

# 基于跑步运动中人体下肢皮肤形变的压缩裤分区设计

张宁峰<sup>1</sup>, 刘成霞<sup>\*2</sup>

(1. 浙江理工大学 服装学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江理工大学 服装数字化技术浙江省工程实验室, 浙江 杭州 310018)

**摘要:**为揭示跑步运动中下肢运动姿势的皮肤形变规律,探讨运动压缩裤的结构与人体皮肤形变的关系,运用三维运动捕捉系统采集跑步过程中人体动态变化,对人体下肢运动姿态做定性分析;选取4个关键动作,从横、纵向分析皮肤形变规律。结果表明:在跑步运动周期过程中,腰臀尺寸变化较小,在 $\pm 3\%$ 内波动;腿部横向变化率在 $(-5.57\%, 7.26\%)$ ,纵向变化率在 $(-15\%, 15.15\%)$ ;皮肤纵向变化大于横向,且不同区域的变化存在差异,其中膝盖纵向变化最为明显,变化率最大值达43%左右。压缩裤的结构设计需考虑下肢运动特征,不同区域的皮肤变化量可作为结构设计及面料选择的依据。

**关键词:**动作捕捉;跑步运动;皮肤形变;压缩裤;分区设计

中图分类号:TS 941.17 文献标志码:A 文章编号:2096-1928(2023)02-0118-07

## Partition Design of Compression Pants Based on Skin Deformation of Lower Limbs in Running

ZHANG Ningfeng<sup>1</sup>, LIU Chengxia<sup>\*2</sup>

(1. School of Fashion Design and Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Zhejiang Provincial Engineering Laboratory of Clothing Digital Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In order to reveal the skin deformation law of lower limb movement posture during running, and explore the relationship between the structure of sports compression pants and the skin deformation of human body, the paper used the three-dimensional motion capture system to collect the dynamic change of the human body during running, analyzed qualitatively the posture of human lower limb and selected four key movements, from the lateral and longitudinal structure to analyze the law. The results show that during the running cycle, the size of the waist and buttocks changed little and fluctuates within 3%, the lateral change rate of the legs is in the range from  $-5.57\%$  to  $7.26\%$ , and the longitudinal change rate is in the range from  $-15\%$  to  $15.15\%$ . The change of the longitudinal direction is greater than that in the lateral direction, and there are differences in different areas, the knee longitudinal change is the most obvious, with the maximum change rate about 43%. The structural design of compression pants should consider the movement characteristics of lower limbs, the skin variation in different areas can be used as the basis for structural design and fabric selection.

**Key words:** motion capture, running exercise, skin deformation, compression pants, partition design

近年来,越来越多的跑步运动员及运动爱好者选择压缩裤作为日常运动裤装,穿着压缩裤不仅能提高运动的主观舒适感,而且还起到减缓疲劳、加快运动恢复等作用<sup>[1]</sup>。压缩裤作为高弹性贴体服

装,对皮肤与面料之间的契合度有较高要求,体表皮肤形变规律是其服用性能及结构设计的理论基础,对功能性运动服装的研发尤为重要<sup>[2]</sup>。

国内外已有不少关于下肢皮肤形变的研究<sup>[3-4]</sup>,

收稿日期:2022-03-06; 修订日期:2023-03-15。

基金项目:浙江省大学生科技创新活动计划暨新苗人才计划项目(2021R406074)。

作者简介:张宁峰(1998—),女,硕士研究生。

\*通信作者:刘成霞(1975—),女,教授,硕士生导师。主要研究方向为纺织品及其测试方法。Email: gloriol-liu@163.com

主要围绕腿部运动姿势以及工艺参数设计等方面展开。其中腿部运动姿势主要针对不同运动特征,通过人工测量或三维系统获得运动中人体主要尺寸变化及皮肤形变规律,具有较好的准确性和实用性<sup>[5-6]</sup>;工艺参数设计主要探究各姿态下体表形变规律与服装面料拉伸的关系,以此提高运动服装的自由度和舒适度<sup>[7-8]</sup>。目前,市场上运动压缩裤的面料、结构等比较单一,而人体运动状态下的皮肤形变是动态变化的,为提高服装的运动性能,在设计服装时应考虑到人体运动状态下皮肤变形问题。

现阶段跑步成为深受人们日常喜爱的运动之一<sup>[9]</sup>,而目前关于运动功能性服装的研发主要涉及骑行、滑雪和球类等特殊运动,对跑步运动姿势的研究较少,且相关研究中缺乏针对实际运动姿势进行精确量化的手段。因此,文中通过三维动态捕捉系统获取人体跑步运动特征,将下肢运动过程分解

