

# 计算机配色光谱基础数据库建立方法的优化设计

方丽丽<sup>1</sup>, 万晓霞<sup>1\*</sup>, 吕伟<sup>2</sup>, 朱红艳<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 武汉大学印刷与包装系, 湖北 武汉 430079;

<sup>2</sup> 深圳劲嘉集团股份有限公司, 广东 深圳 518055;

<sup>3</sup> 武汉红金龙印务股份有限公司, 湖北 武汉 430056

**摘要** 计算机配色逐渐成为主流配色方式,用于保证包装印刷等产品在颜色复制过程中的一致性。光谱基础数据库是计算机配色的基本条件,其建立方法过于复杂,影响了计算机配色技术的推广和应用。根据 Kubelka-Munk 理论分析,建立光谱基础数据库的过程中样条质量浓度(简称浓度)、油墨浓度梯度和油墨梯度数量对配色结果有较大影响。为了优化光谱基础数据库,获得更加准确的配色结果,基于单因素实验法、正交实验法及相关评价方法,提出了一种在配色建库过程中最佳的浓度梯度、梯度数量及样条油墨的浓度范围的组合。实验通过建立的数据库对潘通色进行配色,对色差进行计算,并结合极差进行分析。实验结果显示优化的光谱基础配色数据库很大程度上减少了建库工作量,同时通过计算获得的目标配色结果的精度高,符合生产要求,说明该方法能有效选取最佳参数组合。

**关键词** 视觉光学; 计算机配色; 光谱基础数据库; 单因素实验; 正交实验

中图分类号 TS801.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0633001

## Optimized Design of Method for Establishing Basic Spectrum Database of Computer Color Matching

Fang Lili<sup>1</sup>, Wan Xiaoxia<sup>1\*</sup>, Lü Wei<sup>2</sup>, Zhu Hongyan<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Printing and Packaging, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China;

<sup>2</sup> Shenzhen Jinjia Group Co., Ltd, Shenzhen, Guangdong 518055, China;

<sup>3</sup> Wuhan Hongjinlong Printing Co., Ltd, Wuhan, Hubei 430056, China

**Abstract** Computer color matching has gradually become the mainstream color matching method to ensure the consistency of packaging and printing products in the color reproduction process. The basic spectrum database is the basic condition of computer color matching, and its establishment method is too complicated, which affects the promotion and application of computer color matching technology. According to Kubelka-Munk theoretical analysis, the spline mass concentration (concentration for short), ink concentration gradient, and the number of ink gradients have a great influence on the color matching results in the process of establishing the basic spectrum database. In order to optimize the basic spectral database and obtain more accurate color matching results, based on the single factor experiment method, orthogonal experiment method, and related evaluation methods, an optimal combination of concentration gradient, gradient number, and concentration range of spline ink in the process of color matching database building is proposed. In the experiment, we use the established database to match Pantone colors, calculate the color difference, and analyze the results based on the concentration range. Experimental results show that the optimized spectrum color matching database greatly reduces the workload of database construction. At the same time, the accuracy of the target color matching results obtained by calculation is high, which meets the production

收稿日期: 2020-10-19; 修回日期: 2020-10-27; 录用日期: 2020-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(61275172, 61575147)

\* E-mail: wan@whu.edu.com;

requirements, indicating that the method can effectively select the best parameter combination.

**Key words** visual optics; computer color matching; basic spectrum database; single-factor experiment; orthogonal experiment

**OCIS codes** 330.1690; 300.6170

## 1 引言

随着颜色工业的快速发展,人们对产品质量的要求不断提高。为了能够在包装产品上展现更细腻、精美的颜色,包装、印刷行业对多数产品会采用专色印刷。目前的专色油墨配色主要以人工经验配色为主,人工经验配色会受配色者的心理、生理等主观因素以及纸张、油墨批次等客观因素的影响,导致最终的配色结果不理想<sup>[1]</sup>。不同于传统的人工配色,计算机配色系统实现了专色油墨的自动配色,降低了配色的劳动强度以及损耗程度,同时促进了包装、印刷行业向数字化、网络化方向的发展。

计算机配色技术是通过颜色测量仪器测量出目标色样的光谱反射率数据并将其输入计算机中,然后利用存储在计算机中的光谱基础数据库以及相关配色软件进行计算和修正,最终获得符合目标色样要求的油墨配方。基础数据库是计算机配色技术的关键组成部分,它体现各种染料的吸收和散射性能、理论质量浓度(下文简称浓度)和有效浓度之间的关系,以及底材(基底)的吸收和散射性能<sup>[2]</sup>。基础数据库的建立包括底材样张的准备、油墨的调配、样条的制作以及数据测量等步骤。常将一定浓度的油墨与冲淡剂调配混合,利用印刷适性仪在底材样张上得到不同浓度下的样条,使用分光光度计测量各样条的光谱数据并计算不同浓度的样条在不同波长下的  $K/S$  值,其中,  $K$  为吸收系数,  $S$  为散射系数。由于油墨种类繁多,制作油墨样条耗时较长,实际建立基础数据库时无法获得所有浓度的油墨  $K/S$  值,只能通过打样的方式得到一些离散的、具体浓度下的油墨样条的  $K/S$  值,利用最小二乘法对油墨  $K/S$  值与对应浓度的关系进行曲线拟合,最后计算出油墨的本征  $K/S$  值。

