

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202204014



# 单色料反射光谱曲面配色方法

陈三长, 金福江, 周丽春

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 为了获得单色料反射率随着可见光波长和染料质量占比变化的函数, 提出一种单色料反射光谱曲面配色方法. 首先, 根据染料质量占比与可见光波长的范围将单色料反射光谱曲面划分为 9 个曲面片; 然后, 采用多项式建模方法, 构建不同曲面片的单色料反射光谱曲面模型, 并通过小样实验验证该方法的准确性. 实验结果表明: 通过有限组小样实验可以构建单色料反射光谱曲面, 确定单色料反射率随着染料质量占比和可见光波长的变化关系, 预测布匹在单色料染色后的颜色与目标色的色差.

**关键词:** 反射光谱曲面; 多项式建模; 单色料; 计算机配色

**中图分类号:** TS 193.5; TS 941.26

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2022)06-0799-10

## Color Matching Method of Single Dye Reflection Spectrum Surface

CHENG Sanchang, JIN Fujiang, ZHOU Lichun

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to obtain the function of the single dye reflectivity varying with the visible light wavelength and the dye mass ratio, a color matching method of single dye reflection spectrum surface was proposed. Firstly, according to the range of dye mass ratio and visible light wavelength, the single dye reflection spectrum surface was divided into nine surface sheets. Then, the polynomial modeling method was used to construct the single dye reflection spectrum surface models of different surface sheets, and the method accuracy was verified by sample experiments. The experimental results show that the single dye reflection spectrum surface can be constructed through a limited group of sample experiments, the varying relationship between the single dye reflectivity and the dye mass ratio and the visible light wavelength can be determined, and the color difference between the color of the cloth dyed with the single dye and the target color can be predicted.

**Keywords:** reflection spectrum surface; polynomial modeling; single dye; computer color matching

在纺织印染中, 采用反射光谱表征颜色比三刺激值更加全面和客观<sup>[1-2]</sup>. 单色料反射光谱曲线与染料质量占比(染料质量与布质量的比值)之间的关系十分复杂<sup>[3-4]</sup>, 采用全反射光谱<sup>[3]</sup>进行配色需要在全波段范围内与目标反射光谱尽量匹配, 从而使表色更加全面. 准确的反射光谱描述函数是全反射光谱配色的关键. Zhang 等<sup>[5]</sup>采用光谱波峰、波谷和区域平均反射率等离散点表达光谱特性, 可较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. 王波等<sup>[6]</sup>通过 Bezier 曲线描述反射光谱, 得到准确的反射光谱解析表达式, 并给出控制点与染料质量占比的关键函数关系, 建立反射光谱与染料质量占

**收稿日期:** 2022-04-07

**通信作者:** 金福江(1965-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事复杂系统建模、仿真与控制的研究. E-mail: jinfuliang@163.com.

**基金项目:** 福建省科技计划项目(2021H6028)

比之间的关系,但该方法仅描述 Bezier 控制点与染料质量占比之间的变化曲线.

单色料上染时,单色料反射率的函数为可见光波长和染料质量占比的函数<sup>[7]</sup>,在三维空间中可用曲面进行表征.上述单色料配色模型仅对有限个反射光谱或有限个单色料反射率与染料质量占比的变化曲线进行描述,仅描述曲面的有限条曲线,因此,对单色料配色模型的描述并不全面.基于此,本文提出一种单色料反射光谱曲面配色方法.

# 1 单色料反射光谱曲面建模

## 1.1 单色料反射光谱曲面

单色料上染时,单色料反射率的函数是染料质量占比和可见光波长的二元函数,在三维空间内是一个曲面<sup>[8]</sup>,称为反射光谱曲面.反射光谱曲面的定义(定义 1)及定理(定理 1)如下.

**定义 1** 单色料上染时,单色料反射率  $r(0\leq r\leq 1)$  随着可见光波长  $\lambda(\lambda>0)$  和染料质量占比  $c(0\leq c\leq 100)$  变化的函数表示为  $f(\lambda,c)$ .当染料质量占比  $c$  为定值时, $f(\lambda,c)$  表征实际单色料上染时的反射光谱曲线;当可见光波长  $\lambda$  为定值时, $f(\lambda,c)$  表征实际单色料上染时,固定可见光波长下单色料反射率随着染料质量占比变化的反射光谱曲线.定义集合  $S=\{400\text{ nm}\leq\lambda\leq 700\text{ nm},0\%\leq c\leq 6.0\%\}$ ,即  $\lambda\in[400\text{ nm},700\text{ nm}],c\in[0\%,6.0\%]$ .该集合的可见光波长范围、染料质量占比范围均为染整工业中的常用范围,如果  $f(\lambda,c)$  是单值连续性函数<sup>[9]</sup>,且一阶偏导存在且连续<sup>[10-11]</sup>,则将  $f(\lambda,c)$  定义为反射光谱曲面.

**定理 1** 反射光谱曲面有以下 4 个性质.

- 1)  $\forall (\lambda_0,c_0)\in S$ ,在实际单色料上染中, $f(\lambda_0,c_0)$  为单值函数.
- 2)  $\forall (\lambda_0,c_0)\in S, \lim_{(\lambda,c)\rightarrow(\lambda_0,c_0)} f(\lambda,c)=f(\lambda_0,c_0)$ .
- 3)  $\forall (\lambda_0,c_0)\in S$ ,由于  $f(\lambda,c)$  为连续性函数,需要满足连续性条件,即  $\lim_{(\lambda,c_0)\rightarrow(\lambda_0,c_0)} f(\lambda,c_0)=f(\lambda_0,c_0), \lim_{(\lambda_0,c)\rightarrow(\lambda_0,c_0)} f(\lambda_0,c)=f(\lambda_0,c_0)$ .
- 4)  $\forall (\lambda_0,c_0)\in S$ ,实际单色料上染时, $f(\lambda,c)$  是随着可见光波长和染料质量占比连续变化的,反射光谱曲面在定义域内是光滑的.因此,需满足一阶偏导的连续性,即  $\lim_{(\lambda,c_0)\rightarrow(\lambda_0^+,c_0)} \frac{f(\lambda,c_0)-f(\lambda_0,c_0)}{\lambda-\lambda_0}=\lim_{(\lambda,c_0)\rightarrow(\lambda_0^-,c_0)} \frac{f(\lambda,c_0)-f(\lambda_0,c_0)}{\lambda-\lambda_0}, \lim_{(\lambda_0,c)\rightarrow(\lambda_0,c_0^+)} \frac{f(\lambda_0,c)-f(\lambda_0,c_0)}{c-c_0}=\lim_{(\lambda_0,c)\rightarrow(\lambda_0,c_0^-)} \frac{f(\lambda_0,c)-f(\lambda_0,c_0)}{c-c_0}$ .

根据实际单色料反射率随着染料质量占比和可见光波长变化的函数,定义了反射光谱曲面,反射光谱曲面应保证定义域内连续且光滑,与实际单色料反射率随着染料质量占比和可见光波长的连续变化一一对应.单色料反射光谱曲面很好地表征了单色料上染时的配色模型.

