

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2025.04.006

## 基于电极点位的针织运动紧身衣压力舒适性分析

刘星<sup>1,2</sup>, 冯晨旻<sup>1,2</sup>, 师云龙<sup>1,2</sup>, 唐元冰<sup>3</sup>

(1. 天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387; 2. 天津工业大学 纺织未来技术研究中心, 天津 300387;  
3. 山东齐鲁化纤有限公司, 济南 251600)

**摘要:** 为系统评估集成了柔性电极的针织运动紧身衣的压力舒适性, 选取市售6款L号男式针织运动紧身衣作为实验样本, 通过结合客观压力测试与主观舒适度评价, 对静态直立、静坐伏案、扩胸运动和左右转体等典型运动姿态下的服装压力特征进行了量化分析。基于灰色近优分析法构建综合评价模型, 分析了服装压力分布与运动舒适性的耦合机制。实验结果表明: 不同款式服装在6种运动状态下的压力舒适性呈现显著差异。其中, 样衣Z4与Z6采用高回弹纤维混纺面料、插肩袖结构及腰部分割设计, 在运动过程中调节压力分布(CV值分别为0.195和0.204), 显著优于其他样款(CV值均大于0.400), 为智能服装中兼顾数据采集稳定性与穿戴舒适性的电极集成系统设计提供了实验依据。

**关键词:** 针织运动紧身衣; 服装压力舒适性; 测试点位; 智能监测服设计

中图分类号: TS941.79

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2025)04-0036-08

### Analysis of pressure comfort in knitted sportswear based on electrode positioning

LIU Xing<sup>1,2</sup>, FENG Chenyan<sup>1,2</sup>, SHI Yunlong<sup>1,2</sup>, TANG Yuanbing<sup>3</sup>

(1. School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Research Center for Future Textile Technology, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 3. Shandong Qilu Chemical Fiber Co., Ltd., Jinan 251600, China)

**Abstract:** To systematically evaluate the compression comfort of knitted sports tights integrated with flexible electrodes, six commercially available men's knitted sports tights (size L) were selected as experimental samples. By combining objective pressure tests with subjective comfort evaluations, the pressure characteristics of the garments were quantitatively analyzed under typical exercise postures, including static standing, seated deskwork, chest expansion, and side-to-side rotation. A comprehensive evaluation model was constructed based on the grey near-optimal analysis method, and the coupling mechanism between garment pressure distribution and exercise comfort was investigated. The experimental results showed that the pressure comfort of different styles of garments in six exercise states showed significant differences. Among them, samples Z4 and Z6, with high resilience fiber blended fabrics, inset sleeve structure and waist split design, regulated pressure distribution during exercise (CV values of 0.195 and 0.204, respectively), which was significantly better than the other samples (CV values of more than 0.4). The research results provide an important experimental basis for the design of electrode integration systems that balance data acquisition stability and wearing comfort in smart clothing.

**Key words:** knitted sports tights; clothing pressure comfort; test point; intelligent monitoring service design

随着智能穿戴技术的快速发展, 智能监测服逐渐成为运动健康、医疗监测等领域的关键设备<sup>[1-3]</sup>。智能监测服的功能性基于其能够准确采集穿戴者的生理数据, 而大多数生理信号较微弱, 需足够的压力保证

电极与皮肤密切接触, 才能稳定正常采集<sup>[4-6]</sup>。在长时间佩戴监测需求的场景下, 长时间佩戴的压迫、接触舒适性等因素, 通常会影响到生理信号数据采集的稳定性和准确性。为了确保长时间佩戴的舒适性并避免因

收稿日期: 2024-12-25

基金项目: 中国纺织工业联合会项目(J201805); 济南市人才项目(鲁化J(2022).5)

第一作者: 刘星(1980—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能可穿戴电子纺织品。E-mail: liuxing@tiangong.edu.cn

通信作者: 师云龙(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为服装热舒适。E-mail: shiyunlong@tiangong.edu.cn

不合理的压迫而影响监测效果,压力舒适性成为智能监测服装设计中的重要考量因素。一方面,过大的压力或不合理的压力分布可能影响人体的心率、呼吸、体温等生理参数<sup>[7]</sup>;另一方面,服装压力也会影响服装与人体之间的动态滑移,对生理信号的采集造成干扰<sup>[8-10]</sup>。

智能紧身服装的压力阈值的建立基准方面,Den-ton<sup>[11]</sup>指出人体一般舒适压力范围为 1.960~3.920 kPa。Kim 等<sup>[12]</sup>通过对紧身运动衣的人体穿着试验,指出 0.67~1.82 kPa(5.0~13.7 mmHg)是服装压力的主观优选范围。许俊鹏<sup>[13]</sup>测试了不同运动强度下服装压力的心电信号,指出电极-皮肤之间的压力值与运动的剧烈程度正相关,压力范围在 0.50~1.40 kPa 之间可以同时保证着装舒适性和心电信号的稳定采集。赵倩等<sup>[14]</sup>针对织物电极与皮肤间的摩擦带来的信号伪影问题,设计了不同电极-人体压力参数,通过对比分析所得心电图和监测效果,表明电极-体压强在 0.50~3.50 kPa 区间时,可获得质量良好的心电信号。An 等<sup>[15]</sup>通过织物电极研究了压力对表面肌电图(SEMG)记录的影响,旨在探究可实现与传统 Ag/AgCl 电极性能相当的最佳的服装压力。结果表明,施加于电极的最佳服装压力范围为 0.813~1.680 kPa,低于人体舒适感最佳服装压力(4.0 kPa,大于此压力后,受试者开始感到不适)。这一范围与 Kim 等<sup>[12]</sup>对紧身运动衣测量的衣物压力范围相似。Cömert 等<sup>[16]</sup>通过施加 0.667~3.333 kPa 的电极压力来测试压力对心电图记录的影响,并建议将 2.000~2.666 kPa 作为减少运动伪影的适当压力。

