

基于 CLO 3D 的机织黏合衬悬垂效果模拟

张 钊¹, 陈玮婷¹, 王利君^{*1,2,3}

(1. 浙江理工大学 服装学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江理工大学 浙江省服装工程技术研究中心, 浙江 杭州 310018; 3. 浙江理工大学 丝绸文化传承与产品设计数字化技术文化和旅游部重点实验室, 浙江 杭州 310018)

摘 要:选取 13 种常应用于涤纶纤维面料的机织黏合衬,使用织物悬垂性能测试仪测试其悬垂性,借助 CLO 3D 虚拟试衣系统实现织物的三维模拟,利用 SPSS, Matlab, Python 数学统计软件提取织物悬垂图像和相关数据,并运用相关性检验和回归分析获取虚拟织物性能参数与织物悬垂性之间的关系,最后构建回归模型。结果表明:虚拟织物性能参数中的密度、弯曲强度(纬纱)、弯曲强度(经纱)、弯曲强度(对角线)、纬纱强度、对角线张力与织物悬垂系数、悬垂波数、悬垂均匀度密切相关,用悬垂指标表示虚拟参数,得出 6 个回归方程,实现真实与虚拟织物间悬垂效果的转换。
关键词: CLO 3D 软件;机织黏合衬;虚拟织物;图像处理;悬垂性;织物模拟
中图分类号: TS 941.41; TS 101.92.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2023)04-0290-11

Simulation of the Overhang Effect of Woven Adhesive Lining Based on CLO 3D

ZHANG Yue¹, CHEN Weiting¹, WANG Lijun^{*1,2,3}

(1. School of Fashion Design and Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Apparel Engineering Research Center of Zhejiang Province, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 3. Key Laboratory of Silk Culture Heritage and Products Design Digital Technology, Ministry of Culture and Tourism, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: This paper selected 13 kinds of woven adhesive lining commonly used in polyester fiber fabrics, and tested their drapability by fabric drapability tester. The CLO 3D virtual fitting system was used to realize the 3D simulation of fabric. The fabric overhang image and related data were extracted by SPSS, Matlab and Python mathematical statistical software. And the correlation test and regression analysis were used to obtain the relationship between the performance parameters of virtual fabric and fabric overhang. The results show that the density, bending strength (weft), bending strength (warp), bending strength (diagonal), weft strength and diagonal tension of the virtual fabric are closely related to the overhang coefficient, overhang wave number and overhang uniformity of the fabric. The virtual parameters are represented by the overhang index, and six regression equations are obtained to realize the conversion of the overhang effect between real and virtual fabrics.
Key words: CLO 3D software, woven adhesive lining, virtual fabric, image processing, drapability, cloth simulation

收稿日期:2022-10-23; 修订日期:2023-05-09。
基金项目:国家自然科学基金项目(11471287);中国纺织工业协会项目(J201801);教育部产学研合作协同育人项目(220602005245313);浙江理工大学科研启动基金项目(17072191-Y);浙江省“十四五”研究生课程思政示范课程项目(SSW-ykcsz2022023);浙江理工大学课程思政示范课程建设项目(sfkc202210)。
作者简介:张 钊(1998—),女,硕士研究生。
* 通信作者:王利君(1971—),女,教授,硕士生导师。主要研究方向为舒适性 with 功能服装、数字化服装技术。
Email:wanglijunhz@zstu.edu.cn

在数字化时代,虚拟面料应用技术水平不断提升,现阶段虚拟软件里的面料建模主要是由质点生成网络模型,再通过控制每个点的属性来调整网络的力学性能,实现真实面料与虚拟面料之间的转换^[1]。织物悬垂性能对虚拟服装的美观性影响很大,虽然面料三维建模在视觉研究上有很好的展现,但是在仿真方面有许多来自用户的负面反馈,悬垂造型与真实面料相比有较大的差异是其中之一。

学者们对虚拟面料仿真性能研究有很多,近几年来,越来越多研究人员通过虚拟面料悬垂性能技术来展现面料细节,如余志才等^[2]、ZIMMERLING C 等^[3]、VIDAURRE R 等^[4]运用 BP 神经网络和卷积神经网络从不同角度对虚拟织物悬垂性能进行预测与模拟实验。基于三维软件对虚拟织物悬垂性能的研究,主要对 Autodesk Maya^[5-6]、CLO 3D^[7] 软件中的面料仿真参数进行调整、转换,使面料设置在一定程度上更加简单、便捷。但是在 CLO 3D 软件中,由于粒子网络模拟各项参数和物理属性不能相关联^[1],因此,它在展现服装面料穿着质感时,必须通过粘衬、硬化、冷冻、固定针等技巧性工具来实现,增加了操作难度和复杂度。从模拟面料类型看,陈彩云^[8]、戴济晏等^[9]、周琦等^[10]、袁小军等^[11]、吕雪珊等^[12]从常见面料(如棉、麻、丝、毛、涤纶等)进行模拟研究,但并没有涉及粘衬类织物,而黏合衬拥有其他常见面料无可替代的作用。就悬垂

