

# 宽频自调谐压电振子发电性能研究

闫晓东<sup>1,2</sup>, 周公博<sup>1,2</sup>, 徐 懋<sup>1,2</sup>, 周 坪<sup>1,2</sup>, 何贞志<sup>3</sup>

(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;  
3. 江苏师范大学机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 传统悬臂梁固定方式下压电振子频带较窄, 存在环境适应性差、发电效率低的问题。为此, 提出了一种通过改变固定位置实现宽频的自调谐压电振子。建立了调谐模型, 对压电振子在不同固定位置的发电性能进行了仿真分析, 并通过实验进行了验证。结果表明: 所提出的自调谐压电振子可实现 $f \sim 2.1f$ 范围内的调谐。同时通过调节合适的占空比, 调谐装置可以实现自给自足。在休眠时间为411 s以上的条件下, 可以实现最大频率范围内的调谐, 并且能量收集效率在40%以上。此外, 在充电时间和激励加速度相同、激励频率不同的条件下, 与无调谐压电振子相比, 有调谐装置的压电振子的充电效率提高了223%。

**关键词:** 压电振子; 宽频; 自调谐; 固定位置; 占空比

**中图分类号:** TN384; TN712; TH7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)06-1647-10

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.06.019

## 引言

近年来, 无线传感器网络被广泛应用于机电装备健康监测和故障诊断等方面。传统无线传感器节点主要依赖容量有限的电池供电, 因此需要定期更换电池<sup>[1]</sup>。然而, 许多复杂机械系统(如采矿设备)的工作环境十分恶劣, 不具备经常更换电池的条件, 这导致无线传感器网络技术在这些场景难以应用。环境能量收集技术是将周围环境能量转换为电能的技术, 可以解决传感器节点供电的问题。在环境能量源中, 特别是振动能, 由于其十分普遍, 目前已被广泛应用于传感器节点的能量供给。振动能量的收集形式主要包括压电式、静电式和电磁式三种形式<sup>[2]</sup>。其中, 压电振子具有转换效率高、输出电压高等优点, 尤其适用于节点供能<sup>[3]</sup>。然而, 压电振子的发电性能易受环境振动频率的影响, 一旦环境振动频率与压电振子谐振频率稍有偏离, 发电性能将迅速减弱。因此, 为了保证压电振子能量收集最大化, 应使其在固有频率下工作, 但传统悬臂梁固定方式下压电振子存在频带窄的问题, 无法适应振动频率随机、离散、宽频的环境<sup>[4]</sup>。因此, 拓宽压电振子有效带宽是提高其发电性能的关键。

针对上述问题, 国内外许多学者提出了多种方

法, 主要集中在两方面: 其一为拓宽压电振子自身的有效带宽, 主要包括: 改变压电片的几何尺寸和结构<sup>[5-7]</sup>, 设计多模态和多方向压电振子<sup>[8-10]</sup>, 引入非线性<sup>[11]</sup>等; 其二为利用自调谐方法来调整压电振子的带宽, 主要分为被动调谐和主动调谐。

在被动调谐方面, Somkuwar等<sup>[12]</sup>在压电振子的自由端设置了一个带有滚动单元的空心盒, 滚动单元的运动改变了其固有频率, 从而实现了自调谐。Jackson等<sup>[13-14]</sup>将液体注入到与悬臂梁端部固定的容器中, 拓宽了压电振子的带宽。Liu等<sup>[15-16]</sup>提出了带有两个FUC止动块的MEMS-EH系统, 该装置的主要优点是扩大了工作频率范围, 提高了输出电压和功率。此外, Halim等<sup>[17]</sup>提出了一种可转换频率的压电振子, 可以在宽频范围内产生较大发电功率。但上述方法的调谐范围有限, 仍不能满足频率范围较大的工作环境。

与上述方法相比, 主动调谐法可以获得更大的调谐范围。Wu等<sup>[18]</sup>通过手动调节质量块重心位置实现了压电振子的宽频, 但此方法依赖于手动调节, 不利于实际应用。一些学者试图设计一种适应实际振动环境的自调谐系统。Eichhorn等<sup>[19]</sup>和Aboulfotouh等<sup>[20]</sup>通过执行器或磁铁施加相应的力使压电振子变形, 从而达到调谐的目的。Karadag等<sup>[21]</sup>和师建国等<sup>[22]</sup>使用马达驱动质量块运动, 通过改变压

收稿日期: 2022-03-01; 修订日期: 2022-05-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61971423); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2021YCPY0203); 江苏省优势学科建设项目(PAPD)。

电振子的重心位置以改变自身的固有频率。进一步,与改变重心位置的方法相比,通过改变压电振子固定位置的方法可以实现更大范围的调谐。Huang等<sup>[23]</sup>在传统的悬臂梁固定模式的基础上增加了可移动固定端,通过不断改变梁的长度,可以实现更大范围的调谐。但是这种方法需要两个固定端,增加了能量收集装置的体积和复杂性,不利于实际应用,并且未对功耗问题进行分析。

考虑到环境振动的随机性和复杂性,为了提高压电振子的自适应能力,使其能量收集最大化,提出了一种宽频自调谐压电振子,并通过改变压电振子的固定位置,有效拓宽了自身调谐范围。同时,通过仿真和实验的方法,研究了压电振子在不同固定位置下的发电性能,验证了所提出自调谐装置的可行性。与现有方法相比,该方法不仅易于操作,适用性更强,而且在保证较高水平发电能力的前提下,可以实现更大范围的调谐,满足实际应用中存在多个离散振动频率装备群的能量收集要求。

## 1 宽频自调谐压电振子模型设计

图1所示为所提出的自调谐压电振子模型。压电片1由两个对称的压辊固定。主动辊通过联轴器与减速器轴连接。当控制器向电机驱动器发送信号时,电机动作,从而带动主动辊旋转,同时被动辊在主动辊的作用下运动。压电片1与主动辊之间的相

对位移会引起固定位置的变化,导致压电振子固有频率改变,从而实现自调谐。此外,在压辊前后设计了两个尺寸非常小且由螺栓固定的限位器,并与压电片1相切,进一步保证压电片1只能在水平方向上向前和向后移动。压电片2被螺栓完全固定,主要用于监测环境振动频率,根据压电片2产生的交流电压,得到当前环境振动频率,经单片机判断后将频率信息发送给控制器,从而控制电机的转动。

