

# 膝关节角度及压力变化对女性腿部截面曲率的影响

师亚楠, 方琦, 陈郁\*

(上海工程技术大学 纺织服装学院, 上海 201620)

**摘要:**为研究膝关节角度、测量点压力两者对大腿根部曲率变化的影响,选取8名体型相近、腿型正常的青年女性进行实验。采用手持式三维人体扫描仪获取3个不同等级压缩袜下的大腿根部截面(包括前、后、外、内),再用压力测量系统分别测量4个点的曲率及相应压力,并分析穿着同一等级压缩袜时,不同膝关节角度与截面曲率关系,以及同一膝关节角度、测量点压力与截面曲率的关系。研究表明:穿着同一等级压缩袜且膝关节为 $100^\circ$ 时,后测量点曲率值最大,曲率随膝关节角度的增大而递减,膝关节角度与曲率的关系用二次函数可以准确描述;在膝关节角度不变时,穿着不同等级压缩袜,腿部受到各方向压力时截面形状逐渐趋近于圆形,测量点压力与截面曲率变化趋势一致且为正相关。该结论对压缩袜及紧身裤装的设计与制作具有一定的参考作用。

**关键词:** 压缩袜;膝关节角度;服装压;曲率

**中图分类号:** TS 941.17 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2022)02-0122-07

## Effect of Knee Joint Angle and Pressure Change on Sectional Curvature of Female Leg

SHI Yanan, FANG Qi, CHEN Yu\*

(School of Textiles and Fashion, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** To study the effect of knee joint angle and measuring point pressure on the curvature of thigh root, 8 young women with similar body shape and normal leg shape were selected for the experiment. Using a handheld 3D body scanner to obtain three different grades under compression stockings thigh root section (including front and back, outside and inside), with a pressure measurement system measuring the curvature of the four points and corresponding pressure respectively. When wearing the same grade compression socks, the relationship between different knee joint angles and sectional curvature, as well as the relationship between the same knee joint angle, measuring point pressure and sectional curvature were analyzed. The results show that when the knee joint angle is  $100^\circ$  and wearing compression socks of the same grade, the curvature value of the back measurement point is the largest, and the curvature decreases with the increase of the knee joint angle. The relationship between the knee joint angle and curvature can be accurately described by the quadratic function. When the knee joint angle remain unchanged, the sectional shape of the leg is gradually close to the circle when the leg is subjected to pressure from all directions. The pressure at the measurement point is positively correlated with the variation trend of the sectional curvature. The conclusion has a certain reference for the design and production of compression socks and tights.

**Key words:** compression stockings, knee angle, clothing pressure, curvature

收稿日期: 2021-06-21; 修订日期: 2022-03-21。

作者简介: 师亚楠(1995—), 女, 硕士研究生。

\* 通信作者: 陈郁(1977—), 男, 教授, 硕士生导师。主要研究方向为人工智能在服装设计中的应用等。

Email: 09180001@sues.edu.cn

压缩袜可以预防、缓解、治疗下肢静脉曲张,其应用原理是通过压缩袜在下肢形成自脚踝向上逐渐递减的梯度压力<sup>[1]</sup>,加快下肢的血液回流速度,减少静脉血瘀滞的症状。压缩袜的应用研究,早期多借助假肢或真腿进行静态实验,但随着计算机技术的提高,现已开始使用数学模型进行腿部压力预测。如夏明等<sup>[2]</sup>创建圆筒刚性模型研究穿着运动压缩裤前后腿部截面形态变化,发现服装压与曲率呈正相关,但其忽略了人体腿部是不规则曲面。覃蕊等<sup>[3]</sup>对男袜口腿部截面形态进行研究,通过曲线拟合获取二次曲线方程,为袜口处压力数学模型提供数据参考。侯昀彤等<sup>[4]</sup>研究人体静止站立时大腿止血点处截面曲率与压力分布的关系,发现大腿截面曲率与压力分布呈正相关关系,但忽略了人体腿部并非长期处于静止状态,在腿部姿势变换或者穿着压缩袜时截面曲率均会发生变化。