性能而言,黏合衬会影响服装的保形性和外观风格^[13],因此在现实服装生产中普遍应用。而在 3D 服装建模软件中想要尽可能还原实体服装的展示效果,则需要利用其他操作工具来细化模拟,且在虚拟试衣软件中“粘衬”及“粘衬条”工具都是 3D 服装建模的必要环节,很大程度上影响虚拟服装的悬垂性能。另外,若是虚拟面料参数的精度设置不当,衣片与模特之间产生碰撞时则会出现不同程度的变形,导致织物的外观效果有误差,而黏合衬的加入能够帮助用户在服装建模软件中更真实地模拟出面料成衣状态下不同风格的悬垂仿真效果,故而文中选取机织黏合衬作为研究对象,具有较大的实用价值。

文中以市面上几种常用于涤纶面料的不同线密度的机织黏合衬为研究对象,并将其转换为与 CLO 3D 软件相适配的虚拟织物,将得到的虚拟参数与真实织物悬垂指标进行对比,分析两者间的差异性和相关性,建立两者间的回归方程,最终以真实织物的悬垂指标来进行虚拟织物悬垂效果模拟,方便用户在使用软件时进行面料的数值转换。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料 选取 13 种线密度不同的常用于涤纶纤维面料的机织黏合衬,并将面料沿纬纱、经纱以及 45°角方向裁剪为 220 mm×30 mm 的试样。试样基本参数见 1。

表 1 试样基本信息
Tab.1 Basic sample information

编号	品名	线密度/tex	经密/(根/dm)	纬密/(根/dm)	面密度/(g/m ²)	厚度/mm
1 [#]	全工艺 PA	1.67	250	440	0.11	0.15
2 [#]	全工艺 PA	2.22	240	430	0.14	0.17
3 [#]	ZHPA	3.33	180	380	0.20	0.24
4 [#]	ZH50PA		180	390	0.18	0.19
5 [#]	ZWPES		200	390	0.19	0.20
6 [#]	ZH50PA	5.56	160	360	0.29	0.24
7 [#]	ZWPES		160	340	0.28	0.24
8 [#]	全工艺 PA		180	380	0.32	0.25
9 [#]	ZH50PA	8.33	100	290	0.33	0.28
10 [#]	ZWPES		170	310	0.35	0.28
11 [#]	全工艺 PA		190	280	0.44	0.37
12 [#]	全工艺 PA	11.11	170	270	0.47	0.42
13 [#]	全工艺 PA	16.67	160	260	0.47	0.45

注:PA 为聚酰胺,PES 为聚酯,以上 13 种黏合衬均为短纤,依照国家标准及设备要求,为减小实验误差和数据波动,所有试样都在温度(20±2)℃、相对湿度(65±2)%的条件下放置 24 h。

1.1.2 仪器 XY 系列精密电子天平,常州幸运电子设备有限公司制造;YG(B)141D 型号数字式织

物厚度仪、YG(B)022D 型号自动织物硬挺度试验仪、YG(B)811E 型号织物悬垂性能测试仪,均为温

州大荣纺织仪器有限公司制造; YG026PC_250 型号电子强力机,温州方圆仪器有限公司制造; CLO 面料测量仪 (CLO Fabric Kit, 包括称重仪、测量厚度仪、测量弯曲刚度仪), 上海协伦科技有限公司制造。

1.2 实验方法

1.2.1 真实织物的悬垂性测试 将试样裁剪成直径为 30 cm 且圆心处有 5 mm 孔洞的圆环, 并采用伞式投影法将试样置于 18 cm 的夹持盘间进行图像采集操作。经过旋转及静置的预处理后, 数码相机将会记录下试样静止状态悬垂图像以及特定速度旋转状态下的织物悬垂图像。实验过程中, 样品预先在特定转速下旋转, 之后静置一段时间, 以消除织物初始状态时存在的内外力干扰。

实验结束后, 提取 4 项基本悬垂指标, 将静态悬垂系数、静态悬垂性均匀度、静态悬垂波数、静态投影周长的结果进行整理, 其数据均为平均值, 测试所得悬垂指标见表 2。悬垂指标计算方法如下。

表 2 真实织物悬垂指标数据
Tab.2 Drape indicator data of the real fabrics

悬垂指标					悬垂指标				
编号	悬垂系数/ %	悬垂性均 匀度/%	悬垂波数/ 个	投影周长/ cm	编号	悬垂系数/ %	悬垂性均 匀度/%	悬垂波数/ 个	投影周长/ cm
1 [#]	16.93	17.95	7	80.07	8 [#]	14.06	10.77	8	77.45
2 [#]	12.87	17.54	9	79.05	9 [#]	27.58	14.81	7	82.89
3 [#]	17.71	11.11	8	82.12	10 [#]	21.41	15.56	7	83.05
4 [#]	18.04	12.40	8	83.00	11 [#]	22.01	13.45	7	83.64
5 [#]	14.93	19.60	8	83.14	12 [#]	24.53	11.64	7	84.82
6 [#]	14.84	12.20	8	77.88	13 [#]	25.70	18.79	7	85.12
7 [#]	18.04	12.64	8	81.60					

1.2.2 虚拟织物悬垂性测试

1) 虚拟悬垂仪的建立。参考真实伞式投影实验台的结构和原理, 按照测量织物悬垂性的国家标准, 通过 CLO 3D 将悬垂仪模型简化成上下底直径及高度均为 18 cm 的圆柱体, 在其中一端面的中心设置一个直径 2 cm 的定位柱, 再以.obj 的格式导出模型, 将文件设置成“虚拟模特”格式并导回 CLO 3D。虚拟伞式投影实验台如图 1 所示。