计算机配色的准确性很大程度上依赖于光谱基础数据库中油墨种类的丰富程度和完整程度。油墨的种类越多,计算生成的颜色配方就越多,配色准确性就会提高。因此,在建库的过程中,需要尽可能将同一品牌不同型号和不同颜色的所有油墨都录入到数据库中。因为计算机配色理论遵循的是库贝尔卡-芒克函数理论(Kubelka-Munk 理论)<sup>[3-4]</sup>,理论

上, Kubelka-Munk 理论的吸收系数  $K$  和散射系数  $S$  的比值与浓度  $C$  呈线性关系,但是对于多数油墨而言,只有在低浓度范围内,油墨  $K/S$  值与对应的浓度才近似呈线性关系,随着油墨浓度的增加,承印物对油墨的吸收率降低,  $K/S$  值将随浓度的增大而减小<sup>[5]</sup>。所以在建立光谱基础数据库过程中,制作油墨样条时需要考虑到油墨与冲淡剂调配的不同浓度  $C$  (简称样条浓度)的影响。与此同时,选择样条浓度需要注意选取的浓度节点的数量(简称梯度数量)以及浓度节点间隔的大小(简称浓度梯度大小)。

建库对油墨种类及数量有一定的要求,制作油墨样条耗时长,导致建库周期长,为了提高建库效率,金福江等<sup>[6]</sup>通过建立三原色基础数据曲线,对低浓度及高浓度段的基础数据点进行筛选,从而减少染色布样的数量,减小建库工作量。但是选取的基础数据点仅对当前使用的染料有效,换言之,这个方法不具有普遍适用性。

本文针对构建配色基础数据库时高浓度油墨样品的  $K/S$  值与浓度之间呈非线性关系的问题,研究了基础数据库建立的过程中不同的样条浓度、梯度数量以及浓度梯度大小三者之间的关系对配色结果的影响,基于单因素实验法、正交实验法及相关评价方法得到了一种在配色建库过程中最佳的样条浓度、浓度梯度及梯度数量的组合。该研究为建立配色光谱基础数据库时样条浓度、浓度梯度及梯度数量的选择提供了科学依据。

## 2 基础理论

### 2.1 Kubelka-Munk 理论

计算机配色的基础理论是 Kubelka-Munk 理论,假设膜层界面的折射率连续变化,只考虑在膜层中向上和向下行进的漫射光在膜层中穿行时发生的情形<sup>[7-8]</sup>,采用色料膜层的吸收系数  $K$  和散射系数  $S$  来描述光在色料膜层的吸收情况和散射情况。针对不透明介质,当膜层厚度的增加不会影响不透明介质的光谱反射率  $R_\lambda$  时,获得以  $R_\lambda$  表示波长  $\lambda$  下的  $K/S$  的基本表达式:

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

### 2.2 光谱配色算法

光谱配色算法又称无条件配色<sup>[9]</sup>,目的是使配方色样的光谱反射率与目标色样的光谱反射率完全相同,实现光谱匹配,其数学表达式为

$$(K/S)_{s,\lambda}=(K/S)_{m,\lambda}, \quad (2)$$

式中:下标 s 为目标色样;下标 m 为配方色样<sup>[10]</sup>。

由于油墨等色料的散射系数与其底材的散射系数比值很小,可以忽略不计<sup>[9]</sup>,故可以将色料的吸收系数 K 与散射系数 S 简化为一个参数(K/S)来处理。Kubelka-Munk 单常数理论表明单个油墨 Kubelka-Munk 函数与浓度存在线性关系,其表达式为

$$(K/S)_{i,\lambda}=(K/S)_{t,\lambda}+C_j\varphi_{i,\lambda}, \quad (3)$$

式中:(K/S)<sub>i,λ</sub> 为第 i 种油墨在波长为 λ 时的 K/S 值;(K/S)<sub>t,λ</sub> 为底材在波长为 λ 时的 K/S 值;C<sub>j</sub> 为第 i 种油墨的第 j 个浓度;φ<sub>i,λ</sub> 为比例常数(单位浓度油墨的 K/S 值),代表了油墨在底材上的光学特性。

在进行油墨配方计算前,只需知道不同浓度的油墨样品的 K/S 值以及底材的(K/S)<sub>t,λ</sub>,就可以利用最小二乘法实现 K/S 值与对应浓度的曲线拟合<sup>[11]</sup>,从而获得油墨的本征 K/S 值。

假设采用黄、品红、青三色作为基色配色,波长范围选用 400~700 nm,间隔为 10 nm,基于(3)式可得 31 个联立方程:

$$\begin{cases} (K/S)_{m,400}=(K/S)_{t,400}+C_Y\varphi_{Y,400}+C_M\varphi_{M,400}+C_C\varphi_{C,400} \\ (K/S)_{m,410}=(K/S)_{t,410}+C_Y\varphi_{Y,410}+C_M\varphi_{M,410}+C_C\varphi_{C,410} \\ \vdots \\ (K/S)_{m,700}=(K/S)_{t,700}+C_Y\varphi_{Y,700}+C_M\varphi_{M,700}+C_C\varphi_{C,700} \end{cases}, \quad (4)$$

