

基于波纹梁的两自由度低频振动能量收集装置

王海, 姚刚, 邱皖群, 杨春来, 付邦晨

(安徽工程大学 机械与汽车工程学院, 安徽 芜湖 241000)

摘要:为改善压电式振动能量收集装置固有频率高、能量收集效率低等问题,设计了一种基于波纹梁式压电振子的两自由度振动能量收集装置,并通过理论建模和数值仿真分析其能量收集特性。分析结果表明:与传统的单自由度和两自由度压电振子相比,含有波纹梁的压电振子的固有频率最低,且前五阶固有频率均为 0~60 Hz;其中,第四阶固有频率为 45.92 Hz,比单自由度压电振子低 419.9 Hz,比传统两自由度压电振子低 55.1 Hz。同时,在相同条件下波纹梁式两自由度压电振子输出的电压最大,可达到 28 V。

关键词:机械设计;压电能量收集;波纹梁;低频;两自由度

中图分类号:TH132;TN384 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2017)04-1144-05

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb201704019

Performance-enhanced two-degree-of-freedom energy harvester for low frequency vibration utilizing corrugated cantilever beam

WANG Hai, YAO Gang, QIU Wan-qun, YANG Chun-lai, FU Bang-chen

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract: Traditional Piezoelectric Energy Harvester (PEH) has high natural frequency and low electromechanical conversion efficiency. To overcome this problem a corrugate two-degree-of-freedom (2DOF) PEH is proposed. The energy harvesting characteristics are analyzed using theoretical modeling and numerical simulation. Results show that compared to 1DOF PEH and traditional 2DOF PEH, corrugate 2DOF PEH can achieve fifth order of resonance frequency in the range of 0 to 60 Hz. The fourth resonance frequency of the corrugate 2DOF PEH is 45.92 Hz, which is 419.9 Hz lower than that of 1DOF PEH, and 55.1 Hz lower than that of traditional 2DOF PEH. Meanwhile, the output voltage of the corrugate 2DOF PEH can be controlled as high as 28 V in the same condition, which is the highest voltage among the three harvesters.

Key words: mechanical design; piezoelectric energy harvesting; corrugated cantilevered beam; low frequency; two-degree-of-freedom

0 引言

随着无线传感网络的发展,传感器节点已

被应用于环境监测、农业应用、生命健康以及交通管控等领域,而节点供能是目前亟待解决的关键问题。传统的节点供能方式存在容量小、更换难

收稿日期:2016-03-23.

基金项目:国家自然科学基金项目(51275001,51375469).

作者简介:王海(1976-),男,教授,博士.研究方向:微机械. E-mail:wanghai.20000@163.com

等不足,采用环境能量获取的方式是一种有效解决途径。目前,能量收集方式分为压电式^[1,2]、电磁式^[3,4]和静电式^[5,6]等,其中压电式能量收集方式因结构简单、能量密度高、环境友好、不受电磁干扰等优点而被广泛应用于振动能量收集技术。

车辆驶过的路面、工作中的机器、运动的人体等都是环境中常见的振动源^[7],它们振动频率约为 0~250 Hz^[8],属于低频振动。因此,用于振动能量收集的压电振子在此范围内应有多阶谐振频率或较宽的工作频带。传统的单自由度压电振子因其结构紧凑、简单而被广泛应用,但其仍然存在固有频率高、能量收集效率低等不足。

近年来,为了解决此类问题国内外学者做了很多相关研究。如管青春^[9]提出一种 H 形质量块压电回收结构,提高了压电片的利用率和能量收集效率。Leland 等^[10]通过施加轴向预应力来改变装置的固有频率。Wu 等^[11]设计了一种断路器式两自由度压电收集结构,有效拓宽了工作频带。目前的压电能量收集装置虽然在一定程度上降低了固有频率,但最多只有两阶谐振频率可用,且现有的技术使用的压电材料多为脆性材料 PZT,使用寿命短。