针织运动紧身衣由于其优异的贴合性和弹性,可作为在智能监测服装中集成电极的重要载体。在集成电极的同时,如何保持舒适的压力分布,防止穿戴者因局部压力过大而产生不适感,是一个亟待解决的问题。本研究以市场上常见的 6 款 L 号男式针织运动紧身衣为研究对象,以确定的电极点位,重点分析了其在多种常见姿态下的压力分布情况,包括站立、静坐、伏案、扩胸和左右转身等动作。本文通过对比各款样衣的客观压力值及主观舒适性,并应用灰色近优综合评价法,旨在识别出最适合用于集成电极的服装款式,为智能监测服的设计提供科学依据。

## 1 试验方案

### 1.1 试验对象

选择 10 名身高为(175±2) cm、年龄为 22~25 岁的在校男大学生为试验对象,编号为 A1~A10,试验对象基本体型参数见表 1。试验前,将试验目的、试验方

法及注意事项告知被测试者,并签订知情同意书。

表 1 试验对象基本体型参数

Tab.1 Basic body type parameters of test subjects

试验对象	年龄/ 岁	体重/ kg	身高/ cm	胸围/ cm	腰围/ cm	肩宽/ cm	上臂围/ cm	背长/ cm
A1	24	65	173	91	82	42	27	42
A2	22	79	176	97	84	47	28.5	45
A3	22	65	174	86	75	44	26.5	45
A4	25	70	175	90	80	45	27	43
A5	23	69	173	92	83	43	27.5	43
A6	22	74	177	94	82	46	28	46
A7	24	65	173	88	76	43	27	42
A8	23	66	173	89	78	43	27.5	44
A9	22	71	174	92	81	45	29.5	42
A10	25	70	175	94	82	46	29	45
平均值	23.2	69.7	174.3	91.3	80.3	44.4	27.8	43.7
标准差	1.2	4.3	1.4	3.2	3.0	1.6	1.0	1.5

### 1.2 试验样衣

6 款实验样衣均为市场畅销的针织运动紧身衣,分别编号 Z1、Z2、Z3、Z4、Z5、Z6,如图 1 所示。实验样衣基本参数见表 2。其中 Z2~Z6 腰部都有分割线设计。



图 1 试验样衣

Fig.1 Experimental samples

表 2 实验样衣基本参数

Tab.2 Basic parameters of experimental samples

试样编号	款式	型号	面料成分及比例	克重/(g·m <sup>-2</sup> )	厚度/mm
Z1	上肩袖	L	棉/氨纶(95/5)	178	0.610
Z2	插肩袖	L	涤纶/锦纶(68/32)	179	0.643
Z3	插肩袖	L	涤纶/氨纶(95/5)	215	0.506
Z4	插肩袖	L	锦纶/涤纶/氨纶 (51/37/12)	214	0.840
Z5	插肩袖	L	涤纶(100)	176	0.516
Z6	插肩袖	L	锦纶/氨纶/涤纶 (93/6/1)	262	0.796

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 测试点

根据“FZ/T 70015-2022 针织紧身服压力检测方法 & 评级”中针织紧身上衣测试点的设计,结合所设计的智能生理监测服的电极点位及硬件位置,最终确定了 18 个压力测试点。其中 V1—V6、RA、LA、RL、LL、RT 为电极位置,MB、BB、BL 分别为主机盒、电池盒、

血压底板位置, MUA、BP、SM、SP 分别为袖口外侧点、乳头点、肩中点、肩胛点。具体分布情况如图 2 和表 3 所示。

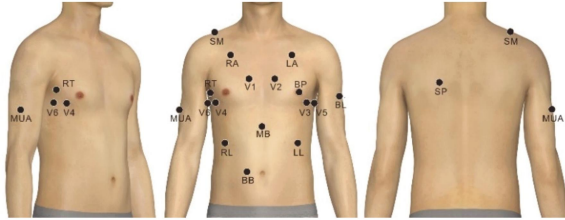


图 2 压力测试点示意

Fig.2 Diagram of pressure test points

表 3 压力测试点位置

Tab.3 Location of pressure test points

压力测试点	测试点位置描述	人体部位
RA	右锁骨中线与第 2 肋骨交点	胸部
LA	左锁骨中线与第 2 肋骨交点	胸部
V1	胸骨右缘第 4 肋间	胸部
V2	胸骨左缘第 4 肋间	胸部
V3、V4	2 个电极为一组, 2 组(V3 和 V5、V4 和 V6)分别放置身体左右两侧, 位于第 5~7 肋间即可	胸部
V5、V6		胸部
RT	V6 侧上 3.5 cm 处	胸部
BP	乳头的中心点	胸部
RL	右上腹	腰部
LL	左上腹	腰部
MB	胸部中心向下 7.5 cm	腰部
BB	左腹部位置	腰部
BL	袖口外侧点向上 7.5 cm 并平行向内 2.5 cm	上臂
MUA	袖口外侧点	上臂
SM	肩峰点与颈根外侧点连线的中点	肩部
SP	后背肩胛部位	背部