在可见光波长范围和染料质量占比范围内,红、黄、蓝 3 色的单色料反射率表征了染料对不同波段的作用大小.因此,将红、黄、蓝 3 色光的中心可见光波长分为 3 个波段,分别为蓝光波段( $400\text{ nm}\leq\lambda\leq 505\text{ nm}$ )、黄光波段( $505\text{ nm}\leq\lambda\leq 615\text{ nm}$ )和红光波段( $615\text{ nm}\leq\lambda\leq 700\text{ nm}$ ).需说明的是,由于反射光谱曲面处处连续,处处光滑,3 个波长范围的左、右区间均为闭区间,不用对边界进行明确分类,边界点满足边界两侧的函数关系,染料质量占比分类亦如此.

染料质量占比的变化会引起反射光谱的变化,在染整配色中,二者为非线性变化.将染料质量占比分为低质量占比( $0\%\leq c\leq 0.4\%$ )、中质量占比( $0.4\%\leq c\leq 1.2\%$ )和高质量占比( $1.2\%\leq c\leq 6.0\%$ ).不同染料质量占比的反射光谱呈现较大差异,因而需要描述不同染料质量占比作用于反射光谱的局部特性.根据染料质量占比分段和可见光波长分段将单色料反射光谱曲面划分为 9 个曲面片(图 1),根据曲面片的局部特性,将 9 个曲面片分为 3 类,即反射光谱中心曲面、反射光谱边曲面、反射光谱角曲面.

3 类反射光谱曲面的定义(定义 2~4)及定理(定理 2~4)如下.

**定义 2** 若  $f_c(\lambda_c,c_c)$  为集合  $S_c=\{505\text{ nm}\leq\lambda\leq 615\text{ nm},0.4\%\leq c\leq 1.2\%\}$  内的反射光谱曲面函数,则称  $f_c(\lambda_c,c_c)$  为反射光谱中心曲面函数.

**定理 2** 反射光谱中心曲面属于反射光谱曲面,定义域为  $S_c=\{505\text{ nm}\leq\lambda\leq 615\text{ nm},0.4\%\leq c\leq$

1.2% }.

根据定义 2, 单色料反射光谱曲面的曲面片 5 为反射光谱中心曲面.

**定义 3** 若  $f_e(\lambda_e, c_e)$  为集合  $S_e$  内的反射光谱曲面函数, 且与反射光谱中心曲面  $f_c(\lambda_c, c_c)$  有且仅有一条交线  $h_{e,c}(\lambda_{e,c}, c_{e,c}), (\lambda_{e,c}, c_{e,c}) \in S_{e,c}, S_{e,c} = S_e \cap S_c$ , 同时, 保证反射光谱中心曲面与  $f_e(\lambda_e, c_e)$  光顺连接, 则称  $f_e(\lambda_e, c_e)$  为反射光谱边曲面函数.

**定理 3** 反射光谱边曲面有以下 3 个性质.

1) 反射光谱边曲面属于反射光谱曲面, 因此,  $S_e \in S, S_{e,c} \in S$ .

2) 根据定理 1, 反射光谱曲面函数在定义域内是连续的, 因此, 反射光谱中心曲面和反射光谱边曲面在交线处需满足连续性条件, 即  $h_{e,c}(\lambda_{e,c}, c_{e,c}) = f_e(\lambda_{e,c}, c_{e,c}) = f_c(\lambda_{e,c}, c_{e,c})$ .

3) 根据定理 1, 反射光谱曲面函数在定义域内是光顺的, 因此, 反射光谱中心曲面和反射光谱边曲面在交线处的一阶导数需满足连续性条件, 即  $\frac{\partial f_e}{\partial c_{e,c}} = \frac{\partial f_c}{\partial c_{e,c}}, \frac{\partial f_e}{\partial \lambda_{e,c}} = \frac{\partial f_c}{\partial \lambda_{e,c}}$ .

根据定义 3, 单色料反射光谱曲面的曲面片 2, 4, 6, 8 为反射光谱边曲面, 反射光谱边曲面与反射光谱中心曲面存在一条交线. 因此, 增加了连续性和一阶导数连续性约束条件.

**定义 4** 若  $f_h(\lambda_h, c_h)$  为集合  $S_h$  内的反射光谱曲面函数, 且与两个反射光谱边曲面  $f_{e,a}(\lambda_{e,a}, c_{e,a}) ((\lambda_{e,a}, c_{e,a}) \in S_{e,a}), f_{e,b}(\lambda_{e,b}, c_{e,b}) ((\lambda_{e,b}, c_{e,b}) \in S_{e,b})$  有且存在两条不同的交线  $h_{h,e,a}(\lambda_{h,e,a}, c_{h,e,a}) ((\lambda_{h,e,a}, c_{h,e,a}) \in S_{h,e,a}), h_{h,e,b}(\lambda_{h,e,b}, c_{h,e,b}) ((\lambda_{h,e,b}, c_{h,e,b}) \in S_{h,e,b})$ , 则称  $f_h(\lambda_h, c_h)$  为反射光谱角曲面函数.

**定理 4** 反射光谱角曲面有以下 4 个性质.

1) 反射光谱角曲面属于反射光谱曲面, 因此,  $S_h \in S, S_{h,e,a} \in S, S_{h,e,b} \in S$ .

2)  $S_{h,e,a} = S_h \cap S_{e,a}, S_{h,e,b} = S_h \cap S_{e,b}$ .

3) 根据定理 1, 反射光谱曲面函数在定义域内是连续的, 因此, 反射光谱角曲面和反射光谱边曲面在交线处需满足连续性条件, 即  $h_{h,e,a}(\lambda_{h,e,a}, c_{h,e,a}) = f_{e,a}(\lambda_{h,e,a}, c_{h,e,a}) = f_h(\lambda_{h,e,a}, c_{h,e,a}), h_{h,e,b}(\lambda_{h,e,b}, c_{h,e,b}) = f_{e,b}(\lambda_{h,e,b}, c_{h,e,b}) = f_h(\lambda_{h,e,b}, c_{h,e,b})$ .

4) 根据定理 1, 反射光谱曲面函数在定义域是光顺的, 故反射光谱角曲面和反射光谱边曲面在交线处的一阶导数需满足连续性条件, 即  $\frac{\partial h_{h,e,a}}{\partial c_{h,e,a}} = \frac{\partial f_{e,a}}{\partial c_{h,e,a}} = \frac{\partial f_h}{\partial c_{h,e,a}}, \frac{\partial h_{h,e,a}}{\partial \lambda_{h,e,a}} = \frac{\partial f_{e,a}}{\partial \lambda_{h,e,a}} = \frac{\partial f_h}{\partial \lambda_{h,e,a}}, \frac{\partial h_{h,e,b}}{\partial c_{h,e,b}} = \frac{\partial f_{e,b}}{\partial c_{h,e,b}} = \frac{\partial f_h}{\partial c_{h,e,b}}, \frac{\partial h_{h,e,b}}{\partial \lambda_{h,e,b}} = \frac{\partial f_{e,b}}{\partial \lambda_{h,e,b}} = \frac{\partial f_h}{\partial \lambda_{h,e,b}}$ .

根据定义 4, 单色料反射光谱曲面的曲面片 1, 3, 7, 9 为反射光谱角曲面, 反射光谱角曲面与两个反射光谱边曲面相邻. 因此, 增加了连续性和一阶导数连续性约束条件.

