

基于振动能量发电的自适应机械同步开关*

黄 瑶, 万小丹, 刘伟群

(西南交通大学机械工程学院 成都, 610031)

摘要 为了解决无线传感器的供电困难以及常用标准电路和同步开关电路有限的能量提取效率,提出了一种优化的自适应机械同步开关,并将其运用于并联同步开关电感电路。根据自适应机械同步开关的工作原理建立了仿真模型,采用噪声激励对自适应机械同步开关进行了研究与分析,通过振动实验台对结构进行实验测试。结果表明,优化的自适应机械同步开关电路能够很好地适应噪声环境,采集到的负载平均功率大约为标准电路的 3 倍。该自适应机械同步开关能够自动检测悬臂梁幅值,且控制开关在位移峰值附近闭合,为振动能量发电装置提供了实践和理论指导。

关键词 振动能量回收;能量提取电路;自适应机械开关;噪声激励

中图分类号 TH128; TH113; TM461

引 言

近几年,压电能量提取装置备受关注^[1-2],常见的压电能量提取电路有标准能量提取电路(standard energy harvesting,简称 SEH)、同步开关电感电路(synchronized switching harvesting on an inductor,简称 SSHI)、同步电荷提取电路(synchronous electric charge extraction,简称 SECE)和优化的同步电荷提取电路等。其中:SEH 结构简单可靠,但能量提取效率不高;SSHI 提取效率高,但同步开关很难实现最优位置控制^[3];SECE 能够提取压电材料的全部能量,但其同步开关闭合时间要求非常高^[4];优化的同步电荷提取电路结构复杂,转换效率不高^[5-6]。

基于常用的提取电路都需要同步开关进行控制,Chamanian 等^[7]提出了基于 SSHI 的电子断路器来控制同步开关。Liang 等^[8]提出了速度控制同步开关。朱莉娅等^[9]提出了一种无源同步开关电路。这些同步开关电路本身会消耗能量,且其闭合时刻有一定的延迟。由于同步开关的闭合、断开时刻直接影响能量提取效率,因此不消耗电能的机械同步开关有较大的发展前景。常见的机械同步开关是在压电元件两侧设置固定电极或可调电极^[10-12],这些机械同步开关很难适应集能器振幅不规则变化的情况,而实际振动环境的振动源大多为无规律的噪声

激励^[13-14],故机械同步开关能量提取效率始终受到限制。

机械同步开关能够在各种振动环境下自动跟随集能器的位移幅值,不需要额外的电子元件,仅需要很小的启动电压就能正常工作,使 SSHI 电路的能量提取效率大幅提升。笔者根据现有机机械同步开关的不足,优化设计了一种能够自适应振动环境的机械开关。根据自适应机械开关的工作原理,建立了仿真模型。由于实际振动环境通常为噪声环境,因此对设计的机械同步开关的参数在噪声环境下进行了仿真分析,研究结构的参数选择规律。采用合适的参数分别对所设计的机械开关电路和标准电路进行实验测试比较。

1 并联同步开关能量提取电路

标准电路由一个整流桥和滤波电容组成,能够实现能量提取,但效率不高。同步开关电感电路在标准电路中引入了电感与同步开关来提高能量的提取效率。并联同步开关能量提取电路如图 1 所示。

在正弦激励下,压电材料产生正弦交流电压,当压电材料运动到位移峰值处时,整流桥断开,压电材料的剩余电荷储存在自身电容 C_0 中。同步开关闭合后,谐振电路(包含一个电感 L 和一个电容 C)振荡开始,在电感器作用下,压电元件 C_0 中的电压方

* 国家自然科学基金资助项目(51875488,51875488);中国博士后科学基金资助项目(2017T100709,2016M600747)
收稿日期:2019-12-22;修回日期:2020-06-15

