

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.04.008

基于 Kubelka-Munk 双常数理论的涤/黏双组分三色混色纤维配方预测

李少聪¹, 项多闻¹, 王旭¹, 方寅春¹, 张文强², 彭旭光²

(1. 安徽工程大学纺织服装学院, 安徽芜湖 241000; 2. 滁州霞客无染彩色纺有限公司, 安徽滁州 239000)

摘要: 为了提高原液着色涤/黏双组分混配色打样效率, 基于 Kubelka-Munk 双常数理论模型, 选用 3 种单色(大红、宝兰 G、金黄)涤纶短纤维和 3 种单色(大红、蓝色、黄色)黏胶短纤维为研究对象, 以 6 种单色纤维进行双组分混色, 按 9 种不同混合比例共得到 54 种三色混色双组分纤维样品。利用测色仪测定混色样的颜色特征参数: 反射率(R)、颜色深度(K/S)、明亮度(L)、红绿色度(a)及黄蓝色度(b), 利用最小二乘法对数据进行处理; 最后对计算混色比例与实际混色比例之间的误差进行评价, 以验证 Kubelka-Munk 双常数理论模型在双组分混配色中的适用性。结果表明, 54 种样品的色差均在 1.0 以下, 均值为 0.277 5, 标准差为 0.217 7, 预测比例与实际比例差距较小, 红色涤纶与蓝色、黄色黏胶组合的平均比例误差最小, 为 1.109%, 说明其比例预测效果较好, 而黄色涤纶与红色、蓝色黏胶组合的平均色差最小, 为 0.172 1, 说明其颜色预测较好。

关键词: 涤/黏双组分; 色纺纱混配色; Kubelka-Munk 双常数理论; 颜色预测; 最小二乘法

中图分类号: TS182 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)04-0048-07

Formulation prediction of polyester/viscose two-component three-color blended fiber based on Kubelka-Munk double constant theory

LI Shaocong¹, XIANG Duowen¹, WANG Xu¹, FANG Yinchun¹, ZHANG Wenqiang², PENG Xuguang²

(1. College of Textile and Clothing, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China;

2. Chuzhou Xiake Non-dyeing Color Spinning Limited Company, Chuzhou 239000, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of the color matching of the two components of the pigment polyester/viscose, based on Kubelka-Munk double constant theoretical model, three monochrome (bright red, royalblue G, golden yellow) polyester staple fiber and three monochrome (bright red, blue, yellow) viscose staple fiber were selected as the research objects, two-component fibers color mixing was carried out with 6 monochromatic fibers, according to 9 different mixing ratios, 54 kinds of three-color mixed-color two-component fiber samples were obtained. The color characteristic parameters, such as reflectance (R), color depth (K/S), brightness (L), red green chromaticity (a) and yellow blue chromaticity (b), were measured by spectrophotometer, the least square method was used to process the data. Finally, the error between the calculated color mixing ratio and the actual color mixing ratio was evaluated. The applicability of Kubelka-Munk two-constant theory model in two-component color mixing was verified. The results show that the color differences of 54 samples are all below 1.0, the mean is 0.277 5 and the standard deviation is 0.217 7, the differences between the predicted ratio and the actual ratio are small, the average ratio error of the combination of red polyester with blue and yellow viscose is the smallest, 1.109%, indicating that the ratio prediction effect is good. The average color difference of the combination of yellow polyester with red and blue adhesive is the smallest, which is 0.172 1, indicating that the color prediction is good.

Keywords: polyester/viscose bi-component; color spinning yarn blending; Kubelka-Munk double constant theory; color prediction; least square method

基金项目: 安徽工程大学横向基金项目(HX-2021-11-003), 安徽工程大学研究生一流课程项目(2021ylkc009)

通信作者: 王旭, 副教授, 博士, 主要研究方向为纺织新材料

收稿日期: 2024-01-17

引用格式: 李少聪, 项多闻, 王旭, 等. 基于 Kubelka-Munk 双常数理论的涤/黏双组分三色混色纤维配方预测[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(4): 48-54.

LI Shaocong, XIANG Duowen, WANG Xu, et al. Formulation prediction of polyester/viscose two-component three-color blended fiber based on Kubelka-Munk double constant theory[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(4): 48-54.

以原液着色纤维作为原料生产的色纺纱,具有加工成本低、环境污染少、碳排放低等优点^[1],其中纤维混配色是色纺纱加工的重要环节之一。目前研究色纺纱纤维混配色的常用模型主要有三种, Kubelka-Munk^[2], Friele^[3]和 Stearns-Noechel^[4]模型。此外,一些其他模型如智能优化算法^[5]、BP神经网络、标准化映射、HSV色立体模型^[6]等,也被用于色纺纱的配色预测。张婷婷等^[7]基于 Kubelka-Munk 双常数模型对环锭数码纺混色纱进行比例预测,利用相对值法求解,结果显示色差均值为1.74,平均比例误差为7.38%,说明 Kubelka-Munk 双常数理论对环锭数码纺混色纱具有适用性。汪燕燕等^[8]为解决传统 Kubelka-Munk 双常数模型的问题,用插值替换法重新构建 Kubelka-Munk 双常数模型,使得配色模型预测精度更高。杨瑞华等^[9]基于 Friele 模型对转杯纺黏胶混色针织物进行测配色研究,计算得出参数 $\sigma=0.134$ 时混色样品平均色差最小。程璐等^[10]将人眼视觉特性对不同波长下反射光的敏感系数引入配色算法中进行加权计算,结合 Stearns-Noechel 理论模型,结果表明引入泊松分布赋值人眼敏感系数的配色算法结果最优。