为 4 个关键姿势,在运动捕捉基础上,结合体表描线法获取下肢横、纵向皮肤变化的数据,并基于跑步运动中人体下肢各部位皮肤的尺度变化规律对无缝针织裤装原型进行网格分区设计,为压缩裤的开发设计提供参考。

# 1 实验

## 1.1 实验材料

**1.1.1 实验仪器与工具** 实验主要设备三维动态捕捉仪,瑞典 Qualisys Oqus 公司制造;辅助工具为跑步机、软尺、标记笔和量角器等。

## 1.2 实验对象

以健康且有跑步习惯的青年女性作为实验对象,选取 3 名腿型均匀的女大学生,年龄 $(22 \pm 1)$ 岁,身高 $(160 \pm 2)$ cm,体质量 $(48 \pm 2)$ kg,平均体型特征见表 1。

表 1 受试者下肢体型参数

Tab.1 Average parameters of lower limb shape of the subjects

部位	平均围度/cm	标准差/cm	部位	平均围度/cm	标准差/cm
腰围	64.5	±0.79	膝盖围	34.0	±0.62
臀围	91.5	±1.22	小腿上围	33.0	±0.20
大腿根围	52.0	±2.30	小腿中围	30.3	±0.61
大腿中围	47.5	±0.61	脚踝上围	24.0	±0.72
大腿下围	41.8	±1.59			

## 1.3 实验方法

**1.3.1 实验动作确定** 当人体处于跑步运动时,上身动作基本保持不变,下肢运动则分为周期性的前腾空、缓冲及后腾空,动作包括前摆、着地缓冲、后蹬、腾空等。此外,由于双腿在跑步过程中动作相同,因此本研究仅针对下肢,且以左腿为例展开研究,具体人体运动轨迹标记点如图 1 所示。

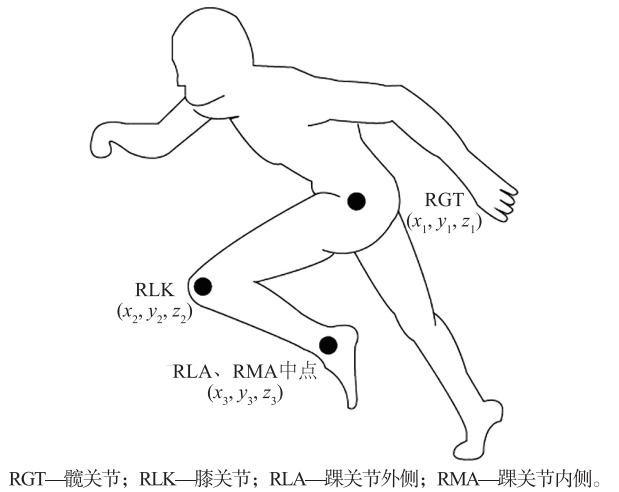
由图 1 可知,为采集人体标记点的运动轨迹并记录整个动态过程,在受试者跑步运动前,分别在髋关节(RGT)、膝关节(RLK)、踝关节内外(RLA, RMA)处贴好反光标记球,标记点所对应三维坐标分别为髋关节 $(x_1, y_1, z_1)$ 、膝关节 $(x_2, y_2, z_2)$ 、踝关节中点 $(x_3, y_3, z_3)$ 。根据空间向量夹角公式计算膝关节角(AKJ)在不同阶段的最大和最小值,即

$$\alpha = \frac{(x_2 - x_1)(x_2 - x_3) + (y_2 - y_1)(y_2 - y_3) + (z_2 - z_1)(z_2 - z_3)}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2 + (z_2 - z_3)^2}};$$
$$\beta = \arccos(\alpha)。$$

(1)

