

# 柔性传感器在足底压力测量系统中的应用

高敏<sup>1</sup>, 张一帆<sup>\*1</sup>, 洪成雨<sup>2</sup>, 李毓陵<sup>1</sup>, 高卫东<sup>3</sup>

(1. 东华大学 纺织学院, 上海 201620; 2. 上海大学 土木工程系, 上海 200444; 3. 江南大学 纺织服装学院, 江苏 无锡 214122)

**摘要:**查阅国内外相关资料,对柔性传感器在足底压力测量系统中的应用进行总结。常见的足底压力测量系统主要有鞋式和平台式两种,分析影响这两种足底压力测量系统的影响因素和传感器在足底压力测量方面的性能,并对人体足底压力测量点和传感器测量区域进行讨论。研究发现传感器与压力的线性力学属性可以实现足底压力的实时测量,将传感器、Internet 和 GPRS 模块有效结合的足底压力测量系统能够实现远程足部电子医疗诊断与监测。

**关键词:**柔性传感器;足底压力测量;鞋式;平台式;鞋式足底压力测量

**中图分类号:**TP 212 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2018)04-0301-07

## Application of Flexible Sensors in the Plantar Pressure Measurement System

GAO Min<sup>1</sup>, ZHANG Yifan<sup>\*1</sup>, HONG Chengyu<sup>2</sup>, LI Yuling<sup>1</sup>, GAO Weidong<sup>3</sup>

(1. College of Textile, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 3. School of Textile and Clothing, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** This paper summarized the application of flexible sensors in the foot pressure measurement system by reviewing the relevant references at home and abroad. Common foot pressure measurement systems included shoes and flat benches. The study also analyzed the influencing factors of the two plantar pressure measurement systems, the performance of the sensor in the measurement of plantar pressure, and the measurement points and areas of human foot pressure. The results showed that real-time measurement of plantar pressure could be achieved by the linear mechanical properties of the sensor and pressure. The foot pressure measurement system that combines the sensor, Internet and GPRS modules could enable remote foot electronic medical diagnosis and monitoring.

**Key words:** flexible sensor, foot pressure measurement, shoe type, platform type, foot pressure measurement

随着柔性传感器技术和无线通信技术的迅速发展,传感器成为智能产品的研究热点。目前柔性传感器在纺织品上的应用越来越广泛,其柔性可穿戴智能纺织品也逐渐受到人们的关注。柔性传感器作为在柔性基底材料上直接键合低杨氏模量形成柔性、拉伸性好和绝缘耐腐蚀的薄导电材料<sup>[1]</sup>,按结构形式可分为压阻式、电容式、压电式和应变式<sup>[2]</sup>,其中应用最广、技术最为成熟的是压阻式。将柔性传感器与鞋制品相结合,可实现足底压力柔性监测。如将柔性足底压力测量系统放置在运动

员的鞋垫中,可对其运动表现进行分析,并且可以预防损伤、控制平衡、诊断疾病等<sup>[3]</sup>。

目前常用足底压力测量系统受到有线、移动性和可穿戴等方面的限制,在远程足底压力监测方面有很大的局限性,但随着蓝牙、GPRS 和 Internet 无线技术的发展,逐渐实现了足底压力远程实时监测。在此基础上无线鞋内足底压力测量系统还可稳定传输数据,这项技术已经应用于微型生物医学监测等其他用途。足底压力分布已被认为是评估各种足部问题的重要因素,在临床实践中,足底压力分

收稿日期:2017-12-20; 修订日期:2018-08-07。

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(17D110116);国家重点研发计划项目(2017YFB0309200)。

作者简介:高敏(1992—),女,硕士研究生。

\*通信作者:张一帆(1983—),女,讲师,硕士生导师。主要研究方向为智能纺织品的研究。Email: zhangyifan@dhu.edu.cn

布被广泛用于诊断足部病理<sup>[4-5]</sup>。文中针对国内外足底压力测试系统、足底压力分布的影响因素<sup>[6-8]</sup>及柔性传感器性能进行概述。

## 1 国内外常用的足底压力测试系统

足底压力分布测量系统从脚印法 (Pedography)、足底压力扫描器 (Sole Barograph)、测力板 (Force Plate) 逐渐发展为能定性测量足底压力大小的测力台 (Force Platform)、压力鞋及压力鞋垫<sup>[9-11]</sup>等。目前国内外足底压力分布测量系统可分平台式和鞋式压力测试系统两种类型。