### 1.2 反射光谱中心曲面建模

曲面片 5 为反射光谱中心曲面, 解析函数为

$$f_c(\lambda_c, c_c) = \sum_{i=0}^{m_{c,1}} \sum_{j=0}^{m_{c,2}} a_{c,i,j} \lambda_c^i c_c^j. \tag{1}$$

式(1)中:  $(\lambda_c, c_c) \in S_c; i$  为可见光波长的幂次,  $i=0, 1, \dots, m_{c,1}; j$  为染料质量占比的幂次,  $j=0, 1, \dots, m_{c,2}; a_{c,i,j}$  为反射光谱中心曲面的多项式系数.

### 1.3 反射光谱边曲面建模

曲面片 2 为反射光谱边曲面, 定义域  $S_{e,2} = \{505 \text{ nm} \leq \lambda_{e,2} \leq 615 \text{ nm}, 0\% \leq c_{e,2} \leq 0.4\%\}$ , 交线定义域  $S_{e,c,2} = \{505 \text{ nm} \leq \lambda_{e,c,2} \leq 615 \text{ nm}, c_{e,c,2} = 0.4\%\}$ , 曲面片 2 的解析函数为

$$f_{e,2}(\lambda_{e,2}, c_{e,2}) = \sum_{i=0}^{m_{e,2,1}} \sum_{j=0}^{m_{e,2,2}} a_{e,2,i,j} \lambda_{e,2}^i c_{e,2}^j. \tag{2}$$

式(2)中:  $(\lambda_{e,2}, c_{e,2}) \in S_{e,2}; i$  表示可见光波长的幂次,  $i=0, 1, \dots, m_{e,2,1}; j$  表示染料质量占比的幂次,  $j=$

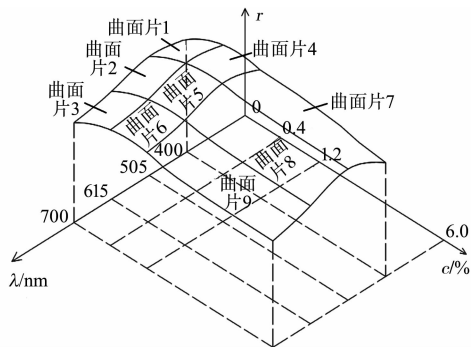


图 1 单色料反射光谱曲面模型  
Fig. 1 Model of single dye reflection spectrum surface

0,1,⋯,m<sub>e,2,2</sub>;a<sub>e,2,i,j</sub>为曲面片2函数的多项式系数.

曲面片2为反射光谱边曲面,其函数的约束条件为

$$\left. \begin{aligned} h_{e,c,2}(\lambda_{e,c,2},c_{e,c,2}) &= f_{e,2}(\lambda_{e,c,2},c_{e,c,2}) = f_c(\lambda_{e,c,2},c_{e,c,2}), \\ \frac{\partial h_{e,c,2}}{\partial \lambda_{e,c,2}} &= \frac{\partial f_{e,2}}{\partial \lambda_{e,c,2}} = \frac{\partial f_c}{\partial \lambda_{e,c,2}}. \end{aligned} \right\}$$

(3)

式(3)中:h<sub>e,c,2</sub>为反射光谱中心曲面和曲面片2的交线.

曲面片4为反射光谱边曲面,定义域S<sub>e,4</sub>={400 nm≤λ<sub>e,4</sub>≤505 nm,0.4%≤c<sub>e,4</sub>≤1.2%},交线定义域S<sub>e,c,4</sub>={λ<sub>e,c,4</sub>=505 nm,0.4%≤c<sub>e,c,4</sub>≤1.2%},曲面片4的解析函数为

$$f_{e,4}(\lambda_{e,4},c_{e,4}) = \sum_{i=0}^{m_{e,4,1}} \sum_{j=0}^{m_{e,4,2}} a_{e,4,i,j} \lambda_{e,4}^i c_{e,4}^j.$$

(4)

式(4)中:(λ<sub>e,4</sub>,c<sub>e,4</sub>)∈S<sub>e,4</sub>;i表示可见光波长的幂次,i=0,1,⋯,m<sub>e,4,1</sub>;j表示染料质量占比的幂次,j=0,1,⋯,m<sub>e,4,2</sub>;a<sub>e,4,i,j</sub>为曲面片4函数的多项式系数.

曲面片4为反射光谱边曲面,其函数的约束条件为

$$\left. \begin{aligned} h_{e,c,4}(\lambda_{e,c,4},c_{e,c,4}) &= f_{e,4}(\lambda_{e,c,4},c_{e,c,4}) = f_c(\lambda_{e,c,4},c_{e,c,4}), \\ \frac{\partial h_{e,c,4}}{\partial c_{e,c,4}} &= \frac{\partial f_{e,4}}{\partial c_{e,c,4}} = \frac{\partial f_c}{\partial c_{e,c,4}}. \end{aligned} \right\}$$

(5)

式(5)中:h<sub>e,c,4</sub>为反射光谱中心曲面和曲面片4的交线.

曲面片6为反射光谱边曲面,定义域S<sub>e,6</sub>={615 nm≤λ<sub>e,6</sub>≤700 nm,0.4%≤c<sub>e,6</sub>≤1.2%},交线定义域S<sub>e,c,6</sub>={λ<sub>e,c,6</sub>=615 nm,0.4%≤c<sub>e,c,6</sub>≤1.2%},曲面片6的解析函数为

$$f_{e,6}(\lambda_{e,6},c_{e,6}) = \sum_{i=0}^{m_{e,6,1}} \sum_{j=0}^{m_{e,6,2}} a_{e,6,i,j} \lambda_{e,6}^i c_{e,6}^j.$$

(6)

式(6)中:(λ<sub>e,6</sub>,c<sub>e,6</sub>)∈S<sub>e,6</sub>;i表示可见光波长的幂次,i=0,1,⋯,m<sub>e,6,1</sub>;j表示染料质量占比的幂次,j=0,1,⋯,m<sub>e,6,2</sub>;a<sub>e,6,i,j</sub>为曲面片6函数的多项式系数.

曲面片6为反射光谱边曲面,其函数的约束条件为

$$\left. \begin{aligned} h_{e,c,6}(\lambda_{e,c,6},c_{e,c,6}) &= f_{e,6}(\lambda_{e,c,6},c_{e,c,6}) = f_c(\lambda_{e,c,6},c_{e,c,6}), \\ \frac{\partial h_{e,c,6}}{\partial c_{e,c,6}} &= \frac{\partial f_{e,6}}{\partial c_{e,c,6}} = \frac{\partial f_c}{\partial c_{e,c,6}}. \end{aligned} \right\}$$

(7)

式(7)中:h<sub>e,c,6</sub>为反射光谱中心曲面和曲面片6的交线.

曲面片8为反射光谱边曲面,定义域S<sub>e,8</sub>={505 nm≤λ<sub>e,8</sub>≤615 nm,1.2%≤c<sub>e,8</sub>≤6.0%},交线定义域S<sub>e,c,8</sub>={505 nm≤λ<sub>e,c,8</sub>≤615 nm,c<sub>e,c,8</sub>=1.2%},曲面片2的解析函数为

$$f_{e,8}(\lambda_{e,8},c_{e,8}) = \sum_{i=0}^{m_{e,8,1}} \sum_{j=0}^{m_{e,8,2}} a_{e,8,i,j} \lambda_{e,8}^i c_{e,8}^j.$$

(8)

式(8)中:(λ<sub>e,8</sub>,c<sub>e,8</sub>)∈S<sub>e,8</sub>;i表示可见光波长的幂次,i=0,1,⋯,m<sub>e,8,1</sub>;j表示染料质量占比的幂次,j=0,1,⋯,m<sub>e,8,2</sub>;a<sub>e,8,i,j</sub>为曲面片8函数的多项式系数.