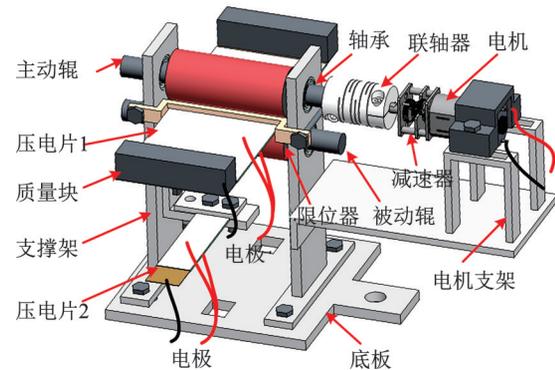


图1 自调谐压电振子模型

Fig. 1 Self tuning piezoelectric vibrator model

此外,所提出的调谐方法只改变压电振子的固定位置,其余部分保持不变,在调谐过程中不需要额外的电路。压电陶瓷材料为PZT-5H,基板材料为CW617N,上下压电陶瓷板并联连接。其余参数如表1所示。

表1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

材料	杨氏模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm	压电常数/(C·m <sup>2</sup> )	介电常数/(nF·m <sup>-1</sup> )
基板	110	0.324	8300	80	33	0.2	—	—
PZT-5H	60.6	—	7500	60	33	0.2	-16.6	25.55
质量块	—	—	8900	10	33	12.6	—	—

### 1.1 调谐范围

压电振子固定位置的改变将直接导致其固有频率的改变,从而达到调谐的目的。所提出的自调谐压电振子简化模型如图2所示,将固定端到压电片左侧自由端的距离记为 $x$ ,图2(a)和(c)分别为调谐范围的上/下限。其中, $x=10$  mm为悬臂梁固定方式,定义为调谐装置调谐的下限; $x=40$  mm为中间梁固定方式,定义为调谐装置调谐的上限。为了研究压电振子在不同固定位置下的发电性能变化,下文选取 $x=10, 20, 30, 40$  mm的4个不同位置进行仿真和实验分析。

### 1.2 调谐原理

压电片2在正弦波激励下的输出电压为正弦波

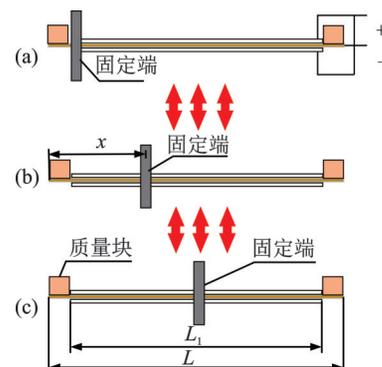


图2 压电振子在不同固定位置的简化模型

Fig. 2 Simplified model of piezoelectric vibrator at different fixed positions

交流电压,微控制单元可在单位时间内检测出高、低脉冲周期。因此,利用LM393比较器可将正弦波电压转换为方波电压,得到当前环境振动频率并反馈

至单片机(MCU)。文中选用的MCU型号为STM32F103ZET6,首先,MCU比较当前环境振动频率与压电振子的固有频率,并通过查表的方式来判断两者是否匹配;然后做出判断指令,并将命令发送给电机驱动器L298N,电机根据收到的信号在既定时间内执行动作;最后,根据能量管理电路反馈的电压信息分析电机实际转动圈数,并进一步控制电机使压电振子的固定位置最佳。同时为了尽可能降低功耗,设置当前环境振动频率与压电振子固有频率的偏差小于3%<sup>[24]</sup>时,电机就不需要工作。调谐优化流程如图3所示,图中, $v$ 表示调谐装置移动的速度, $t$ 表示调谐装置移动的时间; $V$ 表示当前位置处压电振子的实际发电电压, $V_0$ 表示当前位置处压电振子的理论发电电压, $\Delta V_0$ 表示预设的固定电压阈值。

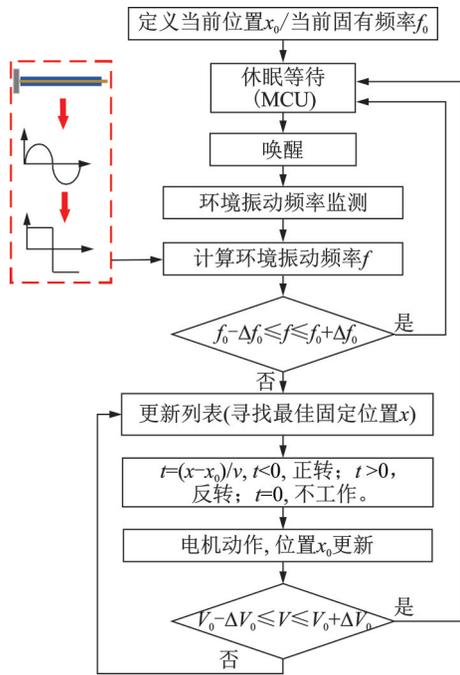


图3 调谐原理

Fig. 3 Tuning principle

由于振动频率的变化,压电振子的输出电压会存在波动,因此,需要通过相关电路处理使得调谐装置实现能量均衡,从而满足功耗需求。如图4所示,所设计的能量管理电路包括主能量源和副能量源,主能量源为压电片1,副能量源为备用电池。能量管理电路可依据当前能耗关系切换最佳能量源,确保其持续为负载提供稳定的电能。其中,能量管理芯片选用具有判断电池电压功能的LTC3331芯片,其工作原理为:首先将压电片1收集到的交流电进行整流滤波转化为直流电,然后对转化后的直流电进行升/降压处理成为负载所能利用的稳定电压,最后由LTC3331对当前能耗需求进行判断。当收集能量大于消耗能量时,压电片1产生的能量为负载

供电,同时将剩余能量存储至备用电池;当收集能量低于消耗能量时,能量管理电路自动切换供能方式,即通过备用电池(副能量来源)为负载供电。

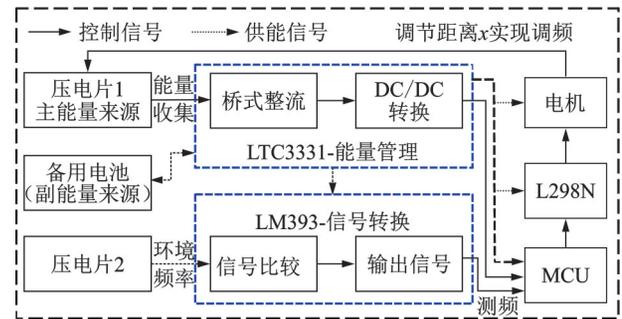


图4 调谐装置能量管理电路

Fig. 4 Energy management circuit of tuning device

### 1.3 等效电路

实质上,压电振子本身相当于电容器。当改变固定位置后,可以将其看作是由左右两端的两个电容器并联而成,等效电路如图5所示。

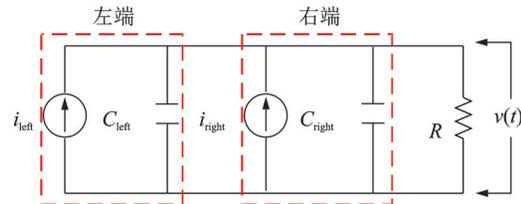


图5 等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit

储存在电容中的电量可以表示为:

$$Q = UC \quad (1)$$

式中  $Q$  为电荷量; $U$ 为电容电压; $C$ 为电容。根据电路知识  $C = \epsilon S / (4\pi kd)$ ,其中  $S$  为截面积,与压电振子的长度  $L$  成正比。当改变压电振子的固定位置时,会出现两种情况,当左右端长度不对称时,由于左右端固有频率不同,长端会先发生共振,此时电路中的电量主要来自于长端,短端由于未发生共振发电量可以忽略。假设长端产生的电荷量和电压分别为  $Q_R$  和  $v_R(t)$ ,则此时电路中的电量  $Q = Q_R$ ,开路电压可以表示为:

$$v(t) = \frac{Q}{C} = \frac{Q_R}{C} = \frac{Q_R}{C_R} \cdot \frac{C_R}{C} = v_R(t) \cdot \frac{S_R}{S} = v_R(t) \cdot \frac{L}{L-x} \quad (2)$$

式中  $C_R$  为长端有效电容; $S_R$  表示压电振子长端的截面积。

当左右两端对称,即  $x = L/2$  时,由于两端的发电量相同,则  $Q = Q_L + Q_R$ ,此时电路的开路电压可以表示为:

$$v(t) = \frac{Q}{C} = \frac{Q_L + Q_R}{C} = \frac{2Q_R}{2C_R} = v_R(t) \quad (3)$$

式中  $Q_L, Q_R$  分别为左右两端产生的电荷量。因此,基于式(2)和(3),压电振子在任意位置的开路电压可以表示为:

$$v(t) = \begin{cases} v_R(t) \cdot \frac{L-x}{L}, & x \neq L/2 \\ v_R(t), & x = L/2 \end{cases} \quad (4)$$

## 2 宽频自调谐压电振子发电性能仿真分析

为了研究压电振子在不同固定位置的发电性能,仿真主要分为以下两部分。一部分是模态分析和静力分析,分析了压电振子在不同固定位置的固有频率和应力分布。另一部分通过谐波响应分析得到压电振子在不同固定位置的开路电压和发电功率。其中,仿真软件采用 ANSYS16.0。

### 2.1 模态分析和静力分析

首先,需要通过模态分析得到压电振子在不同固定位置的固有频率,因为固定位置的改变将直接导致固有频率发生改变。如图 6 所示,通过模态分析发现,随着距离  $x$  的增加,压电振子的固有频率越来越大,假设无调谐装置时固有频率为  $f$ ,则通过调谐装置不断改变固定位置后压电振子的调谐范围可以达到  $f \sim 2.6f$ 。

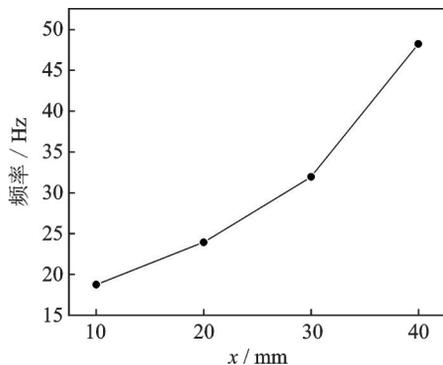


图 6 不同固定位置的固有频率变化趋势

Fig. 6 Variation trend of natural frequency at different fixed positions

其次,进行静力分析,观察压电振子在不同固定位置的应力分布。为保证条件一致,取 60 MPa 作为压电振子在不同固定位置的极限应力(压电陶瓷的极限应力通常在 60~100 MPa<sup>[25]</sup>之间)。将加速度作为激励载荷,不断加大加速度值,直至压电振子的极限应力达到 60 MPa,此时的最大位移变形量定义为极限位移。不同固定位置的应力分布云图如图 7 所示,可以看出,随着距离  $x$  的增加,压电振子的刚

度不断增大,导致压电振子的极限位移值(DMX)不断减小。同时,随着距离  $x$  的增大,压电振子左右两侧的固有频率差值变得越来越小,并且左右两侧的应力分布由不对称逐渐变为对称。当  $x=L/2$  时,压电振子的左右端长度相同,固有频率也保持一致,应变分布完全对称。说明随着距离  $x$  的增加,有效发电面积越来越小,直到  $x=L/2$  时有效发电面积再次达到最大,进一步为分析压电振子不同固定位置的发电性能提供了依据。

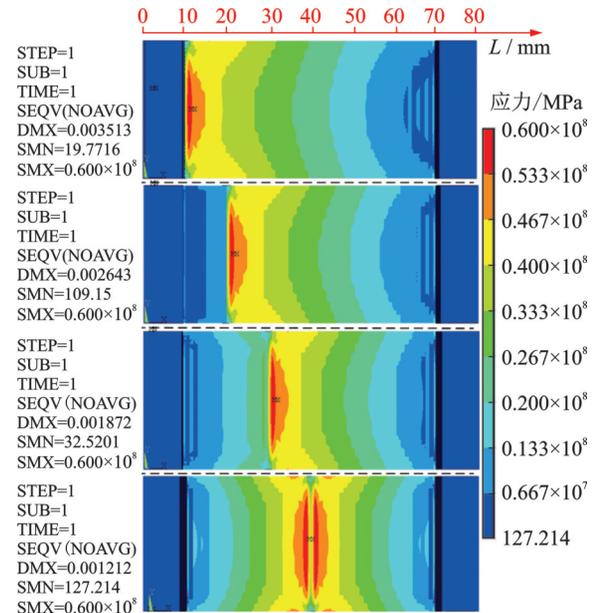


图 7 不同固定位置的应力分布云图

Fig. 7 Cloud diagram of stress distribution at different fixed positions

### 2.2 谐波响应分析

为探讨不同固定位置对压电振子发电性能的影响,通过谐波响应分析比较了不同位置压电振子的发电性能。在谐波响应分析中,将上下压电陶瓷板分别耦合成一个点,并联连接,由于导线电阻很小,可设为  $0.01 \Omega$ 。基于模态分析得到的固有频率结果,在压电振子不同固定位置处进行扫频激励,并施加加速度作为激励载荷。其中,加速度大小设置为  $a=5 \text{ m/s}^2$ ,并观察在  $x=10, 20, 30, 40 \text{ mm}$  时压电振子开路电压变化情况。

