

文章编号 1004-924X(2017)05-1272-09

从人体行走中收集能量的鞋上压电俘能器

樊康旗*, 刘朝辉, 王连松, 余 波

(西安电子科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要:设计了一种安装在鞋上的压电俘能器(PEH),用于收集人体行走时产生的能量。该俘能器由 4 根压电悬臂梁和 1 个弹簧-质量系统组成。弹簧-质量系统能够感知沿胫骨轴的加速度激励,并通过磁耦合驱动压电梁振动从而发电。文中通过拟合实验数据获得加速度信号表达式;然后,建立仿真模型,对俘能器的发电性能进行了仿真分析。最后,加工了实验样机,并实验测试了俘能器的发电性能。结果表明,当受到沿胫骨方向的激励时,压电梁在一个步态周期内可被弹簧-质量系统激励多次从而产生多个峰值电压;受到沿胫骨和脚面两个方向激励时,压电梁的发电性能比只受到单一方向激励时好。当步行速度为 2~8 km/h 时,每根压电梁的峰值电压可达到 10 V。该俘能器能够从人体行走的超低频运动中收集能量,并能够同时收集两个方向的加速度能量,提高了压电梁的发电性能。

关键词:压电俘能器;压电效应;人体步态;能量收集;升频;双稳态结构

中图分类号:TK02;TN384 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172505.1272

Shoe-mounted piezoelectric energy harvester for collecting energy from human walking

FAN Kang-qi*, LIU Zhao-hui, WANG Lian-song, YU Bo

(School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

* Corresponding author, E-mail: kqfan@mail.xidian.edu.cn

Abstract: A shoe-mounted piezoelectric energy harvester was designed to collecting energy from human walking. This energy harvester comprises of four piezoelectric cantilever beams magnetically coupled with a spring-mass system. The spring-quality system could sense the acceleration excitation along a radial bone shaft and generate electricity through the magnetic coupling driving a piezoelectric element. The expression of acceleration signals was obtained by fitting the experimental data. And then, a simulation model was established to simulate the power generation performance of the energy harvester. Finally, a prototype was also fabricated and its performance was verified by an experimental test. The results indicate that the four beams could be triggered several times by the spring-mass system within one step when the energy harvester is excited by the acceleration along the tibial axis, and several piezoelectric beam voltage outputs could be obtained. Furthermore, the power-generating capacity of the piezoelectric beam excited by the coupled accelerations is always better than that excited by the single direction acceleration. When walking speed ranges from 2 km/h to 8 km/h, the peak voltage output from each beam is as large as 10 V. The piezoelectric energy harvester collects

收稿日期:2016-10-25;修订日期:2016-12-26.

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(No. 2015JM5193);国家自然科学基金资助项目(No. 51205302)

the energy from human walking in low frequency and the superposition of voltage outputs generated by accelerations comes from two orthogonal directions, so that the power-generating capacity is improved greatly.

Key words: piezoelectric energy harvester; piezoelectric effect; human gait; energy harvesting; frequency up-conversion; bistable structure

1 引言

目前,大多数的低功率器件(如无线传感器和发射器,医疗植入传感器,便携式电子设备)都依赖电化学电池供电。但是,电化学电池具有寿命短、成本高及处理废旧电池带来的环境污染等问题,所以研究人员正积极寻找一种新的能源以代替电化学电池为低功率器件供电。另外,微电子技术的不断发展大大降低了低功率器件的能耗,因而,从周围环境中收集能量以驱动低功率器件变得更加可行。从周围环境中可收集的能量主要包括太阳能、热能和机械能,其中,机械能,尤其是振动能在周围环境中分布广泛。在机械能向电能转换的多种途径中,压电换能装置由于具有结构简单、输出电压高、机电耦合系数大等优点^[1-4]而备受关注。

在过去的二十多年中,压电俘能器(Piezoelectric Energy Harvester, PEH)的性能不断发展。传统的PEH为线性结构,其仅能在谐振频率点附近有效收集能量。为了改善传统PEH的性能,研究人员提出了多种改进的PEH,以便从宽频带振动^[5],超低频振动^[6-7]和多方向振动^[8]中收集能量。近年来,PEH由于可以向便携设备和可穿戴设备供电,基于人体运动的PEH受到了更多的关注。Shenck等^[9]把多层压电聚合物聚偏二氟乙烯(Polyvinylidene Fluoride, PVDF)安装在鞋掌处来收集脚掌弯曲时所产生的能量,并通过挤压由两个粘有压电双晶片的弯曲金属片形成的椭圆二面体来收集脚跟撞击时的能量。Granstrom等^[10]设计了一种由PVDF制成的背包带以从人体的行走中收集能量。基于可移动质量块和两个压电悬臂梁之间的碰撞,Renaud等^[11]提出了一种从人体四肢的运动中收集能量的PEH。Yang等^[12]开发了一种基于压电纳米线的纳米发电机,将生物能量如人体手指的运动转换成电能。Moro等^[13]分析了脚跟接触地面时的加速度脉冲,并研究了在该加速度脉冲激励下压电悬臂梁的性能。Pozzi等^[14]提出了一

