

DOI: 10.13475/j.fzxb.20180905208

# 基于光谱泛相似测度的色纺纱线与织物间呈色规律

袁理<sup>1,2</sup>, 王丹书<sup>1</sup>, 谷迁<sup>1</sup>, 屠劭杰<sup>1</sup>, 熊莹<sup>1</sup>,  
袁浩然<sup>1</sup>, 刘军平<sup>3</sup>, 鄢煜尘<sup>4</sup>

(1. 武汉纺织大学 电子与电气工程学院, 湖北 武汉 430200; 2. 武汉纺织大学 湖北省纺织新材料与  
先进加工技术省部共建国家重点实验室培育基地, 湖北 武汉 430200; 3. 武汉纺织大学  
数学与计算机学院, 湖北 武汉 430200; 4. 武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要** 针对色纺织物呈色机制的复杂性与特殊性,建立了基于离散 Fréchet 距离与皮尔森相关系数的光谱泛相似测度模型;结合特征间的类内距离与类间距离,构建了光谱反射率曲线特征差异性判别准则,并应用于色纺纱线与其织物间的颜色传递与影响因素分析。结果表明:相较于传统色差分析模型,建立的光谱泛相似测度模型与差异性判别准则具有稳定且有效的颜色表征与判别能力;同时,染色纤维的混配比、性状特性、种类以及捻系数差异均会对其纱线和织物的呈色产生显著影响;当染色纤维混配比差异小于 2.0% 以及纱线捻系数差异小于 10 时,纱线与织物间存在颜色变化,但相对于纤维性状与种类差异而言,织造过程引入的影响有限,属于弱干扰因素。

**关键词** 色纺纱线; 色纺织物; 光谱泛相似测度模型; 相似性准则

中图分类号: TS 101.9 文献标志码: A

## Coloration rules between colored spun yarns and its fabrics based on spectral pan-similarity measure

YUAN Li<sup>1,2</sup>, WANG Danshu<sup>1</sup>, GU Qian<sup>1</sup>, TU Shaojie<sup>1</sup>, XIONG Ying<sup>1</sup>,  
YUAN Haoran<sup>1</sup>, LIU Junping<sup>3</sup>, YAN Yuchen<sup>4</sup>

(1. School of Electronic and Electrical Engineering, Wuhan Textile University, Wuhan, Hubei 430200, China; 2. State Key Laboratory for Hubei New Textile Materials and Advanced Processing Technology, Wuhan Textile University, Wuhan, Hubei 430200, China; 3. School of Mathematics and Computer, Wuhan Textile University, Wuhan, Hubei 430200, China; 4. Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

**Abstract** Aiming at the diversity and complexity of colored spun fabric, a spectral similarity measure model based on the discrete Fréchet distance and the Pearson correlation coefficient was established. Meanwhile, the discriminant criterion of spectral reflectance curve characteristics in view of intra class distance and inter class distance were established, and applied in analysis on the color transfer and influence factors between colored yarn and its fabric. The results show that compared with the conventional color difference analysis model, the spectral similarity measure model and the difference criterion are stable and effective in color characterization and discriminant capability. The difference of mixing ratio, property, type and twisting coefficients of dyed fiber cause significant difference in color of colored spun yarns and fabrics. When the difference of the mixing ratio of dyed fibers is lower than 2% and the difference of yarn twist coefficient is lower than 10, the color change happens between yarn and fabric, but the influence of the weaving process is limited and is a weak interference factor relative to the difference of fiber property and types.

**Keywords** colored spun yarns; colored spun fabric; spectral similarity measure model similarity criterion

收稿日期: 2018-09-21 修回日期: 2018-11-04

获奖说明: 本文荣获中国纺织工程学会颁发的第 19 届陈维稷优秀论文奖

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2014CFB754); 湖北省教育厅科学技术研究计划青年人才项目(Q20141607); 中国纺织工业联合会科技项目(2014072)

第一作者: 袁理(1982—)男,副教授,博士。主要研究方向为图像处理与模式识别。E-mail: yuanli@wtu.edu.cn

色织物是由 2 种或 2 种以上不同色泽的纤维经特定工序混和加工纺制而成的织物,具有宏观色彩丰富、立体感强等特殊外观风格,是纺织行业中独具特色的色纺产业<sup>[1]</sup>。与传统的织物染色不同,采用纤维染色的色纺加工方法,其产品颜色会在纺纱与织造过程中产生变化。因此,在实际生产中,需要根据客户来样,依靠经验和反复试纺、目测来达到目标色。该过程不仅效率低下,而且易引入主观性评判误差,从而影响质量控制与商业交割<sup>[2]</sup>。

近年来,得益于分光光度仪与数码测色仪的普及和性能提升,国内外众多研究机构与团队对染色纤维在成纱和织造过程的呈色特性与影响因素展开研究:刘东升等<sup>[3]</sup>以常见的黑、白色纤维为研究对象,分析了不同混和加工方式对其织物呈色风格的影响,结果发现不同的混配方式和工序会对其色纺织物的风格产生显著影响;文献[4-5]分别针对捻系数与着色涤纶纱和有色粘胶纱的呈色变化规律进行分析,结果发现着色涤纶长丝纱线与有色粘胶纱线的明度、饱和度与成纱捻系数呈负指数规律,而色相呈线性规律增加,并明确指出捻系数的改变会对色纺纱的呈色特性产生影响;任静等<sup>[6]</sup>建立了一种结合快速傅里叶变换(FFT)和 Gabor 滤波器的织物纹理特征提取模型,并以该模型为基础重点分析了织物纹理特征对其主观颜色的影响特性,随着特征纹理能量系数的减小,织物的主观颜色表现愈强,同时,对于同一色相的织物来说,织物的密度、组织结构等表面纹理变化对主观色相属性的影响非常有限;陈子晗等<sup>[7]</sup>通过对纱线的组织结构、经纬密度以及色彩等关键参数进行调整,以探求影响织物呈色的关键因素,织物的色彩并不是单纯彩色细线交织成密集状并置组合,其混色效果受织物纱线色彩、组织结构、织造工艺等因素的共同影响。