式中:下标 Y 为黄色油墨;下标 M 为品红色油墨;下标 C 为青色油墨。

因为只有三色浓度,要满足 31 个联立方程,浓度上的自由度很小。因此,将目标色样和配方色样作差,利用最小二乘法求在波长上极小差值时的解。

$$\Delta = \min \left\{ \sum_{\lambda=400}^{700} [(K/S)_{s,\lambda} - (K/S)_{t,\lambda} - C_Y\varphi_{Y,\lambda} - C_M\varphi_{M,\lambda} - C_C\varphi_{C,\lambda}]^2 \right\}, \quad (5)$$

式中:Δ 为目标色样与配方色样之间的 K/S 值误差。

将(3)式用矩阵形式表达为

$$\mathbf{f}^{(s)} = \mathbf{f}^{(t)} + \mathbf{C}\boldsymbol{\varphi}, \quad (6)$$

式中: f<sup>(s)</sup> 为目标色样 K/S 矩阵, f<sup>(s)</sup> =

$$\begin{bmatrix} (K/S)_{400}^{(s)} \\ (K/S)_{410}^{(s)} \\ \vdots \\ (K/S)_{700}^{(s)} \end{bmatrix}, \text{其中, } (K/S)_{\lambda}^{(s)} \text{ 为目标色样在不同波}$$

长处的 K/S 列阵; f<sup>(t)</sup> 为底材(承印材料)K/S 矩

$$\text{阵, } \mathbf{f}^{(t)} = \begin{bmatrix} (K/S)_{400}^{(t)} \\ (K/S)_{410}^{(t)} \\ \vdots \\ (K/S)_{700}^{(t)} \end{bmatrix}, \text{其中, } (K/S)_{\lambda}^{(t)} \text{ 为底}$$

材在不同波长处的 K/S 列阵; φ 为比例常数(单位浓度油墨的 K/S 值)矩阵, φ =

$$\begin{bmatrix} (K/S)_{400}^{(1)} & (K/S)_{400}^{(2)} & (K/S)_{400}^{(3)} \\ (K/S)_{410}^{(1)} & (K/S)_{410}^{(2)} & (K/S)_{410}^{(3)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ (K/S)_{700}^{(1)} & (K/S)_{700}^{(2)} & (K/S)_{700}^{(3)} \end{bmatrix}; \mathbf{C} \text{ 为三色基础}$$

$$\text{油墨浓度矩阵,即配色处方, } \mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_Y \\ C_M \\ C_C \end{bmatrix}.$$

由(4)式可得

$$\Delta = \min \{ [(\mathbf{f}^{(s)} - \mathbf{f}^{(t)}) - \mathbf{C}\boldsymbol{\varphi}]^T [(\mathbf{f}^{(s)} - \mathbf{f}^{(t)}) - \mathbf{C}\boldsymbol{\varphi}] \}. \quad (7)$$

因为 Δ 要趋于极小值,其对浓度 C 的偏导数为 0,则有

$$\boldsymbol{\varphi}^T \boldsymbol{\varphi} \mathbf{C} = \boldsymbol{\varphi}^T (\mathbf{f}^{(s)} - \mathbf{f}^{(t)}). \quad (8)$$

由此可得配色油墨浓度配方的计算公式为

$$\mathbf{C} = [\boldsymbol{\varphi}^T \boldsymbol{\varphi}]^{-1} \boldsymbol{\varphi}^T (\mathbf{f}^{(s)} - \mathbf{f}^{(t)}). \quad (9)$$

### 2.3 光谱配色基础数据库的建立

由上述对 Kubelka-Munk 理论配色模型的分析可知,建立基础数据库的目标是为配方计算提供油墨和底材的光谱数据以及油墨在不同波长下的 K/S 值等信息。

在配色过程中需要知道各基墨在任一浓度下的 K/S 值,但是参与配色的油墨种类繁多,无法获取所有基墨在任一浓度的 K/S 值,只能通过打样的方式获得一些离散浓度下的 K/S 值。对于一种油墨来说,利用最小二乘法可以实现 K/S 值与对应

浓度的线性拟合,得到油墨的本征  $K/S$  值,同时可以去掉造成配色误差的数据点。由于不同浓度范围内油墨  $K/S$  值与对应浓度的线性化程度不同,因此,通过选择不同浓度范围内的油墨样条进行最小二乘曲线拟合,获得油墨本征  $K/S$  值,据此得到不同的配色结果。

为了准确计算油墨的本征  $K/S$  值,需要针对每种油墨和承印物选取一定的浓度点进行浓度梯度打样。浓度取点间隔大小的选取原则是:在低浓度时取点间隔大一点,高浓度时取点间隔小一些。因为高浓度时  $K/S$  值与浓度的线性关系会发生一定的偏移<sup>[12]</sup>。因此浓度梯度选取不当会影响油墨在不同波长下  $K/S$  值的计算结果,影响配方比例生成。

在光谱基础数据库建立的过程中,梯度数量也需要考虑,梯度数量表示单一油墨以不同的浓度进行打样所得到的样条个数,理论上,基础数据库单一油墨的梯度数量控制在 3~8 个<sup>[5]</sup>就可以了,梯度数量过多会增加建库的工作量,过少会影响配色的精准程度。

因此,基于对建立光谱基础数据库过程的分析可知,影响光谱基础数据库建立的 3 个主要因素分别是样条油墨的浓度范围、浓度梯度,以及梯度数量。下面将建立 4 色光谱基础数据库,在光谱基础数据库的基础上对三个影响因素分别进行单因素实验,选择合适的因素水平进行正交实验。最后根据评价指标获得在配色建库过程中最佳的样条油墨的浓度范围、浓度梯度及梯度数量的组合。