种基于机械拨动的升频技术以从膝关节的低频旋转中收集能量。Pillatsch等^[3]设计了一种由滚筒和压电梁阵列组成的PEH;在此PEH中,滚筒被人体运动驱动在压电梁阵列上滚动,并通过磁耦合触发压电梁振动进而产生电能。Delnavaz等^[4]设计了一个可安装在头盔上的压电式下巴带,以从下颌的运动中收集能量。

通过对PEH的发展历程的回顾可以发现,虽然研究人员已提出了一系列可从人体运动中收集能量的PEH,但如果想要实现高效的能量收集,仍然有很多的问题需要解决。比如,行走被认为是人体运动中最有发展前景的能源,但其超低频率的特性限制了振动式PEH的适用性。实验测量结果表明,当行走速度从4 km/h(慢走)增加到10 km/h(慢跑)^[13-15]时,步态频率的变化为0.8~1.2 Hz。此外,在行走过程中,脚部会产生两个方向上的加速度:沿胫骨轴线的加速度和沿脚面方向的加速度。然而,目前所提出的基于人体运动的PEH通常只能从单一激励中收集能量,没有实现能量的充分利用。

为了从人体行走的超低频运动中收集能量,并充分利用脚部产生的沿两个不同方向的加速度,本文提出一种安装在鞋上的PEH。该PEH由4个压电悬臂梁和1个弹簧-质量系统组成。弹簧-质量系统感知沿着胫骨轴方向的激励,并通过磁耦合驱动压电悬臂梁振动;同时,垂直于脚面方向的两个悬臂可以感知沿着脚面方向的激励。所设计的PEH不仅能够将人体行走过程中所产生的超低频激励转换为更高频的振动,而且能够从双向激励中收集能量。

2 人体行走中可利用的能量

在人体的多种运动中,行走运动由于可产生两个加速度激励而受到广泛的关注。这两个加速度是指鞋与地面之间的冲击加速度以及行走期间腿部摆动引起的加速度,如图1所示。为了便于测量,通常将这两个加速度激励沿两个正交方向

进行分解,即沿着脚面方向和沿胫骨轴方向。在本文中,两个正交方向分别用 x 轴和 z 轴表示。



图 1 人体步态示意图

Fig. 1 Schematic diagram of human gait

为了研究从行走中收集能量的可行性,获取人体正常步态下的加速度的特性是非常必要的。一些研究人员已开展了这方面的研究工作^[13,15],

他们通过加速度计在 4 km/h 的行走速度下测量了脚部所产生的加速度^[15],如图 2 所示($g=9.81 \text{ m/s}^2$)。可以看出,加速度激励具有峰值高、频率低的特点。虽然加速度信号为周期性产生(周期大约为 1 s),但在一个周期内的变化并不规则。沿着 x 轴,加速度峰值大约为 4g;沿着 z 轴,加速度峰值可达到 10g。由于受试者的身高、体重、行走姿势及测试环境等因素不同,不同的受试者在不同条件下测得的加速度存在差异,但是加速度的总体变化趋势是一致的。为了便于对安装在鞋上的 PEH 进行设计和理论研究,本文通过拟合实验数据以获得加速度信号的函数表达式,并将其作为理论分析的标准加速度激励信号,如图 3 所示。

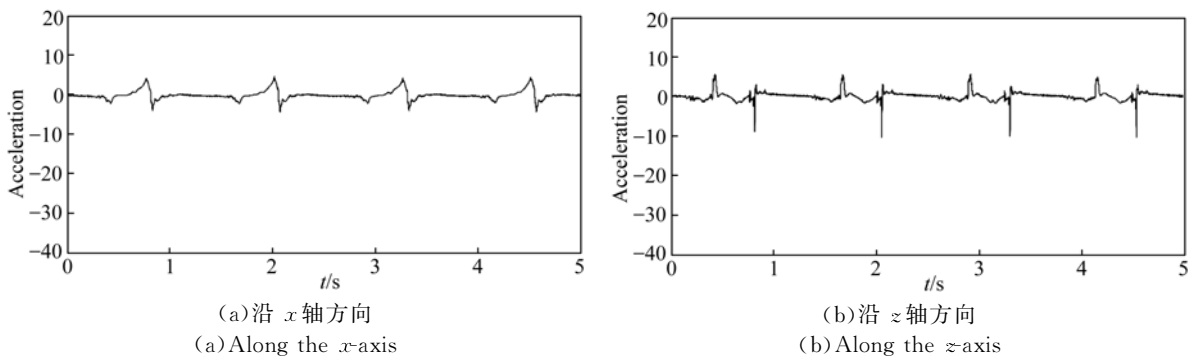


图 2 在 4 km/h 的步速下测得的加速度

Fig. 2 Measured accelerations under a walking speed of 4 km/h^[15]