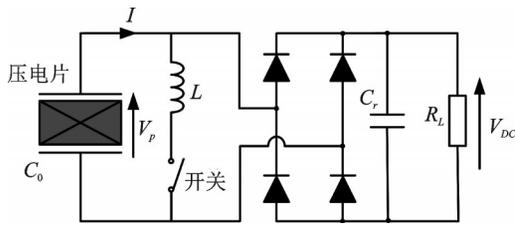


图1 并联同步开关能量提取电路

Fig.1 Parallel synchronous switch circuit

向发生改变并再次储存到 C_0 中, 电流瞬间增加然后减小到 0, 随后压电材料新产生的电压与 C_0 储存的电压一起在负方向增大, 再给负载供电。并联同步开关能量提取电路工作波形如图 2 所示。可以看出, 通过并联同步开关能量提取电路的负载电压明显增加, 其中, 同步开关即使不在压电元件位移峰值处闭合, 负载电压同样有所提高, 这有利于提升能量提取电路的工作效率。同步开关的闭合位置越靠近位移极值点, 能量提取效率越高。

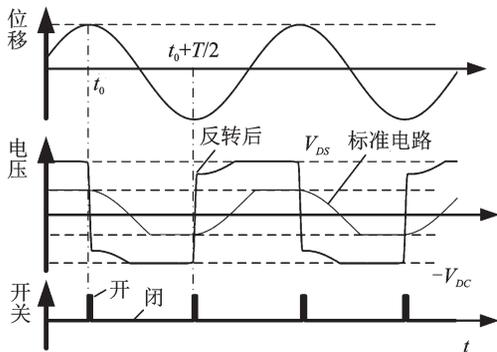


图2 并联同步开关能量提取电路工作波形

Fig.2 Operational waveforms of parallel synchronous switch circuit

2 自适应并联机械同步开关能量提取电路

2.1 自适应并联机械同步开关结构

自适应机械开关电路原理如图 3 所示。结构中为压电悬臂梁, 其靠近固定端的位置贴有压电片用来产生电能, 2 个开关悬臂梁安装在压电悬臂梁的两侧, 其末端有一个质量块和一个忽略质量的缓冲弹簧。缓冲弹簧与发电悬臂梁的质量块接触时可形成回路, 2 个开关悬臂梁和压电悬臂梁就构成了 2 个机械开关。

2.2 自适应机械开关建模

自适应机械开关的系统等效模型如图 4 所示。

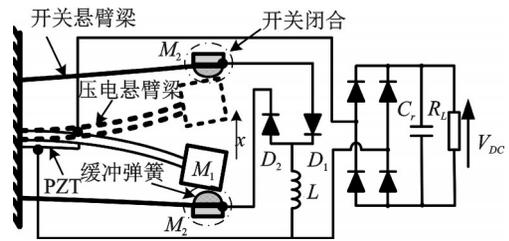


图3 自适应机械开关电路原理

Fig.3 Principle of adaptive mechanical switch circuit

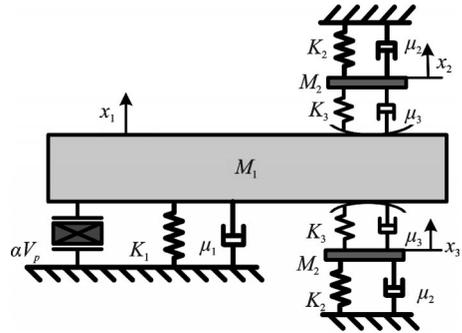


图4 系统等效模型

Fig.4 Equivalent model

其中: M_1, K_1, μ_1 分别为压电悬臂梁的等效质量、等效刚度和等效阻尼; M_2, K_2, μ_2 分别为开关悬臂梁的等效质量、等效刚度和等效阻尼; K_3, μ_3 分别为缓冲弹簧的刚度与阻尼。压电悬臂梁与开关悬臂梁是一个二阶振动系统, 缓冲弹簧可认为是一个一阶系统, 其阻尼力大于弹性恢复力。

根据以上等效模型可推导出压电悬臂梁与开关悬臂梁机械部分的运动方程为

$$M_1 \ddot{x}_1 + \mu_1 \dot{x}_1 + K_1 x_1 + F_1 + F_2 = M_1 \gamma \quad (1)$$

$$\begin{cases} M_2 \ddot{x}_2 + \mu_2 \dot{x}_2 + K_2 x_2 = M_2 \gamma \\ M_2 \ddot{x}_3 + \mu_2 \dot{x}_3 + K_2 x_3 = M_2 \gamma \end{cases} \quad (2)$$

