

【专题：人机工程学与设计应用】

## 基于运动生物力学的护膝设计评价

张峻霞<sup>1,2</sup>, 张子倩<sup>1,2</sup>, 邵洋洋<sup>1,2</sup>, 刘泽龙<sup>1,2</sup>, 高昆<sup>1,2</sup>

(1.天津科技大学 机械工程学院, 天津 300222;

2.天津科技大学 天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控实验室, 天津 300222)

**摘要:** **目的** 旨在探究穿戴三种典型护膝导致的青年人和老年人下肢运动生物力学的变化, 为膝关节护具设计提供相关建议。**方法** 利用 VICON 三维运动捕捉系统、ATMI 三维测力台、Pedar-X 足底压力测试系统等设备对运动学、动力学和足底压力参数进行采集, 根据青年组和老年组实验数据所显示出来的变化趋势总结出三种护膝对不同年龄段人群的影响。**结果** 护膝 B 和护膝 C 对两组受试者造成的影响比护膝 A 更为显著, 两组受试者穿戴护膝后膝关节屈曲方向负荷均增大, 老年组踝关节和足弓负荷增大, 其肢体稳定性也受到影响。**结论** 三种典型护膝对不同年龄段人群造成了不同的影响, 护膝设计应当参照所对应的生物力学变化, 考虑人群、左右肢差异等因素, 综合分析其对膝关节组织和肌肉组织的影响, 以提高人机耦合性。

**关键词:** 运动学; 动力学; 足底压力; 护膝

**中图分类号:** TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)24-0001-07

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.24.001

## Evaluation of Kneepad Design Based on Sports Biomechanics

ZHANG Jun-xia<sup>1,2</sup>, ZHANG Zi-qian<sup>1,2</sup>, SHAO Yang-yang<sup>1,2</sup>, LIU Ze-long<sup>1,2</sup>, GAO Kun<sup>1,2</sup>

(1.School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China;

2.Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and On-line Monitoring for Light Industry & Food Machinery and Equipment, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

**ABSTRACT:** The work aims to explore the biomechanics changes of lower limb movement in young and old people caused by wearing three typical knee pads, and to provide relevant suggestions for design of kneepads. VICON 3-D motion capture system, ATMI three-dimensional force measuring platform, Peder-X plantar pressure testing system were used to collect kinematics, dynamics and plantar pressure parameters. According to the changing trend of the experimental data of the youth group and the elderly group, the influences of three kinds of kneepad on different age groups were summarized. Kneepad B and kneepad C had more significant impacts on the two groups of subjects than kneepad A. The flexural load of the knee joint increased in both groups after wearing kneepad, while the ankle and arch load increased in the elderly group, and the stability of the limbs was also affected. Three typical kneecaps have different effects on the different ages. Knee design should follow the corresponding biomechanics changes, consider the factors of the difference of crowd, left and right limbs, and comprehensively analyze its influence on the structure of knee joint and muscle in order to improve the coupling performance.

**KEY WORDS:** kinematics; dynamics; plantar pressure; kneepad

膝关节是人体下肢重要的负重关节, 构造复杂且由于膝关节经常进行屈伸、内收外展和旋转活动, 使

其常处于一种超负荷的运动状态, 极易引起运动性疲劳从而导致损伤的产生, 其发生运动损伤的概率远大

收稿日期: 2020-11-16

基金项目: 国家自然科学基金委员会面上项目 (50975204)

作者简介: 张峻霞 (1968—), 女, 山西人, 博士, 天津科技大学机械工程学院教授, 主要从事人机工程及人体仿生机构学研究。

于其他关节<sup>[1]</sup>，需要佩戴相关护具对其进行保护。护膝是用来保护运动者在运动中免受损伤的一种护具产品，它能够有效减少运动过程中运动损伤的概率<sup>[2-5]</sup>。目前多数运动员和部分健身爱好者都将佩戴专业运动护膝作为保护膝关节的重要手段。本文从运动生物力学的角度出发，对青年人和老年人穿戴护膝时的运动学、动力学和足底压力参数变化进行了深入研究。

## 1 基于运动生物力学的护膝研究

运动生物力学是生物力学的一个重要分支，研究范围非常广泛，主要利用力学原理研究人体在运动中的力学规律，其研究目的是通过对生物力学原理的探究，降低运动损伤的风险。一般在生物力学中可以将相关参数划分为运动学参数、动力学参数、足底压力参数和肌电参数等。