由于三种常用模型中 Friele 模型与 Stearns-Noechel 模型中含有未知参数,其大小与研究材质有关,而 Kubelka-Munk 双常数模型具有对研究材质不敏感的优点,故笔者以 Kubelka-Munk 双常数模型为基础,对原液着色涤/黏双组分进行纤维混色比例预测实验。以3种单色涤纶短纤维和3种单色黏胶短纤维进行6种双组分搭配方式,并按9种不同混合比例共得到54种三色混色双组分纤维样品,运用 Kubelka-Munk 双常数模型结合最小二乘法实现三色双组分混色比例的预测,并讨论其准确性,以提高原液着色涤/黏双组分纤维混配色打样效率。

1 Kubelka-Munk 模型

1931年, Kubelka 和 Munk 发表了能同时进行光吸收和光散射的物理和数学模型^[11],之后 Kubelka 又对该模型更进一步研究推导,逐步形成了 Kubelka-Munk (K-M)理论。K-M理论分为单常数理论和双常数理论,后者更适用于色纺纱纤维混配色,混合纤维的吸收系数 K /散射系数 S 值与各单色

纤维的 K 值和 S 值之间满足式(1)。

$$\frac{K}{S} = \frac{c_1 K_1 + c_2 K_2 + \dots + c_i K_i}{c_1 S_1 + c_2 S_2 + \dots + c_i S_i} \quad (1)$$

式中: K 为吸收系数; S 为散射系数; K_1, K_2, \dots, K_i 和 S_1, S_2, \dots, S_i 分别为混色纤维中各单色纤维的吸收系数和散射系数; c_1, c_2, \dots, c_i 为混色纤维各单色纤维质量比,且 $c_1 + c_2 + \dots + c_i = 1$ 。

2 最小二乘法求解

最小二乘法^[12]是通过最小化误差的平方和寻找对应已有数据最佳匹配函数的数学优化方法,在已有数据充足的前提下,可求解超定方程组中多个未知数的最佳逼近解。本实验中,利用测色仪获取的混色纤维 K/S 值,运用最小二乘法求解公式(1)中涉及到的混合纤维中三种单色纤维的 K 和 S , 及混合纤维中单色纤维的质量分数。

将式(1)变形可得式(2)。

$$\left(\frac{K}{S}\right)(c_1 S_1 + c_2 S_2 + \dots + c_i S_i) - (c_1 K_1 + c_2 K_2 + \dots + c_i K_i) = 0 \quad (2)$$

假设共有 m 个混色样品,由最小二乘法原理,可将式(2)中的系数常量做以下定义。

$$a_{m,1} = c_1 \left(\frac{K}{S}\right); \quad a_{m,2} = c_2 \left(\frac{K}{S}\right); \quad \dots \quad a_{m,i} = c_i \left(\frac{K}{S}\right)$$

$$a_{m,i+1} = -c_1; \quad a_{m,i+2} = -c_2; \quad \dots \quad a_{m,2i} = -c_i$$

由此,式(2)可由式(3)表示。

$$Y = BX \quad (3)$$

$$\text{式中: } Y = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,2i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1} & \dots & a_{m,2i} \\ 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}; \quad X = \begin{bmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_i \\ K_1 \\ \vdots \\ K_i \end{bmatrix}。$$

通过最小二乘法进行矩阵运算,可得式(4)。

$$X = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (4)$$

式中: X 为各单色纤维的 K 值和 S 值; B^T 为 B 的转置矩阵。

根据 K-M 双常数理论的全光谱配色算法,利用最小二乘法计算混合纤维中各单色纤维的预测比例,计算方法如式(5)和式(6)。

$$A = \begin{bmatrix} K_{1,400} - \left(\frac{K}{S}\right)_{400}^S S_{1,400} & K_{2,400} - \left(\frac{K}{S}\right)_{400}^S S_{2,400} & \dots & K_{i,400} - \left(\frac{K}{S}\right)_{400}^S S_{i,400} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{1,700} - \left(\frac{K}{S}\right)_{700}^S S_{1,700} & K_{2,700} - \left(\frac{K}{S}\right)_{700}^S S_{2,700} & \dots & K_{i,700} - \left(\frac{K}{S}\right)_{700}^S S_{i,700} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C = (A^T A)^{-1} A^T D \quad (6)$$

$$\text{式中: } C = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_i \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; K_{1,400}, K_{2,400}, \dots, K_{i,400}$$

