

中间梁方式下压电式能量采集器发电性能研究

闫晓东^{1,2}, 周公博^{1,2}

(1. 江苏省矿山机电装备重点实验室, 江苏徐州 221116; 2. 中国矿业大学机电工程学院, 江苏徐州 221116)

摘要: 压电式能量采集器(Piezoelectric Energy Harvester, PEH)固定方式的改变会直接影响其发电性能, 而传统悬臂梁固定方式(Cantilever Beam Fixed Mode, CBFM)调频范围窄且发电性能较差. 为了使PEH的发电性能最大化, 提出了一种适用于任意尺寸压电片的中间梁固定方式(Intermediate Beam Fixed Mode, IBFM). 同时, 通过仿真和实验的方法研究了添加不同质量块后CBFM和IBFM两种固定方式的发电性能. 结果表明, 在相交频带处, 与CBFM相比, 采用IBFM后, PEH在单位加速度条件下最大开路电压和发电功率分别平均提升了95.19%和205.88%. 此外, 机电耦合系数(Electromechanical coupling coefficient, EMCC)平均提升了11.60%. 因此, 所提出的方法可以为PEH在不同频段处固定方式的选择提供指导.

关键词: 压电式能量采集器; 发电性能; 悬臂梁固定方式; 中间梁固定方式; 相交频带

中图分类号: TN384; TN712; TH7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2022)02-0404-11

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20201186

Study on Power Generation Performance of Piezoelectric Energy Harvester Under Intermediate Beam Fixed Mode

YAN Xiao-dong^{1,2}, ZHOU Gong-bo^{1,2}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Mining Electromechanical Equipment, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: The change of fixed mode of piezoelectric energy harvester(PEH) will directly affect its power generation performance, while the traditional cantilever beam fixed mode(CBFM) has a narrow frequency range and poor power generation performance. In order to maximize the power generation performance of the PEH, an intermediate beam fixed mode (IBFM) suitable for piezoelectric plates of any size is proposed. Meanwhile, the power generation performance of the two fixed modes of the CBFM and IBFM after adding different mass blocks has been studied through simulation and experiment methods. The results show that compared with the CBFM, the maximum open circuit voltage and maximum generated power of the PEH under unit acceleration are increased by 95.19% and 205.88%, respectively at the intersection frequency band. In addition, the electromechanical coupling coefficient(EMCC) is increased by 11.60% on average. Therefore, the proposed method can provide guidance for the selection of fixed mode of the PEH at different frequency bands.

Key words: piezoelectric energy harvester; power generation performance; cantilever beam fixed mode; intermediate beam fixed mode; intersection frequency band

1 引言

目前, 无线传感器节点在各种工业应用的监控系统中发挥着重要作用, 可以在线监测关键设备的状态, 进行故障检测和诊断等. 然而, 传统的节点依靠电池供电, 存在寿命短、定期更换困难(特别是矿井环境)等问题^[1,2]. 随着能量收集技术的发展, 从环境中获取能量正成为微电子设备持续供电的新途径. 因此, 自供能节

点变得越来越有吸引力. 环境中的能源包括太阳能、风能、振动能等. 其中, 振动能几乎无处不在, 且不易受天气、位置等因素影响, 已成为研究热点^[3]. 通常将振动能转化为电能的装置称为振动能量采集器. 根据能量交换原理, 将振动能量采集器分为电磁式、静电式和压电式^[4]. 而压电式能量采集器(Piezoelectric Energy Harvester, PEH)具有转换效率高、输出电压高、结构简单等

特点,引起了人们的广泛关注^[5]。

常见的 PEH 大多采用传统悬臂梁固定方式(Cantilever Beam Fixed Mode, CBFM),存在工作频带窄的问题,而环境激励频率具有宽频和随机性的特点,采集器的固有频率无法时刻匹配环境振动频率,导致采集器从环境中获取的能量密度小,发电性能大大降低^[6,7]。基于上述问题,许多学者提出了多种方法来提高 PEH 的发电性能和带宽^[7],包括优化悬臂梁和质量块的几何结构^[8-11]、优化电极的占比^[12]、收集多种形式的能量^[13,14]、引入非线性理论^[15]、设计阵列式采集器^[6]、引入自动调频技术^[16]等。其中,自动调频技术可以通过主动^[17]或被动^[18]的方式匹配环境振动频率,具有较强的环境适应性,表现出良好的发展前景。但上述方法多是基于 CBFM,存在可调频范围有限的缺点,即自由端无质量块时 PEH 的固有频率为 f ,通过增加质量块,并利用自动调频技术,PEH 的固有频率可以在 $0\sim f$ 范围内调节。然而,很多大型装备存在两个或多个较稳定且离散的振动主频率,例如,大型振动筛的振动频率与物料的粒径和数目密切相关,即物料粒径和数目的不同会导致各振动主频率之间的差值变大。当振动频率大于 f 时,PEH 在 CBFM 下的发电性能将显著降低,从而达不到节点的功耗需求。因此,传统 CBFM 无法适用于环境振动频率变化范围较大的场合。

调整固定方式可以改变 PEH 的固有频率,增加可调频范围,进一步利用自动调频技术来拓宽带宽以改善发电性能,提高 PEH 的环境适应性。然而,很少有学者研究 PEH 的固定方式。除了传统的 CBFM,刘岳等^[19]研究了固支梁固定方式,实现了结构的优化。Kodalali 等^[20]将固支梁方式下压电片分段布置,并通过实验进行了验证。Hamani 等^[21]研究了在简支梁固定方式下,分布质量和不平衡质量对 PEH 发电性能的影响。然而,上述研究是对固定方式的单独研究。另外,文献^[22,23]研究了 CBFM 和简支梁固定方式作用下,压电片的长宽比对 PEH 的影响,并提出了一种新型固定方式,与 CBFM 相比,该方法在更高的加速度激励下表现出更好的发电性能。尽管对不同固定方式进行了研究,但 PEH 在不同频段的最佳固定方式仍然不明确。

针对以上现状,本文提出了一种新型固定方式——中间梁固定方式(Intermediate Beam Fixed Mode, IBFM)。相比于传统 CBFM,所提出的 IBFM 可以进一步通过自动调频技术实现更宽的可调频范围,扩展 PEH 的应用场合,提高其发电性能和环境适应性。并试图确定在不同频段处 PEH 的最佳固定方式,以最大限度获取能量。本文的主要贡献如下:

(1)证明了通过调整固定方式可以增加 PEH 的可

调频率范围,为拓宽 PEH 带宽提供指导;

(2)在保证压电片可以安全工作的前提下,研究了 2 种固定方式下质量块重量变化时 PEH 的发电性能变化趋势;

