

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.11.012

新型同步机械开关提升压电能量收集效率及其在非线形系统下的特性分析*

葛 聪¹, 刘海利², 梁俊睿^{1,3}

(1. 中国科学院 上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050;

2. 上海科技大学 信息科学与技术学院, 上海 201210; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对压电能量收集(PEH)技术中的自供电电感同步开关能量收集电路(SP-SSHI)有相当大的能量损失问题,对电感同步开关能量收集电路(SSHI)、采用电子开关的 SP-SSHI (ESP-SSHI)电路以及位移极值检测传感器等方面进行了研究,并通过对已有的同步机械开关的 SP-SSHI(MSP-SSHI)进行了总结归纳,提出了一款新型的同步机械开关。将该同步机械开关运用到自供电电感同步开关能量收集电路中,且对该机电 MSP-SSHI 系统进行了建模分析和实验对比。研究表明:MSP-SSHI 工作在线性条件下时,比传统能量收集电路有较高的能量收集效率;工作在双稳态惯性振荡非线性系统下时,有更宽的能量收集频率范围。

关键词:非线性系统;压电能量收集;自供电;电感同步开关能量收集;机械同步开关;震动能量

中图分类号:TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)11-1287-06

New synchronized mechanical switch to improve piezoelectric energy harvesting efficiency and Its characteristic analysis in nonlinear system

GE Cong¹, LIU Hai-li², LIANG Jun-rui^{1,3}

(1. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 2. School of Information Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Aiming at the high power consumption in the self-powered synchronized switch energy harvesting with inductor circuit (SP-SSHI) in the piezoelectric energy harvesting (PEH) technology, the research about the synchronized switch energy harvesting with inductor circuit (SSHI), self-powered SSHI using electric switches (ESP-SSHI) circuit and the displacement extremum detection sensor was presented. Also studied the existing mechatronic switches for SP-SSHI (MSP-SSHI). Based on this, a new displacement extremum detection sensor was proposed, and which is also used in the SP-SSHI to form a new circuit. A model was established for analysis the system, also experiments. The results indicate that the new MSP-SSHI system shows better behavior in energy harvesting than traditional energy harvesting methods. Even more, we studied the feature of the MSP-SSHI when it works at nonlinear environment. The result shows that the nonlinear MSP-SSHI can operate at broader frequency range.

Key words: nonlinear system; piezoelectric energy harvesting; self-powered; SSHI; Mechatronic synchronized Switch, vibration energy

0 引言

近年来通过收集环境中的振动能量来为分布式无

线传感器网络(WSN)供电成为一个很热的研究主题,而压电能量收集(PEH)技术提供了最有前途的解决方案之一^[1-4]。压电结构和功率调节电路是构建高效

收稿日期:2017-03-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61401277)

作者简介:葛聪(1991-),男,江苏宿迁人,硕士研究生,主要从事新能源、能量收集方面的研究。E-mail:gecong@shanghaitech.edu.cn

能量收集系统的两个关键部分。在接口电路的研究中电感同步开关能量收集电路 (SSHI) [5] 以及其他同步开关接口电路 [6] 能够将能量收集能力提高几倍。在 SSHI 中,同步开关需要检测到压电元件处于最大形变时并且及时做出开关动作让输出电压实现翻转。在自供电 SSHI (SP-SSHI) 电路 [7] 被提出之前 SSHI 中的最大位移检测需要外部控制系统以及开关动作需要外部供电,而 SP-SSHI 很好地解决了这个问题,减少了额外的功率需求从而使得 SSHI 更适用于实践。