如图 8 所示,可以看出,在相同的激励加速度条件下,随着  $x$  的不断增大,压电振子的开路电压先减小后突然增大。说明随着  $x$  的增加,压电振子的有效发电面积不断减小,在相同激励条件下,开路电压逐渐降低。当  $x$  足够接近  $L/2$  时,两侧固有频率越来越接近。当  $x=L/2$  时,在两端协同作用下,两侧压电片固有频率相同,压电振子开路电压出现突增,使得发电量达到新的峰值。同时,这一结果与式(4)所给出的电压模型一致,进一步验证了理论模型的正确性。

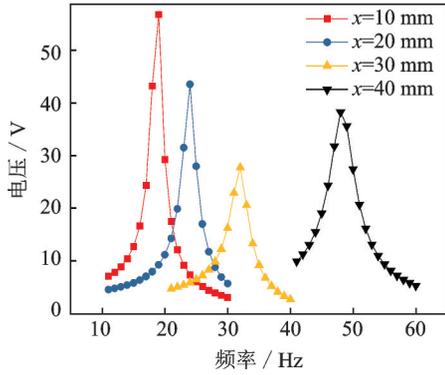


图8 不同固定位置的开路电压变化趋势

Fig.8 Variation trend of open circuit voltage at different fixed positions

最后,对相同激励加速度下不同固定位置处压电振子的发电功率进行了对比分析。获得压电振子最佳输出功率的前提是匹配最优电阻,当负载电阻和压电振子内阻相等时,发电功率最大。因此,设置了一系列不同电阻值的负载电阻进行匹配,如图9所示。可以看出不同固定位置压电振子的电压随着负载电阻值的增大而增大,假设当前激励频率下外负载电阻对应的最大电压为 $U_{\max}$ ,外负载电阻电压可表示为 $U = U_{\max} \sin(2\pi ft)$ ,则瞬时功率可表示为:

$$P_{\text{inst}} = \frac{U^2}{R} = \frac{U_{\max}^2 \sin^2(2\pi ft)}{R} \quad (5)$$

最大平均发电功率可以表示为:

$$P_{\text{average}} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\int_0^T P_{\text{inst}} dt}{T} = \frac{U_{\max}^2}{2R} \quad (6)$$

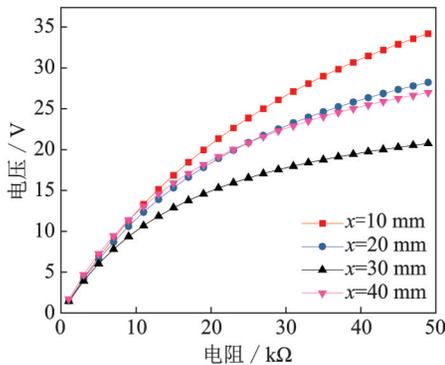


图9 不同固定位置电压随负载电阻的变化趋势

Fig.9 Variation trend of voltage at different fixed positions with load resistance

根据上述功率计算方法,分析不同固定位置平均发电功率的变化趋势。如图10所示,随着负载电阻值的不断增大,压电振子平均功率先增大后减小,且存在一个最优匹配电阻使发电功率最大。同时,与图8所示的开路电压变化趋势相似,随着 $x$ 的增加,不同固定位置压电振子的平均发电功率先减小后突然增大,产生这种变化的原因同样是 $x$ 的增大导致压电振子左右两端有效发电面积减小;而

当 $x=L/2$ 时,左右两端完全对称,有效发电面积达到最大,发电功率出现突增现象。

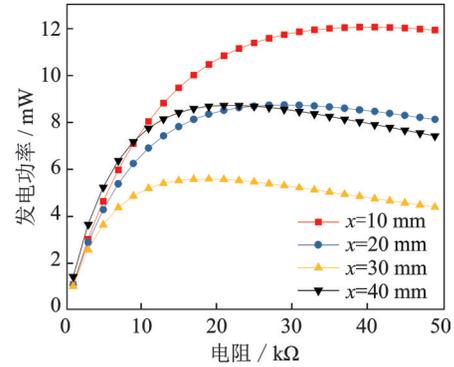


图10 不同固定位置发电功率随负载电阻的变化趋势

Fig.10 Variation trend of generated power at different fixed positions with load resistance

综上所述,当两侧固有频率不一致时,随着 $x$ 的不断增大,压电振子右侧的固有频率越来越大。同时在相同的激励加速度条件下,开路电压和发电功率不断减小。究其原因,随着 $x$ 的增加,压电振子的有效发电面积不断减小,导致其发电量开始逐渐降低。当 $x$ 足够接近 $L/2$ 时,两侧固有频率越来越接近;直至 $x=L/2$ 时,两侧固有频率完全相同,有效发电面积达到最大,在压电振子两端协同作用下,发电功率出现突增,使得发电量达到新的峰值。

### 3 实验结果与分析

实验主要分为三个部分。首先,介绍了实验设置;其次,比较了压电振子在不同固定位置的发电性能;最后,对所提出的自调谐装置的功耗问题进行了分析和讨论。

#### 3.1 实验设置

实验装置如图11所示,主要包括激振器、功率放大器、信号发生器、示波器、动态信号采集仪、压电振子以及相关的整流、滤波和分压电路。其中,动态信号采集仪的采样频率为200 Hz,实验中施加的激励加速度与仿真中一致,设置为 $a=5 \text{ m/s}^2$ 。首先,通过扫频的方法对压电振子在不同固定位置的固有频率进行分析,并基于仿真结果设置扫频范围。然后,在采集压电振子的电信号之前,需要对产生的电信号进行整流和滤波,因此设置了相应的整流滤波电路。最后,通过动态信号采集仪记录不同激励频率下的电压值,并绘制出电压随频率变化的曲线图。因为动态信号采集仪器使用的范围为 $(-5 \text{ V}, 5 \text{ V})$ ,需使用降压电路,设置两个分压电阻,阻值比为11:1,实际电压值可以表示为 $V_{\text{actual}} = 12V_{\text{collection}}$ 。