式中: $\alpha$  为关节角余弦值; $\beta$  为膝关节角。

将一个完整周期的腿部动作分解为 4 个关键动作:向前伸运动至最大关节角、垂直支撑半屈曲缓冲、后摆至最大关节角、后收缩至最小关



RGT—髋关节; RLK—膝关节; RLA—踝关节外侧; RMA—踝关节内侧。

图 1 人体运动轨迹标记点示意

Fig.1 Schematic diagram of marking points

节角,分别记为动作 A、动作 B、动作 C、动作 D,如图 2 所示。为保证研究过程的科学严谨,受试者的所有跑步运动均在速度为 8 km/h 的跑步机上进行。

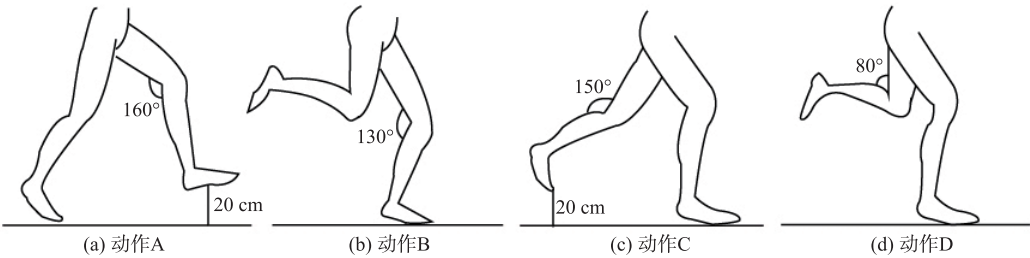


图 2 实验动作分解

Fig. 2 Experimental action decomposition diagram

**1.3.2 测量基准线确定及数据采集** 根据 ISO 8559—1989 标准,对人体下肢进行纵横向测量,其中横向测量线对应腰围  $W$ 、臀围  $H$ 、大腿根围  $W_1$ 、大腿中围  $W_2$ 、大腿下围  $W_3$ 、膝围  $W_4$ 、小腿上围  $W_5$ 、小腿中围  $W_6$ 、脚踝上围  $W_7$ 。纵向测量线  $H_1 \sim H_4$  分别对应各截面围度的前侧  $A$ 、外侧  $B$ 、后侧  $C$ 、内侧  $D$ 。9 条横线和 4 条纵线的下肢体表画线方案如图 3 所示。

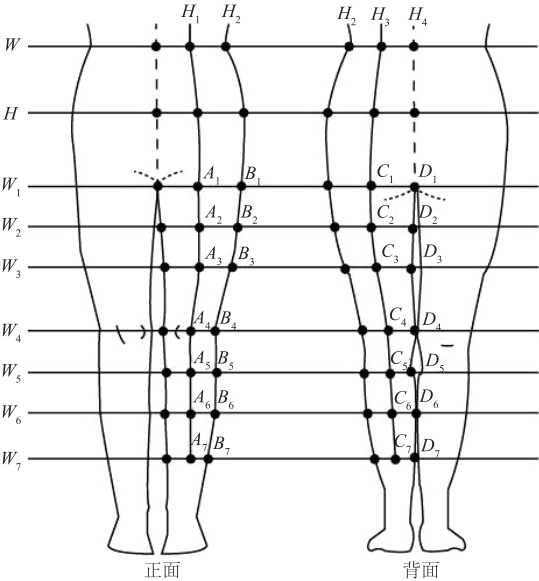


图 3 下肢测量基准线

Fig. 3 Lower limb measurement datum line

目前,人体动态尺寸和皮肤形变率的测量方法主要分为接触式测量和非接触式测量,常用的有体表描线法<sup>[4]</sup>、石膏法<sup>[6]</sup>、网格法<sup>[7]</sup>等。文中采用体表描线法,根据下肢关节运动特点分解人体跑步姿势,标记下肢皮肤横纵向测量线。在每组动作测量之前,受试者调整好相应姿势并保持 1 min,确保腿部皮肤形变趋于稳定状态后,视线与软尺刻度线垂直读取并记录受试者在自然静态站立和跑步分解动作下体表横纵向尺寸(如横向  $A_1B_1$  表示大腿围  $W_1$  处水平位置的腿部前中线到外侧缝线的长度,纵向  $A_1A_2$  表示腿部前中线位置处的大腿围  $W_1$  到  $W_2$  的长度)。为了减少误差,测量时软尺应贴于体表,

不可紧压皮肤。通过计算体表皮变化率,可以得到跑步状态下人体下肢皮肤拉伸情况。具体公式为

$$\alpha = \frac{A - B}{B} \quad (2)$$

式中: $A$  为运动状态下测量点之间的长度 (cm); $B$  为静态站立状态下测量点之间的长度 (cm); $\alpha > 0$  表示拉伸, $\alpha < 0$  表示收缩。