自供电 SSHI 电路由电压峰值检测器、比较器和电子开关 3 个功能块组成。而这 3 个功能块在实际应用中由于器件的特性和限制使得其并不能完美的实现理想的状态。其中非理想峰值检测器使得压电的开路电压降低;非理想比较器带来了开关延迟;非理想开关只能在开路电压高于阈值电压时才能工作。二极管和晶体管的电压降在 SP-SSHI 中引入相当大的能量损失,因此解决这一问题进一步改进 SSHI 电路的一个重要因素。为了降低阈值电压并减少二极管和晶体管中的能量损失, Liu 等人 [8] 提出了一个机械解决方案,其同步开关由固定在压电梁自由端的另一个单悬臂梁和其自由端两侧的触点实现。然而,在他们的设计中,振动幅度不能太小(悬臂在小幅度振动中不能接触到两端的触电)也不能太大(在大振动下可能发生强碰撞)。

在本研究中,提出一个更好的,通过机械方案解决 PEH 系统的 SP-SSHI 接口电路。

1 电子电感同步开关能量收集电路

在 PEH 中,桥式整流器和滤波电容器(也作为能量存储器)实现了最简单的从交流到直流的功率转换,因此它们的组合被认为是标准能量采集 (SEH) 电路。SSHI 技术通过在 SEH 电路中添加开关和感应路径来改善 SEH。

串联型 SSHI 电路如图 1 所示。

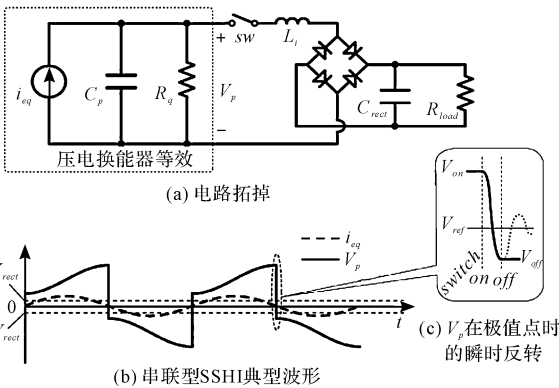


图 1 串联型 SSHI 电路

在 SSHI 中,本研究需要感测压电换能器最大变形的瞬间,并同时打开开关 SW,从而形成 LCR 振荡电路,压电元件两端的电压及等效电容两端的电压 V_p 可以在 RLC 周期的一半之后实现反转。其极值点的电压反转可以阻止能量从电气部分返回到机械部分,实现更高的能量收集能力。

SSHI 电路中检测压电换能器的最大形变点以及开关动作的实现都需要额外的电源供电。为了在不使用外部电源的情况下实现 SSHI 电路的功能, Lallart 和 Guyomar 提出了 ESP-SSHI 电路并由 Liang 进一步改进。该电路由 3 个电子功能块组成即电压峰值检测器、比较器和电子开关,如图 2 所示。

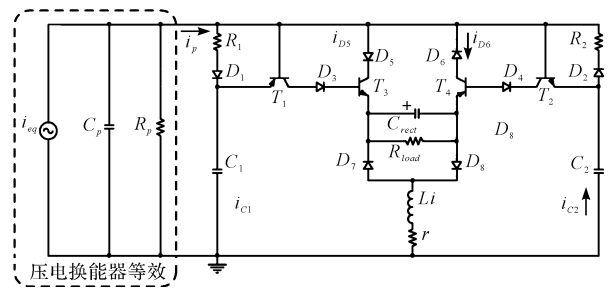


图 2 电子电感同步开关能量收集电路 ESP-SSHI

从 ESP-SSHI 拓扑结构的电压阈值可以推导如下 [11]:

$$V_{thres} = V_{CE(sat)} + 3V_D + V_{BE} \quad (1)$$

式中: $V_{CE(sat)}$ —集电极-发射极饱和电压; V_D —二极管正向压降; V_{BE} —晶体管基极导通电压。

同时,开关相位滞后也可以计算如下:

$$\varphi = \cos^{-1} \left(1 - \frac{V_D + V_{BE}}{V_{OC}} \right) - \tan^{-1} \left[\frac{1}{\omega R_p (C_p + 2C_1)} \right] \quad (2)$$

