

文章编号: 1004-7220(2023)01-0164-06

# 一种基于微型传感器的鞋带拉力测试系统研制及可靠性研究

魏书涛<sup>1,2</sup>, 郭新宇<sup>1</sup>, 汤运启<sup>1</sup>, 晏彪<sup>1</sup>, 李灵君<sup>1</sup>, 李立<sup>3</sup>  
(1. 陕西科技大学设计与艺术学院, 西安 710021; 2. 三六一度(中国)有限公司, 福建 厦门 361009;  
3. 美国佐治亚南方大学 健康科学与运动学院, 乔治亚州 斯泰茨伯勒市 30460)

**摘要:**目的 研发与验证一种鞋带拉力测试系统的可靠性。方法 对3个拉力传感器分别施加0~196 N增量载荷, 每种载荷重复测试9次, 重复测试过程中卸去负载并间隔30 s, 采集每种负荷下传感器的输出电压。使用线性回归分析探究采集的电压信号与增量载荷之间的线性关系, 使用准确度、精确度和一致性区间来验证测量值与真实载荷的一致性, 通过Bland-Altman分析和组内相关系数(intra-group correlation coefficient, ICC)分析验证拉力传感器的重复性和可靠性。结果 传感器的输出电压信号与载荷之间显著线性相关( $P < 0.0001$ ,  $R^2 = 0.9999$ ), 3个传感器  $ICC > 0.999$  ( $P < 0.0001$ )。不同载荷下3个拉力传感器测量值变异系数的均值分别为0.0038、0.0022和0.0035。结论 该鞋带拉力采集系统具有较高的可靠性, 可以用于鞋带拉力的实时采集。

**关键词:** 鞋带; 拉力传感器; 可靠性; 精确度; 准确度

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.01.024

## Development of Shoelace Tensile Test System Based on Micro-Sensors and Reliability Study

WEI Shutao<sup>1,2</sup>, GUO Xinyu<sup>1</sup>, TANG Yunqi<sup>1</sup>, YAN Biao<sup>1</sup>, LI Lingjun<sup>1</sup>, LI Li<sup>3</sup>  
(1. College of Art and Design, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China; 2. 361 Degrees (China) Co., Ltd., Xiamen 361009, Fujian, China; 3. Department of Health Sciences and Kinesiology, Georgia Southern University, Statesboro 30460, USA)

**Abstract: Objective** To design and verify the reliability of a shoelace tensile test system. **Methods** Incremental loads of 0-196 N were applied to three tension sensors, each load was repeated nine times, with the load removed and interval of 30 s during the repeated tests. Then output voltage of the sensors under each load was collected. Linear regression analysis was used to explore linear relationship between the collected voltage signal and the incremental load. Accuracy, precision and consistency intervals were used to verify consistency of the measured values with the true load. Bland-Altman analysis and intra-group correlation coefficient (ICC) analysis were used to verify the repeatability and reliability of the tensile sensor. **Results** There was a significant linear correlation between output voltage signal of the sensors and the load ( $P < 0.0001$ ,  $R^2 = 0.9999$ ), and ICC of three sensors was above 0.999 ( $P < 0.0001$ ). The mean values of the coefficients of variation of the measured values for three tensile sensors under different loads were 0.0038, 0.0022 and 0.0035, respectively. **Conclusions** The shoelace tensile test system has high reliability and can be used for real-time acquisition of shoelace tension.