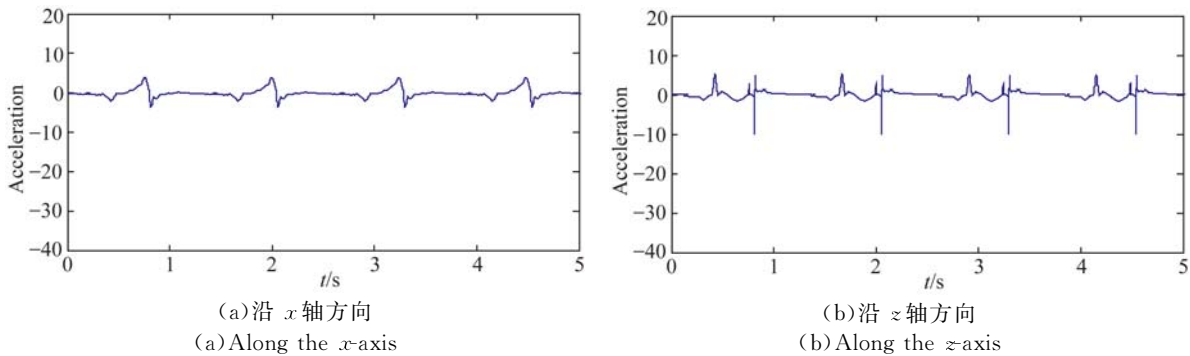


图 3 标准加速度信号

Fig. 3 Standard accelerations

3 能量收集器的设计

3.1 基本结构和系统模型

所设计的从行走中收集能量的 PEH 的结构如图 4 所示。PEH 由 4 个压电悬臂梁(A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4)、1 个弹簧-质量系统和套管组成。在 4 个梁中, A_1 和 A_3 沿 x 轴方向振动, A_2 和 A_4 沿

y 轴方向振动。压电悬臂梁由压电片和金属薄片构成并通过磁力与弹簧-质量系统耦合。弹簧-质量系统由夹在 2 个圆柱形磁铁之间的弹簧构成,磁铁之间的作用力为引力。套筒引导弹簧-质量系统沿 z 轴方向运动。在此 PEH 中,弹簧-质量系统感知沿着 z 轴方向的加速度激励,并通过磁耦合驱动 4 个压电悬臂梁振动,从而实现能量的传递和频率的提升。

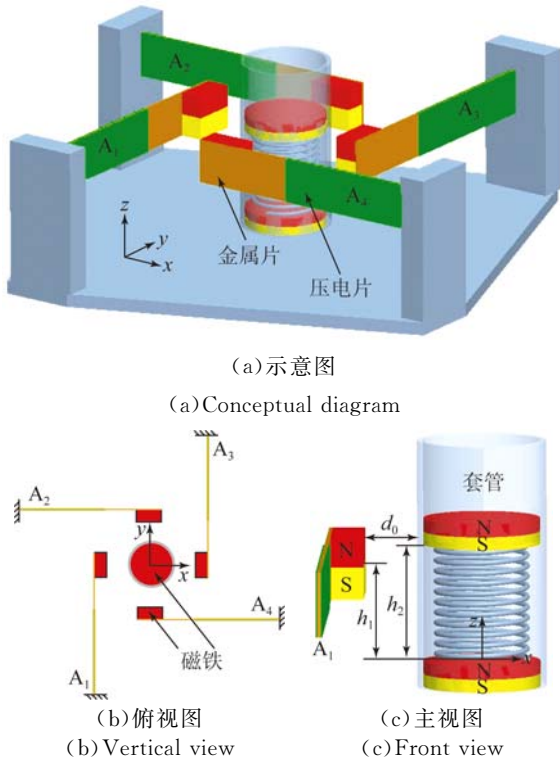


图 4 PEH 原理图

Fig. 4 Configuration of the proposed PEH

为了对所设计的 PEH 进行理论研究,每个压电悬臂梁被简化为质量+弹簧+阻尼器+压电的结构模型,其机电控制方程可以描述为^[16]:

$$F_m = \frac{J_1 J_2}{4\pi\mu_0} \sum_{i,j,k,l,p,q \in \{0,1\}^6} \sum_{(i,j,k,l,p,q \in \{0,1\}^6)} (-1)^{i+j+k+l+p+q} \varphi(u_{ij}, v_{kl}, \omega_{pq}, r), \quad (4)$$