护膝作为一种可穿戴产品，在使用过程中与人体直接耦合发挥作用，因此在其设计中仅仅考虑相关人体部位的静态尺寸是远远不够的，应该深入研究其对于下肢运动生物力学的影响。关于穿戴护膝的相关生物学分析在国外研究较多，国内较少涉及。Breloff 等人<sup>[6]</sup>研究了穿戴护膝对人体在特定动作下的下肢关节角度等运动学参数，发现在特定动作下穿戴护膝对运动学参数的影响不大，但会减小最大关节角度，从而减少膝关节负荷，降低由于下肢关节角度过大而导致的肌肉骨骼疾病风险。Jonathan 等人<sup>[7]</sup>通过探究铰链套筒支撑和铰链框架支撑在对齐和错位条件下对行走中人体下肢关节力学的影响，发现套筒支撑和框架支撑在对齐条件下的踝关节跖屈力矩峰值和膝关节屈曲角峰值显著减小。Khadavi 等人<sup>[8]</sup>通过膝关节损伤和骨关节炎结果评分（KOOS）检查，发现膝关节支撑能够显著降低膝关节疼痛参数。Callaghan 等人<sup>[9]</sup>发现在经过六周的干预后，膝关节支撑对髌股关节疼痛患者的缓解症状明显优于对照组。

此外，相关研究表明，中国人与欧洲人群在解剖特征和膝关节步态模式等方面存在差异，因此需要开展针对国内人群的进一步研究<sup>[10-11]</sup>。目前已有研究主要集中在运动学和动力学方面<sup>[12]</sup>，缺少对足底压力等方面的研究，而足底压力分布是评价步态稳定性的重要指标。基于此，本文从运动生物力学角度出发，全面地探讨了儿种典型护膝对人体的影响，并在此基础上提出了护膝设计的相关建议。

## 2 实验设计

本研究选取了市面上三种较为典型的护膝类型，利用 VICON 三维运动捕捉系统、ATMI 三维测力台、Pedar-X 足底压力测试系统对青年人和老年人穿戴三种护膝时的运动学参数、动力学参数和足底压力相关参数进行采集。



图1 三种护膝产品  
Fig.1 Three kneepad products

### 2.1 实验护膝

根据功能和形态差异选择了三款市面上典型护膝产品，见图1。护膝A为ZAMST公司生产的髌骨带，型号为JK-Band，官方售价105元/只。其特点为体积和接触面积较小，可以有效减轻膝盖肌腱上的负荷。护膝B为LP公司生产的开放式魔术贴护膝，型号为733-KM，官方售价为284元/只。该护膝前方有圆形开孔，能够稳定髌骨，缓震减压，护膝两侧内置弹簧条缓冲压力，面料较为硬挺，与膝关节接触面积较大。护膝C是BAUERFEIND公司生产的套筒式护膝，型号为Genu Train 8，官方售价为599元/只。其特点为包裹性较强，内置竖向支撑条结构缓解压力，采用针织面料较为柔软且弹性较大，与膝关节接触面积是三款护膝中最大的。

本次实验分别选取了青年和老年受试者共十六人，其中青年人八名，老年人八名。受试者均为运动爱好者，且半年内均无下肢外伤史，无步态异常和膝关节疾病。试验开始前对受试者的下肢优势侧进行了测试，结果显示受试者下肢优势侧均为右侧。受试者在试验开始前已经知晓试验过程并且阅读和签署了试验知情同意书。

试验全程在天津科技大学生物力学实验室内进行，试验跑道由五块ATMI力台（60 cm×40 cm）和十块与力台同尺寸的金属方块构成，以配合ATMI力台的数据采集，两侧铺设同等尺寸的辅助跑道，每次试验中受试者需要从跑道一端慢跑至另一端。本次实验按照三种护膝的不同佩戴方式共分为十种条件：（1）不佩戴护膝慢跑；（2）左腿佩戴护膝A慢跑；（3）右腿佩戴1号护膝慢跑；（4）双腿左腿佩戴1号护膝；（5）左腿佩戴护膝B慢跑；（6）右腿佩戴2号护膝慢跑；（7）双腿左腿佩戴2号护膝；（8）左腿佩戴护膝C慢跑；（9）右腿佩戴3号护膝慢跑；（10）双腿左腿佩戴3号护膝。

### 2.2 参数选取

运动学参数有摆动时间（Swing time）、支撑时间（Stance time）、腾空时间（Flight time），步幅（L）、步速（V），膝关节在围绕X、Y、Z三个轴向的最小关节角度（LAKJ1、RAKJ1）、最大关节角度（LAKJ2、RAKJ2）、关节活动范围（LAKJx、RAKJx）；动力学参

数有关节峰力 (LKFJ、RKFJ)、峰力矩 (LKMJ、RKMJ)；足底压力参数有 COP 轨迹、峰值压强、接触面积和压强-时间积分 (足底冲量)。

### 2.3 数据处理与分析

本研究选用每次试验中间段较为稳定的一个完整步态周期进行分析，使用 Matlab 软件编程对实验数据进行处理，使用 minitab 中的方差分析功能进行统计学分析，显著性水平设定为  $p < 0.05$ ，非常显著性水平设定为  $p < 0.01$ 。

## 3 实验结果

为了对护膝的生物力学影响这一课题进行深入研究，本研究实验设计中分组较多，实验数据量大，由于篇幅限制，仅展示相关数据分析结果。详细数据分析和论证可以参考本课题组发表的其他关于受试者穿戴护膝时的步态特征和足底压力特征的文献。