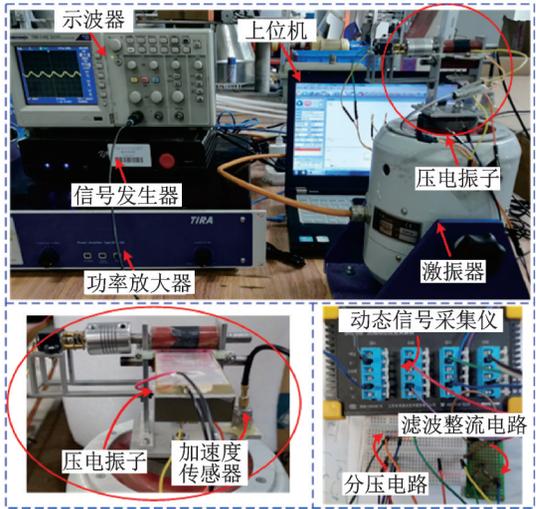


图 11 实验装置  
Fig. 11 Experimental device

### 3.2 宽频自调谐压电振子发电性能实验验证

图 12 为动态信号采集仪在激振器扫频过程中采集到的动态电压值,由于采集仪采集的是时域信号,因此通过傅里叶变换,得到了压电振子在不同固定位置输出电压随频率变化的趋势。可以看出,随着  $x$  的增加,固有频率不断增加,说明所提出的压电

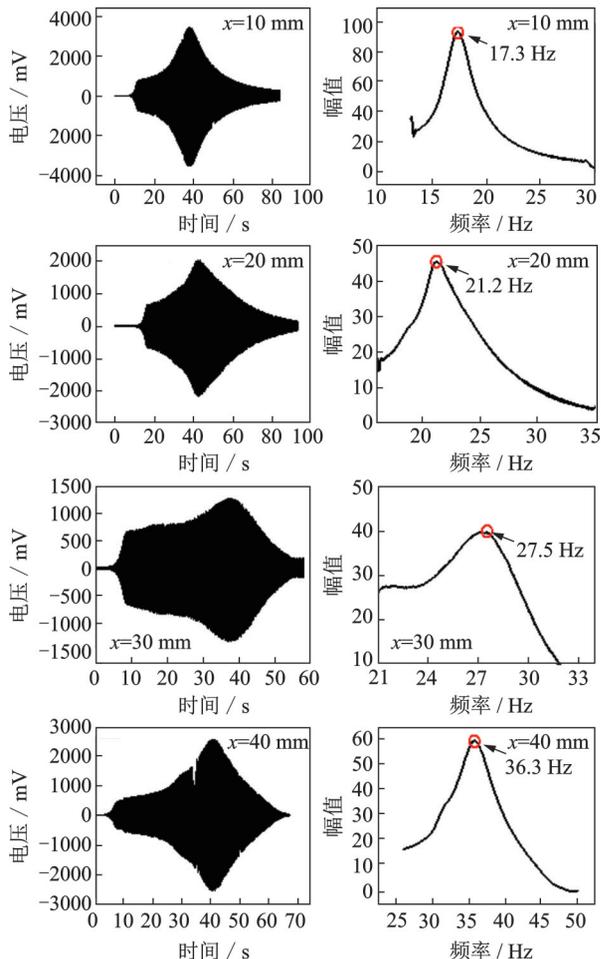


图 12 不同固定位置处电压的时域和频域图

Fig. 12 Time and frequency domain diagrams of voltage at different fixed positions

振子可以在 17.3~36.3 Hz 的频率范围内实现自调谐,即在  $f \sim 2.1f$  范围内进行自调谐。

图 13 为压电振子在不同固定位置处开路电压随频率的变化趋势。与仿真结果相似,随着  $x$  的增加,压电振子的最大开路电压先减小,然后突然增大,产生这种变化趋势的原因与仿真分析相同。

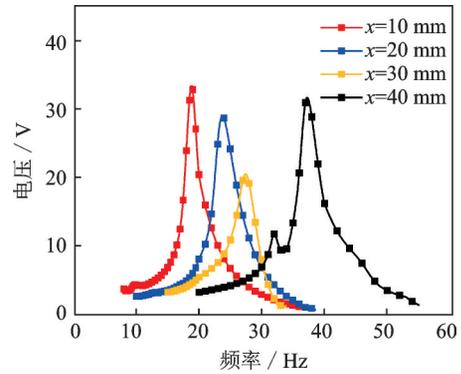


图 13 不同固定位置的开路电压变化趋势

Fig. 13 Variation trend of open circuit voltage at different fixed positions

为进一步研究压电振子在不同固定位置的发电性能,使用一系列不同阻值的负载电阻进行匹配,进而确定压电振子在不同固定位置的最佳匹配电阻。其中,实验中固定位置处  $x=10, 20, 30, 40$  mm 时,激励频率分别为 17.3, 21.2, 27.5, 36.3 Hz。由图 14 可以看出,随着  $x$  的增加,压电振子的电压不断增加,与仿真结果变化趋势一致。结合图 14 结果,由式(6)得到不同固定位置压电振子的发电功率,如图 15 所示。与仿真结果相似,随着负载电阻的增大,平均功率先增大后减小,并存在一个最优匹配电阻使压电振子的发电功率最大化。

图 16 展示了实验和仿真条件下压电振子在不同固定位置的发电功率变化趋势。可以看出,随着  $x$  的增加,发电功率先不断减小,直至  $x=L/2$  时,发电功率突然增大,仿真和实验的变化规律一致。同时结合图 8 和 13 可知,不同固定位置处开路电压与发电功率变化趋势一致,均呈现先减小后增加的趋

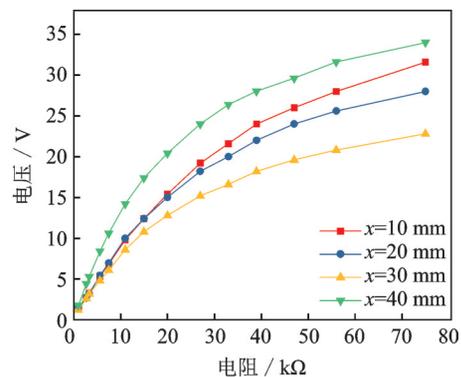


图 14 不同固定位置电压随负载电阻的变化趋势

Fig. 14 Variation trend of voltage at different fixed positions with load resistance

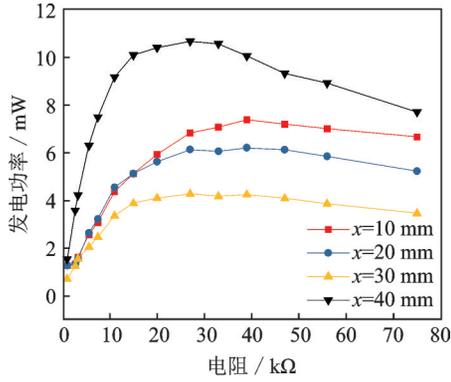


图15 不同固定位置发电功率随负载电阻的变化趋势

Fig. 15 Variation trend of generated power at different fixed positions with load resistance

