

基于拉普拉斯修正公式的服装压力分析

侯钦华, 陈郁*

(上海工程技术大学 纺织服装学院, 上海 201620)

摘要: 为了更加精确地预测压力袖套横向压力分布情况, 建立了手臂椭圆柱模型, 并根据该模型对拉普拉斯公式进行修正。选取3种弹性面料, 测其弹性模量和面料厚度; 使用三维扫描仪测量人体手臂三维尺寸, 设置4种不同压缩系数, 缝制12件压力袖套, 进行压力测量实验; 将实测值与预测值进行对比, 发现修正后的拉普拉斯公式能够准确预测手臂上不同曲率处的压力。该公式为压力袖套的精确设计提供了参考。

关键词: 拉普拉斯公式; 压力袖套; 压力预测; 压力治疗

中图分类号: TS 941.17 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2022)05-0408-08

Research on Clothing Pressure Using the Modified Laplace's Law

HOU Qinhua, CHEN Yu*

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

Abstract: In order to predict the lateral pressure distribution of the pressure cuff more accurately, an elliptical cylinder model of the arm was established. Based on the model, the Laplace formula was modified, and the accuracy of the prediction of the modified formula was tested by experimental verification. Three elastic fabrics were selected to measure their elastic modulus and thickness of fabrics. The three-dimensional size of human arm were measured by three-dimensional scanner. 12 pressure sleeves were sewed by setting different compression coefficients. The actual cuff pressure values were obtained by pressure measurement experiments, and the measured values were compared with the predicted values. It was found that the modified Laplace formula can accurately predict the pressure at different curvature of the arm. The formula provides a reference for the accurate design of pressure cuff.

Key words: Laplace formula, pressure cuff, pressure prediction, stress therapy

压力疗法又称加压疗法, 是指通过对人体体表施加适当的压力, 以预防或抑制皮肤瘢痕增生、防治肢体肿胀的方法^[1]。服装压的确定是加压疗法的重点, 也是近年来的研究热点。

目前, 服装压分布的研究方法主要包括理论预测法、数值模拟法、折减系数法、实验法等^[2-3], 其中基于拉普拉斯公式计算压力的理论预测法是常用方法之一。拉普拉斯公式最初是用以描述液体表面张力、液体曲率与薄膜压力之间关系的, CHENG J C Y等^[4]发现服装压与人体尺寸也可用此公式解

释, 于是拉普拉斯公式开始应用于服装领域。

影响服装压的因素有很多, 主要可分为人体因素与服装因素^[5]。为了提高预测的准确性, 研究人员在进行理论分析时不断提出各种假设、加入各类影响因子。LEUNG W Y等^[6]在研究时考虑了面料的弹性模量与横截面积; TOMAS S等^[7]研究压力绷带时讨论了绷带层数与拉伸后宽度的影响; SIKKA M P等^[8]在研究多层绷带压力时将人体假设为锥形体; BARHOUMI H等^[9]对拉普拉斯公式修正, 得到关于面料弹性模量、厚度、应变、身体围度等参数

收稿日期: 2021-11-08; 修订日期: 2022-03-10。

基金项目: 上海市教育委员会东方学者项目(TP2017074); 研究生科研创新项目(20KY0916)。

作者简介: 侯钦华(1996—), 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上的应用、三维人体测量等。

Email: 09180001@sues.edu.cn

的预测公式: $P = \frac{2\pi \varepsilon E e}{C}$,从而大幅度提升了预测的精度。然而,上述理论的前提是假设人体同一横截面上各部位曲率是相同的。

实际上,人体同一横截面上各部位的曲率并不均匀^[10],以手臂为例,手臂横截面的形状更接近于椭圆形^[11]。理论上,椭圆长轴部位曲率半径小,服装压大,短轴则相反。对于人体某些点状或者小面积的患处,只计算平均压力很难达到所需压力的要求。文中以手臂为研究对象,假设手臂横截面为椭圆形,在此基础上对拉普拉斯公式进行修正,并通过实验验证修正公式的有效性。

1 理论推导

1.1 手臂模型建立

由于手臂的横截面更接近于椭圆,文中将手臂横截面假设为椭圆形刚体,具体如图 1 所示。由图 1 可以看出,以手肘处截面中心 O 为原点,手臂轴线为 x 轴,则截面椭圆半长轴和半短轴是 x 的函数。手臂微元如图 2 所示。对于 x 到 $x + dx$ 处的截面围成的微元,可看成以 x 处的椭圆截面为底,高为 dx 的椭圆圆柱。