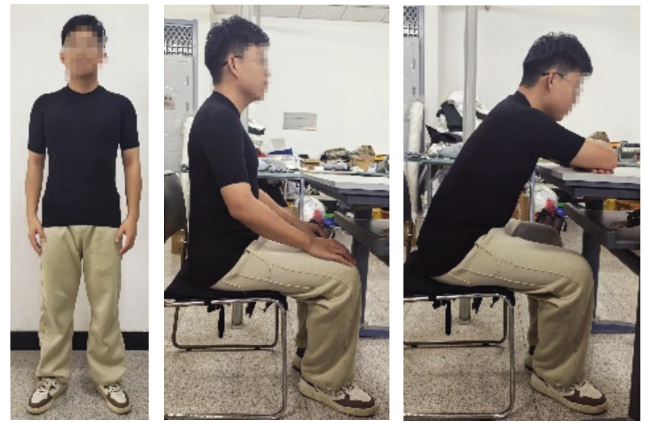
### 1.3.2 试验姿势

在智能生理监测服的实际使用过程中, 人体并非始终保持静止状态。为了更全面地模拟真实使用情境, 本研究选择了 6 种典型的日常活动姿势进行实验。这 6 种姿势包括静止站立、静坐、伏案、扩胸以及左右转身, 如图 3 所示。通过对这 6 种不同动作下的压力值进行分析, 本研究旨在选择出最合适的试样, 从而为智能服装的制备提供理论依据和数据支持。

### 1.3.3 客观压力测试

使用日本 AMI 气囊式接触压力测量系统进行服装压力测试, 如图 4 所示。

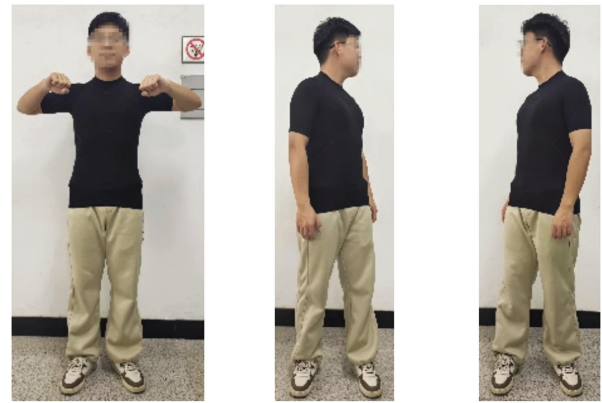
提前在被测人体上身标记好测试点位, 方便气囊压力传感器的放置, 减小试验误差。试验前, 被测试者进入试验室并穿着测试样衣 30 min, 使被测试者适应试验环境, 降低由人体生理因素及试穿过程中服装应



(a) 静止

(b) 静坐

(c) 伏案



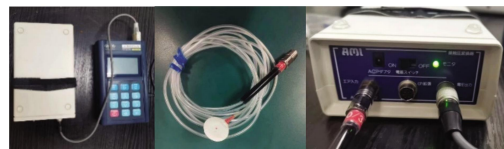
(d) 扩胸

(e) 左转身

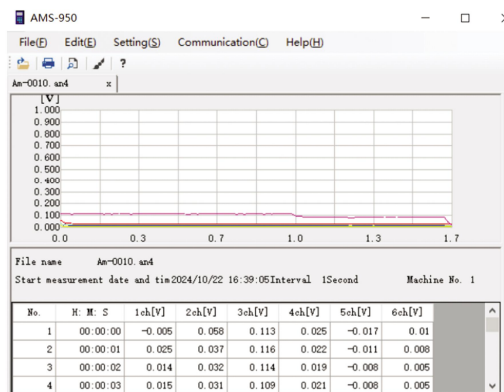
(f) 右转身

图 3 人体动作

Fig.3 Human movement



(a) 仪器元件



(b) 压力测试界面

图 4 服装压力测试系统

Fig.4 Test system of clothing pressure

力松弛状态造成的客观试验数据的误差。测量时, 将气囊压力传感器置于被测人体压力测试点并用胶布

固定,避免气囊压力传感器发生位移。人体保持测试姿态,启动软件,连续采集数据 60 s,截取后 30 s 稳定数据,每个测试点测试 3 次,取平均值作为该测试点的服装压力值。按照试验样衣编号顺序依次进行测试。首先测量静态站立时的压力值,测试完成后,完成其他 6 个动作下的压力测试。

### 1.3.4 主观舒适度评价

本次主观压力试验采用 Hollies 5 级心理学标尺法作为主观评价标准,将压力舒适度等级分为 5 级,如表 4 所示。得分越高,服装越舒适<sup>[17-18]</sup>。人体对单个压力点的服装压力舒适性感知不敏感,因此本研究通过对针织运动紧身衣的 5 个主要部位以及整体舒适