国内主要侧重于平台式压力测量系统的研究,常见的平台式测量系统,一般将 200 ~ 1 000 个微型压力传感器以矩阵形式组成足底压力测量平台。如袁刚等<sup>[12]</sup>用 200 个压力传感器组成的 300 mm × 150 mm 的压力测量台,用于测量糖尿病足患者的足底压力。广州市派康运动医学有限公司研发了动态光学式足底测力系统,通过光学影像技术和传感器测出足底压力分布与人体姿态关系<sup>[13]</sup>。这些平台式测量系统由于测量区域比较小,且传感器在平台中排列需较多连接线,造成平台式测量系统比较笨重,不能置于鞋内,且不能满足步态足底压力测量,因此,在户外和运动测量中有很大的局限性。

国内常见的平台式足底压力采集仪如图 1 所示。该足底压力采集仪具有足部渐层式压力分布测量能力,测量范围为 (350 mm × 150 mm) × 2 (双脚测量),足型尺寸测量精度为 ± 1%,测量速度为实时测量。该足底压力采集仪能测量从刚站立到保持静态不动状态下各阶段的足底压力大小和足底压力分布影像,实现双脚静态足部压力分布数据显示,但其缺点是不能进行步态足底压力分析和户外运动状态下的足底压力分析。



图 1 足底压力采集仪

Fig. 1 Plantar pressure collection instrument

国外对平台式足底压力监测系统进行了优化,通过减小柔性基底材料的厚度和大小,增加传感器数量,使用喷墨印刷电路,减少传感器以矩阵形式在平台中的线路排列问题。在保证平台式压力测量

系统轻薄可弯曲特性的同时,印刷电阻增加了平台式测量系统的长度,使得平台式测量系统在运动状态下也可进行足底压力测量。国外平台式压力测量系统<sup>[2]</sup>如图 2 所示。为了进一步扩大动态下足底压力测量范围,国外研究人员开始侧重于鞋式足底压力测量系统的研究,常见的鞋式足底压力测量系统主要是利用 Pedar 和 F-Scan 传感器制作,其实物如图 3 所示。



图 2 平台式压力测量系统

Fig. 2 Platform pressure measurement systems



图 3 鞋式压力测量系统

Fig. 3 Shoe pressure measurement systems

平台式足底压力测试系统主要是将传感器以矩阵的形式嵌入平板中,可用于静态和短程运动下的足底压力分布研究,但仅限于实验室研究。该系统的优点是足部与传感器充分接触,测量准确性较高,缺点是受空间的限制只能在室内测量。而压力鞋或鞋垫测量系统稳定,结构简单,可用于静态和远程运动下的足底压力分布研究。

为准确测量鞋式足底压力测量系统在自然状态下的足底压力,测试系统的准备需要注意:①移动性好。测试系统需要随人体移动,所以要求测试系统越小越好,研究表明<sup>[14]</sup>质量为 300 g 或更小的鞋附件不会对步态产生影响。②无线化。理想的足底压力测量系统是无线的,这是为了确保足底的舒适性和步态自然。③鞋与传感器的结合度好。这要求传感器柔软、灵敏且不改变足底压力的自然分布状态<sup>[15]</sup>。④成本低。所选传感器必须经济实惠。⑤低功耗。测量系统应该是低功耗的,且保证数据收集和记录的完整性。

## 2 影响足底压力分布的因素

### 2.1 性别

男女足部形状与大小不同的主要原因是足的外侧轮廓、足弓、跖骨和脚拇指有所差异,这些差异

导致男性和女性站立时足部压力分布不同,通常男性足部与物体接触面积大于女性,因此,压力峰值与性别并没有关系<sup>[8]</sup>。MURPHY D F 等<sup>[16]</sup>研究也发现足中处的足底压力大小与性别没有关系。由于所查文献中并没有分析足部其他区域的压力分布变化,所以性别对足部压力分布的影响需要进一步研究<sup>[16]</sup>。