值得注意的是,上述研究仅针对染色纤维在成纱或织造过程中,单一环节的呈色特性与影响因素进行了分析建模,而缺少对其生产全流程颜色传递模型以及影响因素的综合分析。因此,李昌垒等<sup>[8]</sup>以染色粘胶纤维为研究对象,重点分析了纤维、纱线以及织物间的颜色传递关系及规律。结果表明,有色粘胶纤维的光谱反射率值与其纱线、织物的反射率曲线具有相同的变化趋势,且随着染料浓度的增大而逐渐重合。

不同于显示器色光混色或印刷色料混色,色纺产品是以染色纤维作为基本呈色单元,其呈色具有显著的多样性与复杂性<sup>[9]</sup>。因此,能够影响色纺织物呈色特性的可能因素很多,既包括染色纤维的质量配比,也包括染色纤维的种类或性状特性,同时也

包括成纱或织造工艺等。对染色纤维在成纱和织造过程中的呈色特性与影响因素展开系统分析是建立全色域颜色预测模型的基础,也是当前染色纤维混配呈色研究领域亟待解决的关键科学问题。

本文以染色纤维在成纱和织造过程中的呈色特性为研究内容,重点分析其光谱反射率曲线特征的主要影响因素及一般传递规律。建立结合光谱矢量大小和光谱曲线形状的泛光谱相似测度(SPM),并用于色纺纱线与织物间颜色特性的表达与量化分析;同时,结合特征间的“类内距离”与“类间距离”,首次构建了光谱反射率曲线特征差异性判别准则。本文的研究对于探索色纺纱线与织物间的颜色传递与分析建模具有重要的理论价值,同时也能够为染色纤维混配色预测模型以及色纺企业的实践生产提供保障。

## 1 泛光谱相似测度

光谱反射率曲线能够较为全面地表征织物的呈色特性,被广泛应用于纺织品色彩测量与分析中。对于具有复杂颜色模式的色纺纱线或织物而言,其呈色特性和内在规律很难直接通过光谱反射率曲线进行显性表达。色纺织物典型光谱反射率曲线图,如图 1 所示。其中:图 1(a)所示的光谱反射率曲线具有相似的形状特征,但曲线间的距离较大;图 1(b)所示的光谱反射率曲线间距离较为接近,但曲线形状存在显著差异。为准确、全面地表征色纺纱线与织物间的呈色特性与内在规律,本文提出建立泛光谱相似测度(SPM)准则,综合考虑光谱矢量大小与光谱曲线形状 2 种光谱特征。

### 1.1 光谱矢量大小相似度准则

光谱矢量大小是指光谱曲线特征间的几何距离。本文采用 Fréchet 距离作为色纺纱线和织物的光谱曲线距离测度准则<sup>[10-11]</sup>,具体定义如下:

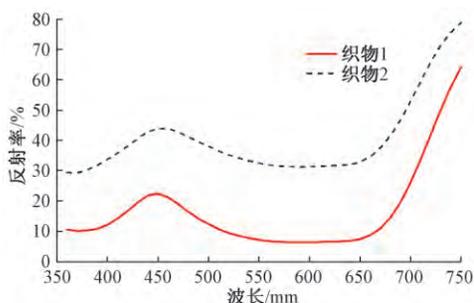
设  $A = \langle a_1, a_2, \dots, a_m \rangle$ ,  $B = \langle b_1, b_2, \dots, b_n \rangle$  组成的 2 条曲线,它们至高点间和至低点间的离散 Fréchet 距离分别为  $d_F^1(A, B)$  和  $d_F^2(A, B)$ ,则将  $|d_F^1(A, B) - d_F^2(A, B)|$  作为 2 条曲线间的离散 Fréchet 距离  $F_D$ ,其中

$$d_F(A, B) = \min_W d_F^W(A, B) \quad (1)$$

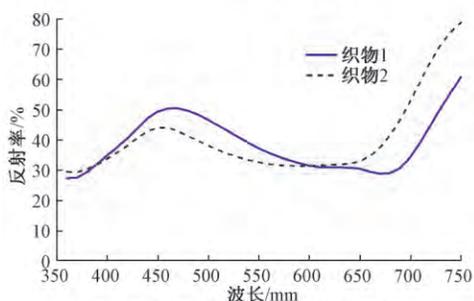
$$d_F^W(A, B) = \max_i \max_{(a, b) \in A_i \times B_i} \text{dist}(a, b) \quad (2)$$

因此,光谱反射率曲线矢量大小相似度准则可表示为

$$S_{\text{SBD}}(A, B) = \sqrt{\frac{1}{N} F_D} = \sqrt{\frac{1}{N} |d_F^1(A, B) - d_F^2(A, B)|^2} \quad (3)$$



