

压电碰撞能量收集中接触面的建模与实验研究

魏 胜^{1,2}, 胡 泓¹

(1. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院 机电工程与自动化学院, 广东 深圳 518055; 2. 深圳职业技术学院 机电工程学院, 广东 深圳 518055)

摘 要:采用碰撞的方法可解决压电悬臂梁的固有频率与外部输入频率不匹配问题,从而提高能量收集的效率。该文讨论了附加质量块的结构及碰撞接触面的设计,对不同接触面进行力学分析,并制作和装配了两种不同接触面的实验原型装置,通过外接电阻来测试输出功率。实验结果表明,在相同的外部输入下,非对称接触面设计的附加质量块可增大反向行程时压电梁的变形,与对称接触面相比,其输出功率可提高约23%。

关键词:压电能量收集;碰撞;悬臂梁;接触面;建模

中图分类号:TM282

文献标识码:A

Modeling and Experimental Research of Contact Surface for Piezoelectric Impact-excite Power Harvesting

WEI Sheng^{1,2}, HU Hong¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Impact-excited piezoelectric cantilever power harvester has been found as an effective approach for solving the mismatch between the resonant frequency and input frequency. The structure design of the proof mass is discussed and the discussion focused on the impulsive contact surface design in this paper. Modeling and dynamic analysis of different contact surface are performed. Two-centimeter scale prototype harvesters which consist of different tip form are fabricated and tested. The measured powers with variable external resistance under different walking speed of each prototype are compared. For the piezoelectric cantilever with asymmetric contact surface, the output maximum average power is 23% more than the power generated by the piezoelectric bimorph cantilever with symmetric contact surface under the same condition.

Key words: piezoelectric power harvesting; impact-excited; cantilever beam; contact surface; modeling

0 引言

压电振动能量收集一般采用悬臂梁结构,其结构简单,平均应变大,能量密度高^[1],但此方法在非谐振状态时能量收集效果差。在实际工作环境中,外部振动源的激励频率经常变化,要保证压电能量的收集效率,很多研究者针对悬臂梁的特性采用多种方法来调节其固有频率或增大工作带宽^[2]。而采用碰撞致上变频的方法可让压电悬臂梁在外部低频输入的情况下实现高频谐振,从而提高能量的收集效率^[3-5]。但这些设计都是直接碰撞压电梁,在外部冲击力的反复作用下,压电悬臂梁虽然会持续产生能量,同时也会损坏表面的压电薄膜。

1 压电碰撞能量收集原理

本文作者已提出了一种平行碰撞的压电能量收集装置^[6],如图1所示。圆柱滑块具有多个圆弧面突起且与压电悬臂梁平行放置,当滑块在导杆上移动时,突起部分就会与梁末端的具有圆弧面的质量块发生碰撞,在碰撞力的作用下压电梁产生弯曲变形,并在自身谐振频率下进行带阻尼的振动,同时压电梁产生弯曲变形,从而将机械能转换为电能。如果将这样设计的能量收集器绑定在人的脚踝处,当人的小腿前后走动时,圆柱滑块就会在导杆上往复移动,这样可将人步行运动产生的动能通过压电梁的振动转换为电能,再通过外接电路实现能量的转

收稿日期:2014-11-21

基金项目:深圳科创委基金资助项目(JCYJ 20120617140557216, JCYJ20120613133924264)

作者简介:魏胜(1976-),男,湖北孝感人,博士生,主要从事压电能量收集方面的研究。通信作者:胡泓(1965-),男,教授,博士生导师,主要从事传感器和精密仪器及MEMS方面的研究。

换、收集和储存。

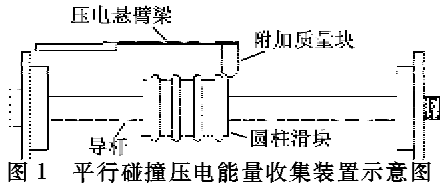


图1 平行碰撞压电能量收集装置示意图

采用平行碰撞法可使其结构紧凑,节约空间,从而提高能量收集密度;多个突起使压电梁在1个周期内承受多次碰撞,并保持连续变形,从而增大输出功率。另外碰撞发生在圆柱滑块与压电梁末端的附加质量块间,避免了直接碰撞压电梁,也可提高压电梁的使用寿命。本文针对圆柱滑块与附加质量块间的碰撞进行力学分析,并比较前向、反向行程时的力矩、应力分布,分析了碰撞接触面的设计对压电梁性能的影响。

