

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202005003



染料拼色反射光谱的 Bezier 曲线建模方法

王波¹, 金福江², 周丽春²

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 将单一染料染色反射光谱表示成由控制点和 Bernstein 基组成的 Bezier 曲线, 分析单一染料质量分数与对应的 Bezier 曲线控制点之间的关系, 建立单一染料染色反射光谱与染料质量分数的参数方程. 根据多种染料拼色的机理, 将多个单一染料染色的反射光谱 Bezier 曲线进行叠加, 得到多种染料拼色的反射光谱 Bezier 曲线, 并通过实际染色实验验证该方法的准确性. 结果表明: 当拼色染料种类、质量分数和织物种类已知时, 文中方法可以确定单一染料染色及拼色染色后布匹的反射光谱 Bezier 曲线和三刺激值, 并预测布匹染色后与目标色的色差.

关键词: 全光谱配色; 光谱建模; Bezier 曲线; 计算机配色

中图分类号: TS 941.26; TS 193.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2021)02-0221-08

Bezier Curve Modeling Method of Reflectance Spectra of Dye Color Matching

WANG Bo¹, JIN Fujiang², ZHOU Lichun²

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The reflection spectrum of a single dye is represented a Bezier curve composed of control points and Bernstein groups, the relationship between the mass fraction of a single dye and the corresponding control point of the Bezier curve is also analyzed, and the parameter equation of the reflection spectrum of the single dye and the mass fraction of the dye is established. According to the mechanism of the color matching of multiple dyes, furthermore, the reflection spectrum Bezier curves of several single dyes are superimposed to obtain the reflection spectrum Bezier curves of multiple dyes, the accuracy of this method is verified by actual dyeing experiments. The results show the proposed method can determine the Bezier curve of the reflectance spectrum and tristimulus value of single dye dyed and color matching dyed cloth, and predict the color difference between dyed cloth and target color.

Keywords: full spectrum color matching; spectral modeling; Bezier curve; computer color matching

在纺织印染中, 由于光谱与染料质量分数之间的非线性关系, 难以得到具有泛用性的光谱建模方法, 故无法建立光谱反射率与染料质量分数之间的直接关系, 从而发展出三刺激值配色法. 现有的计算机测配色系统大多是基于三刺激值配色法, 其基础是测量一定光源下的物体色的三刺激值, 而三刺激值

收稿日期: 2020-05-03
通信作者: 金福江(1965-), 男, 教授, 博士, 主要从事复杂系统建模、仿真与控制的研究. E-mail: jinfujiang@163.com.
基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2016H6015)

相等的两个颜色可达到等色效果^[1-3]. 在三刺激值配色法中, Kubelka-Munk 理论建立了染料质量分数与三刺激值之间的关系^[4], 由三刺激值误差进行迭代调整, 可得到低异谱性的匹配结果^[5]. 然而, 三刺激值无法完全表达某种颜色的全部特性, 当观察条件发生变化时, 等色可能会被破坏而产生色差. 全光谱配色^[6]需尽力匹配标准色的光谱曲线, 使不同波长下的反射率相同. 因此, 标准色的表达更加全面, 匹配结果更加准确, 即使观察环境发生变化, 再配色与标准色依然相同^[7].

颜色变化为非线性关系, 具体表现为不同颜色的光谱特性不同. 文献[8-12]对光谱建模进行研究, 这些方法虽然能够很好地描述光谱曲线的局部特征, 但无法表达光谱曲线的整体特征, 造成颜色匹配结果的异谱性. 文献[13-15]对光谱与染料质量分数之间的关系进行研究, 但这些方法均只适用于某一类颜色的配色方案, 局限性较大, 没有建立光谱与染料质量分数之间的直接关系. 基于此, 本文提出一种染料拼色反射光谱的 Bezier 曲线建模方法^[16-17].

1 单一染料染色的反射光谱 Bezier 曲线模型

定义 1 用波长为 λ 的照明光源入射已染色后的干燥、平整、色泽均匀的织物, 当染色染料质量分数(w)和照明光源波长变化时, 反射光谱率 $R=f(w, \lambda)$ 是个曲面函数; 当染料的质量分数固定(w 为常数), 照明光源波长变化时, 反射光谱率 $R=f(\lambda)$ 为一条反射光谱曲线.

例如, 活性红 3BS 的质量分数从 0.01% 增加到 2.00%, 由 Datacolor 测色系统可得染色后布匹的反射光谱曲线, 如图 1 所示.