其中: x_1, x_2 和 x_3 分别为压电悬臂梁和 2 个开关悬臂梁的位移; γ 为外界激励加速度。

只有当压电悬臂梁与某一开关悬臂梁接触时, F_1 或 F_2 不等于 0, 此时相对应的机械开关闭合, 在其他时刻机械开关处于断开状态。

2.3 噪声仿真分析

由于实际环境中的振动信号大多为多变噪声, 同时为证明所推导模型的正确性, 笔者采用噪声激励作为激励源进行仿真分析。图 5 为系统位移仿真波形。从图 5 可以看出, 开关悬臂梁的位移在大多数情况下都能保持在压电悬臂梁位移的峰值附近, 即机械开关能够在压电悬臂梁的位移峰值附近闭合。这说明所提出的机械开关能自动适应压电悬臂

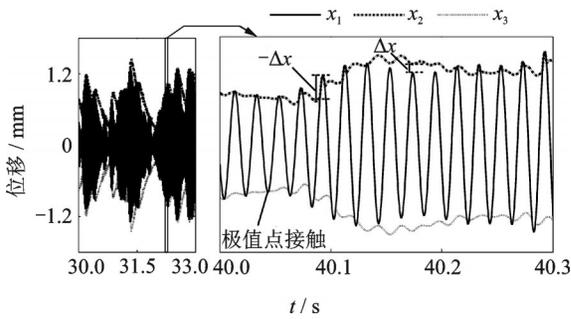


图5 系统位移仿真波形

Fig.5 Simulated displacement waveform

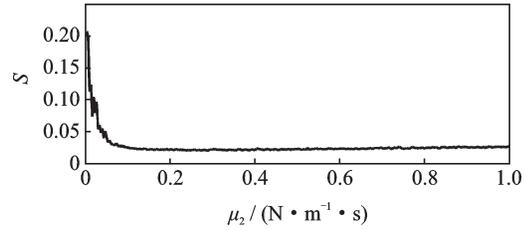
梁的振动幅值。

从图5看出,部分波动比较明显的地方,开关悬臂梁不在位移峰值处与压电悬臂梁接触,或者二者不接触。随后对开关悬臂梁的参数进行了优化分析,以确定系统的最优参数,提高能量提取效率。为评估机械开关参数,仿真后选取若干个周期,选用 x_1, x_2 的波形为研究对象,取出每个周期中 x_1 的最大位移值与 x_1, x_2 接触点的位移值的差值 $-\Delta x$ 和 x_1, x_2 未接触时峰值处的位移差值 Δx ,通过式(3)求解 $-\Delta x$ 与 Δx 的均方根值(无量纲) S 。 S 越小,说明 x_2 与 x_1 的接触点越靠近 x_1 的极值点。机械开关的闭合位置越靠近极值点,能量提取效率越高。

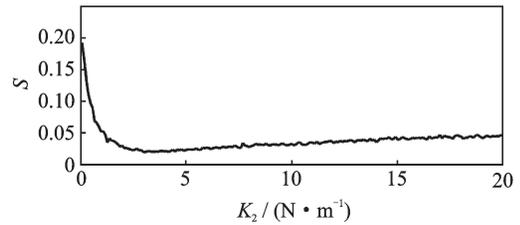
$$S = \sqrt{(-\Delta x)^2 + (\Delta x)^2} \quad (3)$$

开关悬臂梁优化分析如图6所示。可以看出,随着开关悬臂梁等效刚度 K_2 的增加, S 值迅速减小,稍有稳定后再缓慢上升。这说明 K_2 很小时能量采集效率很低,随着 K_2 增大,能量采集效率同样有所下降,这是由于 K_2 太小,在噪声激励下很容易就被压电悬臂梁撞击导致弹开,所以其能量提取效率很低。随着 K_2 继续增大,开关悬臂梁能够在位移峰值处与压电悬臂梁接触,但是开关悬臂梁同样会限制压电悬臂梁的振动,导致产生的总能量减少,不利于能量采集,且此时的机械开关总是提前闭合,使能量采集效率不高。同样的,阻尼 μ_2 的规律与刚度 K_2 类似。随着开关悬臂梁等效质量 m_2 的增加, S 值总体上逐渐增加,能量采集效率变低;但是当 m_2 小于 0.005 kg 时, m_2 越大, S 的值反而越小。 m_2 值在 0.005~0.02 kg 时,系统的稳定性较好。由此得出开关悬臂梁的固有频率较低但不是最低时, S 值相对较小,更有利于提高能量采集效率,开关悬臂梁刚度 K_2, μ_2 的影响明显大于 m_2 。总之,开关悬臂梁的刚度 K_2 、阻尼 μ_2 与质量 m_2 存在一组最优解。