和 $S_{1,400}, S_{2,400}, \dots, S_{i,400}$ 分别为混色纤维中各单色纤维在 400 nm 处的吸收系数和散射系数; $\left(\frac{K}{S}\right)_{400}^s$ 为混色纤维在 400 nm 处的 $\frac{K}{S}$ 值; $K_{1,700}, K_{2,700}, \dots, K_{i,700}$ 和 $S_{1,700}, S_{2,700}, \dots, S_{i,700}$ 分别为混色纤维中各单色纤维在 700 nm 处的吸收系数和散射系数; $\left(\frac{K}{S}\right)_{700}^s$ 为混色纤维在 700 nm 处的 $\frac{K}{S}$ 值。

由于实验为三种单色纤维混配,故 $i=3$,混合纤维中各单色纤维的质量比例之和为 1,但是在实际预测比例时,求得的纤维的质量比例之和不为 1,故需对比例做归一化处理。

3 实验部分

3.1 主要原材料

原液着色涤纶纤维大红、宝兰 G、金黄:规格为 1.5 dtex×38 mm,分别记 1^T, 2^T, 3^T,滁州霞客无染彩色纺有限公司;

原液着色黏胶纤维大红、蓝色、黄色:规格为 1.5 dtex×38 mm,分别记 1^R, 2^R, 3^R,滁州霞客无染彩色纺有限公司。

3.2 主要仪器及设备

电子天平: XPR204S/AC,梅特勒托利多科技(中国)有限公司;

测色仪: Hunterlab ColorQuest XE,上海信联创作电子有限公司;

梳棉机: JWF1203,青岛宏大纺织机械有限责任公司。

3.3 试样制备

将三种涤纶纤维与三种黏胶纤维进行双组分三色混合,组合形式共有 6 种,且单色纤维比例设定最低 10%,最高 50%,每种组合设置 9 种混色比例(5:4:1, 5:3:2, 5:2:3, 5:1:4, 4:1:5, 4:2:4, 4:3:3, 4:4:2, 4:5:1),得到 54 个均匀混色纤维样品,每个样品质量 100 g。54 种混色纤维样品比例见表 1,具体 6 种单色及混色样品照片如图 1 所示。

3.4 测试与表征

使用测色仪,90 波长范围 400~700 nm,每 10 nm 采样,CIELAB 标尺,D65 光源,10°测量角,测量孔径 25.4 mm。每个纤维样品取 1.17~1.18 g 并测试 4 次,取平均值。

3.5 预测与实际样品的色差计算

有色纤维的预测颜色和实际颜色之间的色差是评价颜色模型准确性的一个重要指标。常用色差公式有 CIELAB^[13],CMC^[14],JPC₇₉^[15],CIDDE2000^[16]等,而纺织行业中常用 CMC 色差公式 $l:c=2:1$,其色差公式见式(7)。

表 1 54 种混色纤维样品混色比例

Tab. 1 Color mixing ratio of 54 kinds of mixed fiber samples

Sample	Color	Ratio	Sample	Color	Ratio	Sample	Color	Ratio
1	YR/BT/RT	5:1:4	19	BR/RT/YT	5:1:4	37	RR/YT/BT	5:1:4
2	YR/BT/RT	5:2:3	20	BR/RT/YT	5:2:3	38	RR/YT/BT	5:2:3
3	YR/BT/RT	5:3:2	21	BR/RT/YT	5:3:2	39	RR/YT/BT	5:3:2
4	YR/BT/RT	5:4:1	22	BR/RT/YT	5:4:1	40	RR/YT/BT	5:4:1
5	YR/BT/RT	4:1:5	23	BR/RT/YT	4:1:5	41	RR/YT/BT	4:1:5
6	YR/BT/RT	4:2:4	24	BR/RT/YT	4:2:4	42	RR/YT/BT	4:2:4
7	YR/BT/RT	4:3:3	25	BR/RT/YT	4:3:3	43	RR/YT/BT	4:3:3
8	YR/BT/RT	4:4:2	26	BR/RT/YT	4:4:2	44	RR/YT/BT	4:4:2
9	YR/BT/RT	4:5:1	27	BR/RT/YT	4:5:1	45	RR/YT/BT	4:5:1
10	YT/RR/BR	5:1:4	28	BT/RR/YR	5:1:4	46	RT/BR/YR	5:1:4
11	YT/RR/BR	5:2:3	29	BT/RR/YR	5:2:3	47	RT/BR/YR	5:2:3
12	YT/RR/BR	5:3:2	30	BT/RR/YR	5:3:2	48	RT/BR/YR	5:3:2
13	YT/RR/BR	5:4:1	31	BT/RR/YR	5:4:1	49	RT/BR/YR	5:4:1
14	YT/RR/BR	4:1:5	32	BT/RR/YR	4:1:5	50	RT/BR/YR	4:1:5
15	YT/RR/BR	4:2:4	33	BT/RR/YR	4:2:4	51	RT/BR/YR	4:2:4
16	YT/RR/BR	4:3:3	34	BT/RR/YR	4:3:3	52	RT/BR/YR	4:3:3
17	YT/RR/BR	4:4:2	35	BT/RR/YR	4:4:2	53	RT/BR/YR	4:4:2
18	YT/RR/BR	4:5:1	36	BT/RR/YR	4:5:1	54	RT/BR/YR	4:5:1

Note: YR is yellow viscose; YT is yellow polyester; BR is blue viscose; BT is blue polyester; RR is red viscose; RT is red polyester.