(3)验证了所提出的 IBFM 在相同环境激励条件下与传统 CBFM 相比具有更好的发电性能。

2 模型与假设

2.1 模型

如图 1 所示,本文所使用的压电片模型在市场上很常见。上下层为压电陶瓷,中间为 CW617N 铜基板,压电陶瓷通过环氧树脂导电胶与铜基板胶结。图 1(a)为传统的 CBFM,图 1(b)为所提出的新型固定方式——IBFM。与传统 CBFM 相比,仅改变了固定端的位置,这是简单且容易实现的。接下来,通过加入质量块,调整 2 种固定方式的固有频率,分别研究 2 种固定方式下 PEH 的发电性能,从而确定不同频段的最佳固定方式。

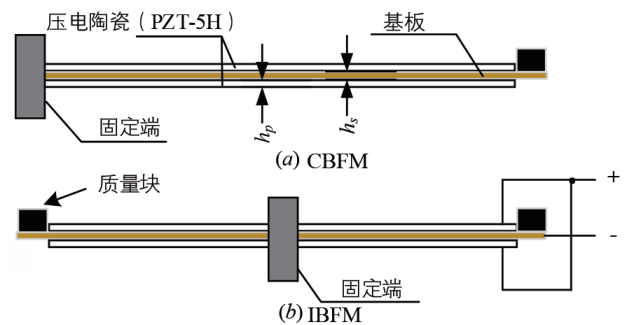


图 1 2 种固定方式模型示意图

当自由端无质量块时,两种固定方式下的固有频率可以表示为

$$\omega_r = \lambda_r^2 \sqrt{YI/mL^4} \quad (1)$$

其中, m 是单位长度的质量, YI 是梁横截面的弯曲刚度, L 表示自由端距固定端的距离。2 种固定方式的固有频率之间存在一定的关系,表示为

$$w_{r_2} = L_1^2 w_{r_1} / L_2^2 \quad (2)$$

其中, L_1 与 L_2 分别表示悬臂梁和中间梁 2 种固定方式的自由端距固定端的距离, ω_{r_1} 和 ω_{r_2} 分别表示悬臂梁和中间梁 2 种固定方式的固有频率。由于不同尺寸的压电片固定端的长度不确定,但一般远小于压电片的长度,因此可以先忽略固定端的长度,即认为 $L_1=2L_2$ 。假设 CBFM 下 PEH 的固有频率为 f ,可知调频范围为 $0\sim f$,则采用 IBFM 后,调频范围可以增加至 $0\sim 4f$ 。

由于本文中 2 种固定方式的固定端长度均为 1 mm,因此,在考虑固定端距离后,采用 IBFM 时 PEH 的调频范围可以达到 $0\sim 3.1f$ 。

其他相关参数见表1,其中压电层的弹性系数矩阵 C 、压电常数矩阵 E 和介电常数矩阵 ϵ 分别为

$$C = \begin{bmatrix} 12.6 & 7.95 & 8.41 & & & \\ 7.95 & 12.6 & 8.41 & & & \\ 8.41 & 8.41 & 11.7 & & & \\ & & & 2.33 & & \\ & & & & 2.3 & \\ & & & & & 2.3 \end{bmatrix} \times 10^{10} \text{ Pa},$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -6.55 \\ 0 & 0 & -6.55 \\ 0 & 0 & 23.3 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 17.0 & 0 \\ 17.0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (\text{C/m}^2),$$

$$\epsilon = \begin{bmatrix} 1700 & & \\ & 1700 & \\ & & 1470 \end{bmatrix}.$$

表1 模型参数

参数	基板	PZT-5H	质量块
杨氏模量/GPa	110	60.6	—
泊松比	0.324	—	—
密度/(kg/m ³)	8 300	7 500	8 900
长度/mm	80	60	10
宽度/mm	33	33	33
厚度/mm	0.2	0.2	—

2.2 假设

通过调整质量块的重量可以改变 PEH 的固有频率. 当外界环境频率大于 f 时, 可以利用上述 2 种固定方式, 加入不同重量的质量块, 将传统 CBFM 下 PEH 的调频范围从 $0 \sim f$ 扩大至 $0 \sim 3.1 f$.

为了使能量获取最大化, 需要确定不同频段的最佳固定方式. 选取 13 组不同重量的质量块, 范围为 1~37 g, 重量依次增加, 质量块添加到自由端. 假设 PEH 在不同环境振动频率下的最佳固定方式如图 2 所示, f_{\max} 和 f_{\min} 分别表示最大和最小重量相对应的固有频率. 可以假设 CBFM 和 IBFM 的调频范围分别为 $f_{1\min} \sim f_{1\max}$ 和 $f_{2\min} \sim f_{2\max}$. 随着重量的增加, IBFM 的固有频率不断降低, 当 $f_{2\min} < f_{1\max}$ 时, CBFM 和 IBFM 均能在 $f_{2\min} \sim f_{1\max}$ 频段实现谐振, 称 $f_{2\min} \sim f_{1\max}$ 为相交频带, 但 2 种固定方式在此频带的发电性能不同. 为了确定 PEH 在不同频带处的最佳固定方式, 首先假设 CBFM 和 IBFM 在 $f_{2\min} \sim f_{1\max}$ 频带都具有良好的发电性能. 在 $f_{1\min} \sim f_{2\min}$ 频带选择 CBFM; 在 $f_{1\max} \sim f_{2\max}$ 频带选择 IBFM. 为了验证这一假设, 下面对 2 种固定方式在相交频带处的发电性能进行了比较分析.

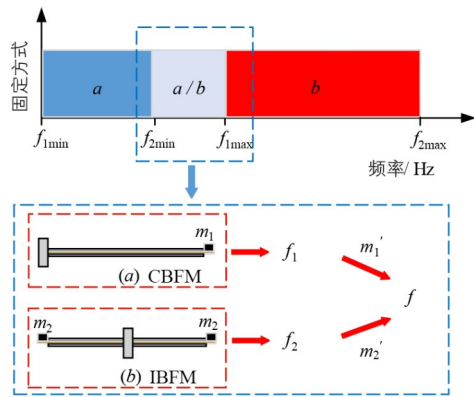


图2 假设模型

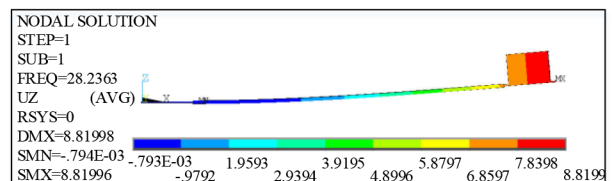
3 相交频带处发电性能仿真研究

本节主要模拟了 PEH 在两种固定方式下相交频带处的发电性能. 仿真软件采用 ANSYS 16.0, 选取 Solid5 (压电材料)、Solid45 (铜基板)、Circu94 (电阻) 3 种单元类型建立了 PEH 的有限元模型. 首先, 通过模态分析得到了固有频率. 然后, 通过谐响应分析, 得到了 2 种固定方式下的极限加速度、极限位移以及最大开路电压. 此外, 通过阻抗分析得到了机电耦合系数 (Electro-Mechanical Coupling Coefficient, EMCC). 最后, 在匹配最优电阻后, 得到了 2 种固定方式下的最大发电功率.