式中: V_{OC} —压电换能器两端的开路电压。

通过式(2)可以看出,开关相位与开路电压 V_{OC} 相关。

2 机械电感同步开关能量收集理论

2.1 机械同步开关结构

同步机械开关如图 3 所示。

机械同步开关包括框架、设于框架上的摆杆、设于框架两侧端面上固定电极及下固定电极、电刷,摆杆在外部振动的作用下在上固定电极与下固定电极之间来回摆动,从而来回地与上固定电极及下固定电极相接触,当摆杆与上固定电极接触后,上固定电极与电刷接通,当摆杆与下固定电极接触后,下固定电极与电刷接通。

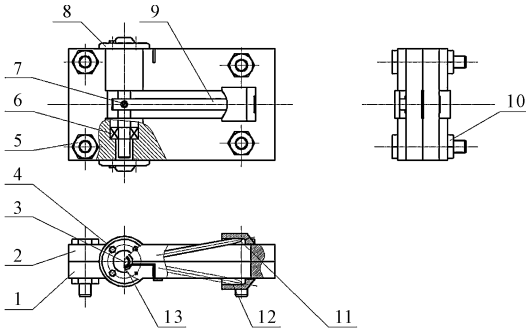


图 3 同步机械开关

1—下盖板;2—上盖板;3—轴;4—螺栓 1 × 4 只;5—螺栓 2 × 4 只;6—轴承 × 2;7—止动螺栓;8—轴承盖 × 2;9—摆杆;10—螺母 × 4;11—上固定电极;12—下固定电极;13—电刷

2.2 机械电感同步开关能量收集电路

机械电感同步开关能量收集电路(MSP-SSHI)的工作流程示意图如图 4 所示。

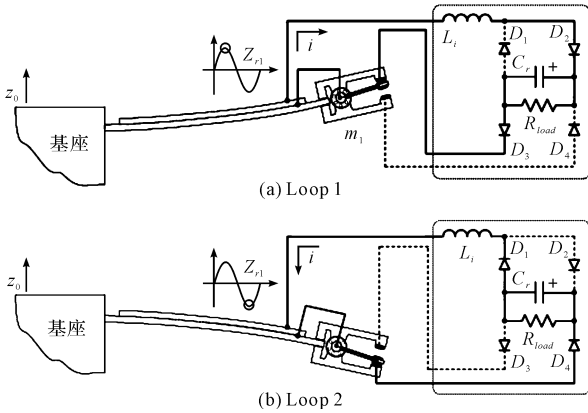


图 4 MSP-SSHI 工作流程示意图

由图可见,给出了两个开关时刻:当压电悬臂梁在其最高点的最大位移附近时,由于惯性,VSS 导电摆杆的自由端接触到上固定电极,从而电路中的 L_i, D_2, C_r, R_{load} 和 D_3 分支的电路被接通。一旦电路接通形成了 RLC 谐振电路,因此压电片两端的电压实现了翻转;当压电悬臂梁在其最低点的最大位移附近时,由于惯性,VSS 导电摆杆的自由端接触到下固定电极,从而电路中的 L_i, D_1, C_r, R_{load} 和 D_4 分支的电路被接通。同样,通过 RLC 谐振使得压电两端的电压再次实现翻转。从而实现了 SSHI,从压电片中收集到更多的能量。

