

收集人体动能的压电俘能器研究

闫世伟¹, 杨志刚²

(1. 空军空降兵学院 军通系, 广西 桂林 541000; 2. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025)

摘要:提出了一种基于压电效应的人体动能转换装置(压电俘能器), 并对其发电能力进行了理论和试验分析。结果表明, 在一定变形范围内, 压电俘能器的输出电能随着激励力的增加而增大; 当激励频率和压电俘能器结构尺寸确定时, 压电俘能器的输出功率随着负载电阻的变化而变化, 且存在最佳的负载使其输出功率达到最大值, 最大输出功率是压电俘能器开路时电压和电容的函数, 最大输出功率与外接滤波电容无关。在 2 Hz(行走频率)激励频率下, 压电俘能器最大输出功率为 0.31 mW。

关键词:人体; 压电效应; 发电; 功率

中图分类号: TN384

文献标识码: A

Research on the Energy Scavenging from Human Body by the Piezoelectric Energy Harvester

YAN Shiwei¹, YANG Zhigang²

(1. Dept. of General Equipment, Air Force Airborne Academy, Guilin 541000, China;

2. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: A piezoelectric energy harvester (PEH) for converting the kinetic energy of human body based on the piezoelectric effect was proposed, and the power generating capacity of the device was studied theoretically and experimentally. The results showed that the output energy of the PEH increased with increasing excitation force in a certain range of deformation. When the excitation frequency and the PEH structure size was determined, the output power of the PEH changed along with the load of different resistance value, and there was an optimal load to obtain maximal electrical energy. The maximum output power was the function of voltage and capacitance in open circuit of PEH. The maximum output power was unrelated with the external filter capacitor. The maximum output power of the PEH was 0.31 mW at excited frequency of 2 Hz (the walking frequency).

Key words: human body; piezoelectric effect; generation; power

0 引言

目前, 以煤炭、石油作为主要燃料的国家, 已面临严重的环境污染, 加上石油资源有限储量减少的双重危机促使世界各国都在努力寻找更具可持续性和环保性的新型能源, 如环境中的动能、太阳能、潮汐能和风能等。太阳能、潮汐能和风能的转化技术已日趋成熟, 但环境中的动能, 特别是人体动能的回收利用研究尚处于起步阶段。众所周知, 人体运动时可产生大量能量, 据研究, 日常活动中上肢活动的功率约为 3 W, 每步行走的功率约为 34 W, 手指敲击键盘时的功率约为 19 mW 等^[1]。如果将这些能

量合理的开发利用, 将是人类应对全球能源危机的另一条出路。为把人体的动能转化成电能, 科学人员相继利用电磁^[2]、静电^[3]、压电^[4-5]等原理开发各种能量捕获装置, 基于不同原理开发的发电装置都有其自身的特点和应用领域, 与其他发电原理相比, 压电发电具有结构简单, 对振动较敏感, 易制作成各种形状和尺寸等优点, 受到人们的广泛青睐。本文依据压电发电原理提出了一种应用在鞋中的压电俘能器, 并对其进行了试验研究。

1 压电俘能器结构及工作原理

图 1 是压电俘能器结构简图。压电俘能器由 2

收稿日期: 2014-10-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277088)

作者简介: 闫世伟(1981-), 男, 吉林农安人, 讲师, 博士, 主要从事压电驱动与控制、微电源、智能机械的研究。E-mail: swyan2008@sina.com。通信作者: 杨志刚(1956-), 男, 吉林长春人, 教授, 博士生导师, 主要从事微小机械与精密机械、压电驱动与控制技术的研究。E-mail: yanshiwei-2000@sohu.com。

片工作在简支支撑条件下的双晶并联型压电发电片(长、宽、高分别为 L 、 W 和 H)组成。由文献[6]可知,在恒定外力 F 作用下,1 片双晶并联型压电发电片(长、宽、高分别为 L 、 W 和 H)在简支支撑条件下(简称压电简支梁,见图 2)所产生的电荷和开路电压分别为

$$Q_p = \frac{3}{4} d_{31} \left(\frac{L}{H} \right)^2 F \quad (1)$$

$$V_p = \frac{3}{16} g_{31} \left(\frac{L}{HW} \right) F \quad (2)$$

根据式(1)、(2)可得压电简支梁的等效电容为

$$C_p = \frac{Q_p}{V_p} = 4\epsilon_{33}^T \frac{LW}{H} \quad (3)$$

式中: g_{31} 为压电电压常数; $d_{31} = g_{31} \epsilon_{33}^T$ 为压电常数; ϵ_{33}^T 为介电常数; $F = KA$, K 为梁的弹性刚度, A 为在恒定外力 F 作用下梁产生的最大位移,也是梁的位移函数 $\mu = A \sin(\omega t)$ 的振幅。

