



不同年龄健康人平地行走时足底压力对比分析

乔 刚, 张建国, 刘合荣
(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

摘 要: 针对年龄因素对成年人平地自然行走时足底压力的影响进行研究. 采用三维测力台系统, 对 20 名不同年龄段的健康成年人在平地自然行走时的地面反力进行数据采集, 经归一化处理后得到足底压力在前后、左右、竖直 3 个方向上的力-时间曲线图, 运用统计学方法对步态特征量进行统计分析, 把不同年龄段人平地自然行走时的足底压力分布进行对比分析. 结果表明, 不同年龄段人在平地自然行走时的足底压力分布存在一定程度上的差异性: 老年组在竖直方向和前后方向上的步态时间参量要小于青年组, 这可能是由于老年人行走时步长较小, 使得身体重心经过髋关节的时刻要早于青年人.

关键词: 年龄; 平地自然行走; 足底压力

中图分类号: R318 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2012)03-0055-05

Comparative Analysis of Plantar Pressure in Normal People of Different Age During Level Walking

QIAO Gang, ZHANG Jianguo, LIU Herong
(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: To investigate the influence of age on plantar pressure in normal people during level walking, ground reaction force data from 20 normal people of different age were collected through the employment of three-dimensional force platform system, and the force data in anterior-posterior, medio-lateral and vertical directions were normalized and transformed into force-time curves. Characteristic parameters were selected and analyzed by using statistical methods. The plantar pressure in normal people of different age was comparatively analyzed. Results show that a certain degree of difference was found in the plantar pressure distribution in normal people of different age during level walking: for the old group, the time parameters of gait in vertical and anterior-posterior direction came earlier than those in the young group. It may be due to the fact that the step length of the old person is smaller than that of the young person and the gravity center of the body crosses the hip earlier in the old group than in the young group.

Key words: age; natural level walking; plantar pressure

行走是人们日常生活中重复最多的一种动作, 而正常行走又是人们日常生活活动的重要组成部分, 对行走异常患者的行走能力进行改善和恢复是康复医学的一项重要内容. 可见, 正常行走在人们日常生活中具有十分重要的意义, 对于老年人来说更是如此. 但随着年龄的增长, 人体在行走过程中存在着行走晃动不稳、关节运动幅度减小以及韧带弹性下降等现象^[1]. 前人的研究^[2]表明, 老年人的摔倒中有约 53% 是由于行走或站立的不稳定造成的, 而摔倒又会

引发其他疾病, 给老年人带来极大的痛苦, 同时给家庭和社会带来巨大的负担. 因此, 就不同年龄段人体自然行走时的足底压力分布进行研究是十分必要的.

有关足底压力的研究, 国外起步较早^[3]: Carlet 于 1872 年设计了一个鞋底充气袋, 记录了人体行走时的足-地作用力; Elftman 使用自行设计的测力板对作用于人体足上的动力学参数进行了精确的测量. 从 20 世纪 80 年代开始, 对足底压力的研究才在国内受到重视. 1986 年, 戴尅戎等^[4]使用微机步态分

收稿日期: 2012-01-05; 修回日期: 2012-02-25

基金项目: 天津市应用基础及前沿技术计划(10JCZDJC23000)

作者简介: 乔 刚 (1985—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生; 通信作者: 张建国, 教授, tustzjg@163.com.

析系统对 41 名正常人平地行走过程中足-地接触力进行了三维分析. 1999 年, 伍颢等^[5]使用三维测力台系统对人体行走过程中的足-地接触力进行了记录和分析. 目前国内在人体足底压力研究领域, 仍处于模仿国外研究的阶段, 而且在研究的细致程度上也相对落后.

本文从分析足底压力的角度, 对不同年龄段健康成年人在平地自然行走时的足底压力进行数据采样, 并进行对比分析, 针对年龄因素对人体自然行走时足底压力的影响进行研究.

1 实验方法

1.1 测试对象

测试对象根据年龄的不同分为青年组和老年组, 每个组均为 5 名男性和 5 名女性, 青年组年龄范围为 20~24 岁, 平均年龄为 22 岁, 平均身高为 (175.7 ± 2.3) cm, 平均体质量为 (65.8 ± 2.1) kg; 老年组年龄范围为 61~65 岁, 平均年龄为 63 岁, 平均身高为 (172.3 ± 1.7) cm, 平均体质量为 (71.8 ± 1.4) kg. 所有测试对象均为身体健康、行动正常、无运动系统病史的成年人. 在实验进行之前, 由实验人员告知受试者实验目的及实验方案, 所有受试者均对本实验知情并同意, 自愿参加本实验.