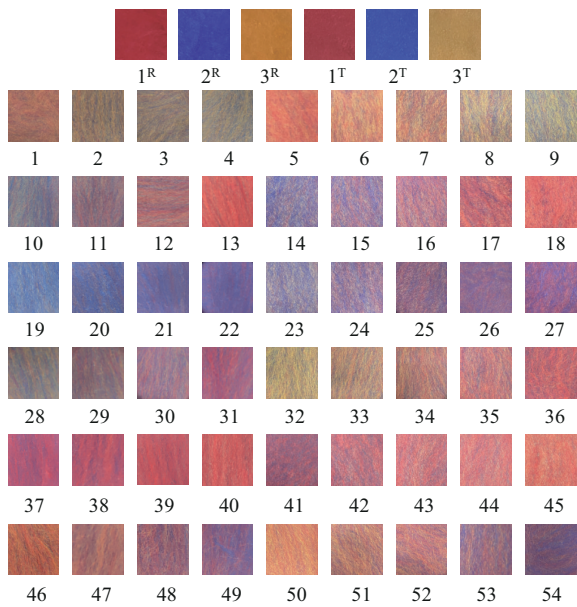


图1 6种单色样及54种混色样品

Fig. 1 6 kinds of monochrome and 54 kinds of mixed color samples

$$\Delta E_{\text{CMC}} = \left[\left(\frac{\Delta L}{lS_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{cS_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{S_H} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中: $\Delta L, \Delta C, \Delta H$ 分别为明度差、饱和度差、色相差; S_L, S_C, S_H 分别为 $\Delta L, \Delta C, \Delta H$ 的加权系数; l, c 分别为调整明度和饱和度相对宽容量的两个系数

且 $l=2, c=1$ 。

通过最小二乘法计算,可得到三种单色涤纶纤维和三种单色黏胶纤维在400~700 nm波长下的 K 值和 S 值,将其代入式(1),进而求出一定混色比例下混合纤维的预测 K/S 值,将其代入式(8)则可以计算出对应的预测反射率 R 值。再将混合纤维的预测色度值与实际色度值代入CMC色差公式,若色差结果越小,说明预测颜色与实际颜色越接近,预测效果越好,预测精度越高。

$$R = 1 + \frac{K}{S} - \left[\left(\frac{K}{S} \right)^2 + 2 \frac{K}{S} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

3.5 配方比例误差

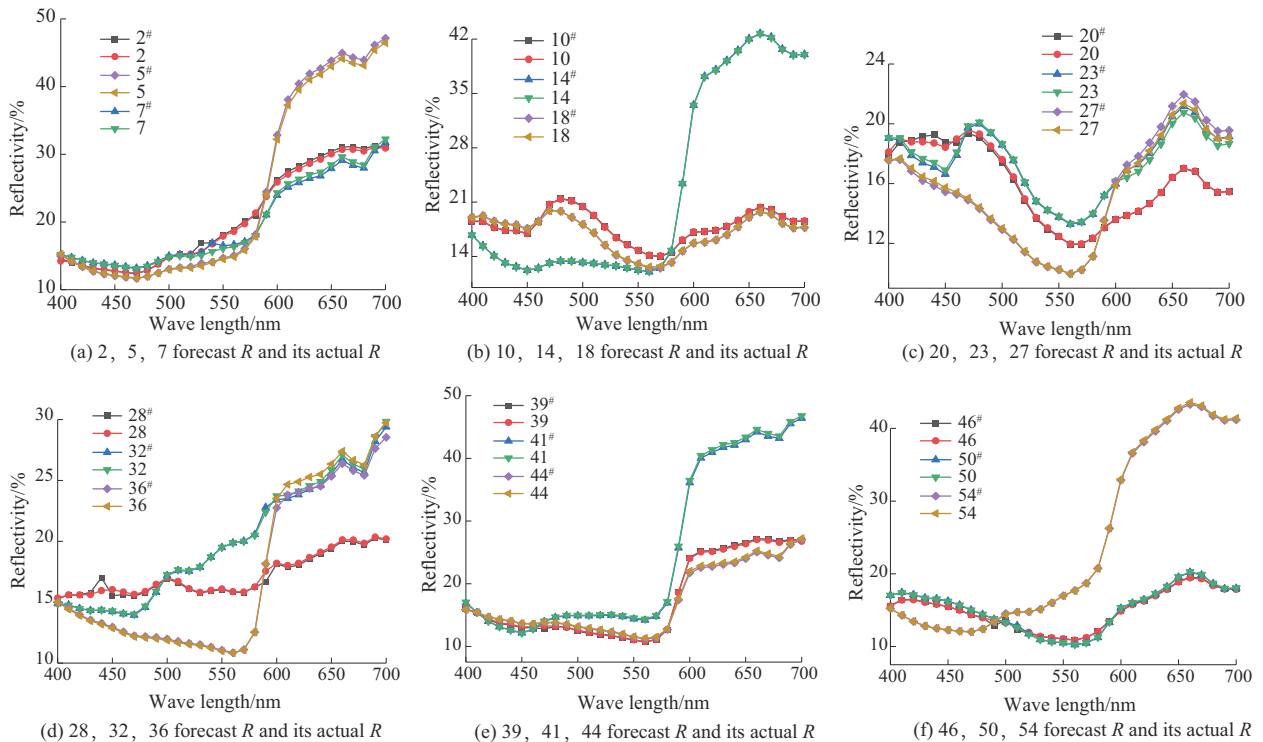
为了比较直观地评价预测的混色配方比例是否精确以及进一步评判配色模型的准确性,引入混色配方比例误差 Δr 作为评价指标,该值越小,说明预测的混色配方比例越精确,其计算见式(9)。