**Key words:** shoelace; tensile sensor; reliability; accuracy; precision

收稿日期: 2022-01-12; 修回日期: 2022-02-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFF0303800), 陕西省教育厅重点科研计划项目(21JT002)

通信作者: 李立, 教授, E-mail: lili@georgiasouthern.edu

运动鞋是人们从事各种体育运动的重要装备,鞋带作为运动鞋的重要结构之一,在提高运动员的穿着舒适度、预防运动损伤和提升运动表现等方面均发挥着重要作用<sup>[1-3]</sup>。研究表明,鞋带松紧对运动鞋的穿着舒适性具有显著影响<sup>[4-5]</sup>。若鞋带太松,运动过程中足与鞋之间发生相对滑动,反复摩擦会使足部产生水泡进而影响人体运动表现;而太紧的鞋会对增大足背压力,对足背肌肉等软组织产生压迫,从而导致足部不适、疼痛甚至损伤<sup>[6]</sup>。

此外,鞋带松紧对人体运动时下肢生物力学特征也会产生显著影响<sup>[4-5,7]</sup>。与穿着有鞋带跑鞋相比,穿着松紧鞋舌跑鞋会产生更大的足外翻角度<sup>[8]</sup>。而鞋带结构则有助于使脚的后跟部位与鞋的后跟部分更贴合,从而更好控制后足运动,降低运动损伤概率<sup>[9]</sup>。鞋帮面松紧对运动鞋性能的影响来源于鞋带的间隔结构,鞋带产生的束缚作用对脚背表面的肌肉和肌腱产生影响,并且为足部提供一定的稳定性支撑,这对于形成动态抵抗足部内翻的能力非常重要<sup>[10]</sup>。然而,前人仅通过受试者对舒适度的感知来主观控制鞋带的松紧程度<sup>[11-13]</sup>。目前尚没有直接量化鞋带拉力的仪器和手段,使得各种研究之间的结果难以比较。小型力学传感器多用于机械、机器人、医疗等领域内,有电阻式、电容式、压电晶体式等应变模式。目前市场上大部分小型力学传感器的体积还是相对较大,质量较大,同时缺少与之相匹配的小型化的信号放大和采集系统,无法满足研究鞋带拉力的要求。在研究鞋带拉力研究方面,还鲜有关于使用微型拉力传感器对鞋带拉力进行量化研究的报道。因此,本文自主研发一套使用微型拉力传感器实现实时采集运动过程中鞋带拉力变化的测量设备,通过使用砝码对拉力传感器的线性度、一致性与重复性进行验证,以期探究人体运动过程中鞋带松紧变化的力学机制,以及分析鞋带拉力对下肢生物力学的影响提供可以量化的研究手段。

## 1 材料与方法

### 1.1 传感器

该鞋带拉力采集系统包含3个微型拉力传感器和数据采集模块,系统包括测量传感器的硬件部分与采集软件部分。鞋带拉力采集系统的硬件部

分由力传感器、放大器、单片机、蓝牙模块(发射端和接收端)、充电模块及电源模块组成[见图1(a)]。其中,力传感器形状为圆柱形,底面直径为10 mm,长度为25 mm,内置4片应变片于应变梁上[见图1(b)]。应变片品牌为HBM,电阻为120  $\Omega$ ,测量网格的长宽均为0.6 mm,应变片长为6.4 mm,宽为3.5 mm。传感器的两侧各有1个固定环,传感器加上固定环的总长度约为35 mm。采样频率为1 kHz,量程为0~200 N。微型鞋带拉力传感器受力引起输出电压发生变化。将拉力与输出电压建立函数关系以表征鞋带拉力。电压信号通过放大器放大300倍,输出至单片机,通过蓝牙模块与计算机端相连。供电包括充电模块以及电源模块,整个硬件部分由1块3.7 V锂电池供电(蓝牙接收端与计算机相连接,由计算机电源供电)。拉力传感器具体参数如表1所示。