2.2 体质量

HILLS A P 等<sup>[17]</sup>研究了肥胖和非肥胖受试者站立和行走时的足底压力差异,结果显示肥胖受试者在行走时足底压力的峰值增加,因此可以初步判断体质量是影响足底压力分布的一个重要因素。体质量指数较高的人相比于非肥胖受试者足底与物体的总接触面积有所增加;同时研究显示,与非肥胖受试者相比,肥胖受试者的前足掌压力峰值以及与物体接触面积较高<sup>[9,18]</sup>。

2.3 年龄

HESSERT M J 等<sup>[6]</sup>研究表明年轻人和老年人足底压力分布有显著差异。主要表现为老年人的足内侧压力普遍低于年轻人,但老年人随着年龄增长足外侧压力有增高趋势。BOSCH K 等<sup>[19]</sup>研究显示相比年轻人,老年人的压力峰值有增高趋势,而足跟和前足的压力峰值有下降趋势。由于足中区

域的足底与物体接触的时间更长,因此,年龄也是影响足底压力的一个因素。

2.4 步速

利用 Emed-F 和 Emed-SF2 压力板系统 (Novel GmbH Munich Germany) 分析了步速对足底压力的影响<sup>[20-22]</sup>。研究发现测试者慢走和快速行走时,足底压力都是增加的,但是快速行走时的增加幅度比较大,慢走时增加幅度比较小,最终,两种速度下的压力值会达到一个稳定值,这是由于人的体质量不会随着速度增加。BURNFIELD I M 等<sup>[23]</sup>研究结果显示步速对足底压力的影响是很明显的,即使在慢速情况下足底压力的变化也很大。

2.5 足型

足型对足底压力分布有一定的相关性,研究表明<sup>[24-26]</sup>,在赤脚行走时,相比高足弓,扁平足患者的足底压力比较大。由于高足弓患者足弓变形比较小,所以前足压力较小。

2.6 鞋子类型

鞋子类型对足底压力分布也有影响,研究表明<sup>[23,27-28]</sup>,穿着跑步鞋的最大压力和压力峰值都高于普通运动鞋。对皮鞋、跑步鞋和赤脚的足底压力研究结果表明,慢走情况下穿着跑步鞋具有较小的足底压力分布。影响足底压力分布的因素见表 1。

表 1 影响足底压力分布的因素  
Tab.1 Factors affecting plantar pressure distribution

因 素	作 者	测试人数	结 论
性别	Periyasamy et al <sup>[8]</sup>	28	男性接触面积高于女性
	Putti et al <sup>[29]</sup>	不详	压力峰值与性别没有关系
	Murphy et al <sup>[16]</sup>	50	足中的接触区域、足底压力与性别没有明显关系
年龄	Hessert et al <sup>[16]</sup>	15	老年人足内侧的压力较小
	Bosch et al <sup>[19]</sup>	104	随着年龄的增长,足底压力峰值增加。婴幼儿相比其他年龄组足弓指数较高
体重	Teh et al <sup>[5]</sup>	120	随着 BMI 增加,总的足底压力和接触面积增加
	Birtane et al <sup>[18]</sup>	50	肥胖受试者的前掌压力峰值高于非肥胖受试者
	Hills et al <sup>[17]</sup>	35	肥胖受试者的压力峰值高于非肥胖受试者
	Periyasamy et al <sup>[8]</sup>	22	肥胖受试者前期的足中压力分布参数与功率比值、接触面积高于非肥胖受试者
步速	Burnfield et al <sup>[23]</sup>	20	步速增加时脚跟、足中部、内侧跖骨和脚趾的压力最大值、峰值和平均峰值
	Taylor et al <sup>[21]</sup>	20	越高
	Ko et al <sup>[20]</sup>	18	步速变化对足底压力有影响
	Pataky et al <sup>[30]</sup>	10	糖尿病患者的行走速度比正常人慢
	Drerup et al <sup>[31]</sup>	20	足中部和前足掌压力峰值随着步速增加而降低 步速减小会导致压力峰值的普遍降低
足型	Syed N et al <sup>[25]</sup>	628	足弓高度与足底压力之间存在关系
	Schie et al <sup>[26]</sup>	34	足弓高度对动态足底压力影响很小
	Chuckpaiwong et al <sup>[24]</sup>	50	足型会影响中足内侧的接触面积,最大压力和压力峰值在前足外侧
鞋子 类型	Wiegerinck et al <sup>[28]</sup>	37	传统运动鞋、平底跑步鞋在压力峰值,最大压力和接触面积方面有显着差异
	Queen et al <sup>[27]</sup>	34	以任意速度跑步时,平底跑步鞋的最大压力和压力峰值明显着大于传统运动鞋

