

压电阵列双相能量收集器的有限元分析模型^{*}

师 阳^{1,2}, 李 妮^{1,2}, 李 勇^{1,2}, 杨 勇^{1,2}

(1. 西安电子科技大学机电工程学院, 陕西 西安 710071;

2. 西安电子科技大学应用力学研究中心, 陕西 西安 710071)

摘 要:文中基于压电阵列双相能量收集器的压电效应和磁-力-电耦合效应,提出了一种宽频的能量收集结构。该结构可同时俘获环境中广泛存在的机械振动和磁场能量,从而实现低功耗电子设备的自供电。利用有限元软件COMSOL建立了压电阵列双相能量收集器的几何模型并进行数值仿真,分析了不同载荷以及组份材料参数对俘能器性能的影响。研究表明,压电阵列双相能量收集器能同时有效地收集机械振动和磁场能量,且各单元串联时可提高输出电压幅值、拓宽共振频带。通过调节材料参数,可以灵活调节俘能器的谐振频率,从而获得最佳电能输出。文中的仿真结果为高性能俘能器的设计提供了一定的理论指导。

关键词:压电阵列;磁-力-电耦合;能量收集;宽频带

中图分类号:TM619 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-5300(2021)02-0050-05

Finite Element Analytical Model of Piezoelectric Array Dual-phase Energy Harvester

SHI Yang^{1,2}, LI Ni^{1,2}, LI Yong^{1,2}, YANG Yong^{1,2}

(1. School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. Research Center for Applied Mechanics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: This paper presents a broadband energy harvesting structure based on the piezoelectric effect and the magneto-elastic-electric coupling effect of piezoelectric array dual-phase energy harvester, which can be used to simultaneously capture mechanical and magnetic energy distributed extensively in the environment, so as to realize the self-powering for low-power electric devices. The geometric model of the energy harvester is established and the numerical simulation is carried out by using the finite element software COMSOL, and the influences of different loadings as well as component material parameters on the energy harvester are analyzed. It is demonstrated that the piezoelectric array dual-phase energy harvester can simultaneously and effectively harvest both mechanical energy and magnetic energy. The amplitude of output voltage is enhanced, and a wider resonance bandwidth is achieved when the collecting piezoelectric units are connected in series. The resonance frequency of the harvester can be tuned flexibly by altering the component material parameters. Consequently, the optimal output power can be obtained. The simulation results of this paper provide a theoretical guidance for designing high-performance energy harvesters.

Key words: piezoelectric array; magneto-elastic-electric coupling; energy harvesting; wide bandwidth

引 言

近年来,从振动、太阳能、风能、热能、磁能等环境中俘获能量已经成为一种低功耗电子设备自主供电技术^[1]。其中,振动和磁场在自然界中普遍存在,比如汽车通过路面和桥梁时产生的振动,机载雷达因桨叶旋转产生的振动^[2],大多数无线传感器网络、家用电器、电力传输电缆等附近存在的低频磁场。基于压电

效应^[3]或磁-力-电耦合效应,可将机械振动能或磁能转换为电能。

线性压电悬臂梁因其结构简单、输出能量密度高、易于实现微型化而被广泛应用于能量俘获器的设计。文献[4]提出并制备了共质量块的悬臂梁阵列压电振动能量收集器结构,并对其进行了优化设计;文献[5]提出分段式压电悬臂梁俘能器,提高了输出电压幅值。

