

基于静电信号的人体步伐周期长程相关性研究

李鹏斐,李孟君,陈曦,唐凯

(北京理工大学机电学院,北京 100081)

摘要: 人的步伐信号包含着人体身体状态和健康状况等多种重要信息,因此受到越来越多的重视和研究.本文利用人体携带大量电荷这一特性,通过静电探测器对人体踏步过程中的步伐静电信号进行采集,研究人体步伐在时间尺度上的变化规律.论文提出一种自相关算法滤除信号中的噪声和干扰,通过相关系数确定步伐中的同相位点,从而获得精确步伐周期值.通过对步伐周期序列进行分解,得到步伐周期增量绝对值和变化符号两个序列,运用消除趋势波动分析对原始步伐周期序列及分解后的两个新序列进行分析,得到其长程相关性规律.通过对于实验所采集的多名测试对象的数据进行分析,发现对于所有被测人员,其步伐周期的增量绝对值序列均呈现出较强的持续正相关,而其周期变化符号呈现出明显的反相关特性.

关键词: 人体静电; 步伐周期; 消除趋势波动分析; 长程相关性

中图分类号: Q612 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)06-1078-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.06.006

Research on Long Range Characteristics of Human Gait Cycle Based on Electrostatic Signals

LI Peng-fei, LI Meng-jun, CHEN Xi, TANG Kai

(School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A variety researches have been done on gait signal in recent years, which contains abundant information of human physical condition and health status. We measured electrostatic gait signal of 6 young men by a novel electrostatic detector instead of accelerometer. The noise was filtered out using self-correlation algorithm to sink the same phase point in every gait and to obtain accurate gait cycle series. The gait cycle series were decomposed into two component series, magnitude series (absolute value of gait cycle increment) and sign series. The detrended fluctuation analysis algorithm was applied to analyze the original gait cycle series and two component series. It is found that the gait cycle series appears positive long range correlation. For the two component series, the magnitude series show strongly positive long range correlation, while the sign series show obviously long range anti-correlation characteristics for all the tested objects.

Key words: human electrostatic; gait cycle; detrended fluctuation analysis; long-range correlation

1 引言

随着社会发展人们对于自身健康状态及社会安全性给予越来越多的关注,而科学技术的进步使得人们可以利用各种便携设备和应用程序方便快捷地对自身的健康状况以及身份信息进行监测^[1].作为人们生活中必不可少的一项活动,行走时的步态和步伐规律虽然受到不同个体身高、体重、走路习惯等因素的影响,但同时也隐藏着丰富的个人身体状态和健康状况的信息^[2,3].所

以,最近几十年人体步伐特征和规律越来越受到研究人员关注^[4].

目前关于人体步伐的研究通常采用的方式是通过在测试对象身上佩戴加速度传感器,测量并记录目标人员在行进过程中的加速度信号,以获取其步态信号和步伐周期进行研究.这种方式因可将所测的加速度信号与腿部摆动直接联系起来而倍受青睐,大量的研究成果通过这种方式获得^[5].另一种经常被采用的方式是利用摄像机拍摄测试对象的行走过程,对人行走时的图像进行

“特征步态”分析^[6-8],直接研究目标人员的步伐规律.在其它一些研究中,文献[9]将人体行走时大腿和小腿的摆动作为钟摆进行建模,在频域中对这种摆动的个人特征进行研究;文献[10]利用步频、步长等步态基本的时空参数对人体目标进行识别.

本文利用人体在踏步过程中身体所带电荷量发生变化从而导致其周围电场随步伐发生相应改变的特性^[11],采用一种非接触式的静电探测器对测试对象的步伐信息进行测量记录,并基于探测器的输出信号对被测人员的步伐相关信息和规律进行研究.

2 人体静电特性分析

人无论处于何种环境,身体都会因为各种原因带有一定的电荷^[12].行走时脚步与地面的摩擦和接触分离是导致这种现象非常重要的一个原因.人在行走过程中,身体所带电荷量会随着步伐而改变,从而导致身体周围电场也会随着步伐节律做相应的变化^[13,14].