其中:

$$\varphi(u_{ij}, v_{kl}, \omega_{pq}, r) = \frac{1}{2} u (v^2 - \omega^2) \ln(r-u) +$$

$$\frac{1}{2} v (u^2 - \omega^2) \ln(r-v) +$$

$$u v \omega \tan^{-1} \frac{u v}{r \omega} + \frac{r}{6} (u^2 + v^2 - 2\omega^2),$$

$$u_{ij} = \alpha + (-1)^j A - (-1)^i a,$$

$$v_{kl} = \beta + (-1)^l B - (-1)^k b,$$

$$\omega_{pq} = \gamma + (-1)^q C - (-1)^p c,$$

$$r = (u_{ij}^2 + v_{kl}^2 + \omega_{pq}^2)^{1/2},$$

式中: J_1 和 J_2 是 2 个磁铁的磁化强度; μ_0 为真空磁导率; i, j, k, l, p, q 是 0 或 1 的整数; φ 是磁铁之间相对位置和它们几何形状的函数; α, β, γ 为两磁铁之间沿不同轴线的距离; A, B, C, a, b, c 分别为两磁铁的长、宽、高。磁力的 3 个分量,即沿 x, y 和 z 轴的磁力,可通过文献^[17]中的式(3)~(5)确定。

$$M_n \ddot{\zeta}_n(t) + \eta_n \dot{\zeta}_n(t) + \Theta_n V_n(t) K_n \zeta_n(t) = F_a(\zeta_n, t) + F_m(\zeta_n, z, t), \quad (1)$$

$$-\Theta_n \dot{\zeta}_n(t) + C_n \dot{V}_n(t) = -I_n(t), \quad (2)$$

其中: M_n 是等效质量; η_n 是等效阻尼; K_n 是等效刚度; Θ_n 是有效压电系数; C_n 是压电层的钳位电容; $V_n(t)$ 和 $I_n(t)$ 分别是电压输出和电流输出; $F_a(\zeta_n, t)$ 是人体行走时沿 x 轴方向的惯性力; $F_m(\zeta_n, z, t)$ 是梁 n 和弹簧-质量系统之间的磁力; $\zeta_n(t)$ 是梁 n 的尖端位移; z 是弹簧自由端的位移,由后续方程给出;参数中的下标 n 表示 4 个梁 A_1, A_2, A_3 和 A_4 。如果 $n=A_1$ 或 A_3 ,则 ζ_n 表示 x ;如果 $n=A_2$ 或 A_4 ,则 ζ_n 表示 y 。弹簧-质量系统的动力学方程为:

$$M \ddot{z}(t) + \eta \dot{z}(t) + K z(t) =$$

$$F_a(z, t) + F_m(\zeta_n, z, t) + F_m(z, t), \quad (3)$$

其中: M 是有效质量; η 是有效阻尼; K 是有效刚度; $F_a(z, t)$ 是人行走沿 z 轴方向的惯性力; $F_m(\zeta_n, z, t)$ 是弹簧-质量系统和梁之间的磁力; $F_m(z, t)$ 是连接在弹簧两端的两个磁体之间的磁力。

为简化计算,使用立方体磁铁模型来确定式(1)和(3)中的磁力 $F_m(z, t)$ 和 $F_m(\zeta_n, z, t)$ 。对于两个沿 z 方向磁化的长方体形磁铁,它们之间的磁力可以表示为^[17]:

表 1 设计和仿真参数

Tab. 1 Design and simulation parameters

参数	值
有效质量 M/g	40
有效阻尼 $\eta/(Ns \cdot m^{-1})$	0.02
有效刚度 $K/(N \cdot m^{-1})$	83
有效质量 M_n/g	2
有效阻尼 $\eta_n/(Ns \cdot m^{-1})$	0.04
有效刚度 $K_n/(N \cdot m^{-1})$	220
有效压电转换系数 $\Theta_n/(mN \cdot V^{-1})$	0.39
压电层电容 C_n/nF	37.1
压电梁的位置 h_1/mm	11
弹簧的初始高度 h_2/mm	18
磁铁的几何尺寸/(mm×mm×mm)	5×5×5
磁化强度 J/T	0.38
初始间距 d_0/mm	2

根据所建立的 PEH 理论模型,使用获得的标准加速度函数信号作为 PEH 的激励信号,可以获得弹簧-质量系统的时域振动响应和 4 个压电悬臂梁的输出电压。PEH 的设计和仿真参数如表 1 所示。在所设计的 PEH 中,4 个压电悬臂梁具有相同的结构参数,磁铁具有相同的尺寸和磁化强度。