1.2 实验方法

1.2.1 实验环境

实验环境主要包括实验走廊和实验设备.

实验走廊由步道和测力平台组成, 其中测力平台放置于实验走廊的中心位置, 平台的前后各放置一块与测力平台等高平齐的步道, 其尺寸为 $3\ 800\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 60\text{ mm}$. 实验走廊如图 1 所示.

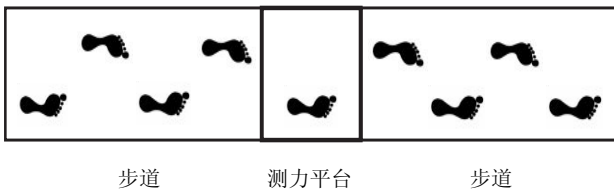


图 1 实验走廊示意图

Fig. 1 Sketch map of walkway

实验设备主要包括计算机、三维测力台系统等. 采用 JP6060 型三维测力台系统采集足底压力数据, 该系统由测力台采集系统(即测力平台)、信号处理系统和数据分析系统组成. 测力平台的尺寸为 $600\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 60\text{ mm}$, 采样频率为 300 Hz, 静

态检测误差小于 0.5%, 根据实际需要可以调整检测量程. 信号处理系统和数据分析系统可以实现对数据的即时处理.

1.2.2 实验过程

测试对象赤脚以正常步态自然走过测力平台, 即受试者以自己惯常的行走速度从一侧步道的始端开始行走, 经过测力平台, 行走至另一侧步道远端为止. 在经过测力平台时, 须保证单脚完整地踩在台面上以获得左脚或右脚的完整的足底压力数据.

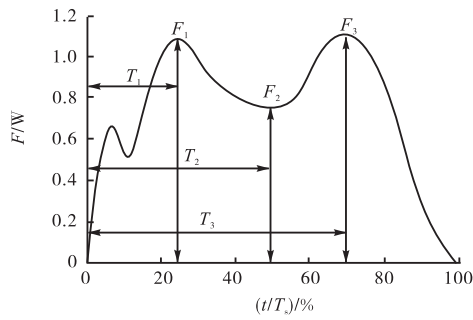
为了确保能够得到稳定可靠的实验数据, 在开始正式的测试之前, 要求测试对象按照实验要求先练习 15 min, 然后进行实验. 开始实验之后, 针对每一位测试对象的左脚和右脚分别进行 10 次测试, 并记录数据. 这 10 次测试所得到的数据可以认为是稳定可靠的数据^[6].

1.3 数据处理方法

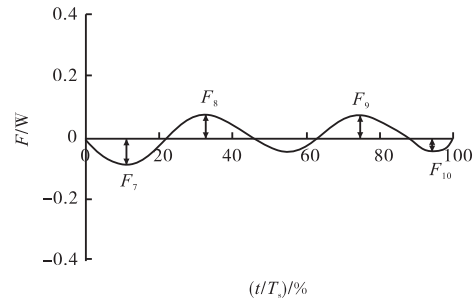
由测力平台可以测得人体行走过程中在 3 个方向上的地面反力, 即 Y 方向(前后方向), X 方向(左右方向)和 Z 方向上(竖直方向)的地面反力. 为了消除测试对象个体之间的差异, 对由测力平台测得的 3 个方向上的地面反力数据进行归一化处理: 力学数据由测试对象的自身重力归一化得到, 时间数据需经过测试对象的单脚单支撑相归一化得到. 单脚单支撑相是指从左脚或右脚的脚跟接触测力平台开始直至该脚脚尖蹬离测力平台的这段时间.

3 个方向上的力学数据和时间数据经归一化处理后拟合得到测试对象足底压力的力-时间曲线如图 2 所示. 图 2 中的 X 轴为归一化时间, 即 t/T_s (T_s 为单脚单支撑相), Y 轴为归一化压力值, 即 F/W (W 为测试对象自身重力).

