

# 倾斜异长组合型压电能量采集器设计与仿真

王 鹏<sup>1,2</sup>, 蒋子豪<sup>1</sup>, 陈仁文<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 江苏 南京 210016;

2. 新疆铁道职业技术学院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 振动是自然界中普遍存在的现象, 而压电材料可以将外界振动的机械能转化为电能, 为微型机电系统、无线传感网络和嵌入式系统等提供能量, 从而使得器件降低对电池能源供应的依赖。为了拓宽压电能量采集器的工作频带并提升其能量采集效率, 该文设计了一种倾斜异长组合型压电能量采集器, 通过理论分析得出该能量采集器的固有频率以及压电能量采集器的各组模态振型, 通过有限元分析证明了理论推导的正确性, 验证了在该设计中压电悬臂梁组数对压电能量采集器的影响规律。结果表明, 倾斜异长组合型压电能量采集器可以实现多模态下的振动能量采集, 提升能量采集效率。

**关键词:** 振动能量采集; 有限元; 异长组合; 多模态

**中图分类号:** TN384 **文献标识码:** A

## Design and Simulation of a Tilted Asymmetric Composite Piezoelectric-Energy Harvester

WANG Peng<sup>1,2</sup>, JIANG Zihao<sup>1</sup>, CHEN Renwen<sup>1</sup>

(1. State Key Lab. of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,

Nanjing 210016, China; 2. Xinjiang Railway Vocational and Technical College, Urumqi 830011, China)

**Abstract:** Vibration is a ubiquitous phenomenon in nature. Piezoelectric materials can convert the mechanical energy of external vibrations into electrical energy, providing energy for micro-electromechanical systems, wireless sensor networks, embedded systems, etc., thereby reducing the device's dependence on battery power. To broaden the working bandwidth of the piezoelectric-energy harvester and improve its energy-harvesting efficiency, this study designs a tilted asymmetric composite piezoelectric-energy harvester, and obtains the natural frequency and modal shapes of each group of the harvester through theoretical analysis. Through finite-element analysis, the correctness of the theoretical derivation is proved, and the influence law of the number of piezoelectric cantilever beams on the piezoelectric-energy harvester in this design is verified. The results show that the tilted asymmetric composite piezoelectric-energy harvester can harvest vibration energy under multiple modes and improve the energy-harvesting efficiency.

**Key words:** vibration energy harvesting; finite element; asymmetric composite; multimode

### 0 引言

随着电子技术的发展, 无线传感器网络以及便携式电子设备的应用更广。传统的设备主要供能途径依赖化学电池, 但化学电池使用寿命有限, 需要定期进行更换。对于工作于特殊环境下的设备, 不具备及时更换电池的条件, 极大地限制了设备的工作与运行<sup>[1]</sup>。因此, 如何实现设备自供能是解决问题的关键。自供能技术是通过采集环境能量实

现对耗能设备的供能<sup>[2]</sup>。在日常生活环境下, 工厂的作业机械会使周围的环境产生振动, 车辆、列车运行造成了道路、轨道、桥梁的振动<sup>[3-5]</sup>。由于振动能量来源广泛, 种类繁多, 频带较宽, 所以如何有效地对其进行收集和存储成为一个重要课题<sup>[6]</sup>。

利用改进的机械结构对环境振动幅度进行放大, 可以提升能量采集器的工作效率。Cao等<sup>[7]</sup>提出了一种可以实现周期调节阶梯厚度的压电悬臂

收稿日期: 2023-12-01

作者简介: 王鹏(1983-), 男, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市人, 博士生。通信作者: 陈仁文, 教授, 博士。

梁振动能量采集器,在低频环境中可实现宽频带振动能量采集。Shi等<sup>[8]</sup>设计了一种Z型梁结构的压电式振动能量采集器,仿真结果表明该结构可以拓宽能量采集器的工作频带,提升振动能量采集转化效率。Yan等<sup>[9]</sup>改进了传统压电悬臂梁的固定方式,提出了一种中间梁固定方式,将最大开路电压以及发电功率分别提升了95.19%和205.88%。

本文提出了一种倾斜异长组合型压电能量采集器,通过理论分析得出了悬臂梁安装角度与固有频率间的关系,经有限元分析验证了通过组合悬臂梁实现扩展采集频段的可行性。本文将不同长度的压电悬臂梁通过调整安装角度部署在有限尺寸环境,实现了多模态下的有效能量采集。