2) 虚拟织物悬垂模拟。使用 CLO 面料测量仪和 Emulator 工具能够实现真实织物的数字化模拟, 对面料的质量和厚度、弯曲强度、拉伸强度进行测量, 并将其测量值录入系统。

1) 静态悬垂系数:

$D = (A_s - A_d) / (A_0 - A_d)。$ (1)

式中: D 为悬垂系数, 用% 表示; A_0 为未悬垂试样的初始面积, 单位为 cm^2 ; A_d 为夹持盘的面积, 单位为 cm^2 ; A_s 为试样悬垂状态时的投影面积, 单位为 cm^2 ; A_s 为试样悬垂状态时的投影面积, 单位为 cm^2 。

2) 静态悬垂性均匀度:

$V_s = \frac{\sum_{i=1}^N |S_i - \bar{S}|}{N \times \bar{S}}。$ (2)

式中: V_s 为静态悬垂性均匀度 (或织物两波谷之间面积的平均差系数), 用% 表示; N 为悬垂波数, 单位为个; S_i 为实测每两个波谷之间的面积, 单位为 cm^2 ; \bar{S} 为波谷之间面积的平均值, 单位为 cm^2 。

3) 静态悬垂波数: 表示试样在悬垂状态所表现出的波纹或折曲数量。

静态投影周长: 表示实验在悬垂状态时, 投影图中边沿的闭合曲线长度, 单位为 cm。

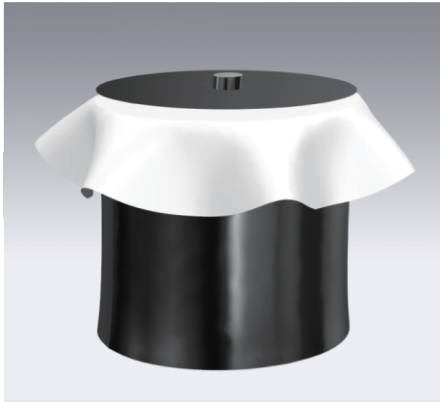


图 1 虚拟伞式投影实验台
Fig.1 Virtual umbrella projection bench

虚拟服装的悬垂感及其他外观质感大部分是由属性编辑器中的细节设置决定,将录入Emulator系统的虚拟织物在虚拟伞式投影实验台上进行织物悬垂模拟,并利用 CLO 面料测试仪测量机织黏合衬的物理属性,同时将数据录入到 CLO 3D 软件自带的 Emulator 系统中,而后将建立的面料格式转换

为 CLO 3D 所对应的面料文件格式. zfab,并重新在软件中打开文件,进一步得到虚拟面料的其他参数。最后通过 CLO 3D 自带的渲染工具,将织物悬垂性的投影轮廓图像以仰角视角导出。虚拟模拟织物具体参数见表 3。虚拟织物具体参数说明见表 4。

表 3 虚拟织物参数
Tab.3 Virtual fabric parameters

编号	纬纱强度	经纱强度	对角线张力	弯曲强度			变形率			变形强度			内部阻尼	密度	摩擦系数
				纬纱	经纱	对角线	纬纱	经纱	对角线	纬纱	经纱	对角线			
1 [#]	28	48	0	8	9	8	30	30	30	25	25	25	1	0	3
2 [#]	27	39	0	10	10	10	30	30	30	25	25	25	1	0	3
3 [#]	34	8	1	13	14	13	30	30	30	25	25	25	1	0	3
4 [#]	24	42	0	13	14	13	30	30	30	25	25	25	1	0	3
5 [#]	22	17	0	13	13	13	30	30	30	25	25	25	1	0	3
6 [#]	40	30	1	20	19	20	30	30	30	25	25	25	1	1	3
7 [#]	35	46	2	19	19	21	30	30	30	25	25	25	1	1	3
8 [#]	40	35	1	21	21	21	30	30	30	25	25	25	1	2	3
9 [#]	39	63	9	23	26	21	30	30	30	25	25	25	1	2	3
10 [#]	37	53	1	25	25	25	30	30	30	25	25	25	1	2	3
11 [#]	38	38	3	28	28	28	30	30	30	25	25	25	1	4	3
12 [#]	37	38	2	28	28	28	30	30	30	25	25	25	1	4	3
13 [#]	32	30	2	29	28	29	30	30	30	25	25	25	1	4	3

表 4 虚拟织物参数说明
Tab.4 Description of virtual fabric parameter

虚拟参数	说明
纬纱(强度),经纱(强度),对角线张力	分别调节织物经、纬、斜 3 个方向的伸缩阻力,表现出硬挺和褶皱的面料质感
弯曲强度(纬纱),弯曲强度(经纱), 弯曲强度(对角线)	表现出织物的硬挺程度,提高弯曲强度值,面料变硬;降低弯曲强度值,面料变软
变形率(纬纱),变形率(经纱), 变形率(对角线)	表现织物在承受一定外力作用时的弯曲特点,变形率越大,面料越容易在较小力的作用下产生弯曲形态
变形强度(纬纱),变形强度(经纱), 变形强度(对角线)	表现出织物各个起伏角的弯曲强度,变形强度越高,织物的棱角形态越不容易弯曲
内部阻尼	影响服装的抖动速度,即拉拽虚拟面料时的拉长或收缩的速度快慢,内部阻力越大,服装抖动速度越慢
密度	代表织物每单位面积的质量,设定数值越大,织物越重
摩擦系数	代表面料与人体或其他物件表面产生相对移动时所产生的摩擦力