为了分析人体周围电场随步伐的变化规律,在文献[11]中对人体电场及其随步伐变化建立了等效模型.当人体处于某一环境中时,由于其所带静电,会与周围环境产生等效电容,包括人体双脚通过鞋底与大地直接耦合产生的电容 C_f 以及人体其他部位与周围环境形成的电容 C_{ri} ($i = 1, 2, \dots$),两者并联构成人体总电容(公式 1).人体等效电容如图 1 所示.

$$C_h = C_f + \sum_{i=1}^{\infty} C_{ri} \quad (1)$$

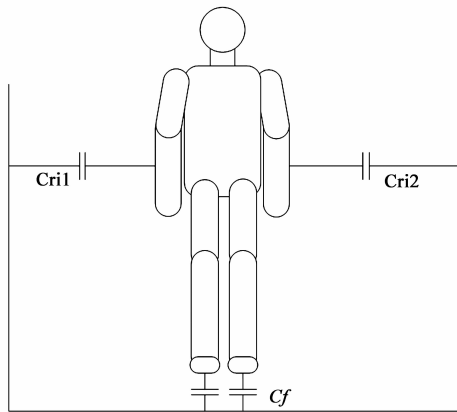


图1 人体等效电容示意图

设人体电荷量为 Q_B ,当人体运动时,双脚交替离开地面,此时与地面之间的电容 C_f 相当于在原有电容上串联一个随脚部离地高度变化的平行板电容器.

当人在同一地点进行脚部运动时人体与探测电极之间的等效电容 C_{ri} 可近似为常量,设定人体脚部原地运动时鞋底与地面间的等效面积为常量 S_0 .通过连接金属材料作为探测电极的静电探测器对人体周围的电场进行测量.探测电极上的感应电流可表示为:

$$I(t) \propto \frac{\pi f_a h_0 \sin 2\pi f_a t}{S_0} \quad (2)$$

其中, h_0 是脚部运动过程中鞋底离地的最大高度, f_a 是人体脚部运动的频率.

对式(2)中相关参数合理取值进行仿真,可得到感应电流值随时间变化规律,如图 2 所示.

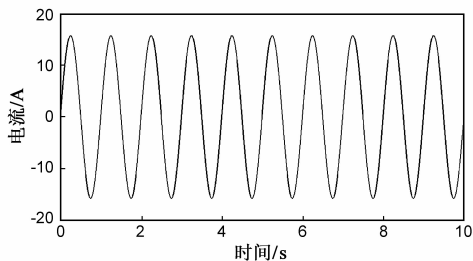


图2 模型所得感应电流随时间变化规律

3 步伐周期获取

由理论分析可知,人体步伐信号是一种周期信号,但实际上人行走时的步伐周期并非固定值,而是随时间变化的,本文主要对步伐周期的长时变化规律进行研究.为了得到行走时的静电信号,我们设计了一种测量电场强度变化率的静电探测器.这种探测器能够很好的测量行走导致的电场变化,同时过滤人体及周围环境电场对信号的干扰.

由于步伐周期的获取仅与人体步行信号的时间信息相关,因此,本文研究中用原地踏步的信号来代替步行的信号.搭建如图 3 所示的静电测量装置,将一个金属球固定在距地面 1m 高处作为对人体步伐静电信号进行获取的感应电极,探测电路放置于实验台上.在探测电极前 1m 处,测试对象以正常行走的速度进行踏步,探测电极所得信号经过信号处理后在示波器上进行显示并记录,踏步的实验模型如图 4 所示.

对于每名测试对象,在固定位置连续踏步 5 min,通过探测器采集此过程的步伐静电信号,采集到的静电信号如图 5(a)所示.

截取所得静电信号中的一段进行放大,如图 5(b)所示,将该波形与图 2 进行比较,实验数据与模型仿真结果具有很好的 consistency.本文将以实验所测得的信号为基础进行步伐周期长时规律的研究.

定义同一只脚相邻两次触地所用的时间为一个步伐周期.理论上其可通过踏步信号中电压峰值点的时间值来确定,但由于被测人员在踏步时自身静电的变化以及受周围环境的影响,所得踏步信号在峰值处波动较大(如图 5(b)所示),这使得我们无法直接通过峰值点获得精确的步伐周期.



