

DOI:10.13475/j.fzxb.20200601307

基于屈诱多形态力学测试的织物外观平整度表征

肖彩勤, 孙丰鑫, 高卫东

(生态纺织教育部重点实验室(江南大学), 江苏 无锡 214122)

摘要 针对现有基于图像或视觉原理的织物外观平整度的测试方法易受到织物复杂花型和纹理的影响,存在织物品类适应性差等不足,提出基于后屈曲诱导的织物多形态构建和力学性能原位检测原理的织物外观平整度表征手段。选取30块织物试样进行多重形变下的原位力学测试,分别提取力-位移测试曲线的5个特征指标,利用SPSS软件对提取的织物特征指标及其厚度和面密度与主观评价等级进行相关性分析,同时采用逐步回归法构建外观平整度的预测模型,并借助1组独立实验对预测模型进行检验。结果表明,用原位力学测试方法构建的预测模型的评价结果与主观评估结果具有较好的吻合度,说明基于原位力学测试方法实施织物外观平整度表征是可行并有效的。

关键词 织物外观平整度; 织物折皱; 原位力学测试方法; 屈曲诱导

中图分类号: TS 101.2; TH 879 **文献标志码**: A

Characterization of fabric smoothness appearance based on buckling-induced mechanical test with multiple deformation of fabrics

XIAO Caiqin, SUN Fengxin, GAO Weidong

(Key Laboratory of Eco-Textiles (Jiangnan University), Ministry of Education, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract The existing methods for testing fabric smoothness appearance based on image methods or visual principles are susceptible to the complex patterns and textures of fabrics, with shortcomings such as poor adaptability for different types of fabrics. Characterization method of fabric smoothness appearance was proposed based on the simultaneous-mechanical testing technology. 30 fabric samples were selected for in-situ mechanical test under multiple deformations, and five characteristic indexes of the force-displacement test curve were extracted respectively. SPSS software was used to correlate the extracted characteristic indexes, and fabric thickness with the subjective evaluation results. The stepwise regression method was used to construct a prediction model for fabric smoothness appearance, and the prediction model was validated with the help of a set of independent experiments. The results show that the evaluation results of the prediction model based on the in-situ mechanical test method have a good agreement with the subjective evaluation results, indicating the feasibility and effectiveness of the in-situ mechanical test method to characterize the appearance of the fabric.

Keywords fabric smoothness appearance; fabric wrinkle; in-situ mechanical test method; buckling inducing

织物的起皱现象被认为是服装在洗涤或穿着过程中承受搓揉挤压等多重作用而引起的织物黏塑性形变,它直接影响了织物的服用性能和外观美感^[1]。织物外观平整度作为纺织材料保形性的一

个重要特性,其量化了织物经过复杂外载作用后的折皱及其回复程度,是织物外观品质和服装市场价值的重要量度^[2-3]。

织物外观平整度表征的传统方法是采用经标准

收稿日期:2020-06-04 修回日期:2020-11-03

基金项目:国家自然科学基金项目(11802104);国家重点研发计划项目(2017YFB0309200);中国博士后基金面上项目(2019M651697);江苏省自然科学基金项目(BK20180589)

第一作者:肖彩勤(1996—),女,硕士生。主要研究方向为基于力学测试的织物外观平整度表征。

通信作者:孙丰鑫(1989—),男,副教授,博士。研究方向为纤维体软材料力学与物理表征技术。E-mail:fxsun@jiangnan.edu.cn。

洗涤或起皱处理后的织物样品,由专业评委通过与标准样照比较进行目测评估,主要参照标准有 AATCC 124—2010《织物经多次家庭洗涤后的外观平整度测定》、AATCC 128—2010《织物折皱回复性:外观法》与 GB/T 13769—2009《纺织品 评定织物经洗涤后外观平整度的试验方法》^[4]。然而,主观评价易受个体经验影响,显示出精度低、再现性差的特点,且人工成本以及时间成本高。近年来,仪器测量图像技术的应用在折皱评估方面起到重要作用,提升了织物外观平整度评价的客观性。基于二维图像方法,采用扫描仪或工业面阵相机捕捉织物样品的二维数字图像,提取折皱灰度表面积和阴影面积^[5];或通过小波分析的变异值、偏移量^[6],灰度共生矩的对比度、相关系数、熵^[7-8]等作为织物折皱水平的特征指标以量化织物外观平整度。另外,三维图像方法利用织物样品的三维深度图像为原始数据,通过双目立体视觉结合分形维数^[9],或借助激光三角测量^[10]等技术来客观评定外观平整度等级。然而,图像技术本质上如主观评价一样属于视觉原理评价,难以克服织物颜色与纹理对评价结果的影响。