事实上不同部位腿部截面曲率会随着动作姿势的变化发生改变,这是研究腿部模型时不可忽略的因素。因此,文中将人体腿部膝关节的日常姿势及行走的动作角度进行分解,探究穿着压缩袜时不同膝关节角度下截面曲率的变化,为研究腿部模型在动态时截面曲率形态变化提供参考。

1 实验部分

1.1 原料与仪器

1.1.1 原料 实验选取符合 YY/T0853—2011 标准的 M 号型长筒压缩袜<sup>[5]</sup>,压力等级为 I 级(1.995 ~ 2.793 kPa)、II 级(3.059 ~ 4.256 kPa)、III 级(4.522 ~ 6.118 kPa),材质为氨纶、锦纶混纺,其中 I 级和 II 级压缩袜氨纶质量分数为 28%,锦纶质量分数为 72%,III 级压缩袜氨纶质量分数为 36%,锦纶质量分数为 64%。

1.1.2 仪器 采用德国 Novel Pliance X 服装压力测量系统,线性误差≤5%,具体如图 1 所示。同时使用先临三维科技股份有限公司生产的手持式三维人体扫描仪(Ein Scan Pro 2X Plus)获取腿部数据。

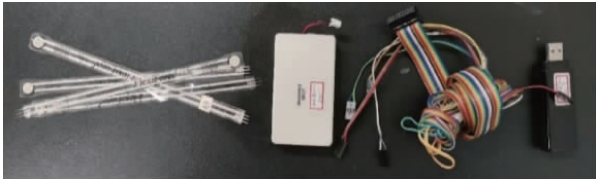


图 1 Flexi Force 柔性传感器及压力测量设备

Fig.1 Flexi force Flexible sensors and pressure measuring equipment

1.2 实验对象

选取 8 名年纪在 24 ~ 26 岁,身高 163 ~ 168 cm,体质量 47 ~ 54 kg,股下长 75 ~ 78.5 cm,身体健康、体型相似且腿部属于正常腿型的实验对象进行测试。

1.3 选取测量点

文中主要研究腿部截面曲率变形与膝关节角度、压力等的关系。腿部压力实验研究常采用 6 个截面,具体如图 2 所示。选择女性大腿根处即截面 G 进行研究,此截面处脂肪多,受到压迫及动作变化时曲率变化明显。

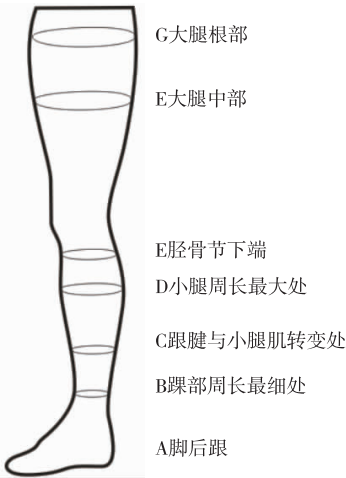


图 2 腿部横向测量截面示意

Fig.2 Cross section of leg transverse measurement

根据行走的单个步幅周期<sup>[6-7]</sup>及日常生活中膝关节不同姿势(如坐姿、驾车姿势等),将实验对象的最小膝关节角度设置为 90°,最大膝关节角度设为 180°,实验过程中膝关节弯曲角度以 10°进行划分,具体如图 3 所示。