2.7 其他因素

足底压力分布测量的准确性还受其他因素影

响,如测量设备、测量区域、实验数据收集、测试时间、步行速度、测试者心理等<sup>[32]</sup>。这些因素在实验

期间要进行标准化控制,以确保测量的准确性。足部关节的运动对了解足底压力分布有重要意义,为了准确测量足底压力,可增加测量区域实验次数,每个实验次数不得少于 3 次,以确保数据的准确性,实验之前应将实验的影响因素控制在误差允许范围内。

### 3 柔性传感器的性能要求

足底压力测量系统的柔性传感器要求必须要有合适的线性度、滞后性、传感尺寸、压力范围和温度敏感性<sup>[14-15,23]</sup>。对于不同性能的柔性传感器,选择合适的范围非常重要。

#### 3.1 滞后性

传感器的滞后性是指载荷从零点以单调递增的方式加载时与载荷从额定载荷以单调递减的方式卸载时,在相同载荷值条件下,传感器的输出值存在差值。通常以这个差值与柔性传感器满量程输出之比表示。当对传感器加载和卸载时,传感器的输出信号和输入信号不相等,这表示传感器的响应有滞后性,传感器不是线性输出,一般都会选择滞后性小的传感器<sup>[34]</sup>。

#### 3.2 线性度

柔性传感器的线性度是传感器的静态特性,是指传感器的电阻与应变之间的线性关系。将一个相当于可变电阻的柔性传感器接入电路,对传感器施加压力,电路中电阻变化,导致电流和电压发生改变,电压与力呈现线性关系,表示传感器的电路处理过程简单,传感器对力的响应是线性的。高度线性关系需要非常简单的信号处理电路,反之亦然,因此有线性关系的传感器是最优的。

#### 3.3 温度敏感度

根据热胀冷缩原理,传感器随着环境温度变化,示数会发生改变。传感器是由不同材料组成的,因为它们对温度变化的反应不同,根据人体体表温度,在 20~37℃ 范围内具有低温敏感度的传感器是首选<sup>[15]</sup>。

#### 3.4 压力范围

不同用途的传感器需要有不同的压力范围,最大压力是柔性传感器可以测量的上限,反之亦然。BEEBY S P<sup>[34]</sup>认为体质量为 75 kg 的人当前脚掌站立时,如果压力均匀分布,则每 31.2 mm<sup>2</sup> 足底面积的界面压力接近 2.3 MPa。在实验中利用 F-Scan 鞋垫式测量系统,发现最大测量压力为 0.1 MPa。同时 URRY S<sup>[9]</sup>研究发现足底压力在某一瞬间高达 3 MPa,因此足底压力测量系统需选用上限为 3 MPa

的传感器。

#### 3.5 传感器的测量区域

柔性传感器的尺寸和位置也很重要,传感器的位置摆放如图 4 所示。大的传感器可能会降低压力峰值,因此建议使用 5 mm×5 mm 的小传感器<sup>[34]</sup>。

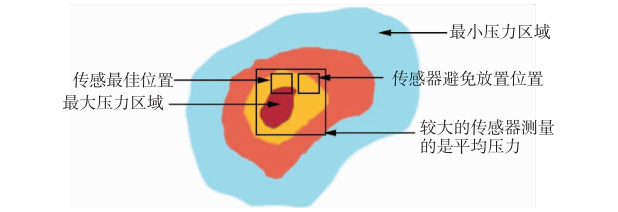


图 4 传感器的摆放位置

Fig. 4 Placement of sensor position

#### 3.6 采集频率

为了准确测量足底压力,根据人体走路和跑步的步频,将柔性传感器采集频率设置为 200 Hz 以上。通常认为这个频率可以对人体日常的步态活动进行采样。

#### 3.7 蠕变和重复性

蠕变是柔性传感器受到长时间恒定载荷或应力的一种永久变形,低蠕变柔性传感器是足部压力测量的重点。重复性是指传感器在相同实验条件下,经多次相同载荷作用而产生与之对应的输出值,其输出曲线重合度越好,重复性就越好,误差也越小。重复性是保证传感器长时间稳定使用的重要因素,影响传感器重复性的因素有机械部分的磨损、间隙、松动、部件的内摩擦、积尘等原因<sup>[34]</sup>。除了上述原因之外,传感器的压力范围和尺寸也是造成测量不准确的原因之一。