同时,在该电路中二极管 D_1 和 D_3 还起到了阻挡反向电流流经电感的作用。故在实现桥电路的同时也实现了控制电流方向的作用。

2.3 机械电感同步开关能量收集装置建模

MSP-SSHI 建模如图 5 所示。

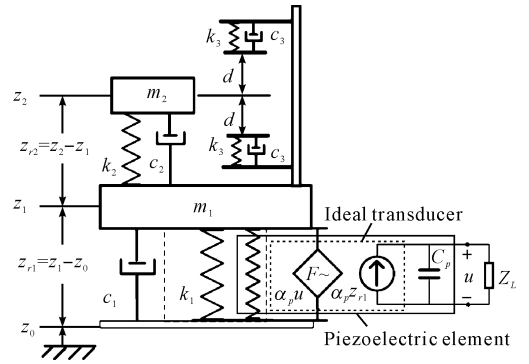


图 5 MSP-SSHI 建模

m_1, c_1, k_1 —压电悬臂梁的等效质量、阻尼和刚度; m_2, c_2, k_2 —VSS 摆杆的等效质量、阻尼和当 VSS 摆杆不接触刚性框架时 VSS 的刚度; c_3, k_3 —在 VSS 梁接触刚性框架之后增加的阻尼和刚度; d —VSS 的上固定基板和下固定电极板距离的一半; z_0 —振动基座的位移; z_1, z_2 — m_1 和 m_2 绝对位移; z_{r1} — m_1 相对于基座的相对位移; z_{r2} — m_2 相对于 m_1 的相对位移; α_p, C_p —压电元件的力-电因子和钳位电容; u 是压电元件两端的电压; Z_L —等效负载电阻

在模型中,机械部分表示为分段线性动态系统:压电悬臂被建模为 1DOF,而 VSS 将的刚度和阻尼随着它的位置不同而不同。压电元件被认为是一个理想换能器来研究机电耦合效应,并且使用线性电阻器作为负载。

为了使方程式更清晰,定义以下的参数:

$$\bar{z}_{r1} = \frac{z_{r1}}{d}; \bar{z}_1 = \frac{z_1}{d}; \bar{z}_{r2} = \frac{z_{r2}}{d}; \bar{m} = \frac{m_2}{m_1};$$

$$\omega_j = \sqrt{\frac{k_j}{m_j}}; \zeta_j = \frac{c_j}{2m_j\omega_j}, (j = 1, 2),$$

$$\omega_3 = \sqrt{\frac{k_3}{m_2}}, \zeta_3 = \frac{c_3}{2m_2\omega_3}, \quad (3)$$

式中: \bar{m} —质量比; ω_j —角共振频率; ζ_j —阻尼比。

通过对 m_2 的运动方程的描述可以列出等式:

$$\begin{aligned} \ddot{\bar{z}}_{r2} + (2\omega_2\zeta_2 + 2\omega_3\zeta_3)\dot{\bar{z}}_{r2} + (\omega_2^2 + \omega_3^2)\bar{z}_{r2} - \omega_3^2 &= -\ddot{\bar{z}}_1 \\ \bar{z}_{r2} > 1, \\ \ddot{\bar{z}}_{r2} + 2\omega_2\zeta_2\dot{\bar{z}}_{r2} + \omega_3^2\bar{z}_{r2} &= -\ddot{\bar{z}}_1 \\ -1 \leq \bar{z}_{r2} \leq 1, \\ \ddot{\bar{z}}_{r2} + (2\omega_2\zeta_2 + 2\omega_3\zeta_3)\dot{\bar{z}}_{r2} + (\omega_2^2 + \omega_3^2)\bar{z}_{r2} + \omega_3^2 &= -\ddot{\bar{z}}_1 \\ \bar{z}_{r2} < -1. \end{aligned} \quad (4)$$

通过对 m_1 的运动方程的描述可以列出等式:

$$\begin{aligned} \ddot{\bar{z}}_{r1} + 2\omega_1\zeta_1\dot{\bar{z}}_{r1} + \omega_1^2\bar{z}_{r1} - \bar{m}[(2\omega_2\zeta_2 + 2\omega_3\zeta_3)\dot{\bar{z}}_{r2} + \\ (\omega_2^2 + \omega_3^2)\bar{z}_{r2}] + \bar{m}\omega_3^2 + \frac{\alpha_p \bar{u}}{m_1} &= -\ddot{\bar{z}}_0\bar{z}_{r2} > 1, \\ \ddot{\bar{z}}_{r1} + 2\omega_1\zeta_1\dot{\bar{z}}_{r1} + \omega_1^2\bar{z}_{r1} - \bar{m}[2\omega_2\zeta_2\dot{\bar{z}}_{r2} + \omega_3^2\bar{z}_{r2}] + \end{aligned}$$