近来研究发现,织物的起皱和屈曲失稳等现象与织物固有的物理力学性能密切相关^[11-12],力学表征不仅有利于避免视觉测试方法带来的弊端,而且有助于探讨织物起皱的本征物理因素,具有潜在的研究意义。因此,本文提出了一种可实现在时间和空间上对织物材料实施连续测试(原位)的织物外观平整度的力学测试手段,能够有效提升具有复杂图案和纹理的织物外观平整度评级的鲁棒性,通过相关性分析阐释力学测试特征指标与织物起皱响应的内在关联,采用逐步回归法构建预测模型表征织物外观平整度等级,并借助 1 组独立实验验证了力学方法的可行性与测试系统的准确性和可靠性,实现了织物外观平整度的客观评价。

1 织物外观平整度力学测试系统

1.1 结构设计

织物外观平整度力学测试系统如图 1 所示,该系统主要包括检测机构、传动机构与相应的数据采集和控制系统。检测机构包括移动板、测试板、试样夹持器以及精度为 0.03%、测量范围为 -500 ~ 500 cN 的力传感器;传动机构主要包括伺服电动机、传动齿轮和丝杆^[13-14]。为保证测试过程中织物弯曲屈曲的稳定性,待测织物通过移动板和测试板上的 2 个弹性夹持器夹持,形成的夹持面呈倒八字

形自然微悬状态。伺服电动机控制移动板在垂直于移动板的方向并相对于测试板进行往复运动,从而形成后屈曲诱导的织物多重形变。与此同时,力传感器实时采集织物的受力情况,并且通过数据采集系统实时记录移动板的位移情况,于控制面板输出力-位移测试曲线。其中两钳口之间的水平距离、最大压缩力和最大压缩力的保持时间,以及试样条宽度可根据实验条件进行调整^[15]。

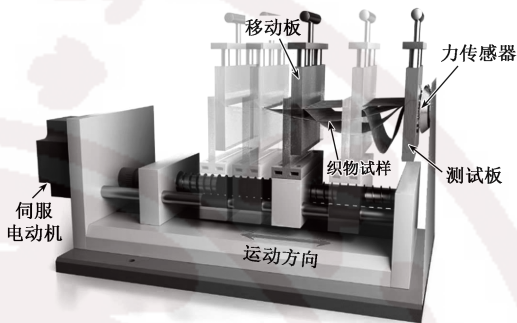


图 1 织物外观平整度力学测试系统示意图

Fig.1 Schematic of evaluation system for fabrics smoothness appearance

1.2 测试原理

织物外观平整度力学测试系统通过构建织物多重形变,提取织物各构形下的力学响应特征,实现一次性完成织物折皱回复性、压缩回弹性和拉伸回弹性的连续测试,从而综合评价织物的外观平整度。图 2 示出原位力学测试过程与主要特征阶段。根据织物典型的多形态形变特征,可将测试过程分为 6 个测试阶段:Ⅰ弯曲屈曲阶段、Ⅱ压缩阶段、Ⅲ折皱回复阶段、Ⅳ伸直阶段、Ⅴ拉伸阶段、Ⅵ拉伸回复阶段。

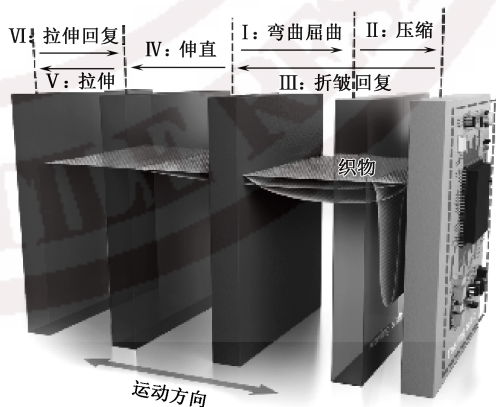


图 2 原位力学测试过程与主要特征阶段

Fig.2 Illustration of in-situ mechanical testing process and featured testing steps