### 4 足底压力主要测量点

根据人体工学和解剖学,足底压力测量区域可以划分 15 个区域,足后部(1~3),足中部(4~5),跖骨(6~10)和脚趾(11~15),具体如图 5 所示。受传感器尺寸、数据采集系统等因素的影响,目前足底压力测量系统只测量其中几个重要的区域<sup>[35]</sup>。



图 5 足底压力测量区域

Fig. 5 Plantar pressure measurement areas



足底压力是人体重要的生理参数,平台式足底压力测量系统只局限于一步或数步的足底压力测量,但是生物医学监测的趋势是实时和现场测量,而鞋式足底压力测量系统则可以实现远程足底压

力测量,这对于人们了解人体日常活动时的足底压力分布是至关重要的,同时也可以为运动员的步态分析提供理论依据。几种足底压力测量系统见表 2。

表 2 足底压力测量系统

Tab.2 Plantar pressure measurement system

参考文献	足底压力测量系统图示	特 点
HEALY et al <sup>[36]</sup>		主要利用 WalkinSense 和 Fscan 传感器设计的足底压力测量系统,其对足底 8 个点的压力峰值进行测量,发现两种传感器都具有良好的重复性,Fscan 的压力值始终比 WalkinSense 的压力值低
CONG et al <sup>[37]</sup>		通过对不同类型鞋子的足底压力变化进行分析,有助于鞋子舒适性研究
EDGAR et al <sup>[38]</sup>		该系统通过提取关键的步态参数描绘身体健康状况,通过压力分析对不同姿势和活动状态进行识别
SALPAVAARA et al <sup>[39]</sup>		足跟处放置两个传感器,提高足跟压力测量精确度,测量系统的电路得到优化,耗能较小,可以持续 20 h 的足底压力监测
HOLLECZEK et al <sup>[40]</sup>		传感器的数量较少,设备的电路复杂,设备收集的数据可以用于姿势和自动识别。该系统与足部紧密接触主要用来识别中风患者的姿势分析
SAITO et al <sup>[41]</sup>		通过对比青年受试者和老年受试者的无障碍步态分析,得出老年受试者脚后跟的压力更小,陡峭。其优点为测试单元的质量和体积较小
ZHANG Y F et al <sup>[42]</sup>		利用 3D 打印和 FBG 传感器结合测量足底压力,测量点可以调整变化,装置简单,实用性较好

## 5 结 语

文中主要介绍了常见的足底压力测量系统,通过分析柔性传感器在足底压力测量系统中的适用性,从而优化足底压力测量系统,并对人体足底压力进行讨论分析。目前,足底压力测量系统还有很多需要改进的地方,如传感器采集系统的稳定性,如何实现无线足底压力实时监测,如何设计出符合人体工学的足底压力测量系统等,都需要研究人员进行更深层次的研究。

另外,柔性传感器在足底压力测量系统的应用也不够完善,不同类型的传感器价格和测量精确度存在明显差别。如果能够改善传感器精度、传感器滞后性以及提高线性度,足底压力测量的精确度将会有显著提高。同时,还可以完善足底压力测量区域,来提高足底压力的测量精度。随着无线智能技术的发展,无线足底压力测量系统将日趋成熟,为远程实时监测足底压力奠定了基础。