度进行主观评价,5 个部位分别是肩部、胸部、腰部、背部和上臂。

表 4 主观压力舒适度评价标尺

Tab.4 Subjective pressure comfort scale

评价指标	1	2	3	4	5
压力舒适性	很不舒适	较不舒适	一般舒适	较舒适	很舒适

## 2 试验结果与分析

### 2.1 客观试验结果与分析

图 5 为客观压力测试所得到的不同动作下,针织运动紧身衣各测试点位的服装压力值。

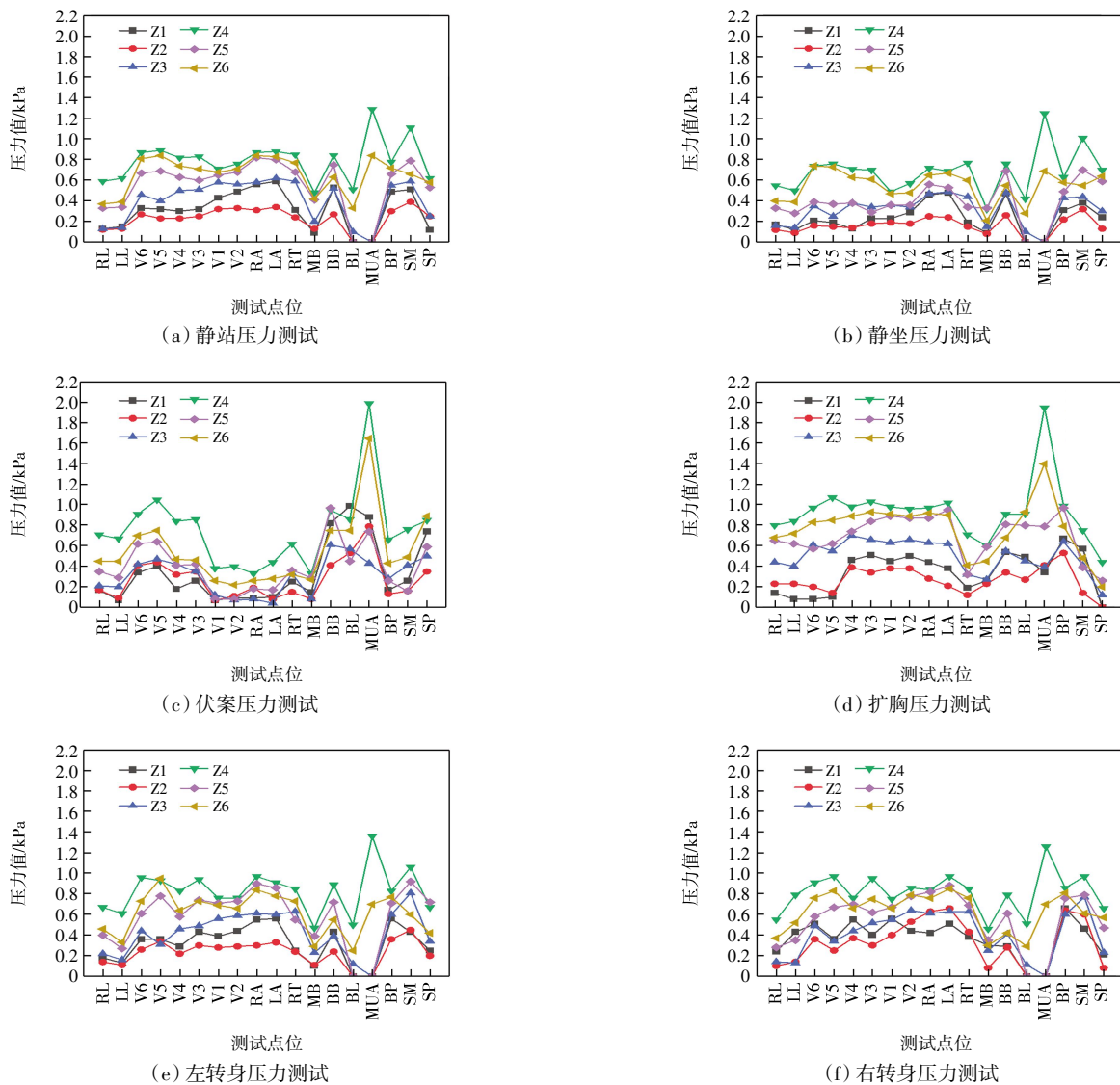


图 5 6 种动作下针织运动紧身衣客观压力测试值

Fig.5 Objective pressure test value of knitted sports tights under 6 movements

由图 5 可知,6 种动作姿势下,6 款针织运动紧身衣在各个测试点呈现不同的压力值大小和压力分布

情况,具体分析如下。

从整体来看,每幅图中 6 款样衣的点线走势相

似,表明在每个动作下,6款服装的压力分布情况较为一致。6款样衣的压力值排序为: $Z4 > Z6 > Z5 > Z3 > Z1 > Z2$ 。6款服装的压力分布情况相似,表明6种动作间的压力变化遵循一定规律。

从总体趋势来看,静站与静坐的压力分布曲线高度一致,但静站时的压力值普遍较高。原因在于静站时,身体保持直立,躯干和四肢的肌肉紧张,衣物被拉伸,从而导致压力增大。同时,重力作用使体重集中于下肢,躯干和上肢通过肌肉支撑,增加了局部压力。相比之下,静坐时肌肉放松,衣物松弛,重心变化使接触压力减小;与静坐相比,伏案状态下测试点V3~V6、RL、LL、BB、BL、MUA、SP的压力值增大,而V1、V2、RA、LA、BP、SM的压力值减小,RT和MB的变化不一致。这是因为伏案时,上身前倾、双臂抬起,导致背部和上身侧面受到拉伸,增加了压力。同时,上身中部和肩部与样衣之间产生间隙,压力减小;在扩胸动作中,较贴体的样衣(如Z2、Z3、Z4、Z5、Z6)在测试点RT、SM、SP的压力值相较静站状态有所减小,而其他测试点的压力值则有所增大。扩胸动作需要抬臂和挺胸,导致腋下、肩部及背部区域的样衣与体表产生间隙,降低了该区域的压力,而其他部位由于拉伸作用,压力增大;在左、右转身动作过程中,上身受到拉伸,导致大部分测试点的压力值增大。而对于Z1、Z2、Z3、Z5样衣的BL和MUA测试点,由于在静站时并未贴合体表,因此其压力值为0,左右转身动作对其压力值没有影响。