2 结果与分析

2.1 横向尺寸形变分析

4 个跑步动作(大腿向前伸至最大关节角、左腿垂直支撑半屈曲缓冲、左腿后摆至最大关节角、左腿后收至最小关节角)时皮肤横向形变率如图 4 所示。

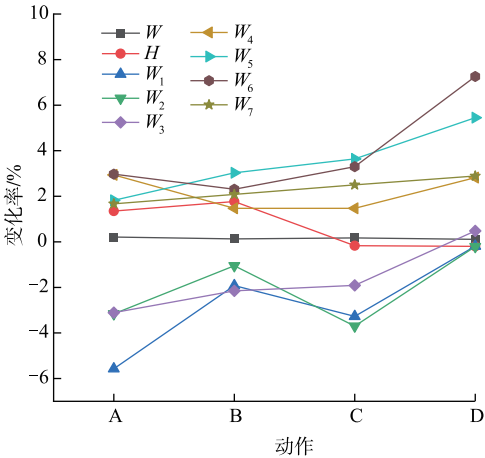


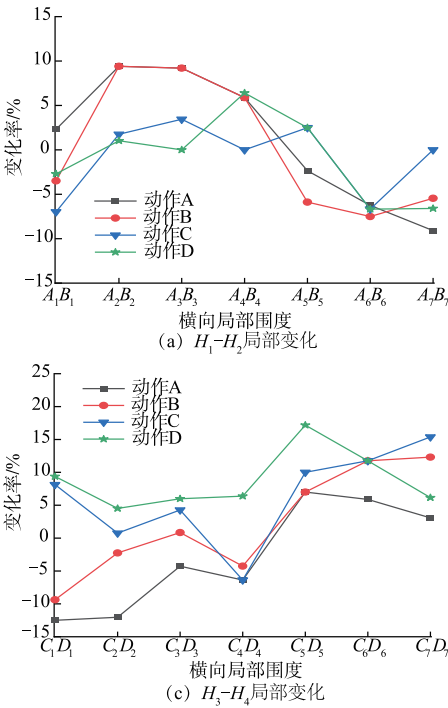
图 4 下肢围度变化

Fig. 4 Girth change of different parts of leg

由图 4 可知,跑步运动中体表皮伸缩变化随关节角度及位置的变化而有所不同。从整体看,腰围  $W$  呈不明显拉伸状态,臀围  $H$  呈先拉伸后收缩趋势,但变化率波动较小。腿部皮肤的横向拉伸程度大于收缩程度,大腿围  $W_1 \sim W_3$  在运动中以收缩状态为主, $W_1$  在动作  $A$  时变化率较大,达到  $-5.57\%$ ,在动作  $D$  时变化率较小,仅  $-0.2\%$  左右。膝盖围  $W_4$  及小腿围  $W_5 \sim W_7$  在运动中均为拉伸状态,且

$W_5$  和  $W_6$  变化率随运动周期呈增大趋势,  $W_6$  的变化率比较显著, 在动作  $D$  时高达 7% 左右;  $W_4, W_7$  横向变化率在 3% 以内, 围度变化不是很明显。

进一步对横向变化率较大的腿部皮肤形变进行分段分析, 横向局部变化率如图 5 所示。由图 5 可以看出, 反面局部横向变化率较大, 正面局部横向变化率较小且相差不大。图 5(a) 中, 在整个周期中腿部外侧围度  $A_2B_2$  的拉伸较大, 围度  $A_6B_6$  的收缩较大, 分别为 9.41%, -7.5%; 围度  $A_2B_2, A_3B_3, A_4B_4$  变化率在前半步态周期中大于 0, 后半步态周期中小于 0; 图 5(b) 和图 5(c) 中, 当下肢向前伸运动至最大关节角(动作 A)时, 腿部外侧  $H_2$  和  $H_3$  横向部分处于收缩状态,  $B_2C_2$  收缩程度最大可达 -21% 左右; 当后收缩至最小关节角(动作 D)时,



反面内侧  $C_5D_5$  拉伸较大, 最大值为 17.18%; 图 5(d) 中, 与  $C_4D_4$  先收缩后拉伸不同,  $D_4A_4$  在步态周期中处于拉伸状态, 在动作 D 时达到 9% 左右, 说明在不同状态下相同围度的皮肤变化率受肌肉状态的影响, 局部横向围度会有较大差别。

为探究跑步运动中不同姿势对下肢横向皮肤形变的影响是否显著, 利用 SPSS 软件分别对 4 种不同跑步动作下横向形变数据进行单因素方差分析 (ANOVA), 结果见表 2。由表 2 可以看出, 在 0.05 显著水平下, 跑步姿势对腿部皮肤形变具有显著影响, 对腰臀区域横向形变影响不显著, 且  $F$  值为  $0.678 < 1$ , 说明跑步姿势对腰臀尺寸横向形变造成的影响较小, 结果与图 4 显示的结果一致(图 4 中腰臀围在跑步周期中形变量接近 0 且波动较小)。