(a) 具有相似形状特征的光谱反射率曲线



(b) 具有相近距离特征的光谱反射率曲线

图 1 色纺织物典型光谱反射率曲线图

Fig.1 Typical spectral reflectance curves of colored spun fabrics. ( a) Spectral reflectance curves with similar shape characteristics; ( b) Spectral reflectance curves with similar distance characteristics

式中:  $N$  表示光谱曲线的波段数, 系数  $1/N$  去除了光谱矢量大小对光谱维度的相关性, 因此:  $S_{SBD}$  表示 2 个光谱矢量间的平均距离; 光谱曲线  $A$  和  $B$  的  $S_{SBD}$  值越小表示其光谱矢量大小越相似, 取值范围为  $0 \sim 1$ 。

### 1.2 光谱曲线形状相似度准则

光谱曲线  $A$  和  $B$  的形状差异 (spectral shape distance, SSD) 可采用光谱矢量间的皮尔森相关系数进行表征, 具体定义如下:

$$S_{SSD}(A, B) = \left( \frac{1 - S_{SCM}(A, B)}{2} \right)^2 \quad (4)$$

其中  $S_{SCM}$  为光谱矢量间的皮尔森相关系数<sup>[12-13]</sup>, 取值范围为  $-1 \sim 1$ 。由式 (4) 可知, 光谱曲线  $A$  和  $B$  的  $S_{SSD}$  值越小表示其光谱曲线形状越相似, 取值范围为  $0 \sim 1$ 。

### 1.3 SPM 及其数学特征

基于以上分析, 光谱曲线  $A$  和  $B$  的 SPM 的数学模型可表示为

$$S_{SPM}(A, B) = \sin(\sqrt{S_{SBD}^2(A, B) + S_{SSD}^2(A, B)}) \quad (5)$$

光谱曲线间的  $S_{SPM}$  值越小, 表明这 2 条光谱曲线越相似。同时,  $S_{SPM}$  准则还满足以下性质: 非负性, 即  $S_{SPM}(A, B) \geq 0$ ; 自反性, 即  $S_{SPM}(A, B) = 0$ , 当且仅

当  $A=B$  时; 对称性, 即  $S_{SPM}(A, B) = S_{SPM}(B, A)$ 。

## 2 实验设计

### 2.1 实验样本的制备

为定量分析不同影响因素的显著性以及颜色在纱线与织物间的传递特性和规律, 委托企业制备了 26 份色纺纱线和织物样品, 配比参数如表 1 所示。无特殊说明情况下, 每份样品由 3 种染色纤维构成, 染色纤维长度为 38 mm, 线密度为 0.15 tex; 捻系数为 350, 但不同样品间的染色纤维配比质量、纤维种类、长短、捻系数等参数存在细微差别。

表 1 实验样本配比参数表

Tab.1 Parameters of experiment samples

样品编号	组分中各色纤维质量分数	说明
17001#	白色 95.05%; 大红 3.93%; 金黄 1.02%	无
17002#	白色 94.60%; 大红 3.90%; 金黄 1.48%	无
17004#	白色 93.60%; 大红 3.90%; 金黄 2.50%	无
17005#	白色 93.10%; 大红 3.90%; 金黄 3.00%	无
17006#	白色 94.96%; 大红 3.06%; 金黄 1.98%	无
17009#	白色 93.38%; 大红 4.60%; 金黄 2.02%	无
17010#	白色 92.90%; 大红 5.10%; 金黄 2.00%	无
17011#	白色 93.90%; 大红 4.60%; 金黄 1.50%	无
17012#	白色 94.00%; 大红 3.53%; 金黄 2.47%	大红: 38 mm
17015#	白色 94.00%; 大红 3.53%; 金黄 2.47%	大红 51 mm
17016#	白色 94.10%; 大红 3.90%; 金黄 2.00%	细绒棉
17017#	白色 94.10%; 大红 3.90%; 金黄 2.00%	长绒棉
17019#	白色 90.00%; 黑色 4.00%; 蓝色 6.00%	无
17020#	白色 88.00%; 黑色 4.00%; 蓝色 8.00%	黑色: 38 mm
17021#	白色 90.00%; 黑色 2.00%; 蓝色 8.00%	无
17022#	白色 89.00%; 黑色 3.00%; 蓝色 8.00%	无
17023#	白色 88.10%; 黑色 4.00%; 蓝色 7.90%	无
17024#	白色 91.00%; 黑色 3.00%; 蓝色 6.00%	黑色: 38 mm
17025#	白色 92.00%; 黑色 2.00%; 蓝色 6.00%	黑色: 38 mm
17026#	白色 88.00%; 黑色 4.00%; 蓝色 8.00%	黑色: 51 mm
17027#	白色 91.00%; 黑色 3.00%; 蓝色 6.00%	黑色: 51 mm
17028#	白色 92.00%; 黑色 2.00%; 蓝色 6.00%	黑色: 51 mm
17029#	白色 94.30%; 大红 3.80%; 金黄 1.90%	捻系数 60
17030#	白色 94.00%; 大红 4.00%; 金黄 2.00%	捻系数 65
17031#	白色 94.00%; 大红 4.00%; 金黄 2.00%	捻系数 75
17032#	白色 94.30%; 大红 3.80%; 金黄 1.90%	捻系数 80

### 2.2 色度学指标的测量

本文采用 X-rite COLOR17 型分光光度计对样本的光谱反射率值进行测量, 仪器参数设定如文献 [1] 所述。色纺纱线采用机缠法制样, 得到纱线试样尺寸为 5.0 cm×15.0 cm, 纱线缠绕厚度为 (1.5±0.2) mm, 在相对湿度为 65% 状态下平衡后进行测色; 同时, 将色纺织物叠成 4 层, 在相对湿度为 65% 状态下平衡后进行测色。