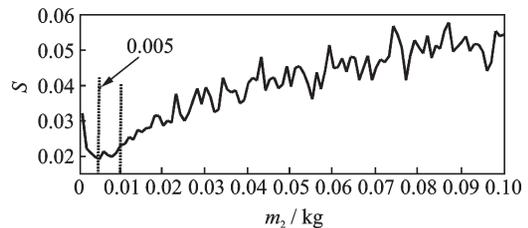
图7为缓冲弹簧参数优化分析。通过对缓冲弹簧参数的仿真,发现缓冲弹簧的刚度 K_3 越大, S 值越



(a) 改变阻尼 μ_2
(a) Change damping μ_2



(b) 改变刚度 K_2
(b) Change stiffness K_2



(c) 改变质量 m_2
(c) Change mass m_2

图6 开关悬臂梁优化分析

Fig.6 Optimization of cantilever switch

小,其刚度值远大于开关悬臂梁的刚度 K_2 。同样的,如图7所示,缓冲弹簧的阻尼 μ_3 越大, S 值越小。可见,一个有较高刚度和阻尼的缓冲弹簧更有利于提高自适应机械开关电路在噪声激励下的采集效率,这与正弦激励时的参数选择有一些区别。

3 实验验证

通过对模型的仿真分析,结合实际情况,选择合适的系统参数搭建实验平台。采用噪声激励进行测试分析,系统参数如表1所示。

实验平台如图8所示,该装置由1个压电悬臂梁、2个固有频率较低的悬臂梁和2个有较大阻尼的缓冲弹簧组成。此压电悬臂梁采用不锈钢梁(100 mm×20 mm×1 mm),其末端粘接2个铁块。低频悬臂梁采用厚度为0.2 mm的铍铜,其固定端去掉一部分材料以降低刚度,缓冲弹簧和质量块安装在低频悬臂梁的末端。压电片贴在靠近压电悬臂梁的固定端处,采用并联同步开关接口电路提取能量。接口电

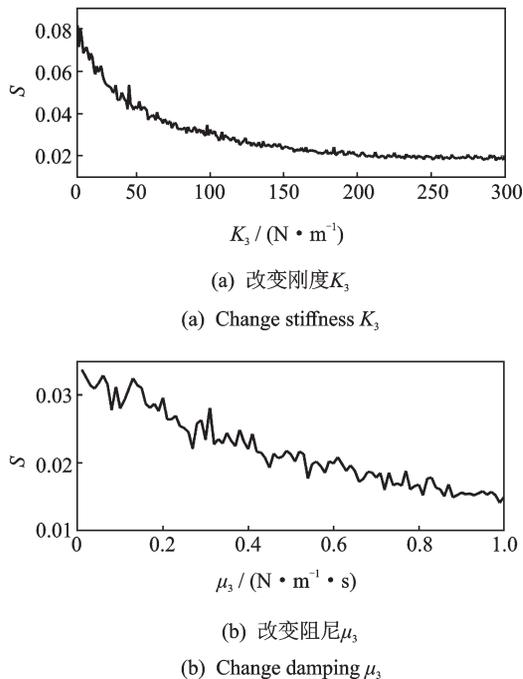


图7 缓冲弹簧参数优化分析

Fig.7 Parameter optimization of buffer springs

表1 系统参数

Tab.1 Parameters of the system

参数	数值
等效质量 m_1/kg	0.013
等效刚度 $K_1/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	1 100
阻尼系数 $\mu_1/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s})$	0.03
等效质量 m_2/kg	0.008
等效刚度 $K_2/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	3.8
阻尼系数 $\mu_2/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s})$	0.15
等效刚度 $K_3/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	185
等效阻尼 $\mu_3/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s})$	0.5
电容 C_0/F	2.4×10^{-8}
电感值 L/H	2×10^{-3}
电阻值 $R_1/\text{k}\Omega$	200