定理 1 通过 n 阶 Bezier 函数拟合反射光谱曲线, 如图 2 所示. 图 2 中: 折线为 Bezier 曲线控制多边形, 其折点为 Bezier 曲线控制点; 实线为 Bezier 曲线; 虚线为反射光谱曲线. 反射光谱的参数方程为

$$\begin{bmatrix} \lambda(t) \\ R(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ R_0 \end{bmatrix} C_n^0 (1-t)^n + \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ R_1 \end{bmatrix} C_n^1 t (1-t)^{n-1} + \cdots + \begin{bmatrix} \lambda_n \\ R_n \end{bmatrix} C_n^n t^n. \tag{1}$$

式(1)中: t 为参数; $\lambda(t)$ 为波长的参数方程; $R(t)$ 为反射光谱的参数方程; $(R_0, \lambda_0), \dots, (R_n, \lambda_n)$ 为控制点; $C_n^0 (1-t)^n, C_n^1 t (1-t)^{n-1}, \dots, C_n^n t^n$ 为 n 阶 Bernstein 基.

由式(1)可知: 反射光谱的参数方程是由控制点决定, 由反射光谱图的数据点求出控制点是反射光谱建模的关键.

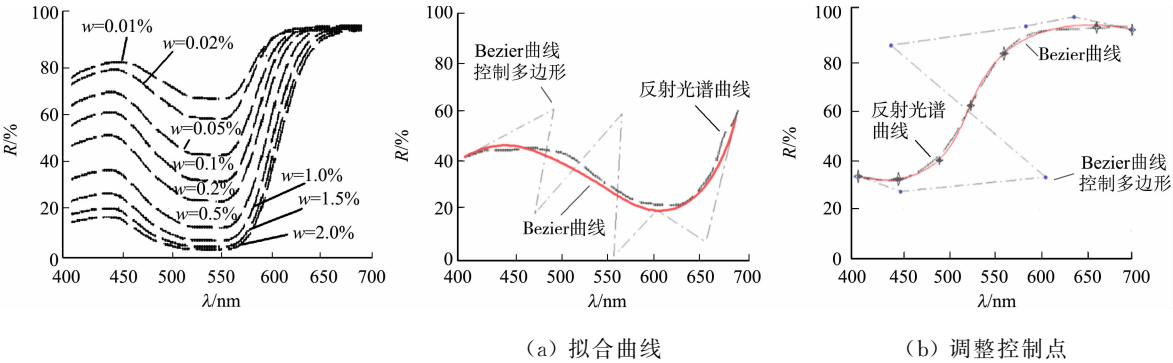


图 1 染色后布匹的反射光谱曲线

图 2 Bezier 函数拟合的反射光谱曲线

Fig. 1 Reflectance spectrum curve of dyed cloth

Fig. 2 Reflectance spectrum curve fitted by Bezier function

定理 2 在反射光谱曲线上取数据点 $(\tilde{R}_0, \tilde{\lambda}_0), (\tilde{R}_1, \tilde{\lambda}_1), \dots, (\tilde{R}_n, \tilde{\lambda}_n)$, 由式(1)可得控制点为

$$\begin{bmatrix} \lambda_0 & R_0 \\ \lambda_1 & R_1 \\ \vdots & \vdots \\ \lambda_n & R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_n^0 (1-t_0)^n & C_n^1 (1-t_0)^{n-1} t_0 & \cdots & C_n^n t_0^n \\ C_n^0 (1-t_1)^n & C_n^1 (1-t_1)^{n-1} t_1 & \cdots & C_n^n t_1^n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_n^0 (1-t_n)^n & C_n^1 (1-t_n)^{n-1} t_n & \cdots & C_n^n t_n^n \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{\lambda}_0 & \tilde{R}_0 \\ \tilde{\lambda}_1 & \tilde{R}_1 \\ \vdots & \vdots \\ \tilde{\lambda}_n & \tilde{R}_n \end{bmatrix}. \tag{2}$$

采用积累弦长参数化方法^[18-19], 为每一个光谱坐标点指定一个参数 t , 以 t_0 为起点, $t_0=0, t_n$ 为终点, $t_n=1$, 有

$$\left. \begin{aligned} t_0 &= 0, \\ t_i &= t_{i-1} + |\Delta P_{i-1}|/s. \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

式(3)中: t_i 为坐标点 $P_i(\lambda_i, R_i)$ 对应的参数; ΔP_{i-1} 为 P_{i-1} 与 P_i 之间的欧式距离; s 为顺序两坐标点的距离总和.

得到坐标点及其对应的参数后, 可求解出 n 个控制点 $(R_0, \lambda_0), (R_1, \lambda_1), \dots, (R_n, \lambda_n)$.

定理 3 单一染料染色的反射光谱 Bezier 曲线模型可用多项式表示.