针对以上问题,本文设计了一种基于 PVDF 材料的波纹梁两自由度低频振动能量收集装置。首先,建立波纹梁两自由度压电振子的理论模型。然后,在理论模型的基础上利用 COMSOL 软件对其能量获取特性进行分析。最后,将仿真分析的结果与传统单自由度和两自由度压电振子俘能特性进行对比。

1 压电振子的结构与理论分析

1.1 波纹梁压电振子的结构

图 1 为波纹梁压电振子的尺寸结构图。其中,内梁为波纹形压电双晶片梁,由上、下两层 PVDF 薄膜和中间铝制基底组成;外梁是长直的铝梁。内、外梁的自由端都附着有不同尺寸的钢块作为质量块,且外梁的右端为固定端。

1.2 波纹梁压电振子的理论分析

波纹梁压电振子能量收集系统可以等效为一个二阶弹簧-质量线性系统,如图 2 所示,其中, m_1 、 m_2 分别是内、外梁上附着的钢块质量; x_1 、 x_2 分别是 m_1 、 m_2 的位移, k_1 、 k_2 表示内、外梁的刚度。

根据欧拉-伯努利梁理论可得波纹梁压电振子自由振动时的动力学方程如下:

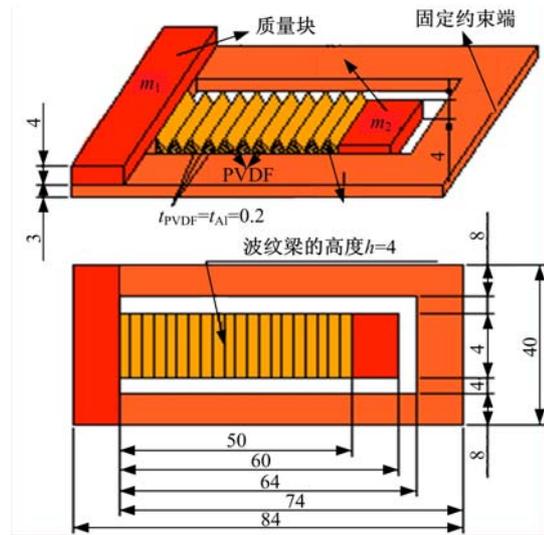


图 1 波纹梁两自由度压电振子的结构尺寸图

Fig. 1 Structure of corrugated 2-DOF piezoelectric energy harvester

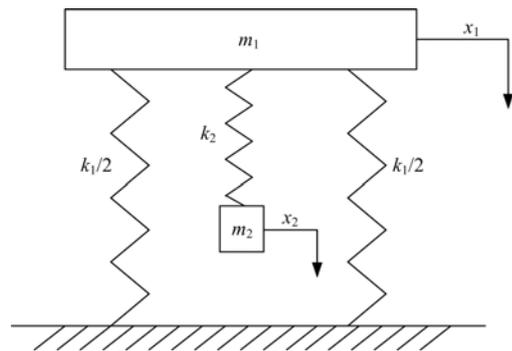


图 2 波纹梁两自由度压电振子的简化模型

Fig. 2 Schematic diagram of a corrugated 2-DOF system

$$\begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

通过简化后可得式(1)的特征函数如下:

$$\lambda^2 - \left[1 + b + \frac{b}{a} \right] \frac{k_1}{m_1} \lambda + \frac{b}{a} \left(\frac{k_1}{m_1} \right)^2 = 0 \quad (2)$$

$$k_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{3EI/L_1^3}, k_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n}{s} \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)} \frac{3}{L_2^3}} \quad (3)$$