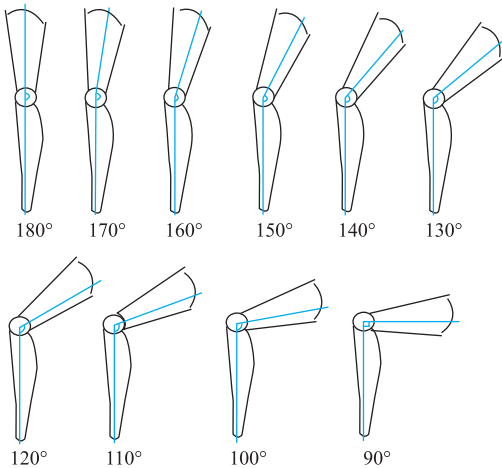


图 3 膝关节实验动作示意

Fig.3 Schematic diagram of knee joint experiment

1.4 实验过程

选取大腿截面前、后、内、外侧 4 个测量点并对轮廓点云进行坐标系区域划分,将 4 个区域内的轮廓点云以坐标轴原点为中心逆时针旋转 45°,并按逆时针顺序命名,其中区域 1 为  $\theta \in (45^\circ \sim 135^\circ]$ 、区域 2 为  $\theta \in (135^\circ \sim 225^\circ]$ 、区域 3 为  $\theta \in (225^\circ \sim 315^\circ]$  和区域 4 为  $\theta \in (315^\circ \sim 45^\circ] \cup (0^\circ, 45^\circ]$ , 具体如图 4 所示。

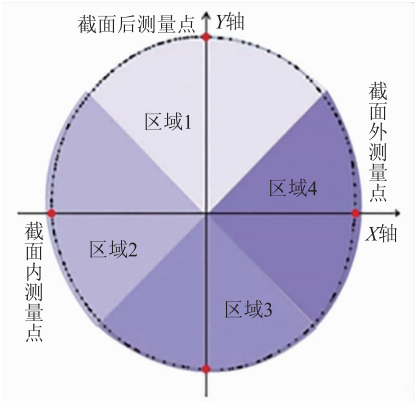


图 4 大腿根处截面轮廓点云的区域划分  
Fig. 4 Regional division of contour point cloud at the root of leg and thigh

实验开始前使用记号笔进行预定位,之后将传感器测试头固定在大腿根部同一水平截面的 4 个测量点位置,并使用多功能角度计确定膝关节角度值,同时保证小腿胫骨位置与地面保持垂直,之后开始进行测量,测量 3 次,保存记录压力趋于稳定状态时的压力值进而取平均值,具体见表 1。

表 1 大腿根部膝关节各角度压力测试平均值

Tab.1 Mean values of pressure test at different angles of thigh root and knee joint

膝关节 角度/(°)	I 级压缩 袜/kPa	II 级压缩 袜/kPa	III 级压缩 袜/kPa
90	0.96	1.28	1.53
100	1.01	1.41	1.70
110	1.09	1.43	1.77
120	1.22	1.59	1.87
130	1.24	1.53	1.77
140	1.28	1.41	1.67
150	1.09	1.34	1.80
160	1.26	1.46	1.63
170	1.02	1.33	1.66
180	0.93	1.30	1.59

2 结果与分析

2.1 数据预处理

为避免实验误差,影响实验准确度,对获取的点云数据进行去噪处理,以获取完整无噪的腿部点云数据。

在相同膝关节角度下,不同实验对象的腿部软组织截面会发生不同形状变化。以 I 级压缩袜下的大腿截面 G 为例,当不同实验对象的膝关节角度发生变化,其截面形状也随之变化,具体如图 5 所示。其中图 5(a)是两个实验对象的膝关节从 180°向 150°变化时截面 G 的变化;图 5(b)是同样的两个实验对象膝关节角度从 180°向 120°变化时截面 G 的变化;图 5(c)是膝关节角度从 180°向 100°变化时截面 G 的变化,经多组对比,选取特征数据最明显的实验者曲率数据进行分析。