2 接触面建模

图2为具有对称接触面的质量块在碰撞过程中的受力示意图。

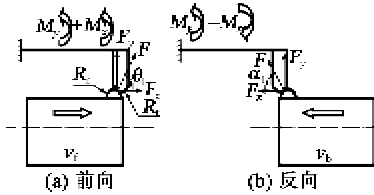


图2 对称接触面碰撞受力示意图

圆柱滑块上的突起和附加质量块的末端设计成圆弧型(半径分别为 R_1 和 R_2)，在前向运动时圆柱滑块以 v_1 的速度碰撞质量块，二者之间的作用力 F 沿两圆弧切点处的法线方向，该作用力可分解为水平方向分力 $F_x = F \cos \theta_1$ 和竖直方向分力 $F_y = F \sin \theta_1$ ，2个分力产生的弯矩 M_x 和 M_y 都使压电梁向上弯曲。圆弧接触的设计还可保证圆柱滑块在顶起压电梁后易向前继续移动，此时压电梁在自身的谐振频率下作衰减振动。在圆柱滑块上设置多个突起，可在一个往返周期内实现多次碰撞，在压电梁的振动并未停止时再次施加激励，从而进一步提高输出能量。另一方面，圆柱滑块在反向运行中(见图2(b))以速度 v_2 碰撞质量块。由于压电梁的附加质量块位于整个装置的正中间，圆柱滑块在前向和反向行程中，碰撞前的运动距离相同，则运动速度也相同($v_1 = v_2$)，相应的相互作用力也相同。同理，反向行程中的相互作用力 F 可分解为沿水平方向的分力 $F_x = F \cos \alpha_1$ 和沿垂直方向的分力 $F_y = F \sin \alpha_1$ ，

但此时2个分力产生的弯矩对压电梁的弯曲作用效果相反。

假设压电梁在弯矩的作用下发生纯弯曲，其横截面法向上的弯曲应力^[4]为

$$\sigma_{ave} = \frac{1}{l_b} \int_0^{l_b} \frac{M_{tot}(x) \frac{t}{2}}{I_{eq}} dx \quad (1)$$

式中： l_b 和 t 分别为压电梁的长度和厚度； I_{eq} 为压电梁的等效转动惯量； x 为压电梁沿长度方向的坐标； $M_{tot}(x)$ 为压电梁沿长度方向的分布弯矩。

根据压电梁的相关几何尺寸和上述分析，前向和反向运行中的分布弯矩为

$$M_{tot-f}(x) = M_y + M_x = F \sin \theta_1 (l_b - x) + F \cos \theta_1 h_1 \quad (2)$$

$$M_{tot-b}(x) = M_y - M_x = F \sin \alpha_1 (l_b - x) - F \cos \alpha_1 h_1 \quad (3)$$

式中 h_1 为附加质量块的长度。

由于附加质量块的接触面是对称设计的， F 与水平力的夹角在前向和反向行程中相同($\theta_1 = \alpha_1$)，因此反向行程中的弯矩小于前向行程($M_{tot-b} < M_{tot-f}$)。

结合第一类压电构造方程和式(1)~(3)，可分别求出前向和反向行程时压电梁产生的开路电压为

$$V_{oc-f} = -\frac{d_{31} t}{\epsilon_{33}} \sigma_{ave-f} = -\frac{d_{31} t}{\epsilon_{33}} \frac{1}{l_b} \int_0^{l_b} \frac{(F \sin \alpha_1 (l_b - x) + F \cos \alpha_1 h_1) \frac{t}{2}}{I_{eq}} dx \quad (4)$$

$$V_{oc-b} = -\frac{d_{31} t}{\epsilon_{33}} \sigma_{ave-b} = -\frac{d_{31} t}{\epsilon_{33}} \frac{1}{l_b} \int_0^{l_b} \frac{(F \sin \alpha_1 (l_b - x) - F \cos \alpha_1 h_1) \frac{t}{2}}{I_{eq}} dx \quad (5)$$

式中： d_{31} 为压电应变系数； ϵ_{33}^T 为介电常数。

由式(4)、(5)可看出，压电梁产生的开路电压与应力成正比，而应力与弯矩有关，这就决定了 $V_{oc-f} > V_{oc-b}$ 。

图3为改进后的非对称接触面的受力示意图。由图可知，质量块右边的倒圆角半径 R_1 大于左边的倒圆角半径 R_2 (见表1)。这种设计使得圆柱滑块上的突起与质量块之间的法向作用力 F 向上偏移，即 $\alpha > \theta$ ，这样既可降低水平作用力又可增大垂直作用力，即在增大 M_y 的同时减少 M_x ，使圆柱滑块在反

向行程中更易将悬臂梁顶起并继续移动,且压电梁的弯曲应力增大,提高输出电压和功率。产生的总弯矩为

$$M'_{\text{tot-b}}(x) = M_y - M_x = F \sin \alpha (l_b - x) + F \cos \alpha h_t \quad (6)$$

