2 基础数据库的建立

1) 样张的准备。铜版纸样张数量为 100 张, 尺寸为 70 mm × 320 mm。

2) 油墨的调配。调配以质量分数 5% 为冲淡剂的含量梯度, 将基础油墨 Y、M、C 与冲淡剂均匀混合(质量分数为 5%~100%, 梯度为 5%), 设定油墨的总质量为 5 g。

3) 样条的制作。利用印刷适性仪, 调节印刷适性仪压力为 300 N, 每次的注墨量为 0.3 mL, 控制匀墨时间为 2~3 min, 四色油墨的基础数据库样本如图 1 所示。

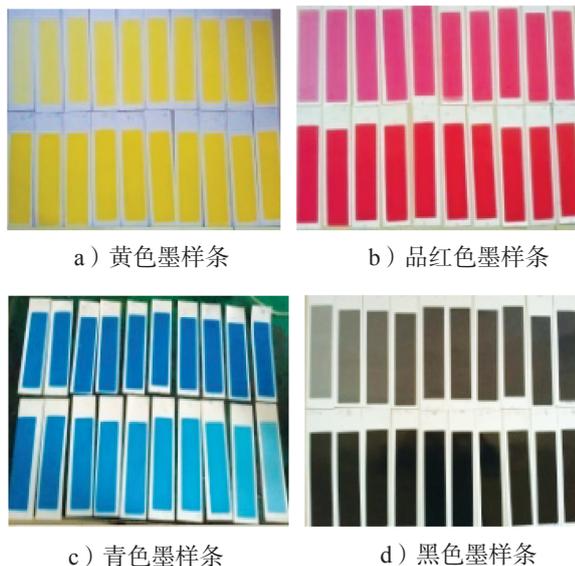


图 1 铜版纸样本

Fig. 1 Coated paper samples

4) 数据库的建立。使用 X-rite SpectroEye 分光

光度计测量铜版纸的光谱反射率, 建立四色油墨的基础数据库。

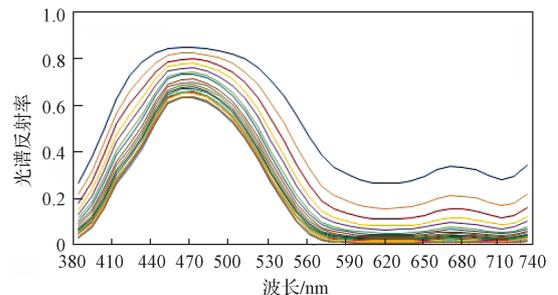
#### 3.3 光谱配色模型的建立与配方修正

根据 Kubelka-Munk 理论, 采用单常数光谱匹配法, 计算出目标色样的配方比例。并通过 X-Rite Ink Formulation 配色系统, 对计算出的目标色样的配方不断进行修正, 对比分析目标色样与配方色样的光谱反射曲线的吻合程度以及色差情况, 最终得到合适的配方修正比例。

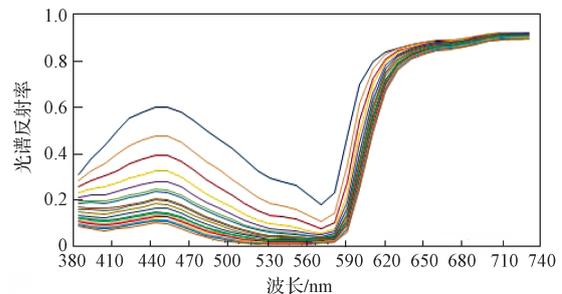
### 4 实验数据分析

#### 4.1 铜版纸基础数据库

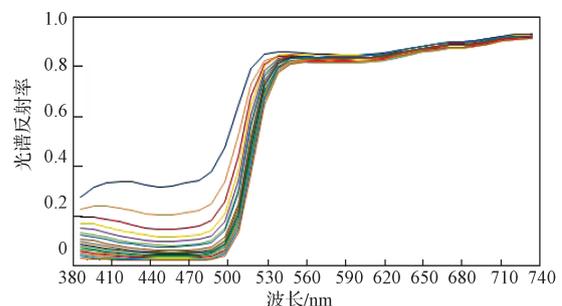
实验中采用 X-rite SpectroEye 分光光度计测量选用的铜版纸样条表面的颜色数据, 并且建立铜版纸在不同油墨浓度下的光谱配色数据库, 所得结果如图 2 所示。