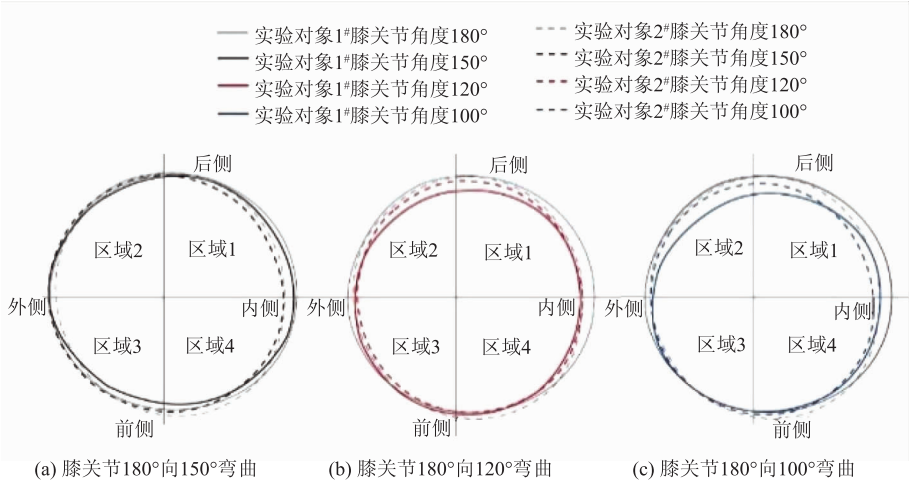


图 5 截面随膝关节角度变化的软组织变形

Fig.5 Soft tissue deformation of cross section changes with angle of knee joint

2.2 截面曲线的曲率计算

曲率是指针对曲线上某个点切线方向角对弧长的转动率,即曲线偏离直线的程度,其中曲线弯

曲程度随着曲率的增大而增加<sup>[8]</sup>。目前,已有科研人员对人体腿部截面曲率进行了初步探究,将穿着紧身裤装产生的服装压与腿部截面的曲率相结合,

并分析服装压力与腿部截面曲率的变化规律<sup>[3]</sup>。截面曲线的曲率计算公式为

$$K = \frac{|y''|}{(1+y'^2)^{3/2}}。$$

式中: $y'$ 为  $x$  关于  $y$  的一阶导数; $y''$ 为  $x$  关于  $y$  的二阶导数。

各区域每隔 4 点选取 1 点作为计算曲线方程的点云并删除其余点云。侯昀彤等<sup>[4]</sup>对大腿

截面进行曲线拟合发现,二元函数对腿部截面轮廓点云的拟合度最佳( $R > 0.98$ ),故选取各区域点云( $x, y$ )的坐标并以  $x$  为自变量、 $y$  为因变量,导入 SPSS 软件中进行二元方程拟合,获得截面前、后、内、外 4 个测量点  $y=f(x)$  的曲线方程组,将方程组代入曲率计算公式,可得所需曲率值。不同等级压缩袜在不同膝关节角度下的曲率数值见表 2。

表 2 不同等级压缩袜不同膝关节角度下曲率

角度/(°)	Ⅰ级压缩袜				Ⅱ级压缩袜				Ⅲ级压缩袜			
	前侧	外侧	后侧	内侧	前侧	外侧	后侧	内侧	前侧	外侧	后侧	内侧
90	0.175	0.132	0.168	0.146	0.164	0.154	0.186	0.150	0.159	0.145	0.163	0.148
100	0.178	0.131	0.203	0.099	0.186	0.160	0.194	0.157	0.164	0.151	0.167	0.146
120	0.159	0.130	0.169	0.132	0.160	0.140	0.165	0.136	0.159	0.140	0.163	0.135
130	0.159	0.136	0.170	0.136	0.159	0.137	0.167	0.132	0.156	0.133	0.163	0.136
140	0.158	0.122	0.166	0.128	0.154	0.140	0.162	0.134	0.153	0.145	0.155	0.139
150	0.157	0.139	0.161	0.133	0.162	0.137	0.168	0.128	0.155	0.134	0.157	0.138
180	0.151	0.121	0.143	0.140	0.149	0.125	0.153	0.141	0.153	0.125	0.151	0.139