6款服装在6个动作下,压力值最大为1.99 kPa,最小值为0 kPa。根据Denton<sup>[11]</sup>指出的人体一般舒适压力范围为1.960~3.920 kPa,可知6款服装的压力值都在舒适度范围内。11个电极点位的压力值均在0.07 kPa到1.07 kPa之间,根据许俊鹏、Kim、An等的研究<sup>[12-15]</sup>,电极在0.50~1.68 kPa时能够同时保证着装舒适性和信号的稳定采集,只有样衣Z4、Z6的电极点位压力值较符合此区间,这主要得益于其高弹性设计和良好的贴合性;Z4、Z6的面料均为氨纶、锦纶和涤纶混纺面料,其中氨纶提供了优异的弹性,锦纶增强了耐磨性和强度,涤纶则提升了抗皱性和耐用性,使面料具有较好的拉伸弹性,能够紧密贴合人体曲线,在运动过程中动态调节压力分布,避免因压力过大或过小影响舒适性或信号采集;同时,使样衣在运动过程中能够持续保持电极与皮肤之间的稳定接触,从而兼顾舒适性和信号采集的稳定性。此外,Z1、Z2、Z3、Z4、Z5、Z6整体服装压力值的CV值(变异系数)分别为0.569、0.605、0.449、0.195、0.483、0.204,进一步表明Z4和Z6的压力分布更为均匀,离散程度较低。

## 2.2 主观试验结果与分析

### 2.2.1 信度分析

信度分析是衡量测量工具稳定性与一致性的重要方法,主要用于评估多次测量结果的一致性与可靠性。信度通常通过可靠性系数来表征,常见的标准是:系数值低于0.7表示信度较差,需进一步改进;系数值介于0.7和0.8之间为可接受的范围系数值;系数值超过0.8则表明信度较高。系数值越接近1,表明测量工具的可靠性越强<sup>[19]</sup>。本文对针织运动紧身衣的主观压力舒适度评估数据进行了信度分析,采用SPSS软件进行可靠性检验。结果显示Cronbach's Alpha系数为0.924,表明该主观压力舒适度评估数据具有较高的可信度,适用于后续的分析与研究。

### 2.2.2 主观压力舒适度比较

在6种动作姿势下6款不同针织运动紧身衣的整体主观舒适度如表5所示。

表5 针织运动紧身衣整体主观压力舒适度评价

Tab.5 Comfort evaluation of overall subjective pressure of knitted sports tights

样衣编号	静站	静坐	伏案	扩胸	左转身	右转身
Z1	4.7	4.8	4.5	4.5	4.6	4.6
Z2	5.0	5.0	4.9	4.9	5.0	5.0
Z3	4.3	4.5	4.5	4.3	4.3	4.3
Z4	3.0	3.1	3.0	2.9	2.9	2.9
Z5	4.7	4.8	4.4	4.2	4.3	4.3
Z6	4.0	4.2	4.1	4.0	4.0	4.0

在这组数据中,Z2在所有动作下表现为优异,评分稳定在4.9~5.0,舒适度最高;Z1和Z5在静站、静坐中表现较好,评分都为4.7以上,虽然在扩胸、左右转身时有所下降,但整体舒适度均值在4.5分以上;Z3、Z6的舒适度较为平稳,评分分别为4.3~4.5和4.0~4.2,整体舒适度较好;Z4整体舒适度评分均值为3.0,在所有动作中舒适度最低;总体而言,整体压力主观舒适度排序为: $Z2 > Z1 = Z5 > Z3 > Z6 > Z4$ 。

为了进一步比较不同针织运动紧身衣压力舒适度的具体情况,将6种动作姿势下分别穿着6款样衣时肩部、胸部、腰部、上臂、背部以及整体的舒适度评分绘制成主观舒适度雷达特征图,结果如图6所示。

由图6可见,不同动作下受试者穿着6款不同样衣的主观舒适感呈现出各自的特点,具有明显的差异性。以胸部舒适度评分为例,静站、静坐、伏案时评分排序为 $Z2 = Z1 > Z3 > Z6 > Z5 > Z4$ ;扩胸时,排序为 $Z2 > Z3 > Z1 > Z6 > Z5 > Z4$ ;左、右转身状态下评分排

