

DOI: 10.13382/j.jemi.B2002914

基于分段线性系统的宽频振动能量收集器*

张 坤^{1,2} 武科迪¹ 苏宇锋¹

(1. 郑州大学 机械与动力工程学院 郑州 450001; 2. 河南工业大学 机电工程学院 郑州 450001)

摘要:研究了一种基于分段线性系统的宽频振动能量收集器,主要由抗磁稳定悬浮结构、弹性膜及感应线圈组成。在静止状态下,悬浮磁铁不需要任何外界能量稳定地悬浮在热解石墨板之间。当振动能量采集器受到水平振动激励时,悬浮磁铁在两热解石墨板之间摆动;当摆动幅度比较大时,悬浮磁铁将与弹性膜发生碰撞使系统刚度呈阶段性变化;随着悬浮磁铁运动,感应线圈中的磁通量发生变化产生感应电动势,从而使外界振动动能转化为电能。当水平激励振幅为 5 mm 时,系统的工作带宽达到 3.2 Hz,最大输出电压达到 78 mV,最大输出功率为 56.3 μ W;当水平振动激励的加速度为 3 m/s^2 时,系统的工作带宽达到 2 Hz,最大输出电压为 44 mV,最大输出功率为 18 μ W。

关键词:分段线性系统;振动能量收集器;宽频;电磁感应

中图分类号: TH703; TN712 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 480.7020

Wideband vibration harvester based on piecewise linear system

Zhang Kun^{1,2} Wu Kedi¹ Su Yufeng¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. School of Electromechanical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: A wideband vibration harvester based on piecewise linear system is proposed, which is mainly composed of the structure of diamagnetically stabilized levitation, induced coils and elastic films. The floating magnet is freely levitated between two pyrolytic graphite sheets without any external energy input. When a horizontal vibration excitation was applied to the vibration energy harvester, the floating magnet would oscillate between two pyrolysis graphite sheets, the floating magnet impacted to the elastic film with the increase of vibration intensity, which would cause the system stiffness to be segmented, the magnetic flux through the induced coils would change during the movement of the floating magnet, and the external vibration was converted into electrical energy. When the horizontal excitation amplitude is 5 mm, the operating bandwidth of the system reaches 3.2 Hz, the maximum output voltage reaches 78 mV, and the maximum output power is 56.3 μ W. Under an excitation acceleration of 3 m/s^2 , a maximum output voltage of 44 mV with the maximum power of 18 μ W is obtained by the harvester, and the operating bandwidth of the system reaches 2 Hz.

Keywords: piecewise linear system; vibration energy harvester; wideband; electromagnetic induction

0 引言

随着无线通信技术、微机电技术以及集成电路技术的发展,无线传感网络得到了广泛的应用,但是目前所采用的供电方式——传统化学电池限制了无线传感网络的性能,难以为其提供持久的电能。传统化学电池储能少、

寿命短,需要经常更换或者频繁的充电,而且不适用于传感节点分布比较广泛、人类难以二次进入、环境恶劣的工作场合。为了解决这一问题,有学者提出利用振动能量收集器^[1-3]将电子器件周边时刻存在的振动能转化为电能来替代化学电池。根据能量转换机制的不同,振动能量收集器可分为 4 种类型,电磁式^[4-6]、压电式^[7-9]、静电式^[10-11]以及磁致伸缩式^[12-13]。电磁式振动能量收集器具

收稿日期: 2020-01-12 Received Date: 2020-01-12

* 基金项目: 国家自然科学基金(51475436)、NSFC-河南联合基金(U1904169)资助项目

有结构简单、能量密度高、环保以及能够响应低频振动等诸多优点,成为该领域的研究热点之一。

目前,电磁式振动能量收集器的设计与研究已经取得了一定的研究成果,但是部分装置是基于线性谐振系统^[14]的,只能在谐振激励状态下才能获得最佳的输出效果。然而,环境中的振动具有随机特性,激励频率很难和装置的谐振频率一致,严重影响了振动能量收集器的输出性能。通过拓宽振动能量收集器的工作带宽可以有效地解决上述问题。Anjum 等^[15]设计了一种可应用于智能传感器的宽带电磁式能量收集器,其工作带宽达到 70 Hz。Wang 等^[16]提出了一种基于自组装磁流体液体轴承的非共振宽带振动能量收集器,实验结果表明该装置能够在 2~4 Hz 范围内稳定工作。