### 3.1 运动学参数

老年人与青年人穿戴护膝后的部分时空步态参数 (见图 2) 变化呈现出相反的趋势，青年人穿戴护膝后的步幅、摆动时间和腾空时间均增大，但老年人的摆动时间和腾空时间均减小，步幅在穿戴护膝 B 时也减小。穿戴护膝后的青年人和老年人的支撑时间

都发生变大的趋势，而青年人穿戴护膝后的步速发生显著性减小的变化趋势。

相关研究表明<sup>[13]</sup>，在跑步过程中收缩肌肉所消耗的能量与接触时间成反比，因此穿戴护膝后支撑时间的增加有利于跑步经济性的提高，减轻人体在跑步过程中的肌肉消耗。青老年人在跑步过程中摆动时间和腾空时间变化趋势与青年组相反，说明老年人采取较为保守的步态策略以应对肌肉骨骼退化带来的影响并维持肢体稳定性，这种步态策略包括降低摆动时间和腾空时间。

步幅和步速是时空步态参数中的重要指标，尤其对专业运动员来说关系到运动成绩<sup>[14]</sup>，而穿戴护膝后青年人的步幅变化较小，仅穿戴护膝 B 有大幅度减小的趋势，但步速在穿戴护膝后有大幅度减小的趋势，穿戴护膝 B 和护膝 C 时这种变化更为显著。这意味着穿戴护膝导致青年人的步频减小，这种变化可能是由于护膝对膝关节的束缚导致膝关节运动受限，且护膝 C 对步速的作用效果最为明显，因此推测这种对膝盖的限制可能与护膝对膝盖的绑缚面积相关，较大的接触面积会限制膝关节周围肌肉发挥作用，从而对关节活动范围造成影响。

由图 3 可知，两组受试者穿戴护膝 B 时左足在 X 方向上和右足 Y 轴方向上的关节活动范围有显著的减小趋势，护膝 A 对两组受试者关节活动范围的影

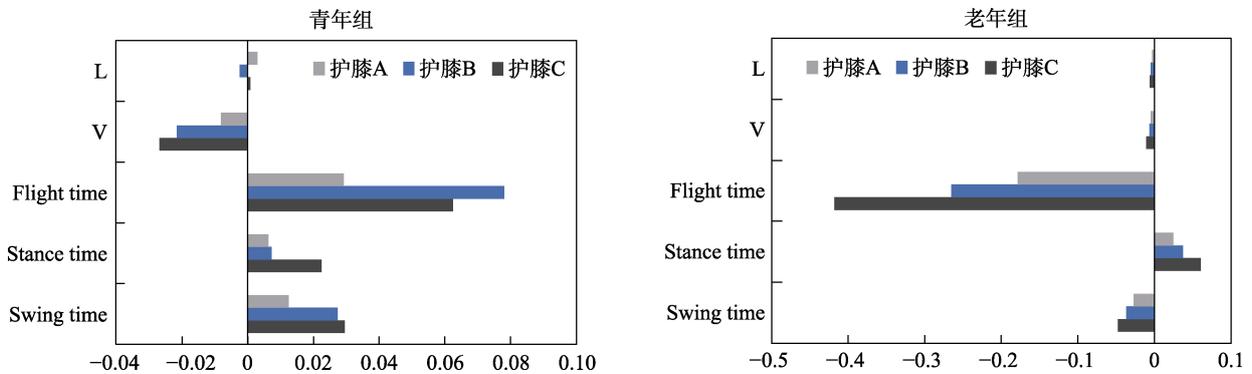


图 2 穿戴护膝跑步过程中时空步态参数  
Fig.2 Spatiotemporal gait parameters during running with kneepad

