

压电悬臂梁俘能器输出特性仿真分析

孙凯利,王海峰,李蒙,崔宜梁

(青岛大学机电工程学院,山东青岛266071)

摘要:为了研究压电俘能器的振动频率、内阻抗、负载及输出功率之间的耦合关系,基于ANSYS APDL软件,对单、双晶串联、双晶并联等多种不同配置方式的压电悬臂梁俘能器进行了压电-电路耦合分析。研究表明,俘能器内阻抗随振动频率呈现非线性变化,在短路谐振频率处达到最小值,在开路谐振处达到最大值;俘能器内、外阻抗匹配时,俘能器输出功率达到最优值;俘能器阻尼较小时,最优输出功率出现在短路谐振与开路谐振处,随着阻尼比逐渐增加,最优输出功率出现在两者之间,且只有一个峰值。

关键词:压电俘能;谐波响应分析;阻抗匹配;压电悬臂梁;输出功率

中图分类号:TN384;TM22

文献标识码:A

DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.04.018

Simulation Analysis of Output Characteristics of Piezoelectric Cantilever Beams Harvester

SUN Kaili, WANG Haifeng, LI Meng, CUI Yiliang

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: In order to study the coupling relationship among the vibration frequency, the internal impedance, the load and the output power of the piezoelectric energy harvester, the piezoelectric-circuit coupling analysis of the piezoelectric energy harvesters with different configurations of single crystal series, double crystal series, double crystal parallel is carried out based on ANSYS APDL software. The results show that the impedance of the energy harvester exhibits a non-linear change with the vibration frequency, which reaches the minimum value at short-circuit resonant frequency and reaches the maximum value at open-circuit resonance. The output power of the energy harvester reaches the optimal value when the internal and external impedances match. When the damping ratio of the energy harvester is relatively small, the optimal output power appears at short-circuit resonant and open-circuit resonance. As the damping ratio gradually increases, the optimal output power occurs between short-circuit resonant and open-circuit resonance, and there is only one peak.

Key words: piezoelectric energy harvesting; harmonic response analysis; impedance matching; piezoelectric cantilever beam; output power

0 引言

随着无线传感器、无线网络及各种微型低功耗器件的发展,传统化学电池因其体积大,使用寿命短,反复拆卸等弊端已无法满足工程需求,利用太阳能、机械振动能、温差能等可再生能源代替传统化学电池成为近几年研究的热点^[1]。与太阳能、温差能等环境能量相比,机械振动不受光照时间与温度的影响,可持续稳定地从周围环境中获取能量,有较好的应用前景。获取振动能量的方式主要包括压电

式^[2-3]、电磁式^[4]、静电式^[5]。相比于后两种方式,利用压电材料的压电式振动能量收集方式能量密度大,受电磁干扰较小,更具稳定性。对压电俘能器的研究主要有两种:

1) 将压电俘能器看作电学开路,不考虑负载对俘能器的作用^[6]。

2) Roundy S等^[7]提出等效电路法将压电俘能器等效为电压源或电流源,不考虑俘能器的机械特性。

收稿日期:2017-10-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51405255);山东省高等学校科技计划资助项目(J12LN95);山东省科技发展计划——政策引导类资助项目(2012YD04038)

作者简介:孙凯利(1995-),男,山东潍坊人,硕士生,主要从事压电能量收集,能量收集电路等研究。通信作者:王海峰(1979-),男,山东临沂人,副教授,博士,主要从事机电一体化系统设计,计算流体力学分析的研究。

但压电俘能器具有机电耦合特性, 本身与负载会有相互影响。Zhu 等^[8]、朱宪荣等^[9]利用 ANSYS 仿真软件采用有限元法, 将俘能器与负载进行耦合分析, 为压电俘能器的输出特性研究提供了新的思路。本文基于 Zhu 等^[8]的理论, 以单—晶体、双晶串联、双晶并联等多种不同配置下的悬臂梁式俘能器作为研究对象, 对振动频率、负载、阻尼比等多个影响俘能器输出特性的因素进行仿真分析, 为确定不同工作环境下俘能器的最优输出功率提供依据。

1 压电俘能器结构及理论模型

如图 1 所示, 根据配置压电片时极化方向的不同, 双晶压电悬臂梁有串联与并联之分; 根据配置压电片时的数量, 压电悬臂梁有单晶体与多晶体之分。由于压电效应, 悬臂梁受外部振动激励产生拉压应变时, 压电体表面形成电荷, 从而形成电势差, 当压电体上、下表面的电极接上外负载会产生压电电流。与双晶梁相比, 单晶悬臂梁配置为上下非对称结构, 因此, 悬臂梁发生形变时, 梁的形变中心层与压电体的中间层并非同一层。