虽然这些宽频的振动能量收集器能够提高系统的输出性能,但是系统内部的摩擦会消耗一部分外界能量,降低能量转化效率。郑州大学的苏宇锋团队^[17-19]利用抗磁稳定悬浮结构构建了一种电磁振动能量收集器,在该装置中活动的磁铁不与任何部件相接触,有助于降低能量转化过程中的损耗。本文在该装置的基础上进行改进,增设了弹性膜结构,构建了分段线性振动系统以拓宽系统的工作带宽,通过实验研究了新装置的输出特性。

1 振动能量收集器结构

基于分段线性系统的宽频振动能量收集器的结构如图 1 所示,该装置主要由弹性膜、感应线圈以及抗磁稳定悬浮结构组成,其中抗磁稳定悬浮结构自上而下由提升磁铁、上热解石墨板、悬浮磁铁以及下热解石墨板构成;感应线圈分别贴附在上热解石墨板的下表面和下热解石墨板的上表面。

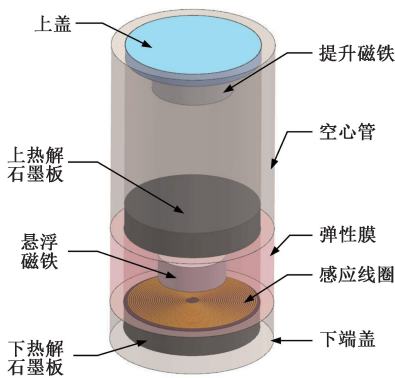


图 1 振动能量收集器

Fig. 1 Schematic of the vibration energy harvester

在该系统中,提升磁铁和悬浮磁铁均沿轴向磁化且磁化方向相同,此时悬浮磁铁受到提升磁铁的磁吸

引力、自身重力以及来自热解石墨板的抗磁力而达到平衡。静止状态下,悬浮磁铁处于自由悬浮状态,不与任何部件接触且不需要任何能源的维持。当对振动能量收集器施加沿水平方向的振动激励,悬浮磁铁将在 2 个热解石墨板之间摆动,感应线圈中的磁通量发生变化产生感应电动势,进而使机械振动能转换为电能。

2 理论建模

2.1 系统模型

振动能量收集器受到外界振动激励后,悬浮磁铁将出现摆动现象,由于空间的限制,悬浮磁铁摆动的幅度比较小,可以视为单摆模型。悬浮磁铁摆动频率由悬浮磁铁与提升磁铁的间距所决定,当激励振幅较大时,悬浮磁铁将与弹性膜发生碰撞。根据悬浮磁铁的运动情况对该装置进行建模得到一个分段线性振动模型^[20],如图 2 所示,其中 k_0 和 k_1 分别表示等效弹簧和弹性膜的刚度, c_0 和 c_1 分别代表等效弹簧和弹性膜的阻尼系数, c_e 代表电磁阻尼系数。

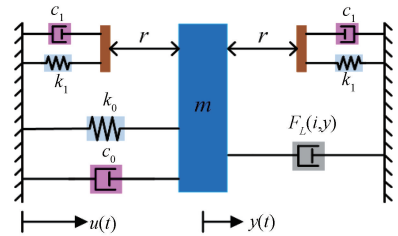


图 2 分段线性振动模型

Fig. 2 Piecewise linear vibration model

当悬浮磁铁的相对位移小于碰撞间距 r 时,悬浮磁铁不与弹性膜发生碰撞,系统的刚度和阻尼分别为 k_0 和 c_0+c_e ;当悬浮磁铁的相对位移大于碰撞间距 r 时,悬浮磁铁与弹性膜发生碰撞,系统的刚度和阻尼分别为 k_0+k_1 和 $c_0+c_1+c_e$ 。该分段线性振动系统的运动方程可以表示为:

$$\begin{cases} m\ddot{y} + (c_0 + c_1)\dot{y} + F_L(i, y) + (k_0 + k_1)y - k_0r = -m\ddot{u}, & y \geq r \\ m\ddot{y} + c_0\dot{y} + k_0y + F_L(i, y) = -m\ddot{u}, & |y| < r \\ m\ddot{y} + (c_0 + c_1)\dot{y} + F_L(i, y) + (k_0 + k_1)y + k_0r = -m\ddot{u}, & y \leq -r \end{cases} \quad (1)$$

$$iL_{coil} + i(R_{load} + R_{coil}) = V(y, \dot{y})$$

式中: $u(t) = U\sin\omega t$; U 表示激励振幅; ω 表示激励频率; y 表示相对位移; $F_L(i, y)$ 表示电磁阻尼力; i 为感应电流; L_{coil} 为电感; R_{load} 和 R_{coil} 分别为系统内阻和外接电阻;

$V(y, \dot{y})$ 表示感应电压。

2.2 频率响应分析

当振动能量收集器处于开路状态下,系统的电磁阻尼可以忽略不计,则式(1)可以改写成:

$$\begin{cases} \ddot{y} + 2(\zeta_0\omega_0 + \zeta_1\omega_1)\dot{y} + (\omega_0^2 + \omega_1^2)y - \omega_1^2r = -\ddot{u}, & y' \geq r \\ \ddot{y} + 2\zeta_0\omega_0\dot{y} + \omega_0^2y = -\ddot{u}, & |y| < r \\ \ddot{y} + 2(\zeta_0\omega_0 + \zeta_1\omega_1)\dot{y} + (\omega_0^2 + \omega_1^2)y + \omega_1^2r = -\ddot{u}, & y \leq -r \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\omega_0 = \sqrt{\frac{k_0}{m}}$, $\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m}}$, $\zeta_0 = c_0/2m\omega_0$, $\zeta_1 = c_1/$

$2m\omega_1$, ω_0 和 ω_1 分别是等效弹簧和弹性膜的共振频率, ζ_0 和 ζ_1 分别为等效弹簧和弹性膜的阻尼比。

令 $\tau = \omega_0 t$, $\rho = \frac{\omega}{\omega_0}$, $\rho_1 = \frac{\omega_1}{\omega_0}$, $\mu = \frac{y}{U}$, $v = \frac{\dot{y}}{U}$, $\delta = \frac{r}{U}$, 则

式(2)可以改写为:

$$\ddot{\mu} + 2\zeta_0\dot{\mu} + \mu = \rho^2 \sin(\rho\tau) + f(\mu, \dot{\mu}) \quad (3)$$

其中:

$$f(\mu, \dot{\mu}) = \begin{cases} -2\rho_1\zeta_1\dot{\mu} - \rho_1^2\mu + \rho_1\delta, & \mu > \delta \\ 0, & |\mu| < \delta \\ -2\rho_1\zeta_1\dot{\mu} - \rho_1^2\mu - \rho_1\delta, & \mu < -\delta \end{cases}$$

利用平均法可以求得式(3)的解析解,假设式(3)的一阶近似解为:

$$\mu = a(\tau) \sin\varphi(\tau) \quad (4)$$

$$\dot{\mu} = a(\tau)\rho\cos\varphi(\tau) \quad (5)$$

$$\varphi(\tau) = \rho(\tau) + \beta(\tau) \quad (6)$$

其中, $a(\tau)$ 代表缓慢变化的振幅, $\beta(\tau)$ 代表缓慢变化的相位差。

联立式(4)和式(5)可得:

$$a\dot{\sin}\varphi + a\dot{\beta}\cos\varphi = 0 \quad (7)$$

将式(4)~(6)代入式(3)可得:

$$a\rho\cos\varphi - a\dot{\beta}\rho\sin\varphi = a(\rho^2 - 1)\sin\varphi + \rho^2\sin(\varphi - \beta) - 2\zeta_0a\rho\cos\varphi + f(\mu, \dot{\mu}) \quad (8)$$