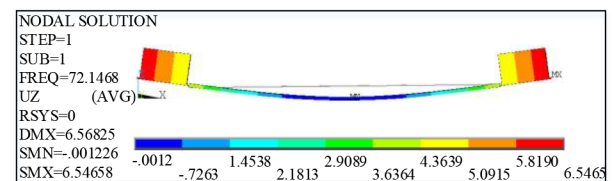
3.1 相交频带的求解

频率特性是 PEH 的重要指标, 因为当环境振动频率与 PEH 的固有频率一致或接近时, 发电性能最佳. 因此, 研究固有频率具有重要意义. 为此, 进行了模态分析, 得到了 CBFM 和 IBFM 2 种固定方式随质量块重量变化的固有频率. 图 3 为在 2 种固定方式下, 当重物的质量均为 17 g 时 PEH 的振型示意图, 可以看出, 两种固定方式下最大位移均发生在自由端.

如图 4 所示, 随着质量块重量的增加, 2 种固定方式的固有频率呈下降趋势. 当质量块的重量继续增加到



(a) CBFM 下振型示意图



(b) IBFM 下振型示意图

图3 2种固定方式重物质量均为 17 g 时振型示意图

一定范围时,固有频率的下降趋势减缓,说明当通过质量块调整频率时,质量块的重量不应过大.质量过大可能导致刚度下降,使得压电陶瓷断裂,而压电陶瓷的断裂将大大削弱 PEH 的发电性能.同时,图 4 显示 CBFM 的固有频率均低于 63 Hz,表明该固定方式适合于低频激励环境. IBFM 的固有频率高于 CBFM,在 48~200 Hz 之间.因此,IBFM 更适合中低频激励环境.此外,还验证了图 2 中存在相交频带的假设, CBFM 和 IBFM 在 48.24~63.90 Hz ($f_{2min} \sim f_{1max}$) 频段内均可以达到谐振状态.因此,下面将比较 PEH 在相交频段不同固定方式下的发电性能.

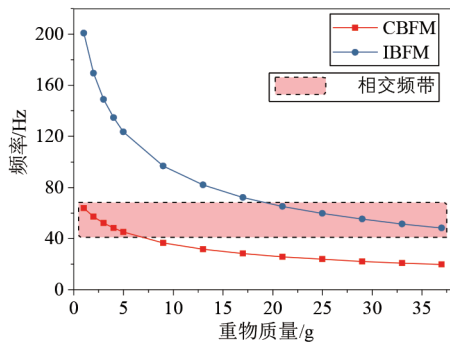


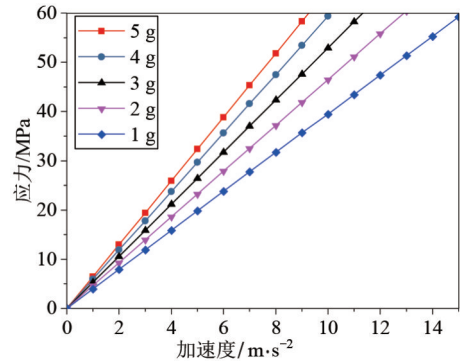
图 4 2 种固定方式固有频率与重物质量的关系

3.2 最大开路电压

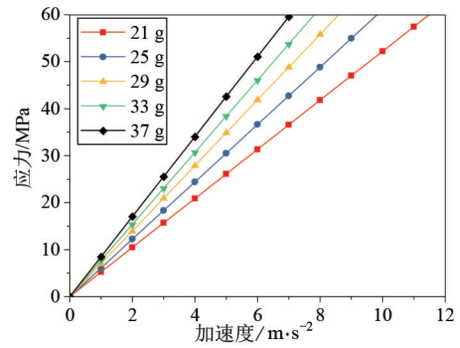
在获取压电振子的最大开路电压之前,需要得到其极限加速度.而压电陶瓷的极限应力一般为 60~100 MPa^[21],为了保证 PEH 的正常工作,以 60 MPa 为极限应力,进行谐响应分析.激励载荷为加速度,加速度不断增大,直至最大应力为 60 MPa 时停止,此时的加速度称为极限加速度,位移为极限位移.图 5 给出了 2 种固定方式下加速度和应力之间的关系,可见随着加速度的增加,应力也随之增加,两者成正比.

图 6 展示了在相交频带处 PEH 所能承受的极限加速度随着质量块重量增加的变化趋势.显然,两种固定方式下,随着质量块重量增加,所能承受的极限加速度均越来越小,但数值差别不大.其中, CBFM 能承受的极限加速度较高,为 9.26 ~ 15.18 m/s²; IBFM 能承受的极限加速度较低,为 7.04 ~ 11.48 m/s².

用 k_1 表示极限位移与极限加速度的比值,即 $k_1=d/a$.如图 7 所示,激励载荷为单位加速度条件时,与 IBFM 相比, PEH 在 CBFM 下能产生更大的位移,但这并不意味着 IBFM 发电性能较差.因为当 PEH 采用 IBFM 并发生共振时,从图 3 所示的 2 种固定方式的振型图可以看出, IBFM 左右两端将产生相同的变形量且提供相同的发电量.因此, 2 种固定方式下 PEH 的发电性能需要进一步研究确定.



(a) CBFM 下应力与加速度的关系



(b) IBFM 下应力与加速度的关系

图 5 2 种固定方式下应力与加速度的关系

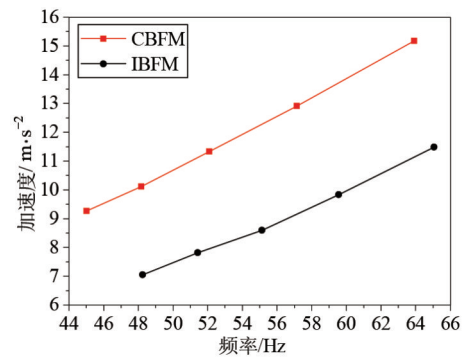


图 6 2 种固定方式极限加速度的比较

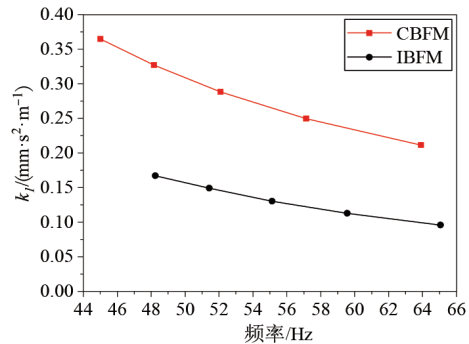


图 7 2 种固定方式在单位加速度条件时的极限位移

通过谐响应分析,得到了 PEH 在 2 种固定方式相交频带处开路电压与加速度的关系. 如图 8 所示,随着加速度的增加,开路电压均在不断增加. 同时,在相同加速度下,自由端质量块重量越大,开路电压越大. 其中, CBFM 和 IBFM 下最大开路电压平均值分别为 35.46 V 和 53 V. 与 CBFM 相比,采用 IBFM 后,在相同加速度下产生的开路电压更高,提升了 49.46%. 因此,对 2 种固定方式分别添加不同重量的质量块后,在相交频带处,当激励加速度为极限加速度时,采用 IBFM 会产生更高的电压.