### 2.3 光谱曲线特征差异性判别准则

在纺织品色差分析过程中, 通常采用确定的阈

值作为判别准则<sup>[14-15]</sup>,但色纺纱线或织物的呈色具有典型的随机性和不均匀性,很难用单一确定阈值对其差异性进行判别分析;因此,本文结合特征间的类内距离与类间距离,首次构建了光谱反射率曲线特征差异性判别准则(SFD),能够针对不同参数的测试样本参数进行自适应调整,具体定义如下:

$$S_{SFD} = \begin{cases} 1, & S_{SPM}(A, B) > 1.5 \times (S_{SPM}(A), S_{SPM}(B)) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $S_{SPM}(A, B)$  表示样本 A 和 B 之间的  $S_{SPM}$  特征距离,即样本间的类间距离;  $S_{SPM}(A)$  表示样本 A 在不同测量点获取的  $S_{SPM}$  特征值,即样本的类内距离;同理,  $S_{SPM}(B)$  表示样本 B 在不同测量点获取的 SPM 特征值。当  $S_{SFD} = 1$  时,表明光谱曲线特征具有显著差异性;当  $S_{SFD} = 0$  时,表示差异不明显。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 纤维比对呈色的影响及规律

色纺纱线或织物是以染色纤维的聚集态为基本呈色单元,因此,不同染色纤维的混配比会导致其色度学指标的改变。对 15 份具有不同混配比参数的色纺纱线及其织物分别进行光谱反射率数值的测量以及 SPM 特征的提取,结果如表 2 所示。其中,  $B_{D(Y)}$  与  $W_{D(Y)}$  分别表示色纺纱线样本间的类间  $S_{SPM}$  特征与类内  $S_{SPM}$  特征;同理,  $B_{D(F)}$  与  $W_{D(F)}$  分别表示色纺织物样本间的类间  $S_{SPM}$  特征与类内  $S_{SPM}$  特征;全部结果进行等比缩放后,按照科学计数法进行表示。

结果表明,对于不同染色纤维混配而成的纱线和织物,当纤维混配比差异接近或达到 1.0% 时,色纺纱线和织物的  $S_{SPM}$  特征均具有稳定且显著的差异性;而 17020# 与 17023# 样本,由于其染色纤维混配比差异仅为 0.2%,所以,无论是色纺纱线还是织物,均无法通过  $S_{SPM}$  特征对样本进行区分,其  $S_{SFD} = 0$ 。

统计分析表明,色纺纱线及其织物间的  $S_{SPM}$  特征值与染色纤维混配比差异总体呈现正向线性相关性,即随着染色纤维混配比差异性增强,样本间的  $S_{SPM}$  特征值也随之增大,即样本的整体相似度下降。不仅如此,色纺纱线与其织物间的  $S_{SPM}$  特征值也与染色纤维的混配比存在关联。当染色纤维混配比差异小于 2.0%,织造加工过程会降低纱线间原有的颜色差异性,即色纺纱线的  $S_{SPM}$  特征值至少会有 1 个数量级的下降;而当染色纤维混配比差异高于 2.0% 时,织造加工处理过程并不会显著改

表 2 纤维质量比对纱线、织物间的 SPM 特征影响

Tab.2 Effect of fiber quality ratio on SPM characteristics between yarns and fabrics

样品编号	$B_{D(Y)}$	$W_{D(Y)}$	$B_{D(F)}$	$W_{D(F)}$	质量差 /%
17001#		$2.04 \times 10^6$		$2.01 \times 10^6$	
17002#	$4.53 \times 10^5$	$4.94 \times 10^8$	$5.6 \times 10^6$	$7.18 \times 10^8$	0.94
17009#		$1.6 \times 10^7$		$1.60 \times 10^7$	
17011#	$1.38 \times 10^4$	$3.49 \times 10^8$	$4.73 \times 10^6$	$3.41 \times 10^8$	1.04
17005#		$1.65 \times 10^6$		$5.25 \times 10^8$	
17012#	$1.34 \times 10^4$	$1.49 \times 10^7$	$1.32 \times 10^5$	$3.19 \times 10^8$	1.80
17004#		$3.72 \times 10^7$		$2.50 \times 10^8$	
17011#	$2.40 \times 10^4$	$3.49 \times 10^8$	$3.38 \times 10^4$	$3.41 \times 10^8$	2.0
17002#		$4.94 \times 10^8$		$7.18 \times 10^8$	
17005#	$5.90 \times 10^4$	$1.65 \times 10^6$	$5.60 \times 10^4$	$5.25 \times 10^8$	3.02
17006#		$2.42 \times 10^6$		$1.42 \times 10^8$	
17010#	$2.29 \times 10^2$	$1.29 \times 10^7$	$1.16 \times 10^2$	$5.85 \times 10^9$	4.12
17020#		$1.59 \times 10^5$		$8.85 \times 10^5$	
17023#	$8.82 \times 10^6$	$3.96 \times 10^6$	$4.55 \times 10^7$	$7.21 \times 10^7$	0.2
17020#		$1.59 \times 10^5$		$8.85 \times 10^5$	
17022#	$3.62 \times 10^3$	$1.36 \times 10^6$	$7.95 \times 10^3$	$3.25 \times 10^8$	2.0
17021#		$2.67 \times 10^5$		$3.08 \times 10^7$	
17023#	$2.53 \times 10^2$	$3.96 \times 10^6$	$2.51 \times 10^2$	$7.21 \times 10^7$	3.0
17019#		$1.45 \times 10^6$		$3.39 \times 10^5$	
17021#	$2.68 \times 10^2$	$2.67 \times 10^5$	$3.85 \times 10^2$	$3.08 \times 10^7$	4.0
17023#		$3.96 \times 10^6$		$7.21 \times 10^7$	
17025#	$1.43 \times 10^1$	$1.51 \times 10^5$	$2.87 \times 10^1$	$7.72 \times 10^6$	7.8