图3 步伐静电信号测量装置

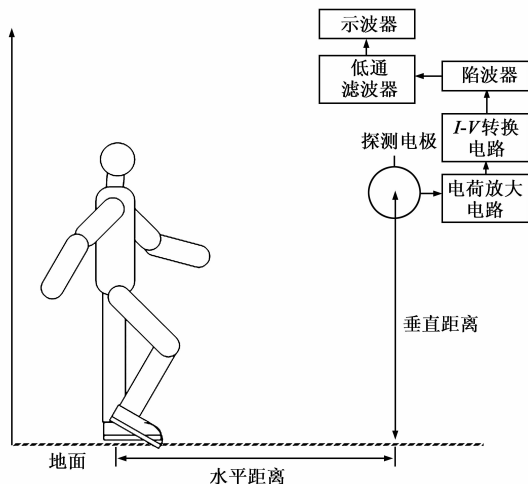
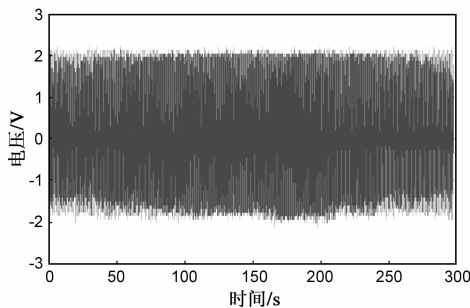


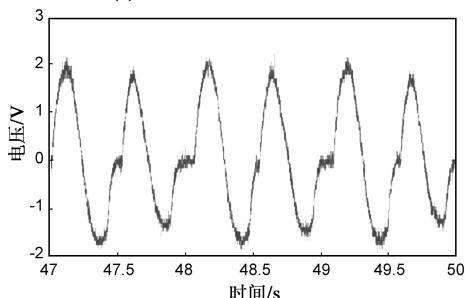
图4 实验人员踏步模型

为了得到准确的步伐周期,我们提出一种自相关算法,对所得到的踏步信号进行分析.选取所得踏步信号中峰值最大的一个波形为样本波形,分别以原始信号中等长度的任意一段波形与样本波形为相关序列,计算两者的相关系数.操作从计时起点开始,平移至计时终点,计算所得相关系数构成一个新的时间序列,如图6所示.进行相关性分析操作后,新序列波形平滑,原信号中峰值处的波动被消除且相关后序列与原踏步信号序列在时间坐标上并未发生变化,因此用该序列对步伐周期进行获取^[15].

通过比较相关性分析后新序列的每点与其前后点相关系数的大小,依次找到新序列中所有的峰值点,并对相隔一个峰值点进行标记(如图6中星号所示).通过计算相关系数的操作过程可知,星号所标记的点即对应相邻步伐的同相位点.利用相邻同相位点,即可计算每一步的步伐周期.



(a) 被测人员5分钟的步伐静电信号



(b) 放大后的步伐信号
图5 步伐静电信号

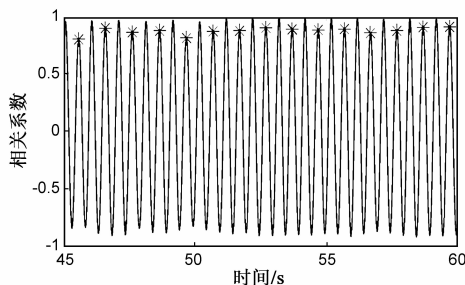


图6 相关系数序列

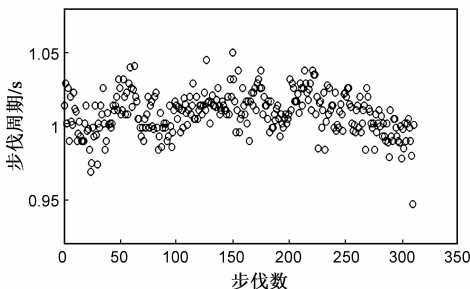


图7 步伐周期序列

4 步伐周期的长程相关性分析

4.1 步伐周期序列分析

在图7中,该被测人员的步伐周期在1s上下分布,为了分析非平稳信号中隐藏的步伐周期的变化规律,我们采用消除趋势波动分析算法(Detrended Fluctuation Analysis, DFA)对其进行分析. DFA^[16~19]是对随机步态经典均方根分析的改进,在生物信号分析领域被广泛采用,用来研究复杂变化信号中存在的内在规律.它的

主要思想是消除时间序列中自身演化的趋势成分,消除后剩下的是主要为波动成分的离差序列,该离差序列与原时间序列具有相同的长程相关性.其长程相关性通过波动函数进行描述,DFA 波动函数表示为:

$$F(n) = \left\{ \frac{1}{N_n} \sum_{v=1}^{N_n} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y((v-1)n+i) - Y_v(i))^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

其中, $Y(i)$ 为时间序列的累计离差, $Y_v(i)$ 为将时间序列分割后对子区间 v 进行数据拟合后的多项式.

