

可调频压电俘能结构研究

赵 扬, 李莹泰, 关明杰

(厦门大学 物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005)

摘 要:提出一种由悬臂梁和分布式压电片构成的可调频压电俘能结构, 改变压电片的电场边界条件可改变俘能结构的共振频率, 对该结构下的两种不同的压电片结合形式进行了 ANSYS 仿真验证与比较。结果表明, 使用嵌入式结合形式比使用表面粘贴式结合形式可得到更高的频率变化率, 频率相对变化率可达 3.17%。

关键词:压电陶瓷; 俘能装置; 可调频; 悬臂梁; 共振频率

中图分类号: TN384

文献标识码: A

Research on a Tunable Piezoelectric Energy Scavenging Structure

ZHAO Yang, LI Yingtai, GUAN Mingjie

(School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: This research proposes a novel piezoelectric scavenger structure which is constructed by a cantilever base beam and piezoelectric elements bonded with the base beam in a certain manner. By changing the electrical boundary conditions of the piezoelectric elements, the resonant frequency of the beam structure changes accordingly. Two kinds of manners in which piezoelectric elements are bonded with the beam are investigated and compared with ANSYS simulations. The results show that the embedded manner surpasses the surface-bonded manner with the frequency variation ratio of 3.17%.

Key words: piezoelectric ceramics; energy scavenging; tunable; cantilever beam; resonant frequency

0 引言

近年来,随着低能耗便携式电子设备及自供电传感器和传感器网络的发展,为这些低能耗电子系统供电成为一个被关注的课题^[1-3]。为了克服用电池供电带来的电池寿命低,更换麻烦等问题,利用周围环境能量的俘能技术得到许多关注和发展。各种形式的能量源都有研究者关注,如太阳能、风能、热能、生物能和振动能等^[4-5]。在振动能俘能领域,压电俘能技术因有着高转换效率,结构紧凑和便于与微纳技术结合等特点而特别被关注^[6-10]。

大多数振动能俘能器都采用弹簧质量阻尼结构并使该结构的共振频率与俘能器周围环境振动的频率一致。只要这两个频率存在很小的偏差,俘能器产生的能量就会显著减小。然而在实际应用中,周围环境的振动频率通常不是恒定不变的单一频率,而是分布在一定频率范围之内。当环境振动频率偏

离俘能结构的共振频率,俘能器的输出将明显减少。

为解决这一问题,宽频^[11-13]和调频^[14-16]压电俘能技术被提出和研究。Xue 等^[11]提出一种宽频技术,将多根不同尺寸的悬臂梁串联或并联来俘能,并讨论他们的效果,数值计算结果表明组合后的系统共振频率可发生变化,但他们的设计是以增加整个系统的体积为代价。Lallart 等^[14]提出一种调频技术,利用一块压电片作为频率传感器,应用 DSPACE 进行控制实验,但他们所采用的系统控制策略较复杂,且控制电路所消耗的实际能量并未被实验测得,这样并未得到系统净俘能和俘能效率。Challa 等^[15]提出另一种调频结构,通过在悬臂梁自由端增加磁场力来控制梁的频率,使原共振频率为 26 Hz 的梁的频率宽增加到 22~32 Hz。但这种方法需要一个产生磁场的装置,也使俘能机构体积增加,失去了压电俘能机构结构紧凑的优点。

收稿日期:2013-08-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11202176)

作者简介:赵扬(1980-),男,辽宁丹东人,助理教授,博士,主要从事智能材料与结构的研究。

本研究提出一种新型的可调频结构,通过改变压电片的电场边界条件来改变梁结构的共振频率,并利用 ANSYS 软件对这种结构的可调频效果做仿真分析以初步证明这种新型可调频结构的可行性,并对这种新型可调频结构的不同形式进行对比分析,以选出较佳的结构形式,获得较大的频率变化范围。