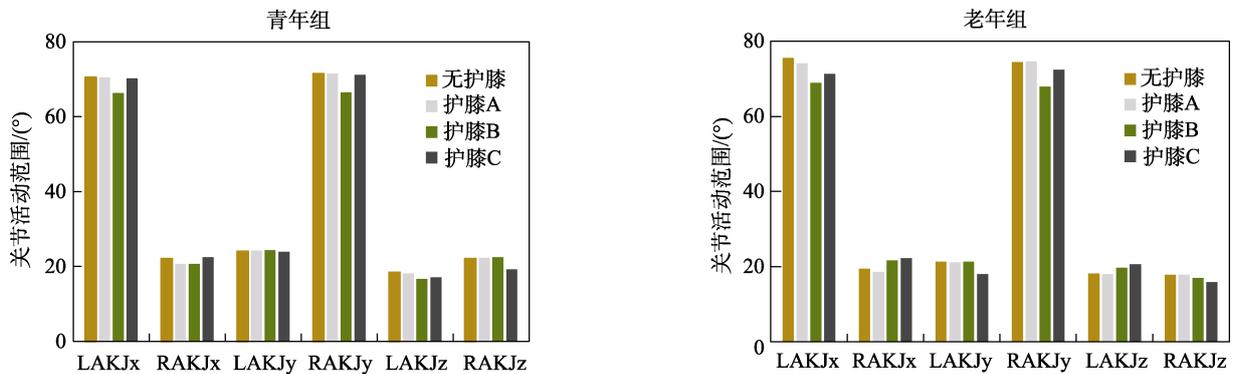


图 3 穿戴护膝跑步过程中膝关节活动范围  
Fig.3 Range of knee motion during running with kneepad

响较小。老年组穿戴护膝 B 和护膝 C 时右足屈曲方向上和左足内旋方向上关节活动范围有轻微增大的趋势。

护膝作为一种与人体膝关节直接耦合的穿戴式产品,其作用的发挥与护膝与膝关节的接触面积和相互作用力直接相关。护膝 B 由于采用较为硬挺的面料和魔术贴的固定方式,因此弹性较小,对膝关节的束缚固定效果较强,对关节活动范围影响较大,护膝 C 次之,护膝 A 最小。前人研究指出,护膝可以通过减少膝关节的多余活动量的方式保护膝关节<sup>[15]</sup>,屈曲角度增大可以降低膝关节损伤的可能性,但相关研究也表明肢体会通过其他方式对关节角度进行补偿<sup>[16]</sup>。

相关研究表明,人体双侧下肢的任务分配有所差异,右利者的左侧肢体主要负责支撑肢体和转移体重,而右侧肢体负责运动中的推进<sup>[17]</sup>。支撑和转移体重具有能量吸收行为,肢体推进行为主要依靠腿部肌肉的发力。肢体的推进行为主要发生在矢状面方向,而穿戴护膝后右足关节活动范围减小主要集中在 Y 轴方向上,因此推测穿戴护膝可能会影响青年人和老年人在跑步过程中的主要步态任务。

### 3.2 动力学参数

穿戴护膝跑步过程中下肢关节力矩(青年组)见图 4。由图可知,青年人穿戴护膝 A 对下肢关节峰值力矩影响较小,青年人穿戴护膝 B 时,踝关节各方向峰值力矩显著减小。青年组穿戴护膝时,膝关节的屈

曲峰值力矩显著增大,内收峰值力矩减小,右足内旋峰值力矩减小。穿戴护膝时屈曲峰值力矩增大而内收、内旋峰值力矩减小。

穿戴护膝跑步过程中下肢关节力矩(老年组)见图 5。由图可知,老年人穿戴护膝 A 对下肢关节峰值力矩影响较小,穿戴护膝 B 和护膝 C 时踝关节屈曲峰值力矩显著减小,膝关节屈曲峰值力矩显著增大,且增幅较大。穿戴护膝减小了老年组髌关节各方向峰值力矩。

通过相关数据分析可以发现,护膝 B 对关节峰值力矩的影响较大,护膝 C 次之。两组受试者左右两侧膝关节屈曲的峰力、峰力矩均显著增加,由于护膝 B 和护膝 C 通过加压固定膝关节,限制其运动范围,发挥保护作用,对膝关节屈曲方向产生压力,使屈曲峰力、峰力矩显著增加,需要更长的时间去吸收这些增加的能量<sup>[18-19]</sup>。

穿戴护膝时,膝关节内收峰值力矩和内旋峰值力矩都呈现出明显的减小趋势,说明护膝在额状面上和矢状面对膝关节的保护作用较为显著。

从三个方向上峰值力矩的角度分析,青年组穿戴护膝后两组受试者膝关节负荷增大,而髌关节、踝关节的负荷出现减小的趋势,但老年组膝关节和踝关节负荷增大,髌关节负荷减小,推测可能是由于老年人穿戴护膝后膝关节功能受限,对下肢应力的缓冲作用减弱,所以部分负荷转移到踝关节处<sup>[19]</sup>,导致踝关节负荷增大。

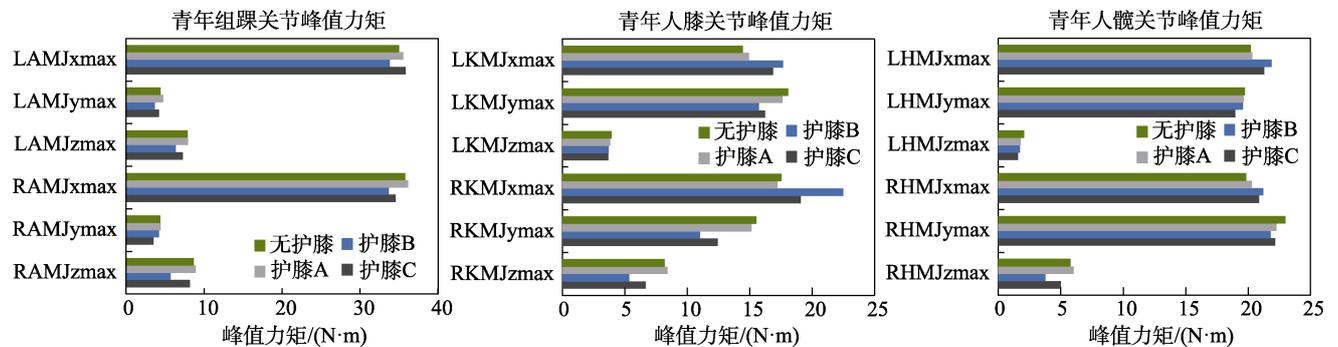


图 4 穿戴护膝跑步过程中下肢关节力矩(青年组)