变色纺纱的呈色特性,二者的  $S_{SPM}$  特征值处于同一数量级,说明此时纱线与织物的光谱曲线特征趋同。

#### 3.2 纤维性状对呈色的影响及规律

染色纤维的性状差异会导致色纺织物呈色特性的改变。对 8 份具有不同纤维长度的样本分别进行光谱反射率测量以及 SPM 特征分析,结果如表 3 所示。

由表 3 可知,对于不同色相的染色纤维,纤维长短差异(纤维长度分别为 38 与 51 mm)会导致其色纺纱线和织物的光谱曲线特征具有显著性差异;同

表 3 纤维性状差异对纱线、织物间的  $S_{SPM}$  特征影响

Tab.3 Effect of fiber characteristics on  $S_{SPM}$  characteristics between yarns and fabrics

样品编号	$B_{D(Y)}$	$W_{D(Y)}$	$B_{D(F)}$	$W_{D(F)}$	说明
17012#		$1.49 \times 10^7$		$3.19 \times 10^8$	大红
17015#	$1.68 \times 10^4$	$3.86 \times 10^8$	$3.59 \times 10^4$	$5.27 \times 10^7$	51 mm
17020#		$1.59 \times 10^5$		$8.85 \times 10^5$	黑色
17026#	$1.84 \times 10^3$	$5.49 \times 10^7$	$1.44 \times 10^4$	$1.61 \times 10^7$	51 mm
17025#		$1.51 \times 10^5$		$7.72 \times 10^6$	黑色
17028#	$1.71 \times 10^4$	$3.97 \times 10^6$	$1.50 \times 10^3$	$4.53 \times 10^4$	51 mm
17024#		$2.25 \times 10^5$		$4.46 \times 10^6$	黑色
17027#	$1.12 \times 10^4$	$8.54 \times 10^4$	$2.29 \times 10^4$	$4.74 \times 10^6$	51 mm

时,统计分析表明,织造加工过程并不会显著改变色纺纱的呈色特性,二者的  $S_{SPM}$  特征值处于同一数量级,即织造过程相较于染色纤维的长短差异而言,对织物的呈色影响有限。

### 3.3 纤维种类对呈色的影响及规律

对 2 份由不同种类纤维构成的色纺纱线及其织物进行  $S_{SPM}$  特征提取与差异性判别分析,结果如表 4 所示。结果表明,采用精梳细绒与采用精梳长绒的 2 份色纺纱线及其织物,其光谱曲线特征具有显著差异。

表 4 纤维种类差异对纱线、织物间的  $S_{SPM}$  特征影响

**Tab.4 Effect of fiber type difference on  $S_{SPM}$  characteristics between yarns and fabrics**

样品编号	$B_{D(Y)}$	$W_{D(Y)}$	$B_{D(F)}$	$W_{D(F)}$	说明
17016#	$1.96 \times 10^2$	$3.24 \times 10^8$	$4.61 \times 10^2$	$6.04 \times 10^8$	细绒
17017#	$1.06 \times 10^6$	$1.06 \times 10^6$	$6.23 \times 10^9$	$6.23 \times 10^9$	长绒

值得注意的是,虽然织造过程并没有显著改变色纺纱线样本间的呈色特性,即  $B_{D(Y)}$  与  $B_{D(F)}$  处于同一数量级,但二者之间仍然存在细微改变。进一步分析表明,相较于色纺纱线而言,织物样本间的光谱曲线形状特征值发生了较大改变,而距离特征值基本保持不变。结合纱线和织物的实际光谱曲线见图 2,可以看出,  $S_{SPM}$  特征变化规律与纱线和织物实际光谱曲线变化规律保持一致,即 2 种不同种类的染色纤维(染料色号相同),其色纺纱线样本间的呈色差异主要体现在明度上,而色相基本保持一致;当对纱线进行织造加工后,由于织物纹理结构的影响,会导致其色相角度发生一定改变,而样本间明度差异基本保持不变。

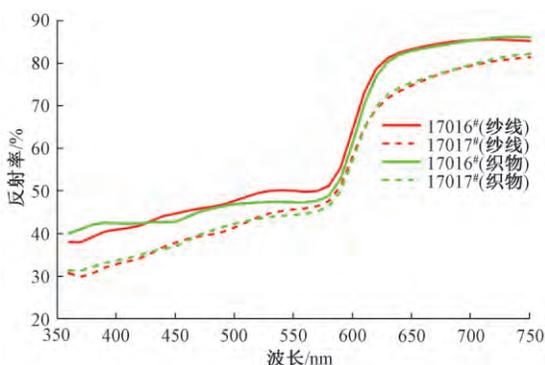


图 2 不同纤维种类的色纺纱线与织物间光谱反射率曲线

Fig.2 Spectral reflectance curves between colored yarns and fabrics with different fiber types