$$\frac{\alpha_p \bar{u}}{m_1} = -\bar{z}_0 - 1 \leq \bar{z}_{r1} \leq 1,$$

$$\ddot{z}_{r1} + 2\omega_1 \zeta_1 \dot{z}_{r1} + \omega_1^2 \bar{z}_{r1} - \tilde{m}[(2\omega_2 \zeta_2 + 2\omega_3 \zeta_3) \dot{z}_{r2} + (\omega_2^2 + \omega_3^2) \bar{z}_{r2}] - \tilde{m}\omega_3^2 + \frac{\alpha_p \bar{u}}{m_1} = -\bar{z}_0 \bar{z}_{r1} < -1. \quad (5)$$

电路方程为：

$$\frac{u}{Z_L} = \alpha_p \dot{z}_{r1} - C_p \dot{u}. \quad (6)$$

根据公式(4,5)便可以运用 4 阶的 Runge-Kutta 方法来求得数值解。

3 机械电感同步开关能量收集实验

该实验的试验装置如图 6 所示。

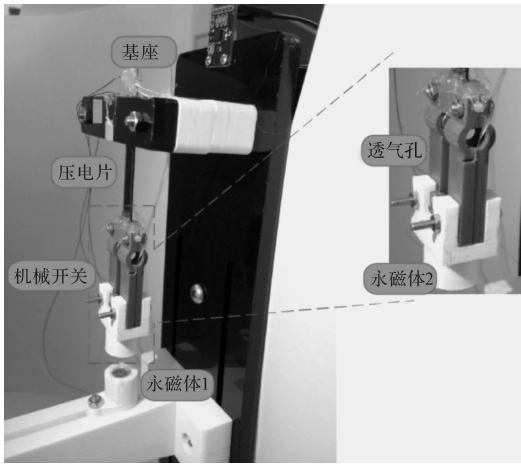


图 6 实验平台

其中,机械开关 VSS 中的运动件取代了之前的单悬臂梁而使用了运动更灵活的摆杆。本研究通过 3D 打印技术将 VSS 打印封装好,但是值得注意的是 VSS 封装处留有了两个孔,该孔的目的是为了充分利用空气阻尼,使得摆杆在摆动过程中的阻尼不仅由连接处的轴承提供也有空气带来的阻尼。压电片选用的是双晶压电片,其中一片用来连接电路进行能量收集,另一片用来作为参考片。

图 6 中的永磁体为研究 MSP-SSHI 在非线性条件下的特性时使用,但是为了保证在同一个共振频率下研究 MSP-SSHI 工作在线性条件和非线性条件时的特性,特地将一对永磁体 1 设计成可移动,当研究 MSP-SSHI 工作在线性区时将永磁体 1 移动到足够远的距离,使得两个永磁体之间没有力的作用。当研究 MSP-SSHI 工作在双稳态惯性振荡非线性系统下(NMSP-SSHI)时将永磁体 1 移动到永磁体 2 的正对位置而使得两永磁体相斥。通过这样的设定来保证整个系统无

论工作在线性条件下还是非线性条件下其共振频率几乎保持不变。

在试验中控制 MSP-SSHI 工作在线性条件下,且工作在其共振频率(27 Hz)下,改变振动的幅值并通过调节纯阻性负载的大小来确定该幅值下最大能量收集功率。由于振动幅值正比于压电片等效开路电压,故可画出开路电压 V_{oc} —最大收集功率 P_{max} 关系图如图 7 所示。

