

参赛队员姓名: 刘 蕾 华南师范大学附属中学, 广州

省份: 广东省

国家/地区: 中国

指导教师姓名: 申西芬 吴玖丹

论文题目: 跑步者个体特征和跑步习惯对足部力学响应的影响  
研究

# 跑步者个体特征和跑步习惯对足部力学 响应的影响研究

作 者：刘 蕾

指导老师：申西芬 吴玖丹

学 校：华南师范大学附属中学

地 址：广东 广州，中国

# 跑步者个体特征和跑步习惯对足部力学响应的 影响研究

刘 蕾

(华南师范大学附属中学, 广州 510631)

**摘 要:** 马拉松运动近年来风靡全国, 大有全民参与的趋势, 但是否每个人都适合参加马拉松运动仍是一个值得研究的问题。长跑者最常见的伤病之一为足底筋膜炎, 而降低足底载荷是减少伤病风险的有效手段。本文首先设计了针对跑步群体的调查问卷, 对 850 名跑步运动爱好者进行了调研, 撰写了跑步群体现状及运动损伤调查报告。对 12 位跑步运动志愿者的身高体重进行了统计, 通过高速摄影技术捕捉跑者的步态特征, 借助图像处理技术和重心判定方法分析了跑者跑步过程的重心变化。基于能量守恒定律和动量定理, 建立了跑者体重、重心最大滞空高度、脚底与跑道的接触时间和跑者足部所受载荷间的关系理论模型。通过足底压力实时测试系统测得了跑者跑步过程中足底所受的真实压力, 得到了跑者足部所受荷载与跑步者个体特征和步态习惯的关系, 验证了模型的合理性。进而, 建立了足底应力与重心起伏幅度、脚底离地时间的关系曲线, 基于生物力学中压力施加与频率对长时间运动受伤风险评估曲线, 提出了判定跑步者是否适合长跑运动的判断标准, 并从降低足底荷载角度对跑步者具体的步态特征和跑步习惯提出了建议。

**关键词:** 步态特征; 高速摄影; 图像处理; 重心起伏幅度; 足底压力监测

# 目 录

摘要.....	2
目录.....	3
主要符号表.....	4
1. 引言.....	5
2. 跑步过程的动力学分析.....	7
2.1 足底荷载计算模型.....	7
2.2 步态参数的确定.....	8
3. 足底压力同步测量与分析.....	13
4. 结论.....	20
参考文献.....	21
致谢.....	22
学术诚信声明.....	23

## 主要符号表

$m$	跑者体重
$\Delta H$	跑者跑步时重心高度变化量
$\Delta H_{t-t'}$	跑者跑步时重心起伏幅度
$t_0$	跑者跑步时脚底与跑道的最长接触时间
$v$	跑者重心最低时垂直方向的速度
$F$	跑者足底荷载
$m_i$	跑者跑步图像中第 $i$ 个质量块的质量
$y_i$	跑者跑步图像中第 $i$ 个质量块的高度
$\alpha_i$	跑者跑步图像中第 $i$ 个质量块权重数
$S_{\text{脚}}$	足底面积

## 1. 引言

近年来, 马拉松运动风靡全国, 大有全民参与的趋势。2019 年在广州举行的马拉松有近 12 万人报名, 报名人数创历史新高。然而, 关于马拉松对人健康的利弊也争议不断。其中, 足底筋膜炎是长跑者常见的伤病, 普遍认为是足底筋膜反复过度受力和足底结构异常导致的<sup>[1]</sup>。图 1 是人体足底结构的示意图, 而足底筋膜位于脚底板的大片区域。足底筋膜炎患者在足底近足跟处有压痛感, 影响着长跑者的运动状态, 甚至影响到其日常生活。



图 1. 足底筋膜示意图<sup>[2]</sup>

是否每个人都适合参加马拉松运动呢? 甚至是否每个人都适合长期跑步呢? 在导师的指导下, 设计了调查问卷, 进行了“跑步是全民运动吗? ——跑步群体现状及运动损伤调查”, 共有 850 名跑步运动爱好者参与了问卷调查, 其中男性占 46%, 女性占 54%, 年龄主要介于 11~50 岁之间。通过调研可以发现, 体育运动爱好者中以跑步爱好者居多 (如图 2 所示), 占调研比例的 54%。但是, 对于跑步这项运动, 参与的普遍为业余爱好者, 没有固定的跑步习惯。根据调查结果, 大部分参与者 1 周的跑步频率是不稳定的 (如图 3 所示), 同时相当一部分跑步者因为没有时间或者觉得没必要 (如图 4 所示), 并没有形成运动前做准备运动的习惯, 这更加大了跑步受伤的风险 (调查问卷及完整的调查报告详见另附的附件)。因此研究跑步者的个体特征与跑步习惯是否容易导致其在长期跑步中出现损伤, 并依据科学的分析对跑者的跑步习惯提出指导性建议是十分必要的。

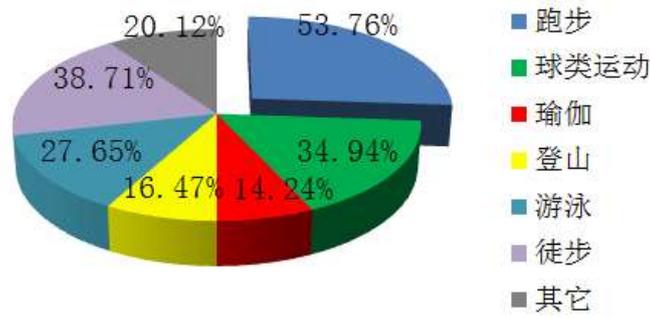


图 2. 运动项目参与比例图

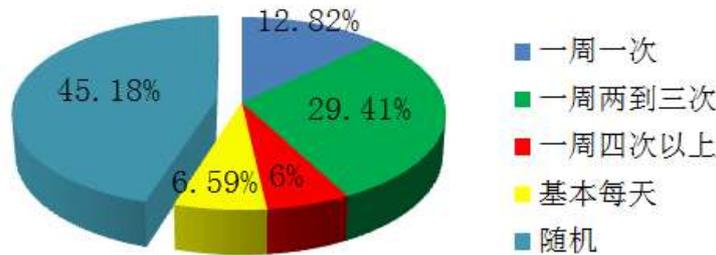


图 3. 跑步频率比例图

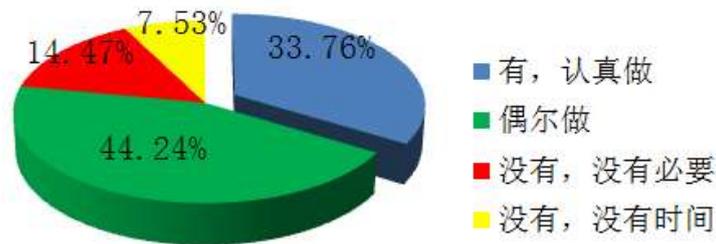


图 4. 跑前热身习惯比例图

研究表明, 在特定的跑步损伤中, 损伤往往是超负荷的结果, 这些重复的超负荷荷载将逐渐降低足底结构特定的承载能力, 最终超过它能承受的应力水平<sup>[3]</sup>, 引起足部损伤与失效。因此, 降低跑步者足底荷载将有效减少受伤的风险, 而足底荷载的大小与跑者的个体特征 (体重) 以及跑步习惯 (步态特征) 密切相关。