### 3 实验方法

#### 3.1 仪器与材料

1) 实验仪器为:Amsterdam 系列印刷适性仪,荷兰生产;ADVENTURER AX 系列分析天平,美国生产;Aktiprint Mini 2 系列紫外固化试验仪,荷兰生产;X-rite Ci64 分光光度计,美国生产。

2) 实验材料为:(1)瓷碗;(2)匀墨刀;(3)一次性滴管;(4)胶印四色基墨,包括品红、黄、青、黑和冲淡剂;(5)无荧光白卡涂布纸(49 mm×215 mm)。

#### 3.2 油墨光谱基础数据库的建立

1) 样张的准备。准备 80 张无荧光白卡涂布纸,尺寸大小为 49 mm×215 mm。

2) 样条梯度油墨制备。将胶印四色基墨分别以

油墨质量分数为 5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%、45%、50%、55%、60%、65%、70%、75%、80%、85%、90%、95%、100% 的 20 种浓度和冲淡剂进行混合,配制油墨总质量为 3 g。

3) 梯度样条的制作。使用 Amsterdam 系列印刷适性仪,调节印刷压力为 500 N,印刷速度为  $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,上墨量为 0.107 g,匀墨时间为 120 s。将配制好的 80 个梯度油墨进行打样,制作成油墨梯度样条数据库,如图 1 所示。

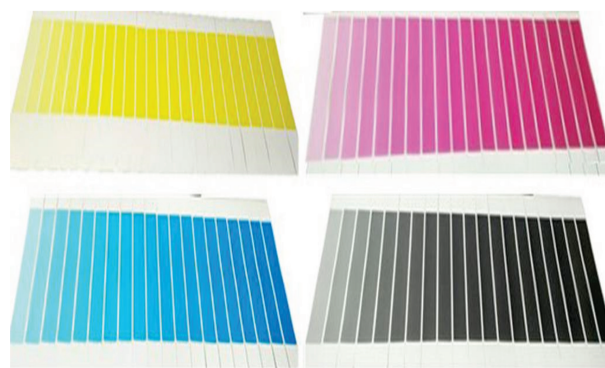


图 1 基础配比的基墨与冲淡剂混合样本

Fig. 1 Samples of base ink and diluent mixed with a basic ratio

4) 数据库的建立。使用 X-rite Ci64 分光光度计分别测量无荧光白卡涂布纸样品表面的光谱反射率数据和无荧光白卡涂布纸在不同油墨浓度下的光谱反射率数据,通过(1)式计算  $K/S$  值,并将其输入计算机内用于建立胶印四色油墨光谱基础数据库。油墨不同浓度梯度对应的的光谱反射率曲线如图 2 所示。

图 2 显示不同基础油墨在不同的浓度梯度下的光谱反射率曲线(箭头指向代表浓度越来越大),这些曲线呈现规则的平行分布,未出现交叉现象,且浓度愈小则光谱反射率愈高,浓度越大则光谱反射率愈低<sup>[13]</sup>。因此,所建立的光谱基础油墨数据库为正确的配色油墨数据库。

#### 3.3 单因素实验

影响光谱基础数据库建立过程的主要因素包括样条油墨的浓度范围、浓度梯度,以及梯度数量。由前面分析可知,基于不同油墨浓度范围进行最小二乘拟合得到的油墨本征  $K/S$  值会对配色结果产生不同的影响,因此可以将油墨浓度按不同的区间划分,建立不同数据库以比较配色结果。同时,也需要对浓度梯度和梯度数量进行划分,建立对应的数据库实验。