在对时间序列进行不同长度分割时,所选取的分割区间长度取值范围不同会导致所得波动函数发生变化.分割区间长度较小时,每段分割区间所包含的数据较少,所得波动函数会产生较大偏差;分割区间长度较大时,分割区间数量较少,波动函数的统计特性不稳定.经过分析,选取分割区间长度范围为 $4 \leq n \leq N/8$ (N 为步伐周期序列长度,即总步伐数).按照 DFA 算法,分别计算区间内每个不同 n 值对应的波动函数值 $F(n)$.对图 7 中所示的步伐周期序列进行二阶消除趋势波动分析处理.为更加明确的显示波动函数与分割区间长度的关系,将计算结果在双对数坐标系中进行表示,得到结果如图 8 所示.

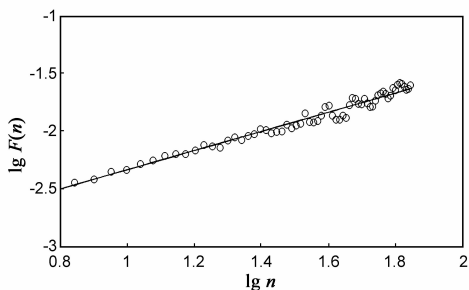


图8 波动函数与区间长度关系

从图 8 可以看出,波动函数 $F(n)$ 与 n 在双对数坐标系具有很好的线性关系,即二者存在幂率关系 $F(n) \sim n^\alpha$,用最小二乘法对图中数据点进行线性拟合,即可确定波动函数的标度指数 α .对该图中数据进行线性拟合后,拟合直线的斜率 $\alpha = 0.687$,由此可知,波动函数与区间长度 n 的关系为 $F(n) \sim n^{0.687}$.

根据 DFA 原理, α 取值不同,对应时间序列的相关特性也不同.

(1) 当 $0 < \alpha < 0.5$ 时,时间序列具有反持续性的长程相关性,即未来的趋势变化很可能与现在的趋势变化相反,且 α 越小,反相关性越强.

(2) 当 $\alpha = 0.5$ 时,时间序列不相关或只具有短程相关性.

(3) 当 $0.5 < \alpha \leq 1$ 时,时间序列具有持续性的长程相关性,且 α 越大,长程相关性越强.

由此可知,该步伐周期序列具有持续性的长程相关性.

为了验证该结论的普遍性,我们分别对 6 位普通青年男性实验人员进行步伐信号采集,并对所得信号进行分析,得到可以表征其长程相关性的步伐周期序列标度指数范围为 0.735 ± 0.006 .由此可说明步伐周期序列长程相关具有普遍性,即普通人在进行踏步时虽然步伐周期一直处于变化状态,但从长时间来看,其步伐周期保持相对稳定.

4.2 步伐周期分解处理

通过对于步伐周期序列的分析,我们发现一定时间内人体的步伐总是呈现一个相对稳定的状态.为了进一步探索人体保持这种稳定状态的内在因素,对步伐周期序列相邻周期值做差值,得到图 9 所示步伐周期增量序列.对步伐周期增量序列进行 DFA 处理,并对所得结果在双对数坐标系中进行线性拟合,得到结果如图 10 所示.拟合所得直线斜率为 0.134,即波动函数的标度指数为 $\alpha = 0.134$,波动函数 $F(n) \sim n^{0.134}$,表明步伐周期增量序列具有很强的长程反相关性.

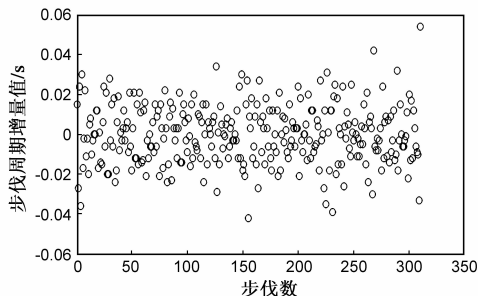


图9 步伐周期增量序列

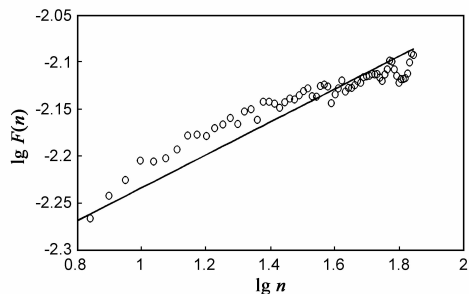


图10 增量序列DFA

进一步将步伐周期增量序列分解为两个新序列,分别为幅度序列以及符号序列,其中,幅度序列定义为周期增量的绝对值序列,符号序列则通过周期增量与 0 的比较值而得,当其大于等于 0 定义为 +1,小于 0 为 -1.这两个序列分别反映了人体踏步时为保持一种步伐习惯而对步长进行调节的大小和方向.