3.2 理论分析

在 4 个压电悬臂梁中, A_1 和 A_3 受到沿 x 轴方向的加速度激励,即沿脚面方向的激励。由于 A_1 和 A_3 具有相同的参数并且被相同的激励驱动,它们的电压响应是相同的,因而仅需获得 A_1 (或 A_3) 的输出电压。在 x 轴方向加速度激励的作用下, A_1 的开路电压响应如图 5 所示。在每个步态周期中, x 轴方向的加速度激励具有两个负的峰值和一个正的峰值。在较小的负的峰值加速度作用下, A_1 产生约 -2 V 的电压输出,而其他两个峰值加速度可使 A_1 产生约 4 V 的电压输出。

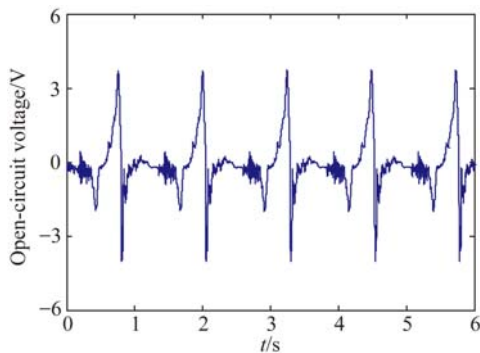
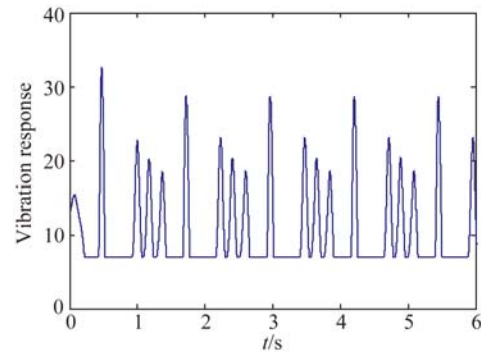


图 5 A_1 被 x 轴方向加速度激励时的开路输出电压
Fig. 5 Open-circuit voltage of A_1 excited by x -directional acceleration

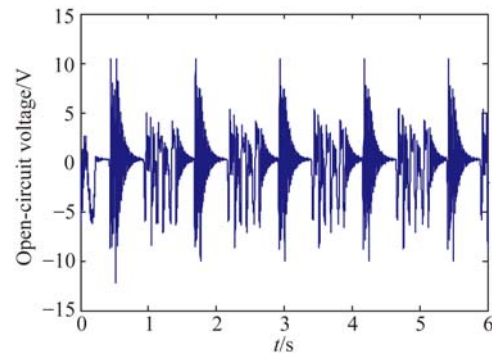
z 轴方向上的加速度激励驱动弹簧-质量系统沿着胫骨轴振动。当连接在弹簧自由端的磁铁通过固定在 4 个梁的自由端的磁铁时,由于磁体间的斥力作用,压电梁先被压弯然后释放。释放后的压电悬臂梁以它们的谐振频率自由振动,从而实现激励频率的提升,如图 6 所示。此外,固定在弹簧两端的 2 个磁铁之间的吸引力使弹簧-质量系统成为双稳态结构,这种设计使得弹簧-质量系统在较小的加速度激励下能够以较大的振幅振动。因此,弹簧-质量系统可以在一个步态周期内

多次触发压电悬臂梁。由于 4 个压电悬臂梁具有相同的结构参数,图 6 中仅展示出 A_1 的输出电压。可以看出, A_1 可以在一个步态周期内产生多个大于 5 V 的电压峰值,最大的电压峰值可达 10 V。



(a) 弹簧-质量系统的时域振动响应

(a) Vibration response of spring-mass system



(b) A_1 的开路电压

(b) Open-circuit voltage of A_1

图 6 PEH 在 z 方向加速度激励下的响应

Fig. 6 PEH response excited by z -directional acceleration

在实际应用中,PEH 同时受到来自于沿 x 方向和 z 方向的加速度激励。在 4 个压电悬臂梁中, A_2 和 A_4 沿 y 轴方向振动,而沿 x 轴的加速度对 A_2 和 A_4 的振动在理论上没有影响,因而 A_2 和 A_4 主要被沿 z 方向的加速度通过弹簧-质量系统激励,并产生相同的电压输出,如图 6(b) 所示。然而, A_1 和 A_3 会受到同步发生的沿 x 方向和 z 方向的加速度的作用,如图 7 所示。因此,分析压电梁被不同方向的加速度激励时的输出电压是否可以叠加以增加 PEH 的输出是非常重要的。

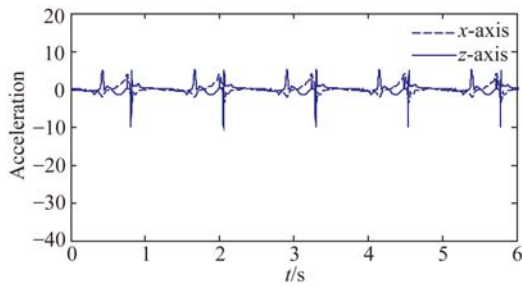
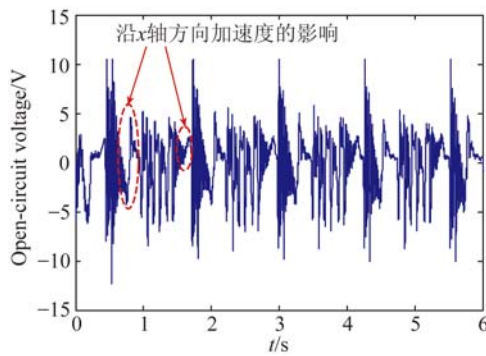