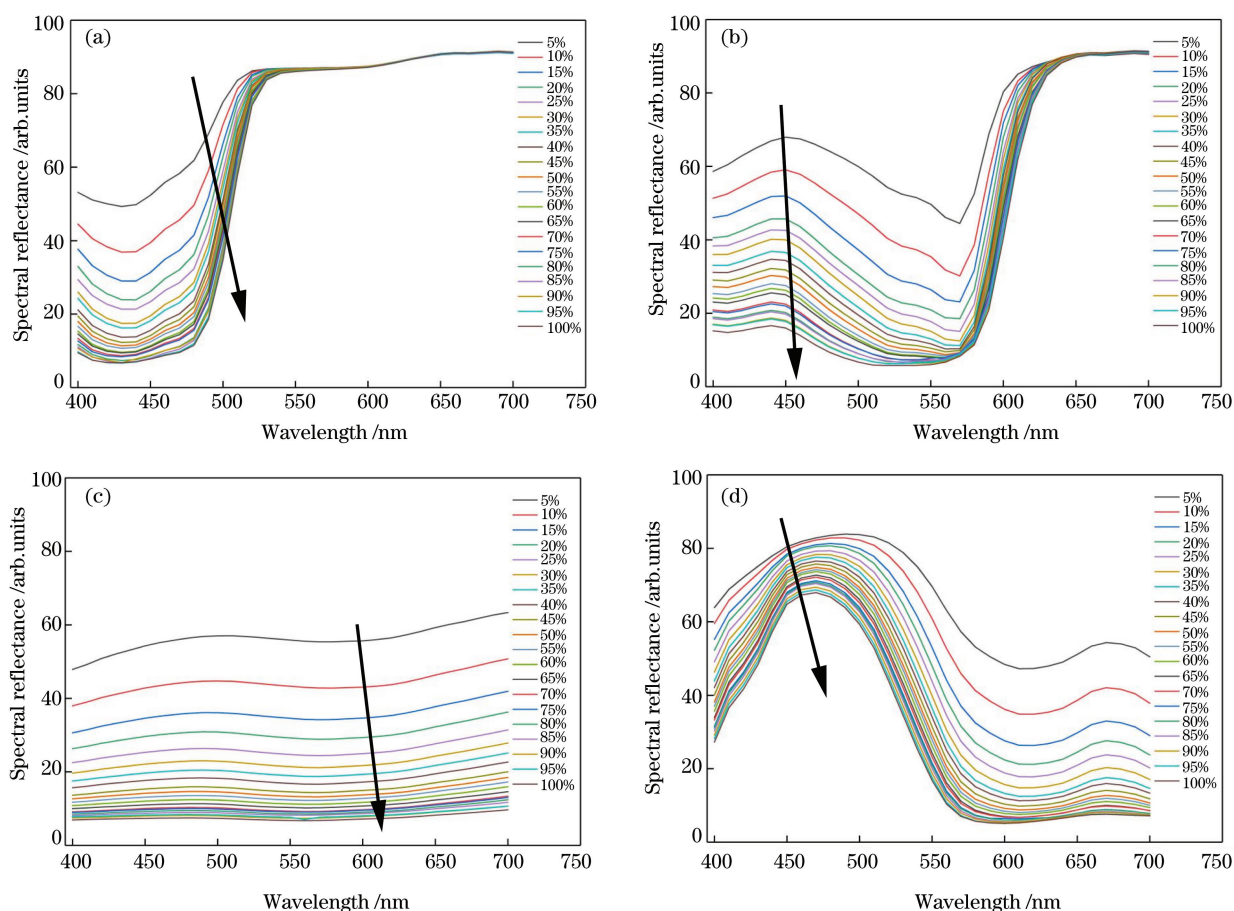


图 2 不同基础油墨在不同浓度梯度下的光谱反射率曲线。(a)黄油墨;(b)品红油墨;(c)青油墨;(d)黑油墨

Fig. 2 Spectral reflectance curves of different basic inks under different concentration gradients. (a) Yellow ink; (b) magenta ink; (c) cyan ink; (d) black ink

利用正交实验可以实现对光谱基础数据库的优化,获得一组最优的样条油墨的浓度范围、浓度梯度以及梯度数量组合。但是每一个影响因素中包含的变量(即水平数)过多,不进行筛选会造成正交实验过于复杂,工作量过大。单因素实验可以对每一个影响因素中的水平数进行优化筛选,为正交实验水平的选取提供依据<sup>[14]</sup>。

单因素实验法即在实验过程中,其他变量保持不变,仅在某一变量的不同水平下分别进行实验,然后比较分析各组实验的结果。实验中变量因素分别是样条油墨的浓度范围、浓度梯度以及梯度数量,按照单因素实验保持其中两个变量因素不变,在另一个变量因素的不同水平下进行实验。样条油墨的浓度范围在不同因素水平的组合条件下均可得到目标色样配方比例。根据 CIELab 1976 色差公式,计算配方色样和目标色样的色差值( $\Delta E$ ),以此作为测量的评价指标,帮助选择合适的变量水平。 $\Delta E$  可表示为

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}, \quad (10)$$

式中: $\Delta L$  为配方色样和目标色样之间的明度差; $\Delta a$ 、 $\Delta b$  为配方色样和目标色样之间的彩度差<sup>[15]</sup>。

潘通 (PANTONE) 色卡 C 版专色配方指南可以用来进行基础油墨配色,为进一步提高配色的准确性,分别从红、黄、蓝 3 种基础色,橙、紫、绿 3 种二次色,以及黄橙、红橙、红紫、蓝紫、蓝绿、黄绿 6 种三次色中各选取一个颜色,组成 12 个具有代表性的颜色作为目标色样本进行配色实验。实验选取的潘通色号名称以及各颜色的 Lab 值如表 1 所示,表中  $L$  为明度指数, $a$ 、 $b$  为色品指数。

在单因素实验中,针对每个目标色样分别进行配色实验,综合不同目标色样的各组实验结果选择最佳的因素水平范围。具体过程如下。

1) 将样条油墨的浓度范围作为实验因素时,浓度梯度为 5,梯度数量为 4,拟合浓度范围分别为低浓度(0%~35%)、中间浓度(40%~70%)、高浓度

表 1 目标色样本颜色数据

Table 1 Sample color data of target color

Serial number	Pantone color	Color data		
		<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
1	Pantone 1795C	47	65	41
2	Pantone 1525C	50	48	73
3	Pantone 144C	65	38	79
4	Pantone 1535C	38	34	53
5	Pantone 108C	88	0	95
6	Pantone 396C	86	-16	102
7	Pantone 368C	69	-47	64
8	Pantone 322C	39	-46	-19
9	Pantone 284C	67	-8	-37
10	Pantone 280C	17	16	-57
11	Pantone 2415C	33	64	-25
12	Pantone 234C	36	63	-12

(75%~100%)、中低浓度(0%~70%)、中高浓度(40%~100%)、完整浓度(0%~100%)。

2)将浓度梯度作为实验因素时,样条油墨的浓度范围固定为0%~70%,梯度数量固定为4,浓度梯度的水平数(油墨取点间隔大小)分别为2%,5%,10%,15%,20%。