分解后所得的这两个序列分别如图 11(a)、图 11(b)所示,从图中不难发现这两个新序列变化的不规则

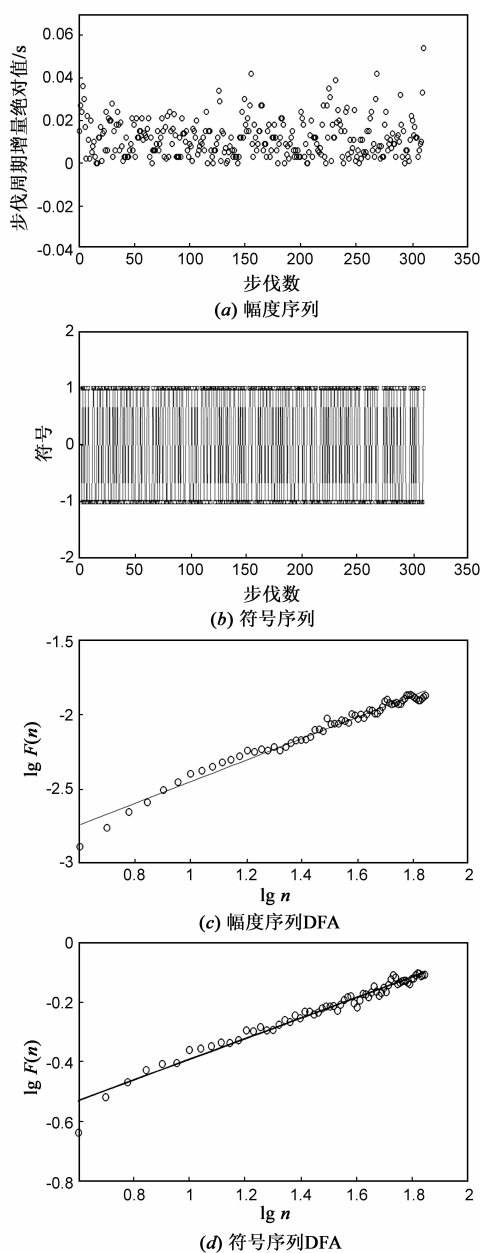


图11 分解所得序列及其DFA处理

性.对这两个序列进行 DFA 处理,图 11(c)、图 11(d)分别为双对数图中幅度序列和符号序列的 DFA 处理结果.在进行线性拟合之后,得到这两个序列拟合直线的斜率,其中,幅度序列拟合直线的斜率为 0.685,符号序列拟合直线的斜率为 0.311.因此这两个序列 DFA 处理之后的标度指数分别为 $\alpha_1 = 0.685$ 和 $\alpha_2 = 0.311$,其中幅度序列呈现长程相关性,而符号序列呈现长程反相关性.幅度序列的长程相关性说明在一个大幅值的周期增量之后很可能伴随着一个大幅值的周期增量;符号序列的长程反相关性则说明一个正的周期增量之后很可能伴随着一个负的周期增量.这一特性表明,一个

大的正周期增量之后被测人员为了保持步伐习惯很可能伴随着一个较大的负周期增量进行调节,而一个小的步伐周期增量之后可能伴随着一个较小的反向调整.

对前面所采集的 6 名测试对象步伐信号重复以上分析过程,得到每名测试对象步伐周期的幅度序列以及符号序列的标度指数,结果表明每名被测人员的幅度序列均呈现长程相关,而符号序列呈现出长程反相关性.这一结果说明人在正常状态下进行踏步时为了保持一种相对稳定的步伐周期状态,会对步伐不断进行双向调整,从而保持长时步伐速度的一致性.

5 结论

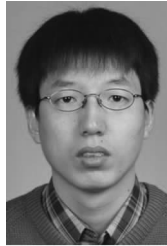
本文通过一种非接触式的静电探测器对一组(6名)普通男性的踏步静电信号进行测量并记录,利用自相关算法获取被测人员的步伐周期精确数值,运用消除趋势波动分析算法对每个步伐周期序列进行分析,并进一步将步伐周期序列分解成为幅度序列和符号序列并分析其标度指数.文章分析结果表明,人在踏步过程中总是通过不断地调整使得步伐周期保持在一个稳定的数值,并且调整过程是一种双向的对称调整.本文有助于理解人在正常状态下进行踏步时为保持稳定的步伐速度进行调整的内在机制,研究结果对于人体运动神经疾病的早期预测、康复过程和机器人行走具有重要意义.