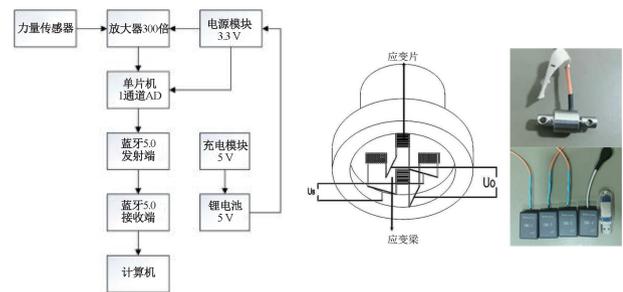


图1 鞋带拉力采集系统及其硬件结构

Fig. 1 Shoelace tension collection system and its hardware structure

表1 传感器基本信息

Tab. 1 Basic information of sensors

技术参数	数值
灵敏度	0.98 mV/V
零点输出	$\leq \pm 1\%$ F. S
综合精度	$\leq \pm 0.5\%$ F. S
蠕变	$\leq \pm 0.5\%$ F. S/30 min
输入阻抗	(1 000 $\pm$ 30) $\Omega$
输出阻抗	(1 000 $\pm$ 2) $\Omega$
绝缘阻抗	$\geq 5\ 000\ M\Omega/100\ VDC$
供电	10 VDC
安全过载	120% F. S
量程	20 kg

此外,还使用了1个数据采集盒和计算机端工作站。数据采集盒体积约为3 cm $\times$ 3 cm $\times$ 1 cm,连续工作时间大于3 h。采样频率为1 kHz,数据传输使用蓝牙技术。数据采集盒的每个模块有4个采集通道(其中1个通道用于同步信号的传输),模块上

带有显示采集是否工作正常的指示灯,红色为异常,绿色为数据采集正常。外壳材料坚固,抗碰撞。计算机端的工作站能够实时显示4个通道的数据变化过程。并设有采集、停止、存储等功能,数据存储的格式为\*.asc。

## 1.2 测试过程

使用砝码、鞋带等材料对鞋带拉力传感器的线性度与重复性进行验证。为了在测量中使测量结果不受鞋带材料延伸性影响,使用内芯为钢丝的鞋带作为测试鞋带,鞋带长度为0.5 m。

通过对传感器施加增量载荷进行测量,将鞋带固定在距地面2 m处,自然下垂。拉力传感器固定在鞋带上。每次测试前清零,并记录电压值作为零载荷。在鞋带上增加砝码,对鞋带分别施加0、0.98、1.96、4.90、9.80、19.60、29.40、39.20、49.00、58.80、68.60、78.40、88.20、98.00、147.00、196.00 N载荷。在每个载荷条件下重复测试9次,每次测试记录5 s的数据,每两测试中间卸去负载并间隔30 s。

## 1.3 数据分析

使用4阶巴特沃斯低通滤波器对鞋带拉力进行滤波处理,截止频率设为20 Hz。数据分析时首先对增量载荷下3个传感器的输出电压信号与增量载荷进行线性回归分析,计算得到载荷与输出电压之间的线性公式。使用准确度、精确度和一致性区间来验证传感器的一致性。其中,准确度定义为测试结果与真实值之间的差值;差值接近零,表示准确度佳<sup>[14]</sup>。精确度定义为测试结果与真实值之间差值的标准差;标准差越小,表示精确度越高<sup>[14]</sup>。一致性区间定义为测试结果与真实值的差值均值的95%置信区间。准确度和精确度的计算公式如下:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_i)}{N} \quad (1)$$

$$P = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_i)^2}{N - 1}} \quad (2)$$

式中:A为准确度;P为精确度; $x_i$ 为测试结果; $X_i$ 为真实值;N为重复测试次数。

另外,在重复性试验中,计算每种施加载荷下测试结果的变异系数(coefficient of variation, CV)。每次测量值选取50帧数据的平均值进行统计分析。CV越低,重复性越好。为了分析真实载荷和

由线性公式所得的载荷之间的重复性和可靠性,进行Bland-Altman分析和组内相关系数(intra-group correlation coefficient, ICC)分析<sup>[15]</sup>。

$$ICC = \frac{MS_R - MS_w}{MS_R + (k - 1)MS_w} \quad (3)$$

式中: $MS_R$ 为行变量均方; $MS_w$ 为组内变异均方。

## 2 结果

### 2.1 线性度

对增量载荷下3个传感器的输出电压信号与增量载荷进行线性回归分析。结果显示,传感器的输出信号与载荷之间存在显著线性相关(见图2)。3个拉力传感器载荷(X)与输出电信号(Y)之间存在线性关系,具体拟合方程如下:

1号传感器:  $Y = 11.39X + 6.060$  ( $P < 0.0001$ ,  $R^2 = 0.9997$ )

2号传感器:  $Y = 11.49X - 4.061$  ( $P < 0.0001$ ,  $R^2 = 0.9998$ )

3号传感器:  $Y = 11.48X - 2.719$  ( $P < 0.0001$ ,  $R^2 = 0.9998$ )

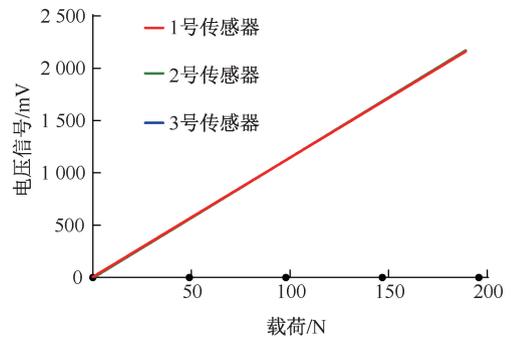


图2 1、2、3号传感器线性回归

Fig. 2 Linear regression of No. 1, No. 2 and No. 3 sensors

### 2.2 一致性

表2显示了增量载荷下3个传感器的准确度、精确度和一致性区间( $\pm 1.96$  SD)。差值在该一致性区间内均匀分布,不超出该区域,表示一致性高。结果表明,1号传感器准确度范围在 $-1.991 \sim 1.446$  N之间,精确度范围在 $0.027 \sim 1.991$  N之间;2号传感器的准确度范围在 $-1.080 \sim 1.763$  N之间,精确度范围在 $0.026 \sim 0.176$  N之间;3号传感器的准确度范围在 $-1.395 \sim 1.725$  N之间,精确度范围在 $0.056 \sim 1.725$  N之间。

表 2 鞋带拉力传感器准确度、精确度

Tab. 2 Accuracy and precision of the shoelace tension sensor

载荷/N	准确度/N			精确度/N		
	1号传感器	2号传感器	3号传感器	1号传感器	2号传感器	3号传感器
0	0.121	-0.164	-0.066	0.011	0.033	0.011
0.98	0.085	-0.070	0.010	0.029	0.014	0.032
1.96	0.439	-0.007	0.036	0.030	0.012	0.019
4.90	0.442	0.029	0.517	0.019	0.020	0.010
9.80	0.481	-0.062	0.330	0.024	0.036	0.018
19.60	0.657	-0.250	-0.152	0.048	0.006	0.045
29.40	1.077	-0.376	-0.236	0.020	0.007	0.047
39.20	1.221	-0.193	-0.471	0.037	0.041	0.035
49.00	1.757	0.889	0.687	0.017	0.009	0.014
58.80	0.270	-0.648	-1.222	0.015	0.040	0.009
68.60	0.021	-1.124	-0.936	0.031	0.020	0.010
78.40	0.046	-1.200	-1.347	0.033	0.039	0.029
88.20	1.920	-1.095	-1.436	0.047	0.024	0.024
98.00	0.493	-1.031	0.146	0.033	0.023	0.030
147.00	1.346	1.873	1.853	0.058	0.039	0.029
196.00	0.811	0.542	0.382	0.046	0.025	0.057

图 3 显示了 3 个传感器真实载荷与线性公式计算载荷的 Bland-Altman 曲线图,从中可以估计出测量偏差。在 Bland-Altman 图上,偏差均匀地分布在差值均值的 95% 置信区间内。95% 置信区间内的点数可以解释该测量系统的可靠性,点数越多,可靠性越好。结果表明,每个传感器只有 1 个点超出测量值和真实值差值均值的 95% 置信区间,1、2、3 号传感器的一致性区间分别为  $-0.747 \sim 0.212$ 、 $-0.261 \sim 0.573$ 、 $-0.332 \sim 0.571$  N。