^{*} 收稿日期:2020-11-23

为了同时收集多方向的振动能,文献[6]提出了蒲公英型多方向压电振动能量采集器,能够有效采集空间环境中各个方向的机械振动能;文献[7-8]对多方向微压电俘能器进行改进,给出了振动能量收集装置输出电压与各因素之间的关系,使其结构具有可更换性。文献[9]提出一种U型三向压电能量采集装置,可从3个正交方向采集振动能量。以上研究通过结构优化设计提高了俘能效率,但所采用结构仅限于收集振动能量,且共振频带较窄。实际应用中,只有当外载频率接近结构固有频率,才能引发机械共振,进而产生显著的转换效率。一旦外载频率偏离结构固有频率,其输出电能就会急剧减小。在磁能收集方面,文献[10]利用永磁体实现磁-电转化,为磁电能量收集提供了新思路;文献[11]制备了一种由长方体粘结的四面磁电复合材料,并研究了不同电路连接模式对磁电系数的影响,不仅改善了磁电效应,还缩小了结构体积;文献[12]发现引入功能梯度材料可显著增强磁-机-电耦合,并获得较宽的共振频带;文献[13]利用压电长纤维复合材料/磁致伸缩多层复合材料从磁-力-电能量收集器中获取磁场能量。针对现有俘能器工作方式单一的缺陷,文献[14]仿真研究了一种机械/磁双能收集器的磁电特性,促进了低频双能收集器的设计和研发。一般来讲,环境中的振动和磁场呈现出低频(0 ~ 100 Hz)和频率随机分布的特点。由于振动和磁场的频率随机性,传统俘能结构尽管具有低响应频率,但也受限于较窄的共振频带,在信号频率发生波动后性能会急速下降,因而失去应用价值。为此,开发宽频带多能俘获技术显得尤为重要。从理论角度出发,研究结构构型和材料参数等对俘能器共振响应的影响,提出调控结构共振频率的有效方法,将会成为研发新型能量收集装置的关键环节之一。

本文提出一种压电阵列式振动/磁场双相能量俘获装置,利用有限元软件对其输出电压和功率进行了分析。结果表明,压电阵列双相能量收集器的串联结构可以有效提高输出电能、拓宽共振频带;同时,通过调节永磁体的位置,可以方便地调控输出电能的大小,为实现低功耗电子设备自供电提供了一定的理论指导。

1 有限元模型

图1为本文提出的压电阵列双相能量收集器的结构示意图。该结构由 m 个压电悬臂梁单元组成,各单元之间存在适当的间距,以保证共振响应时互不干扰。压电悬臂梁单元由中间的弹性基体层和粘接在其上下

表面的压电片组成。梁的一端固定,一端放置永磁体。当每个压电悬臂梁单元单独工作时,压电材料的两个电极输出端连接外电阻,形成闭合电路;当各压电悬臂梁单元同时工作时,将它们串联在一起,再外接电阻,形成闭合电路。建立如图1中所示的坐标系, x 、 y 和 z 分别表示结构的长度、宽度和厚度方向。压电材料沿厚度方向极化,永磁体沿厚度方向磁化。当压电阵列或压电悬臂梁单元受到横向振动作用时,由于压电效应产生感应电压,实现机电转换;当压电阵列或压电悬臂梁单元受到纵向交流磁场 H_{ac} 作用时,位于压电悬臂梁自由端的永磁体会产生扭矩,导致悬臂梁产生弯曲振动,将环境磁能转换为机械能,进而输出电压。压电悬臂梁单元的压电材料、弹性基体和永磁体的厚度分别表示为 t_p 、 t_e 和 t_m 。第 j 个悬臂梁单元的长度记为 l_j 。

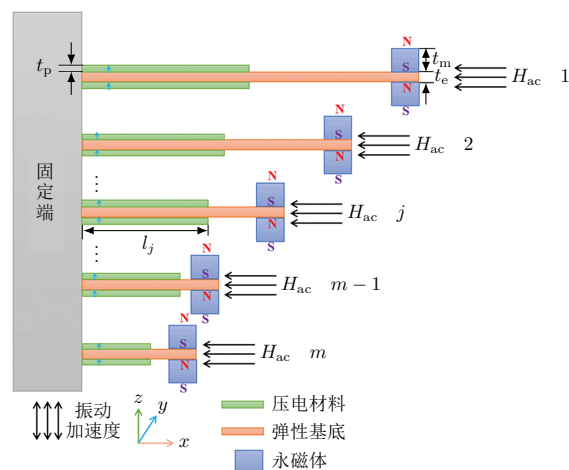


图1 压电阵列双相能量收集器结构示意图

1.1 基本方程

图1所示的压电阵列双相能量收集器的力学控制方程可表示为:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + \alpha \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \text{div} \left(\mathbf{s} + \beta \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial t} \right) + \mathbf{F}_v + \mathbf{F}_m \quad (1)$$