## 1 压电效应原理与能量采集器模型

### 1.1 正压电效应原理

正压电效应的原理是当压电材料存在外部力的作用而发生形变时,压电晶体内部会产生位移,导致压电材料表面出现极性相反的电荷,该情况称之为正压电效应。以压电悬臂梁为能量采集方式的压电能量采集器利用了正压电效应。图1展示了在产生正压电效应时晶体内部电荷的分布变化情况。

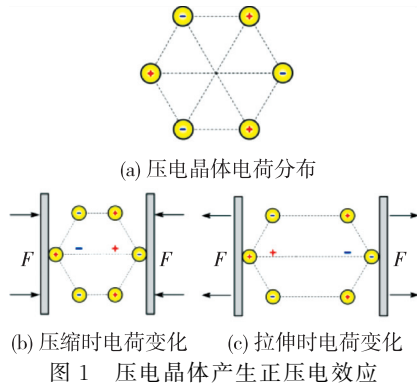


图1 压电晶体产生正压电效应

在压电晶体未受到外界激励时,其内部的离子电荷分布如图1(a)所示,内部电场强度为0,当受到外部应力影响产生应变时,电荷位置发生改变,产生内部电场,如图1(b)、(c)所示。

### 1.2 能量采集器模型

当压电振子工作于谐振频率区间时,其发电性能最佳。压电能量采集器的设计需要满足其工作频率与压电振子的谐振频率相等,压电振子的谐振频率在数值上可以参考其本身的固有频率。

图2为单个压电悬臂梁的结构示意图。当悬臂

梁自由端无质量块时,其固有频率<sup>[10]</sup>可表示为

$$\omega_n = \frac{A_n}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI_0}{\rho S}} \quad (1)$$

式中: $\omega_n$ 为 $n$ 阶固有频率; $A_n$ 为振型系数; $I_0$ 为梁的截面惯性矩; $l$ 为悬臂梁的长度; $\rho$ 为悬臂梁密度; $S$ 为悬臂梁横截面积; $E$ 为悬臂梁弹性模量。

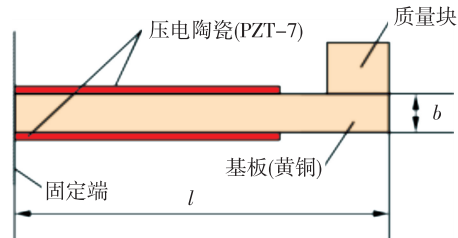


图2 单压电悬臂梁结构

由式(1)可知,通过调节悬臂梁的长度可以扩展能量采集器的工作带宽。本文将长度不等的压电悬臂梁进行组合,组合方式如图3所示。

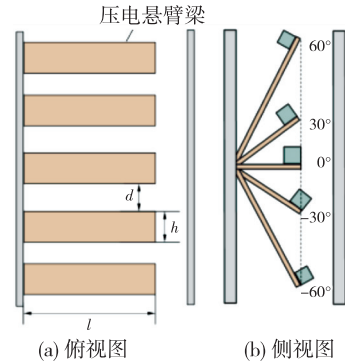


图3 能量采集器组合示意图

根据图3中的悬臂梁组合方式,在不考虑质量块的情况下,根据几何关系可知:

$$l_0 = \frac{l'}{\cos \theta} \quad (2)$$

式中: $l'$ 为该截面相对于固定端的距离; $\theta$ 为倾斜安装的悬臂梁与水平面夹角; $l_0$ 是安装角度为 $\theta$ 的悬臂梁长度。将式(2)代入式(1)可得:

$$\omega_{\theta n} = \frac{A_n \cos^2 \theta}{2\pi l'^2} \sqrt{\frac{EI_0}{\rho S}} \quad (3)$$