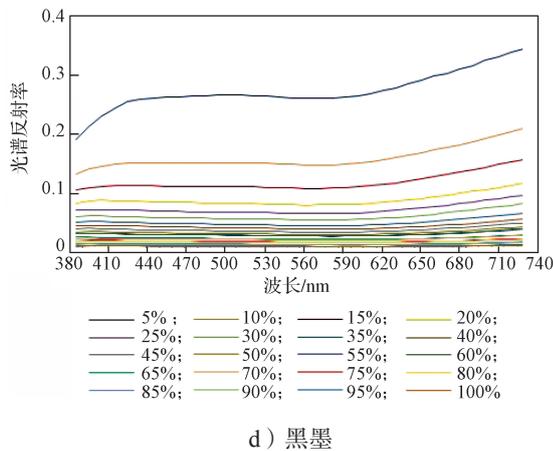
a) 青墨



b) 品红墨



c) 黄墨



d) 黑墨

图2 铜版纸油墨基础数据库

Fig. 2 Coated paper database

由图2可以得知, C、M、Y、BK四色油墨的不同浓度曲线基本呈现出有规律的变化, 曲线较为光滑, 没有突变, 光谱反射率随着油墨浓度的增加而逐渐降低。

#### 4.2 验证油墨的基础数据库

计算基础数据库的光谱数据理论预测值, 通过比较铜版纸的基础数据库的光谱反射率的实际测量值与理论预测值, 验证铜版纸基础数据库的准确性。首先, 由线性插值运算计算单位浓度的  $K/S$  值, 然后根据式(1)、式(2)和式(4)求出光谱数据理论预测值。图3所示是实际测得的铜版纸光谱反射率与理论预测值的对比结果图(以50%的青墨、品红墨、黄墨、黑墨为例)。

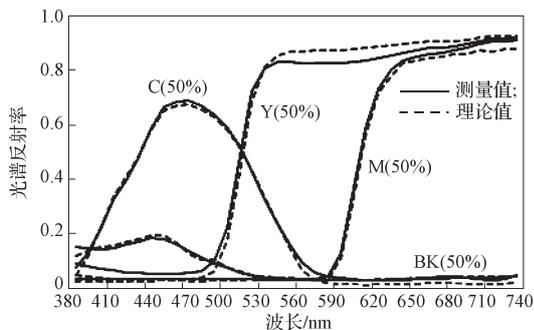


图3 铜版纸样张光谱反射率测量值与理论值对比图

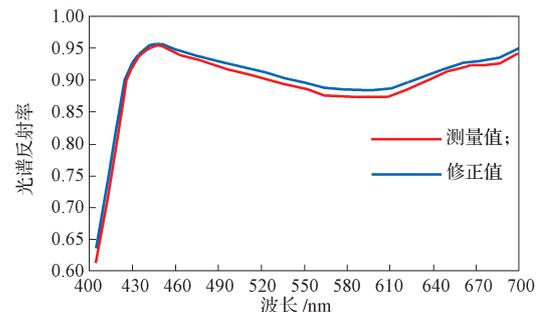
Fig. 3 Comparison of the measured value and the theoretical value of the coated paper samples