在Ⅰ弯曲屈曲阶段,传动机构控制移动板向测试板进行移动,织物开始在测试板和移动板之间弯

曲,形成织物的弯曲屈曲形变;移动板继续向测试板靠近直至弯曲屈曲的织物两翼彼此接触,折叠后的织物被移动板和测试板压缩,压缩过程直到力传感器监测到织物的受力到达最大压缩力的设定值时,移动板停止压缩,并且保持一定的压缩停滞时间,以增强织物的折皱性,此刻完成了 II 压缩阶段测试。接着移动板反向远离测试板运动,使经过弯曲和压缩的织物形变逐渐回复,直到移动板回到测试的起始位置,此时对应 III 折皱回复阶段。织物逐渐由微悬弯曲状态变为伸直状态,移动板继续反向运动,织物由伸直状态开始拉伸,直到织物的受力到达设定的最大拉伸力,完成 V 拉伸阶段测试,最后移动板通过传动机构开始向测试板靠近,直至到达测试的起始位置移动板停止运动,完成 VI 拉伸回复阶段测试。

织物外观平整度力学测试系统在这 6 个测试阶段连续记录织物多重形态,同时力传感器实时监测织物变形过程中的力学响应,得到相应的力-位移曲线,可进行曲线特征值的提取并对织物的外观平整度进行综合表征。

2 实验方案

2.1 样品制备

收集了不同组织结构、不同成分以及不同抗皱性能的商用机织物。织物厚度在 1 kPa 的压力下用 EXPLOIT 电子测厚仪进行测量,同时使用 Mettler 天平测量单位面积样品的质量,精确刻度为 ± 0.1 mg。折皱回复角(经向)由 Shirley 折皱回复测试仪根据 AATCC 66—2008《机织物折皱回复性的测定:回复角法》确定,施加压力为 500 g,试样折叠加压时间与卸除负荷后自行回复时间均为 5 min。折皱回复率由 PhabrOmeter 织物风格仪测试,根据测试原理将 100 cm² 的圆形试样平铺在测试台上,通过推杆模拟人拿捏纺织品 2 次推动纺织品使其向下移动,通过 PhabrOmeter 风格仪自带软件测得织物的折皱回复率。弯曲刚度通过悬臂梁法测得。所有试样在实验前均在温度为(20 \pm 3) °C、相对湿度为(65 \pm 5)% 标准条件下平衡 24 h。试样的具体规格参数如表 1 所示。

表 1 试样基本规格参数

Tab.1 Primary parameters of samples

试样编号	厚度/mm	面密度/(g·m ⁻²)	折皱回复角/(°)	折皱回复率/%	弯曲刚度/(cN·cm ² ·cm ⁻¹)	组织结构	成分
1	0.215	134.3	95.00	77.72	0.123	平纹	棉/涤纶
2	0.273	111.1	75.00	55.63	0.076	平纹	粘胶
3	0.216	117.5	82.00	62.58	0.265	平纹	粘胶
4	0.226	124.7	83.00	62.62	0.683	平纹	粘胶
5	0.419	207.4	80.00	57.81	0.894	平纹	棉/涤纶
6	0.775	371.8	46.00	34.28	1.292	斜纹	棉/涤纶
7	0.447	199.8	75.00	56.58	0.550	斜纹	棉/涤纶
8	0.573	258.4	45.00	30.58	0.746	斜纹	棉
9	0.398	170.7	73.00	50.00	0.385	平纹	棉
10	0.256	142.4	95.00	63.62	0.722	平纹	棉/涤纶
11	0.220	136.6	104.00	69.17	0.248	平纹	棉
12	0.432	184.8	73.00	55.45	0.170	斜纹	棉
13	0.397	205.2	52.00	39.85	0.439	斜纹	棉
14	1.660	575.0	155.00	61.32	2.583	平纹	羊毛/涤纶
15	0.479	279.7	86.00	61.46	0.663	平纹	棉/涤纶
16	0.225	114.5	134.00	78.03	0.062	平纹	锦纶
17	0.450	270.4	42.00	33.37	1.026	斜纹	棉/氨纶
18	0.335	165.2	76.00	53.02	0.132	斜纹	棉/粘胶
19	0.335	165.3	35.00	28.37	0.392	平纹	亚麻
20	0.228	155.4	62.00	51.30	0.369	斜纹	棉
21	0.216	121.5	149.00	69.67	0.077	平纹	锦纶/棉
22	0.343	202.5	56.00	46.01	0.433	斜纹	锦纶/棉/氨纶
23	0.315	208.0	95.00	49.46	1.140	斜纹	涤纶/锦纶
24	0.260	116.5	89.00	63.27	0.093	平纹	棉
25	0.253	127.4	63.00	48.38	0.273	平纹	棉
26	0.271	123.3	60.00	51.77	0.729	平纹	棉
27	0.219	122.9	85.00	71.01	0.211	平纹	棉
28	0.316	173.2	64.00	59.27	0.370	平纹	棉
29	0.216	115.6	65.00	52.65	0.113	平纹	棉/涤纶
30	0.232	119.6	105.00	68.23	0.153	斜纹	棉/锦纶/氨纶

