

文章编号:1004-7220(2016)05-0443-06

## 具备内外旋自由度的双侧减压辅具 对膝关节生物力学的影响

刘 婷, 甘 云, 刘杰民, 罗 云

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

**摘要:** **目的** 针对传统膝关节辅具对人体下肢运动自由度限制的问题,为辅具提供一种顺应膝关节内外旋自由度的设计方案。**方法** 通过在辅具中增加双自由度铰链的设计释放内外旋自由度,设置佩戴具备和不具备双自由度铰链的双侧减压辅具实验组、未佩戴辅具对照组进行步态及力学实验测试。**结果** 步态过程中,相比不具备双自由度铰链的辅具,具备双自由度铰链的辅具对膝关节内外旋运动的限制较小,且辅具可以为人体膝关节提供一定牵引力。**结论** 顺应内外旋自由度的设计方案可以有效减少双侧减压辅具对膝关节运动的限制。

**关键词:** 骨性关节炎; 双侧减压辅具; 内外旋; 牵引力; 步态分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.3871/j.1004-7220.2016.05.443

## The biomechanical effect on knee joint from bilateral unloading knee brace with internal-external rotation

LIU Ting, GAN Yun, LIU Jie-min, LUO Yun (State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** **Objective** Aiming at reducing the restrictions on lower limbs imposed by traditional knee brace, a design scheme for knee brace complying with internal-external rotation is proposed. **Methods** By adding the internal-external hinge, the knee brace could help to release the degree of freedom (DOM) of internal-external rotation of the knee. In the experimental group, the subject was required to wear the bilateral unloading knee brace with or without internal-external hinges, respectively, while in the control group, the subject did not wear the knee brace. Then gait experiment and mechanical testing were conducted. **Results** In gait experiment, the bilateral unloading knee brace with internal-external hinges imposed less restriction on the knee than that from the knee brace without internal-external hinges, and it could also provide some distractive force for the knee joint. **Conclusions** The internal-external hinge design can help to reduce restrictions on the knee imposed from bilateral unloading knee brace.

**Key words:** Osteoarthritis; Bilateral unloading knee brace; Internal-external rotation; Distractive force; Gait analysis

骨性关节炎(osteoarthritis, OA)是一种多发于中老年人群的慢性疾病,其最常见的症状为膝关节疼痛,导致行走困难。OA的发生以及恶化主要是由作用在关节上的持续载荷以及机械应力过载后软骨修复失败导致<sup>[1-2]</sup>。关节损伤是OA的主要特征,如

果能够为关节卸载或者减载,重新建立一个有益的生物力学环境,不仅可以延缓侵入性关节修复手术,还可能完全替代关节修复。临床证明,减轻受损关节面压力有利于减轻关节疼痛,减少关节磨损<sup>[3]</sup>。

人体膝关节是一个具有多自由度的复杂关节,

存在屈伸、内外翻和内外旋3个旋转自由度。屈伸运动是膝关节的主要运动方式,内外翻和内外旋运动则为辅助运动方式。内外旋运动的产生与膝关节的关节面内部结构、半月板的复杂形状有关,能够增强关节稳定性以及带来更加合理的关节面压力分布<sup>[4]</sup>。研究表明,膝关节的异常运动与膝关节OA的进展有很大关系。异常运动导致载荷转移到通常不承力的软骨区域,该区域不能适应载荷。同时,高生物力学负载区域的软骨磨损更快<sup>[5]</sup>。

佩戴膝关节减压辅具是针对OA的非药物手段,其减压原理主要分两种:①依据三点力法的单髁减压原理,如奥索(OSSUR)公司开发的膝关节矫形器等;②双髁减压原理,如在下肢伸直过程中通过上下牵引膝关节减轻关节间压力<sup>[6]</sup>。但是,目前传统矫形辅具的设计大都缺乏对内外旋运动的考虑。在佩戴辅具后,膝关节内外旋运动受限,可能会减小膝关节分散接触应力的能力,改变自然状态下关节面间的压力分布,减小关节吸收冲击的能力<sup>[7]</sup>;同时降低辅具佩戴的舒适性,导致很多患者不能坚持长期佩戴,直接影响辅具的效果<sup>[3]</sup>。人体与辅具交互作用的生物力学问题,是康复辅具设计必须考虑的重要因素<sup>[8]</sup>。为此,法国宝泰欧(PROTEOR)开发了ODRA<sup>®</sup>辅具(distraction and rotation orthotic device),在单纯三点力法的基础上增加了一种新的设计,旨在为膝关节提供外翻力矩和主动式的胫骨外旋运动,更好地缓解患者疼痛<sup>[9]</sup>。但是,在佩戴辅具时,不考虑个体步态间的差异,对患者的关节施加某种特定运动的方法是否会对患者产生副作用还有待商榷<sup>[7]</sup>。