由图3可以得知, C、M、Y、BK四色油墨的铜版纸基础数据与理论预测值基本重合, 说明铜版纸基础数据库的准确性较高, 可以作为油墨配色的基础数据库。

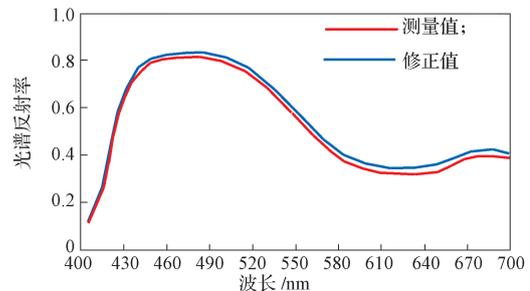
#### 4.3 获取配方

##### 4.3.1 桑德森修正底基与标样色

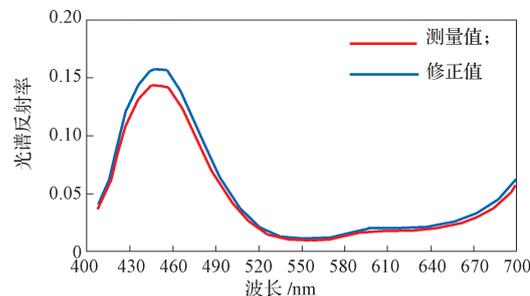
由于 Kubelka-Munk 理论假设介质界面折射率不发生变化, 但实际上, 对于不透明反射样品, 在空气和膜层之间通常存在折射率的变化, 这种折射率的变化, 使得光线在界面上一定会产生光的镜面反射, 导致计算复杂化。故为了得到精确的结果, 必须对测量得到的反射比加以修正。因此, 在进行专色油墨配方的计算之前, 需要对标样以及底基进行桑德森修正<sup>[20]</sup>。本实验中取 Pantone297C、Pantone273C 和 Pantone450C 3个专色作为标样。根据前面给出的公式(3), 对标样以及底基进行桑德森修正, 所得结果如图4所示。由图4可以得知, 经过桑德森修正后的标样以及底基的光谱反射率均略高于实际测量值, 可见, 修整处理能在一定程度上降低测量误差。



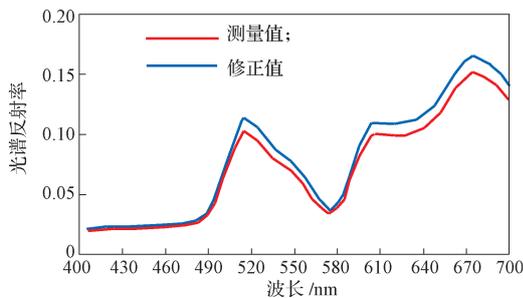
a) 铜版纸测量值与桑德森修正的反射率对比



b) Pantone297C 测量值与桑德森修正的反射率对比



c) Pantone273C 测量值与桑德森修正的反射率对比



d) Pantone450C 测量值与桑德森修正的反射率对比

图4 铜版纸及标样的光谱反射率修正对比图

Fig. 4 Comparison of corrected spectral reflectance of coated paper and standard samples

#### 4.3.2 配方计算与修正

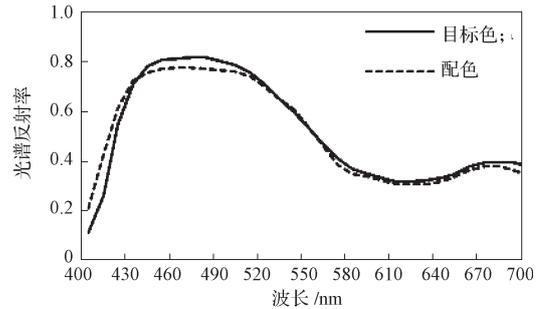
根据公式(7),求得Pantone297C的Y、M、C的配方质量分数分别为43.34%、5.19%、51.42%;Pantone273C的Y、M、C的质量分数分别为0、63.3%、36.7%;Pantone450C的Y、M、C的质量分数分别为73.8%、16.9%、9.3%。根据配方比例,打样(油墨总质量为5g)并使用X-rite SpectroEye分光光度计获取配方色样的光谱反射率,利用X-Rite Ink Formulation配色系统进行配方修正。

配方修正后,所求得Pantone297C的Y、M、C的配方质量分数分别为40.26%、6.53%、53.21%;Pantone273C的Y、M、C的配方质量分数分别为1.3%、60.4%、38.3%;Pantone450C的Y、M、C的配方质量分数分别为62.2%、14.9%、22.9%。

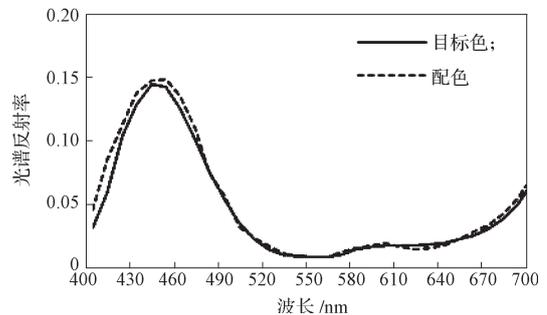
根据修正后的配方比例打样(油墨总质量为5g),采用分光光度计测量标样与配方色样的实际色差:对于Pantone297C,标样与配方色样的色差为 $\Delta E=1.21$ ;对于Pantone273C,标样与配方色样的色差为 $\Delta E=0.96$ ;对于Pantone450C,标样与配方色样的色差为 $\Delta E=2.65$ 。在实际生产中,对于两个颜色之间的差别,要求调墨的色差:一般产品 $\Delta E \leq 3.0$ ,高端产品 $\Delta E \leq 1.0$ 。可见,所求出的目标色配方浓度百分比符合专色配色要求。