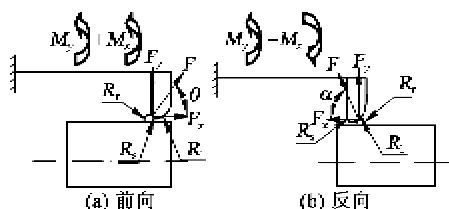


图3 非对称接触面碰撞受力示意图

表1 圆柱滑块与质量块的几何尺寸

R_1/mm	R_2/mm	h_t/mm	R_1/mm	R_2/mm
1	3	7	1	2

另外,相对于对称接触面有 $\alpha > \alpha_c$, 这样非对称接触面在反向行程中产生的弯矩大,即 $M'_{\text{tot-b}}(x) > M_{\text{tot-b}}(x)$, 相应的变形和输出电压也增大。同时,沿 x 轴的分力随夹角 α 的增大而减少,相应的反作用弯矩减少,提高了压电梁工作的可靠性。

3 实验结果与分析

将制作和安装的 2 个具有不同接触面结构的实验原型装置进行对比和验证。图 4 为实验原型组装的爆破图。将 2 个不同结构形状的质量块 a、b 分别贴在压电梁的末端来进行实验和比较。实验布局如图 5 所示。将实验装置绑在人的脚踝处,在正常步行情况下通过外接电阻来测试压电梁的输出电压及功率。其他具体的实验原型尺寸可参考文献[6]。

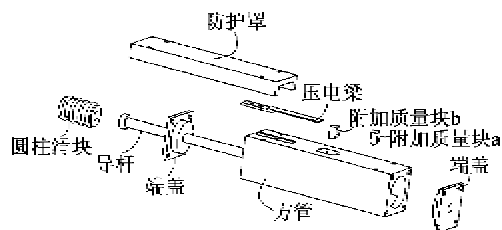
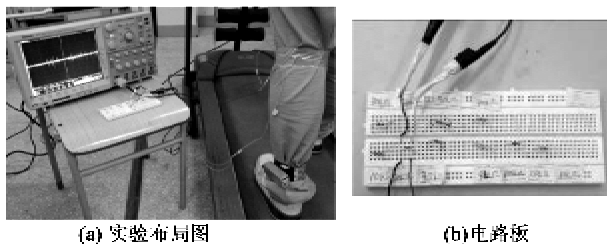


图4 组装示意图



(a) 实验布局图

(b) 电路板

图5 实验布局图及电路板

首先,我们进行一个简单的测试来验证非对称

接触面在前向和反向行程时的开路电压是否一致。因为事先设计的实验原型中方管下方是开口的,便于安装圆柱滑块和导杆。可通过此开口用手指拨动圆柱滑块来、回移动,同时观察示波器上显示的电压波形图,以此来比较圆柱滑块在前向和反向行程的输出开路电压,如图 6 所示。由图可看出,输出电压波形出现高、低交替情况,结合圆柱滑块的运动方向及非对称接触面质量块的安装位置,可判断前向行程的电压高于反向行程的电压。

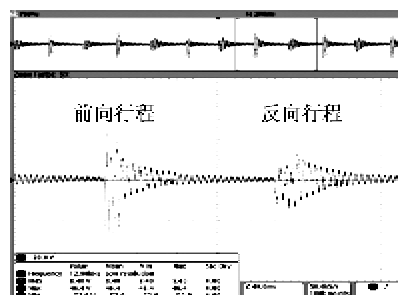


图6 开路电压示波器截图

将 2 个接触面形状不同的附加质量块分别安装在压电晶片的末端,然后组装整个实验原型装置。为简化说明,在后续介绍中将安装对称接触面的称为实验装置 A,而装有非对称接触面的称为实验装置 B。图 7 为采集的实验数据利用 MATLAB 软件行拟合后的电压比较图 ($R = 20 \text{ k}\Omega$)。由图可知,在相同的步行速度下 2 个实验装置在反向行程中两次碰撞的时间间隔接近 ($\Delta t_A \approx \Delta t_B$)。但实验原型 B 产生的峰值电压大于实验原型 A,这一点正好反映了非对称的接触面在反向行程时可通过提高弯曲幅值来增大输出电压。

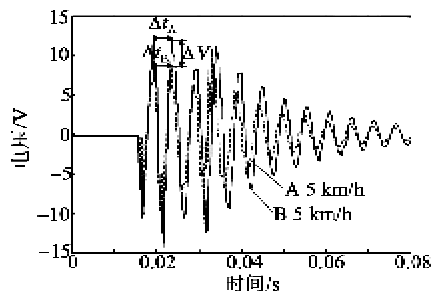


图7 2 个实验原型在反向行程时的输出电压比较图

图 8 为 2 个实验装置在两种步行速度下外接多种电阻时产生的平均电压和功率的综合比较图。平均电压是通过示波器上的 100×10^3 个采样点求出的均方根值。由图可知,压电梁在相同的步行速度下,产生的平均电压随着外接电阻的增大而增大,且在同样的外接电阻条件下,步行速度越大其输出电