注:文中所出现的虚拟织物参数都如上表所示。

2 结果与分析

2.1 真实织物与虚拟模拟织物的悬垂效果比较

2.1.1 图像轮廓处理与数据提取 为便于真实织物与虚拟织物悬垂轮廓对比,利用 Python 对投影图

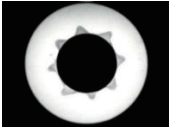


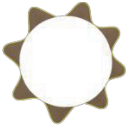

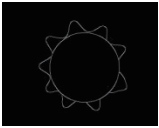
进行轮廓提取及数据处理编码操作,运用到的包(Package)有 opencv-python,numpy,matplotlib,使用 cvtColor() 函数进行灰度化处理,再利用 threshold() 函数进行图像二值化,最后采用 Canny 算子进行轮廓提取。

利用 Matlab 软件根据检测图细胞的数量来计算出真实与虚拟织物的悬垂投影面积及周长。将处理投影二值图的二值掩膜用 `srel()` 函数和 `imdilate()` 函数进行膨胀,用 `imfill()` 函数填充空洞,用

`imclearborder()` 清除边缘,最后将处理后的图像进行连通区域检测,得到真实织物与虚拟织物的投影面积、周长及轮廓图。相关投影轮廓图案提取示意图见表 5。

表 5 悬垂投影图提取示意

Tab.5 Schematic diagram of draping projection map extraction

真实织物			虚拟织物		
悬垂投影图	轮廓图	悬垂投影图	导出图	灰度图	轮廓图
					

2.1.2 图像相似度比较 利用 pHash 算法(感知哈希算法)对真实、虚拟织物图像进行对比,其具体步骤为:

1) 图像灰度化,去色,将图像转为 256 级灰度图;

2) 将图片缩小到 32×32 像素,去除图片细节的高频部分,留下图片结构的低频部分,压缩数据量,便于计算^[14];

3) 进行二维离散余弦变换(DCT 变换),得到 32×32 的 DCT 系数矩阵,直接运用 Matlab 中的 `dct2` 函数进行二维离散余弦变换,语法为 `B = dct2(A,m,n)`,计算公式如下:

$$F(u,v) = c(u)c(v) \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(i,j) \cos\left[\frac{(i+0.5)\pi}{N}\right] \times \cos\left[\frac{(j+0.5)\pi}{N}\right], \quad (3)$$

$$c(u) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{N}}, u=0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}}, u \neq 0 \end{cases}。 \quad (4)$$

式中: $F(u,v)$ 为 DCT 变换后的系数; u,v 为离散频率变量; $f(i,j)$ 为原始信号,即图像在 i 行 j 列的像素值; N 为原始信号的点数; $c(u),c(v)$ 为补偿系数。

4) 缩小 DCT,保留左上方 8×8 的矩阵,并计算其平均值。在缩小 DCT 计算中,将数据空间冗余最小化,能量(低频变量)聚集在左上方,如图 2 所示。

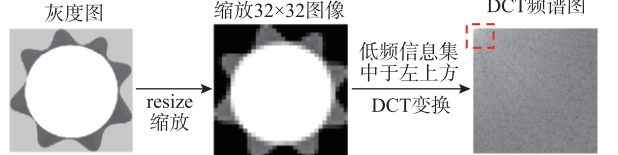


图 2 DCT 原理说明流程

Fig.2 Principle explanation process of DCT

由于人对细节信息不敏感,在识别相同级别图

像时,只需要频谱中的低频信息,所以一般在 Phash 图像处理中截取左上方 8×8 矩阵^[15-16]。

5) 将每个像素的灰度与平均值比较,相当于二值化,大于或等于均值记为 1,小于均值记为 0,从而得到 pHash8×8 指纹图;

6) 比较两幅 pHash 指纹图,计算汉明距离及不同数据位数,得出图像间的差异,汉明距离越大表示图像相似度越小,一般不超过 5 说明两张图像非常相似,超过 10 则为两张不同的图片^[17-18]。汉明距离 d 计算公式如下:

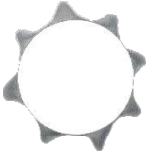


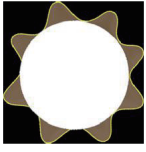


$$d(x,y) = \sum x[i] \oplus y[i]。 \quad (5)$$

式中: x,y 为 n 位的编码; $i=0,1,\cdots,n-1$; \oplus 表示异或。

运用 pHash 算法对织物轮廓输出图进行处理,具体见表 6。

表 6 pHash 算法输出图像处理

Tab.6 pHash algorithm outputs image contour processing

织物分类	原图	缩放32×32图	pHash指纹图
真实织物			
虚拟织物			

通过 Matlab 计算,得到 13 个样本平均汉明距离为 4.23,其中,1 个薄型织物(即 1[#]织物)、3 个中厚型织物(即 6[#],7[#],9[#]织物)、2 个厚型织物(即 12[#],13[#]织物),所有厚型织物汉明距离不超过 5,相似度较高,织物模拟效果最佳,其余织物的汉明距离皆不超过 10,织物模拟效果较好,计算结果见表 7。