式中: $\mathbf{u}$ 和 $\mathbf{s}$ 分别为位移张量和应力张量; t 为时间; α 和 β 分别为质量阻尼系数和刚度阻尼系数; ρ 为等效密度; $\mathbf{F}_v$ 和 $\mathbf{F}_m$ 分别为施加在结构上的体载荷和磁力;“div”表示散度。

根据电荷守恒,系统的电学控制方程表示如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= -\text{grad } V \\ \text{div } \mathbf{D} &= \rho_v \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ρ_v 、 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{D}$ 和 V 分别为压电材料的电荷密度、电场矢量、电位移矢量和电势;“grad”表示梯度。

在微振动和弱磁场环境中,压电材料满足线性压电本构方程,即:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{S} &= \boldsymbol{s}_E \boldsymbol{T} + \boldsymbol{d}^T \boldsymbol{E} \\ \boldsymbol{D} &= \boldsymbol{d} \boldsymbol{T} + \boldsymbol{\varepsilon}_T \boldsymbol{E} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\boldsymbol{T}$ 和 $\boldsymbol{S}$ 分别为应力和应变; $\boldsymbol{s}_E$ 和 $\boldsymbol{\varepsilon}_T$ 分别为弹性柔顺系数矩阵和介电系数矩阵; $\boldsymbol{d}$ 为压电系数矩阵。

1.2 载荷计算

在有限元分析中,结构所受到的振动激励通过施加载荷 $\boldsymbol{F}_v$ 来实现,其大小计算如下:

$$|\boldsymbol{F}_v| = \eta g \rho V_{\text{tot}} \quad (4)$$

式中, η 为振动加速度系数; g 为重力加速度; V_{tot} 为总体积。

图1所示结构自由端的永磁体在交流磁场作用下会产生磁力矩,力矩大小可以通过磁场模块单独计算^[15]。从有限元分析角度来看,直接进行磁场建模相当于增加了一个新的耦合物理场,会加大计算量和有限元分析的难度。因此为了保证有限元求解的精度和效率,采用以下公式计算永磁体所受的磁力矩 T' 来等效代替磁场建模,即:

$$T' = |\boldsymbol{M} \boldsymbol{V}_m \times \boldsymbol{B}_e| = \frac{B_r}{\mu_0} V_m (\mu_0 H_{ac}) \quad (5)$$

式中: $\boldsymbol{M}$ 为磁化强度; V_m 为永磁体的体积; $\boldsymbol{B}_e$ 为磁感应强度; B_r 为剩余磁通密度; μ_0 为真空磁导率。

在有限元计算中,横向磁场作用下结构所受的磁力矩可以等效为分别作用在最上端永磁体上表面和最下端永磁体下表面的一对等大、反向且沿纵向的作用力,其大小可以表示为:

$$|\boldsymbol{F}_m| = \frac{T'}{n t_m} \quad (6)$$

式中, n 为永磁体个数。

1.3 有限元分析

采用COMSOL软件中的静电、固体力学、电路及磁场等多个模块对压电阵列双相能量收集器进行有限元建模。软件中的“压电”多物理场接口结合了“静电”和“固体力学”模块,单独添加“电路”模块,通过在“静电”模块设置终端实现场路耦合。通过固体力学、静电和电路模块收集振动能,磁能则通过磁场模块和其他3个模块收集。系统的俘能性能最终通过计算场路耦合中外接电阻的功率和电压值来衡量。划分网格时,对压电材料和弹性基底材料采用加密的自由三角形网格剖分,以确保计算的精度,对剩余几何采用常规网格大小进行剖分,以提高计算效率。本文共创建了6148个三角形单元,平均单元质量为0.7601。在约束条件方面,对模型左端施加固定约束,体载荷 $\boldsymbol{F}_v$ 施加在所有域上,而磁力 $\boldsymbol{F}_m$ 只作用在永磁体边界上(如1.2节所述)。计算中取梁1的长度 l_1 为64 mm,其他梁的长度以梯度 $\Delta l = 1$ mm依次递减,即 $l_{j+1} = l_j - \Delta l$ ($j = 1, \dots, m$)。主要材料参数见表1。