本研究中, 对 12 位跑步运动志愿者的身高体重进行了统计, 通过高速摄影技术捕捉跑者的步态特征, 借助图像处理技术和重心判定方法分析了跑者跑步过程的重心变化。基于能量守恒和动量定理, 建立了跑者体重、重心最大滞空高度、脚底与跑道的接触时间和跑者足部所受荷载间的关系理论模型。通过足底压力同步测试系统测得了跑者跑步过程中足底 8 个测点处所受的压力, 得到了跑者足部所受荷载与跑步者个体特征和步态习惯的关系, 验证了模型的合理性。进而, 建

立了足底应力与重心起伏幅度、脚底离地时间的关系曲线, 基于生物力学中压力施加与频率对长时间运动受伤风险评估曲线, 提出了初步判定跑步者是否适合长跑运动的判断标准, 并从降低足底荷载角度对跑步者具体的步态特征和跑步习惯提出了建议。

通过本文的研究工作, 我们旨在分析跑步者跑步过程中足底压力大小的影响因素, 并依据国内外已有的一些研究成果, 提出使跑步者在长期跑步运动中减小受伤风险的建议, 为人民群众积极参与跑步运动的安全性提供参考与借鉴。

## 2. 跑步过程的动力学分析

### 2.1 足底荷载计算模型

跑者在奔跑过程中反复经历着一条腿支撑与另一条腿摆动、两条腿相向摆动的连续动作<sup>[4]</sup>。这个完整的过程称之为一个步态周期。在一个完整的步态周期中, 当跑者的重心到达最高点时, 竖直方向的动能全部转化为重力势能; 随后跑者的重心下降, 速度逐渐增大, 这部分重力势能又转化成竖直方向的动能。依据能量守恒定律, 应有

$$mg\Delta H_{t-t'} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

脚底接触到跑道后, 竖直方向的速度逐渐减小至零; 随后在脚的力量作用下, 速度反向, 当脚底离地后, 重心逐渐升高, 速度逐渐减小, 重心再次到达最高点。通过对步态的进一步分析, 可以得到有足底压力的任意两个时间点下重心的速度。根据动量定理可以得到,

$$m(v_1 - v_2) = (F - mg)t_0 \quad (2)$$

此处, 足底刚接触地面为其中一个时间节点的速度 (作为  $v_1$ ), 以足底离地作为另一个时间节点的速度 (作为  $v_2$ )。

事实上, 脚底与地面的接触过程是一个碰撞过程。这个过程可以分为两个阶段。第一个阶段脚以速度  $v_1$  与地面发生碰撞, 由于受到地面碰撞冲量的作用, 跑者速度逐渐减小, 脚部变形逐渐增大, 直到速度等于零。这个阶段碰撞冲量为

$I_1$ ，根据动量定理有

$$0 - mv_1 = I_1 \quad (3)$$

第二个阶段，脚的变形逐渐恢复，脚获得反向的速度，离地时速度为  $v_2$ 。这个阶段碰撞冲量为  $I_2$ ，根据动量定理有

$$mv_2 - 0 = I_2 \quad (4)$$

则可以得到

$$\frac{v_2}{-v_1} = \frac{I_2}{I_1} = e \quad (5)$$

式(5)即为恢复因数  $e$ ，显然  $e$  的取值由碰撞的性质决定。对于完全弹性碰撞， $e = 1$ ；对于塑性碰撞， $e = 0$ ；介于这两者间为弹塑性碰撞， $e$  取 0~1 间的值。

由于跑者的重心最高点在长期跑步过程中养成了习惯，重心最高点几乎是不变的，因此假定在跑步过程中，这两个速度数值上是近似相等的，即认为满足完全弹性碰撞

$$v_1 = -v_2 \quad (6)$$

联立(1)，(2)，(6)，可以得到足底压力和冲量的表达式

$$F = m \left[ \frac{2\sqrt{2g\Delta H_{t-t'}}}{t_0} + g \right] \quad (7)$$

$$I = m \left[ \frac{2\sqrt{2g\Delta H_{t-t'}}}{t_0} + g \right] t_0 \quad (8)$$

## 2.2 步态参数的确定

由 2.1 节的讨论可知，足底压力的大小与跑者的步态特征密切相关。本研究征集了 12 位跑步运动志愿者（如图 5a），采用美国 Redlake MotionXtra HG-100K 高速摄影系统（如图 5b）连续快速捕捉跑步者的步态，并用足底压力同步测试系统测量跑者的足底压力（如图 5b），足底压力测试及分析详见第 3 部分。



(a) 12 位跑步运动志愿者



(b) 美国 Redlake MotionXtra HG-100K 高速摄影系统



(c)足底压力同步测试系统

图 5 测试现场: (a) 12 位跑步运动志愿者; (b) 美国 Redlake MotionXtra HG-100K 高速摄影系统; (c) 足底压力同步测试系统