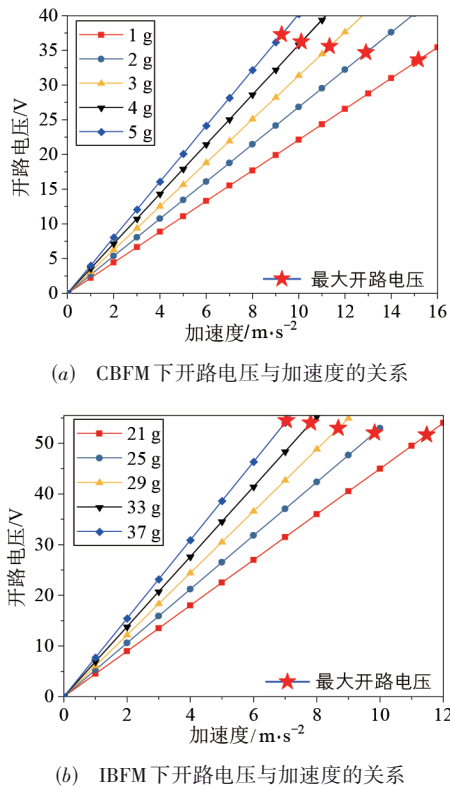


图 8 2 种固定方式开路电压与加速度的关系

最大开路电压是指在极限加速度条件下, PEH 产生的最大电压. 从图 8 可以看出,在两种固定方式下, PEH 的最大开路电压数值差异很大. 为了直观比较两种固定方式下 PEH 的发电能力,用 k_2 表示最大开路电压与极限加速度之比,即 $k_2 = U/a$. 如图 9 所示, CBFM 和 IBFM 下比例系数 k_2 的平均值分别为 3.128 2 和 6.105 9. 因此,采用 IBFM 时, PEH 在单位加速度的激励下能够产生更高的电压,且平均提高 95.19%,也进一步说明调整固定方式可以提高 PEH 的发电性能.

3.3 机电耦合系数

EMCC 是反映 PEH 机械能与电能耦合程度的参数,通常用来衡量 PEH 的机电转换效率. Mason 等人^[22]提出的计算方法被广泛用于计算共振频率附近的 EMCC,

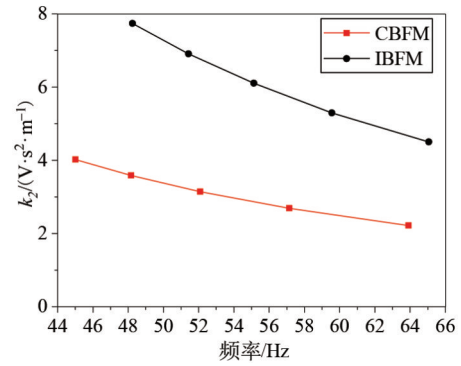


图 9 两种固定方式在单位加速度条件时的最大开路电压

其表达式为

$$K_d^2 = (f_a^2 - f_r^2) / f_a^2 \quad (3)$$

其中, f_a 为开路谐振频率, f_r 为短路谐振频率. 由以上公式可以看出,为了得到 PEH 的 EMCC,需要求出开路和短路谐振频率,从而进行阻抗分析. 阻抗分析需要耦合电压,并将选定的平面合成为一个点. 其中双晶压电陶瓷上下通过导线并联连接. 实际上,阻抗分析是基于逆压电效应,即在交变电场作用下 PEH 的机械变形. 为了便于计算,设置扫频范围,并将激励电场设为 1V (简谐激励),结果即为阻抗. 假设简谐电场的激励为 $E = E_m e^{i\omega t}$,压电片产生的电荷为 $Q = Q_m e^{i\omega t}$,则阻抗表示为

$$Z = V(t) / I(t) \quad (4)$$

其中, $V(t) = V_m \cdot e^{i\omega t}$, $I(t) = dQ/dt = i\omega Q_m e^{i\omega t}$. 因此,阻抗进一步表示为

$$Z = 1/i \cdot 2\pi f Q_m \quad (5)$$

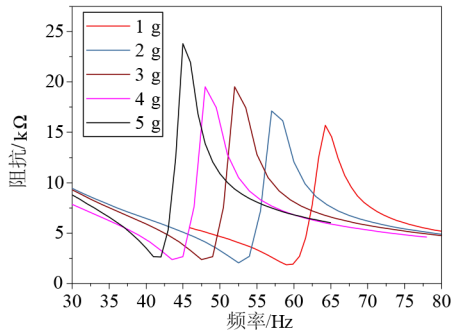
图 10 所示为 2 种固定方式下 PEH 的阻抗和频率之间的关系. 从图中可以得到不同重物质量下 PEH 的谐振频率,并根据式(3)计算出相应的 EMCC. 从表 2 可以看出 PEH 处于 CBFM 和 IBFM 时, EMCC 分别分布在 [0.35, 0.43] 和 [0.45, 0.53]. 经计算, CBFM 和 IBFM 下 EMCC 的平均值分别为 0.394 8 和 0.487 5,与 CBFM 相比,采用 IBFM 后, EMCC 平均提高了 23.48%, PEH 的机电转换效率得到了进一步的提升.

3.4 最大平均发电功率

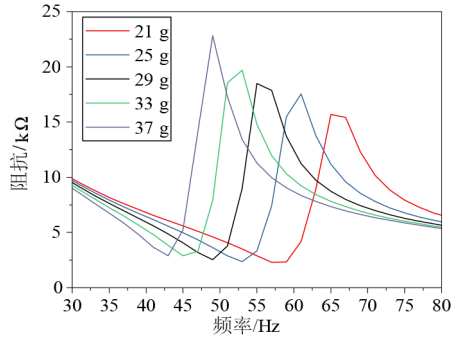
为了更深入地比较 2 种固定方式在相交频带处的发电性能,本节研究了 PEH 在 2 种固定方式下的发电功率. 而获得最佳输出功率的前提是匹配最优电阻,只有当负载电阻和 PEH 的内阻相等时,产生的功率才最大. 因此,需要设置一系列阻值不同的负载电阻进行匹配. 此外,匹配电阻范围可参照上述阻抗分析结果, PEH 内部阻抗计算公式为

$$R = Z \cdot \cos \theta \quad (6)$$

其中, θ 为阻抗相位角,可以得出内阻值不会超过阻抗



(a) CBFM下阻抗与频率之间的关系



(b) IBFM下阻抗与频率之间的关系

图 10 2种固定方式的阻抗与频率的关系

表 2 2种固定方式下EMCC

固定方式	质量块/g	f_n /Hz	f_r /Hz	EMCC	平均值
CBFM	1	64.25	59	0.395 913	0.394 806
	2	57	52.5	0.389 438	
	3	52	47.5	0.406 925	
	4	48	43.5	0.422 742	
	5	45	42	0.359 011	
IBFM	21	65	57	0.480 631	0.487 534
	25	61	53	0.495 071	
	29	55	49	0.454 182	
	33	53	45	0.528 302	
	37	49	43	0.479 483	