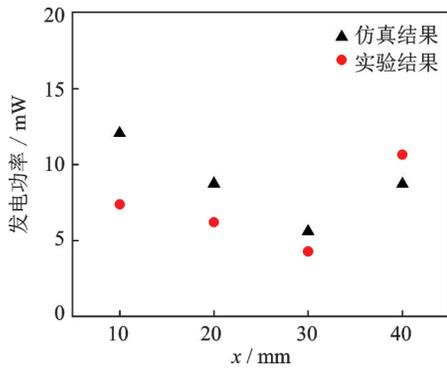


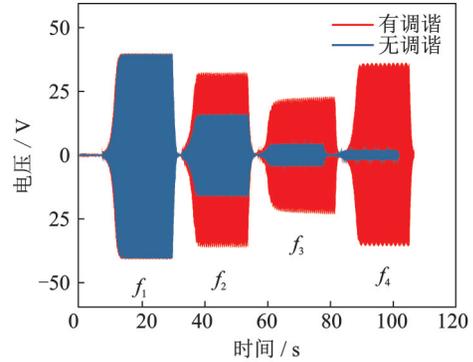
图16 不同固定位置的发电功率变化趋势

Fig. 16 Variation trend of generated power at different fixed positions

势。产生这种变化的原因是 $x$ 的增大导致压电振子的有效发电面积不断减小。而当 $x=L/2$ 时,压电振子左右两侧完全对称且固有频率一致,两侧协同发电,此时压电振子的有效发电面积最大,发电性能得到提升,因此开路电压和发电功率出现突增现象。进一步验证了仿真结果的正确性。

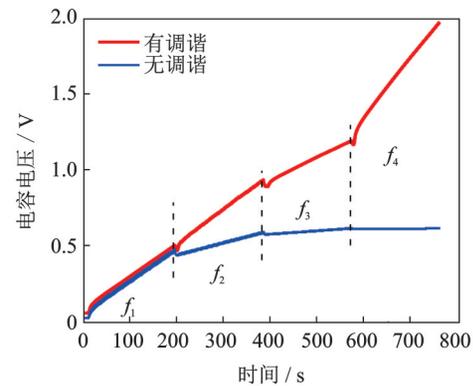
为了验证所提出调谐装置的发电性能,进行了一组有/无调谐装置的对比试验。实验设置了四种不同激励频率( $x=10, 20, 30, 40$  mm处的固有频率分别为 $f_1, f_2, f_3, f_4$ ),激励时间保持一致。其中,选用电容的额定电压为5.5 V,电容值为1 F。图17(a)显示了在四种不同激励频率下,有/无调谐装置时压电振子发电电压的变化情况。可以看出,有调谐装置的压电振子可以识别当前环境振动频率(频率检测装置测得的振动频率与实际振动频率的误差在 $\pm 0.8\%$ 以内)。同时有调谐装置的压电振子始终保证其固有频率与环境激励频率一致,在不同激励频率下产生的发电电压明显高于无调谐装置的压电振子,从而实现了能量收集的最大化。如图17(b)所示,在充电时间、激励频率和加速度相同的情况下,有/无调谐装置的压电振子产生的电量转化为超级电容电压后,分别为1.97 V和0.61 V;与无调谐装置

的压电振子相比,调谐后的充电效率提高了223%。此外,结合图13可知,微弱的频率变化会导致发电性能的快速下降。因此,调节装置提高了压电振子对环境的适应性,进一步提高了能量收集效率。



(a) 无整流开路电压

(a) Unrectified open circuit voltage



(b) 整流后电容充电电压

(b) Capacitor charging voltage after rectification

图17 有/无调谐的实验对比

Fig. 17 Experimental comparison with and without tuning

考虑到调谐装置的可靠性会对发电性能造成影响,为了保证其稳定工作,测试了调谐装置在不同激励条件下的工作情况。如图18所示,从开路电压变化趋势中可以看出,调谐装置的输出性能整体表现比较稳定。同时,当激励频率改变后,能够在振动过程中实现自调谐,进一步验证了其具备较好的环境适应性。与图18(a)和(d)相比,图18(b)和(c)条件下压电振子的开路电压更高。究其原因,图18(b)条件下固定端的位置处于中间,左右两端固有频率一致并协同发电,提高了发电性能,这与仿真和实验得出的结论一致;而图18(d)条件下,激励加速度的增加导致压电振子的振幅变大,所以发电性能得以提升。此外,如图18(c)所示,压电振子在长时间的激励条件下,仍能够保持稳定的发电,说明了调谐装置的可靠性。值得注意的是,在上述激励条件下,调谐装置未发生可见的结构破坏、变形等。因此,所提出的调谐装置可以在保证自身结构可靠的前提下,适应不同激励条件的振动环境,保持稳定的输出性能,并实现自调谐。

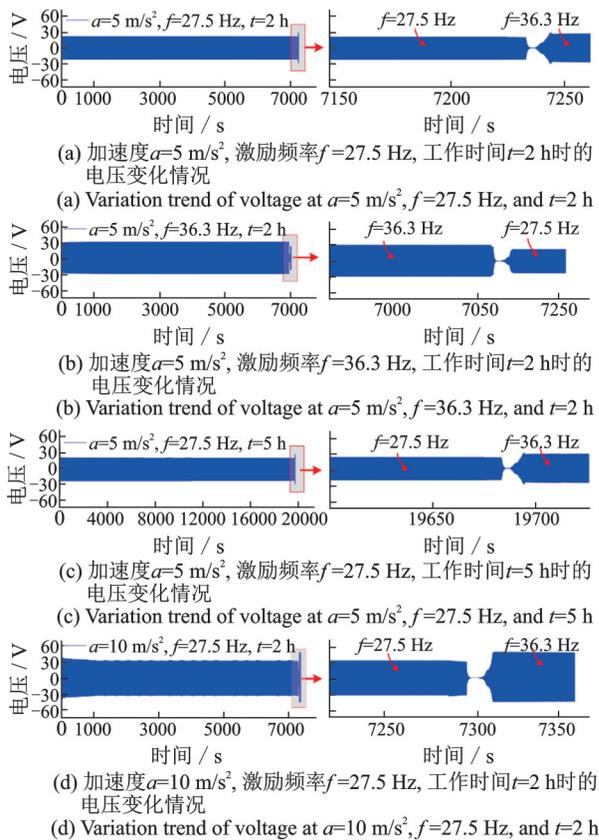


图 18 调谐装置的可靠性测试实验

Fig. 18 Reliability test experiment of tuning device

### 3.3 能耗分析及讨论

为了更好地平衡系统消耗的能量与压电振子收集的能量,需要得到调谐装置的最佳占空比。调谐装置的主要能量消耗来源包括电机、单片机以及电路损耗。本文所用的单片机功耗还可以进一步降低,现有单片机的功耗及电路损耗可低至 $0.57\text{ mW}$ <sup>[21]</sup>;同时通过测试工作电流的方法得知,电机的功耗约为 $87.3\text{ mW}$ 。需要注意的是,通过选择更小功率的电机型号,电机的功耗还可以进一步降低。其中,文中选用的电机为N20减速电机,驱动电压为 $3\sim 6\text{ V}$ ,转速为 $30\sim 500\text{ r/min}$ ,轴长 $8\text{ mm}$ ,轴径 $3\text{ mm}$ 。