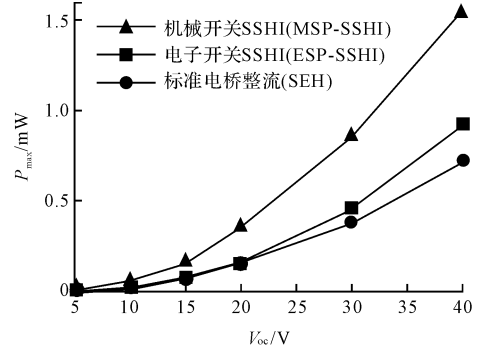


图 7 开路电压 V_{oc} 与最大收集功率 P_{max} 关系图

图 7 中展示了机械开关 MSP-SSHI、电子开关 ESP-SSHI 和标准电桥整流电路 SEH 在不同的等效开路电压下对应的最大输出功率,而从图中可以看出 MSP-SSHI 在所示的等效开路电压下明显优于 ESP-SSHI 和 SEH 电路。其中在开路电压小于 10 V 时由于电子开关 ESP-SSHI 电路中较多的电子元件尤其是二极管数量较多使得压电片输出电压过小时不能越过电路的门限电压从而不能收集到能量。然而, MSP-SSHI 电路中只使用了一个电桥,故门限电压只有两个二极管的压降,所以如图所示, MSP-SSHI 能够工作在开路电压小于 10 V 的情况。同时,随着开路电压的增高, MSP-SSHI 电路收集到的最大功率上升的速度明显高于另外两个电路,即说明, MSP-SSHI 电路能够适用于较宽的振幅范围而且同时能够保证收集到较多的能量。其收集功率相对于 SEH 提高 231%, 相对于 ESP-SSHI 方案提高 178%。

当峰-峰值参考电压保持在 20 V 时, ESP-SSHI 和 MSP-SSHI 的时间-电压波形如图 8 所示。

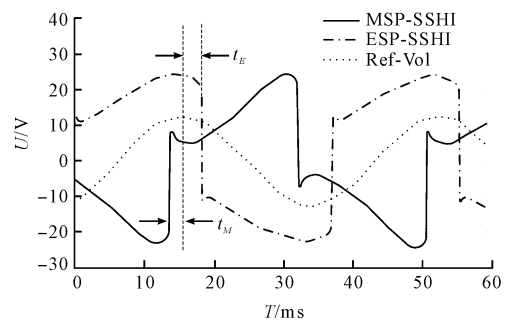


图 8 电子开关与机械开关的相位关系图

图 8 中,ESP-SSHI 和 MSP-SSHI 的波形是分别记录的,将两次记录结果绘制在一幅图中便可以清楚地显示两者的相位关系。对于 SSHI,理想的开关能够在如图 8 中虚线所示的参考电压的极值点处瞬间进行开关动作。而 MSP-SSHI 在理想时刻之前 t_M 时刻便采取开关动作,ESP-SSHI 延时了 t_E 时刻后才采取开关动作。通过做多组在不同开路电压下的 MSP-SSHI 和 ESP-SSHI 的相位关系发现 MSP-SSHI 的相位差主要由其动力学决定,并将影响 MSP-SSHI 的性能。如何更优化设计机械同步开关有效地提高 MSP-SSHI 性能是未来工作中的重点内容。

4 非线性状态下的同步机械开关

本研究提出的新型机械开关通过实验已验证其可以在较宽的振幅范围内收集到较多的能量,然而,对于用来收集环境中能量,还要需要研究该系统的工作的频宽特性,因为大多数情况下环境中的震动是随机的,多频率的,时变的或其某种组合,作为窄带线性系统在这些条件下是非常低效的。所以本文同时提出了让该同步机械开关工作在非线性状态下,测试其频宽特性。非线性状态下的同步机械开关如图 9 所示。

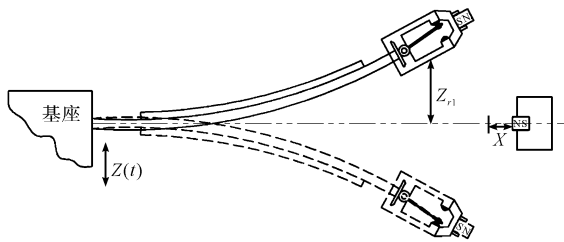


图 9 非线性状态下的同步机械开关

通过在图 6 所示的实验平台下做对比实验。在几乎不改变系统的共振频率的前提下(通过不改变其他结构,只轻轻的将永磁体 1 从离永磁体 2 足够远的距离移动到永磁体 2 的竖直下方),将 NMSP-SSHI 与 MSP-SSHI 相比,实验结果如图 10 所示。