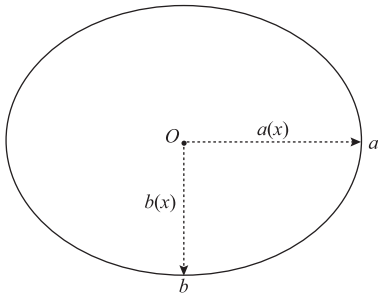


图 1 手臂横截面
Fig.1 Arm cross section

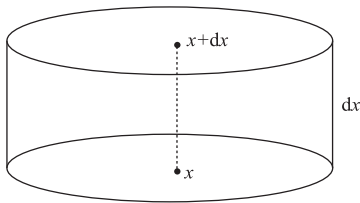


图 2 手臂微元
Fig.2 Arm micro element

将面料剪成长为 $2\pi r$ 、宽为 h 的长方形,并将宽边接合,围成半径为 r 、高为 h 的圆柱形臂套。

1.2 模型求解

把圆柱形臂套穿戴在手臂上,臂套面料受到手臂的作用而伸张,伸张后的面料反过来又会对手臂形成一个压力。

椭圆圆柱满足拉普拉斯方程

$$p = \frac{T}{R}, \tag{1}$$

式中: p 为压强(Pa); T 为面料纵向张力系数,即面料单位长度的拉伸力(N/mm); R 为人体曲率半径(mm)。

面料是由多股纱线构成,因此以一股纱线的形状作为其基本单元,具体如图 3 所示。图 3 中纱线直径为 D ,假设直径即为面料厚度。

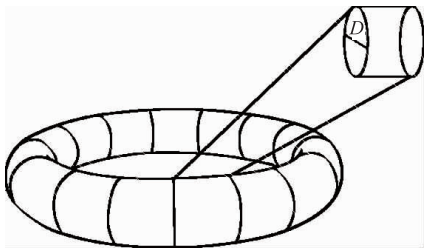


图 3 面料基本单元
Fig.3 Fabric basic unit

假设求得一股纱线受到的力为 F ,则张力系数

$$T = \frac{F}{D}. \tag{2}$$

在面料由圆柱变形为椭圆柱时,纱线由圆变为椭圆。假设该变形为弹性形变,在纱线上取一小段作为微元,假设在压力 F 的作用下发生弹性形变,长度由 dl 变为 dl' ,截面积由 S 变为 S' ,直径由 D 变为 D' ,则微元上的正应力

$$\sigma = E\varepsilon, \tag{3}$$

式中: E 为面料弹性模量;线应变

$$\varepsilon = \frac{dl' - dl}{dl} = \frac{dl'}{dl} - 1.$$

于是微元处的张力系数

$$T = \frac{\sigma S'}{D'} = \frac{\pi \sigma D'}{4}. \tag{4}$$

由于纱线的体积不变,则

$$Sdl = S'dl'. \tag{5}$$

纱线由圆变形为椭圆的始末状态如图 4 所示。

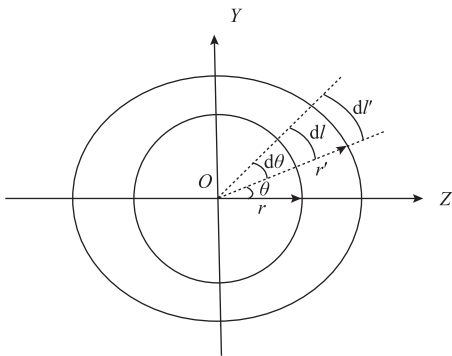


图 4 穿戴在手臂上的臂套面料变形始末状态
Fig.4 State of cloth deformation worn on the arm

图 4 中, $dl = rd\theta$, 取水平方向为 Z 轴, 竖直方向为 Y 轴, θ 为 r' 与 OZ 轴的夹角。
又 S 正比于 D^2 , 故

$$rD^2 = r'D'^2。 \tag{6}$$

将式(6)代入式(4), 得

$$T = \frac{\pi\sigma D'}{4} = \frac{\pi\sigma}{4} \sqrt{\frac{r}{r'}} D。 \tag{7}$$