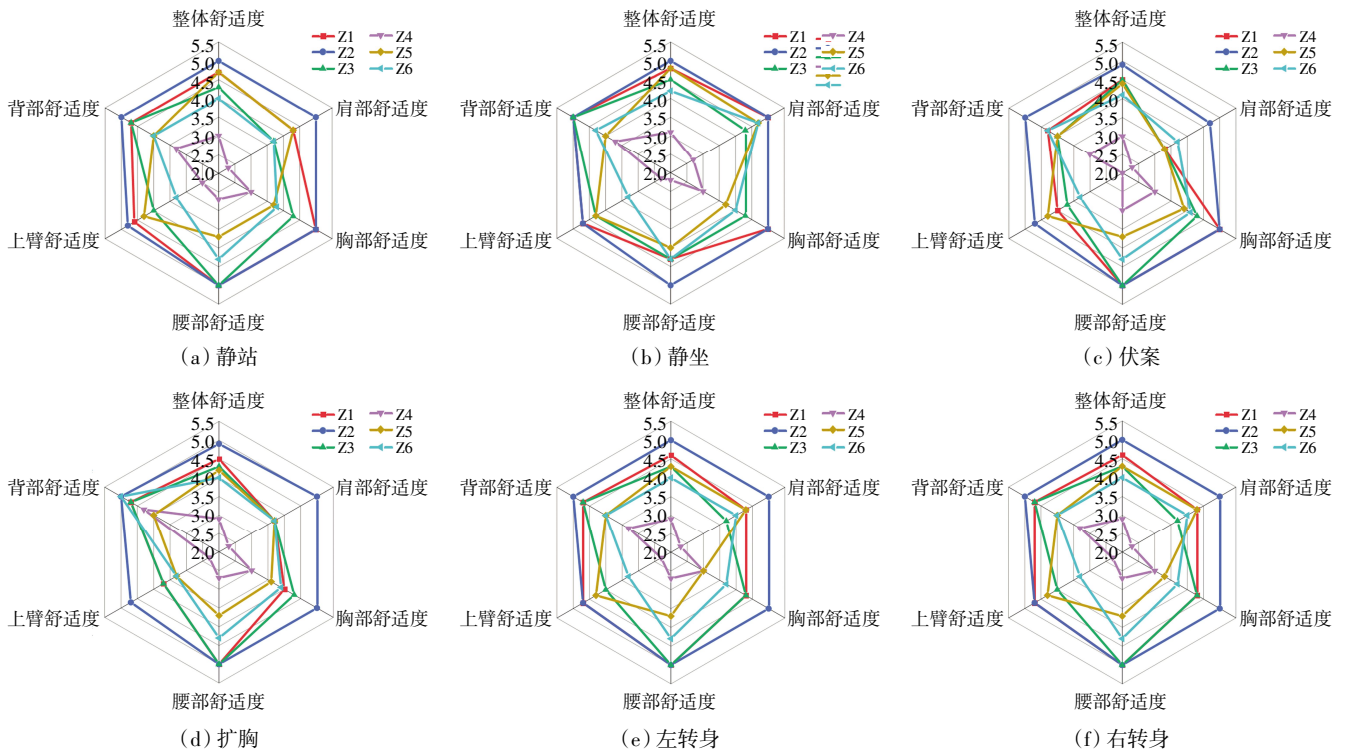


图 6 6 种动作下针织运动紧身衣主观压力舒适度雷达特征

Fig.6 Radar characteristics of subjective pressure comfort of knitted sports tights under 6 actions

序为  $Z2 > Z1 = Z3 > Z6 > Z5 > Z4$ , 与整体压力主观舒适度的排名并不一致。

### 2.3 灰色近优综合评价

为了综合评价 6 款样衣的压力舒适性,将主观与客观数据联立分析,采用灰色近优综合评价法进行分析<sup>[20-21]</sup>。

首先,设定评价样衣为  $M_j(j = 1, 2, \dots, m)$ ,评价指标为  $C_i(i = 1, 2, \dots, n)$ ,相应的白化灰量为  $R_{ij}$ ,则  $m$  样衣  $n$  维指标的灰元为  $R_{n \times m}$ , $R_{ij}$  是第  $j$  个样衣第  $i$  个指标的白化灰元值<sup>[21]</sup>,得到灰矩阵  $R_{n \times m}$ ,见式(1)。

$$R_{n \times m} = \begin{bmatrix} R_{11} & \cdots & R_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ R_{n1} & \cdots & R_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其次,将第  $j$  个样衣在 6 种不同动作下的客观压力值或主观评分作为第  $j$  个样衣第  $i$  个评价指标的评分值,从而构建第  $j$  个样衣第  $i$  个评价指标的白化灰矩阵,见式(2)。为了统一数据维度,处理过程中将客观压力值的 18 个测量点依据表 3 划分为 5 个部位。鉴于样衣胸部和腰部需要集成电极,重要性相对较高,因此对这 5 个部位进行加权处理,其中胸部权重为 0.4,腰部权重为 0.3,其余部位权重均为 0.1,以此对客观压力值和主观评分数据进行相应的处理,得到式(2)的数据结果。

$$R_{6 \times 12} = \begin{bmatrix} 0.30 & 0.23 & 0.38 & 0.78 & 0.54 & 0.62 \\ 0.23 & 0.16 & 0.30 & 0.69 & 0.41 & 0.53 \\ 0.36 & 0.26 & 0.33 & 0.76 & 0.44 & 0.57 \\ 0.33 & 0.24 & 0.46 & 0.89 & 0.65 & 0.71 \\ 0.30 & 0.23 & 0.41 & 0.81 & 0.58 & 0.57 \\ 0.30 & 0.35 & 0.39 & 0.79 & 0.53 & 0.59 \\ 4.86 & 4.98 & 4.46 & 2.82 & 3.85 & 3.91 \\ 4.76 & 4.97 & 4.37 & 2.73 & 3.98 & 4.12 \\ 4.66 & 4.97 & 4.32 & 2.83 & 3.83 & 4.06 \\ 4.31 & 4.97 & 4.43 & 2.90 & 3.65 & 4.05 \\ 4.59 & 4.97 & 4.46 & 2.80 & 3.57 & 3.90 \\ 4.59 & 4.97 & 4.46 & 2.80 & 3.69 & 3.90 \end{bmatrix} \quad (2)$$

然后进行无量化处理,也就是将各个白化灰元值映射到[0,1]区间,以各个白化灰元的效果指标取代白化灰元值,得到近优白化灰矩阵  $\bar{R}'_{6 \times 12}$ 。本文采用上限效果指标(应用于越大越优型指标,见式(3)),计算可得近似白化灰矩阵,见式(4)。

$$\bar{R}'_{n \times m} = \frac{\bar{R}_{n \times m}}{\max\{\bar{R}_{n \times m}, \mu_{\max}\}} \quad (3)$$