从频率-功率关系图中可以看出 NMSP-SSHI 能够在 132% 更的频率范围上响应。与非线性系统下的 SEH (NSEH) 相比, NMSP-SSHI 可以工作在比 NSEH 宽 121% 的频率范围。然而 NMSP-SSHI 在收集到的能量的多少上并没有优势,与 MSP-SSHI 相比反而减少了 41.67%。如何在扩宽频率的同时也能够收集到较高的能量是今后的研究中的重点内容。

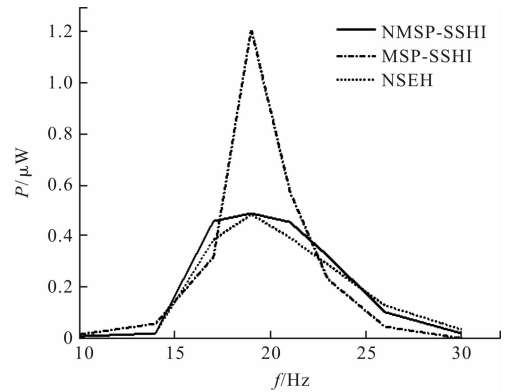


图 10 非线性条件下 NMSP-SSHI, MSP-SSHI 和 NSEH 能量收集的比较

5 结束语

本研究提出了一种改进的新型同步机械开关。通过理论建模和实验验证分析表明运用此开关的压电能量收集系统比以往的收集系统提升能量收集效率,同时也能在较低的振动幅值下工作。而且其工作在非线性条件下时也能够扩宽其工作频宽。因此该装置能够适用于更广泛的场所,收集到更多的能量。

若希望该新型机械电感同步开关能量收集电路能够更好地收集环境中的能量,就需要其适应环境能量的时变性、多频性等非线性特征。目前通过实验发现虽然此新型机械电感同步开关能量收集电路有更宽的工作频率但其能量收集功率却不高。

因此,在下一阶段,本研究将着重于非线性条件下的同步机械开关的研究,使得该同步机械开关能够扩宽工作频宽的同时也能够有较高的能量收集效率,使其能够更好的运用于对环境中的能量收集。

参考文献 (References):

- [1] LIANG J, LIAO W. Piezoelectric energy harvesting and dissipation on structural damping [J]. *Intelligent Material Systems and Structures*, 2009, 20(5):515-527.
- [2] ANTON S R, SODANO H A. A review of power harvesting using piezoelectric materials smart materials and structures [J]. *Journal of Vibroengineering*, 2007, 16(3):R1-R21.
- [3] LIANG J, LIAO W. Energy flow in piezoelectric energy harvesting systems [J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(1):015005.
- [4] WU Y P, BADEL A, FORMOSA F, et al. Nonlinear vibration energy harvesting device integrating mechanical stoppers used as synchronous mechanical switches [J]. *Intelligent Material Systems and Structures*, 2014, 25(14):1658-1663.
- [5] GUYOMAR D, BADEL A, LEFEUVRE E, et al. Toward energy harvesting using active materials and conversion improvement by nonlinear processing [J]. *Ultrasonics Ferro-*

- lectrics and Frequency Control**, 2005, 52(4) : 584-595.
- [6] GUYOMAR D, LALLART M. Recent progress in piezoelectric conversion and energy harvesting using nonlinear electronic interfaces and issues in small scale implementation [J]. **Micromachines**, 2011, 2(2) : 274-294.
- [7] SUN Y, HIEU N H, JEONG C J, et al. An integrated high-performance active rectifier for piezoelectric vibration energy harvesting systems[J]. **Power Electronics**, 2012, 27(2) : 623-627.
- [8] LIU H, GE C, LIANG J R. A mechanical solution of self-powered SSHI interface for piezoelectric energy harvesting systems[J]. **Proc. of SPIE**, 2015(9431) : 1-8.
- [9] 陈定方, 沈 威, 明廷鑫, 等. 悬臂梁式压电能量收集器的建模与分析[J]. 南昌工程学院学报, 2016, 35(4) : 1-9.
- [10] 王浩金, 邹丹燕, 肖 金, 等. 悬臂梁式压电发电结构理论模型及其仿真研究[J]. 2011, 28(11) : 1412-1415.
- [11] LIANG J, LIAO W. Improved design and analysis of self-powered synchronized switch interface circuit for piezoelectric energy harvesting systems[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 2012, 59(4) : 1950-1960.