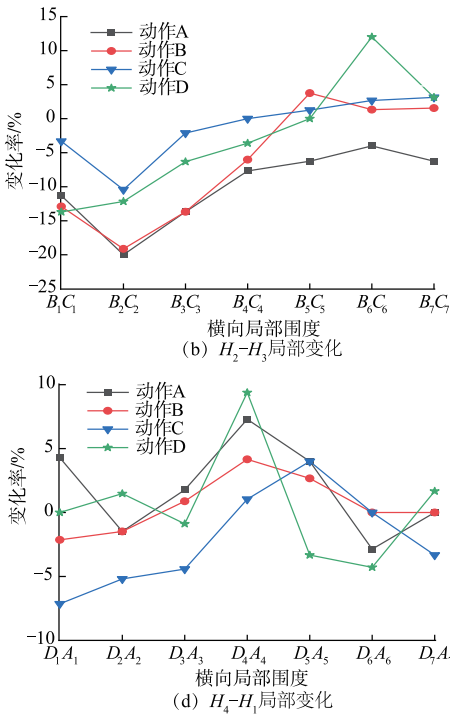


图 5 腿部横向局部变化率

Fig. 5 Transverse local change rate of leg

表 2 方差检验结果

Tab. 2 Variance test results

区域	类别	平方和	自由度	均方	统计量	显著性
腰臀	组间	1.016	3	0.339	0.678	0.610
	组内	1.999	4	0.500		
	总计	3.015	7			
腿部	组间	4.278	3	1.426	13.546	0.050
	组内	62.621	24	2.609		
	总计	66.898	27			

2.2 纵向尺寸形变分析

不同跑步动作下肢纵向形变率如图 6 所示。将人体下肢划分为两大区域, 分别为  $W$  至  $W_1$  (腰臀)、

$W_1$  至  $W_7$  (腿部)。

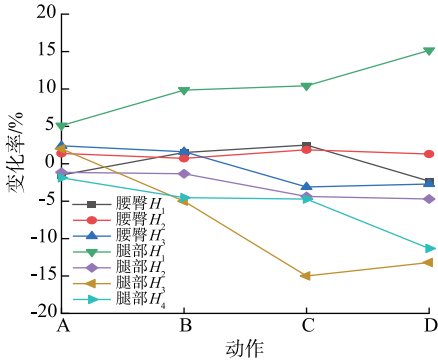


图 6 下肢纵向变化

Fig. 6 Length variation of different parts of leg

由图 6 可知,腰臀区域纵向皮肤变化率在  $\pm 3\%$  左右,变化不明显;腿部区域正面线段  $H_1$  处于拉伸状态,其余变化率基本呈收缩趋势;腿部  $H_1$  的整体纵向变化率明显大于其他纵向变化,变化率最大可达  $15.15\%$ ;腿部  $H_2$  的纵向变化最小,在动作 A 时绝对值仅有  $1.14\%$ 。与图 4 对比可知,纵向皮肤形变率在  $-15\% \sim 15\%$ ,而横向皮肤形变在  $-5\% \sim 8\%$ ,运动中下肢纵向形变较大且大于横向形变量。

腿部局部纵向尺寸变化规律如图 7 所示。在跑步运动周期中,下肢纵向局部皮肤形变率曲线变化趋于一致。由图 7(a)可知,动作 D 对腿部正面  $H_1$  的长度影响最大,最大变化率绝对值可达  $43\%$  左右;对于大腿纵向局部线段  $A_1A_2, A_2A_3$ ,不同跑步动作对其影响由大到小依次是:  $A > C > D > B$ ;此外也可以发现膝盖区域( $A_3A_4$  和  $A_4A_5$ )纵向的变化幅度较大,以拉伸状态为主;在动作 B, D 下,小腿纵向局部线段  $A_5A_6, A_6A_7$  的收缩变化较为平稳。由图 7

(b)可知,线段  $B_1B_2, B_6B_7$  在跑步周期中变化差别不大,腿部弯曲运动使得膝盖上方  $B_3B_4$  产生大幅度拉伸,在动作 A 时最大值为  $13.8\%$ ,而下方  $B_4B_5$  则有不同幅度的收缩,长度变化率产生较大波动。由图 7(c)和(d)可知,在动作 D 时,膝盖的弯曲运动造成腿部反面皮肤收缩,且膝盖附近皮肤变化较大,纵线  $C_3C_4$  和纵线  $C_4C_5$  皮肤最大收缩率分别达到  $-27.66\%$ ,  $-31.8\%$ ;在动作 A, B, D 时,小腿内侧产生不同幅度的纵向收缩,  $D_4D_5$  最大值达到  $-10.5\%$ 。

为探究跑步运动中不同姿势对下肢皮肤纵向形变的影响是否显著,利用 SPSS 软件对 4 种不同跑步动作时下肢纵向形变数据进行单因素方差分析(ANOVA),结果见表 3。由表 3 可知,在  $0.05$  显著水平下,运动姿势对腰臀皮肤形变的影响不显著,对腿部皮肤形变具有显著影响(其显著性数值  $< 0.05$ )。

