

一种冲击式悬臂梁压电俘能器的设计与实验

汪红兵, 孙春华

(苏州市职业大学 机电工程学院, 江苏 苏州 215104)

摘要:为提高悬臂梁压电俘能器的俘能效率,提出了一种冲击式悬臂梁压电俘能器。该俘能器包括多个悬臂梁压电振子,可在风力、人体动力能及环境振动能等多种外载荷作用下产生电能。俘能器的核心部件是悬臂梁压电振子,通过冲击实验发现悬臂梁压电振子在周期性冲击载荷作用下拓宽了共振频率,同时提高了输出功率。测试结果显示在频率约为 21 Hz 的方波冲击信号下,外接电阻为 50 k Ω 时,单个悬臂压电俘能器最大输出功率可达 0.28 mW;当频率分别为 5 Hz、8.5 Hz 时,还可分别输出 0.07 mW 和 0.17 mW 的功率,俘能器出现多个峰值电功率。研究表明所设计的冲击式压电俘能器可有效提高俘能效率。

关键词:冲击;悬臂梁;压电俘能器;共振;振子

中图分类号:TN384

文献标识码:A

Design and Experiment on an Impact Cantilever Piezoelectric Harvester

WANG Hongbing, SUN Chunhua

(Dept. of Mechanical & Electrical Engineering, Suzhou Vocational University, Suzhou 215104, China)

Abstract: An impact cantilever piezoelectric harvester which consists of multiple cantilever piezoelectric vibrator was proposed to improve the harvesting efficiency. The harvester could generate electric power under the functions of some outer loads such as wind, body kinetic energy and environmental vibration energy. The core part of the harvester was the cantilever piezoelectric vibrator. The impact test was carried out and the result shows that the resonance frequency is broadened by the action of the periodic impact load and the output power was improved. The test results show that the maximal output power of the single cantilever piezoelectric vibrator was about 0.28 mW when the frequency of the square wave impact signal was about 21 Hz and the load was 50 k Ω . When the frequency was about 5 Hz and 8.5 Hz, the output power was 0.07 mW and 0.17 mW respectively. The research showed that the impact cantilever piezoelectric harvester could improve the power harvesting effectively.

Key words: impact; cantilever; piezoelectric harvester; resonance; vibrator

0 引言

近年来,随着大规模分布式无线传感系统及微功率器的快速发展,传统化学电池供能方式虽在一定程度上满足需求,但存在如体积较大,寿命有限,需要定期更换等缺点^[1]。利用环境中的能量提供实时电能供给成为当前国内外的一个研究热点^[2-3]。现用于收集环境振动能量的装置主要有电磁式^[4]、静电式^[5]和压电式^[6-7]等。压电式相对于其他能量收集装置具有结构简单、不发热、无电磁干扰、绿色环保及易于微型化等优点。压电式能量收集装置只有处于共振状态下才具有较高的能量转换效率,但

环境的振动频率只在一定的范围内变化,故而压电式能量收集装置普遍存在发电效率较低的情况,这严重制约了压电式能量采集装置的大规模应用。因此,提高压电式能量采集装置的发电效率是当前迫切需要解决的问题。

悬臂梁压电振子因具有刚度低,振动频率低,能量转化效率高和易集成化等优点而受到广泛关注。从现有的研究情况来看,对悬臂梁压电振子的应用只局限在受单一外载荷的作用环境,这降低了其发电效率。因此,本文设计了能适应多种形式外载荷的冲击式压电俘能器,该装置以多个悬臂梁压电振子为发电部件,可在风力、人体动力能及环境振动能

收稿日期:2016-07-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175359);2014年度江苏省第四期“333工程”科研基金资助项目(BRA2014086);“青蓝工程”基金资助项目