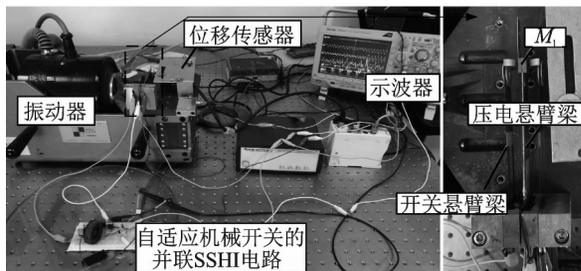


图8 实验平台

Fig.8 Experimental setup

路通过导线分别与压电悬臂梁、开关悬臂梁和压电片的固定端连接。开关悬臂梁与压电悬臂梁之间为低密度海绵材质的缓冲弹簧。海绵表面覆盖有一层

导电胶,以保证机械开关能够导通。海绵作为机械开关的一个电极,压电悬臂梁的质量块作为另一个电极,这样形成了一个单刀双掷开关。该结构安装在一个振动器上,通过电脑产生噪声信号传给功率放大器,功率放大器驱动振动器,所测得的数据回传到电脑并保存。

实验平台搭建完成后,首先断开电路,通过信号发生器给振动台1个固定的正弦加速度,从小到大调节激励频率;然后,观察示波器显示的悬臂梁位移值。发现压电悬臂梁在激励频率为46.7 Hz时,产生的位移值最大,即压电悬臂梁的固有频率约为46.7 Hz。这与仿真计算所得固有频率46.3 Hz基本一致。

采用正弦激励来验证结构的性能,当固定激励频率为47 Hz时,通过调节加速度来改变压电悬臂梁的幅值,保持压电悬臂梁的位移幅值为某一恒定值,分别测量2种电路的最优负载电压,并计算出最优负载功率。机械开关电路的最优电阻值选用800 k Ω ,标准电路的最优电阻值选用200 k Ω ,分别测量了压电悬臂梁幅值为0.5,0.75,1,1.25和1.5 mm时的负载电压,得到2种电路的负载功率如图9所示。可以看到,随着压电悬臂梁位移幅值的增加,2种电路的最优功率都增大,机械开关电路的最优功率明显高于标准电路,且压电悬臂梁的振幅越大,其优势越明显。

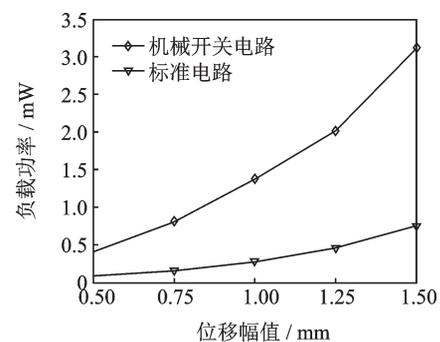
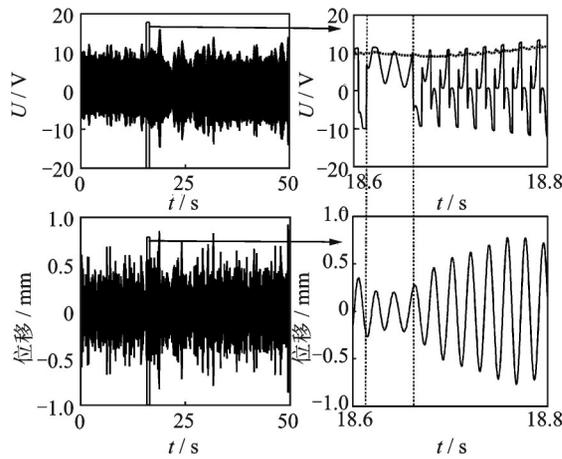


