

多悬臂梁压电振子频率分析及发电实验研究

谢涛, 袁江波, 单小彪, 陈维山

(哈尔滨工业大学机电工程学院, 150001, 哈尔滨)

摘要: 为了提高悬臂梁压电振子的发电能力,设计并制作了多悬臂梁压电振子,采用有限元方法对多悬臂梁压电振子的有效工作频率进行了仿真分析,并且进行了实验验证.在此基础上,对多悬臂梁压电发电装置进行了压电发电实验测试.研究表明,多悬臂梁压电振子工作的谐振频率范围为56~65 Hz,与实验结果基本吻合.相比于单悬臂梁压电振子,多悬臂梁压电振子能有效地拓宽其谐振频带并提高压电发电能力.当多悬臂梁压电振子外接负载为820 Ω 、工作频率为60 Hz时,多悬臂梁压电发电装置的最大输出功率达到4.9 mW,产生的能量能够满足网络传感器等低耗电电子产品的供能需求.

关键词: 多悬臂梁压电振子;发电;有限元分析

中图分类号: TM619 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)02-0098-04

Frequency Analysis and Electricity Generated by Multiple Piezoelectric Cantilevers in Energy Harvesting

XIE Tao, YUAN Jiangbo, SHAN Xiaobiao, CHEN Weishan

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To improve the performance of the piezoelectric cantilever in energy harvesting, multiple piezoelectric cantilevers (PECS) were manufactured. The resonance frequency of PECS was analyzed by FEM and tested by experiments. It is found that the calculated results are in good agreement with the experimental results. Compared with a single piezoelectric cantilever, the PECS can effectively increase the band of resonance frequency. A maximal output power of 4.9 mW can be obtained from the PECS at 60 Hz across a resistive load of 820 Ω , which is enough for some wireless communication systems.

Keywords: multiple piezoelectric cantilevers; electrical energy generation; finite element analysis

随着无线网络、MEMS和便携式电子设备的应用日益广泛,使用化学电池供能的方式存在诸多弊端,如体积大、质量大、供能寿命有限、需要定期更换,以及由此所带来的材料浪费、环境污染等问题.尤其对于目前发展日益迅速的无线网络和嵌入式系统来说时,电池供电的这种缺陷更加明显.在一些特殊场合,如人体、易燃易爆和战场等,电池更换变得极为不便甚至不可能,这些都严重限制了微电子器件的使用.因此,如何为这些低耗能的微电子产品供能,已成为迫切需要解决的问题^[1-6].利用压电材料

的正压电效应,通过俘获环境中的振动能并转化为电能进而为微电子器件进行供能,引起了研究人员广泛的关注,并成为当前国际研究的一个热点问题^[5-9].

由于悬臂梁压电振子振动频率低、能量转化效率高和易于集成化等优点备受关注.文献[1]通过理论建模对悬臂梁压电发电装置进行了结构优化研究,结果表明,通过增加梁末端质量和减少金属梁的厚度可以有效地降低压电振子的谐振频率,提高压电发电装置的能量转化效率.文献[9]对悬臂梁压电

振子进行了数学建模和数值模拟分析,得出了压电振子中压电晶体与金属基板的最佳厚度比,并分析了金属基板材料的弹性模量与最佳厚度比的关系,有利于压电振子的结构优化,提高压电振子的发电能力.上述研究都集中在单悬臂梁压电振子的压电发电研究,然而环境中的振动源振动频率往往不稳定,单悬臂梁对振动频率变化很敏感,不易实现与环境振动源振动频率的良好匹配,不能充分吸收环境中的振动能,这将导致压电发电装置的能量转化效率低下.

本文设计制作了多悬臂梁压电振子,通过将多个悬臂梁压电振子组成一个多压电振子振列,从而拓宽了压电振子的谐振频带,使压电振子在一段频率范围内都能产生谐振或者近似的谐振,进而对多悬臂梁压电振子的频带范围进行了有限元仿真分析和实验测试,最后对多悬臂梁压电发电装置进行了发电能力测试.