将 $\sigma = E\varepsilon = E\left(\frac{dl'}{dl} - 1\right) = E\left(\frac{r'}{r} - 1\right)$ 代入式(7), 得

$$T = \frac{\pi E}{4} \sqrt{\frac{r}{r'}} \left(\frac{r'}{r} - 1\right) D。 \tag{8}$$

椭圆的周长公式^[12]

$$L = \pi \sqrt{2(a^2 + b^2)} \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(4n-3)!}{2^{4n}(n!)^2} \delta^{2n} \right], \tag{9}$$

其中

$$\delta = \frac{a^2 - b^2}{a^2 + b^2}。 \tag{10}$$

椭圆的曲率半径

$$R = \left| \frac{(1 + y'^2)^{3/2}}{y''} \right|, \tag{11}$$

椭圆参数方程为

$$\begin{cases} y = b\sin\phi \\ z = a\cos\phi \end{cases}, \tag{12}$$

故

$$y' = -\frac{b}{a} \cot\phi,$$

$$y'' = -\frac{b}{a^2 (\sin\phi)^3},$$

$$r' = \sqrt{(b\sin\phi)^2 + (a\cos\phi)^2}。 \tag{13}$$

因此曲率半径可表示为

$$R = \left| \frac{a^2}{b} \left(1 + \frac{b^2}{a^2} (\cot\phi)^2 \right)^{3/2} (\sin\phi)^3 \right|。 \tag{14}$$

最后将式(8)和式(14)代入式(1), 求得

$$p = \frac{T}{R} = \frac{\pi b E D}{4 a^2} \sqrt{\frac{r}{\sqrt{(b\sin\phi)^2 + (a\cos\phi)^2}}} \cdot \left(\frac{\sqrt{(b\sin\phi)^2 + (a\cos\phi)^2}}{r} - 1 \right) \cdot \left| \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{b}{a} \cot\phi \right)^2 \right)^{3/2} (\sin\phi)^3} \right|。 \tag{15}$$

由此可知, 当手臂给定, 即 a, b 给定时, 臂套给予手臂的压力与面料的弹性模量 E 、构成面料的纱线直径 D 以及臂套半径 r 有关。

2 材料与方法

2.1 原料与仪器

2.1.1 原料 选取市面上常用的 3 种压力服氨纶面料, 均购于上海懿臣有限公司。面料规格见表 1。

表 1 面料规格

Tab. 1 Fabric parameters

面料编号	成分	面密度/(g/m ²)
1 [#]	$m(\text{锦纶}):m(\text{氨纶}) = 75:25$	130
2 [#]	$m(\text{锦纶}):m(\text{氨纶}) = 61:39$	190
3 [#]	$m(\text{锦纶}):m(\text{氨纶}) = 48:52$	190

2.1.2 仪器 YG026D 型多功能电子织物强力机、YG141 数字式织物厚度仪, 均由宁波纺织仪器厂制造; AMI3037-10 气囊式压力传感器, 北京力泰友联科技有限公司制造。

2.2 面料参数测试

2.2.1 面料拉伸力 参照 FZ/T70006—2004《针织物拉伸弹性回复率试验方法》^[13], 将面料裁剪为 150 mm × 50 mm 的试样, 采用定伸长的拉伸方法, 使用多功能电子织物强力机测其拉伸力, 每组实验做 3 次, 取平均值。采用弹性模量公式计算出面料的弹性模量 E , 即

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{Fl}{S\Delta l}, \tag{16}$$

式中: σ 为应力(kPa); ε 为应变; F 为拉伸力(N); l 为面料的长度(mm); S 为面料的横截面积(mm²); Δl 为面料的伸长量(mm)。

2.2.1 面料厚度 采用数字式织物厚度仪分别测量 3 种面料的厚度。面料的弹性模量和厚度见表 2。

表 2 面料弹性模量和厚度

Tab. 2 Elastic modulus and thickness of fabric

面料编号	弹性模量/kPa	厚度/mm
1 [#]	725.57	0.30
2 [#]	423.90	0.42
3 [#]	383.90	0.51

2.3 压力臂套的制作

2.3.1 臂套围度的确定 选取 20 名年龄(22 ± 2) 周岁, 身高(160 ± 3) cm, 体质量(50 ± 3) kg 的成年女性为受试者, 令其保持手臂展开 45° 的站姿, 使用三维人体扫描仪扫描手臂, 结果如图 5 所示。将扫描得到的点云数据导入 Geomagic 软件中进行处理,