压也越大。由图 8(a)可看出,在相同步行速度下和 外接电阻的情况下,实验原型 B 所产生的平均电压 要高于实验原型 A。其原因是非对称接触面的附加 质量块在反向行程中产生的电压要高于对称面设计 的质量块,这样总的平均电压就会增大。另外,在 5 km/h 的步行速度和 20 k Ω 的外接电阻条件下,实 验原型 B 可产生约 52 μ W 的最大功率,而在同样条 件下实验原型 A 只能产生约 42 μ W,如图 8(b)所 示。总之,非对称接触面的设计可提高约 23% 的输 出功率。

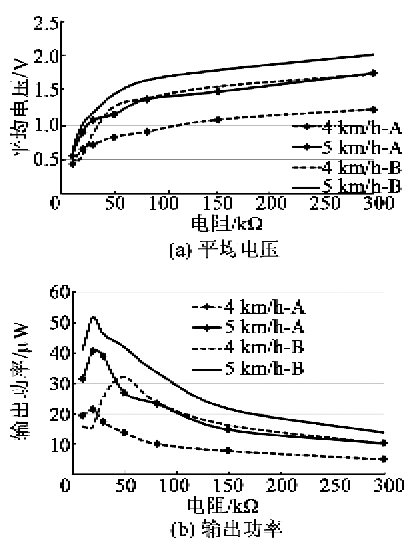


图 8 2 个实验原型的性能比较

4 结束语

本文首先分析压电碰撞能量收集装置中圆柱滑 块和附加质量块间的作用力及弯矩,比较和讨论了 对称接触面和非对称接触面所受作用力的不同,分 析碰撞接触面的设计及碰撞位置对碰撞作用效果的

影响。其中非对称接触面的设计,既可提高实验装 置工作的稳定性,也能增大总的输出功率。然后在 多种步行速度下和 外接不同阻值电阻的条件下进行 实验来比较两种接触面的工作性能。实验结果表 明,非对称接触面设计的附件质量块能增大反向行 程时压电梁的变形,相对于对称接触面而言可提高 约 23% 的输出功率。

参考文献:

- [1] DUTOIT N E, WARDLE B L, KIM S. Design consid- erations for MEMS-scale piezoelectric mechanical vi- bration energy harvesters [J]. *Integrated Ferroelec- trics*, 2005, 71(1): 121-160.
- [2] ZHU D, TUDOR M J, BEEBY S P. Strategies for in- creasing the operating frequency range of vibration en- ergy harvesters: A review [J]. *Measurement Science & Technology*, 2010, 21(2): 22001.
- [3] GU L, LIVERMORE C. Impact-driven, frequency up- converting coupled vibration energy harvesting device for low frequency operation [J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(4): 45004.
- [4] MOSS S, BARRY A, POWLESLAND I, et al. A broadband vibro-impacting power harvester with sym- metrical piezoelectric bimorph-drops [J]. *Smart Mate- rials and Structures*, 2011, 20(4): 45013.
- [5] RENAUD M, FIORINI P, SCHAIJK R V, et al. Har- vesting 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): 35001.
- [6] WEI Sheng, HU Hong, HE Siyuan. Modeling and ex- perimental investigation of an impact-driven piezoelec- tric energy harvester from human motion [J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(10): 105020.
- [7] 唐可洪, 阙君武, 任玉, 等. 压电发电装置的功率分析与 试验 [J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2009, 39(6): 1551- 1553.
- [8] SHU Y C, LIEN I C. Efficiency of energy conversion for a piezoelectric power harvesting system [J]. *Journal of Micromechanics and Micro Engineering*, 2006, 16 (11): 2429-2431.
- [4] KIM S, CLARK W W, WANG Q M. Piezoelectric en- ergy harvesting using a diaphragm structure [J]. *SPIE*, 2003, 5055: 307-318.
- [5] SODANO H A, INMAN D J, PARK G. A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials [J]. *Shock and Vibration Digest*, 2004, 36(3): 197-205.
- [6] 闫世伟, 杨志刚, 罗洪波, 等. TPMS 用压电发电装置研 究 [J]. *压电与声光*, 2010, 35(5): 774-777.

(上接第 759 页)

YAN Shiwei, YANG Zhigang, LUO Hongbo, et al. Re- search on piezoelectric generator device for TPMS [J].