2.2 原位力学测试

测试过程中的实验参数设置如下:两钳口之间的水平距离为 5 mm,最大压缩力和最大拉伸力均为 300 cN,移动板压缩与拉伸回复的停滞时间均为 30 s,移动板运动速度为 20 mm/min,数据采样频率为 90 Hz。每种织物按照经向折叠和纬向折叠各裁剪 4 块长×宽为 50 mm × 20 mm 的试样,放置于标准条件(温度为 (20 ± 3) °C,相对湿度为 (65 ± 5) %)下平衡 24 h 之后进行测试,织物的翘曲方向为原位力学测试试样的长度方向,织物的折叠折线方向为试样的宽度方向,测试之后直观综合比较力-位移曲线的特征指标,从每种经向折叠试样和纬向折叠试样的 4 条曲线中分别挑选出最相近的 3 条力-位移曲线,取 6 条曲线的平均值作为每块试样的最终测试结果。

2.3 织物外观平整度的主观评价

参考 AATCC 124—2018《织物经多次家庭洗涤后的外观平整度测试》,将织物裁剪至 380 mm × 380 mm,对织物样品进行标准洗涤和干燥,获得表现外观平整度级别各异的织物样品,采用标准光源和观察区域,由 6 位专业评委通过比照织物样品与标准样板的相似程度,主观评价织物外观平整度,以 6 位评委评价等级的平均值作为每种织物最终的外观平整度等级。AATCC 124 标准样板如图 3 所示。织物外观平整度分为 6 个等级,即 SA-1、SA-2、SA-3、SA-3.5、SA-4、SA-5。其中:SA-1 表示外观平整度保持性最差,织物最折皱,随着等级数值的升高,折皱程度逐渐降低;SA-5 表示折皱程度最轻,织物最平整。



图3 AATCC 标准样照

Fig.3 AATCC standard photographs

3 结果与讨论

3.1 测试曲线及特征指标提取

织物外观平整度力学测试系统输出的力-位移曲线如图 4 所示。对应于试样在测试时多形态形变特征,力-位移曲线也被分为 6 个阶段。试样经历过弯曲屈曲和压缩测试阶段后,移动板反向远离测

试板运动使压缩试样逐渐恢复,图中试样折皱回复的初始阶段力-位移曲线急剧下降,提取该段曲线拟合的压缩回弹斜率 S_{cr} 作为评价织物外观平整度的一个可能的特征指标。

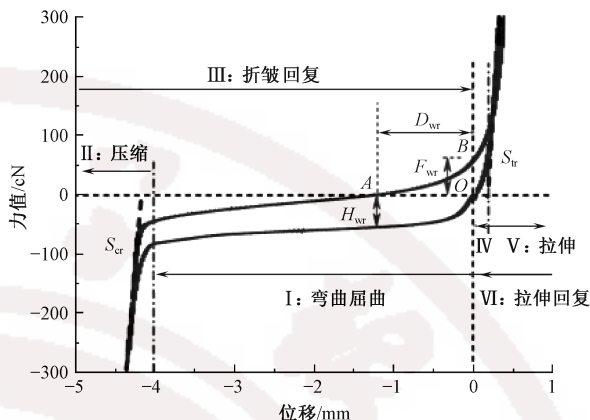


图4 原位力学测试力-位移曲线

Fig.4 Force-displacement curve of in-situ mechanical tests

此后,试样回复缓慢,力值的绝对值逐渐减小到零(A点),然后力值从零开始增大,与纵坐标轴交于B点,以克服织物折皱残余产生的固有弯曲力,因此,可提取织物在折皱回复阶段力值为零的A点与坐标原点O的偏转位移 D_{wr} 以及折皱残余力 F_{wr} 为织物折皱回复性的特征指标来表征织物外观平整度。另外,据报道,织物的弯曲滞后与折皱回复特性密切相关^[14],因此,可提取试样的弯曲屈曲曲线与折皱回复曲线在A点之间的滞后距离 H_{wr} 作为评价织物外观平整度的指标。