以腕关节向上 1 cm 为手腕处围度,再向上15 cm为手肘处围度,测得所需围度数据,并计算平均值。

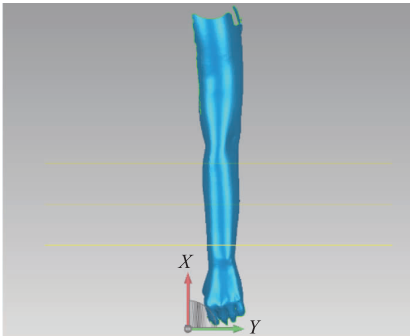


图 5 手臂扫描结果

Fig.5 Arm size measurement

设置不同的压缩系数 (15% , 20% , 25% , 30%) ,经计算确定臂套围度。具体结果见表 3。

表 3 臂套围度

Tab.3 Arm sleeve circumference

压缩系数/%	腕围/mm	肘围/mm
0	150.00	225.00
15	127.50	191.25
20	120.00	180.00
25	112.50	168.75
30	105.00	157.50

2.3.2 臂套缝制 根据表 3 数据对臂套进行打版,裁剪面料,采用锁边缝的方法缝制臂套,得到 4 种不同规格的臂套,具体如图 6 所示。

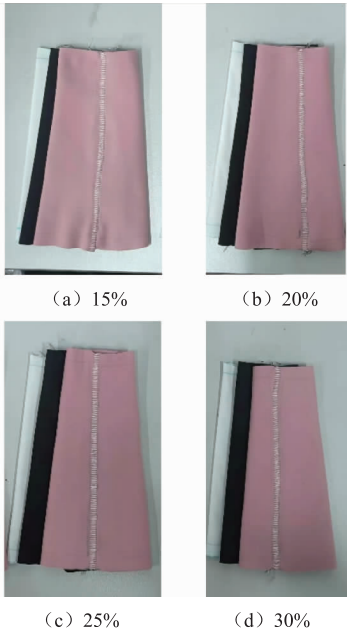


图 6 不同压缩系数的臂套成品

Fig.6 Sleeve finished products

2.4 压力测试

2.4.1 受试者的确定 在 20 名受试者中任选 5 名受试者进行压力测试。

2.4.2 压力测试点的确定 为了不受腕骨凸的影响,选取腕关节凸起最高处以上 3 cm 为测量位置,每一围度测 4 个点,具体测量部位如图 7 所示。

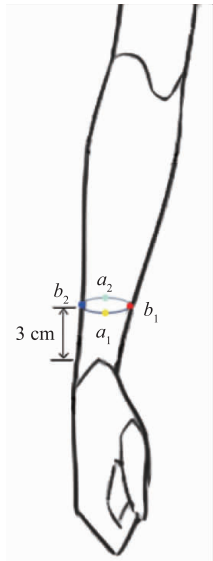


图 7 测量位置与测量点

Fig.7 Measuring position and measuring point

首先采用三维扫描仪扫描 5 名受试者手臂,将扫描得到的点云数据导入 Geomagic 软件,再使用软件对图像进行标记测量,测出手腕处测量点长轴 (a) 与短轴 (b) 半径,测量结果见表 4。

表 4 手臂尺寸

Tab.4 Arm size 单位: mm

受试者	腕围	a	b
A ₁	140	24.45	22.88
A ₂	145	25.10	23.45
A ₃	150	26.60	24.75
A ₄	155	27.31	25.03
A ₅	160	28.89	26.17

2.4.3 压力测试 使用气囊式压力传感器,对受试者手臂部位进行压力测量。每个臂套测量 3 次,取平均值。测量结果见表 5。

由表 5 可以看出,随着受试者腕围的增大,手臂受到的压力逐渐增大;对于同一受试者,臂套压缩系数越大,手臂所受压力越大;同一受试者在相同压缩系数条件下,手臂 a 点的压力值大于 b 点的压力值,这验证了手臂曲率越大所受压力越小的理论。