联立式(7)~(8)可得:

$$\dot{a}\rho = [a(\rho^2 - 1) + \rho^2\cos\beta]\sin\varphi\cos\varphi - (2\zeta_0a\rho + \rho^2\sin\beta)\cos^2\varphi + f(\mu, \dot{\mu})\cos\varphi \quad (9)$$

$$a\dot{\beta}\rho = -[a(\rho^2 - 1) + \rho^2\cos\beta]\sin^2\varphi + (2\zeta_0a\rho + \rho^2\sin^2\beta)\sin\varphi\cos\varphi - f(\mu, \dot{\mu})\cos\varphi \quad (10)$$

由于 \dot{a} 和 $\dot{\beta}$ 是随时间缓慢变化的,可以认为在 2π 周期内它们的大小保持恒定,则:

$$2\pi\dot{a}\rho = \int_0^{2\pi} [(a(\rho^2 - 1) + \rho^2\cos\beta)\sin\varphi\cos\varphi - (2\zeta_0a\rho + \rho^2\sin\beta)\cos^2\varphi + f(\mu, \dot{\mu})\cos\varphi] d\varphi \quad (11)$$

$$2\pi a\dot{\beta}\rho = - \int_0^{2\pi} [(a(\rho^2 - 1) + \rho^2\cos\beta)\sin^2\varphi - (2\zeta_0a\rho + \rho^2\sin\beta)\sin\varphi\cos\varphi + f(\mu, \dot{\mu})\sin\varphi] d\varphi \quad (12)$$

其中:

$f(\mu, \dot{\mu}) =$

$$\begin{cases} -2\rho_1\zeta_1a\rho\cos\varphi - \rho_1^2a\sin\varphi + \rho_1^2\delta, & \varphi_1 < \varphi < \pi - \varphi_1 \\ -2\rho_1\zeta_1a\rho\cos\varphi - \rho_1^2a\sin\varphi - \rho_1^2\delta, & \pi + \varphi_1 < \varphi < 2\pi - \varphi_1 \end{cases}$$

$\varphi_1 = \sin^{-1}(\delta/\alpha)$

令式(11)、(12)左端关于时间的导数等于0,则可以

$$2\pi\rho^2\sin\beta = -2\zeta_0a\rho\pi - 4\rho\rho_1\zeta_1\delta\cos\varphi_1 - 2\rho\rho_1\zeta_2a(\pi - 2\varphi_1) \quad (13)$$

$$2a\varphi_1\rho_1^2 - 2\rho_1^2\delta\cos\varphi_1 = \pi\rho^2\cos\beta = -a\pi\rho^2 + a\pi(1 + \rho_1^2) - 2a\varphi_1\rho_1^2 - 2\rho_1^2\delta\cos\varphi_1 \quad (14)$$

联立式(13)、(14)求解可得到系统的频率响应特性。

3 实验

3.1 实验系统搭建

图3所示为采用3D打印技术制作的实验样机,各部件的参数如表1所示,其中4个感应线圈以串联的方式连接,总内阻大小为108 Ω ;碰撞间距为6.5 mm,弹性膜刚度为0.82 N/mm。



图3 振动能量收集器样机

Fig. 3 Prototype of vibration energy harvester

图4所示为振动测试实验平台,通过计算机设置目标振动信号并传输到振动控制器(ECON VT9002)中,振动控制器将处理后的信号经过功率放大器(ECON LSA-V5 000 A)传输给激振器(ECON LT-50-ST250)驱动激振器工作;样机和加速度传感器(ECON EA-YD-188)利用502胶水固定在激振器的顶杆端部;加速度传感器测得

表1 部件参数

Table 1 Component parameters

参数	性能
提升/悬浮磁铁牌号	NdFeB52(1.45T)
悬浮磁铁尺寸/mm	Φ12×4
提升磁铁尺寸/mm	Φ15×6.35
热解石墨板磁化系数	$\chi = -(8, 8, 45) \times 10^{-5}$
热解石墨板尺寸/mm	Φ25×5
感应线圈材料	铜
感应线圈尺寸/mm	Φ25×Φ4×0.07
感应线圈线径/mm	0.07
感应线圈数目	4