Fig.4 Moment of lower limb joint during running with kneepad (the youth group)

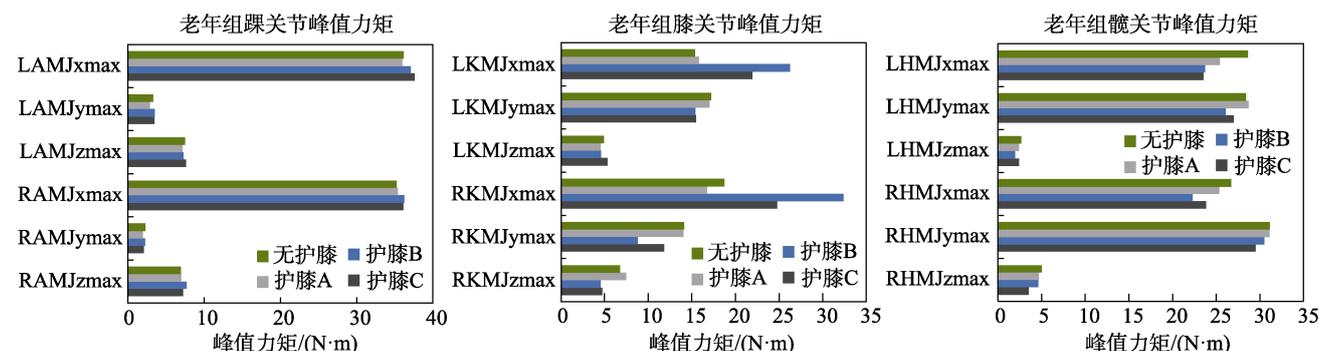


图 5 穿戴护膝跑步过程中下肢关节力矩(老年组)

Fig.5 Moment of lower limb joint during running with kneepad (the elderly group)

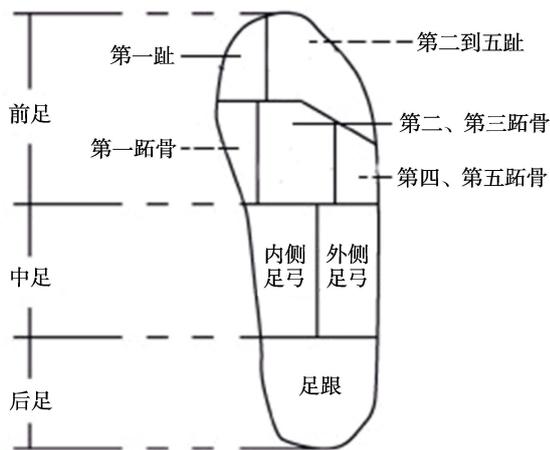


图 6 足底区域分布  
Fig.6 Plantar region distribution

### 3.3 足底压力参数

本研究将足底分为八个区域（见图 6），并对整足 COP 轨迹和八个分区的峰值压强、接触面积和足底冲量进行分析。

足底压力中心轨迹是人体运动过程中从足跟到前足的一系列运动轨迹，是足底压力分布的综合结果，也是对人体行走姿态的间接反映，在步态分析中作为评价行走稳定性的重要指标<sup>[20]</sup>。

穿戴护膝跑步过程中 COP 均值曲线见图 7。青

年人在支撑期的压力中心变化曲线是较为稳定的，表现出从外侧向内侧过渡的趋势。老年人曲线变化的总体趋势与青年人相同，但曲线整体波动幅度较大。老年组穿戴护膝时支撑中期 Y-COP 坐标位置较无护膝状态下更趋向于前足，这说明老年人在穿戴护膝时采取了更加前倾的运动策略。

研究表明，肢体侧向稳定性与跌倒风险成反比，老年人穿戴护膝时 X-COP 曲线整体波动幅度增大，表明侧向稳定向受到了较大的影响，可能会导致老年人运动过程中的跌倒风险增大，但青年人肢体稳定性并没有受到显著影响。出现这种差异的原因可能是护膝对膝关节产生了显著的限制作用，影响了膝关节结构维稳作用的发挥。在这种情况下，青年人往往可以采取肌肉补偿的策略应对变化趋势，而老年人由于肌肉组织功能退化无法迅速应对，因此导致肢体稳定性受到影响。前人研究表明<sup>[21]</sup>，运动中保持一定的前倾角度更有利于维持身体平衡并获得加速度。而老年人支撑中期所采取的前倾策略可能与穿戴护膝时所受到的横线扰动有关。通过对比老年组分别穿戴三种护膝时的 COP 轨迹曲线，可以发现护膝 B 对老年组的影响最大，护膝 C 次之，穿戴护膝 A 与无护膝状态下的差异较小，这与运动学和动力学参数所体现的结果一致。