表 5 实测压力
Tab. 5 Pressure measurement

单位:kPa

受试者	面料	测试点	压缩系数			
			15%	20%	25%	30%
A ₁	1 [#]	a	2.89	2.25	2.10	1.40
		b	1.84	1.46	1.17	0.79
	2 [#]	a	2.28	1.97	1.22	1.05
		b	1.55	1.23	0.81	0.34
	3 [#]	a	2.68	2.09	1.74	1.14
		b	1.80	1.64	1.24	0.87
A ₂	1 [#]	a	3.23	2.48	2.08	1.65
		b	2.23	1.83	1.37	1.15
	2 [#]	a	2.46	2.15	1.46	1.31
		b	1.72	1.28	0.85	0.73
	3 [#]	a	2.78	2.33	1.59	1.29
		b	1.92	1.59	1.26	0.39
A ₃	1 [#]	a	3.23	2.74	2.46	2.01
		b	2.34	1.91	1.57	0.96
	2 [#]	a	2.74	2.15	1.90	1.80
		b	1.87	1.57	1.47	1.42
	3 [#]	a	3.02	2.59	2.40	1.94
		b	1.66	1.89	1.31	0.97
A ₄	1 [#]	a	3.57	3.42	2.67	2.32
		b	2.34	1.96	1.63	1.32
	2 [#]	a	2.76	2.18	2.24	1.22
		b	2.03	1.81	1.54	0.92
	3 [#]	a	3.12	2.76	2.68	1.96
		b	1.91	1.82	1.13	0.97
A ₅	1 [#]	a	3.73	3.08	2.72	2.54
		b	2.40	2.10	1.54	1.39
	2 [#]	a	3.12	2.76	2.68	1.96
		b	1.91	1.82	1.13	0.97
	3 [#]	a	3.46	3.02	2.55	2.24
		b	2.15	1.83	1.52	1.15

注:*a* 点对应的压力为手臂长轴两侧($\phi=0,\pi$)压力的平均值;*b* 点对应的压力为手臂短轴两侧($\phi=\frac{\pi}{2},\frac{3\pi}{2}$)压力的平均值。

3 分析与结果

3.1 理论计算与数据分析

在 Maple 软件中,将 A₃ 受试者和 2[#]面料的数据代入公式,使用软件的绘图功能,得到手臂部位、臂套尺寸与压力之间的关系,具体如图 8 所示。其中 *R* 为压力臂套的半径; ϕ 为手臂围度测量点对应的位置;*p* 为各位置对应的压力。

由图 8 可以看出,由 2[#]面料制成的臂套,在手腕处随着臂套半径的变小,表面压力逐渐增大,手臂处的压力与椭圆截面上的位置有关,且在 $\phi=0,\pi$ 和 $\phi=\frac{\pi}{2},\frac{3}{2}\pi$ 时 *p* 分别有最大和最小值。

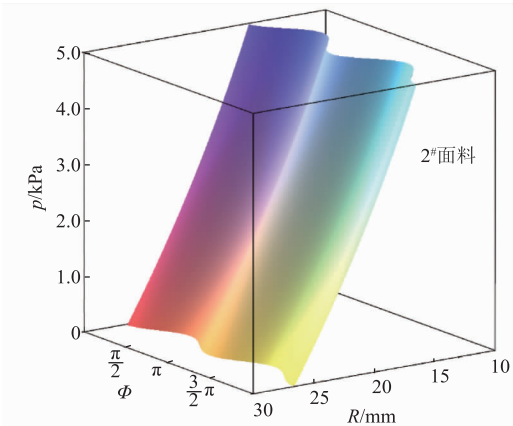


图8 手腕处臂套半径 *R*、手臂测量部位 ϕ 与压力 *p* 的关系
Fig. 8 Relationship of arm sleeve radius and arm measuring position with pressure at wrist

将 5 个受试者手臂尺寸与 3 种面料参数代入公式,求出理论压力值(即压力预测值),具体见表 6。

由表 5 和表 6 可以看出,预测压力与实测压力有相同的变化趋势,两者最大值所对应的均是 A₅ 受试者、1[#]面料的 *a* 点,预测压力最大值为4 kPa,实

测压力最大值为 3.73 kPa;两者最小值所对应的均是 A₁ 受试者、2[#]面料的 *b* 点,预测压力最小值为 0.64 kPa,实测压力最小值为 0.34 kPa。由此证明,文中预测模型在整体思路上是正确的,但预测压力比实测压力整体偏大,预测模型还需进一步改进。