式中:

$$\max\{\bar{R}_{n \times m}, \mu_{\max}\} = \max\{\bar{R}_{n1}, \bar{R}_{n2}, \dots, \bar{R}_{nm}\}$$

$$\bar{R}'_{6 \times 12} =$$

0.384 6	0.294 9	0.487 2	1	0.692 2	0.794 9
0.333 3	0.231 9	0.434 8	1	0.594 2	0.768 1
0.473 7	0.342 1	0.434 2	1	0.578 9	0.750 0
0.370 8	0.269 7	0.516 9	1	0.730 3	0.797 8
0.370 4	0.284 0	0.506 2	1	0.716 0	0.703 7
0.379 7	0.443 0	0.493 7	1	0.670 9	0.746 8
0.975 9	1	0.895 6	0.566 3	0.773 1	0.785 1
0.957 7	1	0.879 3	0.549 3	0.800 8	0.829 0
0.943 3	1	0.874 5	0.572 9	0.775 3	0.821 9
0.867 2	1	0.891 3	0.583 5	0.734 4	0.814 9
0.923 5	1	0.897 4	0.563 4	0.718 3	0.784 7
0.923 5	1	0.897 4	0.563 4	0.742 5	0.784 7

(4)

$$\bar{R}' = S_j[S_1, S_2, \dots, S_6] = S_j \left[ \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \bar{R}'_{i1}, \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \bar{R}'_{i2}, \dots, \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \bar{R}'_{i6} \right] = S_j[0.659, 0.655, 0.684, 0.783, 0.711, 0.782] \quad (5)$$

最后根据式(5)计算出6款样衣白化灰近优度(近优度越接近1,样衣越舒适),列出近优度白化灰行矩阵。

6款样衣的白化灰近优度从大到小排序,可得到其压力舒适性的优劣顺序为:Z4 > Z6 > Z5 > Z3 > Z1 > Z2。Z4、Z6的白化灰近优度非常接近,综合舒适性表现较为突出。Z4、Z6的款式为插肩袖结构且腰部具有分割设计,相比于上肩袖结构及常规腰部设计,插肩袖能够更好地贴合肩部曲线,减少运动时的束缚感,同时腰部分割设计的合理剪裁和弹性面料拼接,进一步优化了服装的贴合性。这种设计实现了服装压力的均匀分布,进而提升了整体穿着舒适性,并在运动过程中保持服装压力的稳定性,确保电极与皮肤的接触,最终实现了可靠的信号采集。所以,Z4、Z6表现出作为集成电极的服装基底的良好潜力。

### 3 结 论

本研究系统揭示了针织运动紧身衣压力舒适性 with 智能监测电极集成的交互机制,通过主客观综合评价得出以下结论:

(1) 动态压力分布特性:6款样衣在静立-坐姿-转体动作中呈现相似压力梯度特征,其服装压力排序为 Z4 > Z6 > Z5 > Z3 > Z1 > Z2,证实服装压力分布具有显著款式依赖性。

(2) 主客观评价悖论解析:尽管 Z4 样衣产生的接触压力最大,但其整体舒适度评分却最低(3/5),与 Z2

样衣(接触压力最小,舒适度评分最高,5/5)形成鲜明对比。根据客观压力与主观舒适度排名计算得出的斯皮尔曼等级相关系数  $r = -0.94$ ,  $P$  值为 0.004 7,表明两者之间存在显著的负相关性。这提示智能服装设计需平衡电极接触压力与生理舒适阈值。

(3) 多目标优化决策:基于灰色近优分析法建立的耦合评价模型显示,样衣 Z4(锦纶/涤纶/氨纶(51/37/12),近优度 0.783)与 Z6(锦纶/氨纶/涤纶(93/6/1),近优度 0.782)的压力-舒适协调性显著优于其他样衣。其成功要素包括:①高回弹面料;②插肩袖结构;③腰部分割设计,使针织紧身衣更加贴合身体曲线,在确保电极与皮肤紧密接触的同时,兼顾运动过程中的舒适性和稳定性,为集成电极的应用提供理想的基础。

后续研究将进一步结合 ECG 信号采集,验证本文结论的可靠性,构建“压力-电生理信号-运动表现”多参数耦合模型,重点解决:①基于 ECG 信号质量指数(SQI)的压力阈值优化;②长期穿戴下的皮肤微环境调控;③基于机器学习的面料-结构协同设计算法开发。本研究为可穿戴健康监测系统的服装载体设计建立了理论方法体系。

### 参考文献:

- [1] 胡丹,赵蒙蒙.基于生理监控的智能可穿戴服装研究[J].针织工业,2024(6):59-64.  
HU D, ZHAO M M. Research advances in smart wearable clothing with physiological monitoring function[J]. Knitting Industries, 2024(6):59-64(in Chinese).
- [2] 于静静,邓咏梅.基于生理监测的可穿戴智能服装应用与展望[J].纺织科技进展,2021(2):6-9,15.  
YU J J, DENG Y M. Application and prospect of wearable smart clothing based on physiological monitoring[J]. Progress in Textile Science & Technology, 2021(2):6-9,15(in Chinese).
- [3] XIE D D. Development and evaluation methods of smart wearable clothing[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1790(1):012018.
- [4] 胡亦雯,唐虹,葛睿.健康监测智能服装的发展现状及趋势[J].针织工业,2023(6):82-85.  
HU Y W, TANG H, GE R. Development status and prospect of health monitoring smart clothing[J]. Knitting Industries, 2023(6):82-85(in Chinese).
- [5] 李红利,陈国崑,刘皓.基于压力和心电信号便携式服装压力舒适性测量设备[J].天津工业大学学报,2020,39(1):48-56.  
LI H L, CHEN G W, LIU H. Portable garment pressure comfort measuring device based on pressure and ECG signals[J]. Journal of Tiangong University, 2020, 39(1):48-56(in Chi-