表1 有限元仿真材料参数

材料	长×宽×厚/mm	密度/(kg·m ⁻³)	杨氏模量/GPa	泊松比	磁化强度/T
铝	64×25×0.3	2700	70	0.33	—
PZT-5	30×25×0.2	7500	—	—	—
永磁体	9×25×20	7850	200	0.30	1.1

2 结果分析和讨论

2.1 模态分析

研究中所取的尺寸梯度 Δl 相对梁的长度 l_j 很小(约为1.5%),每个梁单元的其他材料参数相同,因此各个单元的固有频率相差不大。此处取梁1为代表,其1阶和2阶模态分析如图2所示。由图可知,压电梁单元的1阶和2阶机械共振分别在14 Hz和55 Hz左右出现。在共振频率下,结构发生了十分显著的变形。

图3为单个压电梁单元和串联的压电阵列的输出电压随外激励频率的变化,此时磁场大小和振动加速度系数分别设置为31.83 A/m和0.03。在频率为

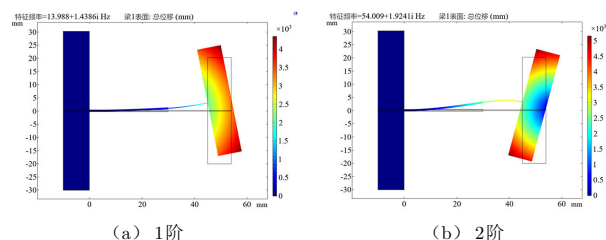


图2 单个梁单元的1阶和2阶模态示意图

0 ~ 80 Hz的范围内,单个梁均出现2次共振,共振频率大小与图2中模态分析结果一致,表明在机械共振响应时电压能够得到极大提高。在1阶和2阶共振频率下,输出的电压分别达到约5.8 V和1.6 V。由3个梁

串联组成压电阵列后,结构的共振频率较单个梁单元并没有发生明显变化,但输出电压却为单个梁在对应共振频率下输出电压的近似叠加,说明串联的压电阵列可以有效提高输出电压。更重要的是,相对于单个梁,压电阵列的响应频率范围明显拓宽。对于单个梁,1阶共振频率附近产生高达5.8 V的电压,但外载频率稍偏离共振频率值后,电压值将迅速减小。例如,当外载频率等于10 Hz或19 Hz时,电压值降低为1.86 V,减小了近3倍。而对于串联结构,在1阶共振频率处,最高电压可达16.8 V,即使外载频率值等于10 Hz或19 Hz,其电压值仍和单个梁的最大电压值相当。这一结果充分表明,串联结构在提高性能和拓宽响应频率范围方面都具有明显的优势。因此,下面将以串联压电阵列为研究对象,继续探究不同激励、材料参数以及负载电阻对输出电压和能量的影响。

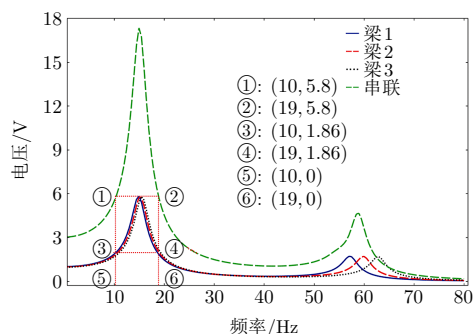


图3 单个压电梁与压电阵列的输出电压频率响应图

2.2 不同激励分析

图4为不同形式激励下压电阵列双相能量收集器的输出电压随频率的变化曲线。在0~80 Hz频率范围内,结构受到单独振动、单独磁场以及二者同时作用时均出现2次共振,且相同阶数的共振频率相等。具体来讲,单独受振动作用时,1阶共振频率下的电压值明显大于2阶,而单独受磁场作用时2阶共振频率下的电压值要高于1阶。这是由于在横向振动作用下,结构更容易发生弯曲共振,即1阶共振;而在水平磁场作用下,容易产生纵向振动,从而引起显著的纵向共振。在1阶(弯曲)共振频率附近,双重激励作用时的电压值为单独激励作用时的叠加,表明压电阵列双相能量收集器在弯曲振动模式下能够同时有效地收集振动和磁场信号。然而,当频率增加到35 Hz左右时,双重激励作用时的电压值反而小于单独磁场作用时;当频率接近2阶共振频率时,双重激励作用时的电压值约等于单独磁场和单独振动作用时的电压差。这一现象可解释为:不同激励的作用位置不同,产生的信号在介质中传播时产生了一定的相位差,随着频率增加,相位差