1 理论分析

悬臂梁是一个连续弹性体,具有无限多个自由度,即有无限多个固有频率和主振型。在一般情况下,梁的振动是无限多个主振型的叠加。如果给梁施加一个大小合适的激振力,其频率正好等于梁的某阶固有频率,就会产生共振。

压电效应的存在,使得压电材料表现出一种独特的机械特性。当压电材料处于开路状态时,压电材料受力变形时会在极化方向两端的端表面积聚电荷进而产生电场,该电场对压电材料的变形起阻碍作用,使压电材料不易变形;当压电材料处于短路状态时,端表面电荷被及时运送走,压电材料的变形不再受电场阻碍,形变量将加大。简言之,开路时,压电材料表现得较“硬”;短路时,压电材料变“软”^[17]。

压电材料最重要的参数是其机电耦合系数(EMCC),表示特定条件下机械能与电能间的转换效率,它的一般定义是 EMCC 的平方等于压电体内储存的电能与外部施加的机械能之比:

$$k_{oc}/k_{sc}=1/(1-k_{ij}^2) \quad (1)$$

式中: k_{oc} 为压电材料开路时的等效刚度; k_{sc} 为短路时的等效刚度; k_{ij} 为压电材料的机电耦合系数,根据工作模式的不同取 k_{31} 或 k_{33} 。由式(1)可知,机电耦合系数越大,开、短路刚度之比越大,即压电片刚度变化量越大。

压电陶瓷是压电材料中的一种,其特点是压电常数大,灵敏度高,制造工艺成熟,成形工艺性好,成本低,利于广泛应用。本研究根据压电陶瓷的这一机械特性,设计一种压电悬臂梁结构,通过改变压电材料的电场边界条件(即开路、短路)使压电材料自身刚度发生变化,进而改变整个结构的共振频率,以构成一种可调频俘能结构。

2 结构设计

悬臂梁压电双晶片是压电俘能装置中最常用的结构方式,其结构如图 1 所示。

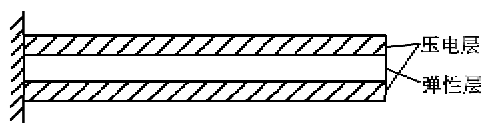


图1 悬臂梁压电双晶片

利用 ANSYS 对悬臂梁做模态分析,发现悬臂梁在振动中,各个部分的形变量并不相等,其固定端的形变量最大,自由端的形变量最小。为了实现对悬臂梁共振频率变化的连续控制,本研究将压电层替换成一块块小压电片,并贴于悬臂梁固定端附近。因此,本研究提出两种结构形式进行研究分析。图 2 为表面粘贴式可调频结构(形式 1),由 5 块压电片交替地在表面粘贴于悬臂梁固定端附近。图 3 为嵌入式可调频结构(形式 2),压电片嵌入悬臂梁表面。

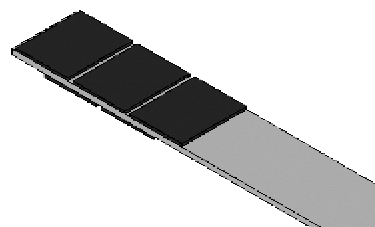


图2 表面粘贴式可调频结构

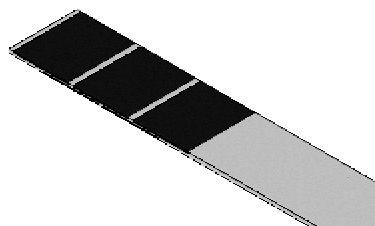


图3 嵌入式可调频结构

形式 1、2 中压电片的极化方向为竖直方向,而形变方向为水平方向,因此压电片均处于 31 工作模式。

3 ANSYS 仿真

悬臂梁材料的选用关系到整体结构的固有频率,进而影响整体结构的性能、特点。本研究选取 1060 铝合金和丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)塑料这两种常见材料作为悬臂梁的基体材料,并分别作 ANSYS 仿真对照。压电片选用美国 Piezo Systems 公司的型号 PZT-5A-S4-ENH 的压电片,机电耦合系数 $k_{31}=0.32$ 。PZT-5A 为各向异性材料,其刚度用一个刚度矩阵来表示。由于在这两种结构形式中,压电片只在一个方向上进行压缩和拉伸。为简化运行,在仿真过程中,本研究用形变方向上的刚度作为压电片短路时的等效刚度。其材料参数如表 1 所示。