式中:无量纲参数 a 、 b 分别为 m_2/m_1 、 k_2/k_1 ; L_1 、 L_2 分别表示内、外梁的长度; EI 表示压电振子的抗弯刚度; μ 为材料的泊松比; s 为 y 轴正方向上的波长,如图 3 所示; n 是 s 在 x 轴方向上的长度, t 是波纹梁的厚度。将式(3)代入式(2)中可得特征方程的根:

$$\begin{cases} \lambda_1 = -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{(a+ab+b)^2 - 4ab}}{2(a+ab+b)} \\ \lambda_2 = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{(a+ab+b)^2 - 4ab}}{2(a+ab+b)} \end{cases} \quad (4)$$

最后,可得波纹梁压电振子的固有频率为:

$$\omega_1 = \sqrt{\lambda_1}, \omega_2 = \sqrt{\lambda_2} \quad (5)$$

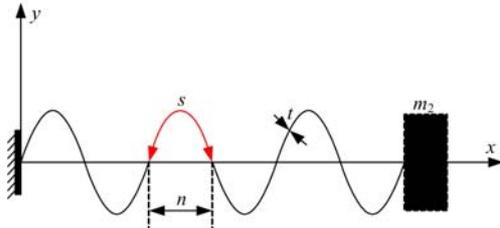


图 3 波纹梁的简化图

Fig. 3 Geometry of corrugated inner beam

利用 COMSOL 软件对波纹梁压电振子进行谐响应和俘能性能分析,验证波纹梁压电振子的低频率振动特性,并与传统单自由度和两自由度压电振子对比。传统单自由度和两自由度压电振子的结构尺寸如图 4 和图 5 所示。

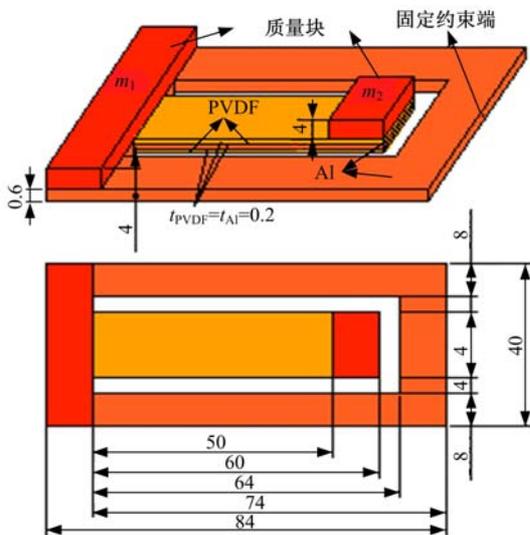


图 4 传统两自由度压电振子的结构尺寸图

Fig. 4 Structure and dimensions of conventional two-degree-of-freedom cantilevered beam

2 数值仿真分析

对 3 种结构的压电振子进行数值仿真分析,并对比它们的固有频率值和输出电压值。首先,在 COMSOL 中建立 3 种压电振子的仿真模型;然后,定义材料的属性,具体参数如表 1 所示;最后,对模型进行网格划分并分析计算。3 种压电

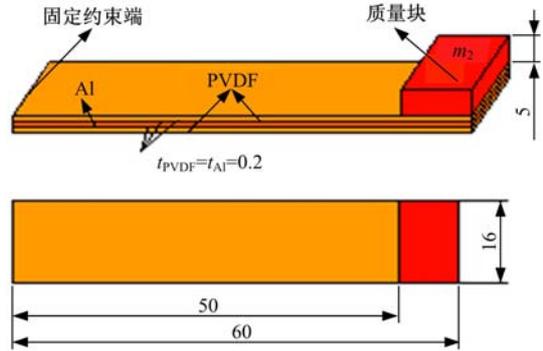


图 5 传统单自由度压电振子的结构尺寸图

Fig. 5 Structure and dimensions of conventional single-degree-of-freedom cantilevered beam

振子谐响应分析的结果如图 6 所示。

表 1 材料属性参数

Table 1 Parameters of material property

材料	密度/ (kg · m ⁻³)	弹性模量 /GPa	泊松比	压电系数 /(pC · N ⁻¹)	相对介电 常数 ε/ε ₀
PVDF	1780	3	0.35	21	9.5
铝	2700	70	0.33	—	—
钢	7850	200	0.33	—	—