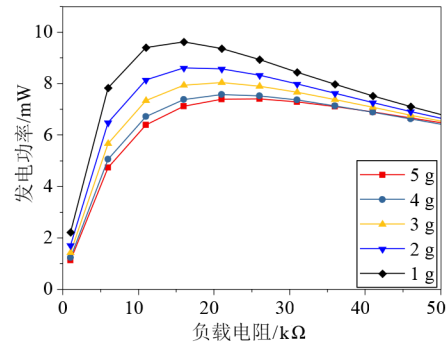
值的结论. 从图 10可以看出,在 2种固定方式下,PEH 的阻抗值均不超过 25 kΩ. 为了清楚地观察负载电阻变化时产生的功率,将负载电阻值范围设置为[0,50]kΩ,即通过设置不同大小阻值的负载电阻来测试 PEH 的发电功率. 假设当前频率下外接负载电阻所对应的最大电压为 U_{\max} ,而外接负载电阻在当前振动频率的电压可以表示为 $U = U_{\max} \sin 2\pi ft$,则瞬时功率表示为

$$P_{\text{inst}} = \frac{U^2}{R} = \frac{U_{\max}^2 \sin^2 2\pi ft}{R} \quad (7)$$

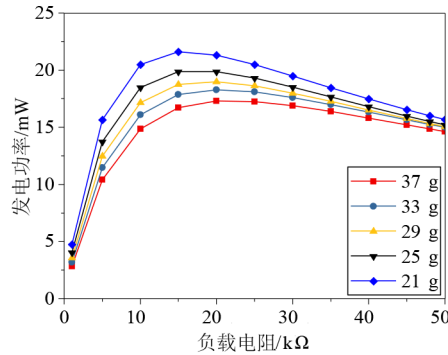
最大平均发电功率的计算公式可以表示为

$$P_{\text{average}} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\int_0^T P_{\text{inst}} dt}{T} = \frac{U_{\max}^2}{2R} \quad (8)$$

图 11所示为 2种固定方式下发电功率随负载电阻变化的情况. 观察表明 2种固定方式下 PEH 的最佳匹配电阻阻值均在 25 kΩ以下,这与阻抗分析得到的电阻阻值范围一致. 图 12展示了 PEH 在 2种固定方式下发电功率随激励加速度变化的趋势,可以看出随着加速度的增加,发电功率也在增加,但在 2种固定方式下发电功率的数值差异较大. 在相同的加速度下,PEH 在采用 IBFM 时发电功率要比采用 CBFM 时大得多. 其中,处于 CBFM 和 IBFM 时最大平均发电功率的平均值分别为 8.26 mW 和 19.24 mW. 可见在采用 IBFM 后,最大平均发电功率提高了 132.93%.



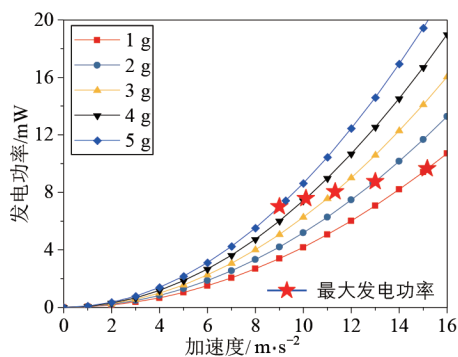
(a) CBFM 下发电功率与负载电阻之间的关系



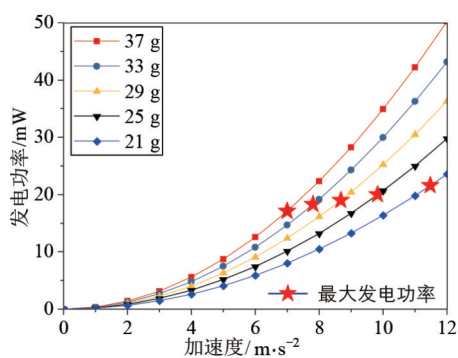
(b) IBFM 下发电功率与负载电阻之间的关系

图 11 两种固定方式的最优负载电阻

最大平均发电功率表示匹配最佳电阻后,在极限加速度激励条件下,PEH 产生的功率. 由于 2种固定方式在相交频带处极限加速度不完全相同,因此需要通过计算最大发电功率和极限加速度的比例系数 k_3 来比较最大发电能力,即 $k_3 = P_{\text{average}}/a$. 如图 13所示,显然,当 PEH 采用 IBFM 时,单位加速度激励条件下产生的发电功率远高于 CBFM 时的发电功率. 其中,CBFM 和 IBFM 下比值系数的平均值分别为 0.712 9 和 2.180 6.说明采用 IBFM 后,单位加速度激励下 PEH 的最大发电量提高了 205.88%.



(a) CBFM 下发电功率与加速度之间的关系



(b) IBFM 下发电功率与加速度之间的关系

图 12 2 种固定方式的发电功率与加速度的关系

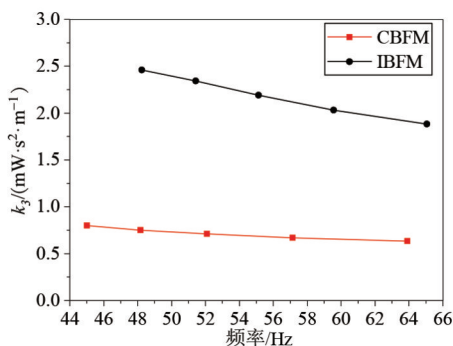


图 13 2 种固定方式在单位加速度条件时的最大发电功率

因此,结合上文中开路电压和EMCC的比较结果可知:在2种固定方式下,IBFM可以提供更好的发电性能.此外,参考图12和13还可以看出,在相同的加速度条件下,随着质量块重量的增加,PEH的发电功率也随之不断增加.然而,有趣的是,PEH的最大平均发电功率整体呈现下降趋势.事实上,从图6可以看出,重物的质量越大,PEH能够承受的极限加速度越小,这对PEH的最大平均发电功率有直接影响.

4 相交频带处发电性能实验验证

实验部分主要对仿真结果进行验证.首先求解出相交频带;其次对2种固定方式下PEH的开路电压进

行研究;然后,通过阻抗分析得到了EMCC,并参考阻抗分析结果匹配最优负载电阻;最后,进行最大平均发电功率的实验.