表 6 预测压力						
Tab. 6 Theoretical calculation value						单位:kPa
受试者	面料	测试点	压缩系数			
			15%	20%	25%	30%
A ₁	1 [#]	<i>a</i>	3.06	2.50	1.98	1.49
		<i>b</i>	2.06	1.61	1.18	0.79
	2 [#]	<i>a</i>	2.50	2.04	1.62	1.22
		<i>b</i>	1.69	1.31	0.97	0.64
	3 [#]	<i>a</i>	2.75	2.45	1.78	1.34
		<i>b</i>	1.86	1.45	1.06	0.71
A ₂	1 [#]	<i>a</i>	3.20	2.65	2.14	1.66
		<i>b</i>	2.17	1.72	1.31	0.92
	2 [#]	<i>a</i>	2.61	2.17	1.75	1.36
		<i>b</i>	1.77	1.41	1.07	0.75
	3 [#]	<i>a</i>	2.87	2.38	1.92	1.49
		<i>b</i>	1.95	1.55	1.18	0.83
A ₃	1 [#]	<i>a</i>	3.48	2.96	2.47	2.02
		<i>b</i>	2.36	1.94	1.55	1.19
	2 [#]	<i>a</i>	2.85	2.42	2.02	1.65
		<i>b</i>	1.93	1.59	1.27	0.97
	3 [#]	<i>a</i>	3.13	2.66	2.22	1.81
		<i>b</i>	2.13	1.75	1.40	1.07
A ₄	1 [#]	<i>a</i>	3.70	3.53	2.68	2.22
		<i>b</i>	2.33	1.93	1.56	1.21
	2 [#]	<i>a</i>	3.03	2.59	2.19	1.82
		<i>b</i>	1.91	1.80	1.27	0.99
	3 [#]	<i>a</i>	3.33	2.85	2.41	2.00
		<i>b</i>	2.10	1.74	1.40	1.08
A ₅	1 [#]	<i>a</i>	4.00	3.48	3.01	2.56
		<i>b</i>	2.43	2.05	1.70	1.37
	2 [#]	<i>a</i>	3.27	2.85	2.46	2.10
		<i>b</i>	1.98	1.67	1.39	1.12
	3 [#]	<i>a</i>	3.60	3.13	2.70	2.30
		<i>b</i>	2.18	1.84	1.53	1.23

注:*a* 点对应的压力为手臂长轴两侧($\phi=0,\pi$)压力的平均值;*b* 点对应的压力为手臂短轴两侧($\phi=\frac{\pi}{2},\frac{3\pi}{2}$)压力的平均值。

3.2 相关性分析

将预测压力与实测压力代入 SPSS 软件中进行相关性分析,具体结果见表 7。

由表 7 可以看出,预测压力接近于实测压力的平均值,标准差也相近,预测值与实测值相关性系数为 0.974,在 0.01 级别相关性显著。

表 7 相关性分析				
Tab. 7 Correlation analysis				
压力	平均值	标准差	个案数	皮尔逊相关性
预测值	1.994 6	0.736 8	120	0.974
实测值	1.922 1	0.712 8	120	

3.3 比较

BARHOUMI H^[9]的拉普拉斯修正公式

$$p_B = \frac{2\pi \varepsilon E e}{C}, \tag{17}$$

式中: p_B 为预测压力; ε 为面料应变; E 为面料弹性模量; e 为面料厚度; C 为身体围度。

BARHOUMI 公式预测的压力值比拉普拉斯公式的预测值更为准确,但其所求压力为截面上各点的平均值,因此 a 、 b 两点的预测值相同。

文中使用误差率分析预测压力的准确性,即

$$\delta = \frac{P_C - P_M}{P_M}, \tag{18}$$

式中: δ 为误差率; p_C 、 P_M 分别为预测压力值和实测压力值。

为了比较文中修正公式与 BARHOUMI 修正公式预测压力的准确性,以 A_3 受试者为例,计算穿戴 3 种不同面料臂套时手臂的实测压力、预测压力平均值。两种修正公式预测准确性的比较结果见表 8。

表 8 两种预测方式的预测准确性比较
Tab. 8 Comparison of prediction accuracy with other prediction methods