在此基础上,假设系统能量收集效率为 $40\%$ ,通过分析压电振子产生最大和最小发电功率位置处调谐装置的最佳占空比,即可确定占空比的上/下限。结合图13可知, $x=30\text{ mm}$ 时产生的发电功率最小为 $4.28\text{ mW}$ ,说明调谐装置移动 $1\text{ mm}$ 至少需要 $34.2\text{ s}$ 的睡眠时间。考虑到该位置调谐范围的上/下限距离 $\Delta x=20\text{ mm}$ ,为了保证设备能在最大范围内进行调谐,在系统效率保持不变的前提下,单片机的睡眠时间应达到 $684\text{ s}$ ; $x=40\text{ mm}$ 时产生的发电功率最大为 $10.67\text{ mW}$ ,说明调谐装置移动 $1\text{ mm}$ 至少需要 $13.7\text{ s}$ 的睡眠时间。该位置调谐范围的上/下限距离 $\Delta x=30\text{ mm}$ ,此时单片机的睡眠时间应达到 $411\text{ s}$ 。由于压电振子在不同固定位置产

生不同的功率输出,睡眠时间会进行动态调整。因此,所提出的调谐装置在睡眠时间至少为 $411\text{ s}$ 的条件下,可以在 $f\sim 2.1f$ 范围内实现自调谐,并且保证能量收集效率为 $40\%$ 以上。

尽管所提出的调谐装置所产生的瞬时能量低于调谐所需要消耗的能量,但在许多应用场合中,能量消耗的时间很短,能量收集的时间足够长,此时通过设置一个合理的占空比可使调谐装置实现自给自足。事实上,环境中的许多振动源具有两个或两个以上稳定的离散振动频率,如图19所示。例如,HVAC通风口的振动频率包括 $21.8, 29$ 和 $127.3\text{ Hz}$ ;丰田汽车发动机的振动频率包括 $24$ 和 $42.8\text{ Hz}$ ;车床防护罩的振动频率包括 $15.5$ 和 $24.5\text{ Hz}$ <sup>[26]</sup>。此外,许多大型设备有两个或两个以上稳定的离散振动频率<sup>[11,23]</sup>。例如大型振动筛的振动频率与物料的粒度和数量密切相关;刮板输送机在满载、空载和半载时的振动频率也不同;提升箕斗在加速、匀速和减速阶段的频差也很大。此时,传统压电振子无法实现多个离散振动频率的能量收集,所提出的自调谐压电振子可以实现更大的频率调节范围,从而提高其发电性能和环境适应性,有效解决传统压电振子频带窄的问题。

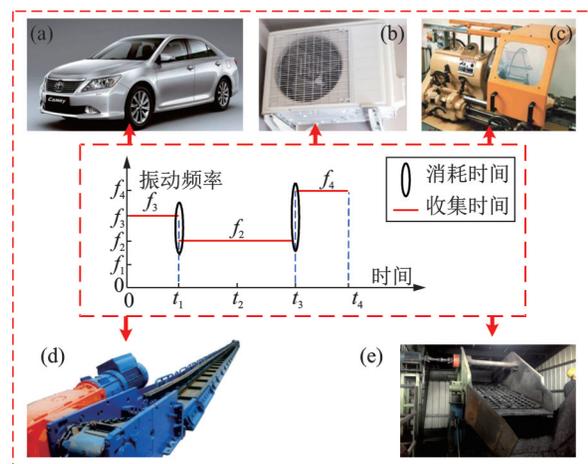


图 19 环境中常见的振动源:

- (a) 丰田汽车发动机;(b)暖通通风口;(c)车床防护罩;  
(d)刮板输送机;(e)振动筛

Fig. 19 Common vibration sources in the environment:  
(a) Toyota motor engine; (b) HVAC vents; (c) Lathe protective cover; (d) Scraper conveyor; (e) Vibration sieve

需要注意的是,本文研究的是质量 $m=37\text{ g}$ 、长度为 $80\text{ mm}$ 的压电振子的频率调节范围,实际上,可以通过改变质量块的大小以及压电片的长度来改变自调谐压电振子频率调节范围的上/下限,使其适应于不同的应用场合。因此,与传统压电振子相比,所提出的自调谐压电振子可以适用于多种具有多个稳定的离散振动频率的应用场合中,实现能量收集最大化,提高自身的环境适应性。

## 4 结 论

针对传统压电振子频带窄的问题,为适应随机振动环境,提出了一种通过改变固定位置使压电振子实现自调谐的方法,并设计了自调谐压电振子原型,仿真和实验结果表明:

(1)随着自调谐压电振子固定位置的变化,压电振子的固有频率不断变化,利用这一特性可实现压电振子在不同激励频率下能量收集的最大化,提高压电振子的环境适应性。

(2)随着距离 $x$ 的增加,压电振子的平均发电功率先减小后突然增大;当 $x=L/2$ 时,压电振子的左右两端完全对称,有效发电面积达到最大。这一特性可为提高压电振子发电性能提供参考。

(3)在休眠时间为411 s以上的条件下,自调谐压电振子的调谐范围可达 $f\sim 2.1f$ ,能量收集效率可达40%以上,证明了所提出的自调谐压电振子在合适的占空比条件下可以实现自给自足。

(4)在充电时间和激励加速度相同、环境激励频率不同的条件下,有/无调谐装置的压电振子电容充电电压分别为1.97 V和0.61 V,表明调谐后的压电振子充电效率提高了223%,验证了所提出的自调谐压电振子可以进一步提高能量收集效率。

### 参考文献:

- [1] 亓有超,赵俊青,张弛.微纳振动能量收集器研究现状与展望[J].机械工程学报,2020,56(13):1-15.  
QI Y C, ZHAO J Q, ZHANG C. Review and prospect of micro-nano vibration energy harvesters[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(13): 1-15.
- [2] 陆颖瓚,朱宇成,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 C, 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.
- [3] Nie X C, Tan T, Yan Z M, et al. Broadband and high-efficient L-shaped piezoelectric energy harvester based on internal resonance [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 159: 287-305.
- [4] 闫晓东,周公博.中间梁方式下压电式能量采集器发电性能研究[J].电子学报,2022,50(2):404-414.  
Yan X D, Zhou G B. Study on power generation performance of piezoelectric energy harvester under intermediate beam fixed mode[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(2): 404-414.