式中 $\omega_{\theta n}$ 为以 $\theta$ 角度安置的悬臂梁的 $n$ 阶固有频率。水平梁与以相对水平基准夹角为 $\theta$ 安装的悬臂梁的各阶固有频率的关系 $W(0, \theta)$ 可表示为

$$W_{(0, \theta)} = (\cos \theta)^{-2} \quad (4)$$

由式(4)可知,根据不同夹角布置的压电能量采集器可以实现对振动能量采集频带的拓宽作用。根据固有频率关系,在梁数为 $N$ 的组合方式下,将

存在  $\frac{N-1}{2}$  组模态, 各组模态振型所对应的频率可表示为

$$\omega_i = \omega_0 \cos^2\left(\frac{n_i \pi}{N-1}\right) \quad (5)$$

式中:  $n_i \in \left(1, \frac{N-1}{2}\right)$ ;  $\omega_i$  为第  $i$  组的固有频率;  $\omega_0$  为水平放置时压电悬臂梁的固有频率。

由于悬臂梁是成组安装, 故在悬臂梁数为  $N$  的条件下, 将存在  $\frac{N+1}{2}$  组模态振型。

## 2 倾斜异长组合型压电能量采集器

### 2.1 模型设计

本文采用 PZT-7 为压电材料, 黄铜为基板材料, 表 1 为采集器材料参数。

表 1 采集器模型参数

参数	压电材料	基板
密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 700	8 400
杨氏模量 $E / \text{GPa}$	—	80
泊松比	—	0.324
厚度 $b / \text{mm}$	0.09	0.12
宽度 $h / \text{mm}$	20	20
基准长度 $l / \text{mm}$	—	30
横梁间隔 $d / \text{mm}$	—	5

对 4 组压电悬臂梁组合方式的压电能量采集器进行实验仿真, 其分组情况如表 2 所示。实验将根据该分组方式开展, 用以得出压电悬臂梁安装组合方式对压电能量采集器的电压输出的影响。

表 2 压电悬臂梁数目与安置方式

组合方式	梁数	安装角度
组合 1	1	0
组合 2	3	$0, \pm \frac{\pi}{4}$
组合 3	5	$0, \pm \frac{\pi}{6}, \pm \frac{\pi}{3}$
组合 4	7	$0, \pm \frac{\pi}{8}, \pm \frac{\pi}{4}, \pm \frac{3\pi}{8}$

### 2.2 有限元建模

在 ANSYS Workbench 仿真软件中分别对不同悬臂梁数目组合的压电能量采集器进行建模。

首先对压电悬臂梁进行网格划分, 利用仿真软件进行分析。在仿真软件中进行单悬臂梁结构的建模操作, 显示所选的基准梁的网格划分如图 4 所示。

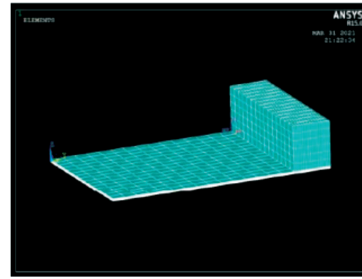


图 4 基准悬臂梁网格划分

在表 2 提出的组合中, 组合 4 为最典型的组合, 现对组合 4 进行振动模态分析与参数分析。在有限元软件中, 组合 4 的网格划分如图 5 所示。

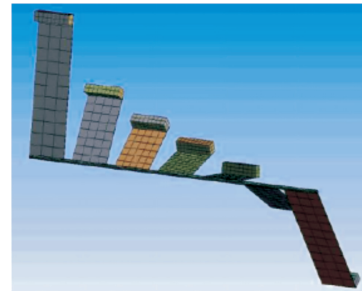


图 5 组合 4 网格划分

图 6 为组合 4 模型侧视图。每个悬臂梁的自由端端点均位于同一条竖直线上, 即图中红色线条, 表示所有悬臂梁在水平面的投影长度均相等, 为中间梁长度 30 mm。