曲面片8为反射光谱边曲面,其函数的约束条件为

$$\left. \begin{aligned} h_{e,c,8}(\lambda_{e,c,8},c_{e,c,8}) &= f_{e,8}(\lambda_{e,c,8},c_{e,c,8}) = f_c(\lambda_{e,c,8},c_{e,c,8}), \\ \frac{\partial h_{e,c,8}}{\partial \lambda_{e,c,8}} &= \frac{\partial f_{e,8}}{\partial \lambda_{e,c,8}} = \frac{\partial f_c}{\partial \lambda_{e,c,8}}. \end{aligned} \right\}$$

(9)

式(9)中:h<sub>e,c,8</sub>为反射光谱中心曲面和曲面片8的交线.

1.4 反射光谱角曲面建模

曲面片1为反射光谱角曲面,其定义域S<sub>h,1</sub>={400 nm≤λ<sub>h,1</sub>≤505 nm,0%≤c<sub>h,1</sub>≤0.4%},交线的定义域S<sub>h,e,1,a</sub>={λ<sub>h,e,1,a</sub>=505 nm,0%≤c<sub>h,e,1,a</sub>≤0.4%},S<sub>h,e,1,b</sub>={400 nm≤λ<sub>h,e,1,b</sub>≤505 nm,c<sub>h,e,1,b</sub>=0.4%},曲面片1的解析函数为

$$f_{h,1}(\lambda_{h,1},c_{h,1}) = \sum_{i=0}^{m_{h,1,1}} \sum_{j=0}^{m_{h,1,2}} a_{h,1,i,j} \lambda_{h,1}^i c_{h,1}^j.$$

(10)

式(10)中:(λ<sub>h,1</sub>,c<sub>h,1</sub>)∈S<sub>h,1</sub>;i为可见光波长的幂次,i=0,1,⋯,m<sub>h,1,1</sub>;j为染料质量占比的幂次,j=0,

$1, \cdots, m_{h,1,2}; a_{h,1,i,j}$  为曲面片 1 函数的多项式系数.

曲面片 1 为反射光谱角曲面, 其函数的约束条件为

$$\left. \begin{aligned} h_{h,e,1,a}(\lambda_{h,e,1,a}, c_{h,e,1,a}) &= f_{h,1}(\lambda_{h,e,1,a}, c_{h,e,1,a}) = f_{e,2}(\lambda_{h,e,1,a}, c_{h,e,1,a}), \\ h_{h,e,1,b}(\lambda_{h,e,1,b}, c_{h,e,1,b}) &= f_{h,1}(\lambda_{h,e,1,b}, c_{h,e,1,b}) = f_{e,4}(\lambda_{h,e,1,b}, c_{h,e,1,b}), \\ \frac{\partial h_{h,e,1,a}}{\partial c_{h,e,1,a}} &= \frac{\partial f_{h,1}}{\partial c_{h,e,1,a}} = \frac{\partial f_{e,2}}{\partial c_{h,e,1,a}}, \\ \frac{\partial h_{h,e,1,b}}{\partial \lambda_{h,e,1,b}} &= \frac{\partial f_{h,1}}{\partial \lambda_{h,e,1,b}} = \frac{\partial f_{e,4}}{\partial \lambda_{h,e,1,b}}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式(11)中:  $h_{h,e,1,a}$  为曲面片 1 和曲面片 2 的交线;  $h_{h,e,1,b}$  为曲面片 1 和曲面片 4 的交线.

曲面片 3 为反射光谱角曲面, 其定义域  $S_{h,3} = \{615 \text{ nm} \leq \lambda_{h,3} \leq 700 \text{ nm}, 0\% \leq c_{h,3} \leq 0.4\%\}$ , 交线的定义域  $S_{h,e,3,a} = \{\lambda_{h,e,3,a} = 615 \text{ nm}, 0\% \leq c_{h,e,3,a} \leq 0.4\%\}$ ,  $S_{h,e,3,b} = \{615 \text{ nm} \leq \lambda_{h,e,3,b} \leq 700 \text{ nm}, c_{h,e,3,b} = 0.4\%\}$ , 曲面片 2 的解析函数为

$$f_{h,3}(\lambda_{h,3}, c_{h,3}) = \sum_{i=0}^{m_{h,3,1}} \sum_{j=0}^{m_{h,3,2}} a_{h,3,i,j} \lambda_{h,3}^i c_{h,3}^j. \quad (12)$$

式(12)中:  $(\lambda_{h,3}, c_{h,3}) \in S_{h,3}$ ;  $i$  为可见光波长的幂次,  $i=0, 1, \cdots, m_{h,3,1}$ ;  $j$  为染料质量占比的幂次,  $j=0, 1, \cdots, m_{h,3,2}$ ;  $a_{h,3,i,j}$  为曲面片 3 函数的多项式系数.

曲面片 3 为反射光谱角曲面, 其函数的约束条件为

$$\left. \begin{aligned} h_{h,e,3,a}(\lambda_{h,e,3,a}, c_{h,e,3,a}) &= f_{h,3}(\lambda_{h,e,3,a}, c_{h,e,3,a}) = f_{e,2}(\lambda_{h,e,3,a}, c_{h,e,3,a}), \\ h_{h,e,3,b}(\lambda_{h,e,3,b}, c_{h,e,3,b}) &= f_{h,3}(\lambda_{h,e,3,b}, c_{h,e,3,b}) = f_{e,6}(\lambda_{h,e,3,b}, c_{h,e,3,b}), \\ \frac{\partial h_{h,e,3,a}}{\partial c_{h,e,3,a}} &= \frac{\partial f_{h,3}}{\partial c_{h,e,3,a}} = \frac{\partial f_{e,2}}{\partial c_{h,e,3,a}}, \\ \frac{\partial h_{h,e,3,b}}{\partial \lambda_{h,e,3,b}} &= \frac{\partial f_{h,3}}{\partial \lambda_{h,e,3,b}} = \frac{\partial f_{e,6}}{\partial \lambda_{h,e,3,b}}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式(13)中:  $h_{h,e,3,a}$  为曲面片 3 和曲面片 2 的交线;  $h_{h,e,3,b}$  为曲面片 3 和曲面片 6 的交线.