以某典型跑步志愿者为例, 高速摄影捕捉到的跑者图像如图 6a。摄影得到的照片, 其本质上是一个一维或者多维的矩阵。对于 RGB 图片, 该矩阵中的每个元素对应着 3 个 1~255 的数值来决定该元素对应的色彩; 对于二值图, 则每个元素便是 1 或者 0。区分出跑者的轮廓后将跑者肢体所占区域二值化, 可以得到二值化后的图像(如图 6b), 黑色影像其实是由多个紧密排列的黑色方块(像素)构成的。进一步地, 通过标尺可确定人物的尺寸特征(如图 6c), 可以得到构成人物影像每一个像素距地面的高度。为了直观体现跑者重心的计算方法, 我们给出了人物对应的图像矩阵示意图(图 7)。在图像矩阵中, 跑者被划分为多个正方形, 将人体理想化为均质体, 每个正方形的质量为  $m_i$ , 高度为  $y_i$ 。但由于高速摄影机捕获的图像时侧视图, 手臂的纸面深度大约只有躯干的  $\frac{1}{4}$ , 腿的纸面深度大约只有躯干的  $\frac{1}{2}$ , 因此在计算时这部分方形应作加权计算, 权重系数定义为  $\alpha_i$ , 则跑者重心的高度可以由式(9)得到:

$$y = \frac{\sum \alpha_i m_i y_i}{\sum \alpha_i m_i} \quad (9)$$

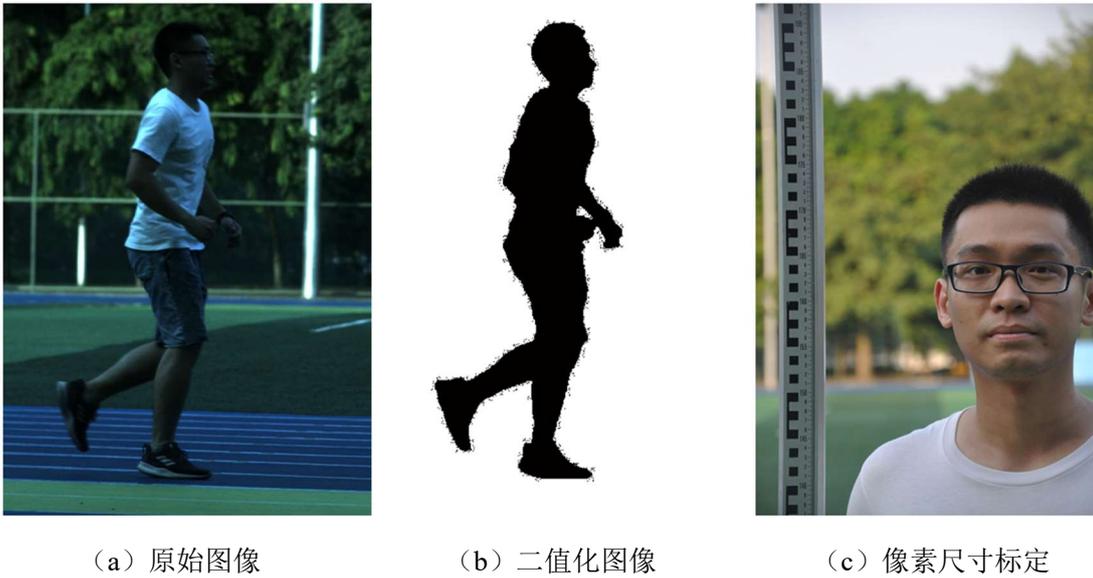


图 6. 高速摄影捕捉到的跑者图像及尺寸标定

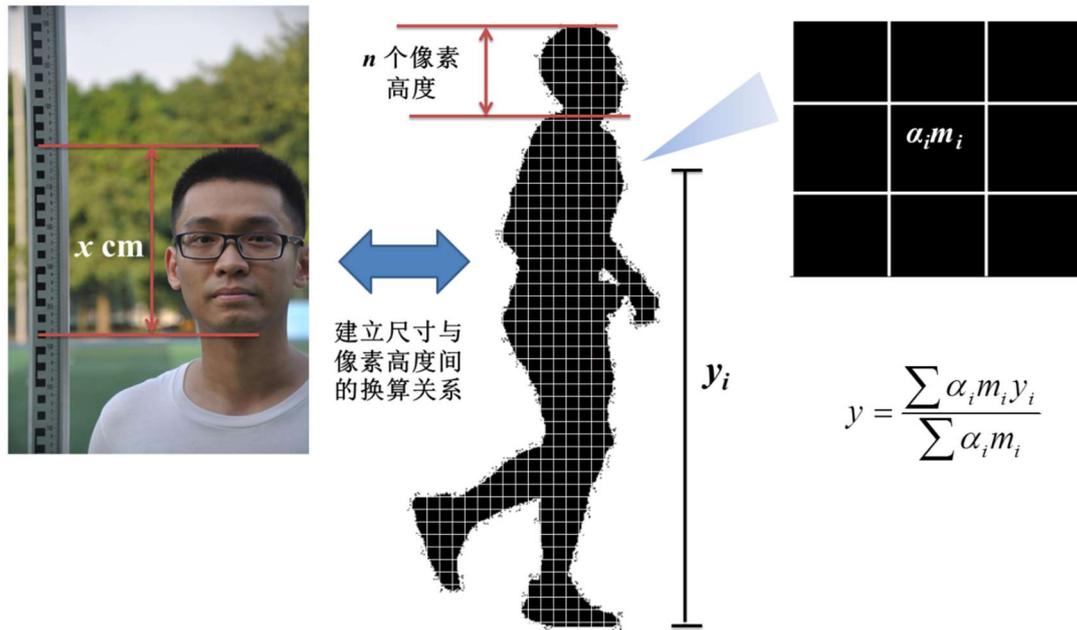


图 7. 像素化图像示意图

已有学者将这种计算不规则物体重心的方法运用于人体重心的判定中<sup>[5]</sup>。结合高速摄影连续多张图像的分析,可以得到一个步态周期内跑者重心随着时间的变化曲线。图 8 为高速摄影机拍摄的一个完整步态的连续影像,图 9 为重心高度变化量 $\Delta H$ 随着时间的变化曲线,可以看出曲线呈现类似于正弦曲线的规律,图

中用箭头标注出几个特征时间点对应的步态图像。当跑者重心达到最高点时,  $\Delta H$  取峰值; 当跑者脚刚着地时, 这个时间节点便是  $t_0$  的起点, 此时的  $\Delta H$  与峰值的  $\Delta H$  间的差值便是  $\Delta H_{t-t'}$ ; 脚着地后重心会持续有小幅度的下降, 直至重心降至最低点, 随后重心缓慢提升, 脚再次离地, 此时的时间节点便是  $t_0$  的终点。此后重心高度的变化量再次达到峰值, 而下一个波谷对应着另一只脚着地后重心降至最低点的时间点。

