

# 基于多模态扩频理论的压电振动能量采集系统

李治宏<sup>1</sup>, 张佳佳<sup>1,2</sup>, 张金雨<sup>1</sup>, 王佳<sup>1</sup>, 马云宾<sup>3</sup>, 牟笑静<sup>2</sup>

(1. 重庆邮电大学 工业物联网与网络化控制教育部重点实验室, 重庆 400065;

2. 重庆大学 光电工程学院, 重庆 400044;

3. 国家石油天然气管网集团有限公司科学技术研究总院分公司, 天津 300457)

**摘要:**以同时提升多模态采集和增加带宽为研究方向,结合多模态扩频理论,建立了一套多模态宽频且能多方向工作的压电振动能量采集系统。该系统包含能量采集器和电源管理电路两个模块。其中,采集器包括4种谐振频率,组成了较宽的工作频带,保证了该采集器在低频振动工作环境下高效率地收集振动能量;电源管理电路将采集到的交流电转换为稳定的直流电,再对电容或电池等储能元件充电以供微电子器件使用。经过模态和谐响应分析后,搭建了实验平台并对采集系统进行实验测试。实验结果表明,在加速度 $6\text{ m/s}^2$ 简谐力激励下,工作频带为 $16.1\sim 27.8\text{ Hz}$ ,输出电压最高可达 $35.75\text{ V}$ ,阻抗匹配后最优阻值为 $200\text{ k}\Omega$ ,此时输出功率为 $115.85\text{ }\mu\text{W}$ 。

**关键词:**多模态;多方向;宽频带;压电;振动能量采集

中图分类号:TN384 文献标识码:A

## Piezoelectric Vibration-Energy Acquisition System Based on Multimodal-Spread-Spectrum Theory

LI Zhihong<sup>1</sup>, ZHANG Jiajia<sup>1,2</sup>, ZHANG Jinyu<sup>1</sup>, WANG Jia<sup>1</sup>, MA Yunbin<sup>3</sup>, MOU Xiaojing<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Industrial Internet of Things and Networked Control of Ministry of Education, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

3. Branch of Science and Technology Research Institute, National Petroleum and Natural Gas Pipeline Network Group Co., LTD., Tianjin 300457, China)

**Abstract:**In this study, multimodal acquisition and bandwidth broadening are enhanced by employing multimodal spread spectrum theory to establish a versatile piezoelectric vibration-energy acquisition system. The system comprises two modules—an energy collector and a power-management circuit. The collector operates across four resonant frequencies, thus ensuring efficient energy harvesting in low-frequency vibration settings. The power-management circuit converts AC power into stable DC power for charging energy-storage components. Following modal-harmony response analysis, an experimental platform is constructed for system testing. Experimental results indicate an operational frequency band of  $16.1$  to  $27.8\text{ Hz}$ , with a peak output voltage of  $33.75\text{ V}$  under a simple harmonic force and an acceleration of  $6\text{ m/s}^2$ . Upon impedance matching, the optimal resistance value is shown to be  $200\text{ k}\Omega$ , which results in an output power of  $115.85\text{ }\mu\text{W}$ .

**Key words:** multimodal; multi directional; broadband; piezoelectricity; vibration energy collection

### 0 引言

随着微电子技术和低功耗电子器件的不断发展,无线传感器节点小型化、功耗低的需求日益突出。因此,收集在环境中普遍存在的低频振动能量,并使其为网络节点或电池供电的研究受到广泛

关注<sup>[1]</sup>。其中,压电能量采集器具有机电转化率较高,供电性能稳定,且不依赖于外部磁场或电源的优秀特性,成为研究热点<sup>[2]</sup>。

传统的压电能量采集器工作频带窄、模态单一且不能多方向采集能量,而环境中的振动能多种多

收稿日期:2024-03-06

基金项目:重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(CSTB2022TIAD-KPX0137)