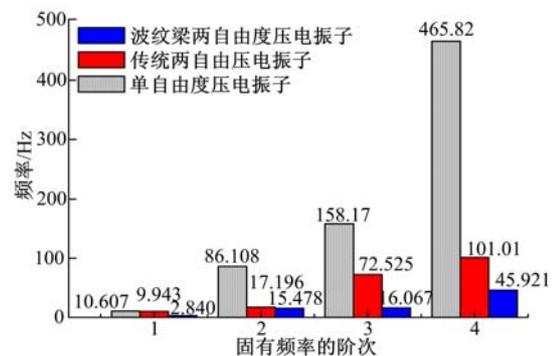


图 6 3 种压电振子的各阶固有频率对比图

Fig. 6 Resonance frequency of three piezoelectric energy harvesters

由图 6 可以看出,波纹梁两自由度压电振子的固有频率最低。其中第四阶固有频率为 45.92 Hz,比传统单自由度压电振子降低 419.9 Hz,比传统两自由度压电振子降低 55.1 Hz。

图 7 为波纹梁两自由度压电振子的五阶振型图。可以看出,波纹梁压电振子的前五阶固有频率均在 60 Hz 以内。其中第二阶和第三阶固有频率相近,相差 0.59 Hz;第四阶和第五阶相近,仅相差 0.27 Hz。