3)将梯度数量作为实验因素时,样条油墨的浓度范围为0%~70%,浓度梯度为5,梯度数量的水平数分别为3,4,5,6,7。其实验结果如图3~5所示,其中NBS表示色差值单位,一个NBS单位表示目光能辨别的微小颜色差异。

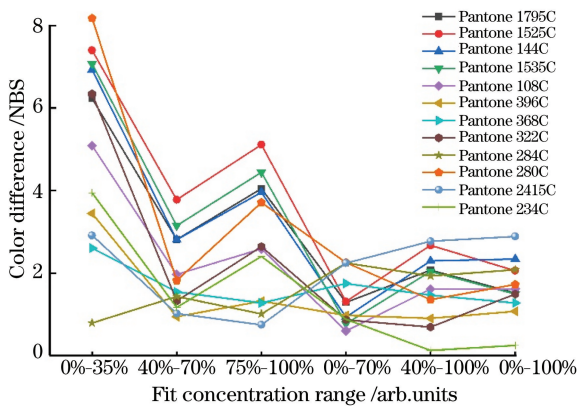


图 3 样条油墨的浓度范围对配色(色差)的影响

Fig. 3 Effect of concentration range of spline ink on color matching (color difference)

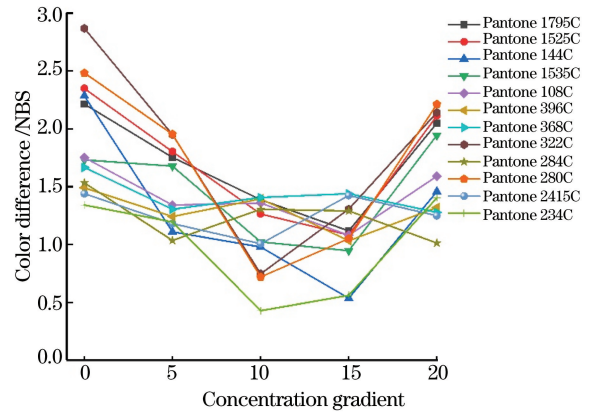


图 4 油墨浓度梯度对配色(色差)的影响

Fig. 4 Effect of ink concentration gradient of on color matching (color difference)

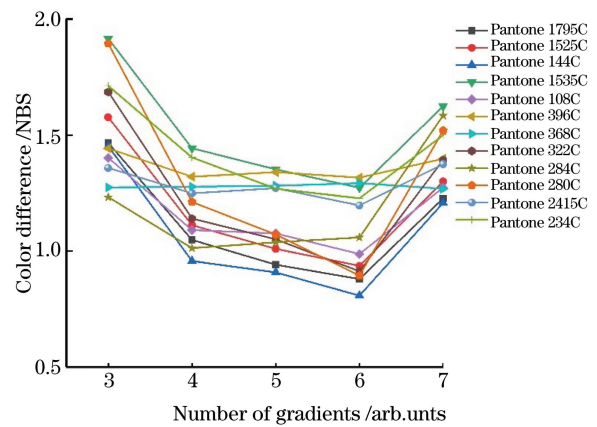


图 5 油墨梯度数量对配色(色差)的影响

Fig. 5 Influence of number of ink gradients on color matching (color difference)

从图3结果可知,样条油墨的浓度范围在中低浓度(0%~70%)、中高浓度(40%~100%)以及完整浓度(0%~100%)三个浓度范围内的同一颜色的配色色差相较于其余浓度范围更小,更适合作为正交实验水平进行实验,因此选取0%~70%、40%~100%和0%~100%作为样条油墨浓度范围的正交实验水平。同理,从图4可知,按照不同浓度间隔取样对配色也会产生较大的影响,根据不同浓度梯度建立的基础数据库对同一个颜色配色的准确性的比较结果,分别选取5%,10%,15%作为油墨浓度梯度的正交实验水平。根据图5,油墨梯度数量分别选取4,5,6。

### 3.4 正交实验

正交实验是一种使用正交表构造多因素测试的方法。正交表包括三个部分:实验因素、因素水平和

评估指标。在许多实验条件中选择具有代表性的几种实验条件,最佳实验条件可以从结果数据中得出。结合上述单因素实验的结果,此正交实验是三因素三水平实验,采用  $L_9(3^4)$  正交实验表,将样条油墨的浓度范围、浓度梯度以及梯度数量依次放在 1,

2,3 列上,不考虑因素间的交互作用,评估指标是根据(10)式计算得到的配方色样与目标色样间的色差,9 次实验的结果如表 2 所示,表中  $K_j$  为第  $j$  列因素水平所对应的实验指标, $K_j/3$  表示  $K_j$  的平均数, $R_j$  为第  $j$  列因素的极差。

表 2 正交实验结果

Table 2 Orthogonal experiment results

Serial number	Experimental factor			Color difference/NBS
	Concentration range	Concentration gradient	Number of gradients	
1	0%—70%	5	4	1.178
2	0%—70%	10	5	0.935
3	0%—70%	15	6	0.772
4	40%—100%	5	5	0.698
5	40%—100%	10	6	0.730
6	40%—100%	15	4	0.753
7	0%—100%	5	6	1.013
8	0%—100%	10	4	0.742
9	0%—100%	15	5	0.844