表 7 真实织物与虚拟织物轮廓 pHash 算法数据

Tab.7 Data of the pHash algorithm for real fabrics and virtual fabric profiles

编号	汉明距离	编号	汉明距离	编号	汉明距离
1 [#]	4	6 [#]	2	11 [#]	6
2 [#]	7	7 [#]	3	12 [#]	3
3 [#]	5	8 [#]	5	13 [#]	1
4 [#]	6	9 [#]	2	平均值	4.23
5 [#]	6	10 [#]	5		

2.1.3 图像差异性比较

1)误差分析。将提取出的真实、虚拟织物的投影面积(S_1,S_2)和周长(C_1,C_2)进行误差分析,两者

数据见表 8。

$$\text{投影面积误差} = \frac{|S_1 - S_2|}{S_1} ;$$

(6)

$$\text{投影周长误差} = \frac{|C_1 - C_2|}{C_1} 。$$

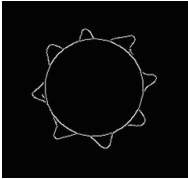
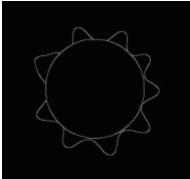
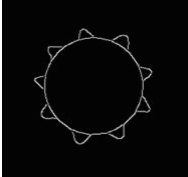
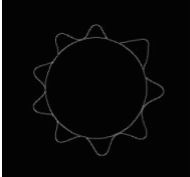
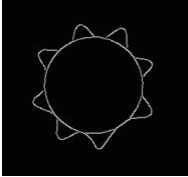
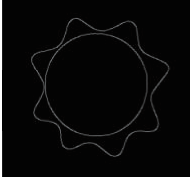
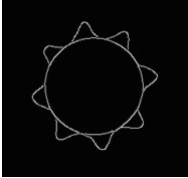

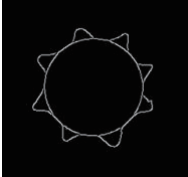
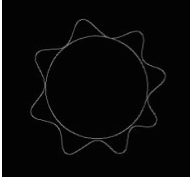
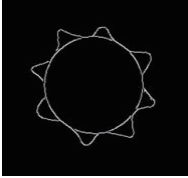
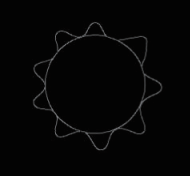
(7)

通过式(6)和式(7)求取真实与虚拟织物的投影面积和周长的误差,并得出平均误差,具体见表 9。

由计算分析得出:投影面积误差比投影周长大;投影面积误差薄型粘衬织物比中厚型和厚型粘衬织物模拟误差大、效果差,符合 2.1.2 投影面积和周长相似度对比数据;而投影周长厚型粘衬织物模拟最优、误差最小。

表 8 真实织物与虚拟织物图像轮廓和数据

Tab.8 Real fabric and virtual fabric image contour processing data

编号	真实织物			虚拟织物		
	轮廓图	投影面积(S_1)	投影周长(C_1)	轮廓图	投影面积(S_2)	投影周长(C_2)
1 [#]		15 887	563.110		17 050	602.105
2 [#]		15 085	537.879		17 487	611.234
3 [#]		16 624	577.122		19 562	591.452
4 [#]		16 414	569.843		19 308	592.942
5 [#]		15 705	554.949		18 341	597.283
6 [#]		16 268	560.077		17 487	611.234

续表						
编号	真实织物			虚拟织物		
	轮廓图	投影面积(S_1)	投影周长(C_1)	轮廓图	投影面积(S_2)	投影周长(C_2)
7 [#]		16 352	568.841		17 756	609.465
8 [#]		16 014	561.522		1 7487	611.234
9 [#]		18 173	570.562		18 885	589.782
10 [#]		20 697	621.947		19 180	599.980
11 [#]		1 7598	589.832		18 988	594.281
12 [#]		18 134	586.936		18 411	583.670
13 [#]		18 067	579.791		18 648	589.236

注:由于以像素点计数,此处涉及的投影面积和周长无单位。								
表 9 真实织物与虚拟织物投影面积、周长误差统计								
Tab.9 Statistical table of real fabric and virtual fabric projection area and perimeter error								
编号	投影面积 误差/%	投影周长 误差/%	编号	投影面积 误差/%	投影周长 误差/%	编号	投影面积 误差/%	投影周长 误差/%
1 [#]	7.32	6.92	6 [#]	7.49	9.13	11 [#]	7.90	0.75
2 [#]	15.92	13.64	7 [#]	8.59	7.14	12 [#]	1.53	0.56
3 [#]	17.67	2.48	8 [#]	9.20	8.85	13 [#]	3.22	1.63
4 [#]	17.63	4.05	9 [#]	3.92	3.37	平均误差/%		5.36
5 [#]	16.78	7.63	10 [#]	7.33	3.53			

2) 配对样本 t 检验。当前样本量小于 30, 先对数据进行正态性检验, 对真实织物和虚拟织物的投影周长和面积进行检验, 并提出 2 个假设:

H_1 : 真实织物与虚拟织物的投影面积间差值的平均值为零;