[编辑: 张 豪]

本文引用格式:

- 葛 聪, 刘海利, 梁俊睿. 新型同步机械开关提升压电能量收集效率及其在非线性系统下的特性分析[J]. 机电工程, 2017, 34(11) : 1287 - 1292.
- GE Cong, LIU Hai-li, LIANG Jun-rui. New synchronized mechanical switch to improve piezoelectric energy harvesting efficiency and Its characteristic analysis in nonlinear system[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(11) : 1287 - 1292. 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 1242 页)

参考文献 (References) :

- [1] DANO M L, HYER M W. Thermally-induced deformation behavior of unsymmetric laminates[J]. **International Journal of Solids & Structures**, 1998, 35(17) : 2101-2120.
- [2] DAYNES S, WEAVER P M, TREVARTHEN J A. A morphing composite air inlet with multiple stable shapes [J]. **Journal of Intelligent Material Systems & Structures**, 2011, 22(9) : 961-973.
- [3] 王世明. 温度与湿度环境对碳纤维复合材料力学行为的影响研究[D]. 南京: 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 2011.
- [4] HYER M W, HERAKOVICH C T, MILKOVICH S M, et al. Temperature dependence of mechanical and thermal expansion properties of T300/5208 graphite/epoxy[J]. **Composites**, 1983, 14(3) : 276-280.
- [5] ABDEL-MAGID B, ZIAEE S, GASS K, et al. The combined effects of load, moisture and temperature on the properties of E-glass/epoxy composites [J]. **Composite Structures**, 2005, 71(3-4) : 320-326.
- [6] MOORE M, ZIAEIRAD S, FIROUZIANNEJAD A. Temperature-curvature relationships in asymmetric angle ply laminates by considering the effects of resin layers and temperature dependency of material properties [J]. **Journal of Composite Materials**, 2014, 48(9) : 1071-1089.
- [7] ETCHES J, POTTER K, WEAVER P, et al. Environmental effects on thermally induced multistability in unsymmetric composite laminates [J]. **Composites Part A: Applied Science & Manufacturing**, 2009, 40(8) : 1240-1247.
- [8] PORTELA P, CAMANHO P, WEAVER P, et al. Analysis of morphing, multi stable structures actuated by piezoelectric patches[J]. **Computers & Structures**, 2008, 86(3-5) : 347-356.
- [9] LOVETT D, JAMES A. An extendible member[P]. European Patent: EP0891248, 1997-8-02.
- [10] GUEST S D, PELLEGRINO S. Analytical models for bistable cylindrical shells[J]. **Proceedings of the Royal Society A**, 2006, 462(2067) : 839-854.
- [11] 柴国钟, 叶钢飞, 张 征, 等. 反对称铺设的单曲率椭圆形壳结构双稳态性能研究 [J]. 浙江工业大学学报, 2015, 43(1) : 1-6.
- [12] ZHANG Z, YE G F, WU H P, et al. Thermal effect and active control on bistable behaviour of anti-symmetric composite shells with temperature-dependent properties [J]. **Composite Structures**, 2015(124) : 263-271.
- [13] 沈观林, 胡更开. 复合材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [14] MANSFIELD E H. The bending and stretching of plates [M]. London: Cambridge University Press, 2005.
- [15] PARHI P K, BHATTACHARYYA S K, SINHA P K. Hygrothermal effects on the dynamic behavior of multiple delaminated composite plates and shells [J]. **Journal of Sound & Vibration**, 2001, 248(2) : 195-214.

[编辑: 李 辉]