$$\Delta r = \sum_i |x_i - x'_i| \quad (9)$$

式中: Δr 为预测与实际混色配方比例之间误差; x_i 和 x'_i 分别为混色样本中第 i 个纤维的实际比例和预测比例。

4 结果与讨论

图2为6种混配纤维组合随机取样的预测反射

图2 6种混配纤维组合随机样的预测 R 与其实际 R Fig. 2 Prediction R and actual R of 6 mixed fibers combined random samples

率与其实际反射率对比图,图2a中2,5,7和2[#],5[#],7[#]分别表示为2,5,7号样品的实际和预测反射率 R ,图2中其余编号与图2a意义相同。由图2a可以看出2,5,7号样品的预测反射率与实际反射率在波长400~700 nm范围内基本重合,图2b~图2f中除个别样本在某些波长下有一定的偏差外,其他均表现出类似的特征,这说明从光谱反射率的角度来看,各样品的预测颜色与实际颜色非常接近。

已知最小二乘法中式(4)结果为混合样中单色样的 K 值、 S 值,结合K-M双常数理论的全光谱配色算法,可求出预测比例。6种组合混合样的预测比例、配方比例误差及色差结果见表2~表7。

表2为黄色黏胶(黄R)与蓝色涤纶(蓝T)、红色涤纶(红T)混合样预测结果。由表2可知,9种配比情况下的黄R与蓝T、红T混色的配方比例误差均值为1.733%,标准差为0.669,说明该组样品预测比例与实际比例差异较小,且离散程度较小;色差均值为0.485 2,标准差为0.215 2,与其他组相比色差及离散程度略大。

表2 黄R与蓝T、红T混合样预测结果

Tab. 2 Prediction results of yellow R mixed with blue T and red T

Sam- ple	Actual ratio			Forecast ratio			$\Delta r/\%$	ΔE_{CMC}
	YR	BT	RT	YR	BT	RT		
1	0.5	0.1	0.4	0.504 2	0.097 4	0.398 5	0.836	0.409 6
2	0.5	0.2	0.3	0.495 5	0.206 4	0.298 1	1.279	0.214 4
3	0.5	0.3	0.2	0.494 8	0.311 4	0.193 7	2.288	0.835 5
4	0.5	0.4	0.1	0.497 4	0.393 4	0.109 2	1.844	0.728 9
5	0.4	0.1	0.5	0.398 3	0.104 8	0.497 0	0.958	0.316 6
6	0.4	0.2	0.4	0.412 9	0.190 4	0.396 7	2.588	0.642 4
7	0.4	0.3	0.3	0.401 6	0.287 4	0.311 1	2.529	0.582 1
8	0.4	0.4	0.2	0.406 2	0.405 0	0.188 8	2.237	0.455 4
9	0.4	0.5	0.1	0.405 2	0.496 7	0.098 1	1.039	0.181 8
Mean value							1.733	0.485 2
SD							0.669	0.215 2

Note: SD is standard deviation

表3为黄T与蓝R、红R混合样预测结果。由表3可知,黄T与蓝R、红R混合样的比例误差均值为1.696%,标准差为1.202,说明该组样品预测比例与实际比例差异较小,且离散程度略小;色差均值为0.172 1,标准差为0.114 5,与其他组相比色差及离散程度较小。

表4为蓝R与红T、黄T混合样预测结果。由表4可知,蓝R与红T、黄T混合样的比例误差均值为1.666%,标准差为1.025,说明该组样品预测比例与实际比例差异较小,且离散程度略小;色差均值为