1 多悬臂梁压电振子结构及工作原理

由于环境中的振动源振动频率往往不稳定,对于单悬臂梁的压电振子不易实现与环境振动源振动频率的良好匹配,这将导致压电发电装置的能量转化效率低下.因此,需要研究多悬臂梁压电振子以拓宽压电振子的谐振频带,实现与振动环境的频率匹配,提高压电发电效率.图 1 给出多悬臂梁压电振子的结构示意图,它是由多个悬臂梁压电振子组成的一个压电振子振列.每个压电振子由金属悬臂梁、压电片和附加质量块组成,并将压电材料粘贴在金属悬臂梁的两面.由于每个压电振子都具有各自的谐振频率且谐振频率连续,因此多压电振子能在一定的频率范围内产生谐振或者近似的谐振.每个悬臂梁的一端都固定在支座上,另一端随着环境的振动源自由振动.外界振动将引起悬臂梁的受迫振动,导致悬臂梁发生弯曲变形,进而引起压电层内应变和应力的变化.根据压电学理论,当压电振子自由端受外力作用而产生弯曲变形时,其表面将有自由电荷生成.压电体所受应力及产生电场的关系可表示为^[10]

$$\boldsymbol{D} = \boldsymbol{dT} + \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{E} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{S} = \boldsymbol{s}^E \boldsymbol{T} + \boldsymbol{dE} \tag{2}$$

式中: $\boldsymbol{D}$ 是电位移; $\boldsymbol{E}$ 是电场强度; $\boldsymbol{d}$ 是压电常数矩阵; $\boldsymbol{S}$ 和 $\boldsymbol{T}$ 分别是应变和应力; $\boldsymbol{\varepsilon}^T$ 为应力恒定时的自由介电常数矩阵; $\boldsymbol{s}^E$ 为电场恒定时的短路弹性柔顺系数矩阵.由于压电晶体的弯曲变形,压电层的

上、下电极之间将产生变化的电势差,可为负载供电.

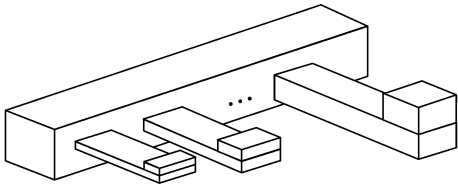


图 1 多悬臂梁压电振子结构示意图

2 振动频率的有限元仿真分析

利用有限元仿真分析方法对多悬臂梁压电振子进行模态分析,得出其谐振频率的变化范围.根据表 1 的结构参数建立了压电振子有限元模型,如图 2 所示.金属弹性梁选用磷青铜,其弹性模量大,能承受更大的形变.压电陶瓷选用 PZT-5H.压电悬臂梁的边界条件为一端固定,另一端机械自由.压电晶片介电常数矩阵 $\boldsymbol{\varepsilon}^T$ 、真空介电常数 ϵ_0 ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$)、压电柔顺系数矩阵 $\boldsymbol{s}^E$ ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$) 和压电常数矩阵 $\boldsymbol{d}$ (10^{-10} C/N) 分别为^[11]

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T = \begin{bmatrix} 3\ 130\epsilon_0 & 0 & 0 \\ 0 & 3\ 130\epsilon_0 & 0 \\ 0 & 0 & 3\ 400\epsilon_0 \end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{s}^E = \begin{bmatrix} 16.5 & -4.78 & -8.45 & 0 & 0 & 0 \\ -4.78 & 16.5 & -8.45 & 0 & 0 & 0 \\ -8.45 & -8.45 & 20.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 43.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 43.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 42.6 \end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{d} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 7.41 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 7.41 & 0 & 0 \\ -2.74 & -2.74 & 5.93 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

在 ANSYS 软件中用于压电分析的单元有 Sol-

表 1 多悬臂梁压电振子结构参数

宽度/mm	厚度/mm	长度/mm	附加质量/g
20	0.2	73.7	
		70.9	0.4
		68.7	0.8
		66.8	1.1
		65.2	1.5
	0.3	63.8	1.8
		58.6	3.3
		55.0	4.7

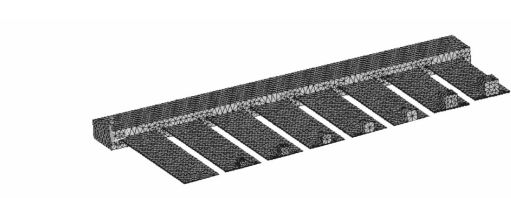


图2 多悬臂梁压电振子有限元模型

id5 和 Solid98 两种, Solid5 单元是 6 面 8 节点的耦合场单元, Solid98 单元是 4 面 4 节点的耦合场单元. 采用 Solid5 单元更适合于压电薄膜的模型单元划分, 其他层采用 Solid45 单元, 并略去粘结层的影响, 即压电薄膜和磷青铜理想粘结, 在粘结层上它们的位移和力是连续的^[12].

对于根据模态分析结果给出的多悬臂梁压电振子的振形图, 只要其中一个梁处于谐振状态下(d31 模式), 就认为多悬臂梁压电振子工作在有效的谐振频率范围内. 图 3 给出了压电振子谐振频率的变化曲线. 由图可知, 多悬臂梁压电振子在 8 个频率下都能产生所需的弯曲振形, 频率变化范围大约为 56~66 Hz, 而单悬臂梁压电振子对振动频率敏感, 其有效的谐振频率范围为 2~3 Hz. 仿真结果表明, 多悬臂梁压电振子能有效拓宽其工作频率范围.