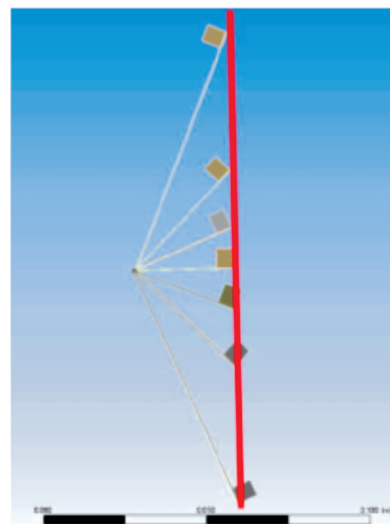


图 6 组合 4 模型侧视图

### 2.3 模态分析

对组合 4 的压电能量采集器进行模态振型分

析,如图7所示。对压电能量采集器模型施加外部载荷,提取压电能量采集器的模态振型。

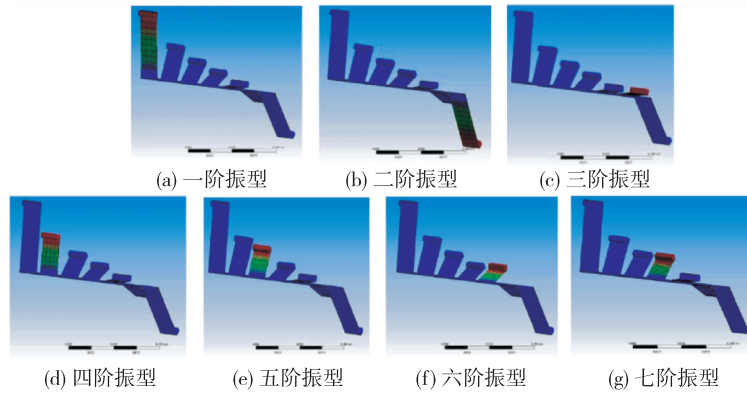


图7 压电能量采集器前七阶模态振型图

根据仿真软件得出的结果,悬臂梁安置方式为组合4的压电能量采集器的前7阶振型与悬臂梁安装角度的关系如表3所示。在前7阶振型中,安装角度分别为 $\pm \frac{\pi}{8}$ ,  $\pm \frac{\pi}{4}$ ,  $\pm \frac{3\pi}{8}$ 安置的梁分别对应表中两个相近的固有频率,通过这一规律可以预测对

压电能量采集器的谐响应分析存在4个峰值。将表3的仿真结果与式(5)计算结果对比可知,仿真结果与计算结果基本吻合。因此,基于该组合方式的设计满足能量采集器在低频环境下实现宽频能量采集的要求。

表3 组合型压电采集器前7阶模态振型对应频率

安装角/rad	$\frac{3\pi}{8}$	$-\frac{3\pi}{8}$	$\frac{\pi}{4}$	$-\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{8}$	$-\frac{\pi}{8}$	0
对应阶数	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶	六阶	七阶
频率/Hz	13.306	13.307	35.707	35.714	55.805	55.806	66.76

### 3 参数分析

对悬臂梁安置方式为组合4的压电能量采集器进行谐响应分析。对该压电能量采集器施加不同的外界激励频率,绘制其输出电压情况的变化规律。实验中,激励加速度为 $g$  ( $g=9.8 \text{ m/s}^2$ ),绘制该能量采集器的频率-电压曲线,如图8所示。

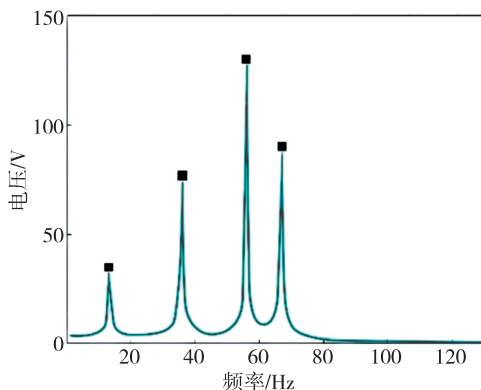


图8 组合梁谐响应分析结果

根据图8可知,组合型压电能量采集器的谐响应分析曲线具有4个明显的波峰,对应组合型压电

能量采集器的4组对应频率,图中,开路电压峰值分别为35.02 V、77.38 V、129.7 V、90.22 V,所对应的激励振动频率分别为13 Hz、36 Hz、56 Hz、67 Hz,证明了在低频环境中,异长组合型压电能量采集器具有一定的扩频效果。

### 4 结束语

本文提出了一种异长组合型压电能量采集器,通过理论分析得出了该压电能量采集器中压电悬臂梁的安装角度与固有频率的关系,利用压电悬臂梁的数学理论进行计算分析,得出了异长组合型压电能量采集器输出的频率-电压规律,采用ANSYS Workbench验证了理论分析的正确性与能量采集器的性能。仿真结果表明,与单个压电悬臂梁相比,组合悬臂梁的设计可以在更多模式下的能量采集。在7个压电悬臂梁的组合条件下可实现4个模态共振频率下的稳定能量采集。