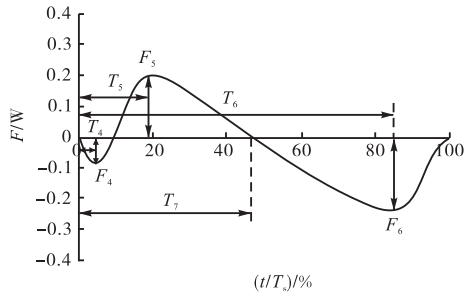
提取 17 个特征量作为步态参数进行统计学分析: 其中, 前后方向的力-时间曲线上提取 7 个特征量, 左右方向的力-时间曲线上提取 4 个特征量, 竖直方向的力-时间曲线上提取 6 个特征量, 各个特征量的含义如图 2 所示. 针对所得到的数据, 即每个测试对象的上述 17 个参数的 10 次左脚数据和 10 次右脚数据作为分析样本, 建立数据库, 进行统计分析. 采用 T 检验的方法对青年组和老年组的 17 个步态特征量进行差异性分析, 针对每一个特征量, 把青年组和老年组的数据进行配对检验, 当 $P < 0.05$ 时, 说明青年组和老年组的足底压力分布存在显著性差异, 当 $P > 0.05$ 时, 说明青年组和老年组的足底压力分布不存在显著性差异^[7-9].



(a) Z方向上的分力



(c) X方向上的分力



(b) Y方向上的分力

图2 行走过程中地面反力在3个方向上的分力

Fig. 2 Three dimensional ground reaction forces during level walking

2 实验结果与数据分析

2.1 实验结果

在对青年组样本和老年组样本平地自然行走时的足底压力数据进行统计后得到的结果见表1—表3.

表1 Z方向的力-时间曲线图6个特征量的统计结果

Tab. 1 Statistic results of the six parameters from vertical force-time curve

特征量	青年组		老年组	
	左脚	右脚	左脚	右脚
F_1	1.08 ± 0.12	1.07 ± 0.07	1.05 ± 0.08	1.06 ± 0.23
F_2	0.86 ± 0.07	0.85 ± 0.12	0.84 ± 0.19	0.84 ± 0.32
F_3	1.11 ± 0.25	1.12 ± 0.28	1.09 ± 0.31	1.08 ± 0.43
$T_1/\%$	25.4 ± 1.6	25.8 ± 3.6	$24.2 \pm 2.3^\square$	$25.3 \pm 1.6^\blacktriangle$
$T_2/\%$	46.7 ± 2.1	45.9 ± 1.3	45.1 ± 1.8	44.2 ± 2.1
$T_3/\%$	75.2 ± 3.5	76.5 ± 3.1	$72.8 \pm 2.7^\square$	$74.5 \pm 3.9^\blacktriangle$

注: $^\square$ 与 $^\blacktriangle$ 分别表明青年组和老年组左脚、右脚对应特征量存在显著性差异($P < 0.05$) (下同).

表2 Y方向的力-时间曲线图7个特征量的统计结果

Tab. 2 Statistic results of the seven parameters from antero-posterior force-time curve

特征量	青年组		老年组	
	左脚	右脚	左脚	右脚
F_4	-0.08 ± 0.02	-0.07 ± 0.09	-0.07 ± 0.03	-0.07 ± 0.10
F_5	0.17 ± 0.04	0.18 ± 0.13	0.18 ± 0.07	0.16 ± 0.12
F_6	-0.23 ± 0.02	-0.22 ± 0.11	-0.24 ± 0.05	-0.23 ± 0.08
$T_4/\%$	4.6 ± 1.2	4.5 ± 2.1	4.2 ± 0.8	4.3 ± 1.4
$T_5/\%$	18.3 ± 1.4	18.0 ± 0.5	17.8 ± 1.7	17.6 ± 2.3
$T_6/\%$	84.1 ± 2.1	84.3 ± 1.6	83.2 ± 1.4	83.8 ± 3.2
$T_7/\%$	45.0 ± 2.6	44.8 ± 0.9	$43.2 \pm 1.4^\square$	$44.6 \pm 2.7^\blacktriangle$

表3 X方向的力-时间曲线图4个特征量的统计结果

Tab. 3 Statistic results of the four parameters from medio-lateral force-time curve

特征量	青年组		老年组	
	左脚	右脚	左脚	右脚
F_7	-0.05 ± 0.13	-0.05 ± 0.08	-0.08 ± 0.16	-0.08 ± 0.04
F_8	0.06 ± 0.17	0.07 ± 0.12	0.07 ± 0.14	0.08 ± 0.21
F_9	0.05 ± 0.12	0.05 ± 0.24	0.06 ± 0.08	0.07 ± 0.32
F_{10}	-0.03 ± 0.04	-0.03 ± 0.18	-0.04 ± 0.13	-0.04 ± 0.07