的影响被逐渐放大;当频率接近2阶共振频率时,刚好产生了接近90°的相位差,使得两种信号方向相反,输出的总信号等于两者之差。因此,本文所提出的压电阵列双相能量收集器的理想工作模态应该是弯曲共振模态,即使结构的弯曲共振频率尽可能接近外界激励的频率,从而诱发显著的力-电耦合和磁-电耦合,并使两种效应所诱导的电压产生叠加效应。如果要在2阶共振频率附近获得输出电压的叠加效应,则需通过设计一定的移相电路来消除相位差。

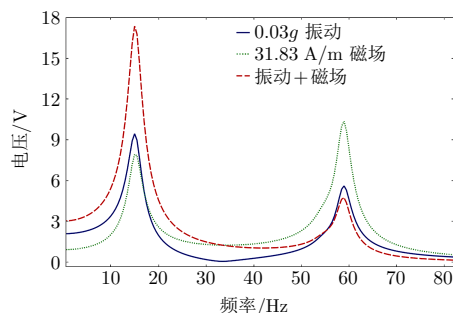


图4 压电阵列双相能量收集器在不同激励下的频响特性

2.3 材料参数对俘能器性能的影响

实际环境中振动和磁场的频域能量杂乱无章,固定几何尺寸和材料参数的结构的弯曲共振频率为常数,很难与环境信号频率相匹配。为此,需要进一步探索频率调控手段。图5给出了永磁体距离悬臂梁固定端的位置 Δd 对俘能器电压-频率曲线的影响。随着永磁体向梁的自由端移动,输出电压和1阶共振频率均减小。电压的峰值和共振频率随永磁体位置的变化曲线如图6所示,两者均随着 Δd 的增大而呈现出近似线性减小的规律。这种良好的线性关系为频率调控带来了很大便利。除此之外,增加永磁体个数一方面会增大结构的等效质量,因而降低共振频率;另一方面会增加磁力矩,产生更强的磁电耦合和输出电压。因此,在选定组份材料和结构尺寸的前提下,可以通过调整永磁体的位置和个数来实现对压电阵列俘能器共振频率的调控,使其与环境信号频率相匹配。

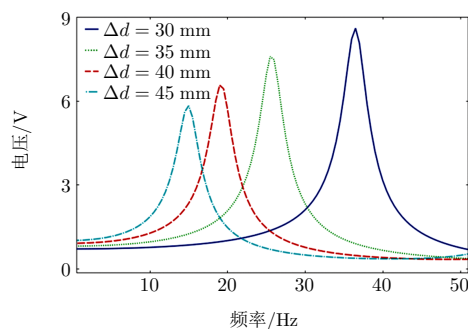


图5 永磁体的位置对俘能器性能的影响

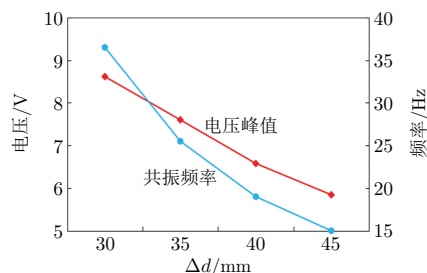


图6 电压峰值和共振频率随永磁体位置 Δd 的变化

图7给出了不同负载电阻对俘能器输出功率的影响,此时的外激励频率固定为1阶共振频率值。从图中可以看出,负载阻值从0 k Ω 变化到400 k Ω 的过程中,输出电压逐渐增大直到饱和,功率则先增大后减小,最优阻值为50 k Ω 。实际上,负载电阻与压电阵列内部阻抗相匹配时,系统的输出功率达到最大值。此外,单个梁的功率幅值相差不大,但串联之后其输出功率幅值显著提高,且最优阻值未发生变化。如:最优电阻下,单个压电梁单元的输出功率为0.14 mW,而压电阵列的输出功率可达0.3 mW。这一结果进一步表明,采用串联的压电阵列有利于提高俘能效率。