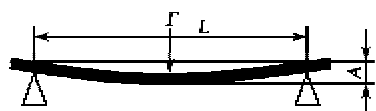


图1 压电简支梁受力变形简图

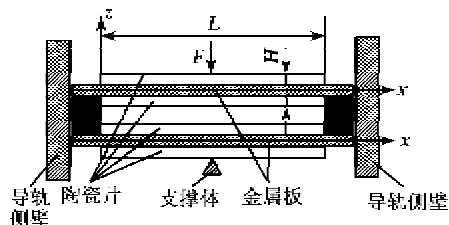


图2 压电俘能器结构简图

忽略阻尼等因素的影响,由式(1)~(3)可知,当施加恒定外力 F (与人脚踩压作用力等效)时,压电俘能器开路电压 V_d 、输出电荷 Q_d 和电能 U_d 可近似表示为

$$V_d = V_p \quad (4)$$

$$Q_d = 2Q_p = \frac{3}{2} d_{31} \left(\frac{L}{H} \right)^2 F \quad (5)$$

$$U_d = \frac{1}{2} Q_d V_d = \frac{9}{64} d_{31} g_{31} \frac{L^3}{H^3 W} F^2 \quad (6)$$

根据式(4)、(5)可得压电俘能器等效电容为

$$C_d = \frac{Q_d}{V_d} = 2C_p = 8\epsilon_{33}^T \frac{LW}{H} \quad (7)$$

当压电俘能器的材料、结构及激励方式确定时,可由式(2)、(5)和(6)求得开路电压、电荷量及电能。

2 压电俘能器输出功率分析

图3为压电俘能器输出端带有整流、滤波电容

C_r (或称为存储电容)和电阻负载 R_L 的等效电路图。图中,下标 R 为负载电阻, I 为总电流, I_{R_1} 和 I_{R_2} 为流经整流桥两端的电流, I_p 为流经电容 C_p 的电流。由图可知,只有当压电俘能器两端电压绝对值大于滤波电容两端电压时,整流桥才能导通,且有 $V_d = V_R$ [7]。假设压电俘能器产生的电流和电压不受整流滤波电路的影响,则压电俘能器输出电压、电荷及位移函数波形如图4所示,此时整流桥两端的电流分别为

$$I_{R_1} = \frac{dQ_d}{dt} - C_d \frac{dV_d}{dt} \quad (8)$$

$$I_{R_2} = \frac{V_R}{R_L} + C_r \frac{dV_R}{dt} \quad (9)$$

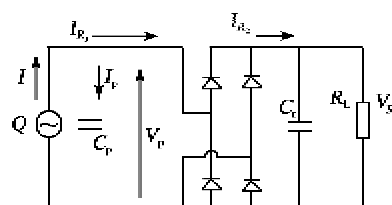


图3 能量转换系统等效模型

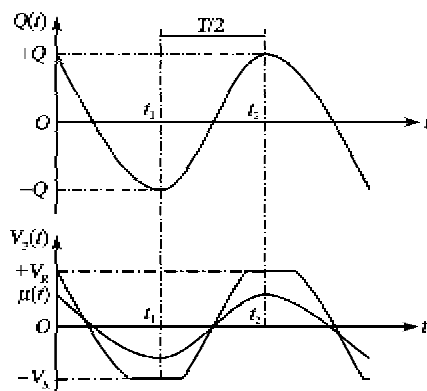


图4 位移、电压和电流输出波形图

在稳态情况下,半个周期($t_2 - t_1 = T/2$, $T = 2\pi/\omega$)内流经 C_r 两端平均电荷为0,整流桥两端的电荷量相等($Q_1 = Q_2$) [8], 且

$$Q_1 = \int_{t_1}^{t_2} I_{R_1} dt = 2(Q_d - C_d V_d) = 2(Q_d - C_d V_R) \quad (10)$$

$$Q_2 = \int_{t_1}^{t_2} I_{R_2} dt = \frac{T}{2} \frac{V_R}{R_L} \quad (11)$$

这里周期 $T = 2\pi/\omega$, ω 为角频率,联立式(10)和(11)可得负载电压及输出功率为

$$V_R = \frac{\omega R_L C_d}{\omega R_L C_d + \pi/2} V_d \quad (12)$$

$$P = 2 \frac{V_R^2}{R_L} = 2 \frac{\omega^2 R_L C_d^2 V_d^2}{(\omega R_L C_d + \pi/2)^2} \quad (13)$$