2.2 数据分析

2.2.1 Z方向数据分析

Z方向上的分力是足底压力的主要组成部分. 正常行走时, 一侧足跟着地至该侧足跟再次着地称为一个步态周期. 一个步态周期可分为6个转折点. 以下肢起步为例: 左足跟着地、左足放平、左足趾离地、右足跟着地、右足放平、右足趾离地分别为6个转折点^[10]. 在一个完整的步态周期中, Z方向上的分力在每一转折点处均有一极值存在, 即一侧足跟着地时存在一极大值 F_1 , 随着该侧足部放平, 受力逐渐减小, 直至该侧足部完全放平时, 受力达到一极小值 F_2 , 然后该侧足跟离地, 至该侧足趾离地时又达到一极大值 F_3 , 由此可以看出Z方向上的受力曲线具有典型的双峰特征. 左、右脚受力曲线的最大峰值约为重力的1.1倍, 最小峰值约为重力的0.85倍.

2.2.2 Y方向数据分析

Y方向上的力-时间曲线基本上是对称分布的, 有一个正的极大值和两个负的极小值, 正的极大值约为重力的17%, 出现在单支撑相的18%处; 两个负的极小值约为重力的7%和23%, 分别出现在单支撑相的4%和84%处. 由于Y方向的正向与步行方向相反, 所以在测试对象向前行进时, 也就是在支撑相早期, 由于在支撑足和地面之间产生的向后水平摩擦力, 使得Y方向力为负; 在支撑足全部落地并主动蹬离地面时, 由肌肉产生的力向后推地面, 在支撑足和地面之间产生向前的水平摩擦力, 这时Y方向力为正^[11].

2.2.3 X方向数据分析

X方向以步行方向右侧为正向, 在X方向的力-时间曲线基本对称且数值很小, 最大值约为重力的7%. X方向受力反映了行走时步态稳定性状况, 正常人行走时X方向受力较小, 这说明正常人行走的稳定性好^[12].

由以上分析可见, 正常测试对象在测力台上行走时, 竖直方向即Z方向的地面反力数值较大, Y方向和X方向的地面反力数值均较小. Z方向的力-时间曲线具有明显的双峰形状, X、Y方向的力-时间曲线均关于时间轴对称. 而如果测试对象存在行走障碍, 其在测力台上行走时稳定性状况很差, 具体表现为力-时间曲线分布不均且与正常人受力曲线差别较大. 而且超出正常范围值越大, 其病情也越严重^[11].

2.2.4 差异性分析

采用T检验的方法对青年组和老年组样本在平地自然行走过程中X、Y、Z这3个方向上的步态特征

量分别进行差异性分析, 统计结果见表1—表3.

T检验结果表明, 在Z方向和Y方向上, 老年组样本的足底压力数据与青年组样本的数据相比, 存在一定程度上的差异性, 具体表现如下: Z方向上, 青年组和老年组的左、右脚足底压力数据在 T_1 和 T_3 处经T检验后均有 $P < 0.05$, 这表明无论是左脚还是右脚, 青年组样本和老年组样本在平地自然行走过程中竖直方向上的足底压力分布在 T_1 和 T_3 处存在显著性差异; Y方向上, 青年组样本和老年组样本的左、右脚足底压力数据在 T_7 处经T检验有 $P < 0.05$, 这表明无论是左脚还是右脚, 青年组样本和老年组样本在平地自然行走过程中Y方向上的足底压力分布在 T_7 处存在显著性差异.

需要指出的是, 在Z方向上, 无论是左脚数据还是右脚数据, 老年组样本步态力学参量 F_1 、 F_2 、 F_3 的数据均小于青年组样本的数据, 考虑可能与老年人步速较青年人慢有关; 对于步态时间参量 T_1 、 T_2 和 T_3 , 青年组样本的数据总是大于老年组样本的数据, 这可能是由于青年人行走时步长较大, 身体重心经过髋关节的时刻要晚于老年人^[13]. 此外, 在X方向上, 无论是左脚数据还是右脚数据, 对于步态力学参量 F_7 、 F_8 、 F_9 、 F_{10} , 老年组样本的数据均大于青年组样本的数据, 由于X方向受力反映了行走时步态稳定性状况, 青年组样本行走时在X方向的受力较小, 这表明青年人行走时的稳定性较好.