曲面片 7 为反射光谱角曲面, 定义域  $S_{h,7} = \{400 \text{ nm} \leq \lambda_{h,7} \leq 505 \text{ nm}, 1.2\% \leq c_{h,7} \leq 6.0\%\}$ , 交线的定义域  $S_{h,e,7,a} = \{\lambda_{h,e,7,a} = 505 \text{ nm}, 1.2\% \leq c_{h,e,7,a} \leq 6.0\%\}$ ,  $S_{h,e,7,b} = \{400 \text{ nm} \leq \lambda_{h,e,7,b} \leq 505 \text{ nm}, c_{h,e,7,b} = 1.2\%\}$ , 曲面片 7 的解析函数为

$$f_{h,7}(\lambda_{h,7}, c_{h,7}) = \sum_{i=0}^{m_{h,7,1}} \sum_{j=0}^{m_{h,7,2}} a_{h,7,i,j} \lambda_{h,7}^i c_{h,7}^j. \quad (14)$$

式(14)中:  $(\lambda_{h,7}, c_{h,7}) \in S_{h,7}$ ;  $i$  为可见光波长的幂次,  $i=0, 1, \cdots, m_{h,7,1}$ ;  $j$  为染料质量占比的幂次,  $j=0, 1, \cdots, m_{h,7,2}$ ;  $a_{h,7,i,j}$  为曲面片 7 函数的多项式系数.

曲面片 7 为反射光谱角曲面, 约束条件为

$$\left. \begin{aligned} h_{h,e,7,a}(\lambda_{h,e,7,a}, c_{h,e,7,a}) &= f_{h,7}(\lambda_{h,e,7,a}, c_{h,e,7,a}) = f_{e,8}(\lambda_{h,e,7,a}, c_{h,e,7,a}), \\ h_{h,e,7,b}(\lambda_{h,e,7,b}, c_{h,e,7,b}) &= f_{h,7}(\lambda_{h,e,7,b}, c_{h,e,7,b}) = f_{e,4}(\lambda_{h,e,7,b}, c_{h,e,7,b}), \\ \frac{\partial h_{h,e,7,a}}{\partial c_{h,e,7,a}} &= \frac{\partial f_{h,7}}{\partial c_{h,e,7,a}} = \frac{\partial f_{e,8}}{\partial c_{h,e,7,a}}, \\ \frac{\partial h_{h,e,7,b}}{\partial \lambda_{h,e,7,b}} &= \frac{\partial f_{h,7}}{\partial \lambda_{h,e,7,b}} = \frac{\partial f_{e,4}}{\partial \lambda_{h,e,7,b}}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式(15)中:  $h_{h,e,7,a}$  为曲面片 7 和曲面片 8 的交线;  $h_{h,e,7,b}$  为曲面片 7 和曲面片 4 的交线.

曲面片 9 为反射光谱角曲面, 定义域  $S_{h,9} = \{615 \text{ nm} \leq \lambda_{h,9} \leq 700 \text{ nm}, 1.2\% \leq c_{h,9} \leq 6.0\%\}$ , 交线的定义域  $S_{h,e,9,a} = \{\lambda_{h,e,9,a} = 615 \text{ nm}, 1.2\% \leq c_{h,e,9,a} \leq 6.0\%\}$ ,  $S_{h,e,9,b} = \{615 \text{ nm} \leq \lambda_{h,e,9,b} \leq 700 \text{ nm}, c_{h,e,9,b} = 1.2\%\}$ , 曲面片 9 的解析函数为

$$f_{h,9}(\lambda_{h,9}, c_{h,9}) = \sum_{i=0}^{m_{h,9,1}} \sum_{j=0}^{m_{h,9,2}} a_{h,9,i,j} \lambda_{h,9}^i c_{h,9}^j. \quad (16)$$

式(16)中:  $(\lambda_{h,9}, c_{h,9}) \in S_{h,9}$ ;  $i$  为可见光波长的幂次,  $i=0, 1, \cdots, m_{h,9,1}$ ;  $j$  为染料质量占比的幂次,  $j=0, 1, \cdots, m_{h,9,2}$ ;  $a_{h,9,i,j}$  为曲面片 9 函数的多项式系数.

曲面片 9 为反射光谱角曲面,其函数的约束条件为

$$\left. \begin{aligned} h_{h,e,9,a}(\lambda_{h,e,9,a},c_{h,e,9,a}) &= f_{h,9}(\lambda_{h,e,9,a},c_{h,e,9,a}) = f_{e,8}(\lambda_{h,e,9,a},c_{h,e,9,a}), \\ h_{h,e,9,b}(\lambda_{h,e,9,b},c_{h,e,9,b}) &= f_{h,9}(\lambda_{h,e,9,b},c_{h,e,9,b}) = f_{e,6}(\lambda_{h,e,9,b},c_{h,e,9,b}), \\ \frac{\partial h_{h,e,9,a}}{\partial c_{h,e,9,a}} &= \frac{\partial f_{h,9}}{\partial c_{h,e,9,a}} = \frac{\partial f_{e,8}}{\partial c_{h,e,9,a}}, \\ \frac{\partial h_{h,e,9,b}}{\partial \lambda_{h,e,9,b}} &= \frac{\partial f_{h,9}}{\partial \lambda_{h,e,9,b}} = \frac{\partial f_{e,6}}{\partial \lambda_{h,e,9,b}}. \end{aligned} \right\} \tag{17}$$

式(17)中: $h_{h,e,9,a}$ 为曲面片 9 和曲面片 8 的交线; $h_{h,e,9,b}$ 为曲面片 9 和曲面片 6 的交线.

2 单色料反射光谱曲面的色差模型

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

$$\left. \begin{aligned} X &= k \sum_{\lambda=400}^{700} rS(\lambda) \overline{x}(\lambda) \Delta\lambda, \\ Y &= k \sum_{\lambda=400}^{700} rS(\lambda) \overline{y}(\lambda) \Delta\lambda, \\ Z &= k \sum_{\lambda=400}^{700} rS(\lambda) \overline{z}(\lambda) \Delta\lambda. \end{aligned} \right\} \tag{18}$$

式(18)中: $\overline{x}(\lambda),\overline{y}(\lambda),\overline{z}(\lambda)$ 为标准光源在 CIE 规定中的标准色度观察者<sup>[12]</sup>的光谱三刺激值; $S(\lambda)$ 为标准照明体<sup>[13]</sup>的相对光谱功率分布; $\Delta\lambda$ 为可见光波长间隔; $k$ 为归化系数,计算公式为

$$k = 100 / \sum_{\lambda=400}^{700} S(\lambda) \overline{y}(\lambda) \Delta\lambda. \tag{19}$$

单色料反射率  $r$  为反射光谱上的一点,因此,可通过  $f(\lambda,c)$  分片计算三刺激值  $X,Y,Z$ .

亨特色度空间的明度  $L_H$  和色品指数  $a_H,b_H$  的计算公式分别为

$$\left. \begin{aligned} L_H &= 10 \times Y^{\frac{1}{2}}, \\ a_H &= \frac{17.5 \times \left( \frac{X}{f_{X,A} + f_{X,B}} - Y \right)}{Y^{\frac{1}{2}}}, \\ b_H &= \frac{7.0 \times \left( Y - \frac{Z}{f_{Z,B}} \right)}{Y^{\frac{1}{2}}}. \end{aligned} \right\} \tag{20}$$

式(20)中: $f_{X,A},f_{X,B},f_{Z,B}$ 均为常数,随着选用的标准色度观察者和标准照明体的不同而改变,对于 CIE1964 观察者<sup>[12]</sup>和 D65 标准照明体<sup>[13]</sup>, $f_{X,A}=0.768\ 3,f_{X,B}=0.179\ 8,f_{Z,B}=1.073\ 3$ .