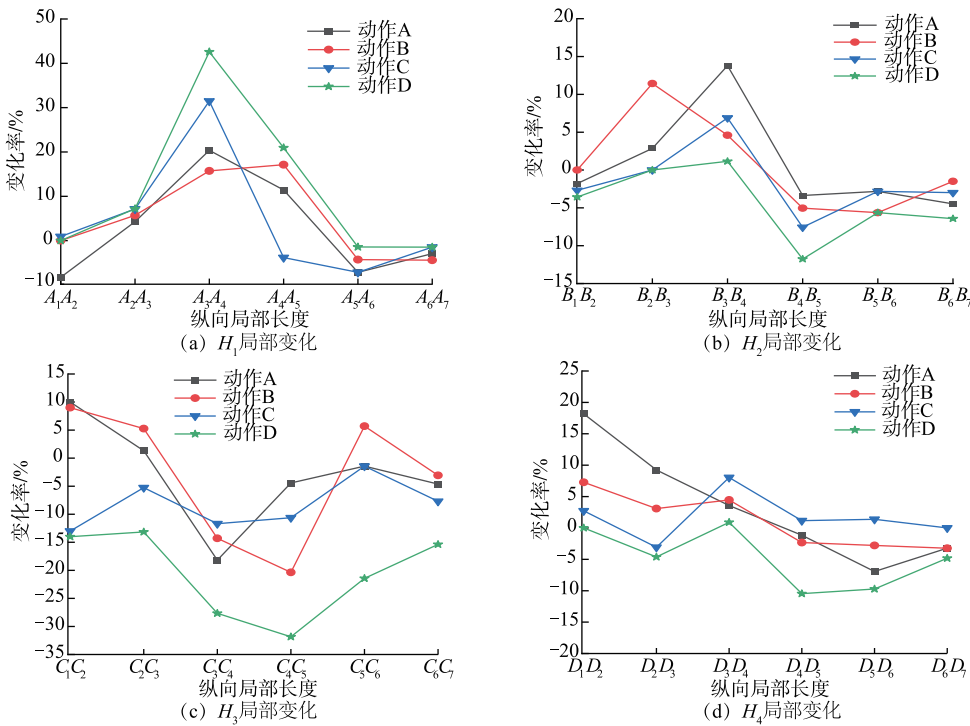


图 7 腿部纵向局部变化率

Fig. 7 Longitudinal local change rate of leg

表 3 方差检验结果

Tab. 3 Variance test results

区域	类别	平方和	自由度	均方	统计量	显著性
腰臀	组间	2.396	3	0.799	2.205	0.165
	组内	2.897	8	0.362		
	总计	5.293	11			
腿部	组间	170.469	3	56.823	3.680	0.043
	组内	185.288	12	15.441		
	总计	355.757	15			

2.3 下肢形变网格图

在跑步过程中,为使运动压缩裤具备良好的合体性和舒适性,其结构设计应始终与人体下肢各部位皮肤的伸缩变化相适应,以便在人体运动状态下为下肢提供舒适感<sup>[10]</sup>。因此,对 4 种不同跑步姿势进行分解,找出人体不同部位皮肤形变值的差异,并对其皮肤变化率进行极值筛选。以无缝针织裤为原型得到基于跑步运动特征的下肢皮肤形变率网格图,其中网格横、纵线与体表测量线对应,如图



8 所示。由图 8 可知,在跑步运动过程中,大腿正面区域横向变化率多小于 10%,反面横纵向变化率大于正面;膝盖区域形变较大,纵向变化率大于 30%;小腿区域反面纵向变化率为 10% ~ 30%,正面及内侧横向变化率接近 20%,其他部位形变较缓和。

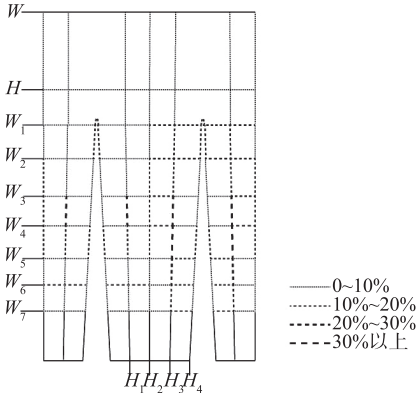


图 8 下肢形变率网格

Fig. 8 Mesh diagram of lower limb deformation

2.4 分区设计

由于跑步过程中下肢不同区域的尺寸变化各不相同,其中膝关节后侧收缩较为明显,大腿后侧其次;拉伸变化较明显的部位为膝盖前侧及外侧,其次是小腿后侧和裆部,腰臀围和小腿前侧伸缩变化较小。因此,在跑步压缩裤装设计中,可针对以上部位与人体下肢伸展幅度的关系进行分区设计。