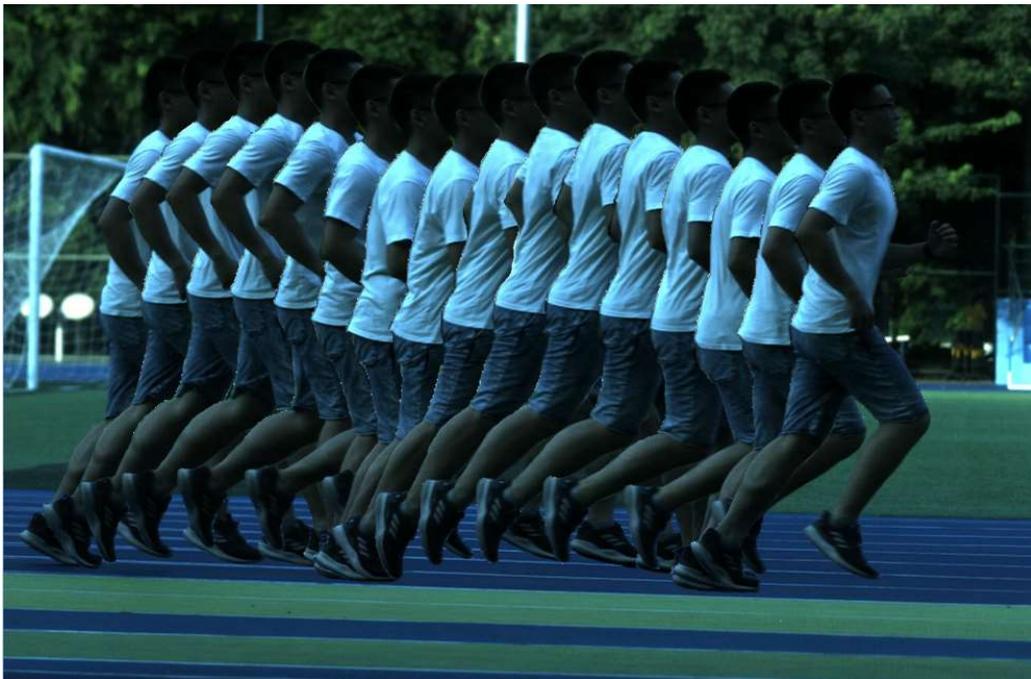


图 8. 跑者一个步态周期的连续影像

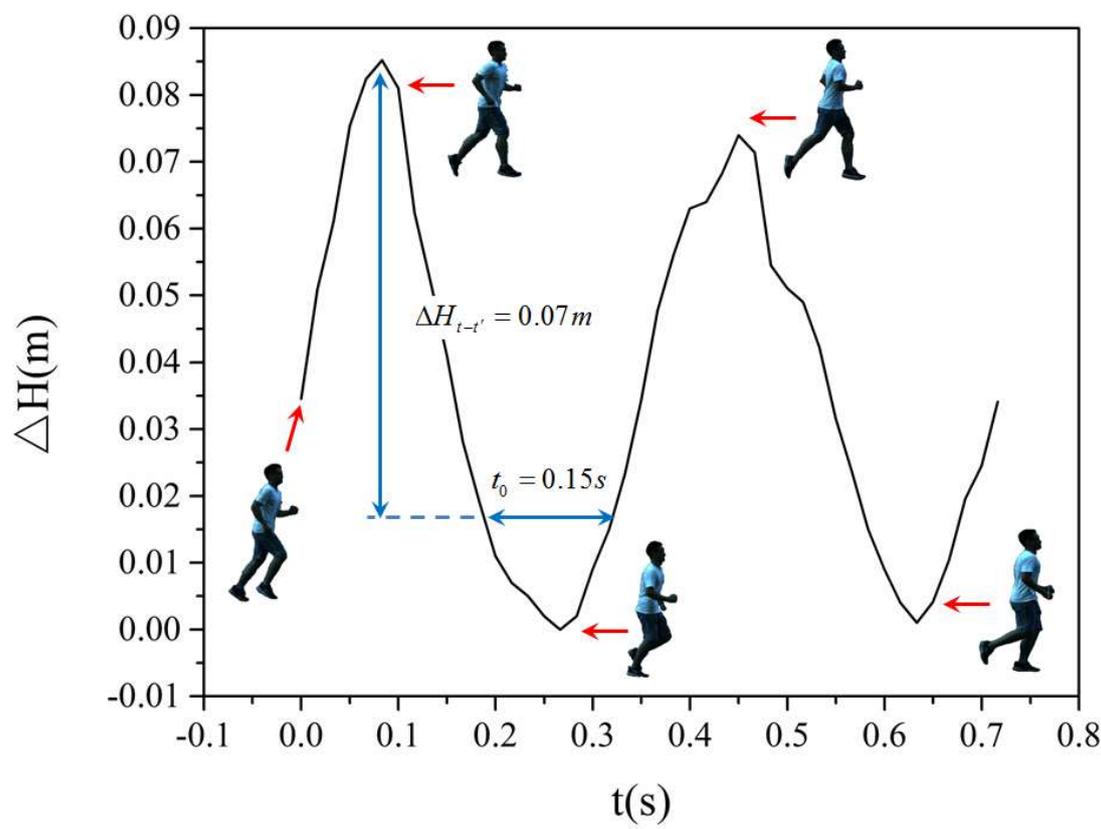


图 9. 重心高度变化量-时间曲线

### 3. 足底压力同步测量与分析

采用合肥威科电子有限公司开发的 FSR402 足底压力同步测试系统（如图 10），测量跑步时跑者足底的真实荷载。8 个压力传感器集成在柔性 PCB 上，分布在脚底与地面主要发生接触的点上。通过数据采集模块，将实时的压力数据点对点以无线传输的方式传至上位机，采样频率为 100Hz。通过这套系统可以实时地将足底荷载显示并记录在电脑上，图 11 为第 2.2 节中跑步志愿者脚底各个传感器记录到的  $F-t$  图。