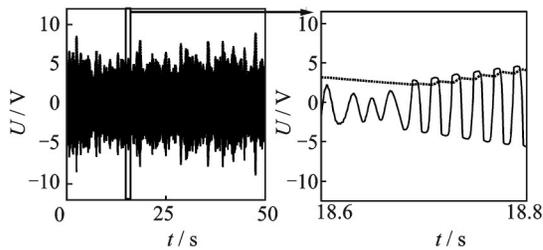
图9 2种电路的负载功率

Fig.9 Optimal power of the two circuits

采用频率为35~55 Hz的噪声激励分别对自适应机械开关电路和标准电路进行测试。为保证一致性,在测试标准电路时仅断开电路中的开关线。2种电路实验电压比较如图10所示。实验测得压电悬臂梁的位移、标准电路的负载电压与压电片电压以及机械开关电路的负载电压与压电片电压。如图10(a)所示,在噪声激励条件下大多数周期内,开关悬臂梁都能够自适应压电悬臂梁的振幅,且接触时机械开关能够正常工作,然而机械开关闭合的位置



(a) 机械开关电路
(a) Mechanical switch circuit



(b) 标准电路
(b) Standard circuit

图10 2种电路实验电压比较

Fig.10 Comparison of experimental voltages of the two circuits

并不固定。随着压电悬臂梁位移幅值的迅速减小,机械开关会出现无接触的情况。随着压电悬臂梁位移幅值的迅速增大,机械开关可能会提前闭合,总体上电路的负载电压稳定,虚线处表明此时的机械开关在压电悬臂梁位移峰值附近闭合。如图10(b)所示,标准电路的负载电压明显低于自适应机械开关电路,且标准电路的位移幅值略高于机械开关电路。这说明笔者所提出的自适应机械开关电路的能量提取效率有所提高,自适应机械开关电路的平均负载电压大约为标准电路的2倍。

将所得到的负载电压分为若干段,分别取每一段电压的平均值,再求得每一段电压的平均功率。图11为2种电路实验平均功率比较。可以看出,机械开关电路的负载平均功率大约为标准电路负载平均功率的3倍,且机械开关电路的负载平均功率波动范围明显大于标准电路。这是因为在噪声激励下,机械开关不能在每个周期都正常工作,其直接影响到负载功率的大小,因此机械开关电路的负载平均功率有较大起伏。这种现象并不影响电路输出功率的提升,笔者所提出的自适应机械开关大幅提高

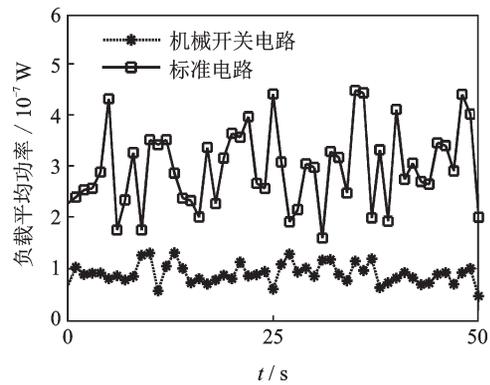


图11 2种电路实验平均功率比较

Fig.11 Comparison of experimental mean power of the two circuits

了SSHI在噪声激励条件下的能量提取效率。

4 结束语

提出了一种优化的自适应机械同步开关,通过建模、噪声激励仿真分析和实验验证,证明了所提出的结构能够自适应不规则的噪声振动环境,且能有效提高压电材料的能量提取效率。在噪声激励仿真过程中发现,开关悬臂梁的刚度与等效质量有一个最优选择区间,而较高刚度和阻尼的缓冲弹簧更有利于提高自适应机械同步开关电路在噪声环境中的采集效率。由于噪声激励的变化多样,自适应机械同步开关难免会有一些无接触或提前接触的情况出现,且这种情况很难避免,故在实际选择时,可结合仿真结果选择合适的参数值,并进行相应的取舍以满足实际需求,这与正弦激励的参数选择有较大区别。笔者根据仿真结果搭建了实验平台,实验结果表明,采用噪声激励时,自适应机械同步开关电路的负载平均功率大约为标准电路负载平均功率的3倍,能量提取效率明显提高。

采用开关悬臂梁作为SSHI的自适应机械同步开关,能有效提高能量的提取效率,仿真分析和实验也发现开关悬臂梁的参数对系统的影响比较明显。因此,今后工作将继续优化机械同步开关的参数,进一步提高能量提取效率。