表3 黄T与蓝R、红R混合样预测结果

Tab. 3 Prediction results of mixed samples of yellow T and blue R and red R

Sam- ple	Actual ratio			Forecast ratio			$\Delta r/\%$	ΔE_{CMC}
	YT	RR	BR	YT	RR	BR		
10	0.5	0.1	0.4	0.500 0	0.100 9	0.399 1	0.175	0.046 0
11	0.5	0.2	0.3	0.504 8	0.188 5	0.306 7	2.301	0.122 9
12	0.5	0.3	0.2	0.492 2	0.299 2	0.208 6	1.711	0.394 8
13	0.5	0.4	0.1	0.504 5	0.410 3	0.085 2	2.957	0.246 8
14	0.4	0.1	0.5	0.396 6	0.090 3	0.513 1	2.621	0.025 2
15	0.4	0.2	0.4	0.400 4	0.198 6	0.401 1	0.289	0.162 9
16	0.4	0.3	0.3	0.405 0	0.296 8	0.298 2	1.001	0.097 0
17	0.4	0.4	0.2	0.402 5	0.397 6	0.199 9	0.509	0.152 1
18	0.4	0.5	0.1	0.395 1	0.518 5	0.086 5	3.696	0.301 6
Mean value							1.696	0.172 1
SD							1.202	0.114 5

表4 蓝R与红T、黄T混合样预测结果

Tab. 4 Prediction results of blue R mixed with red T and yellow T

Sam- ple	Actual ratio			Forecast ratio			$\Delta r/\%$	ΔE_{CMC}
	BR	RT	YT	BR	RT	YT		
19	0.5	0.1	0.4	0.496 5	0.105 4	0.398 1	1.085	0.299 2
20	0.5	0.2	0.3	0.503 0	0.194 4	0.302 6	1.120	0.336 6
21	0.5	0.3	0.2	0.502 2	0.300 9	0.196 8	0.635	0.391 2
22	0.5	0.4	0.1	0.497 0	0.399 8	0.103 2	0.643	0.250 6
23	0.4	0.1	0.5	0.398 3	0.095 1	0.506 6	1.325	0.300 4
24	0.4	0.2	0.4	0.400 9	0.207 8	0.391 3	1.736	0.200 3
25	0.4	0.3	0.3	0.401 6	0.285 6	0.312 8	2.876	0.220 2
26	0.4	0.4	0.2	0.401 8	0.417 9	0.180 4	3.929	0.236 7
27	0.4	0.5	0.1	0.397 8	0.494 0	0.108 2	1.645	0.056 3
Mean value							1.666	0.254 6
SD							1.025	0.090 2

0.254 6,标准差为0.090 2,与其他组相比色差略大,离散程度略小。

表5为蓝色涤纶(蓝T)与红色黏胶(红R)、黄色黏胶(黄R)混合样预测结果。由表5可知,蓝T与红R、黄R混合样的比例误差均值为1.650%,标准差为0.703,说明该组样品预测比例与实际比例差异较小,且离散程度较小;色差均值为0.386 8,标准差为

表5 蓝T与红R、黄R混合样预测结果

Tab. 5 Prediction results of blue T mixed with red R and yellow R

Sam- ple	Actual ratio			Forecast ratio			$\Delta r/\%$	ΔE_{CMC}
	BT	RR	YR	BT	RR	YR		
28	0.5	0.1	0.4	0.502 3	0.095 0	0.402 8	1.003	0.316 0
29	0.5	0.2	0.3	0.498 9	0.208 7	0.292 4	1.741	0.993 4
30	0.5	0.3	0.2	0.493 4	0.302 7	0.203 9	1.321	0.186 6
31	0.5	0.4	0.1	0.506 7	0.393 4	0.099 9	1.343	0.101 0
32	0.4	0.1	0.5	0.404 6	0.094 0	0.501 5	1.206	0.067 2
33	0.4	0.2	0.4	0.402 1	0.194 8	0.403 1	1.042	0.180 9
34	0.4	0.3	0.3	0.390 9	0.316 7	0.292 4	3.335	0.096 8
35	0.4	0.4	0.2	0.394 8	0.393 7	0.211 5	2.290	0.839 9
36	0.4	0.5	0.1	0.407 6	0.500 3	0.092 1	1.571	0.699 3
Mean value							1.650	0.386 8
SD							0.703	0.337 7

0.337 7,与其他组相比色差及离散程度略大。

表6为红色黏胶(红R)与黄色涤纶(黄T)、蓝色涤纶(蓝T)混合样预测结果。由表6可知,红R与黄T、蓝T混合样的比例误差均值为2.461%,标准差为1.024,说明该组样品预测比例与实际比例与其他组相比差异略小,且离散程度略小;色差均值为0.189 4,标准差为0.067 3,与其他组相比色差及离散程度略小。

表6 红R与黄T、蓝T混合样预测结果

Sample	Actual ratio			Forecast ratio			$\Delta r/\%$	ΔE_{CMC}
	RR	YT	BT	RR	YT	BT		
37	0.5	0.1	0.4	0.503 7	0.096 0	0.400 3	0.808	0.254 5
38	0.5	0.2	0.3	0.510 0	0.204 8	0.285 2	2.965	0.140 0
39	0.5	0.3	0.2	0.491 0	0.306 7	0.202 3	1.795	0.174 6
40	0.5	0.4	0.1	0.495 1	0.396 0	0.109 0	1.795	0.076 2
41	0.4	0.1	0.5	0.395 6	0.096 7	0.507 7	1.541	0.172 1
42	0.4	0.2	0.4	0.409 3	0.209 5	0.381 1	3.770	0.2859
43	0.4	0.3	0.3	0.385 5	0.294 4	0.320 1	4.015	0.170 9
44	0.4	0.4	0.2	0.395 3	0.393 4	0.211 3	2.26	0.145 1
45	0.4	0.5	0.1	0.414 4	0.501 6	0.084 0	3.199	0.284 9
Mean value							2.461	0.189 4
SD							1.024	0.067 3