作者简介:李治宏(1998-),男,重庆市人,硕士。通信作者:张佳佳(1985-),男,河南省人,博士,硕士生导师。

样,且具有宽频带和随机性的特征,这限制了振动能量采集器的应用场景。ZOU 等<sup>[3]</sup>提出了一种磁耦合屈张式振动能量采集器,悬臂梁磁铁随采集器振动,磁铁间的非线性磁力作用于屈张式压电采集器磁体上,使压电片产生形变,进而实现振动能量采集,但其采集频带窄且收集能量方向单一。陈旺等<sup>[4]</sup>提出了采用弯曲梁的多方向宽频振动能量采集器,由压电悬臂梁和 L 型弯曲弹性梁构成。振动时,L 型弯曲弹性梁的振动通过非线性磁力传递到压电梁。采集器利用磁力的非线性,实现宽频振动能量采集,但其采集频带较窄。为了提高低频振动环境下的能量收集效率,TANG 等<sup>[5]</sup>引入了 2-自由度压电振动能量采集器模型,并将其扩展为 n-自由度模型,使采集器能在多个共振频率下工作。SUN 等<sup>[6]</sup>提出了一种由柔性和压电材料制成的柔性多模态振动能量采集器。此三维结构允许从多个方向收集能量,同时扩大了采集器的工作频率范围,0~50 Hz 内有 6 个谐振频率。两项研究都采用了多自由度能量采集,以延长采集器的工作频谱,提高能量采集效率。

文献分析表明,采用多自由度技术和扩大收割机的工作带宽可以显著提高能量收集效率。在此基础上,本文介绍了一种多模宽带压电振动能量收集方法。通过将压电元件纳入振动系统,利用系统产生的振动引起压电元件的变形并将其转化为电能。搭建实验平台对该设计进行测试,实验结果验证了采集器的可行性,为无线小型传感器等低功耗器件的供能提供了新的思路和方法。

### 1 能量采集器结构设计

针对现有的悬臂梁式压电能量采集器收集频带窄,工作频率窄,收集方向单一,模态单一等不足,结合多模态拓频理论,设计了多方向、宽频的压电能量采集器,结构及其尺寸标注如图 1 所示。该能量采集器主要由上、下两个分支叉梁,一个水平主梁,3 个压电片及 4 个质量块组成。其中,分支叉梁和主梁以铜作为制作材料,采用螺丝和螺母连接固定,用于衬底并作为公共电极。压电片采用 PZT-5H 压电陶瓷粘贴在主梁和分支梁上,当主梁和分支叉梁因外部激励产生振动时,压电片随之发生形变,将振动能量转化为交流电能。4 个质量块由结构钢制成,固定在两个分支梁叉梁的末端,用于调

整结构工作的谐振频率。

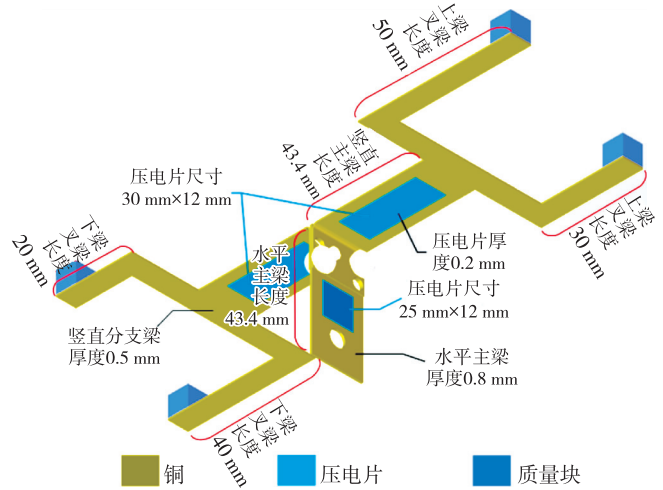


图 1 多模态宽频压电振动能量采集器结构及其尺寸标注

### 2 模型与等效电路分析

多种拓宽能量采集器主要包括线性法和非线性法<sup>[7]</sup>。非线性频带拓展方法主要利用软、硬弹簧响应实现频带拓展,结构实现较复杂,且主要工作在高能运动轨道,应用范围受限。线性频带拓展主要包括多模态能量采集器和阵列式能量采集器。其中,阵列法结构单元较多,体积较大,且最优输出集中在某一工作频率下,无法适应低频运动的随机性。相比之下,多模态能量采集器结构较简单,容易实现,且具有多个离散的谐振频率点。本文提出的多模态能量采集器 4-自由度系统等效模型如图 2 所示。

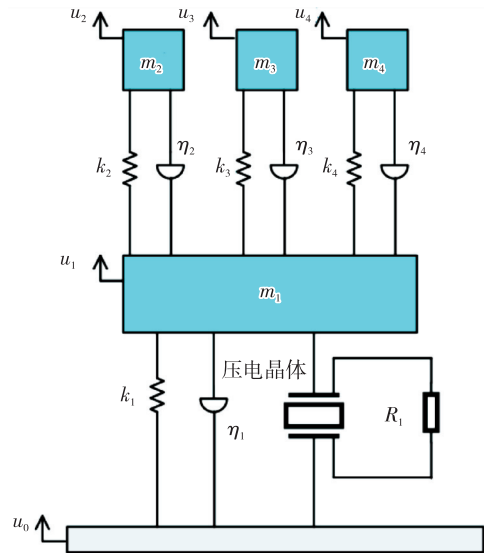


图 2 4-自由度等效模型

该系统的振动微分通过拉氏变换将功率无量纲化,因此,在开路工况下无阻尼开路谐振频率为

$$\left[ 1 - (1 + 3\mu)\Omega^2 - \mu\Omega^4 \sum_{p=2}^4 \frac{1}{\alpha_{p-1}^2 - \Omega^2} \right] + k_e^2 = 0 \quad (1)$$