亨特色差  $\Delta E_H$  的计算公式为

$$\Delta E_H = [\Delta L_H^2 + \Delta a_H^2 + \Delta b_H^2]^{\frac{1}{2}}. \tag{21}$$

式(21)中: $\Delta L_H$ 为明度差; $\Delta a_H,\Delta b_H$ 均为色调差.

根据式(20)可得单色料明度和色品指数的预测值;实际打样后可测量实际的单色料反射光谱,根据式(20)可得单色料明度和色品指数的实际值;通过式(21)可得单色料明度、色品指数预测值和实际值之差,从而验证单色料反射光谱曲面模型的准确性.

3 实验结果与分析

3.1 仪器设备和药品

染色设备为全能试色机(图 2);辅助设备为染液滴定机(图 3)、小样实验罐;染料为活性红 EC-2BL;织物为纯棉汗布;测色仪器为 DataColor 800 型测色仪(美国 DataColor 公司);助剂为赛得利元明粉、纯碱、固色碱;其他药品为皂液(质量分数为 2%)、双氧水(质量分数为 27.5%)、片碱、SF-2 型低泡精炼剂、TF-189 型漂白剂、冰醋酸、除氧酶.



图 2 染液滴定机

Fig. 2 Dye liquor automatic titrator



图 3 全能试色机

Fig. 3 Universal color tester

3.2 小样实验验证

对单色料反射光谱曲面的 9 个曲面片进行正交实验, 单色料反射光谱曲面实验表, 如表 1 所示. 由表 1 可知: 实验需要对染料质量占比分别为 0.02%, 0.06%, 0.10%, 0.20%, 0.40%, 0.60%, 0.80%, 1.00%, 1.20%, 1.60%, 2.00%, 2.20% 的染液进行单色料染色小样实验. 活性红 EC-2BL 小样实验配方表, 如表 2 所示. 表 2 中:  $m$  为布质量;  $\rho$  为质量浓度.

表 1 单色料反射光谱曲面实验表

Tab. 1 Experiment table of single dye reflection spectrum surface

序号	曲面片 1		曲面片 2		曲面片 3		曲面片 4		曲面片 5		曲面片 6		曲面片 7		曲面片 8		曲面片 9	
	$\lambda/\text{nm}$	$c/\%$	$\lambda/\text{nm}$	$c/\%$	$\lambda/\text{nm}$	$c/\%$	$\lambda/\text{nm}$	$c/\%$	$\lambda/\text{nm}$	$c/\%$	$\lambda/\text{nm}$	$c/\%$	$\lambda/\text{nm}$	$c/\%$	$\lambda/\text{nm}$	$c/\%$	$\lambda/\text{nm}$	$c/\%$
1	400	0.02	535	0.02	635	0.02	400	0.4	535	0.40	635	0.40	400	1.20	535	1.20	635	1.20
2	400	0.06	535	0.06	635	0.06	400	0.60	535	0.60	635	0.60	400	1.60	535	1.60	635	1.60
3	400	0.10	535	0.10	635	0.10	400	0.80	535	0.80	635	0.80	400	2.00	535	2.00	635	2.00
4	400	0.20	535	0.20	635	0.20	400	1.00	535	1.00	635	1.00	400	2.20	535	2.20	635	2.20
5	435	0.02	565	0.02	655	0.02	435	0.40	565	0.40	655	0.40	435	1.20	565	1.20	655	1.20
6	435	0.06	565	0.06	655	0.06	435	0.60	565	0.60	655	0.60	435	1.60	565	1.60	655	1.60
7	435	0.10	565	0.10	655	0.10	435	0.80	565	0.80	655	0.80	435	2.00	565	2.00	655	2.00
8	435	0.20	565	0.20	655	0.20	435	1.00	565	1.00	655	1.00	435	2.20	565	2.20	655	2.20
9	470	0.02	595	0.02	675	0.02	470	0.40	595	0.40	675	0.40	470	1.20	595	1.20	675	1.20
10	470	0.06	595	0.06	675	0.06	470	0.60	595	0.60	675	0.60	470	1.60	595	1.60	675	1.60
11	470	0.10	595	0.10	675	0.10	470	0.80	595	0.80	675	0.80	470	2.00	595	2.00	675	2.00
12	470	0.20	595	0.20	675	0.20	470	1.00	595	1.00	675	1.00	470	2.20	595	2.20	675	2.20
13	505	0.02	615	0.02	700	0.02	505	0.40	615	0.40	700	0.40	505	1.20	615	1.20	700	1.20
14	505	0.06	615	0.06	700	0.06	505	0.60	615	0.60	700	0.60	505	1.60	615	1.60	700	1.60
15	505	0.10	615	0.10	700	0.10	505	0.80	615	0.80	700	0.80	505	2.00	615	2.00	700	2.00
16	505	0.20	615	0.20	700	0.20	505	1.00	615	1.00	700	1.00	505	2.20	615	2.20	700	2.20

表 2 活性红 EC-2BL 小样实验配方表

Tab. 2 Formula table of active red EC-2BL sample experiments

$c/\%$	$m/\text{g}$	浴比	$\rho(\text{元明粉})/\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	$\rho(\text{纯碱})/\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	$\rho(\text{固色碱})/\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$
0.02	10	1 : 7	15	1.0	1.5
0.06	10	1 : 7	15	1.0	1.5
0.10	10	1 : 7	15	1.0	1.5
0.20	20	1 : 7	15	1.0	1.5
0.40	10	1 : 7	15	1.0	1.5
0.60	10	1 : 7	25	2.0	2.0
0.80	10	1 : 7	25	2.0	2.0
1.00	10	1 : 7	50	2.0	2.0
1.20	10	1 : 7	50	2.0	2.0
1.60	10	1 : 7	50	2.0	2.0
2.00	10	1 : 7	60	2.0	2.5
2.20	10	1 : 7	60	2.0	2.5

纯棉汗布在使用前需要使用双氧水(质量分数为 27.5%)、片碱、SF-2 型低泡精炼剂、TF-189 型漂白剂进行漂白处理,漂白浴比为 1:10,对于 10 g 布质量,调制 100 mL 的漂液,其中,双氧水为 0.6 mL,片碱为 0.15 g,低泡精炼剂为 0.1 mL,漂白剂为 0.1 mL. 在 100 ℃下漂白 30 min,再使用冰醋酸(0.05 mL)、除氧酶(0.03 mL)及适量水,将漂白后的纯棉汗布进行清洗与脱水处理,脱水后的纯棉汗布便可用于小样染色. 根据表 2 进行小样实验,获得单色料反射光谱曲线,结合表 1 提取不同可见光波长和染料质量占比的单色料反射率,确定活性红 EC-2BL 单色料反射光谱曲面的多项式系数,并验证采用单色料反射光谱曲面模型预测单色料反射光谱的准确性,以及采用单色料反射光谱曲面模型预测单色料反射率随着染料质量占比变化曲线的准确性. 小样实验有以下 6 个步骤.

**步骤 1** 使用染液滴定机进行染液配制,配制的染液盛放于小样实验罐.

**步骤 2** 提前启动全能试色机,并将全能试色机的运行温度设置为 60 ℃恒温,保证全能试色机运行一段时间,且内部温度稳定在 60 ℃.

**步骤 3** 将漂白处理后的 10 g 纯棉汗布快速放入小样实验罐,并将小样试验罐密封,快速放置于全能试色机,在 60 ℃恒温中染色 45 min.

**步骤 4** 10 g 纯棉汗布在全能试色机中染色 45 min(60 ℃恒温)后取出,清洗小样试验罐,用低流速水小心冲洗样布,再置于小样实验罐,吸取 100 mL 皂液(质量分数为 2%)后置于小样实验罐,100 ℃下皂洗 10 min.