## 参考文献:

- [1] 钱鑫,苏萌,李风煜,等. 柔性可穿戴电子传感器研究进展[J]. 化学学报,2016,74(7): 565-575.  
QIAN Xin, SU Meng, LI Fengyu, et al. Research progress of flexible wearable electronic sensors[J]. Acta Chimica Sinica, 2016, 74(7): 565-575. (in Chinese)
- [2] RAZAK A H, ZAYEGH A, BEGG R K, et al. Foot plantar pressure measurement system: a review[J]. Sensors, 2012, 12(7): 9884-9912.
- [3] BONATO P. Wearable sensors/systems and their impact on biomedical engineering[J]. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, 2003, 22(3): 18-20.
- [4] MONTEIRO M, GABRIEL R, ARANHA J, et al. Influence of obesity and sarcopenic obesity on plantar pressure of postmenopausal women[J]. Clinical Biomechanics, 2010, 25(5): 461-467.
- [5] TEH E, TENG L F, RAJENDRA A U, et al. Static and frequency domain analysis of plantar pressure distribution in obese and non-obese subjects[J]. Journal of Bodywork and Movement Therapies, 2006, 10(2): 127-133.
- [6] HESSERT M J, VYAS M, LEACH J, et al. Foot pressure distribution during walking in young and old adults[J]. Bmc Geriatrics, 2005, 5(1): 8.
- [7] KELLIS E. Plantar pressure distribution during barefoot standing, walking and landing in preschool boys[J]. Gait and Posture, 2001, 14(2): 92-97.
- [8] PERIYASAMY R, MISHRA A, ANAND S, et al. Preliminary investigation of foot pressure distribution variation in men and women adults while standing[J]. Foot, 2011, 21

(3): 142-148.

- [9] URRY S. Plantar pressure-measurement sensors[J]. Measurement Science and Technology, 1999, 10(1): 16.
- [10] CAVANAGH P R, TAMMY M S. Nonsurgical strategies for healing and preventing recurrence of diabetic foot ulcers[J]. Foot and Ankle Clinics of North America, 2006, 11(4): 735-743.
- [11] XU Y, WANG L, HE J, et al. Prevalence and control of diabetes in Chinese adults[J]. Jama the Journal of the American Medical Asso, 2013, 310(9): 948-959.
- [12] 袁刚, 张木勋, 张建华, 等. 足底压力分布测量系统及临床应用[J]. 中国组织工程研究, 2004, 18(29): 22-25.  
YUAN Gang, ZHANG Muxun, ZHANG Jianhua, et al. Measuring system for plantar pressure distribution and its clinical application[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2004, 18(29): 22-25. (in Chinese)
- [13] 彭开怀. 基于嵌入式系统的足底压力分布检测仪[D]. 成都: 电子科技大学, 2015: 6-9.
- [14] BAMBERG S J, BENBASAT A Y, SCARBOROUGH D M, et al. Gait analysis using a shoe-integrated wireless sensor system[J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2008, 12(4): 413-423.
- [15] LEE N K S, GOONETILLEKE R S, CHEUNG Y S, et al. A flexible encapsulated MEMS pressure sensor system for biomechanical applications[J]. Microsystem Technologies, 2001, 7(2): 55-62.
- [16] MURPHY D F, BEYNNON B D, MICHELSON J D, et al. Efficacy of plantar loading parameters during gait in terms of reliability, variability, effect of gender and relationship between contact area and plantar pressure[J]. Foot and Ankle International, 2005, 26(2): 171-179.
- [17] HILLS A P, HENNIG E M, MCDONALD M, et al. Plantar pressure differences between obese and non-obese adults: a biomechanical analysis[J]. International Journal of Obesity, 2001, 25(11): 1674-1679.
- [18] BIRTANE M, TUNA H. The evaluation of plantar pressure distribution in obese and non-obese adults[J]. Clinical Biomechanics, 2004, 19(10): 1055-1059.
- [19] BOSCH K, NAGEL A, WEIGEND L, et al. From "first" to "last" steps in life-pressure patterns of three generations[J]. Clinical Biomechanics, 2009, 24(8): 676.
- [20] KO M, HUGHES L, LEWIS H. Walking speed and peak plantar pressure distribution during barefoot walking in persons with diabetes[J]. Physiotherapy Research International, 2012, 17(1): 29-35.
- [21] TAYLOR A J, MENZ H B, KEENAN A M. The influence of walking speed on plantar pressure measurements using the two-step gait initiation protocol[J]. Foot, 2004, 14(1): 49-55.