2.3 膝关节角度与腿部截面曲率关系

2.3.1 膝关节角度对测量点曲率的影响 确定所受压力为定量,选取穿着同一等级压缩袜的实验对象,测量其大腿截面在膝关节各角度下的测量点曲率变化,具体如 6 图所示。由图 6 可知,不同等级压缩袜前、后测量点的曲率大于内、外测量点,且曲率随膝关节角度的增大而递减;内测量点曲率在 160°向 180°变化时,突然升高,可能是由于腿部直立,导致重心转移,曲率升高。

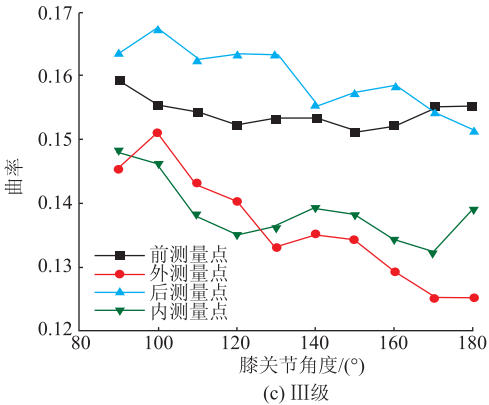
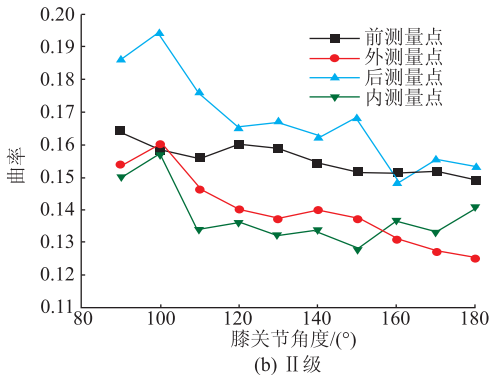
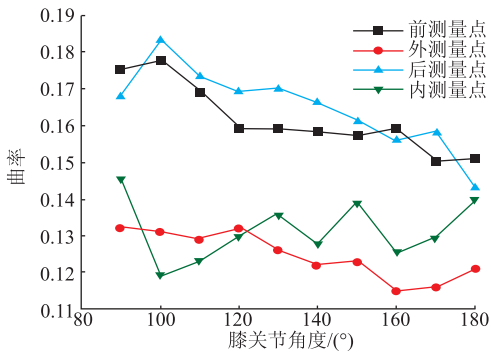


图 6 各级压缩袜下膝关节各角度的测量点曲率  
Fig.6 Measuring point curvature of knee joint under different compression hosiery

2.3.2 膝关节角度与测量点曲率的关系 为探究膝关节角度与曲率关系,利用 SPSS 软件对大腿根部截面测量点的曲率进行相关性分析,并采用线性、非线性拟合两者间的函数关系,最后根据不同函数模型中  $R^2$  值的大小选取合适的函数模型,具体见表 3。

由表 3 可知,膝关节角度与截面 G 前测量点曲率的相关性在 0.05 水平上,相关性显著;膝关节角度与截面 G 的外测量点、后测量点、内测量点的曲率在 0.01 水平上,相关性显著,即截面 G 的 4 个测量点的曲率与膝关节角度显著相关。

表 3 截面测量点曲率与膝关节角度关系

Tab.3 Relationships between the curvature of cross section measurement point and the angle of knee joint		膝关节角度	前测量点	外测量点	后测量点	内测量点
膝关节角度	皮尔逊相关性	1	-0.394 *	-0.949 **	-0.889 **	-0.681 *
	显著性(双尾)		0.260	0.000	0.001	0.030
	个案数	10	10	10	10	10

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

以Ⅲ级压缩袜为例进行分析,探究截面 G 测量点曲率与膝关节角度关系,采用线性、二项式和对数研究截面 G 的 4 个测量点曲率与膝关节角度之间的关系,获得的拟合曲线如图 7 所示。由图 7 可知,3 种曲线中,线性函数、对数函数曲线在描述关