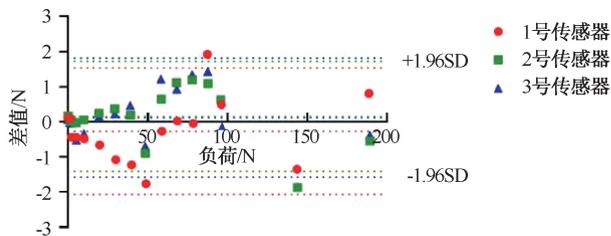


图 3 拉力传感器真实载荷与测量值之间差异的 Bland-Altman 图  
Fig. 3 Bland-Altman plot of the difference between the true load and the measured value of the three tensile sensors

### 2.3 重复性

ICC 是重复性和准确性的指标<sup>[16-17]</sup>。结果显示,3 个传感器的  $ICC > 0.999$  ( $P < 0.0001$ )。如表 3 所示,不同载荷下 3 个拉力传感器测量值变异系数的均值分别为 0.003 8、0.002 2、0.003 5。

表 3 不同负荷下 3 个拉力传感器变异系数

Tab. 3 Coefficient of variation for three tension sensors under different loads

载荷/N	1号传感器	2号传感器	3号传感器
0.98	0.032 2	0.014 9	0.031 7
1.96	0.012 3	0.006 0	0.009 7
4.90	0.003 5	0.004 1	0.001 8
9.80	0.002 4	0.003 7	0.001 8
19.60	0.002 4	0.000 3	0.002 3
29.40	0.000 6	0.000 2	0.001 6
39.20	0.000 9	0.001 0	0.000 9
49.00	0.000 3	0.000 2	0.000 3
58.80	0.000 3	0.000 7	0.000 1
68.60	0.000 5	0.000 3	0.000 1
78.40	0.000 4	0.000 5	0.000 4
88.20	0.000 5	0.000 3	0.000 3
98.00	0.000 3	0.000 2	0.000 3
147.00	0.000 4	0.000 3	0.000 2
196.00	0.000 2	0.000 1	0.000 3

### 2.4 实验应用

在人体测试中,招募 15 名健康的男性大学生,年龄 ( $20.5 \pm 2.5$ ) 岁,身高 ( $1.75 \pm 0.03$ ) m,体重 ( $66.48 \pm 0.03$ ) kg。纳入标准:① 受试者所穿鞋码为 41~42 码,② 每周跑步训练至少 30 km,③ 健康成年男性。排除标准:① 足部明显畸形,② 足部具有感知障碍,③ 半年有下肢运动损伤。

在跑鞋领口处等距设置前、中、后 3 个传感器,

3个传感器之间的连线松紧可调整(见图4)。鞋带拉力在舒适状态下,在45 m长的跑道以自选速度( $1.59 \pm 0.12$ ) m/s进行行走。由3个传感器获取的数据可知,鞋带位置对鞋带拉力有显著影响( $P < 0.0001$ )。位于前部的鞋带拉力显著大于中部的鞋带拉力和后部的鞋带拉力( $P < 0.0001$ ),但位于中部的鞋带拉力与后部的鞋带拉力无显著差异( $P > 0.05$ )。鞋带拉力在步态周期内呈先上升后下降的趋势(见图5)。结果表明,该套系统能够准确、完整获取运动过程中鞋带的拉力变化状态。