为进一步顺应人体下肢的生物力学规律,增加佩戴舒适性,本文提出通过释放辅具轴向旋转自由度的设计方案,达到既确保辅具沿大腿轴向的力传递功能,又顺应关节内外旋运动的目的。通过实验比较有内外旋自由度的双侧减压辅具对人体下肢步态的影响及测量辅具所提供牵引力的大小,初步探索这种具有内外旋自由度的膝关节辅具对膝关节自身运动规律的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 膝关节辅具实验模型设计

#### 1.1.1 膝关节辅具设计要求 膝关节辅具的设计

需要符合人体下肢的生物力学运动特征。图1所示为依据人体解剖面(冠状面、矢状面、横断面)而划分的膝关节3个旋转自由度:屈伸、内外旋、内外翻,旋转轴分别为 $xx'$ 、 $yy'$ 、 $zz'$ <sup>[10]</sup>。通常膝关节辅具是由大腿、小腿支架通过旋转铰链连接而成,大腿支架束缚于大腿,小腿支架束缚于小腿。为确保辅具在下肢轴向方向力传递的能力,同时顺应生物力学运动,必须满足以下3个要求:①大腿支架能绕小腿支架做 $xx'$ 轴的旋转运动,即屈伸自由度,通常辅具均具备屈伸自由度;②大腿支架的主体能绕小腿支架做 $yy'$ 轴向的旋转运动,即内外旋自由度,目前还没有辅具完全释放内外旋自由度;③大腿支架的主体部分能相对小腿支架做 $zz'$ 方向的小范围摆动,即内外翻自由度,部分辅具具备内外翻自由度。

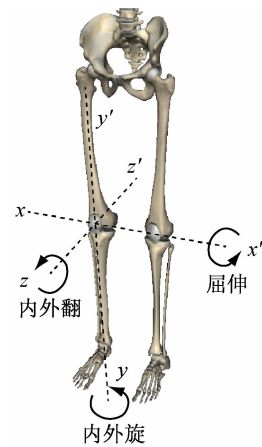
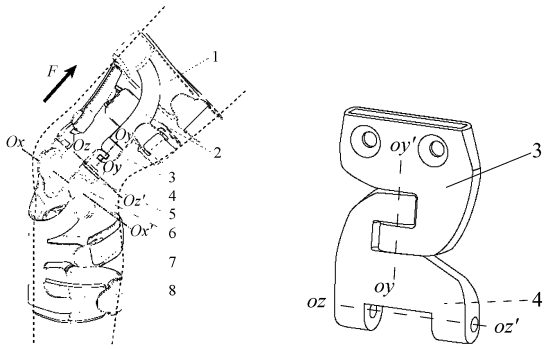


图1 人体下肢解剖结构

Fig. 1 Anatomic structure of the lower limbs

**1.1.2 膝关节辅具设计方案** 针对双侧减压型辅具,提出在辅具合适位置增加铰链设计,可以实现释放内外旋自由度。具有内外旋自由度的双侧减压辅具如图2(a)所示。两侧的大腿支条均通过内外旋铰链对,内外翻铰链对及屈伸铰链对3个铰链依次连接到小腿支架上,辅具的大腿支架部分可绕 $Ox-Ox'$ 相对小腿支架旋转,内外旋铰链对自身可绕轴 $Oy-Oy'$ 旋转,内外翻铰链对可绕轴 $Oz-Oz'$ 旋转。该辅具设计能够符合上述3个要求,具备屈曲、内外翻及内外旋自由度,辅具通过绑带与人体下肢紧密贴合。在步态过程中,随下肢从屈曲到伸直,辅具会逐渐对膝关节产生上下牵引作用。在辅具牵引膝关节时,大腿支条会承受轴向压力、弯矩及扭矩的作