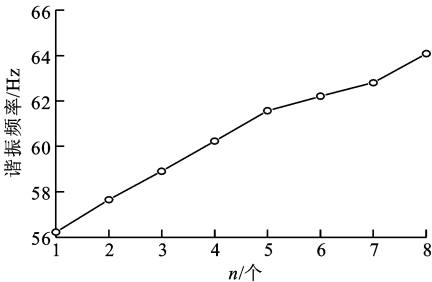


图3 多悬臂梁压电振子谐振频率仿真分析变化曲线

3 实验

在实验前需制作压电振子. 首先将磷青铜加工成金属基板所需要的尺寸, 对其进行热处理, 并让其自然冷却, 然后用砂纸去除磷青铜表面的氧化膜, 同时用丙酮溶液清洗掉压电陶瓷片和制作好的金属基板表面的灰尘、油污等. 将压电片和金属基板采用配置好的导电胶粘接, 并引出电极. 为了减小各压电振子间的差异, 压电振子的粘接过程要求较高, 粘接过程中不能损坏压电陶瓷片及表面镀银电极, 为了避免由于烘干带来的温度影响, 导电胶采取自然凝固. 在保证粘接良好的情况下, 粘接层越薄越好, 若太厚可能引起不导电的现象. 图 4 给出粘接好的多悬臂梁压电振子实物图.

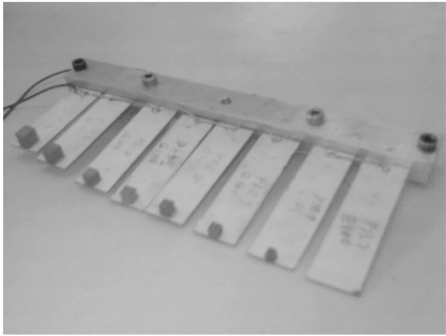


图4 多悬臂梁压电振子实物图

采用德国 Polytec 公司的 PSV-400-m2 激光测振仪对悬臂梁振子进行扫频测试, 激光从垂直平面方向射入, 观察扫频后的振动模拟动画结果, 只要有其中一个梁处于谐振状态下, 即认为悬臂梁振子处于有效的谐振频率范围内, 并记录其固有频率值. 图 5 给出了其中一个谐振频率的振形图.

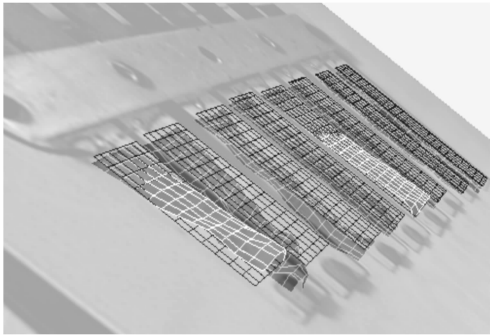


图5 多悬臂梁压电振子谐振频率振形图

图 6 给出了实验测得的多悬臂梁压电振子谐振频率的变化曲线. 由图可知, 多压电振子谐振频率的变化范围为 56~72 Hz, 与有限元仿真分析结果基本吻合.

为了测试多悬臂梁压电振子的发电能力, 建立多悬臂梁压电振子发电实验装置, 如图 7 所示. 实验装置主要包括 HEAS-5 功率放大器、HEV-50 高能激振器、能量存储电路和 DS-5000 系列数字存储示波器. 功率放大器内置的信号发生器输出一个频率

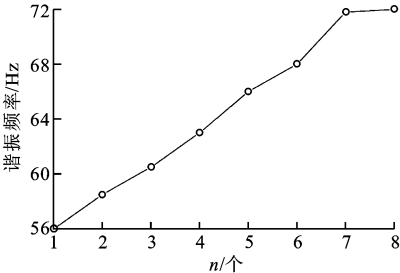


图6 多悬臂梁压电振子谐振频率实验曲线

可调的正弦激励信号,此信号经功率放大对高能激励器进行振动控制,从而为压电悬臂梁振子提供恒定的激励源.压电振子产生的电量经过电容进行存储并向负载供能.利用数字存储示波器对负载的输出电压进行实时测量,并计算负载输出功率.