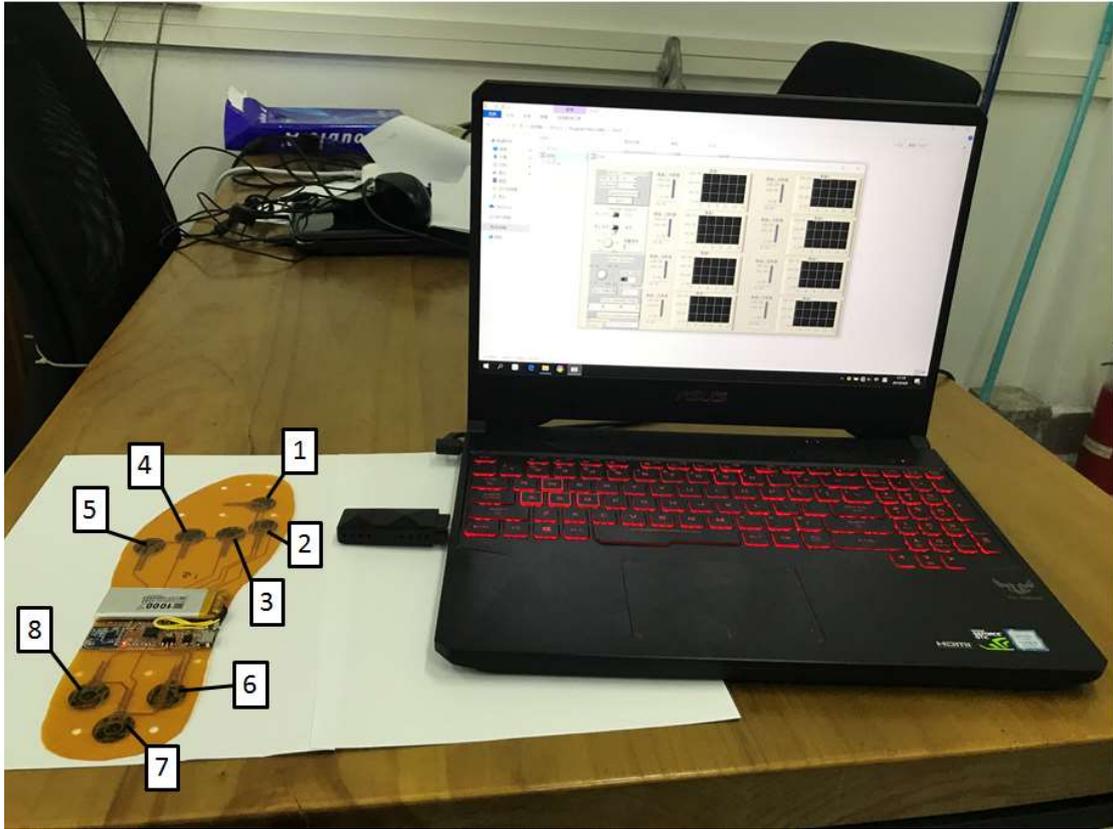


图 10. 足底压力测试系统

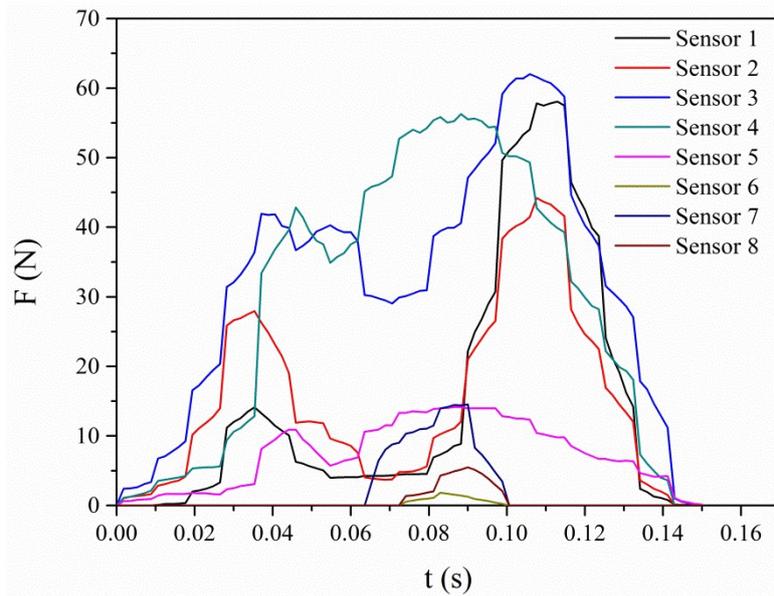


图 11. 某测试跑者的各个传感器数据得到的  $F-t$  图

为简化计算, 假设跑者在跑步过程中, 脚底与地面接触部分的压强是均匀分布的, 因此可使用 8 个测点测得的应力平均值作为脚底与地面接触部分的压强。由于我们在测试过程中发现, 大部分跑者的跑步时可大致分为前脚掌着地—整个脚掌着地—后脚跟离地—前脚掌离地 4 个过程 (见图 8), 这种步态能对踝关节

压力和脚跟筋腱拉力起到一定的缓冲作用。为了简化分析, 这里不讨论前后脚掌先后落地的问题, 仅讨论跑者前脚掌先着地的情况。当前脚掌落地时, 可认为跑者脚底与地面接触部分面积为脚底面积的 1/2, 整个脚掌着地时接触部分面积为整个脚底面积, 因此实测脚底总压力可表示为:

$$F_{\text{实测}} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i \cdot S(t)}{nS_{\text{测点}}}, \text{ 并且 } S(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}S_{\text{脚}}, & \text{前脚掌着地} \\ S_{\text{脚}}, & \text{整个脚掌着地} \end{cases} \quad (10)$$

其中  $n$  为具有非零压力值的传感器个数,  $S_{\text{脚}}$  为脚底面积,  $S_{\text{测点}} = \pi r^2$ ,  $r$  为圆形传感器半径 0.01m。

图 12 为采用上述方法得到跑步志愿者的  $F_{\text{实测}} - t$  图, 该图右侧坐标为体重的倍数, 与文献[6]的结果 (图 13) 比较发现, 本测试得到的曲线图与文献中的曲线图趋势基本吻合, 验证了计算方法和模型的可靠性。