用,为满足与人体下肢紧密贴合的要求和提高双自由度铰链的承载能力,提出如图2(b)所示的铰链设计方案,该设计具备内外翻及内外旋两种自由度。



(a) 双侧减压辅具 (b) 双自由度铰链

1 - 柔性大腿托, 2 - 大腿支条, 3, 4 - 内外旋铰链对, 4, 5 - 内外翻铰链对, 5, 6 - 屈伸铰链对, 7 - 小腿支架, 8 - 柔性小腿托

图2 具备双自由度铰链的双侧减压辅具

Fig. 2 Knee brace with a hinge that has a double-degree of freedom

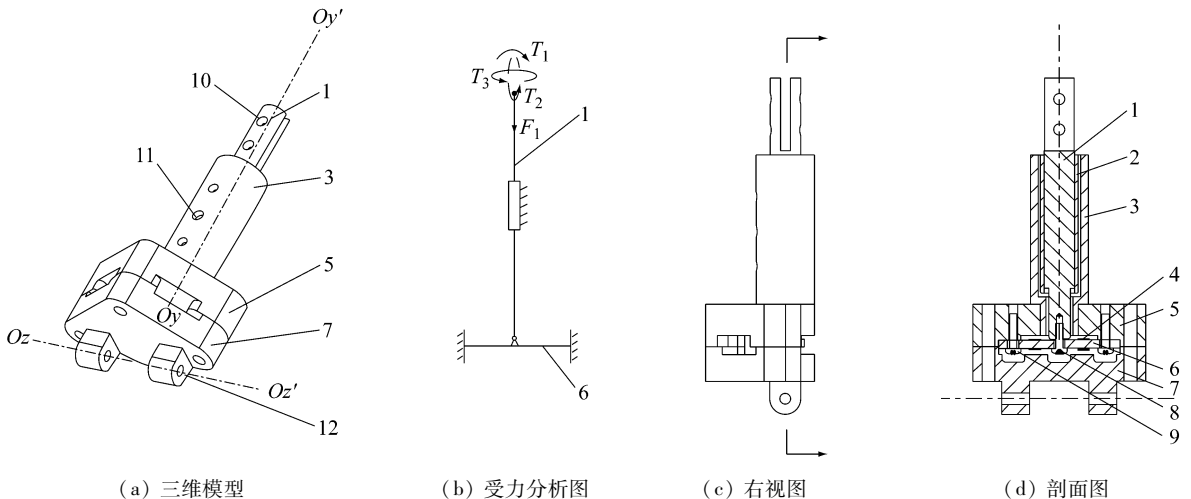
(a) Bilateral unloading knee brace, (b) A hinge with double-degree of freedom

**1.1.3 测力单元设计** 由于不能直接对人体膝关节内部进行应力分布测量,为评价辅具减压效果需要间接测量大腿支条轴向受力<sup>[11]</sup>。但大腿支条受力复杂,除受到沿大腿轴向牵引力之外,还有多个弯矩的作用。简单地在支条表面粘贴应变片很难准确测量,且一般的力传感器不具备合适的装配条件。

因此,为准确测量辅具轴向牵引力,尽可能消除枝条轴向牵引力之外的其他力学因素影响,同时实现双侧减压辅具可以通过装配简单实现具备双自由度铰链和不具备双自由度铰链两种状态变换,设计一种测力单元[见图3(a)]。该测力单元中的滑杆上端与大腿支条相连,受到轴向力  $F_1$ 、弯矩  $T_1$ 、弯矩  $T_2$ 、扭矩  $T_3$ ,下端与测力梁通过螺钉相连[见图3(b)]。理论上,滑杆受到的弯矩  $T_1$  和  $T_2$  会被固定套及上下连接块承担,对测力梁几乎没有影响;且由于轴向旋转自由度的释放,扭矩  $T_3$  对滑杆不会产生影响;测力梁上对称分布有4个应变片组成全桥电路,通过应变片测量梁的弯曲应变来测量轴向力[图3(c)、(d)]。因此,测力单元所测得力学数据仅为其轴向的牵引力或者拉伸力。