表7为红色涤纶(红T)与黄色黏胶(黄R)、蓝色黏胶(蓝R)混合样预测结果。由表7可知,红T与黄R、蓝R混合样的比例误差均值为1.109%,标准差为0.673,说明该组样品预测比例与实际比例差异较小,且离散程度较小;色差均值为0.177 2,标准差为0.117 1,与其他组相比色差及离散程度略小。

表7 红T与黄R、蓝R混合样预测结果

Sample	Actual ratio			Forecast ratio			$\Delta r/\%$	ΔE_{CMC}
	RT	BR	YR	RT	BR	YR		
46	0.5	0.1	0.4	0.503 7	0.098 4	0.397 9	0.741	0.253 7
47	0.5	0.2	0.3	0.488 9	0.208 0	0.303 0	2.213	0.099 1
48	0.5	0.3	0.2	0.496 7	0.300 2	0.203 2	0.666	0.257 2
49	0.5	0.4	0.1	0.511 7	0.389 6	0.098 6	2.348	0.025 8
50	0.4	0.1	0.5	0.402 1	0.101 7	0.496 2	0.762	0.081 6
51	0.4	0.2	0.4	0.401 4	0.194 0	0.404 5	1.198	0.074 5
52	0.4	0.3	0.3	0.401 7	0.302 2	0.2961	0.788	0.3940
53	0.4	0.4	0.2	0.3949	0.403 8	0.2013	1.024	0.287 7
54	0.4	0.5	0.1	0.399 5	0.501 2	0.099 3	0.239	0.121 2
Mean value							1.109	0.177 2
SD							0.673	0.117 1

由表2到表7可以看出,54个混合样品的色差都在1.0以下,色差最大为29号,为0.993 4,色差最小为14号,为0.025 2,按照纺织行业的色差标准,色差在1.1以下属于可接受范围内。54个混合样品的比例误差都在5%以下,比例误差最大是43号,为4.015%,比例误差最小是10号,为0.175%。6种组

合混合样中平均比例误差最小的是红T与蓝R、黄R组合,为1.109%,其离散程度相对最小;6种组合混合样品中平均比例误差最大的是红R与蓝T、黄T组合,为2.461%,其离散程度相对较大,其他四组混合样品平均比例误差都在1.6%~1.8%之间,差异较小。6种组合混合样中平均色差最小的是黄T与红R、蓝R组合,为0.172 1,平均色差最大的是黄R与红T、蓝T混合样,为0.485 2;而其离散程度相对较大的是蓝T与红R、黄R组合,为0.337 7,离散程度相对较小的是红R与黄T、蓝T组合,为0.067 3。

通过计算上述样品整体的色差均值为0.277 5,标准差为0.217 7,比例误差与色差均较小,说明K-M双常数模型适用于预测原液着色涤/黏双组分纤维混配色比例,且精确度较高。

为了更直观地看出预测样与实际样的色差,通过实际测得的反射率 R 与预测的反射率 R 模拟作出预测颜色与实际颜色对比色卡,见图3。

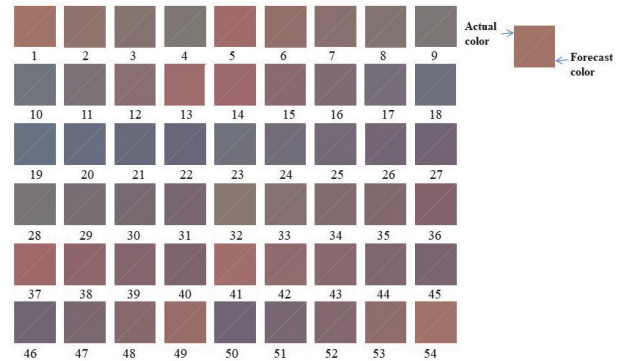


图3 预测颜色与实际颜色对比色卡

Fig. 3 Predicted color compared to the actual color card

由图3可以看出,每个样品右下角的预测颜色与左上角的实际颜色非常接近几乎没有差别,这与前面预测比例与实际比例相差较小以及色差较小的计算结果相一致。该结果进一步验证了K-M双常数模型对于原液着色涤/黏双组分纤维混配色比例预测的可行性。

5 结论

为了更好地辅助和预测原液着色涤/黏双组分纤维混配色,基于K-M双常数模型对6种原液着色涤/黏双组分组合样品进行配色模型实验研究,利用最小二乘法原理对单色纤维的吸收系数 K 值和散射系数 S 值进行数据处理,结果如下。