图5所示为目标色与配方色样的光谱反射率对比图。从图5中可以看出,对于Pantone297C、Pantone273C,目标色与配方色样的反射率曲线基本吻合;但对于Pantone450C,即使在配方修正后,目标色与配色的反射率曲线吻合情况也较差。由于是人为调配油墨,因而在调墨的过程中,若搅拌不均匀,以及分光光度计在测量的过程中受到纸张表面镜面

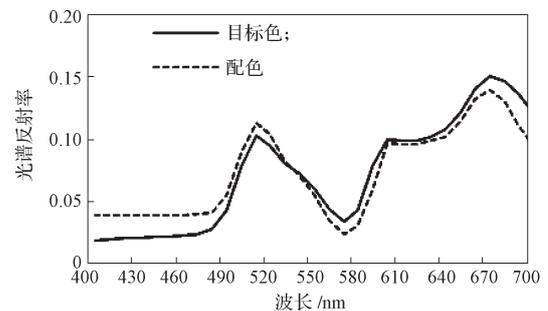
反射的影响,这些都会影响配色精度。



a) Pantone297C



b) Pantone273C



c) Pantone450C

图5 目标色与配方色样的反射率对比图

Fig. 5 Comparison of reflectance of target color and matching color

## 5 结论

本研究是在Matlab中对标样、底基以及Y、M、C、BK四色油墨的样条进行桑德森修正,由线性插值计算出各染料单位浓度的(K/S)值(即 $\phi$ 值)以及标样和底基的(K/S)值,基于Kubelka-Munk单常数光谱匹配算法建立专色配色模型,以此确定标样的油墨配方。可得出如下结论:

1)建立了基础数据库。本文选取Pantone297C、Pantone273C、Pantone450C 3个专色作为标样,建立CMYK四色油墨的基础数据库,并对标样、底基以及

四色油墨的样条进行桑德森修正, 根据 Kubelka-Munk 单常数光谱配色算法, 在 Matlab 中建立单常数的光谱配色模型, 将已制备的铜版纸基础数据库成功导入光谱配色模型中。根据导入的 Y、M、C 三色油墨的基础数据库, 可以实现每种颜色油墨的不同浓度的光谱反射率曲线, 冲淡剂的质量分数范围为 5%~100%, 梯度为 5%, 波长范围为 400~700 nm, 间隔为 10 nm。

2) 验证了基础数据库。确定标样的油墨配方后, 通过比较目标色样与配方色样的光谱反射率以及色差, 验证了油墨配方的准确性。所得实验结果表明: Pantone297C、Pantone273C、Pantone450C 的目标色与配方色样反射率曲线基本吻合, 对于 Pantone297C, 标样与配方色样的色差为  $\Delta E=1.21$ ; 对于 Pantone273C, 标样与配方色样的色差为  $\Delta E=0.96$ ; 对于 Pantone450C, 标样与配方色样的色差为  $\Delta E=2.65$ 。从而证明了四色油墨基础数据库的准确性, 以及基于 Kubelka-Munk 单常数光谱配色算法的实用性。