青年人穿戴护膝后整足峰值压强、接触面积均减小，但老年人的峰值压强除了后跟区域，其他区域均

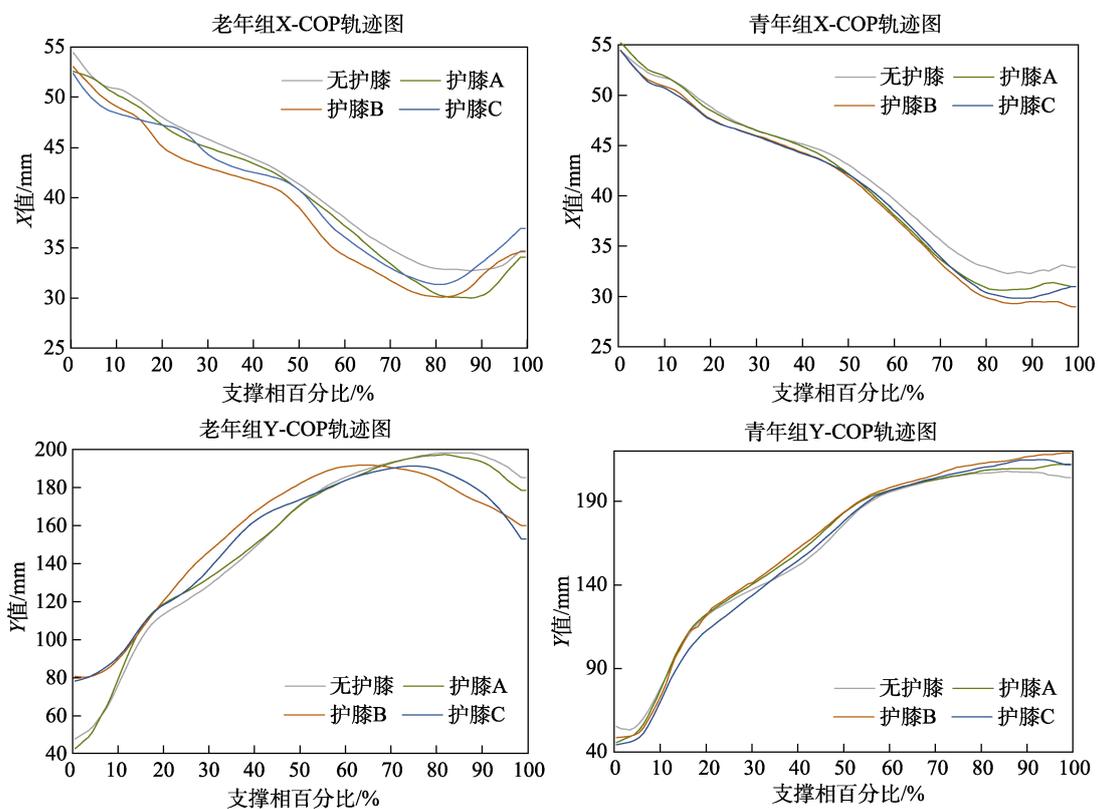


图 7 穿戴护膝跑步过程中 COP 均值曲线  
Fig.7 COP average curve during running with kneepad

呈现增大的趋势,接触面积减小的区域集中在前足外侧,增大的区域集中在足弓部位。青年组穿戴护膝后的足底冲量也趋向于减小,其中足弓区域的减小趋势最显著,老年人整足足底冲量增大,其中前足和足弓区域最为显著。

通过对峰值压强、接触面积和足底冲量三种参数的分析,可以发现青年人穿戴护膝后的足底负荷具有减小的趋势,这种趋势有利于青年人减轻足弓负荷,预防足弓塌陷等疾病。老年组穿戴护膝后足内侧接触面积显著增大,可能会导致内翻足等疾病的发生。同时,穿戴护膝导致老年组足底冲量显著增大,这意味着穿戴护膝给老年人足底带来了更大的负荷,相关研究表明,长期承受较大负荷容易导致足弓区域下降,造成疲劳和损伤<sup>[22]</sup>。

#### 4 护膝评价和设计建议

通过对不同护膝状态下各生物力学参数的分析,发现三种不同种类的护膝对下肢产生的影响有着较为显著的差异。不同护膝间作用差异主要体现在作用效果大小方面,但三种护膝对下肢生物力学参数的影响变化趋势是相同的。

护膝 A 作为一种专门针对髌骨部位的膝关节保护产品,由于其体积和与人体下肢接触面积较小,因此对下肢生物力学参数的整体影响有限,相较于其他两种护膝,护膝 A 对运动学参数、动力学参数和足底压力参数的影响都较小。

护膝 B 整体面料采用聚酰胺纤维,材质硬挺但弹性较小,因此穿戴后对膝关节的限制作用较大。从关节运动范围和关节角度等运动学参数来看,护膝 B 都发挥了较为显著的关节限制作用。