用不同质量分数的染料染色, 得到染色后织物的反射光谱 Bezier 曲线. 对每条反射光谱曲线拟合的 Bezier 曲线控制点个数相同, 取 10 个控制点, 分析 Bezier 曲线控制点与单一染料质量分数的关系(图 3)可知: 单一染料质量分数变化时, 反射光谱 Bezier 曲线控制点纵坐标随质量分数呈对数形式增长(图 3(a)), 而控制点横坐标变化幅度相对较小(图 3(b))

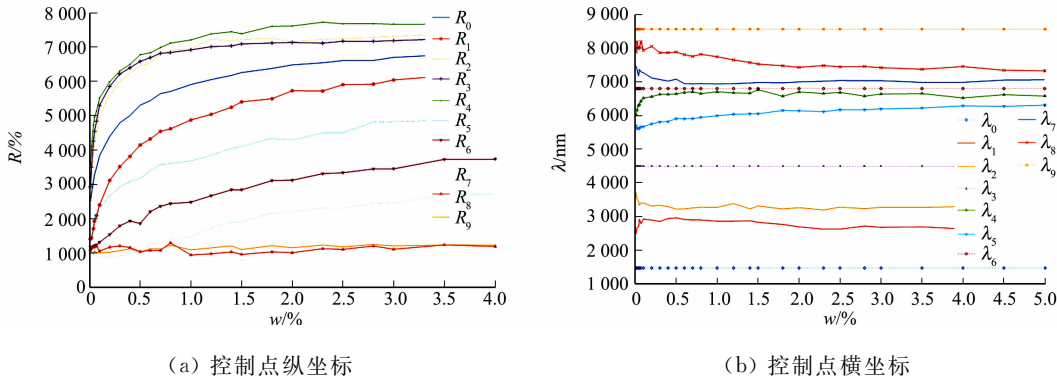


图 3 染色后布匹的反射光谱 Bezier 曲线控制点的变化曲线

Fig. 3 Change curve of Bezier curve control point of reflectance spectrum of dyed cloth

对染料质量分数进行线性化处理, 则控制点与染料质量分数的关系可以表示为

$$P^{(j)}(\tau) = \begin{bmatrix} \lambda^{(j)} \\ R^{(j)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{j,0} + a_{j,1}\tau + a_{j,2}\tau^2 + \dots + a_{j,m}\tau^m \\ b_{j,0} + b_{j,1}\tau + b_{j,2}\tau^2 + \dots + b_{j,m}\tau^m \end{bmatrix}. \tag{4}$$

式(4)中: P 为 Bezier 曲线控制点; $\begin{bmatrix} a_{j,0}, a_{j,1}, \dots, a_{j,m} \\ b_{j,0}, b_{j,1}, \dots, b_{j,m} \end{bmatrix}$ 为系数矩阵 A_j , j 表示每条 Bezier 曲线中不同的控制点, $j=0, 1, 2, \dots, 9, m$ 为多项式系数.

对于每一个控制点, 由小样实验可得染料质量分数与控制点数据 $(w, P^{(j)})$, 再通过最小二乘法计算出控制点关于染料质量分数的表达式的系数矩阵 A_j .

单一染料染色时, 质量分数为 0.01%~2.00% 的单一染料染色布匹, 均可根据式(4)计算出染色后布匹的反射光谱 Bezier 曲线的控制点.

令 $C(w) = [1, w, \dots, w^m]^T$, 则单一染料染色反射光谱 Bezier 曲线控制点与染料质量分数的关系模型为

$$P^{(j)} = A_j C(w). \tag{5}$$

式(5)模型可确定质量分数为 0.01%~2.00% 的单一染料染色后布匹的反射光谱 Bezier 曲线.

2 染料拼色的反射光谱 Bezier 曲线模型

质量分数为 0.1% 的单一活性染料活性黄 3BS、活性红 3RS、藏青 G 分别染色后的布匹反射光谱率, 以及 3 种单一染料拼色染色后的布匹反射光谱曲线, 如图 4 所示.

通过单一染色反射光谱和拼色染色反射光谱之间的关系, 分析拼色染色布匹反射光谱与混合染料各组分质量分数之间的关系. 通过正交试验方法, 得到拼色染色及其对应的单一染料染色结果, 控制点 $P_0(\lambda_1, R_1), P_1(\lambda_{1,w_1}, R_{1,w_1}), P_2(\lambda_{1,w_2}, R_{1,w_2}), P_3(\lambda_{1,w_3}, R_{1,w_3})$ 分别由拟合拼色染色和对应的单一染色后布匹的反射光谱曲线得到. 拼色染色与单一染色控制点对应表, 如表 1 所示.