压缩系数	测试点	压力/kPa			误差/%	
		p_M	p_B	p_C	δ_B	δ_C
15%	a	3.00	3.55	3.15	18.33	5.00
	b	1.96	3.55	2.14	81.12	9.18
20%	a	2.49	2.73	2.68	9.64	7.63
	b	1.79	2.73	1.76	52.51	1.68
25%	a	2.25	2.06	2.24	8.44	0.44
	b	1.45	2.06	1.41	42.07	2.76
30%	a	1.92	1.46	1.83	23.96	4.69
	b	1.12	1.46	1.08	30.36	3.57

注: δ_B 、 δ_C 分别为 BARHOUMI 修正公式和文中修正公式的误差率。

由表 8 可以看出,文中修正公式的预测准确性更高。对于曲率较大的测试点 a ,BARHOUMI 修正公式依然能保持较高的预测准确性,但在曲率较小的 b 点,BARHOUMI 修正公式的预测准确性大大降低。文中修正公式在测试点 b 的预测准确性虽然比在测试点 a 的低,但对比其他公式准确性得到了显著提高,该修正公式为压力服的定制与精准施压提供了有力的参考。

4 结 语

文中根据建立的手臂椭圆柱模型对拉普拉斯公式进行修正,通过实验验证了该公式的准确性,结果表明:

- 1)由于曲率不同,手臂同一截面各部位的压力存在较大差异,使用拉普拉斯公式时将手臂截面假设为椭圆形更合理。
- 2)修正后的拉普拉斯公式包含了面料弹性模量、厚度、椭圆长短轴等参数;基于椭圆截面的拉普拉斯方程计算得到的手臂压力分布规律与实际压力分布基本一致,可用于预测手臂截面曲线上的压力。
- 3)将椭圆模型拉普拉斯公式 BARHOUMI 拉普

拉斯公式对比,文中公式的预测准确性得到了一定的提高。因此在手臂压力分布研究与压力臂套精确定制中,可使用椭圆模型拉普拉斯公式进行计算。

参考文献:

[1] 岳文侠. 压力服装在运动和医疗领域的应用研究[J]. 山东纺织科技, 2019, 60(6): 8-11.
YUE Wenxia. The application of pressure garment in medical and sports areas[J]. Shandong Textile Science and Technology, 2019, 60(6): 8-11. (in Chinese)

[2] 林剑叠, 阎玉秀, 金子敏, 等. 压力服定制技术研究进展[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2021, 45(1): 13-20.
LIN Jiandie, YAN Yuxiu, JIN Zimin, et al. Research progress on customization technology of compression garment [J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Sciences Edition), 2021, 45(1): 13-20. (in Chinese)

[3] 周梦云, 阎玉秀, 金子敏, 等. 增生性瘢痕压力服研究与临床现状及展望[J]. 现代纺织技术, 2021, 29(5): 78-87.
ZHOU Mengyun, YAN Yuxiu, JIN Zimin, et al. Research, clinical status and prospect of hypertrophic scar pressure garments [J]. Advanced Textile Technology, 2021, 29(5): 78-87. (in Chinese)

- [4] CHENG J C Y, EVANS J H, LEUNG K S, et al. Pressure therapy in the treatment of post-burn hypertrophic scar—a critical look into its usefulness and fallacies by pressure monitoring[J]. *Burns*, 1984, 10(3): 154-163.
- [5] 张同会, 冀艳波. 服装压力舒适性研究现状及发展趋势[J]. *山东纺织科技*, 2017, 58(2): 37-41.
ZHANG Tonghui, JI Yanbo. Research status and progress of clothing pressure comfort[J]. *Shandong Textile Science and Technology*, 2017, 58(2): 37-41. (in Chinese)
- [6] LEUNG W Y, YUEN D W, NG S P, et al. Pressure prediction model for compression garment design [J]. *Journal of Burn Care and Research*, 2010, 31(5): 716-727.
- [7] THOMAS S. The use of the Laplace equation in the calculation of sub-bandage pressure[J]. *World Wide Wounds*, 2002, 3(1): 21-23.
- [8] SIKKA M P, GHOSH S, MUKHOPADHYAY A. Mathematical modeling to predict the sub-bandage pressure on a conical limb for multi-layer bandaging[J]. *Medical Engineering and Physics*, 2016, 38(9): 917-921.
- [9] BARHOUMI H, MARZOUGUI S, ABDESSALEM S B. Clothing pressure modeling using the modified Laplace's law[J]. *Clothing and Textiles Research Journal*, 2019, 38(2): 134-147.
- [10] 慕怡菲, 金子敏, 阎玉秀, 等. 烧伤瘢痕康复压力衣的研究现状与展望[J]. *服装学报*, 2020, 5(5): 393-397, 404.
MU Yifei, JIN Zimin, YAN Yuxiu, et al. Current status and research prospect on burn scar rehabilitation pressure garment[J]. *Journal of Clothing Research*, 2020, 5(5): 393-397, 404. (in Chinese)
- [11] 韩红爽, 张梅, 刘艳君. 弹性针织服装围度方向的压力数学模型[J]. *天津工业大学学报*, 2008, 27(4): 19-21.
HAN Hongshuang, ZHANG Mei, LIU Yanjun. Pressure mathematical model at circumference of elastic knitted apparel[J]. *Journal of Tianjin Polytechnic University*, 2008, 27(4): 19-21. (in Chinese)
- [12] 陈晓彦, 刘植. 椭圆周长公式的注记[J]. *大学数学*, 2019, 35(5): 95-101.
CHEN Xiaoyan, LIU Zhi. Derivation and application of elliptical perimeter formula [J]. *College Mathematics*, 2019, 35(5): 95-101. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 针织物拉伸弹性回复率试验方法:FZ/T 70006—2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.