H_2 : 真实织物与虚拟织物的投影周长间差值的平均值为零。

配对样本统计数据见表 10。配对样本相关性见表 11。配对样本检验见表 12。

表 10 配对样本统计
Tab.10 Paired sample statistics

投影图像配对		平均值	个案数	标准偏差	标准误差平均值
配对 1	真实投影面积	18 107.769 2	13	1 360.876 69	377.439 28
	虚拟投影面积	18 591.769 2	13	855.889 42	237.381 01
配对 2	真实投影周长	593.955 8	13	25.563 69	7.090 09
	虚拟投影周长	602.112 7	13	10.456 69	2.900 17

表 11 配对样本相关性
Tab.11 Paired sample correlation

投影图像配对	个案数	相关性(r)	显著性(p)
配对 1 真实投影面积与虚拟投影面积	13	0.794	0.001
配对 2 真实投影周长与虚拟投影周长	13	0.035	0.911

表 12 配对样本检验结果
Tab.12 Paired sample testing results

投影图像配对		配对差值					t	自由度 (df)	Sig. (双尾)
		平均值	标准偏差	标准 误差平均值	差值 95%置信区间				
					下限	上限			
配对 1	真实投影面积 虚拟投影面积	-484.00	856.88	237.66	-1 001.81	33.81	-2.04	12	0.064
配对 2	真实投影周长 虚拟投影周长	-8.16	27.28	7.57	-24.64	8.33	-1.08	12	0.302

采用配对样本 t 检验判断真实织物对虚拟织物投影面积、周长的影响, 结果显示配对 1 中 $p < 0.05$, 说明真实织物和虚拟织物投影面积在 0.05 显著性水平下有明显差异, 且 $r = 0.794 \in [0.7, 1]$, 呈现出强相关关系, 符合原假设 H_1 ; 而配对 2 中 $p > 0.05$, 则说明真实织物和虚拟织物投影周长无明显差异, 不符合原假设 H_2 。

比较平均值得出虚拟投影面积和周长要高于真实投影面积和周长, 且虚拟织物投影周长优于投影面积的仿真模拟。

2.2 真实织物与虚拟模拟织物悬垂性相关分析

剔除表 4 中的不变数据(包括虚拟织物经纬纱变形率、经纬纱变形强度、内部阻尼、摩擦系数), 使用 SPSS 对真实织物悬垂指标与虚拟织物参数进行

相关性分析, 其中置信水平为 95%, 通过散点图绘制及正态分布检验对数据进行处理, 选择合适的相关性处理方法。

将需要验证的两组数据进行线性关系判断和正态性检验, 由于本研究样本量只有 13 项, 分析数据倾向于采用夏皮罗-威尔克(Shapiro-Wilk)检验结果, 若两组数值都满足 Sig. > 0.05 , 即在置信水平 95% 以上, 则表明变量满足正态分布, 使用皮尔逊检测; 反之则为非正态分布, 选择斯皮尔曼检测, 并将悬垂波数、悬垂系数、悬垂均匀度、投影周长分别作为自变量, 将密度、纬纱强度、经纱强度、弯曲强度(纬纱)、弯曲强度(经纱)、弯曲强度(对角线)、对角线张力作为因变量, 得出其中的关系。真实悬垂指标与虚拟指标相关性检测数据见表 13。

表 13 悬垂指标与虚拟指标相关性检测

Tab. 13 Overhang indicator correlation detection with virtual indicator

悬垂指标	悬垂波数		悬垂系数		悬垂均匀度		投影周长	
虚拟参数	相关系数(<i>r</i>)	Sig.	相关系数(<i>r</i>)	Sig.	相关系数(<i>r</i>)	Sig.	相关系数(<i>r</i>)	Sig.
密度	-0.663*	0.014	0.652*	0.016	-0.122	0.691	0.495	0.085
纬纱强度	-0.270	0.373	0.356	0.232	-0.597*	0.031	-0.157	0.609
经纱强度	-0.365	0.220	0.405	0.169	0.052	0.867	0.022	0.943
弯曲强度 (纬纱)	-0.625*	0.022	0.717**	0.006	-0.214	0.483	0.475	0.101
弯曲强度 (经纱)	-0.626*	0.022	0.783**	0.002	-0.232	0.446	0.504	0.079
弯曲强度 (对角线)	-0.591*	0.033	0.675*	0.011	-0.232	0.446	0.166	0.109
对角线 张力	-0.555*	0.049	0.744**	0.004	-0.213	0.484	0.372	0.210

注：* 表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著；* * 表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著。

由表 13 分析得出,密度、弯曲强度(纬纱)、弯曲强度(经纱)、弯曲强度(对角线)、对角线张力与悬垂波数显著相关,且都为负相关;密度、弯曲强度(纬纱)、弯曲强度(经纱)、弯曲强度(对角线)、对角线张力与悬垂系数显著相关,为正相关;纬纱强度与悬垂均匀度显著相关,为负相关。