顶杆的加速度传输给振动控制器;采用示波器(Tektronix TDS2012B)测试并记录样机的输出电压。

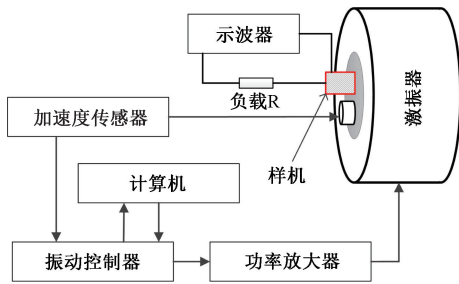


图4 实验平台

Fig. 4 Experimental setup

3.2 实验与分析

实验过程中分别测试了激励振幅和激励加速度对振动能量收集器输出性能的影响。不同激励振幅下输出电压随激励频率的变化曲线如图5所示,从图5可以看出幅频响应曲线呈阶段性变化。当振幅为3 mm时,输出电压曲线在2.1 Hz处发生偏转,而在3.1 Hz处出现电压骤减现象;当激励频率<2.1 Hz时,悬浮磁铁不会与弹性膜相互碰撞,在此阶段系统响应曲线与线性系统一致;当激励频率在2.1~3.1 Hz时,悬浮磁铁将与弹性膜发生碰撞,在此区间内幅频响应曲线接近线性变化;当激励频率>3.1 Hz时,悬浮磁铁同样不会与弹性膜发生碰撞,幅频响应曲线将与线性系统的响应曲线一致,该阶段悬浮磁铁的相对位移随激励振幅的增大而逐渐减小,感应线圈中的磁通量也随之减小,当相对位移减小到一定程度时,感应线圈内的磁通量变化由激励频率所决定,其随激励频率的增大而增大,因此在该阶段系统的输出电压随着激励频率的增大而增大;在此激励振幅作用下,系统的最大输出电压为42.2 mV,工作带宽为1 Hz。当激励振幅分别为4和5mm时,幅频响应曲线均在2 Hz处发生偏转,而电压骤减点分别为3.7和5.2 Hz,最大输出电压分别为50.1和78 mV,系统的工作带宽分别为1.7和3.2 Hz。由此可知,系统的工作带宽和最大输出电压随激励振幅的增大而增大。

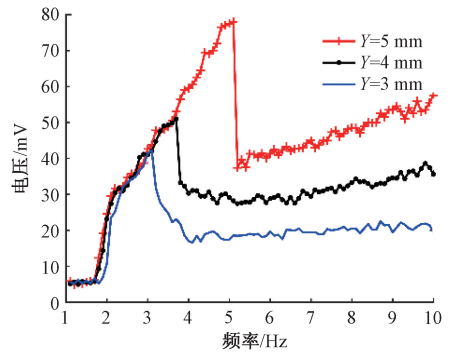


图5 不同激励振幅下输出电压随激励频率的变化曲线

Fig. 5 Curve of output voltage with excitation frequency under different excitation amplitudes

3种不同激励振幅下系统的输出功率随激励频率的变化曲线如图6所示,从图6可以看到,输出功率同样呈分段变化,与输出电压曲线一致,3种激励振幅下系统所产生的最大输出功率分别为16.4、24.1和56.3 μW。

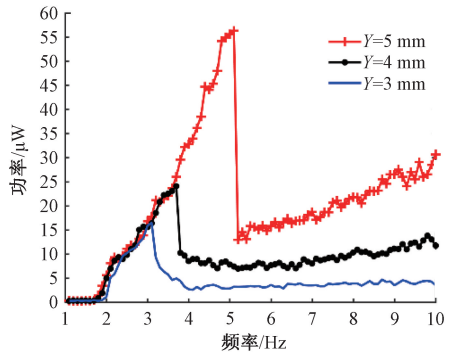


图6 不同激励振幅下输出功率随激励频率的变化曲线

Fig. 6 Curve of output power with excitation frequency under different excitation amplitudes