定义 2 染料拼色. 拼色是指用多种不同质量分数的单一染料混合均匀进行染色. 因此, 拼色后织物的反射光谱模型为

$$R = f(w_1, w_2, \dots, w_m, \lambda). \tag{6}$$

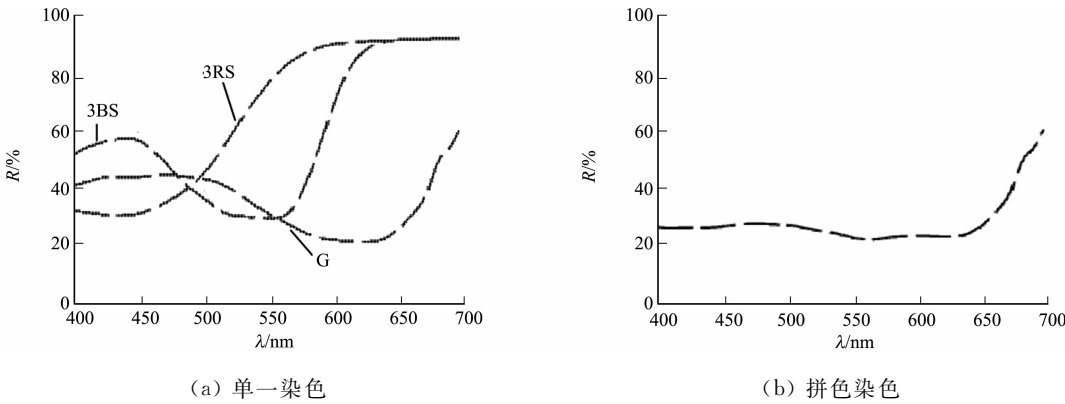


图 4 染色后布匹反射光谱曲线

Fig. 4 Reflectance spectrum curve of dyed cloth

式(6)中: $\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_m$ 为 m 种不同染料的质量分数.

定理 4 拼色的反射光谱曲线率 $R=f(\lambda)$ 可由 m 种单一染料反射光谱曲线率 $R_i=f_i(\lambda), i=1, \cdots, m$ 得到. 当 m 种染料质量分数和照明光源的波长都变化时, m 种染料拼色的反射光谱模型是一个 $m+1$ 维超曲面; 当 m 种染料的质量分数固定时, $\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_m$ 为常数, m 种染料拼色的反射光谱率为 $R=f(\lambda)$. 拼色反射光谱是由固定质量分数的单一染料染色混合得到, 因此, 拼色的反射光谱率 $R=f(\lambda)$ 也可以由 m 种单一染料反射光谱率 $R_i=f_i(\lambda), i=1, \cdots, m$ 得到.

定理 5 当 m 种染料质量分数变化时, 拼色染色后布匹的反射光谱模型可以表示为 m 个质量分数为 ω_i 的单一染料染色光谱模型 $R_i(\omega_i, \lambda), i=1, \cdots, m$ 组合, 即

$$R=f(\omega_1, \cdots, \omega_m, \lambda)=f(R_1(\omega_1, \lambda), \cdots, R_m(\omega_m, \lambda)).$$

(7)

定理 6 拼色染色与单一染料染色后布匹的 Bezier 反射光谱曲线控制点之间的关系为

$$P_0(\omega_1, \omega_2, \omega_3)=f(P_1(\omega_1), P_2(\omega_2), P_3(\omega_3)).$$

(8)

式(8)中: P_0 为拼色染色 Bezier 反射光谱曲线控制点.

这样可将单一染色与拼色染色的反射光谱曲线关系转化为控制点之间的关系. 得到单一染色控制点与拼色染色控制点的模型后, 用 Bezier 方法进行叠加, 可得拼色反射光谱 Bezier 曲线与染料质量分数之间的关系.

定理 7 对于采用相同 Bernstein 基函数的单一染料染色光谱 Bezier 曲线和 m 个质量分数为 ω_i 的单一染料拼色反射光谱 Bezier 曲线有以下线性叠加关系, 即

$$P_0=r_1P_1+\cdots+r_mP_m.$$

(9)

式(9)中: $r_i \in [0, 1], \sum_{i=1}^m r_i=1$, 因主要分析 3 种染料拼色的结果, 故取 $m=3$; 由单一染料染色光谱曲线合成的拼色反射光谱曲线与实际光谱曲线控制点的差值, 经实验的样本数据 (P_1, P_2, P_3, P_0) 进行函数网络训练, 调整系数 $r_1 \sim r_3$, 可得到适合的系数.