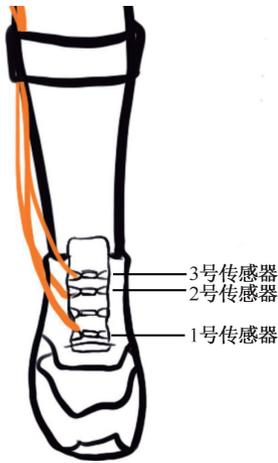


图4 跑鞋上传感器设置位置

Fig. 4 Sensor setting position on running shoes

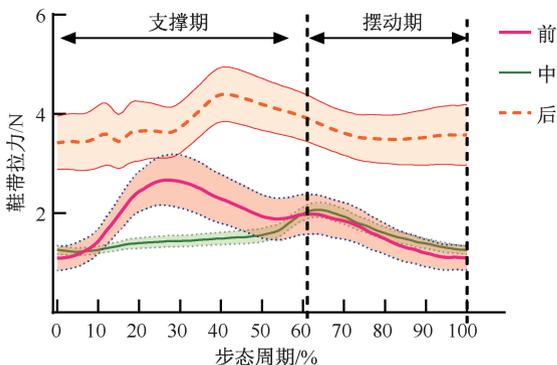


图5 舒适状态下行走时鞋带拉力在步态周期内变化曲线

Fig. 5 Shoelace tension curve in one gait cycle during walking under comfortable state

### 3 讨论

为了量化运动中鞋带拉力的变化,本文研发了一种基于微型拉力传感器,可以实时采集鞋带拉力

的测量系统。结果表明,自制的微型拉力传感器对载荷的响应具有良好的线性度,拉力传感器的准确度和精确度高,同时,较小的变异系数说明传感器具有较高的可重复性。良好的线性度与可重复性表明此测量系统在测量鞋带拉力时具有较高的信效度,将其用于测量动态鞋带拉力是可靠的。其次,传感器的体积、重量及挂环的设计能够满足鞋带拉力测试的需求,较小的体积、重量以及简单的固定方式使这种传感器具有高度的可行性与可操作性。

传感器的输出信号与增量载荷之间的线性回归模型显示出非常好的拟合优度( $R^2 > 0.99$ ,  $P < 0.0001$ ),表明自制的微型拉力传感器对载荷的响应具有非常好的线性度。Bland-Altman 曲线图分析是检测系统误差的重要方法<sup>[8]</sup>。在一些临床和实验室研究中,Bland-Altman 分析被用来评估两种器械之间的一致性<sup>[18-19]</sup>。采用95%一致限和均数差法进行可靠性评价<sup>[20]</sup>。图3显示,每个传感器只有1个点超出了真实载荷和测量值之间差值的95%置信区间,表明测量结果与真实载荷相比差异较小,测量结果可靠。如表3所示,重复加载不同载荷后,3个传感器输出信号的变异系数非常小,说明3个传感器都具有较好的重复性。

本文使用自主研发的微型传感器对鞋带拉力进行量化。实验结果表明,其具有较好的线性度、一致性与可重复性,并且尺寸、质量也在现阶段尽可能做到较小范围,对运动的影响也很小,能够较为准确反映鞋带在运动中的拉力变化过程,为运动鞋的相关设计研发工作提供数据和理论依据。

本研究的局限性主要在于鞋带拉力测量会受鞋带的材质、间隔距离、系带方式、鞋面结构与材质、运动方式等因素的影响,本课题组后续会继续对相关因素对鞋带拉力的影响进行研究。

### 4 结论

本研究使用的鞋带拉力传感器具有较高的线性度、一致性和良好的重复性。轻量化与较小的体积也使传感器更易于固定在鞋带上便于测量,较高的精度使传感器能够很好捕捉到鞋带拉力的细微变化。未来可以通过改进传感器技术,使其实用性得到进一步提高,扩大其对不同鞋带材料与系带