由 $\partial P/\partial R_L=0$,可求得最佳负载 R_Δ 和最大输出功率 $P_{\max}$ 分别为

$$R_\Delta = \frac{\pi}{2} \frac{1}{\omega C_d} \quad (14)$$

$$P_{\max} = \frac{1}{\pi} \omega C_d V_d^2 \quad (15)$$

式(12)、(13)表明,压电俘能器的输出电压随负载变化而变化,且存在最佳负载使其输出功率达到最大值。从式(15)中可看出,当激励频率确定时,最大输出功率是压电俘能器开路时电压和电容的函数,最大输出功率与外接滤波电容无关,因此可根据负载及所需功率进行压电俘能器优化设计。

3 数值模拟与试验分析

为分析压电俘能器的发电能力及各外部因素对其发电能力的影响,进行了相关试验研究。为使模拟和测试更接近人的实际运动情况,以下试验均在2 Hz激励频率下进行,并给出部分相关曲线。压电陶瓷片尺寸为40 mm×30 mm×0.15 mm,基板尺寸为50 mm×30 mm×0.2 mm,压电俘能器相关材料参数如表1所示。

表1 材料性能参数

材料	$E/$ (GN/m)	$d_{31}/$ (pC/m)	$\epsilon_{33}^T/$ (nF/m)	$\rho/$ (g/cm ³)
磷青铜	120.4			8.8
PZT-5H	82.0	-280	20	7.6

图5为不同 F 作用下,压电俘能器在开路状态时的电能输出曲线。由图可知,随着 F 的增大,电能输出逐渐增加,但在 $F>5$ N时,电能输出量随 F 的增加而逐渐趋缓,这主要是因为压电陶瓷硬而脆,变形量过大会造成碎裂,所以压电俘能器在设计过程中设置了限位装置,使压电发电片受力弯曲后始终处于安全变形范围内,从而确保压电发电片的使用寿命,但同时也造成了电能输出并不是随着力的增加而无限增大。

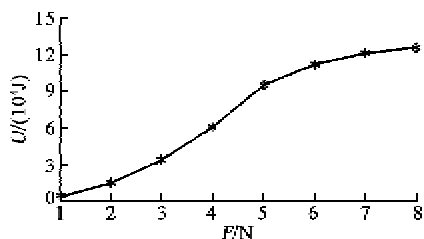


图5 激励力与输出电能的关系

图6为不同负载条件下,压电俘能器输出电压与负载电阻的关系曲线。从曲线的变化趋势可知,

存在一个最佳的负载使压电俘能器输出功率最大,最佳理论负载值是2.04 MΩ,所对应的最大输出功率为0.3 mW;实验测得的最佳负载值为2.2 MΩ,所对应的最大输出功率为0.31 mW,由此可见试验分析的结果和理论分析的结果比较接近,证明了理论分析的正确性。从图中还可看出,在该种激励方式下,滤波电容对输出功率无明显影响。

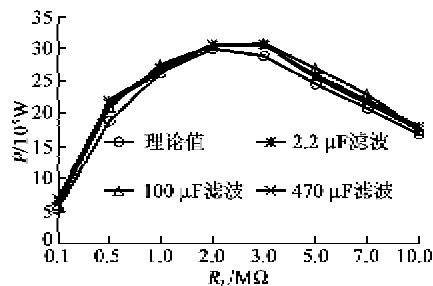


图6 不同负载时的功率输出特性

4 结束语

本文提出一种应用在鞋里收集人体动能的压电俘能器,建立了功率计算模型,并进行了数值模拟和试验验证。理论分析与试验测试结果表明,在压电发电片允许变形范围内,压电俘能器的输出电能随着激励力的增加而增大;当激励频率和压电俘能器结构确定时,压电俘能器的输出功率随着负载变化而变化,且存在最佳的负载使其输出功率达到最大值,最大输出功率是压电俘能器开路时电压和电容的函数,且与外接滤波电容无关;在2 Hz(行走频率)激励频率下压电俘能器最大输出功率为0.31 mW。因此,可根据负载和所需功率情况进行压电俘能器结构设计,同时通过本文的研究进一步证明利用压电效应构造压电发电装置收集人体运动时的能量是一种行之有效的方法,也必将成为能量回收的研究热点。

参考文献:

- [1] GONZALEZ J L, MOLL F, RUBIO A. Human powered piezoelectric batteries to supply power of wearable's electronic devices[J]. Int J Soc Materials Eng Resources, 2002, 10(1): 34-46.
- [2] GL YNNE-JONES P, TUDOR M J, BEEBY S P, et al. An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems[J]. Sensors and Actuators A, 2004, 110(2): 344-349.
- [3] MITCHESON P D, MIAO P, STARK B H, et al. MEMS electrostatic micro-power generator for low frequency operation [J]. Sensors and Actuators A, 2004, 115(6): 523-529.

(下转第763页)