4.1 相交频带的求解

分别对PEH在2种固定方式下进行了不同重物重量的实验,搭建了如图14所示的实验平台,所涉及的实验设备主要有S51110高能电动式激振器、BAA120功率放大器、SCS-2信号发生器以及示波器.其中,2种固定方式下,质量块均由镍材料制成,压电片尺寸完全相同,只是改变了固定方式.通过参考仿真得到的2种固定方式的固有频率值,设置相应的扫频间隔,进而利用激振器进行扫频得到PEH的固有频率.在扫描过程中,观察示波器的电压变化并记录最大开路电压时的频率,对应的频率认为是固有频率.

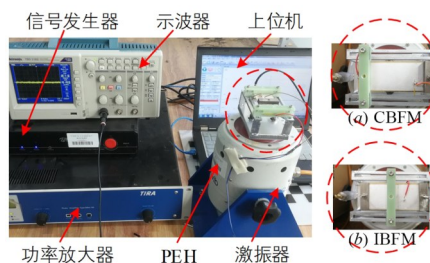


图 14 实验平台

图15给出了两种固定方式下的固有频率随重物重量的变化趋势.结果表明,两种固定方式下的固有频率随重物重量的增加而减小,与仿真结果一致.CBFM下的固有频率普遍处于46.28 Hz以下,而IBFM下的固有频率处于39.6 Hz以上.同时,CBFM和IBFM在34.1~51.9 Hz ($f_{2min} \sim f_{1max}$)之间相交,再次验证了图2提出的假设.接下来将通过实验对PEH在2种固定方式相交频带处的发电性能进行比较.

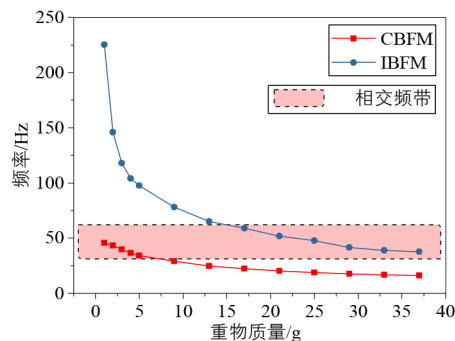
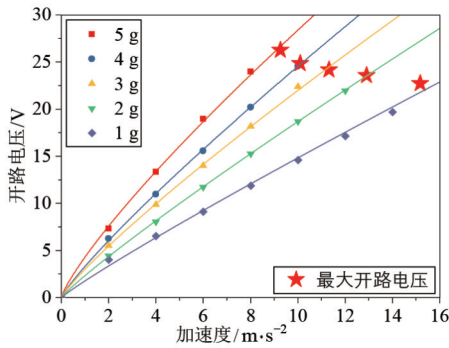


图 15 2 种固定方式的固有频率与重物质量的关系

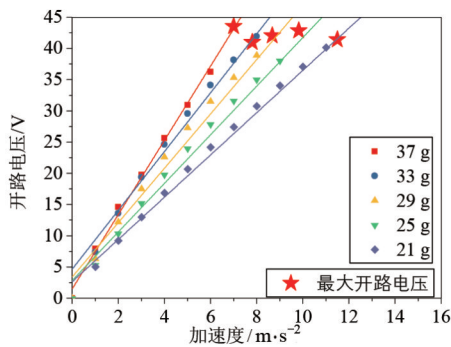
4.2 最大开路电压

当激振频率与PEH固有频率一致且所施加的加速度为极限加速度时,对应的开路电压是最大开路电压.依次测量2种固定方式在不同重物质量下的最大开路

电压,结果如图 16 所示,可以看出,2种固定方式下开路电压均随着加速度的不断增大而增大,且在加速度相同的条件下,重物质量越大,PEH所产生的开路电压也越大.其中,CBFM和IBFM下最大开路电压平均值分别为24.304 V和42.154 V.相比于CBFM,PEH在IBFM下产生的最大开路电压要更高,平均提升了73.44%.



(a) CBFM下开路电压与加速度的关系



(b) IBFM下开路电压与加速度的关系

图 16 两种固定方式的开路电压与加速度的关系

如图 17 所示为在单位加速度条件下 CBFM 和 IBFM 两种固定方式在相交频带处产生的最大开路电压,比例系数 k_2 的平均值分别为 2.148 6 和 4.845 6. 显然,IBFM 产生的开路电压更高,相比于 CBFM,比例系数 k_2 平均提升了 125.52%. 采用 IBFM 后,在相交频带处,PEH 有更好的发电性能,同时也验证了仿真的正确性.

4.3 机电耦合系数

在进行发电功率实验之前先进行阻抗分析,目的是为接下来匹配最优负载电阻提供参考.如图 18 所示,所使用的实验仪器为 WK6500B 阻抗分析仪,由于阻抗分析需要对 PEH 施加 1V 的正弦电压,根据逆压电效应,压电片会产生振动.因此,在实验过程中需将 PEH 固定在台面上,以免引起支座抖动而影响 PEH 的振动状态,从而产生一定的误差影响.

图 19 展示了 2 种固定方式的阻抗随频率变化的趋

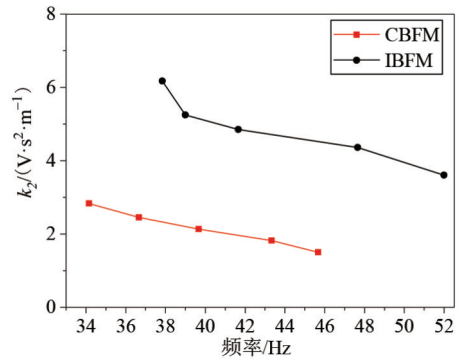


图 17 2种固定方式在单位加速度条件下的最大开路电压

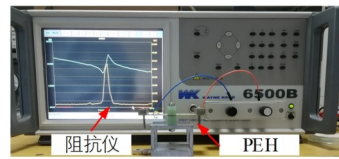
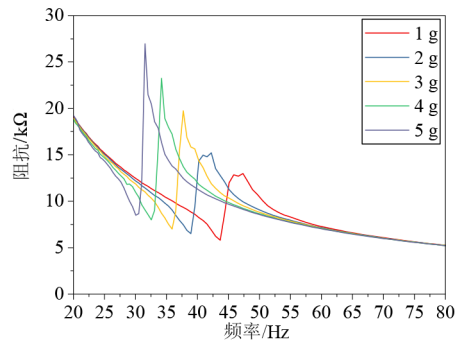
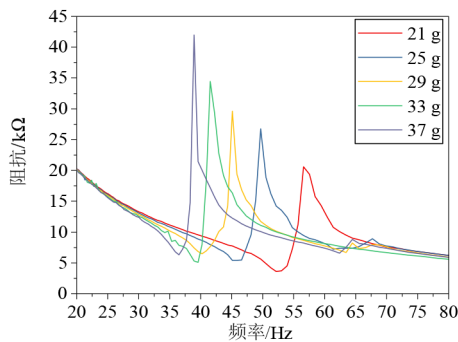


图 18 阻抗分析实验



(a) CBFM下阻抗与频率之间的关系



(b) IBFM下阻抗与频率之间的关系

图 19 2种固定方式下阻抗与频率的关系

势,可以看出,两种固定方式的阻抗值均处于 50 kΩ 以下.得到不同重物质量时 PEH 的谐振频率后,根据式(3)计算 EMCC.表 3 为 2 种固定方式在不同重物质量时的 EMCC,可见 CBFM 和 IBFM 在相交频带处 EMCC 的平均值分别为 0.337 8 和 0.377 0.相比于 CBFM,采用 IBFM 后,PEH 的 EMCC 平均提升了 11.60%.