根据文献[11],下肢贴体型服装各部位面料收缩率一般在 10% ~ 20%,且收缩率与服装压力密切相关。人体运动会使服装面料发生形变,运动过程中面料的伸长率越接近,对人体产生的服装压力越均匀,也就越能在保证压力舒适性的前提下减小肌肉损伤概率。因此,可对横向围度和纵向结构应用不同弹性模量的面料,皮肤形变超过 30% 的区域选用高弹面料,10% ~ 30% 的形变区域选用中弹面料,形变率低于 10% 的区域选用低弹面料,在满足压力舒适性的同时增加服装功能性。各区域选用的面料类型见表 4。

表 4 不同区域面料选用类型

Tab. 4 Selection types of fabrics in different areas			
区域	面料类型	区域	面料类型
1 <sup>#</sup>	中弹	5 <sup>#</sup>	高弹
2 <sup>#</sup>	中弹	6 <sup>#</sup>	中、高弹
3 <sup>#</sup>	低、中弹	7 <sup>#</sup>	中弹
4 <sup>#</sup>	中弹	8 <sup>#</sup>	低弹

由表 4 可知:①1<sup>#</sup>,2<sup>#</sup>区为腹臀部,运动过程中皮肤形变率虽小于 10%,但属于脂肪堆积区域,为满足人体活动的横向拉伸量,应增大臀裆部活动量,以满足髋关节的自由度,同时要考虑大腿前后

摆动对裆部前后拉伸变化的影响,可选择中弹面料以增加舒适度及自由度,避免过度束缚。②3<sup>#</sup>,8<sup>#</sup>区横纵向皮肤形变较小,且 3<sup>#</sup>区有大腿肌肉群,为确保大腿肌肉区域的稳定性,应适当施加压力,可选择横向模量稍低的中低弹性面料;8<sup>#</sup>区可选择低弹性面料。③4<sup>#</sup>区皮肤形变在跑步过程中大于 3<sup>#</sup>区,可选择中弹面料。④5<sup>#</sup>区皮肤拉伸及收缩变化较为明显,且膝关节运动幅度大,为不影响关节运动,应加大纵向拉伸自由度,可利用分割线加强该部位立体形态,以适应人体膝关节结构的运动状态,并选择横纵向模量较高的高弹面料,提高穿着者的运动自由度,避免膝关节受损,优化运动舒适性。⑤6<sup>#</sup>区为膝盖外侧区域,外侧区域在大腿部位纵向有拉伸,过膝关节逐渐减小,纵向形变大于横向形变,可适当增加外侧长度,选用纵向模量高、横向模量低的中弹面料。⑥7<sup>#</sup>区为小腿发力肌肉区域,为减小肌肉震荡,可采用纵向模量高、横向模量低的中弹面料,加大小腿后侧压力。通过上述分析,基于下肢横纵向在跑步运动中产生的不同皮肤变化率,对压缩裤装进行分区设计,具体如图 9 所示。

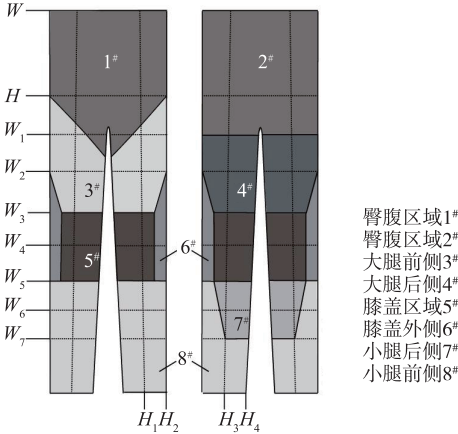


图 9 跑步压缩裤分区设计

Fig. 9 Running compression pant partition design

3 结 语

通过三维动作捕捉仪获取跑步运动下人体下肢特征,结合体表画线法分析静态及跑步关键动作对应的下肢皮肤形变分布规律,得出以下结论:

1)跑步会引起人体下肢各区域皮肤形变,尤其对腿部影响较为显著。大腿正面常处于收缩状态,反面多为拉伸状态,且纵向变化幅度大于横向;膝盖的弯曲运动使皮肤产生大幅纵向收缩,纵向局部变化率绝对值高达 43% 左右;小腿长度方向整体呈收缩状态,围度上正面变化大于反面,长度上则相反。