试样完成了折皱回复阶段,开始被移动板伸直并拉伸,拉伸阶段试样受力曲线急剧上升。之后移动板向测试板靠近,试样拉伸回复,张力急剧释放,并回到实验起始位置,则拉伸回复曲线相应的直线段拟合的拉伸回弹斜率 S_{tr} 可用作表征织物外观平整度的一个可能的特征指标。

由此初步确定了 5 个曲线参数作为特征指标,利用 Origin 软件对 1~30 号织物试样所得到的力-位移测试曲线分别进行分析,提取相应的特征指标。30 个试样的曲线参数统计结果以及织物外观平整度的主观评价结果见表 2。

3.2 主观评级分析

标准化的主观感受表现的平均值如图 5 所示。可直观看出每种试样的主观评价存在着一定的误差度,但是等级误差并不是很大,证实主观评价的一致性和有效性。6、8、17、19 号试样的主观外观平整度等级相对较低,在 1.5~2 之间,而相应的特征值 D_{wr} 、 H_{wr} 、 F_{wr} 明显大于其他试样的特征值(见表 2)。

表 2 织物外观平整度主观评价与特征指标测试结果

Tab.2 Results of subjective evaluation of fabric smoothness appearance and feature indices

试样 编号	织物外观平整度主观评价							原位力学测试曲线特征指标				
	评委 1	评委 2	评委 3	评委 4	评委 5	评委 6	均值	D_{wr}/mm	H_{wr}/cN	F_{wr}/cN	$S_{cr}/(cN \cdot mm^{-1})$	$S_{tr}/(cN \cdot mm^{-1})$
1	4.0	3.5	4.0	4.0	4.0	4.0	3.92	0.10	4.41	5.35	743.30	729.69
2	3.5	3.5	3.0	3.5	3.0	3.0	3.25	0.18	4.86	5.01	834.35	710.25
3	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.0	3.42	0.07	3.81	4.72	804.29	730.37
4	3.5	3.0	4.0	3.5	3.5	3.5	3.50	0.19	10.15	8.65	775.13	762.00
5	3.5	3.5	3.0	3.5	3.5	3.0	3.33	0.17	15.68	10.15	676.50	764.44
6	2.0	1.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.83	0.72	29.88	18.82	591.45	501.04
7	3.5	4.0	3.0	3.5	3.5	3.5	3.50	0.18	11.26	7.59	724.26	492.81
8	2.0	2.0	1.0	2.0	2.0	1.0	1.67	0.58	20.13	13.80	651.39	703.52
9	2.0	3.0	3.0	3.0	3.0	2.0	2.67	0.20	9.36	6.17	707.85	601.82
10	4.0	3.5	3.0	3.5	3.5	3.5	3.50	0.07	7.21	9.11	663.66	818.00
11	3.5	4.0	4.0	3.5	3.5	3.5	3.67	0.05	2.65	5.34	775.07	679.33
12	3.5	3.5	3.0	3.5	3.0	3.0	3.25	0.39	8.24	7.31	712.37	682.33
13	3.0	2.0	3.0	2.0	3.0	2.0	2.50	0.61	17.63	13.33	702.55	692.92
14	3.5	3.5	3.0	3.5	3.5	3.5	3.42	0.06	10.68	12.37	372.09	662.72
15	3.0	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.42	0.22	23.22	18.17	506.74	755.39
16	4.0	4.0	4.0	4.0	5.0	5.0	4.33	0.13	2.42	2.65	815.45	725.32
17	2.0	1.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.83	0.61	27.17	16.32	647.78	562.53
18	3.5	3.0	3.5	3.0	3.0	3.5	3.25	0.23	5.34	4.59	777.34	635.10
19	2.0	2.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.50	1.58	17.19	13.99	713.78	702.95
20	3.0	3.5	3.5	3.5	3.0	3.0	3.25	0.36	12.57	8.82	715.88	706.39
21	4.0	3.5	4.0	4.0	3.5	4.0	3.83	0.18	1.31	2.13	800.97	728.54
22	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.00	0.84	14.96	10.69	700.15	555.92
23	3.0	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	3.08	0.23	10.55	8.95	593.71	758.66
24	3.5	4.0	3.5	3.5	3.5	3.5	3.58	0.09	3.92	4.40	804.38	691.42
25	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.00	0.41	15.31	12.73	789.83	739.76
26	3.5	3.0	3.0	3.5	3.0	3.0	3.17	0.25	13.04	11.93	760.38	775.87
27	4.0	3.5	4.0	3.5	3.5	3.5	3.67	0.16	7.48	6.49	723.25	715.51
28	3.5	3.5	3.5	3.0	3.0	3.0	3.25	0.26	12.07	12.29	712.50	695.58
29	3.5	3.5	3.0	3.5	3.5	3.0	3.33	0.27	4.79	5.49	793.77	708.81
30	3.5	3.5	4.0	4.0	3.0	3.0	3.50	0.32	2.32	2.25	802.08	739.51