系时存在不同程度的偏离,而二次函数相较前两种曲线可以准确描述膝关节角度与曲率关系。由此,分别将 4 个测量部位数据进行二次函数计算,并将其模型的具体参数估计值列举出来,详见表 4 ~ 表 7。

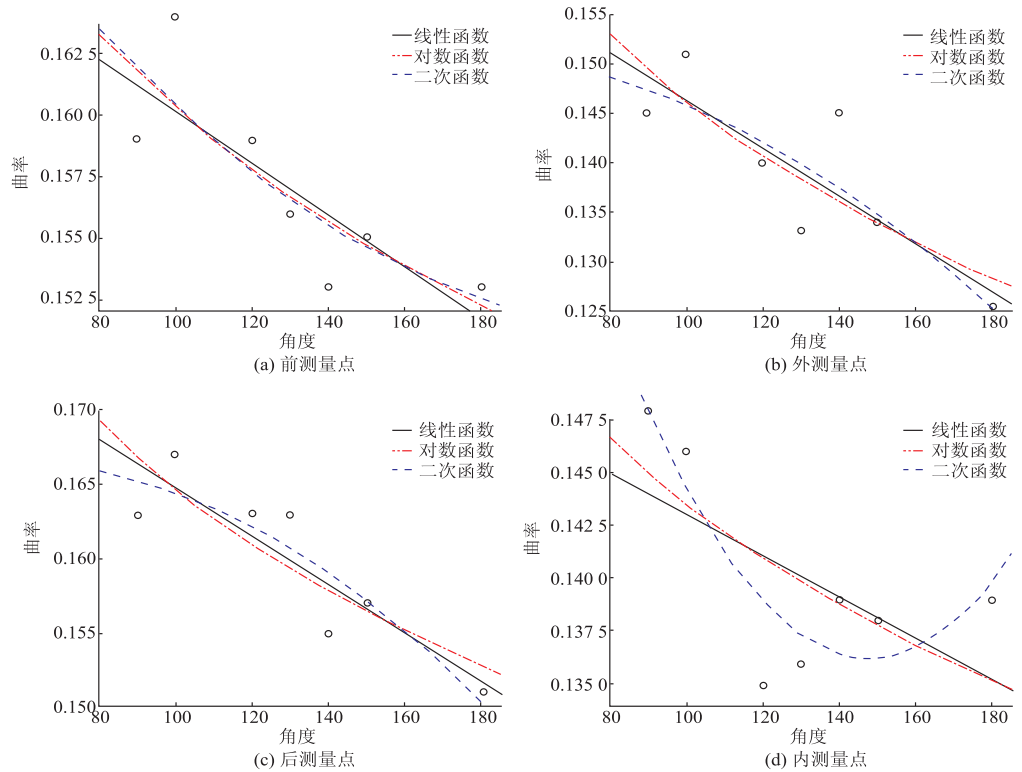


图 7 截面 G 各测量点的曲率拟合情况

Fig.7 Curvature fitting diagram of each measuring point of section G

表 4 前测量点曲率的函数模型

Tab.4 Functional models of front measuring point curvature		模型汇总			参数估计		
方程类型		$R^2$	$F$	Sig.	常 数	回归系数 $b_1$	回归系数 $b_2$
线性函数		0.155	1.469	0.260	0.158	$-2.970 \times 10^{-5}$	
二次函数		0.838	18.051	0.002	0.201	0.000	$2.462 \times 10^{-6}$
对数函数		0.153	1.449	0.263	6.333	1.000	

表 5 外测量点曲率的函数模型

Tab.5 Functional models of external measuring point curvature		模型汇总			参数估计		
方程类型		$R^2$	$F$	Sig.	常 数	回归系数 $b_1$	回归系数 $b_2$
线性函数		0.900	71.757	0.000	0.173	0.000	
二次函数		0.900	31.535	0.000	0.000	0.000	$2.273 \times 10^{-7}$
对数函数		0.907	77.977	0.000	5.628	1.002	