式中： $\alpha$  为谐振频率下相邻质量块角频率的比值； $\mu$  为基座或者质量块的位移； $k_e$  为质量块的刚度。

通过数值方法可确定系统的多个谐振频率。由式(1)可见，谐振频率与  $\alpha$ 、 $\mu$  和  $k_e$  相关，且多个谐振频率之间并不是相互独立的，调节相关参数可以实现工作频带的连续拓展。

### 3 电源管理电路设计

压电能量采集器的输出具有开路电压脉冲值较高，短路电流脉冲值较小的特点，无法直接为负载端微电子器件提供稳定、持久的电能。结合上文分析，采用“充电-存储-释放”的充放电策略，结合储能电容，使能量采集器收集的能量经过电源管理电路后能实现稳定的直流输出。

本文提出的能量采集器输出功率的数量级在  $\mu\text{W}$  级，因此，在选择电源管理芯片时应本着低功耗的原则，结合较少的分立器件共同实现电能转换。为了提高能量转换效率，使用 LTC3588 芯片作为电源管理芯片，配合整流电路和电容共同实现能量的转换和储存。

综上所述，结合能量采集器、整流桥及储能电容，整套电源管理电路系统如图 3 所示。由于本文能量采集器的输出高于 LTC3588-1 芯片输入范围，故在整流后接入一个稳压二极管  $D_5$ ，将输入电压维持在合理范围内，防止因电压过高而损坏芯片。将  $D_1$  与  $V_{in2}$  相连，置于高电平状态， $D_0$  接地，实现 3.3 V 直流输出，为后续储能元件充电。

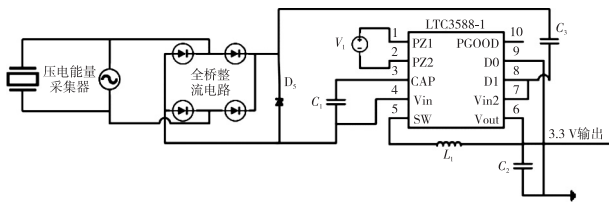


图 3 基于 LTC3588-1 的电源管理电路

## 4 实验测试

### 4.1 实验系统搭建

为了验证能量采集器在实际情况下的输出特性，参考相关实验研究，搭建了输出性能测试平台，主要包括振动激励系统和数据采集系统。信号发生器、功率放大器、振动台组成振动激励系统，为实验模

拟实际情况下的振动激励；加速度传感器与电荷放大器相连，将实时的振动加速度转化为电信号以便记录；示波器和电脑主机构成了数据采集处理系统。

### 4.2 多模态能量采集器输出性能测试

为了验证频率对有效工作带宽和多方向振动能量收集能力的影响，在实验平台上进行输出测试。测试内容包括在竖直和水平方向激励下能量采集器开路电压随频率的变化。在不同外接负载条件下测试能量采集器输出功率的变化(最优负载测试)。测试结果如图 4-6 所示。