2)跑步运动对腰臀形变的影响不显著,腰臀部的横、纵向皮肤变化程度较平稳,整体变化率在 $\pm 3\%$ 以内,呈现前拉伸后收缩的趋势。

3)跑步运动中下肢各区域的皮肤形变差异较大,分析横向及纵向皮肤变化率可用于优化压缩裤等紧身类运动裤装设计,如选用不同组织结构及弹性模量的面料进行分区设计,为下肢不同区域提供舒适服装压的同时使服装更加符合人体运动特性,从而提高着装舒适性。

### 参考文献:

- [1] 郑晴,王宏付,柯莹. 运动压力裤的功能研究进展[J]. 服装学报, 2018, 3(6): 482-486.  
ZHENG Qing, WANG Hongfu, KE Ying. Review on the functions of compression tights[J]. Journal of Clothing Research, 2018, 3(6): 482-486. (in Chinese)
- [2] 邢梦迪,刘莉. 运动捕捉技术在运动服装研发中的应用[J]. 山东纺织科技, 2017, 58(4): 25-28.  
XING Mengdi, LIU Li. The application of motion capture technology in developing sportswear[J]. Shandong Textile Science and Technology, 2017, 58(4): 25-28. (in Chinese)
- [3] 王永进. 动态人体尺寸的测量方法[J]. 纺织学报, 2013, 34(4): 104-110.  
WANG Yongjin. Study of body anthropometrical method in motion state[J]. Journal of Textile Research, 2013, 34(4): 104-110. (in Chinese)
- [4] 程宁波,吴志明,徐存东. 基于运动捕捉的骑行运动中人体皮肤形变分析[J]. 纺织学报, 2018, 39(9): 120-126.  
CHENG Ningbo, WU Zhiming, XU Cundong. Analysis on skin deformation of human body during cycling based on motion capture[J]. Journal of Textile Research, 2018, 39(9): 120-126. (in Chinese)
- [5] 王燕珍,王建萍,张燕,等. 基于跑步运动状态下的皮肤拉伸研究[J]. 纺织学报, 2013, 34(8): 115-119.  
WANG Yanzhen, WANG Jianping, ZHANG Yan, et al. Study of skin stretching based on running sports status [J]. Journal of Textile Research, 2013, 34(8): 115-

119. (in Chinese)

- [6] 李秀青,刘需,赵欲晓. 骑行运动中男子下肢体表尺寸变化规律[J]. 纺织学报, 2017, 38(8): 120-126.  
LI Xiuqing, LIU Xu, ZHAO Yuxiao. Study on size changes of man's lower limb body in riding motion[J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(8): 120-126. (in Chinese)
- [7] 冯洋,王永进. 基于足球运动的男子下肢体表皮肤形变的研究[J]. 北京服装学院学报(自然科学版), 2017, 37(2): 25-32.  
FENG Yang, WANG Yongjin. Study on skin deformation of man's lower limb during football[J]. Journal of Beijing Institute of Clothing Technology (Natural Science Edition), 2017, 37(2): 25-32. (in Chinese)
- [8] 王伟荣,丛洪莲. 基于下肢运动特征的纬编无缝瑜伽裤结构设计[J]. 纺织学报, 2021, 42(6): 140-145.  
WANG Weirong, CONG Honglian. Structural design of weft-knitted seamless yoga pants based on leg motion characteristics[J]. Journal of Textile Research, 2021, 42(6): 140-145. (in Chinese)
- [9] 傅维杰,刘宇,魏书涛,等. 紧身装备在体育科学领域的研究现状与展望[J]. 中国体育科技, 2011, 47(2): 114-120.  
FU Weijie, LIU Yu, WEI Shutao, et al. Research advancements and prospects of compression equipments in sports science[J]. China Sport Science and Technology, 2011, 47(2): 114-120. (in Chinese)
- [10] 吴济宏,于伟东. 针织面料的拉伸弹性与服装压[J]. 武汉科技学院学报, 2006, 19(1): 21-25.  
WU Jihong, YU Weidong. The elasticity and clothing pressure of knitted fabrics[J]. Journal of Wuhan University of Science and Engineering, 2006, 19(1): 21-25. (in Chinese)
- [11] 刘咏梅,杨一凡,赵纹硕. 基于特定伸长率的针织一片式紧身裤结构设计[J]. 针织工业, 2019(9): 57-62.  
LIU Yongmei, YANG Yifan, ZHAO Wenshuo. Structure design of knitted one-piece trousers based on specific elongation rate[J]. Knitting Industries, 2019(9): 57-62. (in Chinese)

(责任编辑:张雪)