1、16、21 号试样的主观外观平整度等级相对较高,其相应的特征值相比于其他试样相对较小(对照表 2 的特征指标)。因此可初步判断,织物外观平整度与客观测试所提取的特征值有较好的相关性,力学测试指标可反映织物的外观平整水平。

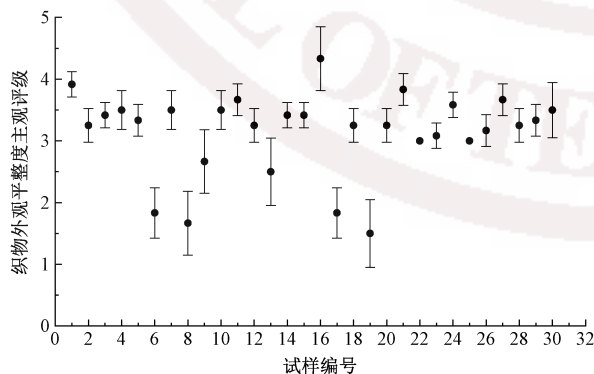


图 5 织物外观平整度主观评价

Fig.5 Subjective evaluation of fabric smoothness

3.3 回归模型构建

为科学地分析织物外观平整度与客观测试所提

取指标之间的关系,采用 SPSS 软件对 1~23 号试样的外观平整度等级 G 、所提取特征指标以及织物厚度 T 和面密度 W 进行皮尔斯曼相关性分析,结果如表 3 所示。可以看出:曲线特征指标 D_{wr} 、 H_{wr} 和 F_{wr} 、厚度 T 、面密度 W 与织物外观平整度在 0.01 水平具有显著的相关性; S_{cr} 、 S_{tr} 在 0.05 水平与织物外观平整度显著相关,表明原位力学测试曲线提取的特征指标可用来表征织物外观平整度。

利用 SPSS 软件,以织物外观平整度等级为因变量,5 个特征指标、织物厚度以及面密度为自变量,在 95% 置信区间下使用逐步回归法,对 1~23 号试样构建预测织物外观平整度的多元线性回归方程。回归模型为

$$G_{pre} = -1.099D_{wr} - 0.044H_{wr} + 3.982 \quad (R^2 = 0.761)$$

式中, G_{pre} 为织物外观平整度预测值。基于逐步回归算法,偏转位移 D_{wr} 与滞后距离 H_{wr} 2 个指标进入回归方程,说明织物外观平整度主要由弯曲性能所决定。方程判定系数 R^2 为 0.761,说明织物外观平整度与特征指标之间的回归模型拟合度良好。另外,

表3 织物外观平整度与曲线特征指标的相关性分析

Tab.3 Correlation analysis of fabric smoothness appearance and curve characteristic index

	D_{wr}	H_{wr}	F_{wr}	S_{cr}	S_{tr}	T	W	G
D_{wr}	1							
H_{wr}	0.688**	1						
F_{wr}	0.599**	0.939**	1					
S_{cr}	-0.324	-0.755**	-0.853**	1				
S_{tr}	-0.408	-0.287	-0.164	0.126	1			
T	0.436*	0.779**	0.723**	-0.756**	-0.485*	1		
W	0.439*	0.825**	0.822**	-0.925**	0.359	0.883**	1	
G	-0.825**	-0.718**	-0.626**	0.465*	0.414*	-0.577**	-0.551**	1

注:**在0.01级别(双尾),相关性显著;*在0.05级别(双尾),相关性显著。

回归方程 F 检验中 F 值为 31.888, 大于临界值 $F_{0.05}(2,2) = 19.000$, 且 p 值 < 0.01 , 证实了构建的回归模型显著。