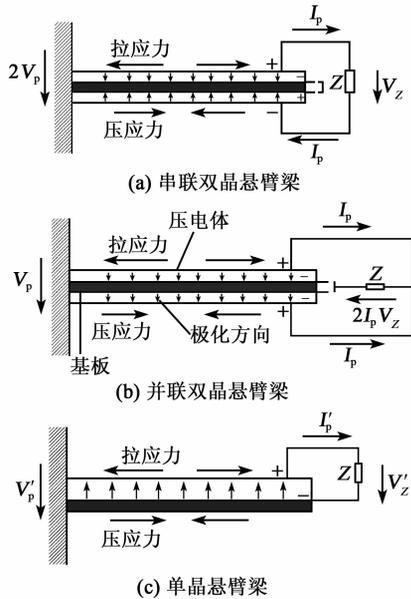


图 1 压电悬臂梁外接负载结构示意图

压电俘能器的控制方程为

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) - \Theta V_p(t) \quad (1)$$

$$\Theta x(t) - C_p V_p(t) = Q_p(t) \quad (2)$$

式中: M 、 K 、 C 分别为俘能器的等效质量、等效刚度、等效阻尼; Θ 为机电耦合系数; C_p 为俘能器电容; V_p 为俘能器输出电压; Q_p 为俘能器产生的电荷量; F 为外部振动激励; x 为俘能器的位移。

接外负载时, 俘能器的电压、电流输出方程为

$$V_p(t) = V_Z(t) = I_Z(t)Z \quad (3)$$

$$I_Z(t) = \omega Q_p(t) \quad (4)$$

式中: V_Z 为两端负载电压; I_Z 为流经负载的电流; ω 为振动角频率; Z 为俘能器外负载。综合式 (1)~(4) 可看出, 俘能器外接负载的电学特性会影响俘能器本身的机械特性, 外负载与俘能器之间有较强的耦合特性。

压电俘能器的输出功率与负载有关, 当负载阻抗与内阻抗匹配时, 输出功率达到最大值, 其输出功率为

$$P = V^2 \left| \frac{Z}{(Z_0 + Z)^2} \right| \quad (5)$$

式中 Z_0 为俘能器内阻抗, 由等效内阻 R 与容抗 R_{C_0} 组成。因为 $R \ll R_{C_0}$, 故

$$Z_0 \approx R_{C_0} = \frac{1}{\omega C_p} = \frac{1}{2\pi f C_p} \quad (6)$$

式中 f 为俘能器振动频率。因此, 压电俘能器输出功率不仅与外负载有关, 还与俘能器的振动频率有关。

2 有限元模型

采用 ANSYS APDL 软件对带外负载的压电俘能器进行压电-电路耦合分析。悬臂梁有限元模型如图 2 所示, 悬臂梁上、下两极板电压耦合后引出电极与外负载相连, 其中俘能器的压电体由 SOLID226 构成、基板由 SOLID5 单元构成、外负载由 CIRC94 单元构成。SOLID226、SOLID5 单元支持力学与电学两种自由度, CIRC94 单元支持电学自由度, 将 SOLID5 单元的电学自由度抑制作为普通机械结构单元, SOLID226、CIRC94 两单元的电学载荷可以自由传递, 俘能器的电压、电流、电荷、功率均可通过 CIRC94 单元提取^[10]。压电俘能器材料等参数如表 1 所示。PZT-5H 相对介电常数矩阵 ϵ_r 、压电常数矩阵 e 和压电弹性系数矩阵 c 分别为

$$\epsilon_r = \begin{bmatrix} 804.6 & 0 & 0 \\ 0 & 804.6 & 0 \\ 0 & 0 & 659.7 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & 14.1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10.5 & 0 \\ 10.5 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{C/m}^2) \quad (8)$$

$$c = \begin{bmatrix} 13.2 & 7.1 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ 7.1 & 13.2 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ 7.3 & 7.3 & 11.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6 \end{bmatrix} \times 10^{10} \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (9)$$