### 参考文献:

[1] 王冠,王瑞尧.基于簇头优化的自供能无线传感网络路

- 由算法[J]. 计算机应用, 2018, 38(6): 1721-1725.
- WANG Guan, WANG Ruiyao. Routing algorithm based on cluster-head optimization for self-energized wireless sensor network[J]. Journal of Computer Applications, 2018, 38(6): 1721-1725.
- [2] 赵宇恒, 梁俊睿, 赵康. 一种自供能压电能量收集系统的设计与实现[J]. 电子设计工程, 2018, 26(5): 1-6.
- ZHAO Yuheng, LIANG Junrui, ZHAO Kang. Design and implementation of a self-powered piezoelectric energy harvesting system[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(5): 1-6.
- [3] 汪振国, 雷晓燕, 罗锟, 等. 桥梁结构振动试验相似模型的设计及校验[J]. 振动与冲击, 2018, 37(7): 220-226.
- WANG Zhenguo, LEI Xiaoyan, LUO Kun, et al. Design and validation of similarity model in bridge structural vibration tests [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(7): 220-226.
- [4] 宋立忠, 冯青松, 孙坤, 等. 城市轨道交通高架钢轨波磨地段振动噪声试验[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(3): 159-168.
- SONG Lizhong, FENG Qingsong, SUN Kun, et al. Test on vibration noise of rail corrugation section on urban rail transit viaduct [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(3): 159-168.
- [5] 罗浩. 公路曲线连续梁桥车桥耦合振动响应研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2021.
- [6] 王光庆, 杨斌强, 徐文潭, 等. 非线性宽频压电振动能量采集器的研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1): 221-230.
- WANG Guangqing, YANG Binqiang, XU Wentan, et al. Research on nonlinear broadband piezoelectric vibration energy collector[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(1): 221-230.
- [7] CAO D, GAO Y. Free vibration of non-uniform axially functionally graded beams using the asymptotic development method[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2019, 40(1): 85-96.
- [8] 施海天, 魏莎, 丁虎, 等. Z型梁结构压电式能量采集性能分析[J]. 振动与冲击, 2022, 41(4): 93-100.
- SHI Haitian, WEI Sha, DING Hu, et al. Performance analysis of piezoelectric energy harvesting of a Z-shaped beam [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(4): 93-100.
- [9] 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 Xiaodong, ZHOU Gongbo. Study on power generation performance of piezoelectric energy harvester under intermediate beam fixed mode [J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(2): 404-414.
- [10] 贺学锋, 杜志刚, 赵兴强, 等. 悬臂梁式压电振动能量采集器的建模及实验验证[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1771-1778.
- HE Xuefeng, DU Zhigang, ZHAO Xingqiang, et al. Modeling and experimental verification for cantilevered piezoelectric vibration energy harvester [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(8): 1771-1778.
- [11] KLYUCHNYK I, BONDARENKO A, GALKIN P, et al. Response-time of pyroelectric detector simulator [C]// Sozopol: 2021 XXXI International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA), 2021: 1-5.
- [12] 李搏, 李健壮, 干旭春, 等. 一种系统级封装的ESD保护技术[J]. 微电子学, 2021, 51(2): 211-215.
- LI Bo, LI Jianzhuang, GAN Xuchun, et al. A kind of ESD protection technology using system in package [J]. Microelectronics, 2021, 51(2): 211-215.
- [13] 彭雄, 徐骅, 刘韬, 等. 射频电路ESD防护优化设计[J]. 微电子学, 2021, 51(3): 363-367.
- PENG Xiong, XU Hua, LIU Tao, et al. Optimization design of an ESD protection strategy in RF circuits [J]. Microelectronics, 2021, 51(3): 363-367.
- [14] 丁雨憧, 何杰, 陈哲明, 等. 硅基钽酸锂压电单晶复合薄膜材料及应用[J]. 压电与声光, 2023, 45(1): 66-71.
- DING Yuchong, HE Jie, CHEN Zheming, et al. Single-crystal LiTaO<sub>3</sub> composite film material on Si substrate and its application [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2023, 45(1): 66-71.

(上接第258页)