结合单一染料染色 Bezier 反射光谱曲线模型, 拼色染色 Bezier 反射光谱曲线控制点 P_0 与单一染料质量分数 $\omega_1 \sim \omega_3$ 的关系可表示为

$$P_0^{(j)}=r_1A_{1,j}C_1(\omega_1)+r_2A_{2,j}C_2(\omega_2)+r_3A_{3,j}C_3(\omega_3).$$

(10)

因此, 已知拼色染料的质量分数, 即可得到各单一染料染色的反射光谱 Bezier 曲线控制点 (P_1, P_2, P_3) , 由此计算出对应的拼色染色控制点 P_0 . 由拼色染色控制点 $P_0^{(j)}, j=0, 1, 2, \cdots, 9$, 可得拼色染色的反射光谱模型, 即

$$P_0(t) \mid_{w_1, w_2, w_3} = \begin{cases} \sum_{j=0}^3 P^{(j)} B_{j,n}(t_1), & 0 \leq t_1 \leq 1, \\ \sum_{j=0}^3 P_0^{(j+3)} B_{j,n}(t_2), & 0 \leq t_2 \leq 1, \\ \sum_{j=0}^3 P_0^{(j+6)} B_{j,n}(t_3), & 0 \leq t_3 \leq 1. \end{cases} \tag{11}$$

3 拼色染色反射光谱 Bezier 曲线的色差模型

国际照明委员会(CIE)标准色度系统下的三刺激值 X, Y, Z 的计算公式分别为

$$\left. \begin{aligned} X &= k \sum_{\lambda=400}^{700} R(\lambda) P(\lambda) \overline{x}(\lambda) \Delta\lambda, \\ Y &= k \sum_{\lambda=400}^{700} R(\lambda) P(\lambda) \overline{y}(\lambda) \Delta\lambda, \\ Z &= k \sum_{\lambda=400}^{700} R(\lambda) P(\lambda) \overline{z}(\lambda) \Delta\lambda. \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

式(12)中: $\overline{x}(\lambda), \overline{y}(\lambda), \overline{z}(\lambda)$ 为标准光源在每个可见光波段下的光谱三刺激值, 由 CIE 标准给出; $P(\lambda)$ 为照明体的相对光谱功率分布, 对于反射式分光光度计, 其值为常数; $\Delta\lambda$ 为计算时采用的波长间隔; k 为归化系数, 由选定的 CIE 色度系统决定.

因此, 由拼色染色反射光谱 Bezier 曲线可以得到任意波长下的光谱 $R(\lambda)$, 由式(12)可计算出拼色彩色的三刺激值 X, Y, Z .

当色度空间中 $\overline{x}(\lambda), \overline{y}(\lambda), \overline{z}(\lambda)$ 及 $P(\lambda)$ 为连续函数时, 由于反射光谱 Bezier 曲线 $R(\lambda)$ 控制点为常数, 其 Bernstein 为连续基函数, 故式(12)可表示为

$$\left. \begin{aligned} X &= k \int_{400}^{700} R(\lambda) P(\lambda) \overline{x}(\lambda) d\lambda, \\ Y &= k \int_{400}^{700} R(\lambda) P(\lambda) \overline{y}(\lambda) d\lambda, \\ Z &= k \int_{400}^{700} R(\lambda) P(\lambda) \overline{z}(\lambda) d\lambda. \end{aligned} \right\} \tag{13}$$

对式(13)进行积分运算, 由反射光谱 Bezier 曲线可得色泽精确的三刺激值 X, Y, Z . 对于用反射分光光度计得到的反射光谱, 其 $\overline{x}(\lambda), \overline{y}(\lambda), \overline{z}(\lambda)$ 及 $P(\lambda)$ 为常数, 反射光谱 Bezier 曲线的三刺激值 X, Y, Z 可简化为

$$X = k_X \int_{400}^{700} R(\lambda) d\lambda, \quad Y = k_Y \int_{400}^{700} R(\lambda) d\lambda, \quad Z = k_Z \int_{400}^{700} R(\lambda) d\lambda. \tag{14}$$

式(14)中: $k_X = P(\lambda) \overline{x}(\lambda); k_Y = P(\lambda) \overline{y}(\lambda); k_Z = P(\lambda) \overline{z}(\lambda); k_X, k_Y, k_Z$ 均为常数.

反射光谱 Bezier 曲线控制点已确定, 根据定理 1, 可将式(14)转换成关于参数 t 的 Bernstein 基函数的积分形式, 从而精确计算出染色织物色泽的三刺激值.

亨特色差 ΔE_{Hunter} 表达式、亨特颜色空间明度指数 L 和色品坐标 a, b 的计算公式分别为

$$\Delta E_{\text{Hunter}} = [(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2]^{1/2}, \tag{15}$$

$$\left. \begin{aligned} L &= 10Y^{1/2}, \\ a &= 17.5 \times \frac{(1.05X - Y)}{Y^{1/2}}, \\ b &= 7.0 \times \frac{(Y - 0.932Z)}{Y^{1/2}}. \end{aligned} \right\} \tag{16}$$

取标准照明体 D65 和 CIE 1964(10°) 观察者, 在相同波长下, 将拼色彩色后的实测反射光谱曲线和

用单一染料 Bezier 曲线叠加的拼色 Bezier 曲线的三刺激值分别代入式(16). 经计算,可得明度指数 L 及色品坐标 a, b 的差值 $\Delta L, \Delta a, \Delta b$;再由式(15)计算出拼色染色后的实测与预测的色差,从而验证多种染料拼色染色后布匹的反射光谱 Bezier 曲线的准确性.