(责任编辑:邢宝妹)

(上接第389页)

- [33] 侯宝权, 于迪, 吴萌盟, 等. 多孔石墨烯/碳纳米管@V2O5 柔性电极材料制备及性能研究[J]. *有色金属工程*, 2020, 10(10): 29-33.
HOU Baoquan, YU Di, WU Mengmeng, et al. Research on preparation and properties of porous graphene/carbon nanotube @ V2O5 flexible electrode materials [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2020, 10(10): 29-33. (in Chinese)
- [34] 姚梦瑶, 赵昕, 陈耀燕, 等. 石墨烯基柔性一维电极材料的制备与性能研究[J]. *功能材料*, 2020, 51(8): 8111-8116.
YAO Mengyao, ZHAO Xin, CHEN Yaoyan, et al. Preparation and properties of graphene-based flexible one-dimensional electrode materials[J]. *Journal of Functional Materials*, 2020, 51(8): 8111-8116. (in Chinese)
- [35] 任瑞丽, 王会才, 高丰, 等. 石墨烯基柔性超级电容器复合电极材料的研究进展[J]. *材料导报*, 2020, 34(11): 11099-11105.
REN Ruili, WANG Huicai, GAO Feng, et al. Research progress of graphene-based flexible supercapacitor composite electrode materials [J]. *Materials Reports*, 2020, 34(11): 11099-11105. (in Chinese)
- [36] 李宁, 陈涛. 石墨烯基电极材料在柔性全固态超级电容器中的研究进展[J]. *应用化学*, 2018, 35(3): 259-271.
LI Ning, CHEN Tao. Recent progress on graphene-based flexible all-solid-state supercapacitors[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2018, 35(3): 259-271. (in Chinese)
- [37] CHEN F, JI Y J, REN F Y, et al. Three-dimensional hierarchical core-shell $\text{CuCo}_2\text{O}_4 @ \text{Co}(\text{OH})_2$ nanoflakes as high-performance electrode materials for flexible supercapacitors[J]. *Journal of Colloid And Interface Science*, 2021(586): 797-806.
- [38] 沈思静, 郭为民, 乐志文, 等. 柔性固态非对称超级电容器电极材料的研究进展[J]. *应用化工*, 2021, 50(3): 838-841, 854.
SHEN Sijing, GUO Weimin, YUE Zhiwen, et al. Research progress of electrode materials for flexible solid-state asymmetric supercapacitors [J]. *Applied Chemical Industry*, 2021, 50(3): 838-841, 854. (in Chinese)
- [39] 田佳鑫. 金属有机框架/聚吡咯复合织物电极材料的制备及应用研究[D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2019.
- [40] 黄继伟, 钱学仁, 安显慧, 等. 柔性基金属氧化物超级电容器电极材料的研究进展[J]. *功能材料*, 2019, 50(8): 8040-8050.
HUANG Jiwei, QIAN Xueren, AN Xianhui, et al. Research progress of flexible base metal oxide supercapacitor electrode materials[J]. *Journal of Functional Materials*, 2019, 50(8): 8040-8050. (in Chinese) (责任编辑: 卢杰)