(1)运用K-M双常数模型预测原液着色涤/黏双组分三色混色纤维比例具有可行性,且预测精度较好。

(2)原液着色涤/黏双组分54个混合纤维样品预测颜色与实际颜色的色差均在1.0以下,色差最大为蓝T与红R、黄R混合样且混合比例为5:2:3,为0.993 4,色差最小为黄T与蓝R、红R混合样且混合比例为4:1:5,为0.025 2,色差均值为0.277 5,标准差为0.217 7,说明预测比例与实际比例差距较小。

(3)原液着色涤/黏双组分54个混合纤维样品预测比例与实际比例的误差均在5%以下,比例误差最大是红R与黄T、蓝T混合样且混合比例为4:3:3,为4.015%,比例误差最小是黄T与蓝R、红R混合样且混合比例为5:1:4,为0.175%,比例误差均值为1.719%,标准差为0.989。

参考文献

- [1] 刘宇,胡海蓉.原液着色涤纶的发展与挑战[J].合成纤维,2023,52(10):5-8.
LIU Yu, HU Hairong. The development and challenge of dope coloring polyester fiber[J]. Synthetic Fiber in China, 2023, 52(10): 5-8.
- [2] ALCARAZ O R, IPARRAGIRRE I, ORTIZ D, et al. The extended Kubelka-Munk theory and its application to spectroscopy[J]. Chem-Texts, 2020, 6:1-14.
- [3] FRIELE L F C. The application of colour measurement in relation to fibre-blending[J]. Journal of the Textile Institute Proceedings, 1952, 43(8):604-611.
- [4] STEARNS E I, Noechel F. Spectrophotometric prediction of color of wool blends[J]. American Dyestuff Reporter, 1944, 33(9): 177-180.
- [5] 许雪梅.基于智能优化算法的织物智能配色系统研究[D].杭州:浙江理工大学,2021.
XU Xuemei. Research on fabric intelligent color matching system based on intelligent optimization algorithm[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2021.
- [6] 李娟娟.基于数控混色纺纱的HSV色立体构建及其彩色纱颜色预测[D].无锡:江南大学,2023.
LI Juanjuan. HSV color stereo construction and color yarn color prediction based on numerical control color blending spinning[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.
- [7] 张婷婷,薛元,贺玉东,等.环锭数码纱Kubelka-Munk双常数配色模型构建及其色彩预测[J].纺织学报,2020,41(1):50-55.
ZHANG Tingting, XUE Yuan, HE Yudong, et al. Construction of Kubelka-Munk double-constant color matching model for ring digital yarn color prediction[J]. Journal of Textile Research, 2020, 41(1):50-55.
- [8] 汪燕燕,薛元,陈宥融,等.面向全色域转杯纺纱的Kubelka-Munk双常数理论模型构建及颜色预测[J].现代纺织技术,2024(3):1-12.
WANG Yanyan, XUE Yuan, CHEN Yourong, et al. Construction of Kubelka-Munk double constant theoretical model and color prediction for pangamut spinning[J]. Advanced Textile Technology, 2024 (3):1-12.
- [9] 杨瑞华,王卓.基于Friele模型的转杯纺黏胶混色针织物测配色系统[J].服装学报,2023,8(1):31-36,49.
YANG Ruihua, WANG Zhuo. Color matching model of viscose color blended fabric based on Friele model[J]. Journal of Clothing Research, 2023, 8(1):31-36, 49.
- [10] 程璐,马崇启,周惠敏,等.基于视觉特性的色纺纱全光谱配色算法优化[J].纺织学报,2022,43(10):38-44.
CHENG Lu, MA Chongqi, ZHOU Huimin, et al. Optimization of full spectrum color matching algorithm for color spun yarn based on visual characteristics[J]. 2022, 43(10):38-44.
- [11] ZHANG G, ZHOU J, PAN R, et al. Color prediction for pre-colored cotton fiber blends based on improved Kubelka-Munk double-constant theory[J]. Fibers and Polymers, 2021, 22: 412-420.
- [12] IBRAHIM S. Discrete least square method for solving differential equations[J]. Advances and Applications in Discrete Mathematics, 2022, 30:87-102.
- [13] DURMUS D. Cielab color space boundaries under theoretical spectra and 99 test color samples[J]. Color Research & Application, 2020, 45(5):796-802.
- [14] CHAOUCH S, MOUSSA A, LADHARI N. Color formulation of cotton fabrics using multi-objective ant colony optimization[J]. Journal of Natural Fibers, 2022, 19(17):15 459-15 474.
- [15] LEE C H, WANG Y, TANG Y L, et al. Dyeing wool knitted fabric in nano-scale reverse micelle with reactive dyes—a computer colour matching study[J]. Fibers and Polymers, 2021, 22:1 320-1 332.
- [16] DURAND L B, RUIZ-LÓPEZ J, PEREZ B G, et al. Color, lightness, chroma, hue, and translucency adjustment potential of resin composites using CIEDE2000 color difference formula[J]. Journal of Esthetic and Restorative Dentistry, 2021, 33(6):836-843.