滑杆可沿  $Oy-Oy'$  轴拉压变形及绕轴  $Oy-Oy'$  旋转,即实现了辅具的内外旋自由度。测力单元与辅具内外翻铰链相连,可绕轴  $Oz-Oz'$  旋转,即实现了辅具的内外翻自由度。因此,测力单元可替代双自由度铰链,实现辅具的内外旋自由度和内外翻自由度,即为双自由度辅具(2-DOF 辅具)。此外,可通过将销轴插入孔11中,限制滑杆绕轴  $Oz-Oz'$  的内外旋自由度,即为单自由度辅具(1-DOF 辅具)。

通过拉伸试验机 (ElectroForce<sup>®</sup> 3330 Test Instruments, Bose 公司, 美国)、数据采集系统 (NR500, Keyence公司, 日本)对测力单元标定和校



(a) 三维模型 (b) 受力分析图 (c) 右视图 (d) 剖面图

1 - 滑杆, 2 - 滚珠衬套, 3 - 固定套, 4 - 应变片, 5 - 上连接块, 6 - 测力梁, 7 - 下连接块, 8 - 螺钉, 9 - 螺栓, 10 - 大腿支条连接孔, 11 - 绕  $O_2$  轴旋转自由度限制孔, 12 - 绕  $O_1$  轴旋转孔

图3 测力单元示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the force sensor (a) 3D model, (b) Force analysis, (c) Right view, (d) Section view

准,结果表明,测力单元的误差率约为5%,符合实验初步要求。

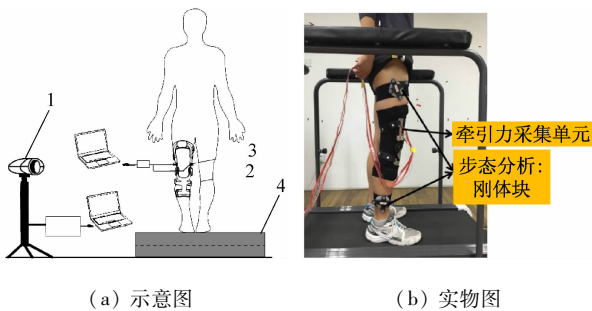
### 1.2 实验对象

招募1名29岁健康男性受试者,身高177 cm,体重65 kg,身体质量指数(body mass index, BMI)  $20.75 \text{ kg/m}^2$ ,步态实验中步速3 m/s。经受试者同意后,右腿佩戴辅具进行步态及力学实验。

### 1.3 实验设置及器材

为比较有无内外旋自由度的双侧减压辅具设计对膝关节的生物力学影响,通过比较步态数据来间接测量。

利用逸动 Opti\_Knee 步态测试系统采集人体佩戴辅具时的步态数据(见图4)。步态分析系统由导航级红外 NDI 镜头、高速度自动摄像机、双向自动跑步机组成。人体的大、小腿分别绑有一个刚体块,每个刚体块贴有4个红外反光球。红外 NDI 镜头(采样频率60 Hz,精度0.3 mm)可以捕捉反光球的运动轨迹,得到反光球的空间运动三维坐标,从而计算出在步态过程中人体股骨相对于胫骨的相对位置关系<sup>[12]</sup>。Opti\_Knee 可追踪记录关节运动轨迹,同步拍摄运动图像,将运动以曲线的形势记录下来供评估使用。



1 - NDI 摄像头, 2 - 辅具, 3 - 测力单元, 4 - 跑步机

图4 实验装置图

Fig. 4 Experimental device (a) Schematic diagram, (b) Picture

步态实验:为了确定膝关节运动功能是否异常,需要将其与正常膝关节的各项运动进行对比<sup>[13]</sup>。以健康男性作为试验者,佩戴不同设计的辅具在跑步机上以3 m/s的速度行走,进行步态实验。设置1个对照组,2个实验组,比较人体下肢屈伸、内外翻与内外旋运动规律的差异。对照组为未佩戴辅具;实验组1为佩戴具备双自由度铰链的双侧减压辅具

(简称2-DOF,具备屈伸、内外翻及内外旋自由度);实验组2为佩戴不具备双自由度铰链的双侧减压辅具(简称1-DOF,具备屈伸及内外翻自由度)。

力学实验:佩戴所设计的具备双自由度铰链的双侧减压辅具进行力学实验,通过使用自行设计的测力单元及数据采集系统(NR500, Keyence公司,日本),采集人体佩戴辅具时的枝条牵引力数据。