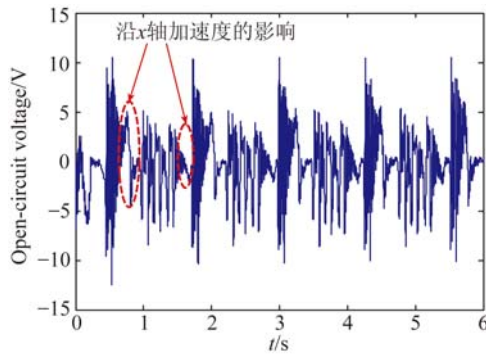
图 7 x 轴和 z 轴的同步加速度信号

Fig. 7 Synchronous accelerations coming from x -axis and z -axis



(a) A_1 的开路电压

(a) Open-circuit voltage of A_1



(b) A_3 的开路电压

(b) Open-circuit voltage of A_3

图 8 同步加速度信号对 PEH 的影响

Fig. 8 Effect of synchronous accelerations on PEH

对于 A_1 ,沿 x 轴的正向加速度与弹簧-质量系统施加的磁力(排斥力)相反,因而在每个步态周期内,沿着 x 轴的正向加速度导致 A_1 的输出电压向下偏移,如图 8(a)所示。相反,沿着 x 轴的负向加速度使得电压输出向上偏移。整体来看,在每个步态周期内, x 轴加速度产生的多个电压峰值可以与由 z 轴加速度产生的电压输出进行

叠加以获得更好的性能。类似地,对于 A_3 ,由沿 x 轴和 z 轴加速度产生的电压输出也可进行叠加,如图 8(b)所示。但应该指出的是,对于 A_3 ,沿 x 轴的正向加速度与弹簧-质量系统施加的磁力(排斥力)是一致的,而沿 x 轴的负向加速度与磁力(排斥力)相反。因此,由沿 x 轴加速度产生的 A_3 输出电压的偏移与 A_1 输出电压的偏移相反。

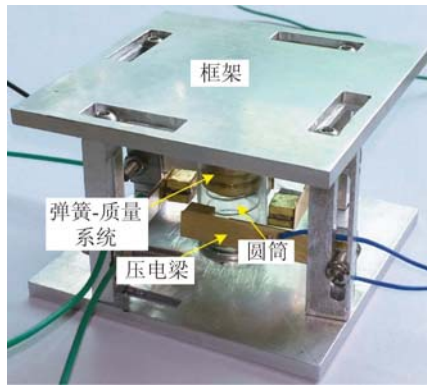
4 实验验证和分析

为了验证所设计的 PEH 的可行性,本文加工制作了相应的 PEH 实验样机,如图 9(a)所示。该样机有 4 个压电悬臂梁,每 1 个压电悬臂梁都由黄铜衬底和压电片(PZT-5H)贴合而成。粘合在压电悬臂梁自由端上的质量块由两层长方体黄铜片和长方体磁铁(Nd-Fe-B)组装而成。为了便于调节弹簧-质量系统的谐振频率,固定在弹簧顶部的质量块由多层圆片状黄铜片和圆片状磁铁(Nd-Fe-B)组装而成。另一圆片状磁铁固定在弹簧的底部,将弹簧夹在 2 块磁铁之间。弹簧的材料为黄铜,有效刚度为 30 N/m。弹簧-质量系统被封装在由聚碳酸酯制成的套筒中。该样机的框架由硬铝(2A12-T4)制成。样机的尺寸列于表 2 中。

表 2 样机的尺寸

Tab. 2 Sizes of prototype

参数	值
铜基质	27 mm×7.1 mm×0.1 mm
压电片	17 mm×7.1 mm×0.24 mm
弹簧(外径 * 直径)	12 mm×20 mm
套筒(内径 * 直径)	15 mm×39 mm
长方体黄铜片	6 mm×6 mm×2 mm
长方体磁体	5 mm×5 mm×1 mm
圆片状黄铜片(直径 * 高度)	14 mm×2 mm
圆片状磁体	12 mm×1 mm
框架	68 mm×68 mm×45 mm