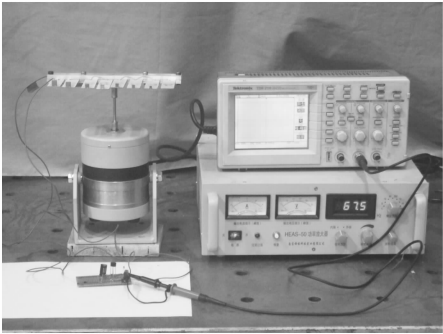


图 7 压电振子实验装置图

图 8 给出了振动加速度为 $1g$ 、外接负载为 $820\ \Omega$ 时压电发电装置的输出功率随频率的变化曲线,其中单悬臂梁压电振子结构尺寸为表 1 中的第 3 组.由图 8 可知,多悬臂梁压电发电装置在频率 $56\sim72\ \text{Hz}$ 内具有较大的功率输出,在振动频率为 $60\ \text{Hz}$ 时最大输出功率达到 $4.9\ \text{mW}$,而单悬臂梁压电振子相比多悬臂梁压电振子,输出功率明显小且只在很窄的频带内才有高功率输出.多悬臂梁压电振子输出功率出现多个相对的峰值,这是由于多悬臂梁压电振子拓宽了其谐振频带,在谐振频带内有一个梁或多个梁产生谐振,而每个梁在自身的谐振频率处输出的功率不同.当振动频率为 $60\ \text{Hz}$ 时,由图 6 可知,单悬臂梁产生的谐振输出功率达到 $2.3\ \text{mW}$,且其他悬臂梁输出的功率相对较大,从而使整个压电发电装置输出功率大.当振动频率为 $71\ \text{Hz}$ 时,由图 6 可知,在此频率处没有梁产生谐振,且逐渐远离其他悬臂梁的谐振点,在此振动频率处相比于悬臂梁谐振时梁输出的功率相对很小(如本实验的单悬臂梁输出功率仅为 $0.4\ \text{mW}$),则整个压电发电装置输出功率相对较小,这样使得多悬臂梁压电发电装置在谐振频率范围内输出功率产生了相对这

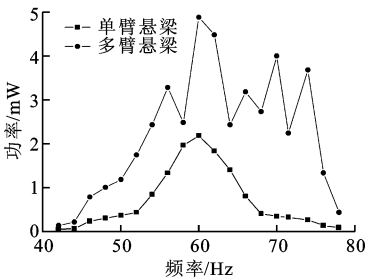


图 8 多悬臂梁压电振子输出功率随频率的变化曲线

样使得多悬臂梁压电发电装置在谐振频率范围内输出功率产生了相对的峰值和低谷.

4 结 论

本文设计并制作了多悬臂梁压电振子,采用有限元仿真方法,对多悬臂梁压电振子有效的工作频率进行了仿真分析并且进行了实验验证,同时对多悬臂梁压电振子进行了发电能力测试.研究表明,多悬臂梁压电振子有限元仿真分析谐振频率为 $56\sim66\ \text{Hz}$,与实验结果基本吻合.相比单悬臂梁振子,多悬臂梁能有效地拓宽其谐振频带,易于实现与环境振动源振动频率匹配以提高压电发电效率.当多悬臂梁压电发电装置在负载为 $820\ \Omega$ 、工作频率为 $60\ \text{Hz}$ 时,最大输出功率达到 $4.9\ \text{mW}$,产生的能量能够满足网络传感器等低耗能微电子产品的供电需求.

参考文献:

[1] JIANG Shunong, LI Xianfang, GUO, Shaohua, et al. Performance of a piezoelectricbimorph for scavenging vibration energy [J]. Smart Mater Struct, 2005, 14: 769-774.

[2] JIANG Shunong, HU Yuantai. Analysis of a piezoelectric bimorph plate with a central-attached mass as an energy harvester [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2007, 54 (7): 1463-1469.

[3] HU Yuantai, XUE Huan, HU Hongping, et al. A piezoelectric power harvester with adjustable frequency through axial preloads[J]. Smart Mater Struct, 2007, 16:1961-1966.

[4] HU Yuantai, XUE Huan, HU Ting, et al. Nonlinear interface between the piezoelectric harvesting structure and the modulating circuit of an energy harvester with a real storage battery [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectr, and Frequency Control, 2008, 55(1):148-160.

[5] NG T H, LIAO W H. Sensitivity analysis and energy harvesting for self-powered piezoelectric sensor [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2005, 16(10):785-797.

[6] 阚君武,唐可洪,任玉,等. Energy efficiency of piezoelectric monomorph cantilever generator[J]. 光学精密工程,2008,16(12):2389-2405.

HAN Junwu, TANG Kehong, REN Yu, et al. Energy efficiency of piezoelectric monomorph cantilever generator [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(12): 2389-2405.

(下转第 107 页)