表3 2种固定方式下EMCC

固定方式	质量块/g	f_a /Hz	f_f /Hz	EMCC	平均值
CBFM	1	47.34	43.64	0.387 565	0.337 755
	2	42.24	38.95	0.386 924	
	3	37.7	35.91	0.304 476	
	4	34.2	32.57	0.305 041	
	5	31.53	30.03	0.304 769	
IBFM	21	56.61	52.19	0.387 376	0.376 966
	25	49.71	45.83	0.387 315	
	29	45.09	40.24	0.451 171	
	33	41.64	39.59	0.309 902	
	37	38.95	36.50	0.349 064	

进一步验证了仿真结果的正确性,同时,也证明了所提出的固定方式可以使 PEH 的机电转换效率进一步提升.

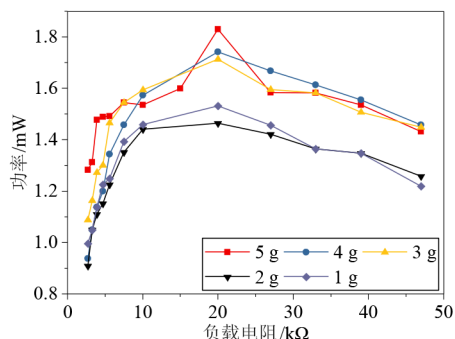
4.4 最大平均发电功率

与仿真方法测试发电功率类似,在进行发电功率实验之前,需要根据实验所测得的阻抗值设置一系列阻值不同的负载电阻进行匹配.得到最优负载电阻值后,施加相应的极限加速度,此时产生的功率即为最大平均发电功率.其中,负载阻值的设置参照4.3节阻抗分析得到的结果,取0~50 kΩ之间的仿真电阻进行实验.图20所示为两种固定方式的最优负载电阻.可以看出,2种固定方式下,最优阻值均为20 kΩ,接下来将进行最大平均发电功率的测试和比较.

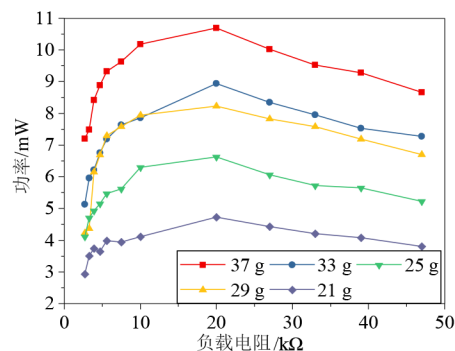
图21展示了2种固定方式下发电功率与加速度之间的关系.在相同加速度条件下,2种固定方式的发电功率都随着重物质量的增加而增加.而随着加速度的不断增大,PEH在2种固定方式下的发电功率都在不断增大.此外,与仿真结果类似,PEH的最大平均发电功率随着重物质量的增加整体呈下降趋势.其中,CBFM和IBFM的最大发电功率平均值分别为6.723 mW和21.770 mW,相比于CBFM,在相交频带处,PEH在采用IBFM后,最大平均发电功率平均提升223.81%.

2种固定方式在单位加速度条件下产生的最大平均发电功率如图22所示,CBFM和IBFM在相交频带处,比例系数 k_3 的平均值分别为0.576 4和2.470 4.相比于CBFM,PEH在采用IBFM后,单位加速度条件下最大平均发电功率平均提升328.59%.

综上所述,相比于传统CBFM,所提出的IBFM在调频范围以及发电性能两方面都表现的更加优越.同时,所提出IBFM的最大可调频范围达到了传统CBFM的3.1倍以上,有效拓展了PEH的带宽.如表4所示,在2种固定方式的相交频带处,当激励载荷为单位加速度时,相比于CBFM,所提出IBFM的开路电压和发电功率分别平均提升了125.52%和328.59%.此外,EMCC平

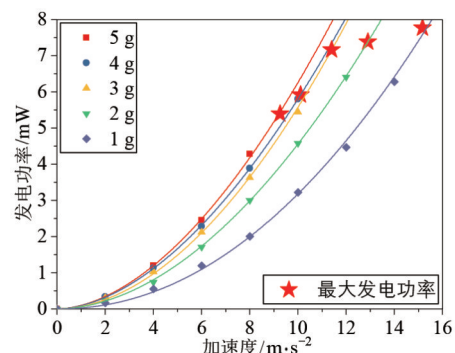


(a) CBFM下发电功率与负载电阻之间的关系

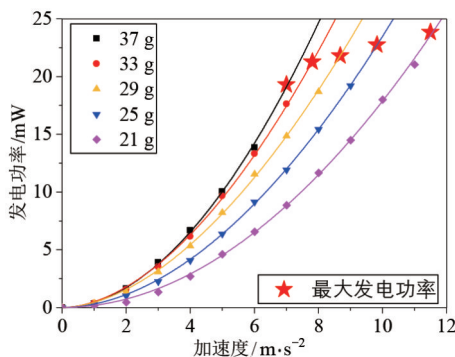


(b) IBFM下发电功率与负载电阻之间的关系

图20 两种固定方式的最优负载电阻



(a) CBFM下发电功率与加速度之间的关系



(b) IBFM下发电功率与加速度之间的关系

图21 2种固定方式的发电功率与加速度的关系

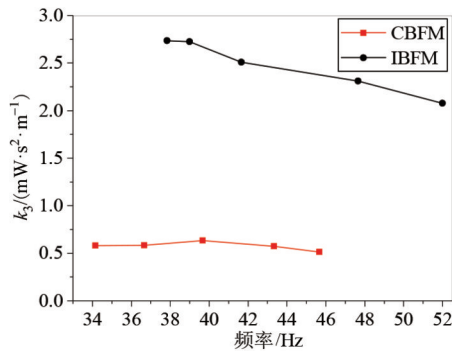


图22 2种固定方式在单位加速度条件时的最大发电功率

表4 2种固定方式在相交频带处性能参数比较

参数	CBFM	IBFM	提升率/%
开路电压 k_2 /(V·s ² /m)	2.148 6	4.845 6	125.52
EMCC	0.337 8	0.377 0	11.60
发电功率 k_3 /(mW·s ² /m)	0.576 4	2.470 4	328.59

均提升了11.60%,进一步说明了改变固定方式后提升了PEH的发电性能.因此,在相交频带处,PEH采用IBFM后发电性能更佳.