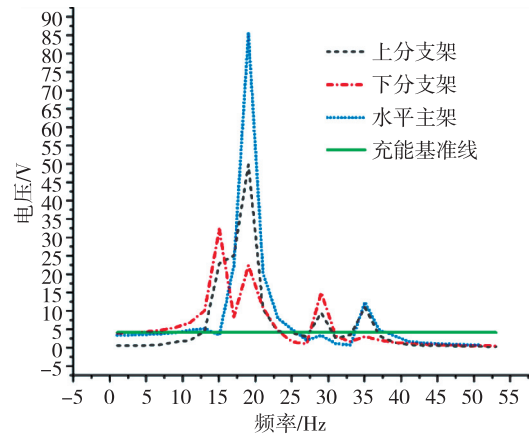


图 4 竖直方向输出电压与频率的关系

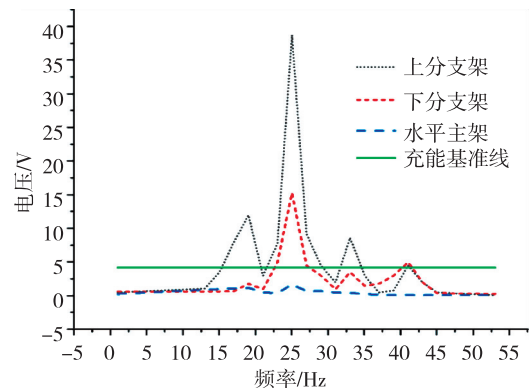


图 5 水平方向输出电压与频率的关系

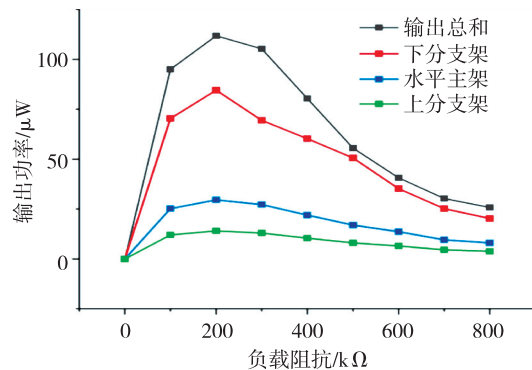


图 6 输出功率与负载阻抗的关系

首先验证能量采集器的多方向能量收集能力。在竖直和水平方向施加激励,测试了在 1~53 Hz 内以 2 Hz 为单位的 27 个频率点下采集器的开路电压。激励的加速度值固定为 6 m/s<sup>2</sup>。

根据图 4 所示,竖直方向激励下的能量采集器发生 4 次谐振(15.3 Hz、18.9 Hz、18.6 Hz、35.2 Hz),并输出 4 个峰值。在 18.9 Hz 时,3 个梁的输出达到最大值。考虑到锂电池的充电电压约为 4.2 V,故采用 4.2 V 作为采集器的有效输出电压,图中绿色划线以上为输出电压曲线,采集器在竖直方向的激励下具有 3 个有效工作频带,分别为 13.1~23.8 Hz、27.8~31.7 Hz 和 33.2~37.4 Hz。

根据图 5 所示,水平方向激励下只有两个分支梁有输出电压,而水平主梁几乎无输出。在 50 Hz 低频范围内,上、下分支梁在 4 个谐振频率处产生波峰,其中 25.2 Hz 时两个分支梁的输出达到最大值。采集器在水平方向的激励下具有 3 个有效工作频带,分别为 15.5~20.3 Hz、21.4~28.6 Hz 和 31.9~34.3 Hz。

其次,能量采集器的输出功率不仅与外部激励相关,还取决于外部负载。为了得到与本文能量采集器相匹配的最优阻值,将旋转式电阻箱连接在能量采集器的输出端口,将静电计的探头接在电阻箱两端,负载端的功率为

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (2)$$

式中: $U$  为能量采集器的输出电压; $R$  为负载端的电阻值。设置频率为 18.9 Hz,加速度为 6 m/s<sup>2</sup>,得到输出功率曲线见图 6。由图可见,在 200 k $\Omega$  时,能量采集器输出达到最大(为 115.85  $\mu$ W)。

为了验证压电振动取能电源的实用性能,以低功耗无线节点为负载,采用隔离地的手持示波器同时观测储能电容充电电压波形和电源输出电压波形。测试结果如图 7 所示。由图可见,将储能电容电压从 0 充电至 11 V,用时 1 220 s。充放电循环周期内,储能电容电压从 4.2 V 充电至 11 V,用时 996 s。当储能电容放电时,电源管理电路输出电压突增至 3.3 V;当储能电容重新充电时,电源管理电路输出电压骤降至 0。由此可知,当负载为无线节点时,储能电容的充放电循环周期连续且完整,电源管理电路工作正常。