作者简介:汪红兵(1977-),男,安徽省舒城县人,副教授,硕士,主要从事压电驱动与压电俘能技术的研究。

等多种外载荷冲击作用下发电,研究内容为压电发电技术迈向实用化提供了有力的技术支持。

1 冲击式悬臂梁压电俘能器的工作原理

所设计的冲击式悬臂梁压电俘能器如图1所示。悬臂梁压电振子如图2所示。

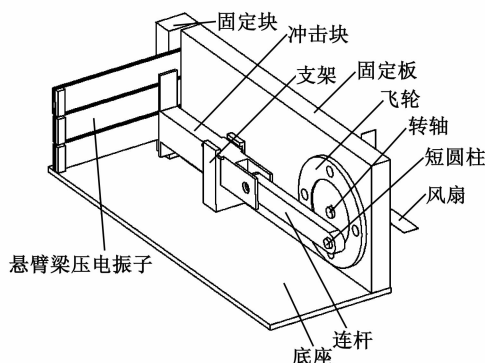


图1 冲击式悬臂梁压电俘能器的结构

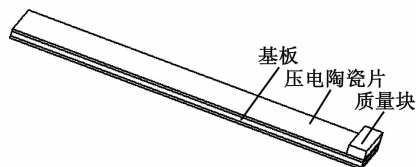


图2 悬臂梁压电振子

该俘能器在工作时,可将外力转换为冲击块对悬臂梁压电振子的碰撞,外力带动风扇旋转,风扇带动转轴旋转,从而使转轴上的飞轮旋转。飞轮旋转时带动连杆做平面内运动,连杆带动冲击杆做平面内运动,冲击块在支架的约束下,只做水平方向的直线往复运动。由于冲击块来回的直线运动,冲击杆的尾部不断冲击悬臂梁压电振子靠近夹持端的位置,悬臂梁压电振子在冲击块的冲击下发生变形,压电陶瓷片的两个表面产生电势差,可提供电能。

基板两面可分别粘贴压电陶瓷片,成为双晶压电振子;也可将压电陶瓷片粘贴在基板的一面,成为单晶压电振子。质量块压电振子的自由端,可以降低悬臂梁压电振子的固有频率,使其更易发生共振。由于环境外力的不稳定性,冲击块的作用频率也在一定范围内变化。将多个悬臂梁压电振子设计成不同尺寸,使得各个悬臂梁压电振子具有不同的固有频率,这样在冲击块的作用频率变化时,可使多个悬臂梁压电振子中的某一个发生共振,从而提高悬臂梁压电振子的输出电压。

该俘能器可在风力作用下用于发电,还可在一些周围有振动源的环境下工作,悬臂梁压电振子可在环境振动激励下变形产生电能。在野外或其他特殊场合下,还可利用人力直接拨动悬臂梁压电振子

或风扇,使悬臂梁压电振子变形产生电能,为应急使用。

该冲击式压电俘能器可满足在多种形式载荷作用下进行发电。该装置设计了传动系统将外载荷通过冲击块作用到悬臂梁压电振子上,装置的核心部件是悬臂梁压电振子,直接影响装置的发电能力。因此,本文将对悬臂梁压电振子进行深入分析,以提高装置的发电能力。

2 冲击式悬臂梁压电俘能器的压电效应

压电陶瓷材料具有脆性特点,当所受外载荷过大时,超过材料的许用应力便会发生碎裂,所以,压电俘能器中的悬臂梁压电振子需要设置金属弹性梁作为基板。在此选用单晶悬臂梁压电振子,工作过程如图3所示。

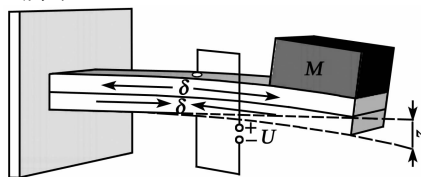


图3 悬臂梁压电振子工作过程示意图

金属弹性梁的上表面贴有压电陶瓷片,一端固定在基座中,一端自由,自由端附有质量块M。当振子的自由端在外载荷的作用下做上、下弯曲振动时,振子自由端发生弯曲变形 z ,压电陶瓷片的上、下两表面间产生电压 U ,对外输出电能。悬臂梁发生弯曲变形时,压电陶瓷发生切向应变 δ ,切应力与极化方向垂直,因此,悬臂梁压电振子工作在 d_{31} 模式。

压电材料的边界条件不同,其描述的压电方程也不同。冲击式悬臂梁压电俘能器的压电效应^[8]为

$$S_i = s_{ij}^E T_j + d_{ni} E_n \quad (1)$$

$$D_m = d_m T_j + \epsilon_{mn}^T E_n \quad (2)$$

式中: $i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$; $m, n = 1, 2, 3$; D 为电位移; E 为电场强度; d 为压电常数矩阵; S 和 T 分别为应变和应力; ϵ^T 为应力恒定时的自由介电常数矩阵; s^E 为电场恒定时短路弹性柔顺系数矩阵。