3 种压电振子谐响应分析的结果表明,波纹

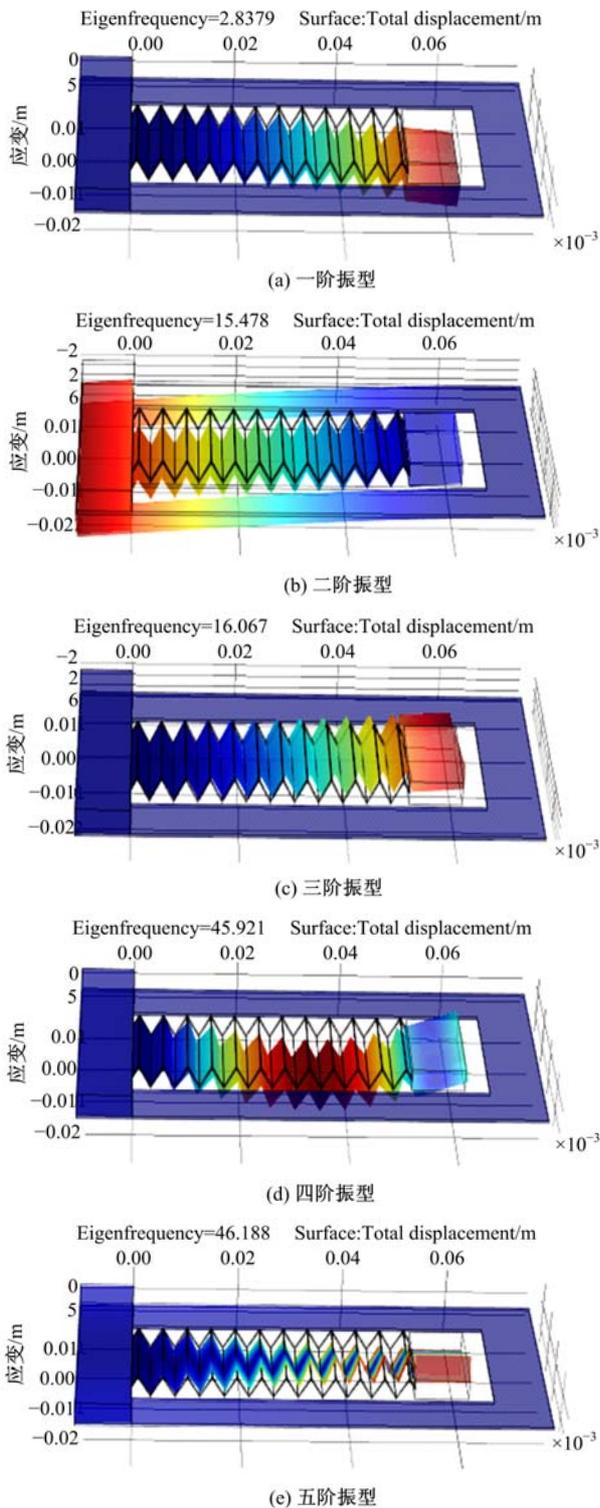


图 7 波纹梁两自由度压电振子的振型图

Fig. 7 Modal analysis of corrugated 2-DOF PEHs

梁两自由度压电振子的固有频率最低,能在 0~60 Hz 频段内获得五阶谐振。

图 8 为 3 种结构的压电振子末端位移随频率变化的曲线图。可以看出,波纹梁两自由度压电振子末端位移最大,为 56 mm,比单自由度压电

振子大 22 mm,比传统两自由度压电振子大 11 mm。波纹梁压电振子在 0~60 Hz 的频段内有 3 个明显的峰值,这 3 个峰值对应了压电振子的五阶谐振频率。其中第一个峰值发生在一阶谐振处,第二个峰值发生在二、三阶谐振处,第三个峰值发生在四、五阶谐振处。

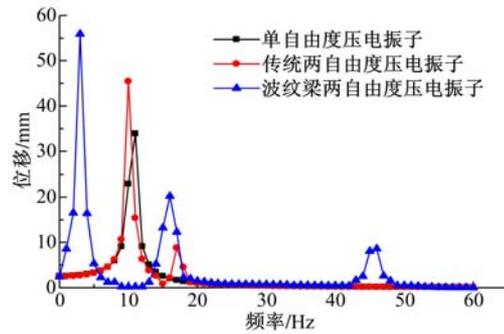


图 8 3 种压电振子末端位移随频率变化的曲线图

Fig. 8 Displacement curves of three PEHs versus frequency

图 9 为 3 种压电振子输出的电压值随频率变化的曲线图,变化规律与末端位移相似。可以看出,波纹梁压电振子在一阶谐振频率处有最大输出电压 28 V,高于单自由度压电振子 15 V,高于传统两自由度压电振子 10 V。且波纹梁压电振子可以在低频段内获取多个谐振频率,增加了能量收集的效率。

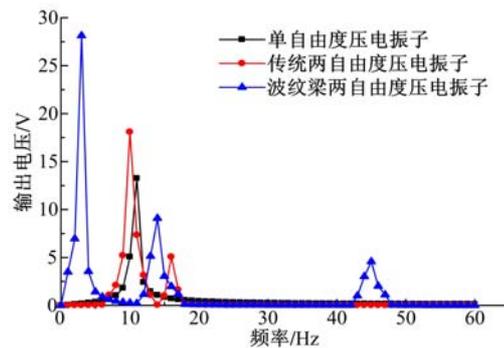


图 9 3 种压电振子的输出电压随频率变化的曲线图

Fig. 9 Output voltage curves of three PEHs versus frequency

为了得到 3 种压电振子在工作环境下的能量采集情况,本文导入了如图 10 所示的随机信号来模拟工作环境下的实际振动源。图 11 为 3 种压电振子在 1~50 Hz 的随机振动下输出的电压值随时间的变化曲线图。可以看出,波纹梁压电振子最大输出电压为 28 V,传统两自由度压电振子的最大输出电压为 21 V,单自由度压电振子的最大输出电压为 16 V。