3.4 回归模型检验

为进一步验证构建的多元回归方程的有效性, 将 24~30 号检验试样提取的特征指标代入到回归方程, 把织物外观平整度的主观评价与基于原位力学测试的客观评价作比较, 结果如表 4 所示。可见, 主客观评价差值均小于 0.19, 误差率绝对值最大值为 5.2%, 表明主客观评价结果一致性较好, 因此基于力学测试指标所构建的回归模型对织物外观平整度具有较好的预测, 有较高的实用价值, 能够表征织物外观平整度等级。

表4 织物外观平整度的主客观评价比较

Tab.4 Comparison of subjective and objective evaluation of fabric smoothness appearance

试样编号	主观评价	客观评价	差值	误差率绝对值/%
24	3.58	3.71	-0.13	3.6
25	3.00	2.86	0.14	4.6
26	3.17	3.13	0.04	1.3
27	3.67	3.48	0.19	5.2
28	3.25	3.17	0.08	2.5
29	3.33	3.47	-0.14	4.2
30	3.50	3.53	-0.03	0.9

4 结论

本文提出用于评价织物外观平整度的原位力学测试方法, 从测试的力-位移曲线提取了 5 个特征指标, 即压缩回弹斜率 S_{cr} 、偏转位移 D_{wr} 、折皱残余力 F_{wr} 、滞后距离 H_{wr} 和拉伸回弹斜率 S_{tr} , 对所提取特征指标以及织物厚度 T 和面密度 W 与织物主观评价等级进行皮尔斯曼相关性分析发现, 特征指标 D_{wr} 、 H_{wr} 和 F_{wr} 、厚度 T 、面密度 W 与织物外观平整度主观评级在 0.01 水平具有显著相关性, S_{cr} 、 S_{tr} 在 0.05 水平与织物外观平整度主观评级显著相关, 说明提取的特征指标能够反映织物的外观平整度等

级。采用逐步回归法构建预测模型以表征织物外观平整度, 并对回归方程进行检验, 分析比较表明基于原位力学测试的客观评价与主观评价吻合度良好, 验证了保形性力学测试系统的可行性与稳定性, 因此, 构建的力学测试系统能够高效客观量化织物外观平整度。

FZXB

参考文献:

- [1] 刘成霞, 韩永华. 模拟实际着装的织物抗皱性测试方法[J]. 纺织学报, 2017, 38(3): 56-60.
LIU Chengxia, HAN Yonghua. Measurement for fabric wrinkle resistance by simulating actual wear [J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(3): 56-60.
- [2] 徐平华, 冒海琳, 沈红影, 等. 洗后织物外观视觉特征编码与折皱评级[J]. 纺织学报, 2020, 41(5): 66-71.
XU Pinghua, MAO Hailin, SHEN Hongying, et al. Visual feature coding and wrinkle assessment of repeatedly laundered fabrics [J]. Journal of Textile Research, 2020, 41(5): 66-71.
- [3] WANG J, SHI K, WANG L, et al. Automatic assessment of fabric smoothness appearance based on a compact convolutional neural network with label smoothing[J]. IEEE Access, 2020, 8: 26966-26974.
- [4] 赵娜娜, 丁雪梅. 织物折皱回复性表征方法研究进展[J]. 毛纺科技, 2019, 47(8): 89-93.
ZHAO Nana, DING Xuemei. Progress on characterization method of fabric wrinkle recovery [J]. Wool Textile Journal, 2019, 47(8): 89-93.
- [5] XU B, REED J A. Instrumental evaluation of fabric wrinkle recovery [J]. Journal of The Textile Institute, 1995, 86(1): 129-135.
- [6] 张一帆, 龙海如. 针织物外观平整度的小波分析与等级评定[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2008, 34(6): 692-695.
ZHANG Yifan, LONG Hairu. Wavelet analysis and grade assessment of knitted fabric smoothness [J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2008, 34(6): 692-695.
- [7] MORI T, KOMIYAMA J. Evaluating wrinkled fabrics