表 6 后测量点曲率的函数模型

Tab.6 Functional models of post measuring point curvature

方程类型	模型汇总			参数估计		
	$R^2$	$F$	Sig.	常 数	回归系数 $b_1$	回归系数 $b_2$
线性函数	0.790	30.186	0.001	0.179	0.000	
二次函数	0.813	15.192	0.003	0.162	0.000	$-9.848 \times 10^{-7}$
对数函数	0.819	9.059	0.001	5.535	1.001	

表 7 内测量点曲率的函数模型

Tab.7 Functional models of internal measuring point curvature

方程类型	模型汇总			参数估计		
	$R^2$	$F$	Sig.	常 数	回归系数 $b_1$	回归系数 $b_2$
线性函数	0.464	6.918	0.030	0.154	0.000	
二次函数	0.715	8.768	0.012	0.211	-0.001	$-9.848 \times 10^{-6}$
对数函数	0.461	6.843	0.031	6.480	1.001	

由表 4~表 7 可以看出二次函数模型的  $R^2$  大于线性、对数模型且接近于 1,故可采用二次函数描述膝关节角度与曲率的关系。以Ⅲ级压缩袜为例,截面 G 处的一元二次多项式回归方程如下:

$$y_{3-前} = 0.2 - 6.94 \times 10^{-4}x + 2.46 \times 10^{-6}x^2;$$

$$y_{3-外} = 0.18 - 3.33 \times 10^{-4}x + 2.27 \times 10^{-7}x^2;$$

$$y_{3-后} = 0.16 + 1.17 \times 10^{-4}x - 9.85 \times 10^{-7}x^2;$$

$$y_{3-内} = 0.21 - 0.1 \times 10^{-4}x + 3.30 \times 10^{-6}x^2。$$

式中: $x$  为膝关节角度的数值; $y_3$  为Ⅲ级压缩袜截面 G 测量点的曲率。

2.4 测量点压力对腿部截面曲率的关系

当膝关节角度一定时,通过定量分析可得出压力值与曲率的相互关系。如截面 G 在膝关节角度  $180^\circ$  时,将穿着 I 级、II 级、III 级压缩袜下的软组织截面形状进行对比,发现任意压缩袜的服装压对软组织变形具有相同规律,即受到各方向的压力时截面形状逐渐趋近于圆形(见图 5)。

按照压缩袜的等级对截面测量点的压力值与曲率进行分析,并讨论其变化规律。穿着 I 级、II 级和 III 级压缩袜且膝关节  $90^\circ$  时,截面 4 个测量点的压力值与曲率的变化规律如图 8 所示。由图 8 可以直观看出,测量点的压力值与曲率的折线变化趋势一致,后测量点的压力值最大,截面在该区域的曲线最弯曲、曲率最大;内测量点的压力值最小,该区域截面曲线最平稳,相应的曲率也最小。

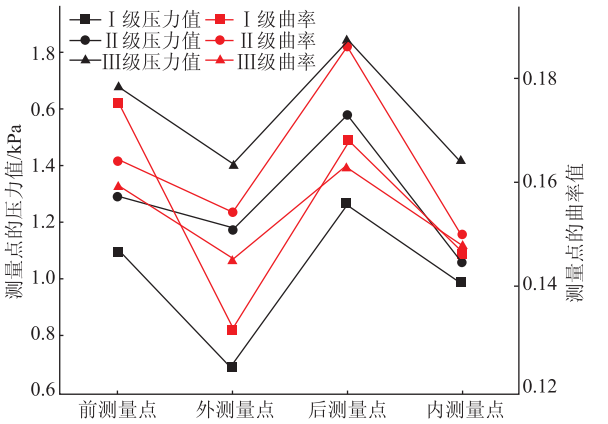


图 8 不同等级压缩袜截面 G 各测量点曲率与压力之间的关系

Fig.8 Relation diagram between curvature and pressure at each measuring point of different grades of compression hosiery section G