不同激励加速度下系统的输出电压随激励频率的变化曲线如图7所示,从图7可以看到,输出电压先随着激励频率的增大而增大,在这一阶段悬浮磁铁与弹性膜发生碰撞,而且激励频率越大,悬浮磁铁与弹性膜碰撞的越剧烈,在输出电压达到最大后,输出电压出现骤减,然后输出电压随着激励频率的增大而减小。3种激励加速度所对应的最大输出电压分别为26.3、39和44 mV,其随激励加速度的增大而增大,所对应的激励频率分别为2.6、3.4和4.0 Hz。由于在起振之初,悬浮磁铁便开始于弹性膜发生碰撞,因此3种激励加速度下系统的工作带宽分别为0.6、1.4和2 Hz,其随着激励频率的增大而增大。

不同激励加速度条件下系统的输出功率随激励频率的变化曲线如图8所示,输出功率的变化趋势与输出电压的变化趋势一致,均呈现先增大后减小的变化趋势,其

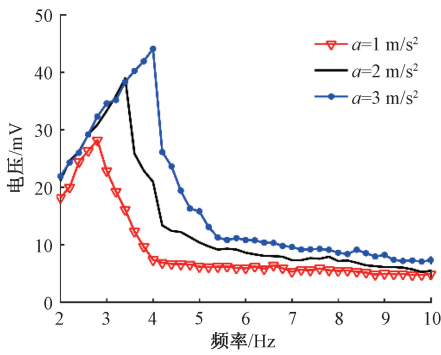


图 7 不同激励加速下输出电压随激励频率的变化曲线

Fig. 7 Curve of output voltage with excitation frequency under different excitation accelerations

中输出功率分别在 2.6、3.0 和 4.0 Hz 处达到最大,所对应的最大输出功率分别为 7.3、14.1 和 18 μW 。

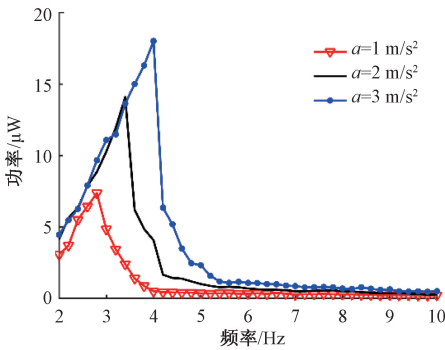


图 8 不同激励加速度下输出功率随激励频率的变化曲线

Fig. 8 Curve of output power with excitation frequency under different excitation accelerations

4 结 论

本文提出了一种基于分段线性系统的电磁式振动能量收集器,通过实验验证了该振动能量收集器具有宽频响应特性,通过阶段性改变系统的刚度来实现输出电压(输出功率)的阶段性变化,从而拓宽系统的工作带宽。实验测得在激励振幅为 5 mm 时,最大输出电压为 78 mV,最大输出功率为 56.3 μW ,工作带宽为 3.2 Hz;在激励加速度为 3 m/s^2 时,最大输出电压为 44 mV,最大输出功率为 18 μW ,工作带宽为 2 Hz。通过实验发现系统的工作带宽随着外界激励强度的增大而增大。本文所设计的振动能量收集器能够收集激励频率小于 10 Hz 的环境振动,通过进一步优化设计有望应用于人体运动能的收集。

参考文献

[1] MUNAZ A, CHUNG G S. An electromagnetic energy harvester based on multiple magnet scavenging power

from low frequency vibration [J]. *Microsystem Technologies*, 2017, 23(1):91-99.