- with image analysis and neural networks [J]. *Textile Research Journal*, 2002, 72(5): 417-422.
- [8] WANG X, YAO M. Grading the crease recovery with twisting of fabric by using image identification technique [J]. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2000, 12(2): 114-123.
- [9] KANG T J, CHO D H, KIM S M. New objective evaluation of fabric smoothness appearance [J]. *Textile Research Journal*, 2001, 71: 446-453.
- [10] XU B, CUMINATO D F, KEYES N M. Evaluating fabric smoothness appearance with a laser profilometer [J]. *Textile Research Journal*, 1998, 68: 900-906.
- [11] 赵立环, 张杰. 织物折皱回复角与其力学性能指标间的关系 [J]. *纺织学报*, 2013, 34(10): 39-42.
- ZHAO Lihuan, ZHANG Jie. Relationship between fabric's wrinkle recovery angle and mechanical properties [J]. *Journal of Textile Research*, 2013, 34(10): 39-42.
- [12] SUN F, GUO M, HU X, et al. Analysis of curve parameters to characterize multidirectional fabric wrinkling by a double extraction method [J]. *Textile Research Journal*, 2019, 89(15): 2973-2982.
- [13] 高卫东, 孙丰鑫, 王蕾. 一种纺织品保形性测量装置及测量方法: 201810026135.3 [P]. 2018-07-27.
- GAO Weidong, SUN Fengxin, WANG Lei. Textile shape retention measurement device and method: 201810026135.3 [P]. 2018-07-27.
- [14] 胡霄睿, 孙丰鑫, 肖彩勤, 等. 基于原位力学测试的织物折皱回复性表征 [J]. *纺织学报*, 2020, 41(10): 41-45.
- HU Xiaorui, SUN Fengxin, XIAO Caiqin, et al. Characterization of wrinkle recovery of fabrics based on in-situ mechanical testing [J]. *Journal of Textile Research*, 2020, 41(10): 41-45.
- [15] LU Y, HU X, SUN F, et al. Determination of optimal system parameters to characterize the wrinkle recovery of fabrics by an integrated shape retention evaluation system [J]. *Textile Research Journal*, 2019, 90(1): 91-100.
- [9] 严佳, 李刚. 医用纺织品的研究进展 [J]. *纺织学报*, 2020, 41(9): 191-200.
- YAN Jia, LI Gang. Research progress on medical textiles [J]. *Journal of Textile Research*, 2020, 41(9): 191-200.
- [10] 刘泽堃, 李刚, 李毓陵, 等. 生物医用纺织人造血管的研究进展 [J]. *纺织学报*, 2017, 38(7): 155-163.
- LIU Zekun, LI Gang, LI Yuling, et al. Research progress of biomedical textile artificial blood vessel [J]. *Journal of Textile Research*, 2017, 38(7): 155-163.
- [11] XIE M, LI Y, ZHAO Z, et al. Development of silk fibroin-derived nanofibrous drug delivery system in supercritical CO₂ [J]. *Materials Letters*, 2016, 167: 175-178.
- [12] CARUBELLI I, SARATHCHANDRA P, et al. The potential of anisotropic matrices as substrate for heart valve engineering [J]. *Biomaterials*, 2014, 35(6): 1833-1844.
- [13] LIU Z, ZHENG Z, CHEN K, et al. A heparin-functionalized woven stent graft for endovascular exclusion [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2019, 180: 118-126.
- [14] LI G, LIU Y, LAN P, et al. A prospective bifurcated biomedical stent with seamless woven structure [J]. *Journal of The Textile Institute*, 2013, 104(9): 1017-1023.
- [15] 李刚, 李毓陵, 陈旭炜, 等. 分叉人造血管的制备技术研究 [J]. *产业用纺织品*, 2008, 26(8): 9-12.
- LI Gang, LI Yuling, CHEN Xuwei, et al. Preparation technology of bifurcated artificial blood vessel [J]. *Industrial Textiles*, 2008, 26(8): 9-12.
- [16] 刘泽堃, 李刚, 李毓陵, 等. 纤维基腔内隔绝分叉机织人造血管的研究 [J]. *产业用纺织品*, 2017, 35(6): 6-13.
- LIU Zekun, LI Gang, LI Yuling, et al. Study on fiber-based endovascular graft exclusion with bifurcations [J]. *Technical Textiles*, 2017, 35(6): 6-13.
- [17] LIU Z, LI G, ZHENG Z, et al. Silk fibroin-based woven endovascular prosthesis with heparin surface modification [J]. *Journal of Materials Science Materials in Medicine*, 2018, 29(4): 46.
- [18] GUO F, JIAO K, BAI Y, et al. Novel transcatheter aortic heart valves exhibiting excellent hemodynamic performance and low-fouling property [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(1): 207-215.

(上接第 79 页)