### 3.4 捻系数对呈色的影响及规律

对 4 份具有不同捻系数的样本进行分析,结果如表 5 所示。

表 5 纤维捻系数差异对纱线、织物间的  $S_{SPM}$  特征影响

**Tab.5 Influence of fiber twist factor on  $S_{SPM}$  characteristics between yarns and fabrics**

样品编号	$B_{D(Y)}$	$W_{D(Y)}$	$B_{D(F)}$	$W_{D(F)}$	捻系数
17029#	$1.99 \times 10^{-7}$	$4.40 \times 10^{-6}$	$2.14 \times 10^{-4}$	$4.02 \times 10^{-7}$	60
17032#	$6.14 \times 10^{-8}$	$6.14 \times 10^{-8}$	$2.58 \times 10^{-7}$	$2.58 \times 10^{-7}$	80
17030#	$8.10 \times 10^{-9}$	$8.10 \times 10^{-9}$	$7.36 \times 10^{-8}$	$7.36 \times 10^{-8}$	65
17031#	$1.02 \times 10^{-7}$	$1.02 \times 10^{-7}$	$9.23 \times 10^{-5}$	$2.43 \times 10^{-9}$	75

实验结果表明:染色纤维成纱过程中的捻系数差异会对色纺纱线和织物的光谱反射率曲线特征产生影响;同时,织造加工过程能够进一步强化这种差异,说明当纱线捻系数差异在相对较小范围内,织造加工过程所引入的织物纹理特征会对其呈色产生显著影响,即  $S_{SPM}$  特征至少会有 1 个数量级的上升。

### 3.5 对比实验分析

CMC( $l:c$ ) 色差分析公式被广泛应用于纺织品色度学指标的差异性分析。为验证 SPM 模型的有效性与稳定性,本文选取 3.1 节中的 15 份样本分别进行色差分析。同时,也采用“类内距离”和“类间距离”的色差分析判别准则,实验结果如表 6 所示。

表 6 纤维质量对比对纱线、织物间的色差分析结果

**Tab.6 Analysis results of chromatic aberration between yarns and fabrics by fiber mass ratio**

样品编号	$B_{CMC(Y)}$	$W_{CMC(Y)}$	$B_{CMC(F)}$	$W_{CMC(F)}$	质量差/%
17001#		0.663		0.372	
17002#	0.767	0.616	0.315	0.161	0.94
17009#		0.731		0.191	
17011#	1.308	0.240	0.148	0.240	1.04
17005#		0.771		0.084	
17012#	1.820	0.280	0.887	0.357	1.80
17004#		0.358		0.358	
17011#	0.408	0.240	1.611	0.240	2.0
17002#		0.616		0.161	
17005#	0.506	0.771	0.105	0.084	3.02
17006#		0.244		0.307	
17010#	6.231	0.091	5.174	0.195	4.12
17020#		0.424		0.527	
17023#	0.404	0.254	0.194	0.264	0.2
17020#		0.424		0.527	
17022#	1.988	0.519	1.860	0.123	2.0
17021#		0.199		0.064	
17023#	3.559	0.254	3.792	0.264	3.0
17019#		0.309		0.392	
17021#	4.134	0.199	3.843	0.064	4.0
17023#		0.254		0.264	
17025#	5.489	0.011	6.006	0.156	7.8

其中,色  $l:c=2:1$ ;  $B_{CMC(Y)}$  与  $W_{CMC(Y)}$  分别表示色纺纱线样本间的“类间”色差值与“类内”色差值;同理  $B_{CMC(F)}$  与  $W_{CMC(F)}$  分别表示色纺织物样本间的

“类间”色差值与“类内”色差值。

结果表明,对于不同染色纤维混配而成的纱线和织物样本,色差值表征能力有限且并不稳定,其类间色差与类内色差值与混配比参数无明显相关性;对于部分样本的测试分析出现了随机波动性,如 17004<sup>#</sup>与 17011<sup>#</sup>、17002<sup>#</sup>与 17005<sup>#</sup>等。样本间色差值仅在染色纤维混配比达到 3.0% 以上时才趋于稳定。因此,本文所建立 SMP 模型相较于传统的色差分析模型具有更为理想的有效性和稳定性。

不仅如此,本文所建立的 SPM 模型综合考虑了光谱矢量大小与光谱曲线形状 2 个层面的特征信息,能够表征光谱曲线的内在规律和特点,使得相似的光谱更为相似,而不相似的光谱差别更大。以 17001<sup>#</sup>与 17002<sup>#</sup>色纺纱和织物的光谱曲线为例对比分析,结果如图 3 所示。