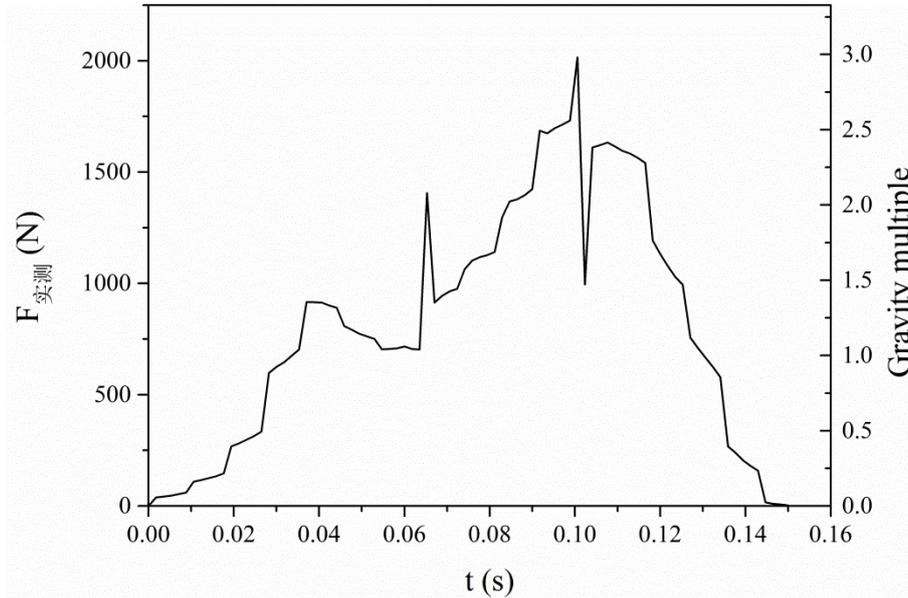


图 12. 某跑步志愿者的  $F_{\text{实测}} - t$  图

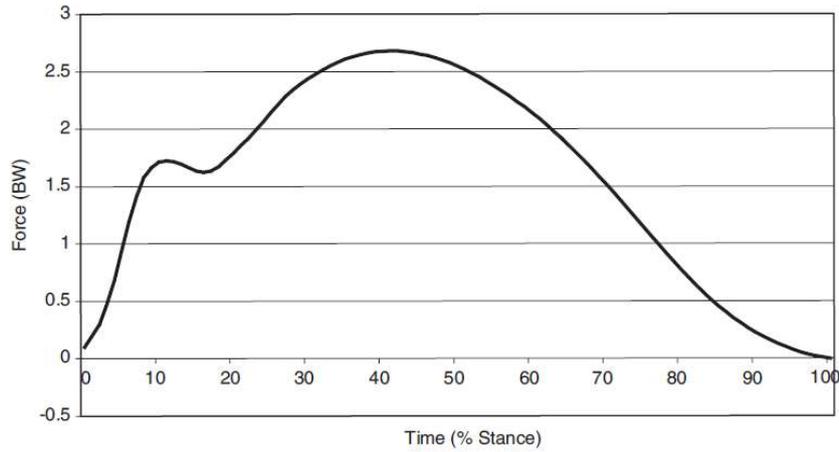


图 13. 典型的跑者垂直地面方向作用力随时间变化图，纵坐标(BW)为体重倍数<sup>[6]</sup>

将图 12 得到的曲线图积分即可得到该跑者测试过程中冲量随时间的变化：

$$I = \int F_{\text{实测}} dt \quad (11)$$

由式(11)得到的  $I-t$  图如图 14 所示。对比第 2 节得到的理论结果（图 14 中的红线数据）可以发现，测试结果与理论结果的绝对误差为  $26.32\text{kg}\cdot\text{m/s}$ 。考虑到测量足底压力和分析重心变化过程中存在一定的误差，因此有理由认为这个测试误差是在合理范围内，可依据此测试结果和理论模型进行进一步分析。

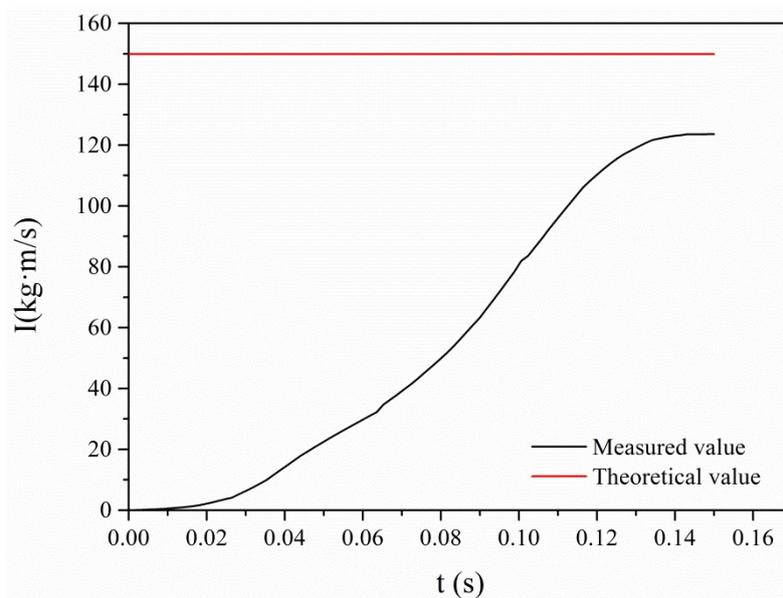


图 14. 实测所得的  $I-t$  图与理论值比较

根据参考文献[6]可知，运动过程中足底压力、作用频率对长时间运动受伤风险大致满足如图 15 的关系。足部受到的应力（stress）超过一定的值，运动损伤将在较少的运动次数（或者跑步里程）中出现；足部受到的应力（stress）越

小, 运动员进入“受伤区域”前可以进行的运动次数(或跑步里程)就越大。更有甚者, 当应力水平在曲线的水平渐近线以下时, 运动损伤几乎不会发生。然而对于多大应力为安全极限, 医学和生物力学界尚未有相关的研究成果。因此不妨假设长期跑步产生足底筋膜炎的疲劳极限为  $\sigma = 188.9\text{kPa}$ , 该数值是通过参考于海滨等<sup>[7]</sup>对 20km 长跑后的足跟压强除以安全系数 1.2 得到。

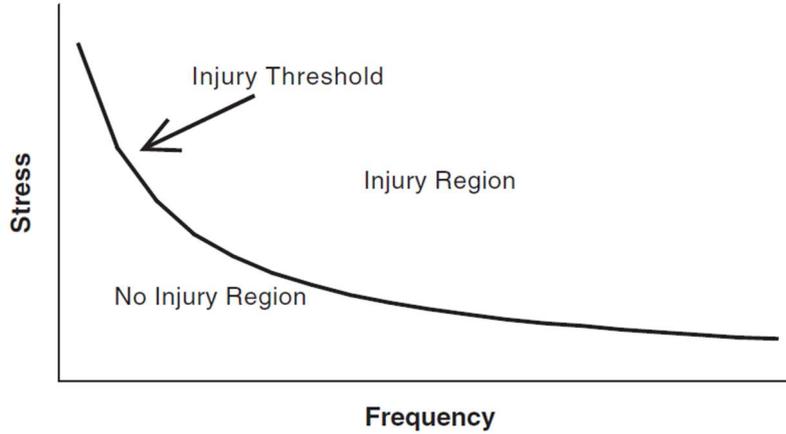


图 15. 足底应力与频率对长时间运动受伤风险评估曲线<sup>[6]</sup>

基于式 (7) 得到的足底压力, 可计算足底平均应力。由于式 (7) 是对整个冲击过程简化得到的足底载荷, 且脚底与地面接触过程中主要是前脚掌承载, 整个脚掌着地的时间和压力峰值都比较小, 因此这里忽略整个脚掌着地时带来的冲量, 计算足底应力时, 接触面积只取脚底面积的一半, 即:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{2m}{S_{\text{脚}}} \left[ \frac{2\sqrt{2g\Delta H_{t-t'}}}{t_0} + g \right] \quad (12)$$