- [22] MAETZLER M, BOCHDANSKY T, ABBOUD R J. Normal pressure values and repeatability of the Emed® ST2 system[J]. *Gait and Posture*, 2010, 32(3): 391-394.
- [23] BURNFIELD J M, FEW C D, MOHAMED O S, et al. The influence of walking speed and footwear on plantar pressures in older adults[J]. *Clinical Biomechanics*, 2004, 19(1): 78-84.
- [24] CHUCKPAIWONG B, NUNLEY J A, MALL N A, et al. The effect of foot type on in-shoe plantar pressure during walking and running[J]. *Gait and Posture*, 2008, 28(3): 405-411.
- [25] SYED N, KARVANNAN H, MAIYA A G, et al. Plantar pressure distribution among asymptomatic individuals: a cross-sectional study [J]. *Foot and Ankle Specialist*, 2012, 5(2): 102-106.
- [26] SCHIE C H M V, BOULTON A J M. The effect of arch height and body mass on plantar pressure[J]. *Wounds A Compendium of Clinical Research and Practice*, 2000, 12(4): 88-95.
- [27] QUEEN R M, ABBEY A N, WIEGERINCK J I, et al. Effect of shoe type on plantar pressure: a gender comparison[J]. *Gait and Posture*, 2010, 31(1): 18-22.
- [28] WIEGERINCK J I, BOYD J, YODER J C, et al. Differences in plantar loading between training shoes and racing flats at a self-selected running speed [J]. *Gait and Posture*, 2009, 29(3): 514-519.
- [29] PUTTI A B, ARNOLD G P, ABBOUD R J. Foot pressure differences in men and women [J]. *Foot and Ankle Surgery*, 2010, 16(1): 21-24.
- [30] PATAKY T C, CARAVAGGI P, SAVAGE R, et al. New insights into the plantar pressure correlates of walking speed using pedobarographic statistical parametric mapping (pSPM) [J]. *Journal of Biomechanics*, 2008, 41(9): 1987-1994.
- [31] DRERUP B, SZCZEPANIAK A, WETZ H H. Plantar pressure reduction in step-to gait: a biomechanical investigation and clinical feasibility study[J]. *Clinical Biomechanics*, 2008, 23(8): 1073-1079.
- [32] 王兰美, 郭业民, 潘志国. 人体足底压力分布研究与应用[J]. *机械制造与自动化*, 2005, 34(1): 35-38.  
WANG Lanmei, GUO Yemin, PAN Zhiguo. The study on plantar pressure distribution and its application [J]. *Machine Manufacturing and Automation*, 2005, 34(1): 35-38. (in Chinese)
- [33] LUO Z P, BERGLUND L J, AN K N. Validation of F-Scan pressure sensor system: a technical note[J]. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 1998, 35(2): 186-191.
- [34] BEEBY S P. MEMS mechanical sensors[J]. *Sensor Review*, 2004, 24(3): 319-320.
- [35] SHU L, HUA T, WANG Y, et al. In-shoe plantar pressure measurement and analysis system based on fabric pressure sensing array [J]. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine A Publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2010, 14(3): 767-775.
- [36] HEALY A, BURGESSWALKER P, NAEMI R, et al. Repeatability of Walkin Sense in shoe pressure measurement system: a preliminary study[J]. *Foot*, 2012, 22(1): 35.
- [37] CONG Y, ZHANG M. Measurement of in-shoe plantar triaxial stresses in high-heeled shoes [C]// *International Conference on Biomedical Engineering and Informatics*. New York: IEEE, 2010: 1760-1763.
- [38] EDGAR S, SWYKA T, FULK G, et al. Wearable shoe-based device for rehabilitation of stroke patients [C]// *International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology*. New York: IEEE, 2010: 3772-3775.
- [39] SALPAVAARA T, VERHO J, LEKKALA J, et al. Wireless insole sensor system for plantar force measurements during sport events[J]. *XIX Imeko World Congress Fundamental and Applied Metrology Proceedings*, 2009, 76(12): 6-11.
- [40] HOLLECZEK T, RÜEGG A, HARMS H, et al. Textile pressure sensors for sports applications [J]. *Sensors*, 2010, 143(2): 732-737.
- [41] SAITO M, NAKAJIMA K, TAKANO C, et al. An in-shoe device to measure plantar pressure during daily human activity [J]. *Medical Engineering and Physics*, 2011, 33(5): 638-645.
- [42] ZHANG Y F, HONG C Y, RAFIQUE A, et al. A fiber Bragg grating based sensing platform fabricated by fused deposition modeling process for plantar pressure measurement[J]. *Measurement*, 2017, 112(20): 74-79.

(责任编辑:张雪,邢宝妹)