3 结 论

身体健康、行动正常的老年人在常速自然行走时的足底压力分布与青年人相比并没有显著性的差异, 只是身体重心经过髋关节的时刻要比青年人早一些, 使得老年人行走时的步态时间参量要比青年人小一些.

参考文献:

- [1] 赵芳, 周兴龙. 老年人站立及行走稳定性的生物力学研究[J]. 北京体育大学学报, 2003, 26(2): 188-191.
- [2] 肖美痕. 老年人常速行走与快速行走特征的生物力学分析[D]. 北京: 北京体育大学, 2004.
- [3] 孟殿怀, 励建安. 临床三维步态分析系统的组成、原理及其临床应用[C]//首届实用康复医学论坛论文集. 2006: 292-297.
- [4] 赵芳. 老年人步态特征的分析及其评价系统的初步建立[D]. 北京: 北京体育大学, 2002: 3.

- [5] 伍颢,陆爱云,庞军. 健康老年人常速行走的步态分析[J]. 上海体育学院学报,2000,24(2):19-21.
- [6] Joseph Hamill, Mcniven S L. Reliability of selected ground reaction force parameters during walking[J]. Human Movement Science, 1990, 9(2): 117-131.
- [7] 全国统计方法应用标准化技术委员会. 数据的统计处理和解释[M]. 杭州:浙江大学出版社,1991:24.
- [8] White R, Agouris I, Selbie R D, et al. The variability of force platform data in normal and cerebral palsy gait[J]. Clinical Biomechanics, 1999, 14(3): 185-192.
- [9] Simpson K J, Jiang P. Foot landing position during gait influences ground reaction forces[J]. Clinical Biomechanics, 1999, 14(6): 396-402.
- [10] 张潇,卢世璧. 人体步态分析系统子系统:测力台系统及其临床应用[J]. 中国生物医学工程学报,1998,17(4):358-366.
- [11] 李爱萍,胡军,刘合荣. 基于三维测力台系统的人体步态分析[J]. 微计算机信息,2010,26(5-1):226-228.
- [12] 张潇,卢世璧,陆文莲,等. 人体步态分析系统的研制及其在临床骨科的应用[J]. 生物医学工程与临床,1997,1(1):34-41.
- [13] Charnley J, Pusso R. The recording and the analysis of gait in relation to the surgery of the hip joint[J]. Clinical Orthopaedics and Related Research, 1968, 58: 153-164.

责任编辑:常涛

(上接第54页)

3 结 论

(1)在污泥臭氧氧化的过程中,有机物的增溶会随着臭氧投加量的增加而增加,逐渐趋于平缓;臭氧投加量和 MLSS 减少量、MLVSS 减少量有相似的规律.

(2)在相同臭氧投加量下,作用时间为 30 min 的污泥破解效果最佳. 通过实验表明间断高浓度投加臭氧比连续低浓度投加臭氧破解污泥的效果好.

(3)在臭氧投加量较低时,氨氮和总磷的浓度增加量极小,而当投加量大于 0.15 g/g MLSS 时,氨氮和总磷的浓度随着投加量的增大而明显增加.

(4)空气进气量是影响臭氧传质很重要的因素,进气量越大破解效果越好,在进气量为 2.0 L/min 的条件下,臭氧氧化破解污泥效果最佳.

(5)在进气量为 2.0 L/min 的条件下,最佳投放量为 0.25 g/g 时,MLSS 减少量为 1.42 g/L,SCOD 的增加量为 626 mg/L, NH₃-N 和 TP 的增加量分别为

10.7、1.068 mg/L.

参考文献:

- [1] 曹国凭,林伟,李文洁. 城市污泥的处理方法及填埋技术的应用[J]. 水利科技与经济,2006,12(11):758-761.
- [2] 张义安,高定,陈同斌,等. 城市污泥不同处理处置方式的成本和效益分析:以北京市为例[J]. 生态环境,2006,15(2):234-238.
- [3] Muller J A. Prospects and problems of sludge pre-treatment processes [J]. Water Science and Technology, 2001,44(10):121-128.
- [4] Zhou H D, Smith D W. Ozone mass transfer in water and wastewater treatment: experimental observations using a 2D laser particle dynamics analyzer [J]. Water Research, 2000,34(3):909-921.
- [5] Lin S H, Wu C L. Removal of nitrogenous compounds from aqueous solution by ozonation and ion exchange [J]. Water Research, 1996,30(8):1851-1857.

责任编辑:周建军