5 结论

本文提出了一种新型固定方式——IBFM,所提出的方法不仅有效拓宽了传统CBFM下PEH的可调频范围,大幅提升了其发电性能,而且具有普适性,可用于任意尺寸的压电片.仿真和实验结果表明:所提出的方法可以将传统CBFM的可调频范围从0~ f 拓宽至0~3.1 f 以上.与传统CBFM相比,采用IBFM后,在2种固定方式的相交频带处,单位加速度激励条件下PEH的最大开路电压和最大平均发电功率分别平均提升了95.19%和205.88%.同时,EMCC平均提升了11.60%.验证了改变固定方式可以改善PEH的发电性能,为不同频段固定方式的选择提供了指导,说明在实际应用中通过改变PEH的固定方式来拓宽带宽和提高发电性能是可行的.

参考文献

- [1] FU H L, YEATMAN E. A methodology for low-speed broadband rotational energy harvesting using piezoelectric transduction and frequency up-conversion[J]. Energy, 2017, 125: 152-161.
- [2] HAN J, HU J, YANG Y, et al. A nonintrusive power supply design for self-powered sensor networks in the smart grid by scavenging energy from ac power line[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(7): 4398-4407.
- [3] 张旭辉, 赖正鹏, 吴中华, 等. 新型双稳态压电振动俘能

系统的理论建模与实验研究[J]. 振动工程学报, 2019, 32(1): 91-100.

ZHANG X H, LAI Z P, WU Z H, et al. Theoretical modeling and experimental study of a novel bistable piezoelectric vibration energy harvesting system[J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(1): 91-100. (in Chinese)

- [4] WANG J L, ZHOU S X, ZHANG Z E, et al. High-performance piezoelectric wind energy harvester with Y-shaped attachments[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 181: 645-652.
- [5] YU J, SESHIA A. Power optimisation by mass tuning for mems piezoelectric cantilever vibration energy harvesting [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2015, 25(1): 108-117.
- [6] 罗翠线, 秦敏哲. 基于模态分离技术的3×n阵列式低频宽带压电振动发电机的设计研究[J]. 电子学报, 2020, 48(3): 554-560.
- LUO C X, QIN M Z. A 3×n element piezoelectric vibration generator with low frequency and wide bandwidth exploiting modes separation technique[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(3): 554-560. (in Chinese)
- [7] 徐振龙, 单小彪, 谢涛. 宽频压电振动俘能器的研究现状综述[J]. 振动与冲击, 2018, 37(8): 190-199, 205.
- XU Z L, SHAN X B, XIE T. A review of broadband piezoelectric vibration energy harvester[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(8): 190-199, 205. (in Chinese)
- [8] ABDUL A, MATHIE G, MOHANNAD E, et al. Effects of proof mass geometry on piezoelectric vibration energy harvesters[J]. Sensors, 2018, 18(5): 1584.
- [9] 梁光胜, 李艺. 风车型低频压电振动能量采集器的研究与设计[J]. 压电与声光, 2018, 40(3): 423-427.
- LIANG G S, LI Y. Research and design of low-frequency piezoelectric vibration energy harvester with windmill structure[J]. Piezoelectric and Acousto-optic, 2018, 40(3): 423-427. (in Chinese)
- [10] 马天兵, 陈南南, 吴晓东, 等. Z型压电振动能量收集装置[J]. 光学精密工程, 2019, 27(9): 1968-1980.
- MA T B, CHEN N N, WU X D, et al. Z-type piezoelectric vibration energy harvesting device[J]. Optical and Precision Engineering, 2019, 27(9): 1968-1980. (in Chinese)
- [11] ALAMEH A, GRATUZE M, NABKI F. Impact of geometry on the performance of cantilever-based piezoelectric vibration energy harvesters[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(22): 10316-10326.
- [12] 白凤仙, 马慧卿, 孙建忠, 等. 悬臂梁电极长度对压电俘能电气特性的影响研究[J]. 电子学报, 2019, 47(11):

18-24.

BAI F X, MA H Q, SUN J Z, et al. Study of the electrode length of cantilever on electrical characteristics of piezoelectric energy harvesting[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(11): 18-24. (in Chinese)

- [13] ZHOU G B, LI Z X, ZHU Z C, et al. A new piezoelectric bimorph energy harvester based on the vortex-induced-vibration applied in rotational machinery[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(2): 700-709.
- [14] REZAEI-HOSSEINABDI N, TABESH A, DEGHANI R. A topology and design optimization method for wide-band piezoelectric wind energy harvesters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(4): 2165-2173.
- [15] CHALLA V, PRASAD M, SHI Y, et al. A vibration energy harvesting device with bidirectional resonance frequency tenability[J]. Smart Materials & Structures, 2008, 17(1): 15035-15010.
- [16] FAN K Q, CHANG J W, CHAO F B, et al. Design and development of a multipurpose piezoelectric energy harvester[J]. Energy Conversion & Management, 2015, 96: 430-439.
- [17] KARADAG C, TOPALOGLU N. A self-sufficient and frequency tunable piezoelectric vibration energy harvester [J]. Journal of Vibration & Acoustics, 2016, 139(1): 011013.1-011013.8.
- [18] YU, L D, TANG L H, YANG T J. Piezoelectric passive self-tuning energy harvester based on a beam-slider structure[J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 489: 115689.
- [19] 刘兵, 虞梦琳, 谷旺, 等. 两端固支梁振动能量收集器的结构设计及优化[J]. 机械工程与自动化, 2018, (1): 1-3.
LIU B, YU M L, GU W, et al. Structural design and optimization on double-clamp-beamed piezoelectric vibration energy collector[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2018, (1): 1-3. (in Chinese)
- [20] KODALI P, KRISHNA A, VARUN R, et al. Segmented electrodes for piezoelectric energy harvesters[J]. IEEE Electron Device Letters, 2014, 35(4): 485-487.
- [21] HAMANI I, TIKANI R, ASSADI H, et al. Energy harvesting from moving harmonic and moving continuous mass traversing on a simply supported beam[J]. Measurement, 2020, 150: 107080.
- [22] HAO B L, ZHOU G B, ZHU Z C, et al. A study of the properties of a piezoelectric ceramic plate in the symmetric fixation mode[J]. IEEE Access, 2018, 6: 36863-36873.
- [23] LI Z X, ZHOU G B, ZHU Z C, et al. A study on the power

generation capacity of piezoelectric energy harvesters with different fixation modes and adjustment methods[J]. Energies, 2016, 9(2): 98.

作者简介



闫晓东 男, 1995年出生, 山西吕梁人. 现为中国矿业大学机电工程学院博士研究生. 主要研究方向为压电振动能量收集技术和传感器网络.

E-mail: yanxiaodong@cumt.edu.cn



周公博(通讯作者) 男, 1985年出生, 安徽桐城人. 现为中国矿业大学教授、博士生导师. 主要研究方向为矿山机械、传感器网络、故障监测与诊断、压电振动能量收集技术等.

E-mail: gbzhou@cumt.edu.cn