## 2 结果与讨论

### 2.1 步态实验

受试者在跑步机上以3 m/s的速度行走,分别采集未佩戴辅具、佩戴具备双自由度铰链的双侧减压辅具、佩戴不具备双自由度铰链的双侧减压辅具3种情况下的步态数据,得到在一个步态周期内,膝关节屈伸、内外旋、内外翻角的度变化曲线(见图5)。

双足行走是一个周期性运动,其步态周期依据运动特点可分为承重期(步态周期的0%~60%阶段)和摆动期(步态周期的60%~100%阶段,膝关节不承力)。

由图5(a)可知,在脚跟着地及承重阶段,与未佩戴辅具相比,佩戴双自由度辅具时,膝关节屈曲角度大 $5^\circ$ 。在人腿伸直过程中,膝关节辅具对膝关节的牵引动力来自于人体下肢的屈伸运动,故佩戴膝关节辅具后,人腿伸直需要更多能量,佩戴辅具一定程度上阻碍了腿的伸直,需要克服阻力矩才能伸直,增加了肌肉活动强度<sup>[6]</sup>。肌肉活动对改善关节僵硬及稳定性有很重要的作用<sup>[14-15]</sup>,有利于人体膝关节的康复。在站立末期阶段(40%~60%)及摆动期,佩戴单自由度辅具与佩戴双自由度辅具相比,均与未佩戴辅具的屈伸曲线接近,表明双侧双自由度辅具能够较好贴合受试者的下肢,对人体正常膝关节屈伸运动规律影响小,顺应了步态过程中人体下肢的运动。

由图5(b)可知,在站立末期阶段,与佩戴单自由度辅具相比,佩戴双自由度辅具时的内外旋曲线更接近未佩戴辅具的内外旋曲线,表明双自由度辅具更顺应膝关节的旋转运动。在站立末期阶段,佩戴双自由度辅具与未佩戴辅具相比,存在平均约 $1^\circ$ 的外旋差异,但是佩戴单自由度辅具与未佩戴辅具相比,存在平均约 $3.8^\circ$ 的外旋差异。双自由度铰链

的存在能够允许辅具沿大腿轴向的自由旋转,解除了一般辅具对大腿内外旋转的制约。研究表明,异常的膝关节内外旋运动会减小关节吸收冲击和分散接触应力的能力,改变受力分布状况,使以往承力较少的软骨区域受力增加,膝骨关节炎恶化的几率增大<sup>[4,7]</sup>。因此,理论上具有内外旋自由度的辅具对膝关节更有益处。

由图 5(c)可知,在站立期阶段(0%~60%),与

未佩戴辅具相比,佩戴辅具减少了关节内翻 3°。在步态站立期内,膝关节中心处于人体重心与脚掌中心连线外侧,导致膝关节受到内翻力矩,故下肢出现内翻,且内翻力矩与 OA 的进展关系密切<sup>[16]</sup>。佩戴本文辅具能为膝关节侧向提供稳定支撑,提高膝关节侧向稳定性,因而一定程度上限制了内翻进展。通常关节内翻角度减小意味着内翻力矩减少,从而减轻内踝关节受力,有效减轻患者病痛<sup>[17]</sup>。