- [2] NAUFAL S, ANDWITRI Z Z M, ISMARDI A, et al. Simulation and characterization of symmetrical planar spring FR4-based for electrodynamic vibration energy harvesting[C]. 6th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM), IEEE, 2017:145-149.
- [3] YAMAMOTO B E, TRIMBLE A Z. An experimentally validated analytical model for the coupled electromechanical dynamics of linear vibration energy harvesting systems [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2017, 28(1):3-22.
- [4] GAO M, WANG Y, WANG Y, et al. Experimental investigation of non-linear multi-stable electromagnetic-induction energy harvesting mechanism by magnetic levitation oscillation [J]. *Applied Energy*, 2018, 220: 856-875.
- [5] AHMAD I, KHAN F U. Multi-mode vibration based electromagnetic type micro power generator for structural health monitoring of bridges [J]. *Sensors and Actuators: Pphysical*, 2018, 275:154-161.
- [6] ASAI T, ARAKI Y, IKAGO K. Energy harvesting potential of tuned inertial mass electromagnetic transducers [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 84:659-672.
- [7] FAN K, TAN Q, LIU H, et al. Improved energy harvesting from low-frequency small vibrations through a monostable piezoelectric energy harvester [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 117: 594-608.
- [8] HE J, WEN T, QIAN S, et al. Triboelectric-piezoelectric-electromagnetic hybrid nanogenerator for high-efficient vibration energy harvesting and self-powered wireless monitoring system [J]. *Nano Energy*, 2018, 43:326-339.
- [9] 陆颢瓚, 朱宇宸, 刘琪才, 等. 悬臂梁压电式能量收集器方向性效率的研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(3):181-187.
- LU H Z, ZHU Y CH, LIU Q C, et al. Study on directional efficiency of piezoelectric VEH based on cantilever beam [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(3):181-187.
- [10] YANG Z, HALVORSEN E, DONG T. Electrostatic energy harvester employing conductive droplet and thin-film electret [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2013, 23(2):315-323.
- [11] WANG F, HANSEN O. Electrostatic energy harvesting device with out-of-the-plane gap closing scheme [J].

- Sensors and Actuators:Physical, 2014, 211:131-137.
- [12] JAFARI H, GHODSI A, AZIZI S, et al. Energy harvesting based on magnetostriction, for low frequency excitations[J]. Energy, 2017, 124:1-8.
- [13] APICELLA V, CLEMENTE C S, DAVINO D, et al. Magneto-mechanical optimization and analysis of a magnetostrictive cantilever beam for energy harvesting[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2019, 475:401-407.
- [14] SIDDIQUE A R M, MAHMUD S, VAN H B. Energy conversion by 'T-shaped' cantilever type electromagnetic vibration based micro power generator from low frequency vibration sources [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 133:399-410.
- [15] ANJUM M U, FIDA A, AHMAD I, et al. A broadband electromagnetic type energy harvester for smart sensor devices in biomedical applications [J]. Sensors and Actuators:Physical, 2018, 277:52-59.
- [16] WANG Y, ZHANG Q, ZHAO L, et al. Non-resonant electromagnetic broad-band vibration-energy harvester based on self-assembled ferrofluid liquid bearing [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2017, 26(4): 809-819.
- [17] ZHANG Z, ZHANG K, DUAN Z, et al. Study on diamagnetic levitation structure in electromagnetic vibration energy harvester [J]. Sensors and Materials, 2018, 30(6):1357-1366.
- [18] YE Z, DUAN Z, TAKAHATA K, et al. Motion characteristics and output voltage analysis of micro-vibration energy harvester based on diamagnetic levitation[J]. Applied Physics A, 2015, 118(1): 91-100.
- [19] 巩启, 苏宇锋, 张自军, 等. 抗磁悬浮永磁体转子的理论分析与实验[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(8):63-68.
- GONG Q, SU Y F, ZHANG Z J, et al. Theoretical analyses and experiments of permanent magnets rotor based on diamagnetic levitation[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(8):63-68.
- [20] USPENSKY B V, AVRAMOV K V. On the nonlinear normal modes of free vibration of piecewise linear systems[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(14):3252-3265.

作者简介



张坤, 2013年于黑龙江八一农垦大学获得学士学位, 2019年于郑州大学获得博士学位, 现为河南工业大学老师, 主要研究方向为能量采集器。

E-mail:kunzh2019@qq.com

Zhang Kun received his B. Sc. degree from Heilongjiang Bayi Agricultural University in 2013, Ph. D. degree from Zhengzhou University in 2019. Now he is a teacher of Henan University of Technology. His main research interest includes energy harvester.



苏宇锋(通信作者), 博士, 现为郑州大学教授, 主要研究方向为能量采集器和微致动器。

E-mail:yufengsu@zzu.edu.cn

Su Yufeng (Corresponding author) Ph. D. degree, professor at Zhengzhou University. His main research interest includes energy harvester and microactuator.