4 实验与验证

4.1 小样实验

小样实验 1 为单一染料染色;小样实验 2,3 为拼色染料染色. 小样实验 1~3 中的浴比均为 1 : 10, 布的质量均为 5 g. 小样实验 1~3 的染色配方,如表 2,3 所示.

表 2 小样实验 1 的染色配方
Tab. 2 Dyeing recipe of sample experiment 1

实验参数	配方 1	配方 2	配方 3	配方 4	配方 5	配方 6
$w(3BS)/\%$	0.01	0.05	0.10	0.50	1.00	2.00
$w(3RS)/\%$	0.01	0.05	0.10	0.50	1.00	2.00
$w(G)/\%$	0.01	0.05	0.10	0.50	1.00	2.00
$\rho(\text{烧碱})/\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0
$\rho(\text{固色碱})/\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	1.5	1.5	1.5	1.5	2.0	2.8
$\rho(\text{元明粉})/\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	15.0	15.0	15.0	25.0	40.0	60.0

表 3 小样实验 2,3 染色配方
Tab. 3 Dyeing recipe of sample experiments 2, 3

实验参数	小样实验 2				小样实验 3			
	3BS	3RS	G	拼色染料	3BS	3RS	G	拼色染料
$w(3BS)/\%$	0.01	0	0	0.01	0.20	0	0	0.20
$w(3RS)/\%$	0	0.5	0	0.5	0	0.1	0	0.1
$w(G)/\%$	0	0	0.05	0.05	0	0	0.50	0.50
$\rho(\text{烧碱})/\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0	1.0	1.0	2.0
$\rho(\text{固色碱})/\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	1.5	1.5	1.5	2.0	2.8	1.5	1.5	2.0
$\rho(\text{元明粉})/\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	15.0	25.0	15.0	40.0	60.0	15.0	25.0	40.0

织物为双面汗布;染料为 3BS,3RS,G;实验采用 CADSMG108/00 型染液滴定机、HS-24 型高温染色小样机、HH-S 型恒温水浴机、烘干机、DataColor800 型测色配色仪.

用滴液滴定机加染料于染杯,放入布样;将染杯置于 60 ℃ 小样机中 45 min;于 100 ℃ 恒温水浴机皂洗 5 min;取出样布,进行清洗、烘干;使用测色配色仪测量布匹的反射光谱.

单一染料染色后的反射光谱曲线(小样实验 1),如图 5 所示. 图 5 中:虚线为测得的实际反射光谱率;实线为预测的反射光谱率.

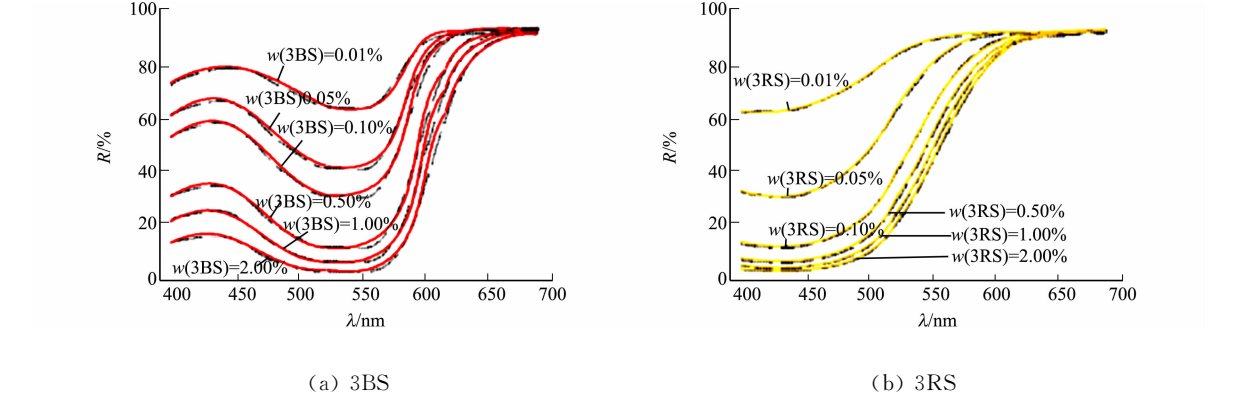


图 5 单一染料染色的反射光谱曲线(小样实验 1)
Fig. 5 Reflectance spectrum curve of single dye (sample experiment 1)

小样实验 2,3 先进行不同染料的单一染色,分别测得单一染色的反射光谱曲线,如图 6 所示;然后,进行拼色染色实验,测得拼色染色的反射光谱曲线,如图 7 所示. 图 6,7 中:虚线为测得的实际反射光谱

率;实线为预测的反射光谱率.