(a) 实验样机
(a) Prototype



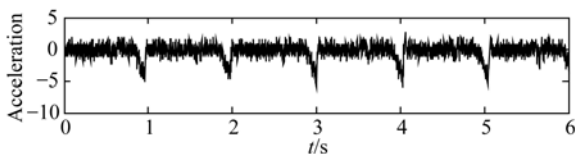
(b) 实验平台
(b) Test platform

图 9 实验配置

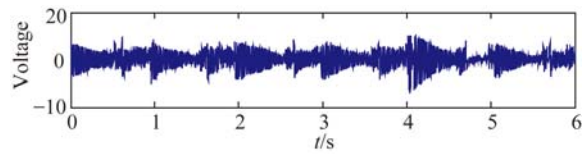
Fig. 9 Experimental setups

实验平台如图 9(b)所示。加速度计固定在高度为 1.72 m、重量为 70 kg 的受试者的鞋根外侧以测量沿 x 方向和 z 方向的加速度激励。压电悬臂梁的输出电压由示波器检测和记录。实验中,受试者分别以 2 km/h、4 km/h、6 km/h 和 8 km/h 的恒定速度在跑步机上行走。

图 10 给出了在 4 km/h 的行走速度下, z 方向的加速度以及 A_1 的输出电压。为了实现该测试,整个结构绕 z 轴旋转 90° ,使得 A_1 不受 x 方向上加速度的影响。可以看出,步态频率大约为 1 Hz,在每个步态周期内, A_1 被多次激励。当脚跟撞击地面时,峰值加速度大约为 $-5g$,此时 A_1 可以产生大约 10 V 的峰值电压。



(a) z 轴方向上的加速度
(a) z -directional acceleration

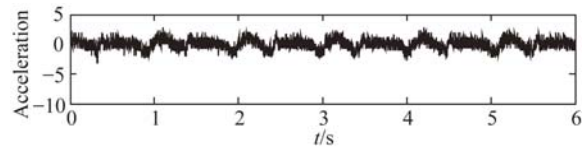


(b) A_1 的输出电压

(b) Voltage output from A_1

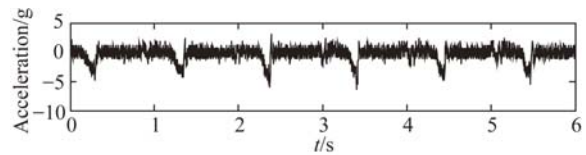
图 10 PEH 实验样机在 4 km/h 的步速下受到 z 方向加速度时的输出

Fig. 10 Experimental PEH response come from z -direction accelerations under a walking speed of 4 km/h



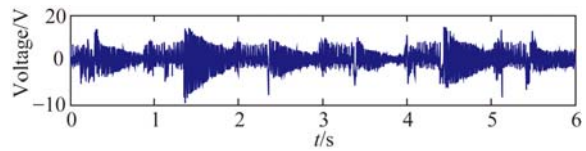
(a) x 轴方向上的加速度

(a) x -directional acceleration



(b) z 轴方向上的加速度

(b) z -directional acceleration



(c) A_1 的输出电压

(c) Voltage output from A_1

图 11 PEH 实验样机在 4 km/h 的步速下受到 x 方向和 z 方向加速度时的输出

Fig. 11 Experimental PEH responses come from x -direction and z -direction accelerations under a walking speed of 4 km/h

在 x 方向和 z 方向加速度的共同激励下, A_1 的输出电压如图 11 所示。虽然,在一个步态周期内,沿 x 方向的加速度激励对 A_1 的输出电压的影响不明显,但 A_1 的峰值电压可以提高到 10 V 以上。为了更直观地了解沿 x 方向加速度对输出电压的影响,获取了 A_1 在不同条件下的均方根电压,如图 12 所示。当 A_1 沿着脚面方向放置时,其不受 x 方向加速度的影响,而当 A_1 被放置成垂直于脚面方向时,其同时受到来自 x 轴和 z 轴的加速度作用。可以看出,当被 x 轴和 z 轴的

加速度同时激励时, A_1 的均方根电压总是大于被单一的 z 方向加速度激励时的均方根电压。此外,当行走速度从 2 km/h 增加到 8 km/h 时, A_1 的均方根电压单调递增。通常情况下加快行走速度可以使 x 方向和 z 方向的加速度增加,从而提高 A_1 的均方根电压。

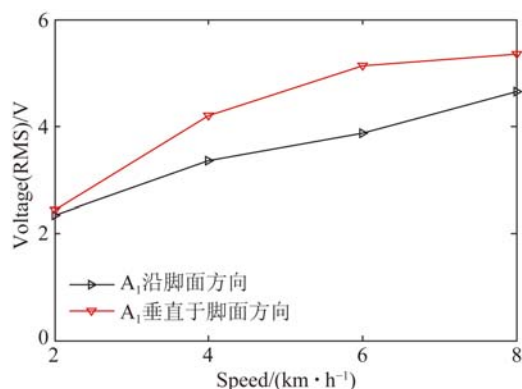


图 12 A_1 在不同条件下的均方根电压

Fig. 12 Root-mean-square voltages of A_1 under various conditions

参考文献:

- [1] FAN K Q, MING Z F, XU C H, *et al.*. The dynamic characteristics of harvesting energy from mechanical vibration via piezoelectric conversion [J]. *Chinese Physics B*, 2013, 22(10): 104502.
- [2] TANG L H, YANG Y W. A nonlinear piezoelectric energy harvester with magnetic oscillator [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(9): 094102.
- [3] PILLATSCH P, YEATMAN E M, HOLMES A S. A scalable piezoelectric impulse-excited energy harvester for human body excitation [J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 21 (21): 115018-115026.
- [4] AIDIN D, VOIX J. Flexible piezoelectric energy harvesting from jaw movements [J]. *Smart Materials & Structures*, 2014, 23(10): 105020-105027.
- [5] TANG L H, YANG Y W, SOH C K. Improving functionality of vibration energy harvesters using magnets [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2012, 23(13): 1433-1449.
- [6] FAN K Q, CHANG J W, CHAO F B, *et al.*. Design and development of a multipurpose piezoelectric energy harvester [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 96: 430-439.
- [7] FAN K Q, CHANG J W, PEDRYCZ W, *et al.*. A nonlinear piezoelectric energy harvester for various mechanical motions [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(22): 223902.
- [8] SU W J, ZU J. An innovative tri-directional broadband piezoelectric energy harvester [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(20): 203901.
- [9] SHENCK N S, PARADISO J A. Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics [J]. *IEEE Micro*, 2001, 21(3): 30-42.
- [10] GRANSTROM J, FEENSTRA J, SODANO H A, *et al.*. Energy harvesting from a backpack instrumented with piezoelectric shoulder straps [J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(5): 1810-1820.
- [11] RENAUD M, FIORINI P, VAN SCHAIJK R, *et al.*. Harvesting energy from the motion of human limbs: the design and analysis of an impact-based piezoelectric generator [J]. *Smart Materials and Structures*, 2009, 18(3): 035001.
- [12] YANG R S, QIN Y, LI C, *et al.*. Converting biomechanical energy into electricity by a muscle-movement-driven nanogenerator [J]. *Nano Letters*, 2009, 9(3): 1201-1205.
- [13] MORO L, BENASCIUTTI D. Harvested power and sensitivity analysis of vibrating shoe-mounted

5 结 论

本文设计了一种可安装在鞋上的压电俘能器,该俘能器由 1 个弹簧-质量系统、4 个压电悬臂梁和套管组成。首先,通过拟合实验数据获得了标准加速度信号;接着,建立仿真模型,并使用获得的标准加速度信号作为俘能器的外部激励信号,对其进行理论分析;最后,制作了实验样机,并对俘能器的发电性能进行测试。数值模拟和实验测试结果表明,当俘能器受到沿胫骨轴的加速度激励时,人体行走所产生的超低频率的激励可被转换为压电悬臂梁的更高频率的自由振动,实现激励频率的提升;当俘能器同时受到沿胫骨轴的加速度和沿脚面方向的加速度作用时,不同激励所产生的电压输出可以叠加,提高了俘能器的性能。所制作的俘能器样机,在每个步态周期内可产生多个电压输出峰值,其中最大的峰值电压可达 10 V 以上。

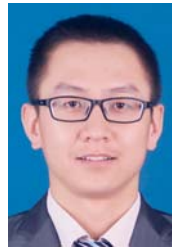
- piezoelectric cantilevers [J]. *Smart Materials and Structures*, 2010, 19(11): 115011.
- [14] POZZI M, ZHU M L. Plucked piezoelectric bimorphs for knee-joint energy harvesting: modelling and experimental validation [J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(5):55007.
- [15] YLLI K, HOFFMANN D, WILLMANN A, *et al.*. Energy harvesting from human motion: exploiting swing and shock excitations [J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(2):025029.
- [16] FAN K Q, CHAO F B, ZHANG J G, *et al.*. Design and experimental verification of a bi-directional nonlinear piezoelectric energy harvester [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 86: 561-567.
- [17] AKOUN G, YONNET J P. 3D analytical calculation of the forces exerted between two cuboidal magnets [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1984, 20(5): 1962-1964.

导师简介:



樊康旗(1979—),男,陕西西安人,博士,副教授,2005年、2007年于西安电子科技大学分别获得硕士、博士学位。主要是从事微机电系统的力学分析和微能源收集技术的研究。E-mail: kqfan@mail.xidian.edu.cn

作者简介:



刘朝辉(1992—),男,山西晋中人,硕士,2014年于山西大同大学获得学士学位,主要研究方向为微机电系统。E-mail: lzh920202@163.com