## 4 结果与讨论

极差分析由于计算简便、直观、简单易懂,是正交实验结果分析中最常用的方法。正交实验的极差分析包括三部分,分别为确定因素的主次顺序、确定各因素最优水平、综合选取最优因素水平组合<sup>[12]</sup>。其中利用  $K_j$  可以判断第  $j$  列因素最优水平和最优组合,根据表 2 数据计算得到:样条油墨的浓度范围因素下的  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  值分别为 2.885, 2.181, 2.598,同时计算得到平均数  $K_1/3$ 、 $K_2/3$ 、 $K_3/3$  分别为 0.962, 0.727, 0.866; 油墨浓度梯度因素下的  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  值分别为 2.889, 2.407, 2.368,平均数  $K_1/3$ 、 $K_2/3$ 、 $K_3/3$  分别为 0.963, 0.802, 0.789; 油墨梯度数量因素下的  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  值分别为 2.672, 2.477, 2.515,平均数  $K_1/3$ 、 $K_2/3$ 、 $K_3/3$  分别为 0.891, 0.826, 0.838。 $R$  为极差,表示该因素在其取值范围内实验指标变化的幅度,其大小可以确定各因素的主次顺序。经计算,样条油墨的浓度范围因素的极差值  $R_1$  为 0.234,油墨浓度梯度因素的极差值  $R_2$  为 0.174,油墨梯度数量因素的极差值  $R_3$  为 0.065。

由上述分析可知, $R_1 > R_2 > R_3$ ,样条油墨的浓度范围影响最大,为主要因素。其次是样条浓

度梯度,最后是油墨梯度数量。对于样条油墨的浓度范围而言, $K_2/3 < K_3/3 < K_1/3$ ,并且因为评估指标是配色色差,所以色差越小越好。因此,样条油墨的浓度范围的最优水平为 40%~100%,同理油墨浓度梯度和油墨梯度数量的最优水平分别是 15%和 5。通过极差分析可知,本实验各因素的最优参数组合为:样条油墨的浓度范围为 40%~100%,油墨浓度梯度为 15%,油墨梯度数量为 5。

按照以上最优参数组合,在每种油墨浓度范围 40%~100%内,以 15%的取样间隔选取 5 个油墨浓度数据,根据最小二乘法拟合得到该油墨的本征  $K/S$  值,在此基础上实现油墨光谱基础数据库的建立。

为了进一步验证配色的准确性,采用无荧光白卡涂布纸作为底材,按照最优参数组合,在油墨浓度范围 40%~100%内,以 15%的取样间隔选取 5 个油墨浓度数据,分别建立大红色、金红色、射光蓝色、深黄色 4 个胶印油墨光谱基础数据库。按照单因素实验选取目标色的方法在潘通色卡的基础色、二次色和三次色中另外各选取一个典型颜色,组成 12 个颜色进行配色验证,验证所用目标色样如表 3 所示。

表 3 验证所用目标色样本颜色数据

Table 3 Color data of target color samples for verification

Serial number	Pantone color	Color data		
		<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
1	Pantone 185C	50	76	42
2	Pantone 172C	58	68	70
3	Pantone 1505C	67	56	90
4	Pantone 137C	75	32	87
5	Pantone 127C	89	-3	46
6	Pantone 3965C	87	-10	107
7	Pantone 355C	51	-72	38
8	Pantone 3288C	44	-61	1
9	Pantone 3135C	51	-53	-38
10	Pantone 2726C	40	23	-63
11	Pantone 2587C	42	41	-49
12	Pantone 214C	45	72	7

表 4 8 色优化光谱基础数据库的配色结果

Table 4 Color matching results of 8-color optimized spectrum base database

Database	Color difference /NBS					
	Pantone 185C	Pantone 172 C	Pantone 1505 C	Pantone 137 C	Pantone 127 C	Pantone 3965 C
Optimal value	0.7906	1.0050	1.0796	0.8317	0.7812	0.7830

Database	Color difference /NBS					
	Pantone 355 C	Pantone 3288 C	Pantone 3135 C	Pantone 2726 C	Pantone 2587 C	Pantone 214 C
Optimal value	0.6963	0.9287	1.4674	2.5182	0.7251	0.8684

## 5 结 论

基于 Kubelka-Munk 理论,研究基础配色数据库中吸收系数  $K$  和散射系数  $S$  的比值与浓度  $C$  的线性关系,利用最小二乘法实现  $K/S$  值与对应浓度的曲线拟合,得到油墨的本征  $K/S$  值。为获得建立光谱基础数据库的最优实验条件,提出了一种针对光谱基础数据库优化的正交实验方案,以样条油墨的浓度范围、梯度数量、梯度浓度作为建立基础数据库的影响因素进行正交优化实验,并进行配色实验以验证配色准确性,得出如下结论。

1) 基于 Kubelka-Munk 单常数理论,根据  $K/S$  值与染料浓度的变化关系,综合对样条油墨的浓度范围、梯度数量、梯度浓度三个影响因素的单因素实验、正交实验和极差的分析,得出建立 CMYK 4 色光谱基础数据库的最优条件组合是:样条油墨的浓度范围为 40%~100%,油墨浓度梯度为 15%,油墨梯度数量为 5。利用在此基础上建立的优化的光谱