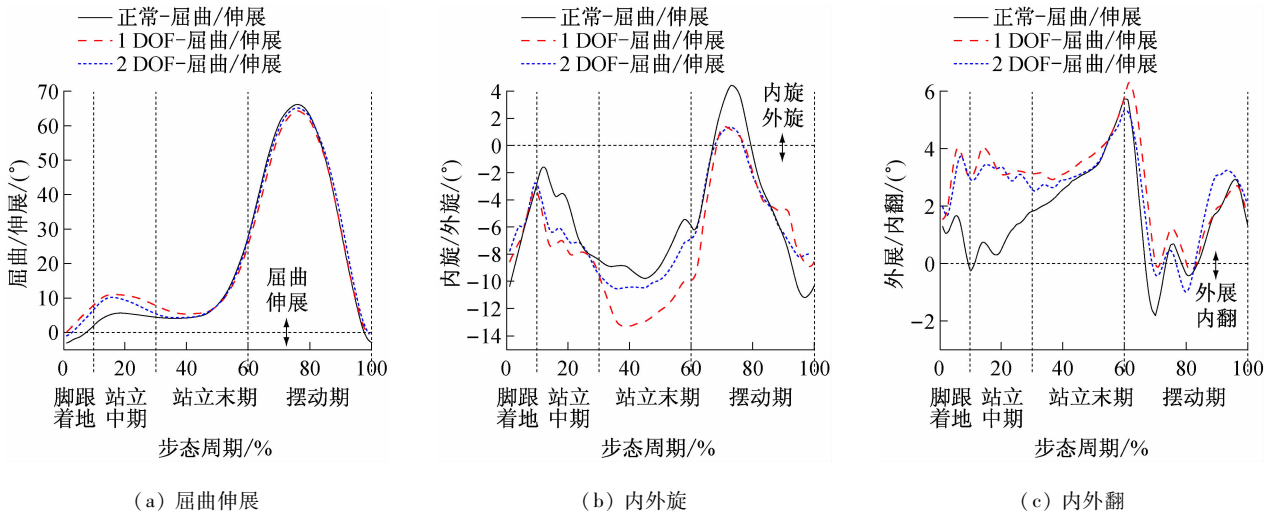


图 5 佩戴辅具前后膝关节自由度

Fig. 5 Freedom of knee joint before and after wearing the brace (a) Flexion-Extension, (b) Internal-external, (c) Adduction-Abduction

## 2.2 力学实验

为了验证辅具佩戴的力学效果,同一名志愿者佩戴双自由度辅具进行原地踏步运动,采集力学数据,得到辅具为膝关节内外侧提供的牵引力曲线(见图 6)。辅具为膝关节提供的最大牵引力约为 210 N,其中内外侧测力单元测得牵引力分别约为 118、92 N,辅具内外侧均提供牵引力。

研究表明,维持膝关节运动、减少关节间压力、保证温和的力学刺激有利于软骨修复<sup>[18]</sup>。由图 6 可知,本文所设计的辅具可以随步态过程为膝关节内外侧均提供牵引力,实现分时间歇承载,提高辅具佩戴舒适性。该辅具为体重 65 kg 的健康男性提供约 21 kg 牵引力,占体重 32.3%。在减肥的人群当中,只有 1/5 的人可以减掉原体重 10% 并在 1 年之内维持这一体重<sup>[19]</sup>;而对 OA 患者而言,由于关节不便导致运动量减少,减肥是一件更加困难的事情。

由此可见,双侧减压辅具对 OA 患者具有重要意义。

实验发现,辅具内外侧牵引力的大小及分布情况可以通过调节辅具相对人体下肢的佩戴位置及绑带松紧来改变。在临床使用过程中,应依据患者情况调整辅具佩戴方式。

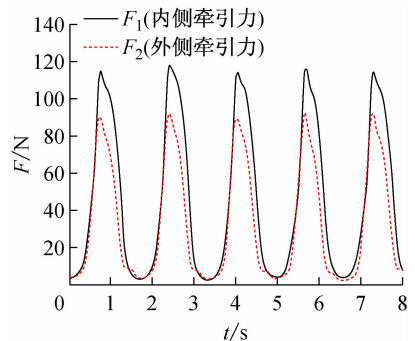


图 6 辅具提供牵引力

Fig. 6 Force provided by the knee brace

### 3 结论

本文提出了为膝关节双侧减压辅具增加内外旋自由度的概念,并且设计双自由度铰链实现双侧减压辅具对人体膝关节内外旋自由度的释放;为在复杂受力环境中测量辅具支条轴向支撑力,设计具有内旋转自由度的测力单元;通过实验验证具有内外旋自由度的双侧减压辅具对人体正常膝关节三维运动,尤其是内外旋运动规律的影响较小,理论上避免了膝关节软骨磨损加重。双侧减压辅具可以在步态过程中为膝关节提供一定的牵引力,减轻患者疼痛,同时下肢软组织分时间歇承载,避免局部软组织长时间承受较高载荷而导致的血液循环障碍。由于个体性差异,不同患者下肢需要的牵引力不相同,故需要进一步探索辅具设计与其提供牵引力大小间的规律,根据患者情况调节辅具内外侧牵引力的大小,最终实现减压辅具最大程度地帮助佩戴者的目的。