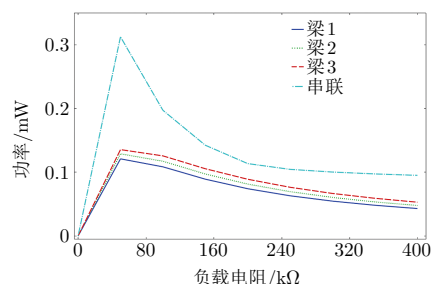


图7 不同负载电阻对俘能器输出功率的影响

3 结束语

本文提出一种压电阵列双相能量收集器,通过引入永磁体使得结构既能俘获横向振动也能收集纵向磁能,提高了器件工作效率。利用有限元软件COMSOL对压电阵列双相能量收集器性能进行了仿真研究。结果表明,串联的压电阵列能够在提高系统输出电压的同时拓宽共振频带。利用永磁体的位置及负载电阻等关键参数对能量俘获系统性能的影响规律,提出了频率调控以及性能优化的若干建议。本文仿真模型得到的数值结果可为俘能器在小型设备自供电领域的应用提供一定的理论指导。

参考文献

[1] 陈仲生. 压电式振动能量俘获理论与方法[M]. 北京:国防工业出版社, 2017.

- [2] 于浚峰. 直升机载雷达动力学分析及振动抑制方法研究[J]. 电子机械工程, 2019, 35(4): 1-6.
- [3] 杨辰烨, 雷静桃. 阿基米德曲线形双晶压电执行器的设计与分析[J]. 电子机械工程, 2020, 36(2): 1-4.
- [4] SHE Y, WEN Z Y, ZHAO X Q, et al. The MEMS vibration energy harvester with piezoelectric array [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014, 27(8): 1033-1037.
- [5] LEE S, YOUN B D, JUNG B C. Robust segment-type energy harvester and its application to a wireless sensor [J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(9): 1-12.
- [6] CHEN R, REN L, XIA H, et al. Energy harvesting performance of a dandelion like multi-directional piezoelectric vibration energy harvester [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015(230): 1-8.
- [7] 张旭辉, 林然. 全方向振动能量收集系统[J]. 工矿自动化, 2015, 41(1): 84-87.
- [8] 张旭辉, 吴中华, 邓鹏飞, 等. 可更换式多方向振动能量收集装置优化研究[J]. 压电与声光, 2017, 39(4): 594-598.
- [9] SU W J, ZU J. An innovative tri-directional broadband piezoelectric energy harvester [J]. Applied Physics Letters, 2013(103): 1-4.
- [10] XING Z P, LI J F, VIEHLAND D. Giant magneto-electric effect in Pb(Zr,Ti)O₃-bimorph/NdFeB laminate device[J]. Applied Physics Letters, 2008(93): 1-2.
- [11] ZUO Z J, PAN D A, LU J, et al. Multiplied magneto-electric effect in multifaceted magnetoelectric composite [J]. Applied Physics Letters, 2014(104): 1-3.
- [12] SHI Y, YAO H, GAO Y W. A functionally graded composite cantilever to harvest energy from magnetic field[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017(693): 989-999.
- [13] KANG M G, SRIRAMDAS R, LEE H, et al. High power magnetic field energy harvesting through amplified magneto-mechanical vibration [J]. Advanced Energy Materials, 2018, 8(16): 1-11.
- [14] 韩建, 张舜祖, 高原文. 机械/磁双能收集器磁-力-电行为的有限元分析模型[J]. 兰州大学学报, 2020, 56(3): 371-379.
- [15] FERNANDES E, MARTIN B, RUA I, et al. Design, fabrication, and testing of a low frequency MEMS piezoelectromagnetic energy harvester [J]. Smart Materials and Structures, 2018, 27(3): 1-15.

师 阳 男, 1988年生, 博士, 主要研究方向为智能材料与结构。

杨 勇 男, 1977年生, 副教授, 主要研究方向为电磁固体力学。