俘能器的机电耦合效应由 T 和 S 等机械量与场强 E 和 D 等电学量相互耦合作用而形成。在电学短路(即 $E=0$)情况下,通过正压电效应来产生自由电荷。

3 悬臂梁压电振子模态分析

利用Pro/E软件和有限元分析软件ANSYS之间的无缝对接功能,将Pro/E中的三维几何模型直接传入到ANSYS中,在ANSYS中建立单晶振子

的有限元网格模型,如图4所示。

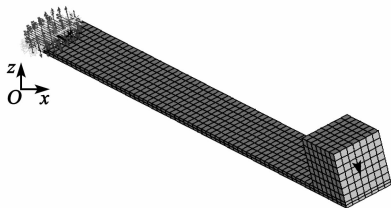


图4 悬臂梁压电振子有限元模型

压电陶瓷需选用机电耦合单元 Solid 5, 可用于计算压电陶瓷中的机电耦合。基板和质量块可选用单元 Solid 45, 只包含应力和应变信息。基板和质量块采用 45 钢, 其密度为 $7\,860\text{ kg/m}^3$, 弹性模量为 209 GPa , 泊松比为 0.267 。压电陶瓷片采用 PZT-8, 材料属性如下:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T = \begin{bmatrix} 7.124 & & & & & \\ & 7.124 & & & & \\ & & 5.841 & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \end{bmatrix} \times (10^{-9}\text{ F/m}) \quad (3)$$

$$\boldsymbol{d} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 10.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10.5 & 0 & 0 \\ -4.1 & -4.1 & 14.1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times (10^{-10}\text{ C/m}^2) \quad (4)$$

$$\boldsymbol{c} = \begin{bmatrix} 13.2 & 7.1 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ & 13.2 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ & & 11.5 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 3 & 0 & 0 \\ & & & & 2.6 & 0 \\ & & & & & 2.6 \end{bmatrix} \times (10^{10}\text{ Pa}) \quad (5)$$

式中 $\boldsymbol{c}$ 为刚度矩阵。

振子一端固定约束, 一端自由。振子的初始结构尺寸参数如表 1 所示。

表1 振子的结构参数

参数	宽度/mm	高度/mm	长度/mm
悬臂梁	7	0.2	70
陶瓷片	7	0.2	70
质量块	7	7.0	7

对振子有限元模型进行模态分析, 模态分析结果只关注低阶模态, 因为在低频振动环境中只有低阶模态易被激发, 因此, 振子的一阶弯振的模态振型及频率如图 5 所示。由图可见, 一阶弯振的振型为一端固定约束, 一端自由振动, 其频率为 20.394 Hz 。该振型及其所在频率是振子的工作振型和频率。

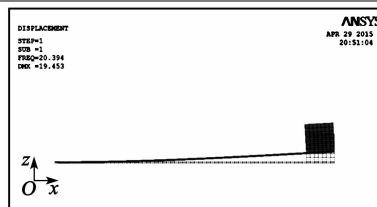


图5 振子一阶弯振振型与频率

4 悬臂梁压电振子在冲击载荷作用下的实验研究

对该悬臂梁压电振子频率特性和发电能力进行实验, 实验装置如图 6 所示。实验装置包括 GF100 功率放大器、激振器、TFG2015G DDS 函数发生器和示波器。

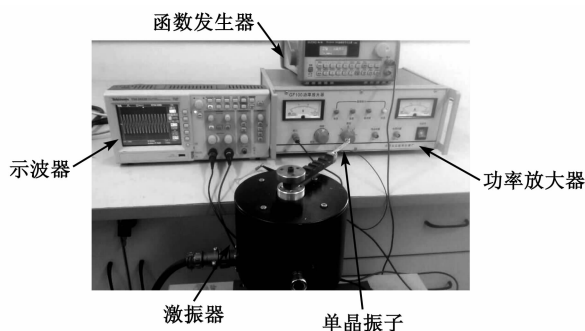


图6 单晶悬臂梁压电振子实物

4.1 谐波载荷和冲击载荷的俘能效果比较

图 6 中, 函数发生器产生 1 个正弦波形信号, 信号的频率和幅值可调。该信号的强度较弱, 通过功率放大器放大信号强度, 然后传到激振器内, 通过调整功率放大器来调整激振器的振幅。悬臂梁压电振子一端固定在激振器上, 另一端自由, 在固定端正弦波载荷激励下, 悬臂梁压电振子弯曲振动产生电能。改变函数发生器里的正弦波信号频率, 让其在 $0.5 \sim 38\text{ Hz}$ 内变化, 通过示波器观察单晶振子最大输出电压, 其最大输出电压随频率的变化如图 7 所示。