方式的可使用范围,同时减少传感器本身对人体的影响,为开发智能鞋靴产品提供更为精细的数据支撑。

### 参考文献:

- [ 1 ] 范毅方,余根宇,范雨轩,等. 耐力跑的生物力学机制及其在跑鞋设计中的应用[J]. 医用生物力学, 2021, 36(S1): 116.  
FAN YF, YU GY, FAN YX, *et al.* Biomechanical mechanisms of endurance running and their application in the design of running shoes [J]. J Med Biomech, 2021, 36(S1): 116.
- [ 2 ] 万祥林,曲峰. 运动鞋屈曲刚度对舒适性及短跑表现的影响[J]. 体育科学, 2013, 33(12): 59-64.
- [ 3 ] 谢恩礼,詹建国. 步态生物力学大数据分析研究进展[J]. 医用生物力学, 2021, 36(6): 984-989.  
XIE EL, ZHAN JG. Progress of big data analysis in gait biomechanics [J]. J Med Biomech, 2021, 36(6): 984-989.
- [ 4 ] HAGEN M, HENNIG E M. Effects of different shoe-lacing patterns on the biomechanics of running shoes [J]. J Sport Sci, 2009, 27(3): 267-275.
- [ 5 ] HAGEN M, HOMME AK, UMLAUF T, *et al.* Effects of different shoe-lacing patterns on dorsal pressure distribution during running and perceived comfort [J]. Res Sports Med, 2010, 18(3): 176-187.
- [ 6 ] CANNARD, FRANCIS, HERBAUT, *et al.* A reliable measure of footwear upper comfort enabled by an innovative sock equipped with textile pressure sensors [J]. Ergon, 2016, 59(10): 1327-1334.
- [ 7 ] 晏彪,弓太生,汤运启,等. 运动鞋鞋面压力研究进展[J]. 中国皮革, 2021, 50(4): 50-55.
- [ 8 ] SARROS EA. The effect of shoe-lacing pattern on running economy in Division-1 endurance athletes [D]. Tennessee: Middle Tennessee State University, 2016.
- [ 9 ] 洪友廉,王琳,周继和,等. 有鞋带跑鞋和松紧鞋舌跑鞋跑步主观舒适度、足底压力和后足运动参数比较[J]. 中国运动医学杂志, 2011, 30(7): 613-617.
- [ 10 ] CZAPLICKI Z, RYLSKI A, SERWETA W, *et al.* Research on footwear laces with respect to abrasion resistance and spontaneous untying [J]. Fibres Text East Eur, 2020, 3(141): 23-26.
- [ 11 ] CHENG YL, HONG Y. Using size and pressure measurement to quantify fit of running shoes [J]. Footwear Sci, 2010, 2(3): 149-158.
- [ 12 ] HERBAUT A, ROUX M, GUÉGUEN N, *et al.* Determination of optimal shoe fitting for children tennis players: Effects of inner-shoe volume and upper stiffness [J]. Appl Ergon, 2019, 80: 265-271.
- [ 13 ] 王熙,杨洋,张希妮,等. 不同运动鞋舒适性差异及对篮球典型动作足部受力特征影响[J]. 医用生物力学, 2018, 33(2): 142-149.  
WANG X, YANG Y, ZHANG XN, *et al.* Comfort difference in sports characteristics of foot loading in shoes and its effects on typical basketball footwork [J]. J Med Biomech, 2018, 33(2): 142-149.
- [ 14 ] STREINER DL, NORMAN GR. "Precision" and "accuracy": Two terms that are neither [J]. J Clin Epidemiol, 2006, 59(4): 327-330.
- [ 15 ] 余红梅,罗艳虹,萨建,等. 组内相关系数及其软件实现[J]. 中国卫生统计, 2011, 28(5): 497-500.
- [ 16 ] KOO TK, LI MY. A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research [J]. J Chiropr Med, 2016, 15(2): 155-163.
- [ 17 ] SHROUT PE, FLEISS JL. Intraclass correlations: Uses in assessing rater reliability [J]. Psychol Bull, 1979, 86(2): 420.
- [ 18 ] BLAND JM, ALTMAN DG. Measuring agreement in method comparison studies [J]. Stat Methods Med Res, 1999, 8(2): 135-160.
- [ 19 ] LUDBROOK J. Confidence in Altman-Bland plots: A critical review of the method of differences [J]. Clin Exp Pharmacol P, 2010, 37(2): 143-149.
- [ 20 ] 缪华章. 基于 Bland-Altman 法 LoA 可信区间的一致性评价[D]. 广州: 南方医科大学, 2014.