可见, 基于 Kubelka-Munk 理论, 可计算出更为精确的专色油墨配方, 保证专色油墨在提高印刷速度与印刷质量的同时, 保持色彩再现的一致性。

#### 参考文献:

- [1] KOIRALA P, HAUTA-KASARI M, MARTINKAUPPI B, et al. Color Mixing and Color Separation of Pigments with Concentration Prediction[J]. Color Research & Application, 2008, 33(6): 461-469.
- [2] 杨春雷. 配墨系统关键技术研究 [D]. 北京: 北京印刷学院, 2013.  
YANG Chunlei. Research on Key Technology of Color Matching for Spot-Color Printing Ink[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2013.
- [3] 许佳艳. 涤棉双组份纤维混色计算机辅助配色的研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2013.  
XU Jiayan. The Study on Computer Aid Matching for Colored Fiber Blends of Polyester and Cotton[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2013.
- [4] YANG H Y, ZHU S K, PAN N. On the Kubelka-Munk Single-Constant/Two-Constant Theory[J]. Textile Research Journal, 2010, 80(3): 263-270.
- [5] YANG H Y, ZHANG G, ZHOU J L. Effect of Computer Color Matching System in Laboratory[J]. Advanced Materials Research, 2013(655/656/657): 3-6.
- [6] 元辉. 胶印油墨的专色配色研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2007.  
YUAN Hui. Study on the Spot Color Matching of Offset Ink[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.
- [7] YANG H Y, ZHOU J L, QUE Z W, et al. The Influence of Dye Concentration on Kubelka-Munk Fundamental Optical Parameters of Fabric[J]. Advanced Materials Research, 2011(332/333/334): 481-484.
- [8] 骆光林, 高虎, 王海梅. 基于双常数 Kubelka-Munk 理论的凹印油墨配色方法 [J]. 包装工程, 2006, 27(6): 12-14.  
LUO Guanglin, GAO Hu, WANG Haimei. Method of Ink Color Matching Used in Gravure Printing Based on Kubelka-Munk Theory and Two Constants[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(6): 12-14.
- [9] 周春霞, 唐正宁. 包装印刷专色油墨的计算机配色理论研究 [J]. 包装工程, 2006, 27(5): 121-123.  
ZHOU Chunxia, TANG Zhengning. Study on Computer Color Matching of Special Ink Packaging Printing[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(5): 121-123.
- [10] 于蒙蒙, 唐正宁. 新双常数 Kubelka-Munk 理论专色油墨配色算法研究 [J]. 包装工程, 2010, 31(13): 104-107.  
YU Mengmeng, TANG Zhengning. Research on Color Matching Algorithm for Spot Color Ink Based on New Two-Constant Kubelka-Munk Theory[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(13): 104-107.
- [11] CENTORE P. Perceptual Reflectance Weighting for Estimating Kubelka-Munk Coefficients[EB/OL]. [2016-08-02]. <http://www.munsellcolourscienceforpainters.com/ColourSciencePapers/PerceptualReflectanceWeightingForKubelkaMunk.pdf>.
- [12] LIN J, XU L, ZHANG H. Hybrid Biogeography Based Optimization for Constrained Optimal Spot Color Matching[J]. Color Research & Application, 2014, 39(6): 607-615.
- [13] LIN J. A Hybrid Biogeography-Based Optimization for the Fuzzy Flexible Job-Shop Scheduling Problem[J]. Knowledge-Based Systems, 2015, 78: 59-74.
- [14] 许法强. 基于光谱的多色复制技术研究及实现 [D]. 武汉: 武汉大学, 2013.  
XU Faqiang. Research on Spectral-Based Multiple-

- Ink Reproduction and Its Implementation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.
- [15] PAHJEHFOULADGARAN M, KAARNA A. Spectral Matching Functions and Ellipse Mappings in Search for More Uniform Chromaticity and Color Spaces[C]// International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems. Heidelberg: Springer, 2010: 80–92.
- [16] KARBASI A, MORADIAN S, ASIABAN S. Improving the Performance of Computer Color Matching Procedures[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2008, 25(9): 2251–2262.

## Research of Spectral Color Matching Algorithm Based on Kubelka-Munk

ZHAO Defang<sup>1</sup>, HUANG Xinguo<sup>1,2,3</sup>

- ( 1. School of Printing and Packaging, Wuhan University, Wuhan 430079, China;  
2. School of Packaging and Materials Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;  
3. Time Publishing and Media Co., Ltd., Hefei 230071, China )

**Abstract:** In order to calculate the ink formula more precisely and ensure the consistency of color reproduction based on improving printing speed and printing quality, Pantone297C、Pantone273C、Pantone450C were used as the standard samples in experiment, with the database establishment of CMYK four color printing ink and Saunderson correction of standard sample, base materials and four color printing ink. In Matlab, the single constant color matching model was set up to calculate ink formula and verify the accuracy of ink formulation by comparing the spectral reflectance and color difference of target and matching colors. Experimental results showed that reflectance curves of target and matching colors of Pantone297C, Pantone273C, Pantone450C were basically consistent. For Pantone297C, the color difference of target color and matching color was 1.21, while it was 0.96 for Pantone273C and 2.65 for Pantone450C, which verified the correctness of the four color ink database and the practicability of the single constant spectrum matching algorithm based on Kubelka-Munk.

**Keywords:** spot color ink; ink formulation; Kubelka-Munk; database; color matching model