- nese).
- [6] ETANA B B, MALENGIER B, KWA T, et al. Evaluation of novel embroidered textile-electrodes made from hybrid polyamide conductive threads for surface EMG sensing[J]. *Sensors*, 2023, 23(9): 4397.
- [7] PERIYASWAMY T, BALASUBRAMANIAN M. Combining multiple human physiological signals using fuzzy logic to determine stress caused by battle dress uniforms[J]. *SN Applied Sciences*, 2022, 4(11): 319.
- [8] 胡艳琼, 张辉, 邓咏梅. 应用于健康领域的着装压力研究进展[J]. *纺织导报*, 2015(5): 70-72.  
HU Y Q, ZHANG H, DENG Y M. Progress in the research of health field-oriented clothing pressure[J]. *China Textile Leader*, 2015(5): 70-72(in Chinese).
- [9] KIM S, LEE S, JEONG W. EMG measurement with textile-based electrodes in different electrode sizes and clothing pressures for smart clothing design optimization[J]. *Polymers*, 2020, 12(10): 2406.
- [10] 郑丽. 以传感器定位为目的的紧身服装研制[D]. 上海: 东华大学, 2023.  
ZHENG L. Development of tight-fitting clothing for sensor positioning[D]. Shanghai: Donghua University, 2023 (in Chinese).
- [11] DENTON M J. Fit stretch and comfort[J]. *Textiles*, 1972(3): 12-17.
- [12] KIM N Y, LEE H. Influence of clothing pressure on blood flow and subjective sensibility of commercial sports compression wear[J]. *Fashion & Textile Research Journal*, 2019, 21(4): 459-467.
- [13] 许鹏俊. 用于体表心电监测的纺织结构电极与皮肤之间机械作用分析及动态噪音研究[D]. 上海: 东华大学, 2012: 62-63.  
XU P J. Mechanical interaction analysis and dynamic noise study between textile structure electrode and skin for body surface ECG monitoring [D]. Shanghai: Donghua University, 2012: 62-63 (in Chinese).
- [14] 赵倩, 邓咏梅, 关小芳. 智能服装中纺织电极对心电监测信号的影响[J]. *天津纺织科技*, 2021(4): 17-21.  
ZHAO Q, DENG Y M, GUAN X F. Influence of textile electrode on ECG monitor signal quality of intelligent clothing[J]. *Tianjin Textile Science & Technology*, 2021(4): 17-21(in Chinese).
- [15] AN X, TANGSIRINARUENART O, STYLIOS G K. Investigating the performance of dry textile electrodes for wearable end-uses[J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2019, 110(1): 151-158.
- [16] CÔMERT A, HONKALA M, HYTTINEN J. Effect of pressure and padding on motion artifact of textile electrodes[J]. *BioMed Eng OnLine*, 2013, 12, 1-19.
- [17] 苏红兵, 陈海英, 张露, 等. 人体下肢有限元模型构建及着袜舒适性分析[J]. *天津工业大学学报*, 2013, 32(6): 32-35.  
SU H B, CHEN H Y, ZHANG L, et al. Building of finite element model of lower limbs and analysis of socks' comfort[J]. *Journal of Tianjin Polytechnic University*, 2013, 32(6): 32-35 (in Chinese)
- [18] 王佳, 刘夏. 基于视觉和压力舒适的女性塑身裤规格设计[J]. *纺织科技进展*, 2023(10): 53-57.  
WANG J, LIU X. Size design of women's shapewear pants based on visual and pressure comfort[J]. *Progress in Textile Science & Technology*, 2023(10): 53-57(in Chinese).
- [19] 季云慧, 张玮, 张成蛟, 等. 女性生理内裤压力舒适性比较分析[J]. *浙江纺织服装职业技术学院学报*, 2023, 22(1): 37-48.  
JI Y H, ZHANG W, ZHANG C J, et al. Comparison and analysis on pressure comfort of female physiological underwear[J]. *Journal of Zhejiang Fashion Institute of Technology*, 2023, 22(1): 37-48(in Chinese).
- [20] 梁书运, 吴济宏, 周橙. 弹性针织面料压力舒适性的模糊评价[J]. *毛纺科技*, 2023, 51(6): 117-122.  
LIANG S Y, WU J H, ZHOU C. Research on the pressure comfort of elastic knitted fabrics based on fuzzy evaluation[J]. *Wool Textile Journal*, 2023, 51(6): 117-122 (in Chinese).
- [21] 张同会, 冀艳波. 基于骑行动作分析的骑行裤压力舒适性研究[J]. *针织工业*, 2019(1): 62-66.  
ZHANG T H, JI Y B. Pressure comfort of cycling pants based on cycling motion analysis[J]. *Knitting Industries*, 2019(1): 62-66(in Chinese).

#### 本文引文格式:

刘星, 冯晨旸, 师云龙, 等. 基于电极点位的针织运动紧身衣压力舒适性分析[J]. *天津工业大学学报*, 2025, 44(4): 36-43.

LIU X, FENG C Y, SHI Y, et al. Analysis of pressure comfort in knitted sportswear based on electrode positioning[J]. *Journal of Tiangong University*, 2025, 44(4): 36-43(in Chinese).