**步骤 5** 皂洗结束后,将 10 g 纯棉汗布取出,用低流速水冲洗样布表面残留染液,并用脱水机将样布简单脱水,置于烘箱中烘干,最后置于低温中冷却 5 min.

**步骤 6** 将冷却后的样布置于 DataColor 800 型测色仪的测量孔中测量反射光谱,得到染后 10 g 纯棉汗布的反射光谱.

使用 DataColor 800 型测色仪测量冷却后的样布,可得实验表中对应的染料质量占比和单色料反射率,经计算可得活性红 EC-2BL 单色料反射光谱曲面 9 个曲面片函数的多项式系数,如表 3 所示. 表 3 中: $a_{i,j}$  ( $i=0,1,2,3;j=0,1,2$ )为曲面片函数的多项式系数.

表 3 活性红 EC-2BL 曲面片函数的多项式系数  
Tab. 3 Polynomial coefficients of reactive red EC-2BL surface sheets function

系数	曲面片 1	曲面片 2	曲面片 3	曲面片 4	曲面片 5	曲面片 6	曲面片 7	曲面片 8	曲面片 9
$a_{0,0}$	-20.07	-47.99	-90.74	-62.60	-144.58	-296.35	-52.50	-73.32	-174.48
$a_{0,1}$	-204.03	-415.90	-1 080.52	34.99	78.08	271.00	9.18	-32.89	80.12
$a_{0,2}$	316.99	599.56	2 012.24	-16.95	-32.02	-84.01	-2.20	11.59	-8.85
$a_{1,0}$	0.13	0.29	0.41	0.41	0.85	1.35	0.35	0.43	0.74
$a_{1,1}$	1.36	2.33	4.73	-0.22	-0.48	-1.33	$-6.11 \times 10^{-2}$	0.18	-0.36
$a_{1,2}$	-2.11	-3.36	-8.89	0.10	0.20	0.43	$1.48 \times 10^{-2}$	$-6.34 \times 10^{-2}$	$3.66 \times 10^{-2}$
$a_{2,0}$	$-2.67 \times 10^{-4}$	$-5.85 \times 10^{-4}$	$-6.23 \times 10^{-4}$	$-8.60 \times 10^{-4}$	$-1.64 \times 10^{-3}$	$-2.03 \times 10^{-3}$	$-7.52 \times 10^{-4}$	$-8.42 \times 10^{-4}$	$-1.03 \times 10^{-3}$
$a_{2,1}$	$-3.01 \times 10^{-3}$	$-4.36 \times 10^{-3}$	$-6.91 \times 10^{-3}$	$4.32 \times 10^{-4}$	$9.75 \times 10^{-4}$	$2.14 \times 10^{-3}$	$1.33 \times 10^{-4}$	$-3.12 \times 10^{-4}$	$5.24 \times 10^{-4}$
$a_{2,2}$	$4.71 \times 10^{-3}$	$6.32 \times 10^{-3}$	$1.31 \times 10^{-2}$	$-2.10 \times 10^{-4}$	$-4.07 \times 10^{-4}$	$-7.03 \times 10^{-4}$	$-3.31 \times 10^{-5}$	$1.16 \times 10^{-4}$	$-4.97 \times 10^{-5}$
$a_{3,0}$	$1.79 \times 10^{-7}$	$3.87 \times 10^{-7}$	$3.13 \times 10^{-7}$	$6.02 \times 10^{-7}$	$1.06 \times 10^{-6}$	$1.02 \times 10^{-6}$	$5.39 \times 10^{-7}$	$5.45 \times 10^{-7}$	$4.81 \times 10^{-7}$
$a_{3,1}$	$2.20 \times 10^{-6}$	$2.72 \times 10^{-6}$	$3.36 \times 10^{-6}$	$-2.85 \times 10^{-7}$	$-6.55 \times 10^{-7}$	$-1.13 \times 10^{-6}$	$-9.65 \times 10^{-8}$	$1.85 \times 10^{-7}$	$-2.57 \times 10^{-7}$
$a_{3,2}$	$-3.46 \times 10^{-6}$	$-3.90 \times 10^{-6}$	$-6.41 \times 10^{-6}$	$1.40 \times 10^{-7}$	$2.76 \times 10^{-7}$	$3.82 \times 10^{-7}$	$2.46 \times 10^{-8}$	$-7.02 \times 10^{-8}$	$2.23 \times 10^{-8}$

使用 DataColor 800 型测色仪测得冷却后活性红 EC-2BL 单色料反射光谱曲线,如图 4 所示. 通过单色料反射光谱曲面模型,构建活性红 EC-2BL 单色料反射光谱曲面,如图 5 所示. 使用 DataColor 800 型测色仪可测得可见光波长分别为 450,550,650 nm 时,活性红 EC-2BL 染料质量占比分别为 0.02%,0.06%,0.10%,0.20%,0.40%,0.60%,0.80%,1.00%,1.20%,1.60%,2.00%,2.20%的单色料反射



率,并使用活性红 EC-2BL 单色料反射光谱曲面模型预测可见光波长分别为 450,550,650 nm 时,单色料反射率随着染料质量占比变化的曲线,如图 6 所示. 使用 DataColor 800 型测色仪测得染料质量占比分别为 0.06%,0.60%,1.60%时的活性红 EC-2BL 单色料反射光谱曲线(实际反射光谱曲线),并使用活性红 EC-2BL 单色料反射光谱曲面模型预测染料质量占比分别为 0.06%,0.60%,1.60%时的反射光谱(预测反射光谱曲线),结果如图 7 所示.