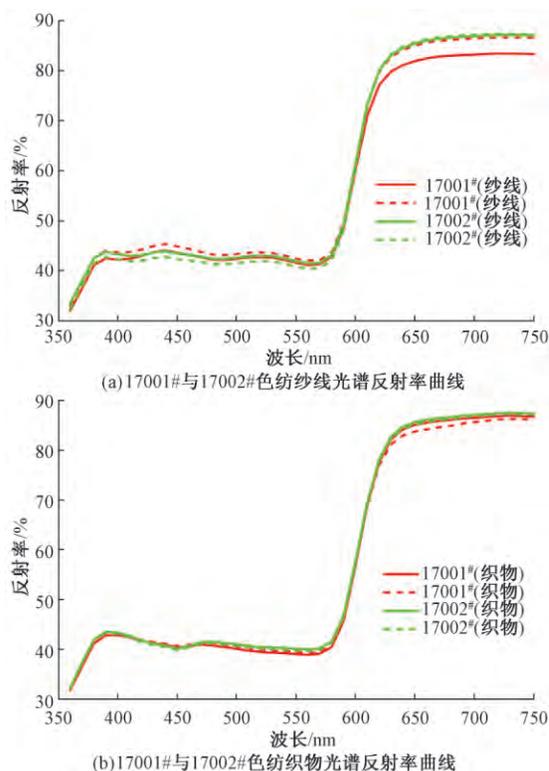


图 3 17001<sup>#</sup>与 17002<sup>#</sup>色纺纱及织物光谱反射率曲线

Fig.3 Spectral reflectance curves of colored spun yarns and fabrics from 17001<sup>#</sup> and 17002<sup>#</sup>. (a) Spectral reflectance curves of colored spun yarns from 17001<sup>#</sup> and 17002<sup>#</sup>; (b) Spectral reflectance curves of colored spun fabrics from 17001<sup>#</sup> and 17002<sup>#</sup>

其中 2 份样本的纤维混配比差异为 0.94%; 红色实线和红色虚线分别表示 17001<sup>#</sup>样本在 2 次实验的光谱曲线; 同理,绿色实线和绿色虚线分别表示 17002<sup>#</sup>样本在不同区域光谱曲线。可以看出,无论是色纺纱线样本还是色纺织物样本,17001<sup>#</sup>与

17002<sup>#</sup>样本间的光谱曲线在有效波长范围内,出现了多处重合与交叠,无法清晰、直观表征样本间的呈色差异性。而本文所建立的 SPM 特征提取模型,对 2 份样本具有显著的判别分析能力,能够表征光谱曲线的本质特征。

### 3.6 异常结果分析

在部分单项测试分析中,出现了异常结果,如染色纤维性状差异分析实验中的 17024<sup>#</sup>与 17027<sup>#</sup>样本以及捻系数差异分析实验中的 17029<sup>#</sup>与 17032<sup>#</sup>样本。通过分析,发现在这些样本中均出现了不同程度的染色纤维异常聚集的情况,即因为质量控制和织造工艺而引起的色度学指标特征波动。部分色纺织物异常结构如图 4 所示。

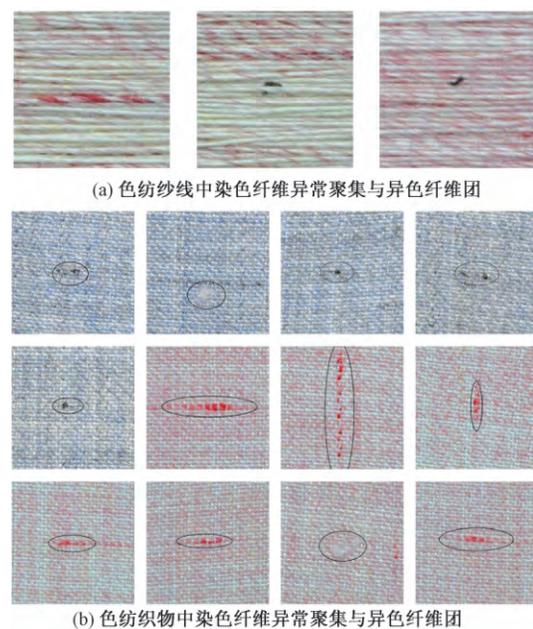


图 4 染色纤维异常聚集与异色纤维团

Fig.4 Abnormal aggregation of colored fibers and heterochromia fiber clusters in colored yarns (a) and colored fabrics (b)

## 4 结 论

本文重点分析染色纤维在成纱和织造过程中的呈色特性与主要影响因素及一般传递规律。针对色纺产品呈色的多样性与复杂性,建立了结合光谱矢量大小和光谱曲线形状的泛光谱相似测度,并用于色纺纱线与织物间颜色特性的表征与定量化分析;同时,结合特征间的类内距离与类间距离,首次构建了光谱反射率曲线特征差异性判别准则,具有一定的自适应性。对 26 份具有不同配比参数及特性的色纺纱线和织物进行实验分析,得到结论如下。

1) 相较于传统的色差分析模型,本文所建立的

SPM 模型能够有效表征色纺纱线和织物的光谱反射率曲线特征。由于该模型综合了曲线距离与形状两个层面的特性信息,因此对于不同混配比参数的色纺纱和织物具有理想的有效性和稳定性。

2) 对于不同染色纤维混配而成的纱线和织物,当纤维混配比差异接近或达到 1.0% 时,色纺纱线和织物的  $S_{SPM}$  特征均具有稳定且显著的差异性;同时,色纺纱线及其织物间的  $S_{SPM}$  特征与染色纤维混配比差异总体呈现正向线性相关性;当染色纤维混配比差异小于 2.0%,织造加工过程会降低纱线间原有的颜色差异性。

3) 纤维长短差异会导致其色纺纱线和织物样本的光谱曲线特征产生显著性差异;同时,织造加工过程并不会显著改变色纺纱的呈色特性,二者的  $S_{SPM}$  特征值处于同一数量级,即织造过程相较于染色纤维的长短差异而言,对织物的呈色影响有限。

4) 染色纤维种类的差异会对色纺纱线和织物的光谱曲线特征产生显著影响。同时,对纱线进行织造加工后,由于织物纹理结构的影响,会导致其色相角度发生一定改变,而总体明度差异保持不变。