2.3 真实与虚拟模拟织物性能转换模型建立

结合表 2、表 3 数据及 2.2 相关性检测结果,在 SPSS 中建立多元线性回归模型,其中,因变量 Y 为虚拟数,可假设:密度为 Y_1 ,建立模型为模型 1;弯曲强度(纬纱)为 Y_2 ,建立模型为模型 2;弯曲强度(经纱)为 Y_3 ,建立模型为模型 3;弯曲强度(对角线)为 Y_4 ,建立模型为模型 4;纬纱强度为 Y_5 ,建立模型为模型 5;对角线张力为 Y_6 ,建立模型为模型 6。自变量 X 为悬垂指标,可假设:悬垂系数为 X_1 ,悬垂性均匀度为 X_2 ,悬垂波数为 X_3 ,投影周长为 X_4 。模型方程假设公式为:

$$Y(Y_1,Y_2,Y_3,Y_4,Y_5,Y_6) = A + aX_1 + bX_2 + cX_3 + dX_4。$$

(8)

式中: A 为常量; a,b,c,d 为系数。

R^2 表示模型的拟合能力,其范围为 $[0,1]$,当数值越接近 1,说明回归拟合越好。回归模型分析见表 14。根据表 14 可知,模型 1、模型 2、模型 3、模型 4、模型 5、模型 6 中自变量 X 对因变量 Y 分别有 53.2% ,51.9% ,61.6% ,46.1% ,35.6% ,56.7% 的解释能力, $R^2 \in [0,1]$ 。回归系数分析见表 15。根据表 15 中共线性统计的 VIF(方差膨胀系数)分析,当 $VIF < 10$ 时不存在多重共线问题,由此可以建立回归模型方程:

$$Y_1 = 2.601 + 0.179X_1 - 0.590X_3；$$

(9)

$$Y_2 = 10.342 + 0.961X_1 - 1.248X_3；$$

(10)

$$Y_3 = 6.199 - 1.066X_1 - 0.925X_3；$$

(11)

$$Y_4 = 12.340 + 0.883X_1 - 1.313X_3；$$

(12)

$$Y_5 = 50.619 - 1.194X_2；$$

(13)

$$Y_6 = 0.511X_1 + 1.305X_3 - 18.021。$$

(14)

表 14 回归模型分析

Tab. 14 Regression model analysis

模型	R^2	调整后 R^2	标准估算的错误	德宾-沃森
1	0.532	0.439	1.208 82	1.676
2	0.519	0.423	5.496 28	1.369
3	0.616	0.539	4.781 13	1.318
4	0.461	0.353	5.782 75	1.266
5	0.356	0.298	8.181 42	0.915
6	0.567	0.480	1.726 15	1.492

表 15 回归系数分析
Tab.15 Regression coefficient analysis

模型	预测变量	未标准化系数		标准化系数	共线性统计	
		B	标准错误	Beta	容差	方差膨胀系数 VIF
1	(常量)	2.601	8.921			
	X_1	0.179	0.125	0.524	0.352	2.840
	X_3	-0.590	0.904	-0.238	0.352	2.840
2	(常量)	10.342	40.564			
	X_1	0.961	0.566	0.627	0.352	2.840
	X_3	-1.248	4.110	-0.112	0.352	2.840
3	(常量)	6.199	35.286			
	X_1	1.066	0.493	0.714	0.352	2.840
	X_3	-0.925	3.576	-0.085	0.352	2.840
4	(常量)	12.340	42.679			
	X_1	0.883	0.596	0.580	0.352	2.840
	X_3	-1.313	4.325	-0.119	0.352	2.840
5	(常量)	50.619	7.162			
	X_2	-1.194	0.484	-0.597	1.000	1.000
6	(常量)	-18.021	12.740			
	X_1	0.511	0.178	1.008	0.352	2.840
	X_3	1.305	1.291	0.354	0.352	2.840

注: B 为非标准化回归系数; Beta 为常数是 0 时的回归系数值。

3 结 语

文中基于虚拟织物的悬垂效果模拟研究,从机织黏合衬的真实织物悬垂性能和虚拟织物性能参数为出发点,分析其中的差异性与相关性,从而建立回归模型。研究结果验证了涤纶机织黏合衬悬垂虚拟化的可行性,为虚拟织物悬垂效果模拟研究提供了思考方向,提高了 CLO 3D 软件的使用效率与操作便利性。

1)利用 3D 建模软件对真实伞式投影实验台进行建模,并采用 CLO 面料测量仪和 Emulator 工具转化得到虚拟涤纶机织黏合衬,从而获得对应的虚拟参数指标及虚拟悬垂效果模拟图像数据,对比 YG(B)811E 织物悬垂性能测试仪测试出的 4 个悬垂指标,并根据 Matlab 及 Python 语言对数据进行差异性 & 相似性分析,得出厚型织物在模拟时效果优于中厚型和薄型织物。

2)根据配对样本 *t* 检验和相关性检测的结果,表明模拟织物与真实织物悬垂指标密切相关的虚拟参数为密度、弯曲强度(纬纱)、弯曲强度(经纱)、弯曲强度(对角线)、纬纱强度、对角线张力。同时,将 3 个真实织物悬垂指标与 6 个虚拟参数建立数学模型,得到 6 个回归方程,说明可以通过真实织物的

悬垂指标对织物的虚拟参数进行计算转换,从而达到织物快速模拟的目标。

参考文献:

[1] 王会威,张辉. 基于 CLO 3D 的织物悬垂性模拟影响因素分析[J]. 纺织科技进展, 2015(5): 12-14.
WANG Huiwei, ZHANG Hui. The influencing factors analysis of fabric draping simulation based on CLO 3D [J]. Progress in Textile Science and Technology, 2015 (5): 12-14. (in Chinese)

[2] 余志才,钟跃崎. 应用人工神经网络分析织物的形态与性能之间的关系[J]. 毛纺科技, 2021, 49(5): 1-7.
YU Zhicai, ZHONG Yueqi. Analysis of the shape-property relationship of fabric by using artificial neural network[J]. Wool Textile Journal, 2021, 49(5): 1-7. (in Chinese)

[3] ZIMMERLING C, TRIPPE D, FENGLER B, et al. An approach for rapid prediction of textile draping results for variable composite component geometries using deep neural networks [C]//AIP Conference Proceedings, Proceedings of The 22nd International Esaform Conference on Material Forming: Esaform 2019. Vitoria-Gasteiz: AIP Publishing, 2019, 2113(1): 020007.