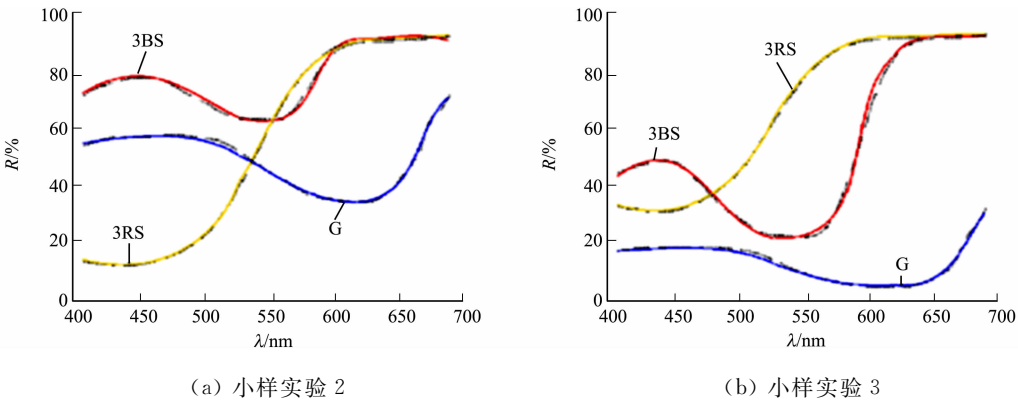


图 6 单一染料染色的反射光谱曲线(小样实验 2,3)

Fig. 6 Reflectance spectrum curve of single dye (sample experiments 2, 3)

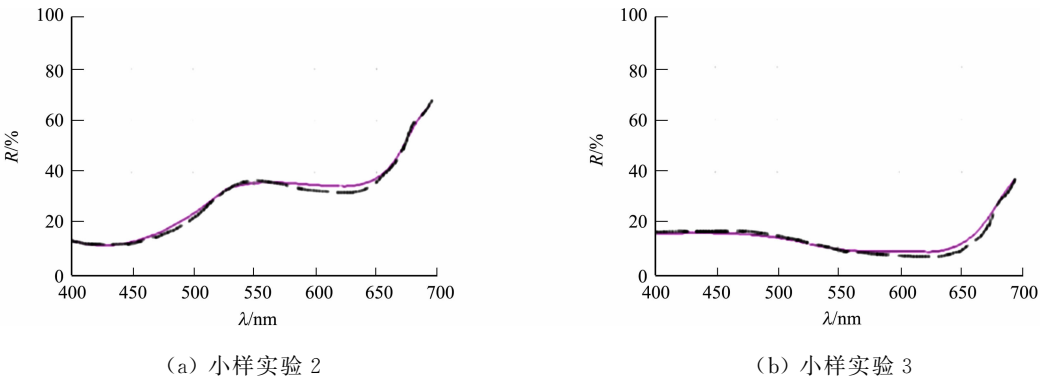


图 7 拼色染色的反射光谱曲线(小样实验 2,3)

Fig. 7 Reflection spectrum curve of color matching (sample experiments 2, 3)

4.2 实验分析

分析实际染色后布匹的反射光谱和预测得到的反射光谱,分别计算三刺激值、亨特色差(ΔE_{Hunter}),均方根误差(ΔE_{RMS})及光谱匹配精度(G_{FC}),结果如表 4,5 所示.表 4,5 中:(X_r, Y_r, Z_r)为染色布匹的实际三刺激值;(X_p, Y_p, Z_p)为染色布匹的预测三刺激值;小样实验 1 取单一染色中色差最大者.

表 4 小样实验三刺激值比较
Tab. 4 Comparison of tristimulus value of sample experiments

实验编号	(X_r, Y_r, Z_r)	(X_p, Y_p, Z_p)
小样实验 1	(57.54, 48.01, 61.90)	(58.69, 49.17, 62.42)
	(76.49, 74.93, 37.51)	(76.49, 74.93, 37.51)
	(31.27, 37.22, 50.16)	(33.87, 39.71, 53.09)
小样实验 2	(29.12, 31.89, 15.44)	(32.69, 35.50, 18.86)
小样实验 3	(10.61, 11.74, 18.86)	(11.21, 11.87, 17.97)

表 5 小样实验光谱曲线对比
Tab. 5 Comparison of spectral curves of sample experiments

实验编号	ΔE_{Hunter}	ΔE_{RMS}	G_{FC}
小样实验 1	1.18	0.015	0.999
	0.01	0.010	0.999
	2.28	0.027	0.999
小样实验 2	3.23	0.036	0.998
小样实验 3	3.26	0.011	0.999

由表 4,5 可知:预测的反射光谱与实际染色的反射光谱的 CIE 色差均小于 4,属于工业染色可接受的范围,证明文中方法的有效性;预测与实际的反射光谱的均方根误差极小;预测与实际的反射光谱匹配精度高,证明文中方法的准确性.