参考文献

- [1] Lisetti C, Nasoz F, Le Rouge C, et al. Developing multimodal intelligent affective interfaces for tele-home health care[J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2003, 59(1): 245 - 255.
- [2] Murray M P, Drought A B, Kory R C. Walking patterns of normal men[J]. Journal of Bone and Joint surgery, 1964, 46(2): 335 - 360.
- [3] Murray M P. Gait as a total pattern of movement: Including a bibliography on gait[J]. American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation, 1967, 46(1): 290 - 333.
- [4] Ben Abdelkader C, Cutler R, Davis L. Person identification using automatic height and stride estimation[A]. 16th International Conference on Pattern Recognition[C]. Quebec, Canada: IEEE Computer Society, 2002, 4: 377 - 380.
- [5] Ailisto H J, Lindholm M, Mantyjarvi J, et al. Identifying people from gait pattern with accelerometers[A]. Defense and Security, International Society for Optics and Photonics[C]. Orlando, Florida, USA: Biometric Technology for Human Identification II, 2005. 7 - 14.
- [6] Yu S, Tan D, Tan T. A framework for evaluating the effect of

- view angle, clothing and carrying condition on gait recognition [A]. 18th International Conference on Pattern Recognition [C]. Hong Kong, China: IEEE Computer Society, 2006. 441 – 444.
- [7] Ben Abdelkader C, Cutler R, Davis L. Motion-based recognition of people in eigen gait space [A]. Proceedings Fifth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition [C]. Washington, D C: IEEE Computer Society, 2002. 267 – 272.
- [8] Wang L, Tan T, Ning H, et al. Silhouette analysis-based gait recognition for human identification [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(12): 1505 – 1518.
- [9] Cunado D, Nixon M S, Carter J N. Using gait as a biometric, via phase-weighted magnitude spectra [A]. Audio and Video-based Biometric Person Authentication [C]. Crans-Montana, Switzerland: Springer Berlin Heidelberg, 1997. 93 – 102.
- [10] Niyogi S A, Adelson E H. Analyzing and recognizing walking figures in XYT [A]. Proceedings IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. Seattle: Computers and Electronics in Agriculture, 1994. 469 – 474.
- [11] Chen X, Zheng Z, Cui Z, et al. A novel remote sensing technique for recognizing human gait based on the measurement of induced electrostatic current [J]. Journal of Electrostatics, 2012, 70(1): 105 – 110.
- [12] Dewey J K, Fargues M P, Hippensiel R. Electrostatic target detection: A preliminary Investigation [D]. California, U S: Naval Postgraduate School, 1993.
- [13] Okazaki M, Fujiwara O, Azakami T. Characteristic measurement of human body potential due to stepping on metal plate [J]. J IEICE, 1991, 12(2): 184 – 189.
- [14] Takiguchi K. the Measurement System of Human Walking [R]. Tokyo: Japan Information Technology Promotion Agency (IPA), 2002.
- [15] Li P F. Research on characteristics of human gait by electrostatic detection [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 241(5): 587 – 590.
- [16] Peng C K, Buldyrev S V, Havlin S, et al. Mosaic organization of DNA nucleotides [J]. Physical Review E, 1994, 49(2): 1685.
- [17] Peng C K, Havlin S, Stanley H E, et al. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series [J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 1995, 5(1): 82 – 87.
- [18] Hausdorff J M, Peng C K, Ladin Z, et al. Is walking a random walk? Evidence for long-range correlations in stride interval of human gait [J]. Journal of Applied Physiology, 1995, 78(1): 349 – 358.
- [19] Ashkenazy Y, Ivanov P C, Havlin S, et al. Magnitude and sign correlations in heartbeat fluctuations [J]. Physical Review Letters, 2001, 86(9): 1900 – 1903.

作者简介



李鹏斐(通信作者) 男, 1980年出生于甘肃宁县, 北京理工大学机电学院讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为电磁探测理论与应用及信号处理。

E-mail: pfl@bit.edu.cn



李孟君 男, 1991年出生于江西丰城, 北京理工大学机电学院硕士研究生, 主要研究方向为静电目标探测与识别。