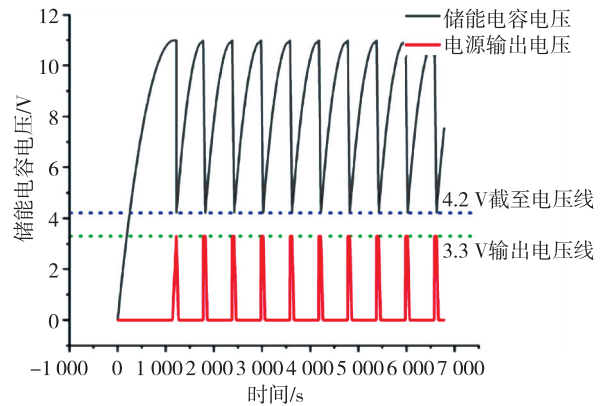
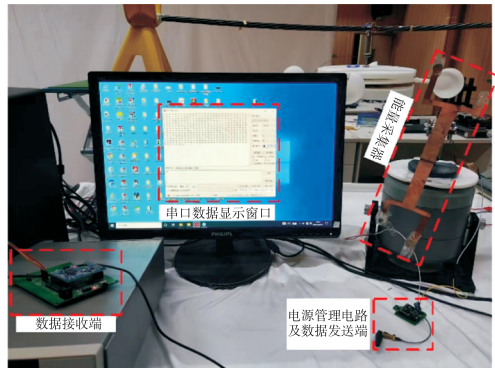
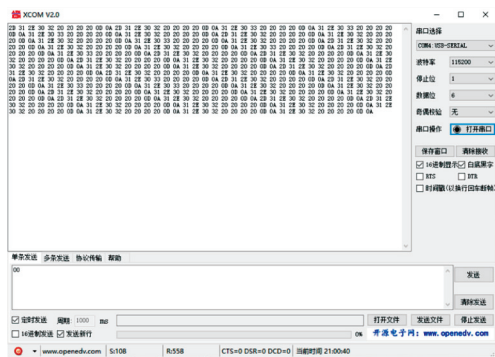


图 7 传感节点驱动测试

图 8 为压电振动能量采集系统的实用性能测试。图中,串口数据显示窗口周期性地收到来自数据发送端的测量数据,证明了压电振动能量采集系统能够保持长期稳定地运行。



(a) 实用性能测试图



(b) 串口数据显示窗口

图 8 能量采集系统的实用性能测试

## 5 结束语

本文基于多模态拓频理论设计了一套多方向、多模态的宽频压电振动能量采集系统,解决了传统采集器的收集频带窄、工作频率单一、收集方向单一及模态单一等缺点。通过实验验证了其多方向振动能量收集能力,为了检验能量采集系统的实际



效果,对由采集器与低功耗无线传感节点组成的系统进行测试。实验结果显示,在  $0.6g$  ( $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ )加速度的简谐力激励下,能量采集器输出电压最高可达  $35.75 \text{ V}$ 。经过阻抗匹配后,最优阻值为  $200 \text{ k}\Omega$ ,此时输出功率为  $115.85 \mu\text{W}$ ,实验验证了能量采集器具备多方向收集能量的能力。同时,在此条件下能量采集器的输出能量成功驱动无线传感节点,能以间隔  $996 \text{ s}$  周期性地驱动节点工作一次。在持续  $0.6g$  简谐力激励振动情况下,能量采集系统能保持长期稳定地运行。综上所述,本研究设计并验证了一种多模态宽频压电振动能量采集系统。系统中的能量采集器具备多模态特性,在宽频振动条件下能够有效地收集能量,并具备多方向收集能量的能力。此研究为拓展悬臂梁式振动能量采集器的工作频带和提高能量收集效率提供了新的思路和方法。

#### 参考文献:

- [1] 赵博. 物联网技术在智能制造中的应用研究[J]. 产品可靠性报告, 2023(2):83-85.  
ZHAO Bo. Research on the application of internet of things technology in intelligent manufacturing [J]. Product Reliability Report, 2023(2):83-85.
- [2] 赵金兰, 李娅, 岳庆玲, 等. 无线传感器网络技术的应用及前景分析[J]. 江苏科技信息, 2021, 38(35):51-53.  
ZHAO Jinlan, LI Ya, YUE Qingling, et al. Application and prospect analysis of wireless sensor network technology[J]. Jiangsu Science and Technology Information, 2021, 38(35):51-53.
- [3] ZOU H X, ZHANG W M, LI W B, et al. Magnetically coupled flextensional transducer for wideband vibration energy harvesting: Design, modeling and experiments[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 416: 55-79.
- [4] CHEN Wang, DAI Xianzhi, ZHANG Zhang, et al. Piezoelectric multidirectional wideband vibration energy harvester using bending beams[J]. Henan University of Science and Technology, 2019(16): 45-48.
- [5] TANG L, YANG Y. A multiple-degree-of-freedom piezoelectric energy harvesting model[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2012, 23(14): 1631-1647.
- [6] SUN R, LI Q, YAO J, et al. Tunable, multi-modal, and multi-directional vibration energy harvester based on three-dimensional architected metastructures [J]. Applied Energy, 2020, 264: 114615.
- [7] 杜宇. 宽频振动能量收集方法研究与结构设计[D]. 合肥:合肥工业大学, 2019: 30-39.  
DU Yu. Research on broadband vibration energy collection method and structure design[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019: 30-39.