5) 染色纤维在成纱过程中,捻系数差异会对色纺纱线和织物的光谱反射率曲线特征产生影响;同时,在捻系数差异较小时,织造加工过程会进一步强化这种差异。

本文的研究对于探索色纺纱线与织物间的颜色传递与分析建模具有重要的理论价值,同时也能够为染色纤维混配色预测模型以及色纺企业的实践生产提供保障。而建立染色纤维、纱线及其织物间的全流程颜色传递模型及其影响因素定量分析将是本文下一步研究的重点。

#### FZXB

#### 参考文献:

- [1] 袁理,代乔民,付顺林,等. 结合全局与局部多样性特征的色纺纱色度学指标测试与评价[J]. 纺织学报, 2018, 39(2): 157-164.  
YUAN Li, DAI Qiaomin, FU Shunlin, et al. Global and local diversity features-fused colorimetry index testing and evaluation of colored spun yarns [J]. Journal of Textile Research, 2018, 39(2): 157-164.
- [2] 严旭新,黄玉强,于文菡,等. 新型色纺精细混棉工艺流程研究[J]. 棉纺织技术, 2015, 43(6): 49-52.  
YAN Xuxin, HUANG Yuqiang, YU Wenhan, et al. New fine blending process procedure study of colored spinning [J]. Cotton Textile Technology, 2015, 43(6): 49-52.
- [3] 刘东升,万震,吴爱儿. 混和方式对色纺纱质量和织物风格的影响[J]. 棉纺织技术, 2017, 45(3): 41-43.  
LIU Dongsheng, WAN Zhen, WU Aier. Influence of blending method on colored spun yarn quality and fabric style [J]. Cotton Textile Technology, 2017, 45(3): 41-43.
- [4] 陈美玉,施楣梧,孙润军. 加捻程度对着色涤纶纱线颜色变化规律的影响[J]. 西安工程科技学院学报, 2004, 18(2): 105-108.  
CHEN Meiyu, SHI Meiwu, SUN Runjun. The influences on the colour of spun-dyed PET yarns by twist of yarns [J]. Journal of Xi'an University of Engineering Science and Technology, 2004, 18(2): 105-108.
- [5] 杨文芳,路硕,李昌垒,等. 捻度对有色粘胶纱颜色的影响[J]. 棉纺织技术, 2016, 44(1): 22-24.  
YANG Wenfang, LU Shuo, LI Changlei, et al. Influence of twist on the color of colored viscose yarn [J]. Cotton Textile Technology, 2016, 44(1): 22-24.
- [6] 任静. 织物表面纹理与主观颜色的关系[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2014: 39-52.  
REN Jing. The relation between surface textures of fabrics and subjective colors [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2014: 39-52.
- [7] 陈子晗. 织物结构设计与织物色彩关系的研究与应用[D]. 上海: 东华大学, 2015: 23-35.  
CHEN Zihan. Research and application of the relationship between fabric structure and fabric color [D]. Shanghai: Donghua University, 2015: 23-50.
- [8] 李昌垒,马君志,秦翠梅,等. 有色黏胶纤维、纱线、织物间颜色规律研究[J]. 针织工业, 2016(11): 47-51.  
LI Changlei, MA Junzhi, QIN Cuimei, et al. Study of color rules between colored viscose fiber and its yarns and fabrics [J]. Knitting Industries, 2016(11): 47-51.
- [9] 赵玉. 基于原色纤维混配色织物的呈色规律研究[D]. 上海: 东华大学, 2015: 31-50.  
ZHAO Yu. Study on fabric coloring law based on primary-color fibers blending [J]. Shanghai: Donghua University, 2015: 31-50.
- [10] ESTEVÃO Esmi, FRANCIELLE Santo Pedroa, LAÉCIO Carvalho De Barros, et al. Fréchet derivative for linearly correlated fuzzy function [J]. Information Sciences, 2018, 435: 150-160.
- [11] 高孝杰,简季,戴晓爱,等. 基于 Fréchet 距离的光谱曲线匹配应用分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(3): 408-414.  
GAO Xiaojie, JIAN Ji, DAI Xiaoi, et al. Spectral curve matching application analysis based on fréchet distance [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(3): 408-414.
- [12] 焦洪赞,王少宇,彭正洪. 基于条件随机场的光谱相似性匹配高光谱遥感影像聚类方法[J]. 武汉大学学

- 报(工学版) 2016 49(6):937-943.
- JIAO Hongzan , WANG Shaoyu , PENG Zhenghong. A spectral similarity matching classifier based on conditional random field for hyperspectral remote sensing imagery [J]. Engineering Journal of Wuhan University , 2016 49(6) : 937-943.
- [13] 孔祥兵 舒宁 陶建斌 等. 一种基于多特征融合的新型光谱相似性测度[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(8) : 2166-2170.
- KONG Xiangbing , SHU Ning , TAO Jianbin , et al. A new spectral similarity measure based on multiple features integration [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis , 2011 , 31( 8) : 2166-2170.
- [14] LI Q Z , ZHU C Y. Comparison of color measuring methods for yarn dyed woven fabrics [J]. Advanced Materials Research , 2012 , 441: 651-655.
- [15] 李启正, 金肖克, 张声诚, 等. 数码测色法在织物颜色评价中的应用[J]. 印染, 2014(17) : 17-22.
- LI Qizheng , JIN Xiaoke , ZHANG Shengcheng , et al. Application of digital color measuring methods to color evaluation of textiles [J]. China Dyeing and Finishing , 2014( 17) : 17-22.