5 结束语

使用 Bezier 参数曲线表示反射光谱率,可以将染料质量分数与曲线的关系转化为染料质量分数与点的关系,易于光谱重构和匹配.同时,将反射光谱曲线先分段再拟合,使反射光谱曲线的数学表示更加准确.通过分析染料质量分数和反射光谱的关系,建立由单一染料合成拼色染料的函数模型,可直接由

染料配方的质量分数计算出染色后布匹的反射光谱率,并由该反射光谱率计算与目标色之间的色差.由染色配方直接预测配色结果和色差,相较于三刺激值配色法的反复迭代和调整过程,文中方法具有快速性和简洁性,且使用反射光谱曲线考察目标色与匹配色,更加准确、真实.

参考文献:

[1] 李小东,赵东柏,冯利军. 计算机配色理论与实践[J]. 绿色包装,2017(2):53-59. DOI:10. 19362/j. cnki. cn10-1400/tb. 2017. 02. 004.

[2] 王华清,文水平. 计算机测色配色应用技术[M]. 上海:东华大学出版社,2012.

[3] 杨陈. 腈纶纤维三刺激值计算机测配色研究[J]. 毛纺科技,2015,43(11):54-58. DOI:10. 19333/j. mfkj. 2015. 11. 012.

[4] 陈遵田,杜泉,郭建军. 针织品测色配色系统研究[J]. 四川工业学院报,1998,17(4):36-41.

[5] 苏步青,刘鼎元. 计算几何[M]. 上海:上海科学技术出版社,1980.

[6] 刘昕,郑文军,谢天宝. 计算机反射光谱法配色的研究[J]. 印刷标准化,1997(2):15-18.

[7] 周吉川,张贵. 电脑测配色在纺织品颜色管理中的应用[J]. 轻纺工业与技术,2018,47(7):92-95.

[8] 吕勋,吴虹,杨德森. 实测光谱特征曲线分析及建模[J]. 科技信息,2011(5):65-66.

[9] 夏祥华,孙汉文. 基于遗传算法的曲线拟合方法用于重叠荧光光谱的定量解析[J]. 光谱学与光谱分析,2012,32(8):2157-2161. DOI:10. 3964/j. issn. 1000-0593(2012)08-2157-05.

[10] CUAN Kaixuan,LU Dejun,ZHANG Weifeng. Spectral reflectance reconstruction with the locally weighted linear model[J]. Optical and Quantum Electronics,2019,51(6):1-12. DOI:10. 1007/s11082-019-1887-8.

[11] CAO Bin,LIAO Ningfang,CHENG Haobo. Spectral reflectance reconstruction from RGB images based on weighting smaller color difference group[J]. Color Research and Application,2016,42(3):327-332.

[12] MANSOURI A,MARZANI F S,GOUTON P. Neural networks in two cascade algorithms for spectral reflectance reconstruction[C]// International Conference on Image Processing. [S. l.]:IEEE Press,2005:718-721. DOI:10. 1109/ICIP. 2005. 1530156.

[13] 许倩,张秉森,潘玉丽. 基于分段数值分析和多项式拟合的织物染料配色研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版),2012,27(1):79-84. DOI:10. 3969/j. issn. 1006-9798. 2012. 01. 016.

[14] 马崇启,程璐,金晓,等. Stearns-Noechel 模型的全光谱纱线配色算法[J]. 光谱学与光谱分析,2018,38(8):2488-2492. DOI:10. 3964/j. issn. 1000-0593(2018)08-2488-05.

[15] 陈维国,沈加加,张志强,等. 一种基于全光谱配色的混色毛织物计算机拼色方法: 101833593A[P]. 2010-09-15.

[16] 高晶. Bezier 曲线的算法研究[J]. 辽宁师专学报(自然科学版),2008,10(2):25-26. DOI:10. 3969/j. issn. 1008-5688. 2008. 02. 019.

[17] 星蓉生,潘日晶. 三次均匀 B 样条曲线插值数据点及其切矢的 PIA 算法[J]. 福建师范大学学报(自然科学版),2014,30(1):25-32.

[18] 李永桥,湛永祥. 累加弦长法插值在反求工程中的实现研究[J]. 山东建筑大学学报,2008,23(3):247-249. DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-7644. 2008. 03. 014.

[19] 叶丽,谢明红. 采用积累弦长法拟合 3 次 NURBS 曲线[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2010,31(4):383-387. DOI:10. 11830/ISSN. 1000-5013. 2010. 04. 0383.

(责任编辑:钱筠 英文审校:吴逢铁)