利用最优参数组合建立品红、黄、青、黑、大红色、金红色、射光蓝色、深黄色 8 色胶印光谱基础数据库,对 12 个目标色进行配方计算,根据配方比例打样(油墨总质量为 3 g)并使用 X-rite Ci64 分光光度计测量打样样条光谱反射率数据,获取配方色样与目标色的色差值。表 4 中所列色差均为 D65 光源、10°标准观察者条件下 CIELab1976 色差公式的计算结果。

从表 4 的数据可以看出,利用最优参数组合建立的品红、黄、青、黑、大红色、金红色、射光蓝色、深黄色 8 色胶印光谱基础数据库对 12 个目标色进行配色,其配色精度很高。实际产品生产过程对生产产品与目标产品的颜色差别有对应的具体要求,对于一般产品来说  $\Delta E \leq 3.0$  即符合要求,对于要求颜色精美和真实的中高端产品来说, $\Delta E \leq 1.0$  才符合生产要求。经过优化的专色油墨基础数据库的配色精度达到要求,同时可以应用于更广泛和更高要求的油墨配色。

基础数据库可以进行准确的油墨配色,且精度较高。

2) 在实际应用中,根据生产需要选取合理的浓度梯度并利用最小二乘法进行曲线拟合,就可以利用较少的基础数据色样建立准确的优化数据库,按照最优参数组合增加另外 4 种胶印油墨数据库同样可以使配色保持高精度。同时,在单因素实验中可以发现,当油墨浓度梯度在 5%~15%之间、梯度数量为 4~6 时进行配色实验得到的结果比其他同等条件下得到的结果更准确,因此该取值范围同样也可以作为建立优化光谱基础数据库的参考范围,这样可以大大减少建立基础数据库的工作量。

## 参 考 文 献

- [1] Zhao C F. Study on theory and practice of computer matching color [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2004.  
赵晨飞. 计算机配色的理论与实践研究[D]. 西安:西安理工大学, 2004.



- [2] Li H. Principle and application of color technology [M]. Beijing: Science Press, 1994.  
李亨. 颜色技术原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [3] Kubelka P, Munk F. Ein beitrag zur optik der farbanstriche[J]. Zeitschrift fur Technische Physik, 1931, (12): 593-601
- [4] Park R H, Stearns E I. Spectrophotometric formulation [J]. Journal of the Optical Society of America, 1944, 34(2): 112-115.
- [5] Lin C Y, Lu B T. The application of the least squares method on matching colors [J]. Journal of Wuhan University of Science and Engineering, 2007, 20 (11): 5-8.  
林纯勇, 陆必泰. 最小二乘法在测配色中的应用[J]. 武汉科技学院学报, 2007, 20(11): 5-8
- [6] Jin F J, Tang Y P. Study on the K/S value of reactive dyes in computer color matching [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2008, 30(1): 83-85, 92.  
金福江, 汤仪平. 计算机配色中活性染料单位浓度 K/S 值研究 [J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2008, 30(1): 83-85, 92.
- [7] Xu H. New technology of computer color measurement and color matching [M]. Beijing: China Textile & Apparel Press, 1990.
- [8] Zhao D F, Huang X G. Research of spectral color matching algorithm based on Kubelka-Munk [J]. Packaging Journal, 2017, 9(1): 46-52.  
赵德方, 黄新国. 基于 Kubelka-Munk 理论的光谱配色算法研究 [J]. 包装学报, 2017, 9(1): 46-52.
- [9] Li R, Gu F. The use of tristimulus and spectrophotometric algorithms of computer color matching [J]. Journal of Zhengzhou Institute Technology, 2004, 15(6): 37-40.  
李戎, 顾峰. 三刺激值配色与反射光谱配色的运用 [J]. 中原工学院学报, 2004, 15(6): 37-40.
- [10] Zhou J L. Study on mixing law of colorants in turbid media like fabric [D]. Zhengzhou: Zhongyuan University of Technology, 2012.  
周金利. 织物类不透明介质的色料混合定律的研究 [D]. 郑州: 中原工学院, 2012.
- [11] Yu M M. The research of computer color matching system of spot color ink: the research of coloring model based on new two-constant Kubelka-Munk theory [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011.  
于蒙蒙. 专色油墨配色系统的研究: 新双常数 Kubelka-Munk 理论配色模型研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2011.
- [12] Yang H Y, Zhang J J, Yang Z H, et al. Test methods for rationality of basic data in computer color matching [J]. Journal of Zhongyuan University of Technology, 2019, 30(3): 11-17.  
杨红英, 张靖晶, 杨志晖, 等. 计算机配色基础数据合理性的检验方法 [J]. 中原工学院学报, 2019, 30 (3): 11-17.
- [13] Xue C H. Color science and practical technology of computer color measurement and color matching [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004  
薛朝华. 颜色科学与计算机测色配色实用技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [14] Wan X X, Fu M, Huang X G, et al. Optimization study of non-contact color measurement parameters [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36 (9): 2889-2893.  
万晓霞, 付马, 黄新国, 等. 非接触式颜色测量参数的最优化研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36 (9): 2889-2893.
- [15] Zhou H, Wang C Y, Luo L L, et al. Spectrophotometric color matching algorithm of jacquard fabric with all colored wefts based on Kubelka-Munk double constant theory [J]. Journal of Textile Research, 2012, 33(5): 35-39.  
周华, 王春燕, 罗来丽, 等. 基于 Kubelka-Munk 双常数理论的纬全显色提花织物配色算法 [J]. 纺织学报, 2012, 33(5): 35-39.