### 参考文献:

- [1] BLOCK JA, SHAKOOR N. The biomechanics of osteoarthritis: Implications for therapy [J]. *Curr Rheumatol Rep*, 2009, 11(1): 15-22.
- [2] 程杰平, 马洪顺, 褚怀德. 骨性关节炎对膝关节软骨力学性质影响的实验研究[J]. *医用生物力学*, 2005, 20(1): 25-27.  
CHENG JP, MA HS, CHU HD. Effect of osteoarthritis on mechanical properties of knee joint cartilage [J]. *J Med Biomech*, 2005, 20(1): 25-27.
- [3] WALLER C, HAYES D, BLOCK JE, *et al.* Unload it: The key to the treatment of knee osteoarthritis [J]. *Knee Surg Sport Tr A*, 2011, 19(11): 1823-1829.
- [4] KOO S, ANDRIACCHI TP. The knee joint center of rotation is predominantly on the lateral side during normal walking [J]. *J Biomech*, 2008, 41(6): 1269-1273.
- [5] ANDRIACCHI TP, MÜNDERMANN A, SMITH RL, *et al.* A framework for the *in vivo* pathomechanics of osteoarthritis at the knee [J]. *Ann Biomed Eng*, 2004, 32(3): 447-457.
- [6] 徐明峰, 朱良凡, 周文选, 等. 新型卸载方式的膝关节矫形器设计与评价[J]. *上海交通大学学报*, 2014, 48(2): 181-186.
- [7] FARROKHI S, TASHMAN S, GIL AB, *et al.* Are the kinematics of the knee joint altered during the loading response phase of gait in individuals with concurrent knee osteoarthritis and complaints of joint instability? A dynamic stereo X-ray study [J]. *Clin Biomech*, 2012, 27(4): 384-389.
- [8] 蒲放, 樊瑜波. 康复辅具设计中的生物力学研究[J]. *医用生物力学*, 2013, 28(4): 363-365.  
PU F, FAN YB. Biomechanical research for design of rehabilitation technical aids [J]. *J Med Biomech*, 2013, 28(4): 363-365.
- [9] LAROCHE D, MORISSET C, FORTUNET C, *et al.* Biomechanical effectiveness of a distraction-rotation knee brace in medial knee osteoarthritis: Preliminary results [J]. *Knee*, 2014, 21(3): 710-716.
- [10] VICTOR FH. Basic biomechanics of the musculoskeletal system [M]. USA: Lippincott Williams & Wilkins, 2001.
- [11] LEW WD, PATRNCHAK CM, LEWIS JL, *et al.* A comparison of pistoning forces in orthotic knee joints [J]. *Orthot Prosthet*, 1984, 36: 85-95.
- [12] KAPANDJI IA. The physiology of the joints: Lower limb [M]. USA: Elsevier Health Sciences, 1987.
- [13] ZHANG Y, YAO Z, WANG S, *et al.* Motion analysis of Chinese normal knees during gait based on a novel portable system [J]. *Gait Posture*, 2015, 41(3): 763-768.
- [14] SHARMA L, PAI YC. Impaired proprioception and osteoarthritis [J]. *Curr Opin Rheumatol*, 1997, 9(3): 253-258.
- [15] 安丙辰, 郑洁皎, 沈利岩. 膝骨关节炎与膝关节伸、屈肌群肌力的相关性研究[J]. *医用生物力学*, 2015, 30(2): 174-178.  
AN BC, ZHENG JJ, SHEN LY. Correlation study on knee extensor/flexor strength and knee osteoarthritis [J]. *J Med Biomech*, 2015, 30(2): 174-178.
- [16] REEVES ND, BOWLING FL. Conservative biomechanical strategies for knee osteoarthritis [J]. *Nat Rev Rheumatol*, 2011, 7(2): 113-122.
- [17] POLLO FE, OTIS JC, BACKUS SI, *et al.* Reduction of medial compartment loads with valgus bracing of the osteoarthritic knee [J]. *Am J Sport Med*, 2002, 30(3): 414-421.
- [18] KAMEI G, OCHI M, OKUHARA A, *et al.* A new distraction arthroplasty device using magnetic force; A cadaveric study [J]. *Clin Biomech*, 2013, 28(4): 423-428.
- [19] WING RR, PHELAN S. Long-term weight loss maintenance [J]. *Am J Clin Nutr*, 2005, 82(1 Suppl): 222S-225S.