护膝 C 采用整体针织面料,质地柔软且弹性较大,与膝关节接触面积比前两种更大,因此能够对膝关节周围肌肉产生更多的影响,导致老年组在穿戴护膝 C 时肢体稳定性所受影响最大。

通过上述分析,总结出以下几点设计建议。

1) 膝关节部位关节囊松弛,不足以将髌骨稳定在股骨上,髌骨需要依赖于周围肌腱、肌肉等组织维持稳定状态并发挥作用。运动状态下膝关节活动更为剧烈,髌骨运动范围增大,易于引发髌骨脱位与半脱位等症状,因此需要辅助产品固定。虽然三种护膝都对髌骨部位进行了物理固定,但股四头肌和股内侧肌肌力的强弱对髌骨的脱位状态有着较大的影响<sup>[23]</sup>,因此在护膝设计中应该进一步考虑对周围肌肉的限制和影响,以保证护膝对膝关节整体的作用效果。

2) 相较于行走,跑步运动需要更大的膝关节屈曲角度以获得更大的推动力并缓冲下肢所受冲击,然而穿戴护膝导致膝关节屈曲角度较小,可能会影响到跑步中地面推动力的获得效率,从而影响到跑步的经济性。膝关节护具应该在保证膝关节运动方向活动量

充足的前提下,尽量减少膝关节的活动量,以减小运动损伤的几率。因此,在护膝设计过程中,应该考虑压力的分区分布设计,即对水平面和额状面方向加压以减小这两个方向上的关节活动量,达到稳定膝关节的目的,在针对专业运动员的护膝设计中,还应该特别注意护膝施加在矢状面方向上压力需要相对减小,以保证跑步运动的经济性,提高运动效率。

3) 通过对比左右侧下肢动力学、运动学数据和足底压力参数,发现穿戴护膝对左右侧肢体影响具有差异性。例如,老年组穿戴护膝 B 和护膝 C 后,其左侧膝关节在水平面和额状面方向上的关节活动范围显著减小,但右侧膝关节呈现出轻微增大的趋势。这种左右侧肢体的差异性与人在运动时的肢体功能分配有关,运动过程中左侧肢体主要负责支撑和体重转移,右侧肢体更倾向于向指定方向推进人体<sup>[24]</sup>。因此,在护膝设计过程中应该根据左右侧肢体的不同特点进行设计,对于左侧膝关节应该注重减轻其负荷,可以选用支撑性较好的材质作为护膝材料。对于右侧肢体则应该采用弹性较好的材质且注重压力的分区分布,在保护膝关节的同时使推进行为不受影响。

4) 实验结果表明,青年人和老年人穿戴护膝时下肢运动学、动力学和足底压力参数的变化趋势是不同的,但市面上的运动护膝并没有针对年龄进行较为明确的区分和设计。穿戴普通运动护膝导致老年人肢体侧向稳定性受到影响,因此在针对老年人的运动护膝设计过程中应该注意对膝关节结构和周围肌肉的限制程度,保证其维稳作用的正常发挥。此外,老年人穿戴护膝时,踝关节和足弓部位负荷增大,应该考虑足部相关配套护具产品的使用。

#### 5 结语

护膝作为一种运动护具在运动人群中得到了广泛应用。目前市面上运动护膝种类繁多,通过对膝关节进行束缚,实现固定和支撑作用,但护膝对人体下肢各参数更深入的影响并不明确。本研究从运动学、动力学和足底压力三个方面探究了典型护膝对青年人和老年人跑步运动过程中的影响,根据研究结果对典型护膝所造成的影响进行了分析,并基于此提出了护膝设计的相关建议。本研究对护膝所造成的人体下肢生物力学变化进行了深入研究,弥补了国内关于护膝生物力学研究的空白,后续可以沿此方向对穿戴护膝时的下肢肌电参数变化进行探究。

#### 参考文献

- [1] KNUTZEN K M, BATES B T, SCHOT P, et al. A Biomechanical Analysis of Two Functional Knee Braces[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 1987, 19(3): 303-309.