[4] VIDAURRE R, SANTESTEBAN I, GARCES E, et al. Fully convolutional graph neural networks for parametric virtual try-on[J]. Computer Graphics Forum, 2020, 39

- (8): 145-156.
- [5] 杜宇轩, 张辉. 基于 Autodesk Maya 的虚拟织物悬垂性影响因数分析[J]. 纺织科技进展, 2016(10): 11-14.
DU Yuxuan, ZHANG Hui. Analysis of the influencing factors of virtual textile drape property based on Autodesk Maya[J]. Progress in Textile Science and Technology, 2016(10): 11-14. (in Chinese)
- [6] 周琦, 杜宇轩, 张辉. 基于 Autodesk Maya 的虚拟织物悬垂性评价因子分析[J]. 纺织科技进展, 2018(10): 29-31.
ZHOU Qi, DU Yuxuan, ZHANG Hui. Factor analysis on the draping property evaluation of the virtual fabric based on Autodesk Maya[J]. Progress in Textile Science and Technology, 2018(10): 29-31. (in Chinese)
- [7] 韩新叶, 张辉. 基于 CLO 3D 的虚拟织物悬垂性能评价主因子分析[J]. 纺织科技进展, 2017(2): 32-34.
HAN Xinye, ZHANG Hui. Factor analysis on the draping property evaluation of the virtual fabric based on CLO 3D system[J]. Progress in Textile Science and Technology, 2017(2): 32-34. (in Chinese)
- [8] 陈彩云. 仿丝绸处理对涤纶织物悬垂性的影响[J]. 丝绸, 2018, 55(9): 15-20.
CHEN Caiyun. Influence of silk-like finishing on polyester fabric drapability[J]. Journal of Silk, 2018, 55(9): 15-20. (in Chinese)
- [9] 戴济晏, 徐伯俊, 张洪, 等. 黏胶仿真丝织物的服用性能测试与分析[J]. 丝绸, 2017, 54(1): 9-14.
DAI Jiyan, XU Bojun, ZHANG Hong, et al. Wearability test and analysis of viscose silk-like fabric[J]. Journal of Silk, 2017, 54(1): 9-14. (in Chinese)
- [10] 周琦, 张辉. 虚拟精纺毛织物的悬垂性能模拟研究[J]. 现代纺织技术, 2020, 28(2): 29-34.
ZHOU Qi, ZHANG Hui. Simulation study on drapability of virtual worsted fabrics[J]. Advanced Textile Technology, 2020, 28(2): 29-34. (in Chinese)
- [11] 袁小军, 陈晓东, 邱莉, 等. 基于图像处理的织物悬垂性综合评价[J]. 纺织科学与工程学报, 2020, 37(3): 19-24.
YUAN Xiaojun, CHEN Xiaodong, QIU Li, et al. Comprehensive evaluation of fabric drape based on image processing[J]. Journal of Textile Science and Engineering, 2020, 37(3): 19-24. (in Chinese)
- [12] 吕雪珊, 祝杭琪, 王雪琴. 真丝织物虚拟化的悬垂性对比研究[J]. 丝绸, 2022, 59(1): 38-45.
LYU Xueshan, ZHU Hangqi, WANG Xueqin. Comparative study on drapability of virtual silk fabrics[J]. Journal of Silk, 2022, 59(1): 38-45. (in Chinese)
- [13] 沈芳芳. PU 涂层面料与黏合衬的配伍研究[D]. 上海: 东华大学, 2013.
- [14] SRIVASTAVA M, SIDDIQUI J, ALI M A. A review of hashing based image copy detection techniques[J]. Cybernetics and Information Technologies, 2019, 19(2): 3-27.
- [15] ROMA N, SOUSA L. A tutorial overview on the properties of the discrete cosine transform for encoded image and video processing[J]. Signal Processing, 2011, 91(11): 2443-2464.
- [16] BEGUM M, UDDIN M S. Digital image watermarking techniques; a review[J]. Information, 2020, 11(2): 110.
- [17] 刘婉婷, 梁晓萍, 张瀚匀. 基于感知哈希的图像检索系统[J]. 现代计算机, 2021, 27(24): 136-139, 143.
LIU Wanting, LIANG Xiaoping, ZHANG Hanyun. Image retrieval system based on perceptual hashing[J]. Modern Computer, 2021, 27(24): 136-139, 143. (in Chinese)
- [18] SHEHU G S, ASHIR A M, ELEYAN A. Character recognition using correlation and hamming distance[C]//2015 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). Malatya: IEEE, 2015: 755-758.

(责任编辑:张 雪)