仍然以典型跑步志愿者为例, 其体重为 69kg, 脚掌离开地面到脚掌接触地面并且重心达到最低点的时间约为 0.3s(见图 9), 因此选取  $t_0 = 0.1s, 0.15s, 0.2s, 0.25s, 0.3s$  五种情况进行计算, 得到足底应力  $p$  随重心高度  $\Delta H_{t-t'}$  的变化曲线, 如图 16 所示。

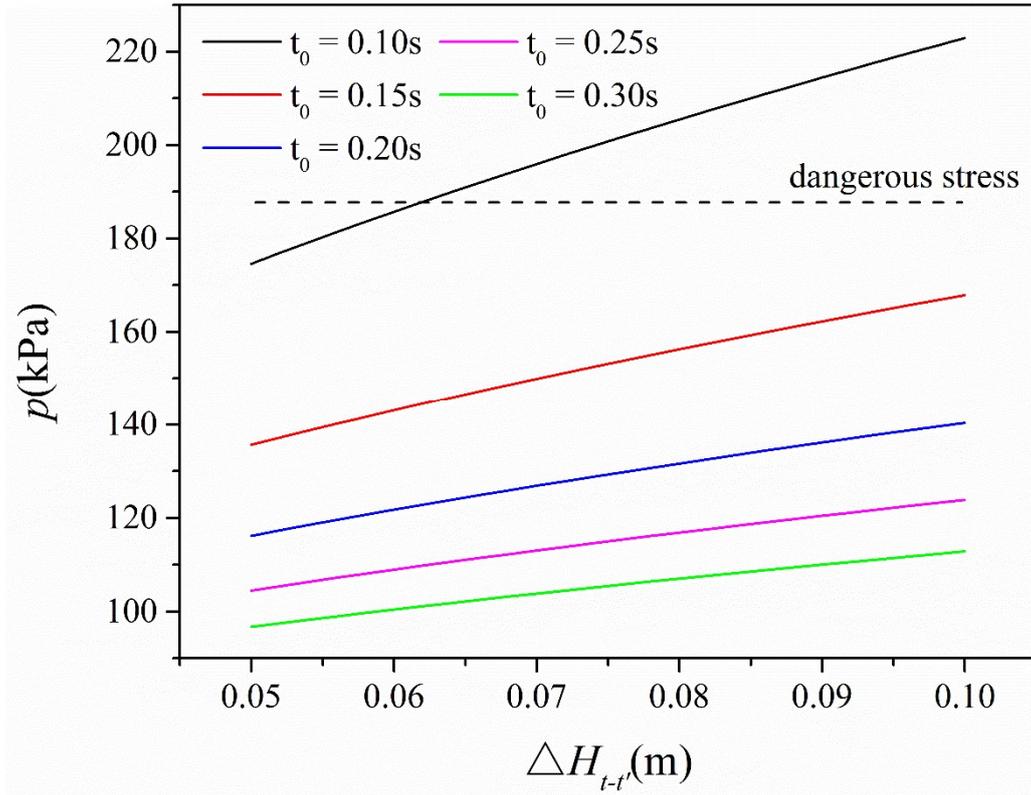


图 16.  $p - \Delta H_{t-t'}$  曲线

从曲线中可以看出, 无论  $t_0$  取何值, 足底应力  $p$  都随着  $\Delta H_{t-t'}$  缓慢增大, 且当  $t_0$  取较小值时增幅较大。一般地, 当  $t_0$  大于等于 0.15s 时 (普通慢跑者), 曲线整体都在危险压力值之下, 对于这些跑者不需要担心因长跑引发足底筋膜炎; 当  $t_0$  接近 0.10s 时 (竞技型跑者), 有一定概率会出现足底应力大于危险疲劳极限的情况, 对于这类人群应适当调整步态, 时常注意跑步时足底的健康状况。

典型跑步志愿者在跑步过程中重心最大起伏幅度约为 8~9cm, 因此选取  $\Delta H_{t-t'} = 6\text{ cm}, 7\text{ cm}, 8\text{ cm}, 9\text{ cm}, 10\text{ cm}$  五种情况, 得到足底应力  $p$  随脚底接触地面时间  $t_0$  的变化曲线, 如图 17 所示。