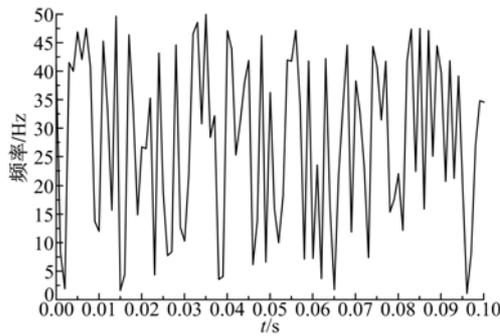


图 10 随机信号的能谱图

Fig. 10 Energy spectrum of random signal

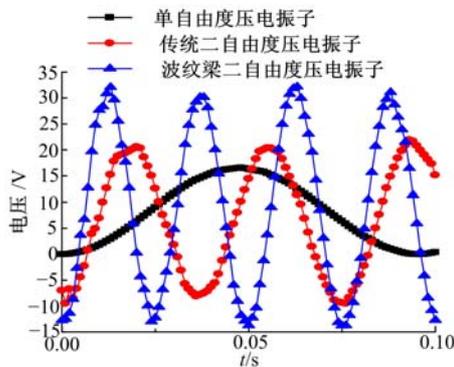


图 11 3 种压电振子在随机振动下输出电压随时间变化的曲线图

Fig. 11 Output voltage curves of three PEHs versus time

3 结束语

本文对波纹梁两自由度压电能量收集系统进行了理论和仿真分析,并与传统单自由度和两自由度压电振子进行对比。分析结果表明,波纹梁两自由度压电振子的固有频率最低,一阶固有频率仅为 2.8 Hz,且能在 0~60 Hz 频段内获得五阶谐振。波纹梁两自由度压电振子输出的电压值最大,为 28 V。因此,波纹梁两自由度压电振子结构可以有效降低能量收集装置的固有频率,增加低频段谐振阶数,优化了俘能效果,提高了能量收集效率。后续工作将致力于设计多方向振动能量收集系统以及寻找拓宽频带的方法。

参考文献:

[1] Anton S R, Sodano H A. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006) [J]. Smart Material and Structures, 2007, 16(3):1-21.
 [2] 闫世伟,杨志刚,阚君武,等. 压电陶瓷能量转换系

统[J]. 吉林大学学报:工学版, 2008, 38(2):344-348.
 Yan Shi-wei, Yang Zhi-gang, Kan Jun-wu, et al. Energy conversion system with piezoelectric ceramic [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2008, 38(2):344-348.
 [3] Elvin N G, Elvin A A. An experimentally validated electromagnetic energy harvester [J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(10):2314-2324.
 [4] Glynne-Jones P, Tudor M J, Beeby S P, et al. An electromagnetic vibration-powered generator for intelligent sensor systems[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2004, 110(1-3):344-349.
 [5] Sheu G J, Yang S M, Lee T. Development of a low frequency electrostatic comb-drive energy harvester compatible to soc design by cmos process[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011, 167(1):70-76.
 [6] Naruse Y, Matsubara N, Mabuchi K, et al. Electrostatic micropower generation from low-frequency vibration such as human motion[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2008, 19(9):19-22.
 [7] Knight C, Joshua D, Sam B. Energy options for wireless sensor nodes [J]. Sensors, 2008, 8(12):8037-8066.
 [8] Chen S N, Wang G J, Chien M C. Analytical modeling of piezoelectric vibration-induced micro power generator[J]. Mechatronics, 2006, 16(9):379-387.
 [9] 管青春. 悬臂梁式压电能量回收装置结构优化[D]. 合肥:中国科学技术大学物理学院, 2011.
 Guan Qing-chun. Structural optimization of cantilever piezoelectric energy harvesting devices[D]. Hefei: School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, 2011.
 [10] Leland E S, Wright P K. Resonance tuning of piezoelectric vibration energy scavenging generators using compressive axial preload[J]. Smart Materials and Structures, 2006, 15(5):1413-1420.
 [11] Wu Hao, Tang Li-hua, Yang Yao-wen, et al. Development of a broadband nonlinear two-degree-of-freedom piezoelectric energy harvester[J]. Journal of Intelligent Material System and Structure, 2014, 25(14):1875-1889.