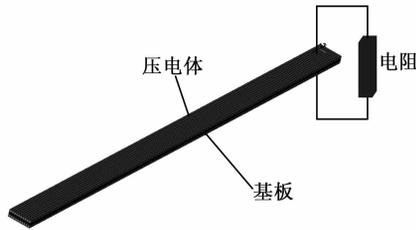


图2 串联双晶悬臂梁有限元模型

表1 俘能器相关参数

参数	PZT-5H	基板(磷青铜)
密度/(kg·m ⁻³)	7 800	8 920
弹性模量/GPa	56	113
泊松比	0.30	0.35
单晶:长×宽×高/mm	100×5×1	100×5×0.5
双晶:长×宽×高/mm	100×5×0.5	100×5×0.5
阻尼比	0.02	0.02

3 仿真分析

根据压电俘能器接外负载不同,有电学短路与电学开路两种电学边界条件。将俘能器一端固定,自由端施加法向垂直力 0.01 N,对俘能器进行谐响应分析,如图 3 所示。由图可看出,串、并联俘能器的短路谐振频率为 78.25 Hz,开路谐振频率为 80.5 Hz;单晶悬臂梁的短路谐振频率为 85.25 Hz,开路谐振频率为 85.75 Hz。另外,串联双晶悬臂梁的输出电流是并联双晶悬臂梁的 2 倍,输出电压是后者的 1/2。

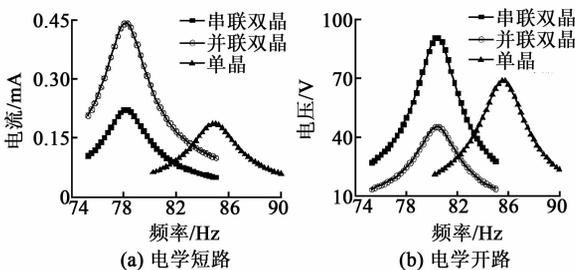


图3 不同电学边界条件下的俘能器输出特性谐响应分析

为进一步探究负载对俘能器谐振频率的影响,分别选取 10 kΩ、200 kΩ、500 kΩ、800 kΩ、5 MΩ 等不同负载进行谐响应分析,分析结果如图 4 所示。由图可见,随着负载的增加,俘能器的谐振频率逐渐从短路谐振过渡到开路谐振,最大输出功率有一个先增加后减少的过程。图 5 为俘能器负载与谐振频率的关系。由图可见,外负载使俘能器谐振频率的变化范围在俘能器的短路谐振与开路谐振之间。

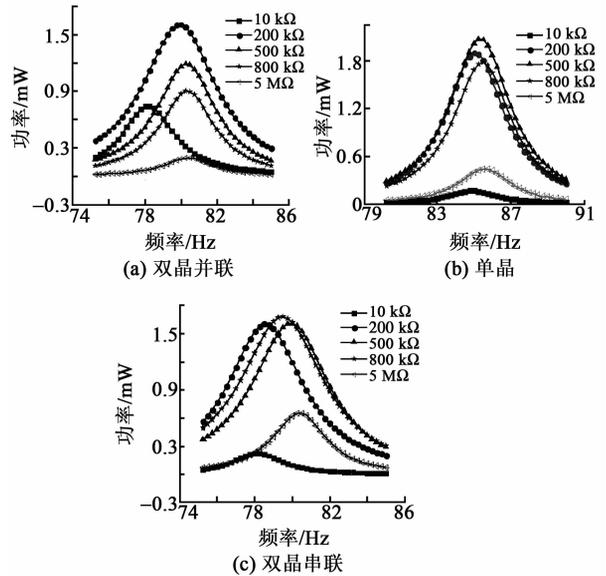


图4 不同负载下俘能器输出功率随频率的变化

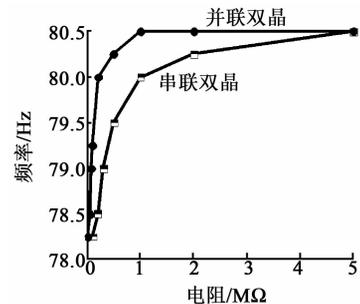


图5 谐振频率随负载的变化

悬臂梁俘能器的电容随振动频率的变化而变化,因而内阻抗也会随之变化。为求得压电俘能器内阻抗与振动频率的关系,由

$$C_p = \frac{Q}{V} \quad (10)$$

可知,首先对悬臂梁俘能器输入 1 V 的电压,进行谐响应分析,这时从 CIRC94 单元提取的电荷量数值与压电俘能器的电容数值相等。之后由式(6)可求出压电俘能器的阻抗,结果如图 6 所示。