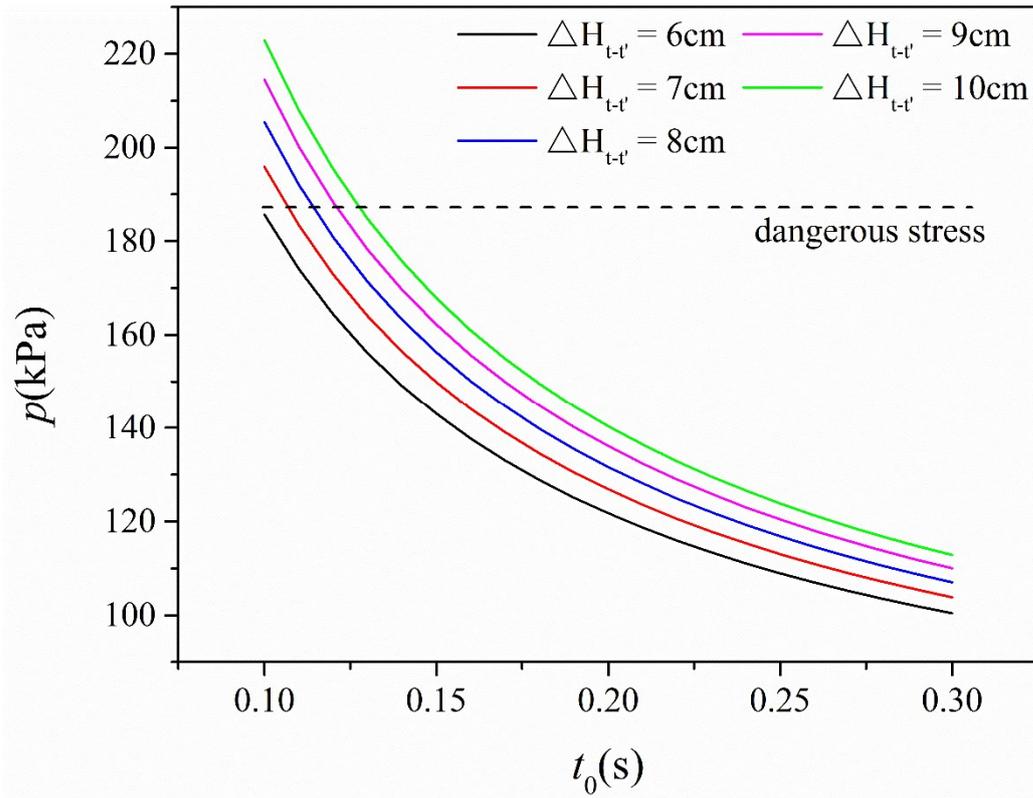


图 17.  $p-t_0$  曲线

从曲线中可以看出, 无论重心起伏幅度  $\Delta H_{t-t'}$  取何值, 足底应力  $p$  都随着  $t_0$  急剧减小, 表明脚底与地面的接触时间对足底应力的影响很大。且当  $\Delta H_{t-t'}$  取不同值时, 曲线族的间距比较小, 表明重心高度变化对足底压力的影响相对较小。

通过图 16、图 17, 可以进行跑步者是否适合长期跑步的评估, 在测得跑者质量的基础上, 采用高速摄影系统和足底压力测试系统, 获取跑者一个步态周期跑者的姿态图像及足底应力变化数据, 通过图像处理得到跑者的重心起伏幅度  $\Delta H_{t-t'}$  和脚底与地面的接触时间  $t_0$ , 计算足底应力, 在与足底压力测试系统测得的数据进行比较验证后, 与长跑者容易出现损伤的足底应力疲劳极限比较, 判断跑者是否需要改变速度、步态等跑步习惯, 以减少足底筋膜炎的风险、减少长期跑步对足部的伤害。

## 4. 结论

本文针对跑步者的个体特征和跑步习惯对足部力学响应开展了研究, 首先进行了跑步群体现状及运动损伤调查, 获得了一手的调研数据。基于能量守恒和动量定理, 建立了跑者体重、重心最大滞空高度、脚底与跑道的接触时间和跑者足部所荷载荷间关系的理论模型。采用高速摄影技术捕捉跑者的步态特征, 通过足底压力实时测试系统测得了跑者足底所受的真实压力。建立了足底应力与重心起伏幅度、脚底离地时间的关系曲线, 提出了判定跑步者是否适合长跑运动的分析方法和判断标准, 并从降低足底荷载角度对跑步者具体的步态特征和跑步习惯提出了建议。具体结论如下:

(1) 在接受“跑步群体现状及运动损伤调查”的 850 人中, 54%是跑步爱好者, 但大多没有固定的跑步频率, 且没有或仅偶尔进行跑前热身运动的占 66%, 这大大加大了跑步受伤的风险。

(2) 通过高速摄影技术拍摄跑者跑步过程中的跑步姿态图像, 并借助图像处理技术分析跑者的重心变化是可行的, 计算得到的重心高度随时间的变化曲线真实反映了跑者的跑步状态, 可用于后面的深入分析。

(3) 基于能量守恒定律和动量定理推导得到的足底载荷与跑者质量、重心起伏幅度和脚底与跑道的接触时间之间的模型, 与现场测试的结果较为吻合, 验证了该简化模型的正确性。

(4) 采用足底压力实时测试系统可同步获取跑者足底关键测点的压力数据, 结合高速摄影系统测试及图像处理结果, 可建立足底应力与重心起伏幅度、脚底离地时间的实测关系曲线。

(5) 基于生物力学中压力施加与频率对长时间运动受伤风险评估曲线, 并依据设定的长期跑步产生损伤的足底应力疲劳极限, 可通过高速摄影系统和足底压力实时测试系统获取的数据、理论模型的计算结果, 进行跑步者是否适合长期跑步的评估, 并提出跑步速度和步态的改进建议。

## 参考文献

- [1] Ribeiro A.D., et al. Dynamic patterns of forces and loading rate in runners with unilateral plantar fasciitis: A cross-sectional study[J]. Plos One. 2015,10(9):1-9.
- [2] [http://www.360doc.com/content/18/0905/16/58393640\\_784131964.shtml](http://www.360doc.com/content/18/0905/16/58393640_784131964.shtml).
- [3] 郭雪莹. 长跑爱好者足部形态及足底压力变化恢复特征研究[D]. 北京体育大学. 2019.
- [4] 赵西西. 马拉松跑步状态下肢骨骼肌肉系统的防护研究与产品开发[D]. 上海工程技术大学. 2015.
- [5] 霍长娟. 基于视频的人体运动姿态分析与重建[D]. 天津理工大学. 2008.
- [6] Alan Hreljac. Etiology, prevention, and early intervention of overuse injuries in runners: a biomechanical perspective. Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America[J]. 2005(16):651-667.
- [7] 于海滨, 曾全寿, 郑志艺, 潘紫晓, 杨礼. 持续 20 km 跑步中足底压强变化与主观舒适评分的关系[J]. 北京体育大学学报. 2018,41(6):70-75.

## 致谢

值此论文完成之际,感谢华南师范大学附属中学的教育激发了我的批判思维和创新思维,感谢申西芬老师和吴玖丹老师在论文选题和研究思路上的指导和帮助, 特别感谢申老师在足底载荷-时间曲线积分的教导、吴老师在基于能量守恒定律和动量定理推导理论模型中的指导。感谢华南理工大学土木与交通学院汤立群教授课题组给予的帮助, 特别感谢马东鹏、卢昭明博士在足底压力同步测试系统、高速摄影系统使用上的指导, 感谢李浩祖、李新华、张舸等博士、硕士哥哥姐姐充当本研究的跑步志愿者。



图 18. 现场测试小组合照 (左起: 李浩祖硕士、马东鹏博士、作者、  
卢昭明博士、李新华硕士)

## 学术诚信声明

本参赛团队声明所提交的论文是在指导老师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。尽本团队所知, 除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外, 论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。若有不实之处, 本人愿意承担一切相关责任。

参赛队员: 刘蕾

指导教师: 申西芬 吴淑丹