- [5] 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]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(9): 1968-1980.
- [6] Muthalif A G A, Nordin N H D. Optimal piezoelectric beam shape for single and broadband vibration energy harvesting: modeling, simulation and experimental results [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2015, 54-55: 417-426.
- [7] Li H S, Liu D H, Wang J J, et al. Broadband bimorph piezoelectric energy harvesting by exploiting bending-torsion of L-shaped structure[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 206: 112503.
- [8] 陈仁文,任龙,夏桦康,等.多方向宽频带压电式振动能量采集器研究进展[J].仪器仪表学报,2014,35(12):2641-2652.  
Chen R W, Ren L, Xia H K, et al. Research advance in multi-directional wide-band piezoelectric vibration energy harvesters[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(12): 2641-2652.
- [9] 罗翠线,秦敏哲.基于模态分离技术的 $3\times n$ 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  $3\times n$  element piezoelectric vibration generator with low frequency and wide bandwidth exploiting modes separation technique[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(3): 554-560.
- [10] Romani A, Filippi M, Tartagni M. Micropower design of a fully autonomous energy harvesting circuit for arrays of piezoelectric transducers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 729-739.
- [11] 王淑云,朱雅娜,阚君武,等.间接激励压电发电机的建模仿真与试验研究[J].振动工程学报,2021,34(1):127-133.  
Wang S Y, Zhu Y N, Kan J W, et al. Performance analysis and test of a piezoelectric energy harvester based on indirect excitation[J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(1): 127-133.
- [12] Somkuwar R, Chandwani J, Deshmukh R. Wideband auto-tunable vibration energy harvester using change in centre of gravity[J]. Microsystem Technologies, 2018, 24(7): 3033-3044.
- [13] Jackson N, Stam F, Olszewski O Z, et al. Broadening the bandwidth of piezoelectric energy harvesters using liquid filled mass[J]. Procedia Engineering, 2015, 120: 328-332.
- [14] Jackson N, Stam F, Olszewski O Z, et al. Widening the bandwidth of vibration energy harvesters using a liquid-based non-uniform load distribution[J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2016, 246: 170-179.

- [15] Liu H C, Tay C J, Quan C G, et al. A scrape-through piezoelectric MEMS energy harvester with frequency broadband and up-conversion behaviors[J]. *Microsystem Technologies*, 2011, 17(12): 1747-1754.
- [16] Liu H C, Lee C G, Kobayashi T, et al. Piezoelectric MEMS-based wideband energy harvesting systems using a frequency-up-conversion cantilever stopper[J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2012, 186: 242-248.
- [17] Halim M A, Park J Y. Theoretical modeling and analysis of mechanical impact driven and frequency up-converted piezoelectric energy harvester for low-frequency and wide-bandwidth operation[J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2014, 208: 56-65.
- [18] Wu X M, Lin J H, Kato S, et al. A frequency adjustable vibration energy harvester[J]. *Proceedings of PowerMEMS*, 2008: 245-248.
- [19] Eichhorn C, Tchagsim R, Wilhelm N, et al. A smart and self-sufficient frequency tunable vibration energy harvester[J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2011, 21(10): 104003.
- [20] Aboulfotouh N A, Arafa M H, Megahed S M. A self-tuning resonator for vibration energy harvesting[J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2013, 201: 328-334.
- [21] Karadag C V, Topaloglu N. A self-sufficient and frequency tunable piezoelectric vibration energy harvester [J]. *Journal of Vibration & Acoustics*, 2017, 139(1): 011013.
- [22] 师建国, 高广财, 滕睿. 激励频率自适应的采煤机状态压电俘能监测装置研究[J]. *传感技术学报*, 2018, 31(5): 683-687.
- Shi J G, Gao G C, Teng R. Study on piezoelectric energy harvesting device for state monitoring of shearer adaptive to excitation frequency[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2018, 31(5): 683-687.
- [23] Huang S C, Lin K. A novel design of a map-tuning piezoelectric vibration energy harvester[J]. *Smart Materials & Structures*, 2012, 21(8): 085014.
- [24] Zhang J H, Qin L F. A tunable frequency up-conversion wideband piezoelectric vibration energy harvester for low-frequency variable environment using a novel impact-and rope-driven hybrid mechanism [J]. *Applied Energy*, 2019, 240: 26-34.
- [25] 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.
- [26] Reilly E K, Miller L M, Fain R, et al. A study of ambient vibrations for piezoelectric energy conversion[J]. *Proceedings of PowerMEMS*, 2009: 312-315.

## Power generation performance analysis of broadband self-tuning piezoelectric vibrator

YAN Xiao-dong<sup>1,2</sup>, ZHOU Gong-bo<sup>1,2</sup>, XU Mao<sup>1,2</sup>, ZHOU Ping<sup>1,2</sup>, HE Zhen-zhi<sup>3</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Mine Mechanical and Electrical Equipment, Xuzhou 221116, China;

2. School of Mechatronic and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

3. School of Mechatronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Under the traditional cantilever fixed mode, the frequency band of piezoelectric vibrators is narrow, which has the problems such as poor environmental adaptability and low power generation efficiency. Therefore, a broadband self-tuning piezoelectric vibrator is proposed by changing the fixed position. The tuning model is established, and then the power generation performance of the piezoelectric vibrator at different fixed positions is simulated and analyzed. It is verified by experimental method. The results show that the proposed self-tuning piezoelectric vibrator can achieve tuning in the above range of  $f \sim 2.1f$ . At the same time, by adjusting the appropriate duty cycle, the tuning device can achieve self-sufficiency. When the sleep time is more than 411 s, the tuning in the maximum frequency range can be realized, and the energy collection efficiency can reach more than 40%. In addition, when the charging time and excitation acceleration are the same, but the excitation frequency is different, the charging efficiency of the piezoelectric vibrator with the tuning device is improved by 223% compared with that without tuning piezoelectric vibrator.

**Key words:** piezoelectric vibrator; broadband; self-tuning; fixed position; duty cycle

**作者简介:** 闫晓东(1995—),男,博士研究生。E-mail: yanxiaodong@cumt.edu.cn。

**通讯作者:** 周公博(1985—),男,博士,教授。E-mail: gbzhou@cumt.edu.cn。