参 考 文 献

[1] 边义祥,杨成华. 基于压电材料的振动能量回收技术现状综述[J]. 压电与声光, 2011, 33(4): 612-622.
BIAN Yixiang, YANG Chenghua. A review of current research for energy harvesting based on vibration of piezoelectric materials[J]. Piezoelectrics & Acoustoo-

- tics, 2011, 33(4): 612-622. (in Chinese)
- [2] 王爽, 吕宝占. 典型压电俘能器的发展现状与俘能机理分析[J]. 电子元件与材料, 2018, 37(11):1-11.
WANG Shuang, LÜ Baozhan. Mechanism and status of typical piezoelectric energy harvester [J]. Electronic Components & Materials, 2018, 37(11): 1-11. (in Chinese)
- [3] ASANUMA H, SAKAMOTO K, KOMATSUZAKI T, et al. Electromechanical dynamics of Z-shaped mechatronic synchronized switch harvesting on inductor (SSHI) harvester [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2019, 58(6): 064501.
- [4] LIU W, BADEL A, FORMOSA F, et al. A comprehensive analysis and modeling of the self-powered synchronous switching harvesting circuit with electronic breakers [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 65(5): 3899-3909.
- [5] LALLART M, WU W, YAN L, et al. Inductorless synchronized switch harvesting using a piezoelectric oscillator [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 33(3): 2585-2594.
- [6] 屈凤霞, 夏银水, 施阁, 等. 自供电的同步电荷提取电路的优化设计[J]. 传感技术学报, 2016, 29(3): 349-355.
QU Fengxia, XIA Yinshui, SHI Ge, et al. Optimized design of self-powered synchronous charge extraction circuit [J]. Journal of Transduction Technology, 2016, 29(3): 349-355. (in Chinese)
- [7] CHAMANIAN S, MUHTAROGLU A, MEMBER S, et al. A self-adapting synchronized-switch interface circuit for piezoelectric energy harvesters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(1): 901-912.
- [8] LIANG J, ZHAO Y, ZHAO K. Synchronized triple bias-flip interface circuit for piezoelectric energy harvesting enhancement [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 34(1): 275-286.
- [9] 朱莉娅, 郑梅, 陈仁文. 一种无源同步开关压电能量收集电路研究[J]. 电子元件与材料, 2016, 35(2): 74-79.
ZHU Liya, ZHENG Mei, CHEN Renwen. An improved passive synchronized switching circuit for piezoelectric energy harvesting [J]. Electronic Components and Materials, 2016, 35(2): 74-79. (in Chinese)
- [10] 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系统下的特性分析[J]. 机电工程, 2017, 11: 012.
GE Cong, LIU Haili, LIANG Junrui. New synchronized mechanical switch to improve piezoelectric energy harvesting efficiency and Its characteristic analysis in nonlinear system [J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2017, 11: 012. (in Chinese)
- [11] LALLART M, LOMBARDI G. Synchronized switch harvesting on electromagnetic system: a nonlinear technique for hybrid energy harvesting based on active inductance [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 203: 112135.
- [12] SHIH Y, VASIC D, WU W. A non-contact mechanical solution for implementing synchronized switching techniques for energy harvesting using reed switches [J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(12): 125013.
- [13] 孙强, 张捷, 肖新标, 等. 低温环境下高速列车车内噪声问题及控制方案[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(6): 1217-1222.
SUN Qiang, ZHANG Jie, XIAO Xinbiao, et al. Interior noise issues and noise control measures of high-speed train in low temperature [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(6): 1217-1222. (in Chinese)
- [14] 张合. 振动与冲击在引信技术中的应用展望[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(2): 235-241.
ZHANG He. Application prospect of vibration and shock in fuze technology [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(2): 235-241. (in Chinese)



第一作者简介:黄瑶,女,1995年11月生,硕士生。主要研究方向为振动能量回收、自供电传感器及非线性动力学。曾发表《Energy current analysis of an improved self-adaptive mechatronic approach for P-SSHI》(《IEEE Transactions on Industrial Electronics》2020, Vol. 68, No. 2)等论文。
E-mail: huangyao.daisy@foxmail.com

通信作者简介:刘伟群,男,1983年10月生,博士、教授。主要研究方向为振动能量收集、智能材料结构与系统。
E-mail: weiqunliu@home.swjtu.edu.cn