综上所述,任意膝关节角度下,腿部截面 4 个测量点的压力值与曲率呈正相关,曲率随着压力值的增加而增大。因此,腿部截面中测量点的压力值与曲率变化规律一致,根据腿部截面各区域曲线的曲率值可预测压力值的分布规律。

3 结 语

1)通过确定测量点的点云坐标获取曲线方程组,并将其代入曲率计算公式,分别获取穿着 3 种等级压缩袜时大腿根部的曲率数值,为膝关节角度及压力与曲率关系研究奠定数值基础;

2)膝关节角度和测量点压力对大腿截面曲率

影响显著,进而发现两者高度相关并可采用二元回归模型描述变化规律;

3)测量点压力值与曲率的折线变化趋势一致,后测量点的压力值为最大值,此处曲线最弯曲、曲率最大,内测量点的压力值最小,此处曲线最平稳,相应的曲率也最小,同理在测量其他膝关节角度时,可以得出相似结论。由此可知,在相同膝关节角度下,测量点压力与截面曲率的变化趋势一致且为正相关关系,截面曲率随着测量点压力值的增加而增大。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 刘晓凤,张倩,王璐. 医用压力袜的结构特征及其研究进展[J]. 生物医学工程学进展,2019,40(2):78-82.  
LIU Xiaofeng,ZHANG Qian,WANG Lu. Structural characteristics and research progress of medical compression stocking[J]. Shanghai of Biomedical Engineering,2019,40(2):78-82. (in Chinese)
- [ 2 ] 夏明,宋婧,张平,等. 跑步运动压缩裤压力预测模型的建立[J]. 产业用纺织品,2019,37(3):31-36.  
XIA Ming,SONG Jing,ZHANG Ping, et al. Establishment of pressure prediction model for running compression pants[J]. Technical Textiles,2019,37(3):31-36. (in Chinese)
- [ 3 ] 覃蕊,范雪荣,陈东生. 男短袜袜口处标准腿截面曲线研究[J]. 纺织学报,2012,33(3):119-123.  
TAN Rui,FAN Xuerong,CHEN Dongsheng. Study on the standard curve of lower leg leg cross section at top of men's

socks[J]. Journal of Textile Research,2012,33(3):119-123. (in Chinese)

- [ 4 ] 侯昀彤,徐蓼芫,王芳芳. 女性大腿截面曲率与下肢服装压力分布的关系[J]. 南通大学学报(自然科学版),2015,14(2):43-48.  
HOU Yuntong,XU Liaoyuan,WANG Fangfang. Relationship between the section curvature of female and the pressure distribution of lower limb garment[J]. Journal of Nantong University (Natural Science Edition),2015,14(2):43-48. (in Chinese)
- [ 5 ] 国家食品药品监督管理总局. 医用静脉曲张压缩袜:YY/T 0853—2011[S]. 北京:中国标准出版社,2013.
- [ 6 ] 倪海燕,甘应进,陈东生,等. 女性弹力袜压力测试及其压感舒适性研究[J]. 西安工程大学学报,2009,23(1):35-38.  
NI Haiyan,GAN Yingjin,CHEN Dongsheng, et al. Study on the pressure comfort of female elastic stockings[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University,2009,23(1):35-38. (in Chinese)
- [ 7 ] 王永荣,秦洁云,王敏,等. 压力医疗袜的压力性能测试与评价[J]. 东华大学学报(自然科学版),2015,41(1):48-52.  
WANG Yongrong,QIN Jieyun,WANG Min, et al. Evaluation and measurement of the pressure performance of medical stockings[J]. Journal of Donghua University (Natural Science edition),2015,41(1):48-52. (in Chinese)
- [ 8 ] 约翰逊,毛毓球. 曲线[M]. 2 版. 北京:科学出版社,1980:33.

(责任编辑:张 雪)