- [2] YEUNG W E. A Systematic Review of Interventions to Prevent Lower Limb Soft Tissue Running Injuries[J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2002, 35(6): 383-389.
- [3] 阎玉秀, 高智英, 金子敏, 等. 跑步运动中护膝压迫对女子膝关节角度影响[J]. *丝绸*, 2018, 55(8): 52-56.  
YAN Yu-xiu, GAO Zhi-ying, JIN Zi-min, et al. Protection Effect of Kneepad Compression on Knee Joint in Running[J]. *Journal of Silk*, 2018, 55(8): 52-56.
- [4] 姚瑞祥, 王燕珍. 行走和慢跑状态下护膝的防护效果[J]. *纺织学报*, 2015, 36(6): 106-111.  
YAO Rui-xiang, WANG Yan-zhen. Protective Effect of Kneepads in States of Walking and Jogging[J]. *Journal of Textile Research*, 2015, 36(6): 106-111.
- [5] 何玲. 抗冲击无缝针织物性能研究与防护运动服开发[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2015.  
HE Ling. Research on Impact Resistance of Seamless Knitted Fabric and Development of Protective Sportswear[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2015.
- [6] BRELOFF S P, SINSEL E W, DUTTA A, et al. Are Knee Savers and Knee Pads a Viable Intervention to Reduce Lower Extremity Musculoskeletal Disorder Risk in Residential Roofers?[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2019, 74: 102-108.
- [7] SINGER J C, LAMONTAGNE M. The Effect of Functional Knee Brace Design and Hinge Misalignment on Lower Limb Joint Mechanics[J]. *Clinical Biomechanics*, 2008, 23(1): 52-59.
- [8] KHADAVI M J, CHEN Y T, FREDERICSON M. A Novel Knee Orthosis in the Treatment of Patellofemoral Pain Syndrome[J]. *Open J of Ther Rehab*, 2015, 3: 56-61.
- [9] CALLAGHAN M J, PARKES M J, HUTCHINSON C E, et al. A Randomised Trial of a Brace for Patellofemoral Osteoarthritis Targeting Knee Pain and Bone Marrow Lesions[J]. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 2015, 74(6):1164-1170.
- [10] ZHANG Y, YAO Z L, WANG S B, et al. Motion Analysis of Chinese Normal Knees During Gait Based on a Novel Portable System[J]. *Gait Posture*, 2015, 41(3): 763-768.
- [11] RYU T, CHOI H S, CHOI H, et al. A Comparison of Gait Characteristics between Korean and Western People for Establishing Korean Gait Reference Data[J]. *Int J Ind Ergon*, 2006, 36(12): 1023-1030.
- [12] 胡宗祥. 慢跑下肢技术动作的生物力学研究[D]. 北京: 北京体育大学, 2008.  
HU Zong-xiang. Research on Impact Resistance of Seamless Knitted Fabric and Development of Protective Sportswear[D]. Beijing: Beijing Sport University, 2008.
- [13] KRAM R, TAYLOR C R. Energetics of Running: A New Perspective[J]. *Nature*, 1990, 346(6281): 265-267.
- [14] MOORE I S, JONES A M, DIXON S. Mechanisms for Improved Running Economy in Beginner Runners[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2012, 44(9): 1756-63.
- [15] 刘青青, 阎玉秀. 基于三维运动捕捉的篮球护膝防护性能研究[J]. *现代纺织技术*, 2019, 27(2): 53-58.  
LIU Qing-qing, YAN Yu-xiu. Research on the Protection Performance of Basketball Kneepad Based on 3D Motion Capture[J]. *Advanced Textile Technology*, 2019, 27(2): 53-58.
- [16] KNUTZEN K M, BATES B T, SCHOT P, et al. A Biomechanical Analysis of Two Functional Knee Braces[J]. *Medicine & Ence in Sports & Exercise*, 1987, 19(3): 303.
- [17] SADEGHI H, ALLARD P, DUHAIME M. Functional Gait Asymmetry in Able-bodied Subjects[J]. *Human Movement Science*, 1997, 16(2-3): 243-258.
- [18] HAMILTON N. Changes in Sprint Stride Kinematics with Age in Master's Athletes[J]. *Journal of Applied Biomechanics*, 1993, 9(1): 15-26.
- [19] PUDDLE D L, MAULDER P S. Ground Reaction Forces and Loading Rates Associated with Parkour and Traditional Drop Landing Techniques[J]. *Journal of Sports Science & Medicine*, 2013, 12(1): 122-129.
- [20] COCK A D, CLERCQ D D, WILLEMS T, et al. Temporal Characteristics of Foot Roll-over During Barefoot Jogging: Reference Data for Young Adults[J]. *Gait Posture*, 2005, 21(4): 432-439.
- [21] 李波. 姿势跑法跑步技术诊断与分析在中长跑技术教学中的应用性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨体育学院, 2019.  
LI Bo. Application Research on the Diagnosis and Analysis of Postural Running Technique in the Teaching of Middle-distance Running Technique[D]. Harbin: Harbin Sport University, 2019.
- [22] 梁玉, 霍洪峰, 杨静怡, 等. 老年人步行时足底压力及步态特征的增龄性变化[J]. *中国老年学杂志*, 2013(13): 36-38.  
LIANG Yu, HUO Hong-feng, YANG Jing-yi. The Aging Changes of Plantar Pressure and Gait Characteristics of the Elderly During Walking[J]. *Chinese Journal of Gerontology*, 2013(13): 36-38.
- [23] JOHANNSEN H G, GAD D, HEIDEMANN E D. Acute and Chronic Patella Dislocations. Therapeutic Strategies in Danish Orthopedic Departments[J]. *Ugeskr Laeger*, 2000, 162(34): 4523-4525.
- [24] SADEGHI H, ALLARD P, DUHAIME M. Functional Gait Asymmetry in Able-bodied Subjects[J]. *Human Movement Science*, 1997, 16(2-3): 243-258.