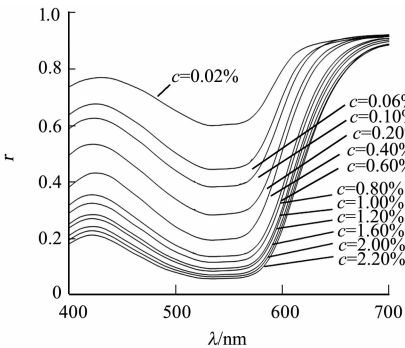


图 4 活性红 EC-2BL 单色料反射光谱曲线

Fig. 4 Active red EC-2BL single dye reflection spectrum curves

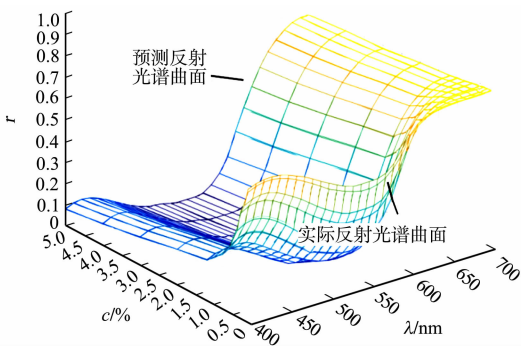


图 5 活性红 EC-2BL 单色料反射光谱曲面

Fig. 5 Active red EC-2BL single dye reflection spectrum surface

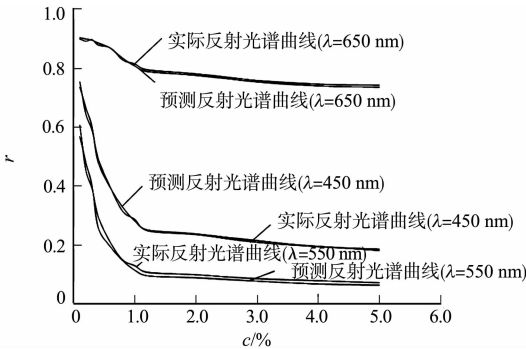


图 6 单色料反射率随着染料质量占比变化的曲线

Fig. 6 Curves of single dye reflectivity varying with dye mass ratios

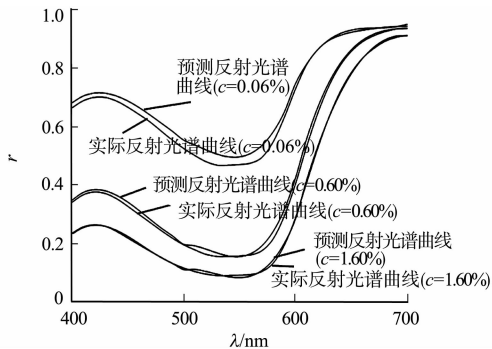


图 7 单色料反射光谱曲线

Fig. 7 Single dye reflection spectrum curves

### 3.3 结果分析

根据活性红 EC-2BL 小样实验结果,计算可见光波长分别为 450,550,650 nm 时,单色料反射率随着质量占比实际变化曲线与预测变化曲线的线性度( $R$ )<sup>[14]</sup>和均方根误差( $\Delta E_{\text{EMC}}$ )<sup>[15]</sup>,结果如表 4 所示. 计算染料质量占比分别为 0.06%,0.60%,1.60%时,活性红 EC-2BL 实际反射光谱曲线和预测反射光谱曲线的线性度、均方根误差和 D65 光源<sup>[16]</sup>下的色差( $\Delta E$ ),结果如表 5 所示.

表 4 不同可见光波长下单色料反射率变化情况

Tab. 4 Changes in reflectivity of monochromatic materials under different visible light wavelengths

参数	$\lambda=450\text{ nm}$	$\lambda=550\text{ nm}$	$\lambda=650\text{ nm}$
$R$	0.998 436 3	0.993 314 4	0.998 325 2
$\Delta E_{\text{EMC}}$	0.001 379 6	0.004 756 9	0.000 378 8

表 5 不同染料质量占比下反射光谱变化情况

Tab. 5 Changes in reflectance spectra under different dye mass ratios

参数	$c=0.06\%$	$c=0.60\%$	$c=1.60\%$
$R$	0.992 769 5	0.999 842 9	0.999 842 9
$\Delta E_{\text{EMC}}$	0.015 783 3	0.004 756 9	0.000 378 8
$\Delta E$	2.688 831 9	0.656 434 1	0.283 764 5

预测反射光谱曲面与实际反射光谱曲面非常接近,说明采用多项式建模方法构造反射光谱曲面具有有效性(图 5). 由表 4 可知:预测反射光谱曲线与实际反射光谱曲线的线性度较高,均方根误差较小,

证明构建的反射光谱曲面能够准确地预测单色料反射率随着染料质量占比变化的曲线. 由表 5 可知: 预测反射光谱曲线与实际反射光谱曲线的线性度较高, 均方根误差较小, 色差较小, 虽然在低质量占比段色差偏大, 但仍满足 CIE 标准的要求(色差小于 4), 属于工业可接受范围. 因此, 反射光谱曲面建模方法可以准确地预测单色料反射光谱曲线.

4 结 束 语

采用多项式建模方法, 构造单色料反射率随着染料质量占比和可见光波长变化的反射光谱曲面, 构建全面的反射光谱曲面模型, 比有限曲线描述单色料反射光谱曲面的方法更加全面准确. 通过活性红 EC-2BL 进行有限组小样实验, 对单色料反射率随着染料质量占比变化曲线的准确性进行验证. 文中构建的单色料反射光谱曲面模型较为准确地实现了单色料反射光谱曲线和单色料反射率随着染料质量占比变化曲线的预测.

参 考 文 献:

[1] 王喜昌,周丰昆,禹秉熙,等. 三刺激值配色和全光谱配色的比较[J]. 光学精密工程, 1999, 7(2): 14-17. DOI:10.3321/j. issn:1004-924X. 1999. 02. 003.

[2] 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:10.13306/j. 1006-9798. 2012. 01. 004.

[3] 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.

[4] 杨志晖. 织物 K-M 光学参数随染料浓度变化的研究[J]. 纺织科学与工程学报, 2018, 35(3): 81-85. DOI:10.3969/j. issn. 2096-5184. 2018. 03. 018.

[5] ZHANG Leihong, LIANG Dong, LI Bei, *et al.* Spectral reflectance recovery from a white-balanced RGB image based on the algorithm of compressive sensing[J]. Ukrainian Journal of Physical Optics, 2016, 17(3): 112-123. DOI:10.3116/16091833/17/3/112/2016.

[6] 王波,金福江,周丽春. 染料拼色反射光谱的 Bezier 曲线建模方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2021, 42(2): 221-228. DOI:10.11830/ISSN. 1000-5013. 202005003.

[7] 邹文海,徐海松,王勇. 基于彩色扫描仪的图像光谱重构[J]. 光学学报, 2007, 27(5): 859-863. DOI:10.3321/j. issn: 0253-2239. 2007. 05. 019.

[8] 徐梦豪. 形状可调过渡曲线及三角域 Bézier 曲面的构造[D]. 南昌: 东华理工大学, 2021. DOI:10.27145/d. cnki. gh-ddc. 2021. 000388.

[9] 普里瓦洛夫. 复变函数引论[M]. 闵嗣鹤, 等译. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2013.

[10] 陈少波,郑志丹,张自强,等. 一种具有光顺要求的曲线拟合方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2003(6): 16-17. DOI:10.3969/j. issn. 1001-2265. 2003. 06. 006.

[11] 王立涛,贾明. 能量法曲面光顺技术与探索[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22(1): 110-112. DOI:10.3969/j. issn. 1008-0562. 2003. 01. 034.

[12] 胡维生. 颜色物理和 CIE 标准色度系统[J]. 物理, 1982, 11(4): 202-208.

[13] 喻柏林,荆其诚. 光源的色温和 CIE 标准光源[J]. 国外计量, 1977(1): 41-49.

[14] 朱力行, HICKERNELL F J, 安鸿志. 随机回归模型线性性的拟合优度检验方法[J]. 数学年刊 A 辑(中文版), 1997(2): 115-120.

[15] 张英芝,翟粉莉,郑玉彬,等. 基于累积误差平方和最小的参数估计方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(11): 49-54. DOI:10.12141/j. issn. 1000-565X. 200159.

[16] 荆其诚,张增慧,焦书兰,等. CIE 标准照明体 A, D<sub>55</sub>, D<sub>65</sub>, D<sub>75</sub> 色度点的颜色匹配和允许范围[J]. 光学学报, 1982(1): 86-91.

(责任编辑: 钱筠      英文审校: 崔长彩)