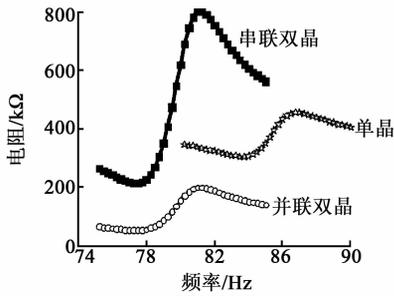


图6 俘能器阻抗随频率变化

由图6可知,悬臂梁俘能器的内阻抗并不是线性变化,其在短路谐振处达到最小值,在开路谐振处达到最大值,串联双晶俘能器的内阻抗是并联形式下的4倍。单晶悬臂梁俘能器因非对称配置,内阻抗随频率的变化向高频偏移,但整体趋势不变。

不同阻尼比(ζ)下,随频率变化的输出功率如图7所示。当阻尼比较小时,最优功率会在短路谐振与开路谐振处出现峰值,随着阻尼比增加,最优功率的峰值变为一个且位于短路谐振与开路谐振中间。

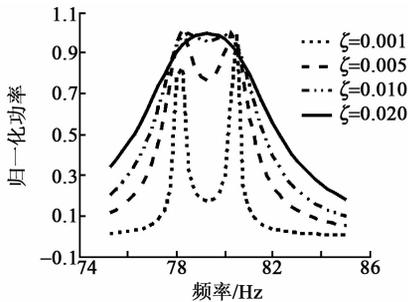


图7 不同阻尼比下,最优功率随频率的变化

4 结束语

压电俘能器作为一机电耦合系统,最优输出功率受多种因素影响,需综合考虑外界振动频率、负载、俘能器本身材料等多种因素的相互作用。为保持俘能器最大输出功率,环境振动频率应在俘能器的短路谐振频率与开路谐振频率之间。俘能器内阻抗受振动频率的影响,而外负载影响俘能器的谐振频率。在实验研究过程中,难以找到俘能器实现阻抗匹配的与外部环境产生谐振的契合点。基于ANSYS仿真软件,进行压电-电路耦合分析,能够在短时间内分析多组数据,为实验研究提供一定依据。经分析,悬臂梁俘能器输出功率达到毫瓦级,满足低功耗器件的正常工作需求。

参考文献:

- [1] 汪红兵,孙春华.一种冲击式悬臂梁压电俘能器的设计与实验[J].压电与声光,2017,39(3):426-429.
WANG Hongbing, SUN Chunhua. Design and experiment on an impact cantilever piezoelectric harvester [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2017, 39 (3): 426-429.
- [2] LIU J Q, MAO X H, MAO X H, et al. A MEMS-based piezoelectric power generator array for vibration energy harvesting[J]. Microelectronics Journal, 2008, 39(5):802-806.
- [3] 汪红兵,孙春华,李志荣.沥青路面内矩钹形压电俘能器性能仿真分析[J].压电与声光,2015,37(4):667-671.
WANG Hongbing, SUN Chunhua, LI Zhirong. Performance simulation analysis on a rectangle cymbal shaped piezoelectric energy harvester in asphalt pavement[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37 (4): 667-671.
- [4] SAHA C R, O'DONNELL T, LODER H, et al. Optimization of an electromagnetic energy harvesting device[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42 (10):3509-3511.
- [5] TORRES E O, RINCON-MORA G A. A 0.7 μm BiCMOS electrostatic energy-harvesting system IC [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2010, 45 (2): 483-496.
- [6] 房目稳.压电俘能器俘能性能数学建模及仿真分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [7] ROUNDY S, WRIGHT P K. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics[J]. Smart Materials & Structures, 2004, 13(5):1131-1142.
- [8] ZHU M, WORTHINGTON E, NJUGUNA J. Analyses of power output of piezoelectric energy-harvesting devices directly connected to a load resistor using a coupled piezoelectric-circuit finite element method[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2009, 56(7):1309-1317.
- [9] 朱宪荣,王红艳,徐蕾.压电俘能器阻抗匹配分析及实验研究[J].压电与声光,2011,33(6):919-922.
ZHU Xianrong, WANG Hongyan, XU Lei. Analysis and experiment on impedance match of piezoelectric energy harvester[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(6):919-922.
- [10] 胡仁喜,闫波,康士廷. ANSYS 15.0多物理耦合场有限元分析从入门到精通[M]. 3版.北京:机械工业出版社,2015.