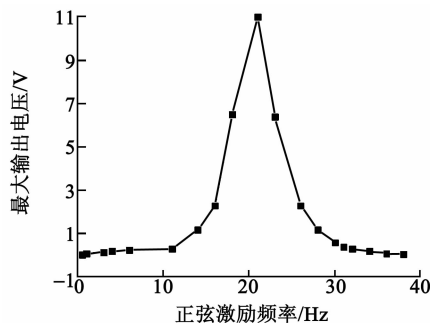


图7 振子最大输出电压随正弦波频率的变化图

由图 7 可见, 当频率达到 21 Hz 时, 输出电压最大, 此时悬臂梁压电振子接近共振状态。与图 5 中

的一阶弯振频率 20.394 Hz 接近,可见此时正是一阶弯振被激发出来产生共振。

调整实验装置,对悬臂梁压电振子承受方波的冲击载荷进行实验,实验装置如图 8 所示。由图可见,悬臂梁压电振子固定在支架上,碰撞杆固定在激振器上,函数发生器发出方波信号,经功率放大器作用在激振器上,激振器上的碰撞杆撞击悬臂梁压电振子,悬臂梁压电振子发生弯曲振动产生电能。当碰撞杆作用在悬臂梁压电振子的自由端时,改变激励频率,得到最大输出电压随频率变化的曲线如图 9 所示。



碰撞杆

图8 振子承受冲击载荷的实验装置

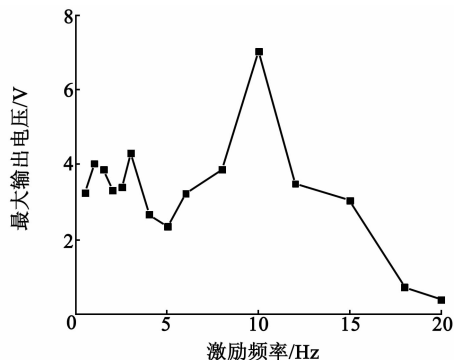


图9 振子最大输出电压随激励频率的变化图

与正弦激励作用下在频率约 21 Hz 获得最大电压相比,碰撞形式下的冲击振动在频率约 10 Hz 时可获得相当量的电压值,降低了有效工作频率,且频率范围得到拓宽。由此可见,碰撞式悬臂压电俘能振子更适于低频振动环境下俘获能量,且可在很宽的范围俘获较高的能量。

4.2 冲击载荷作用位置影响

图 8 中,激振器上的碰撞杆碰撞悬臂梁压电振子的不同位置,分为两种方式:

- 1) 将冲击作用于悬臂梁压电振子的自由端。
- 2) 将冲击作用于悬臂压电俘能器的夹持端。

图 10 为在相同冲击条件,两种方式下的悬臂压电俘能器被激发出的最大电压值。由图可见,相比方式 1,方式 2 可获得较高的电压。这说明冲击式

悬臂压电俘能振子更适于低频振动环境下俘获能量,且可在很宽的范围俘获较高的能量,冲击位置应靠近夹持端。

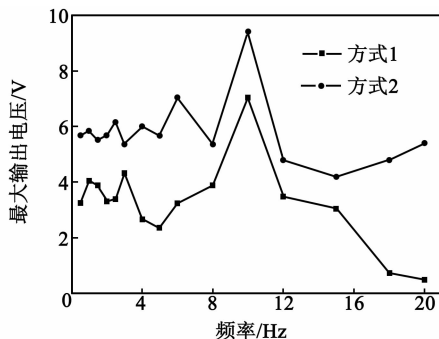


图10 不同冲击位置下的电压

在图 8 所示的实验装置中,调整碰撞杆对悬臂梁压电振子的冲击位置,使其作用在悬臂梁压电振子靠近夹持端位置,函数发生器发出方波信号,通过功率放大器作用产生激励电压信号施加在激振器上,固定在激振器上的碰撞杆产生振幅约 1 mm 的振动。当激励信号频率为 21 Hz,外接电阻为 50 k Ω 时,单个悬臂压电俘能器所俘获的最大电能可达到 0.28 mW;在激励信号频率分别为 5 Hz、8.5 Hz 时,可分别输出 0.07 mW 和 0.17 mW 的电能,俘能器出现多个峰值电功率。

5 结论

1) 设计了一种冲击式悬臂梁压电俘能器,外载荷通过冲击块作用到悬臂梁压电振子上进行发电,可满足在多种形式载荷作用下进行发电。

2) 对单个悬臂梁压电振子分别在正弦波载荷和方波载荷冲击作用下的俘能效果进行实验研究。在方波载荷的冲击作用下,降低了有效工作频率,并拓宽了工作频率范围。

3) 通过实验研究了方波载荷对单个悬臂梁压电振子的不同位置进行冲击作用时的俘能效果。结果表明作用于悬臂压电俘能器的夹持端比自由端效果更好。

4) 实验研究表明在频率约为 21 Hz 的方波冲击信号下,当外接电阻为 50 k Ω 时,单个悬臂压电俘能器最大输出功率可达到 0.28 mW;当频率分别为 5 Hz、8.5 Hz 时,还可分别输出 0.07 mW 和 0.17 mW 的功率,俘能器出现多个峰值电功率。

(下转第 432 页)