表 1 材料参数

参数	1050 合金	ABS	PZT-5A
刚度/(N/m ²)	6.9×10^{12}	2.0×10^9	5.2×10^{10}
密度/(kg/m ³)	2 700	1 020	7 750
泊松比	0.330	0.394	0.310

形式 1、2 尺寸如图 4 所示,悬臂梁总长 300 mm,宽 25 mm,厚 2 mm;压电片共 5 片,每片长 20 mm,宽 25 mm,厚 0.5 mm;形式 2 中,压电片嵌入悬臂梁本体,两者的整体结构构成一根完整的悬臂梁,其余各部分尺寸与形式 1 保持一致。

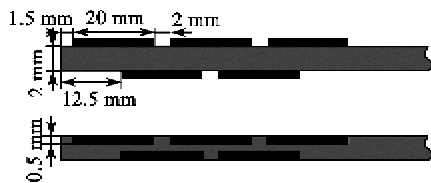


图 4 形式 1、2 结构尺寸

这两种形式中,压电片均以 31 模式进行工作。根据之前的理论分析,我们可以得到压电片在开路时的等效刚度为 $6.907 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$ 。

在 ANSYS 的仿真分析中,本研究对以上两种结构分别作模态分析,以获得它们的固有频率。在仿真分析过程中,本研究采用以下的处理方式:

1) 在前处理阶段,悬臂梁基体材料和压电片选用 Solid 45 作单元属性。Solid 45 单元表示 3-D 实体,8 节点 3 自由度,具有塑性、徐变、膨胀、应力强化、大变形和大应变能力。建模时以米为单位确定长度,两者采用 Glue 的结合方式。以自由方式对各部分进行网格划分,根据压电片开、短路情况的不同,选择不同的压电片等效刚度对压电片进行网格划分。

2) 在求解运算阶段,采用 Block Lanczos 算法对两种结构分别进行模态分析。Block Lanczos 法使用 lanczos 算法,求解速度快,精度高,并采用 Sturm 序列检查,在每个漂移点处如果找不到所有的特征根,lanczos 法会给出提示信息,弥补丢根的缺陷。施加约束时将固定端限制为 All DOF(即约束所有位移),选择位移值为 0,自由端不施加任何约束。

4 仿真结果及分析

为便于分析,将以上两种结构中的压电片进行编号。从悬臂梁固定端算起,往外依次编号 1~5。

两种结构形式中,本研究分别假设前 $N(N \leq 5)$ 片压电片短路,其余开路的情况进行求解。求解结

果如图 5、6 所示。

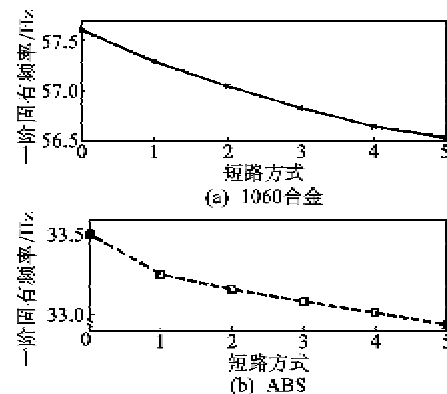


图 5 形式 1 频率变化趋势

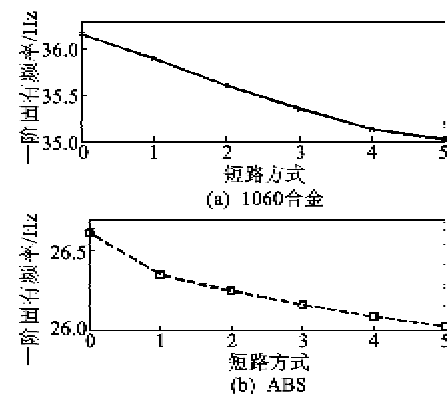


图 6 形式 2 频率变化趋势

观察图 5、6 可以发现:

1) 固有频率的变化均呈下降趋势,说明压电片短路时,结构的固有频率下降,且下降幅度随短路压电片数量的增多而增大。且变化趋势曲线越来越平缓,说明越远离固定端的压电片对结构固有频率变化影响越小。

2) 开路固有频率 ABS 较 1060 合金低,形式 2 较形式 1 低。形式 1 中 1060 合金开路固有频率为 57.604 Hz,ABS 为 33.503 Hz;形式 2 中 1060 合金开路固有频率为 36.168 Hz,ABS 为 26.612 Hz。说明使用 ABS 作悬臂梁基体材料或采用形式 2 均可有效降低整体结构的共振频率。

3) 频率相对变化率 1060 合金较 ABS 高,形式 2 较形式 1 高。形式 1 中 1060 合金频率相对变化率为 1.87%,ABS 为 1.70%;形式 2 中 1060 合金频率相对变化率为 3.17%,ABS 为 2.23%。说明嵌入式结构中压电片刚度变化对共振频率的影响作用更大。

4) 仿真计算得到的最大频率相对变化率为 3.17%,这个值虽然不大,但在某些调频范围需要较

小的应用中可采用这种调频结构。

5 结束语

本研究设计了两种可调节悬臂梁固有频率的俘能器结构,并对其进行 ANSYS 仿真分析。由仿真结果可见,表面粘贴式结构简单易行,但其频率变化较小;嵌入式的频率相对变化率较表面粘贴式有较大提高,频率相对变化率可达 3.17%,但其结构形式不易实现,悬臂梁形状需特别定制。由于压电片既可作为电场边界条件驱动元件,又可作为俘能元件,本结构可用来进一步做自调频俘能系统设计。在未来的研究中,我们将继续研究各结构尺寸对频率变化的影响,以优化结构和尺寸,使得悬臂梁频率变化幅度进一步提高,然后进行自调频系统设计。本研究成果将提高压电俘能器在实际工程中应用的可能性和适应性。

参考文献:

- [1] HANDE A, BRIDGELALL R, ZOGHI B. Vibration energy harvesting for disaster asset monitoring using active RFID tags[J]. *Proc IEEE*, 2010, 98(9): 1620-1628.
- [2] ROCHA J G, GONCALVES L M, ROCHA P F, et al. Energy harvesting from piezoelectric materials fully integrated in footwear [J]. *IEEE T Ind Electron*, 2010, 57(3): 813-819.
- [3] RENAUD M, FIORINI P, SCHAIJK R. Harvesting energy from the motion of human limbs: the design and analysis of an impact-based piezoelectric generator [J]. *Smart Mater Struct*, 2009, 18(3): 035001.
- [4] WISCHKE M, MASUR M, KRONER M, et al. Vibration harvesting in traffic tunnels to power wireless sensor nodes[J]. *Smart Mater Struct*, 2011, 20(8): 085014.
- [5] KHALIGH A, ZENG P, ZHENG C. Kinetic energy harvesting using piezoelectric and electromagnetic technologies-state of the art[J]. *IEEE T Ind Electron*, 2010, 57(3): 850-860.
- [6] LI X, GUO M, DONG S. A flex-compressive-mode piezoelectric transducer for mechanical vibration/strain energy harvesting[J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 2011, 58(4): 698-703.
- [7] TANG Q, YANG Y, LI X. Bi-stable frequency up-conversion piezoelectric energy harvester driven by non-contact magnetic repulsion [J]. *Smart Mater Struct*, 2011, 20(12): 125011.
- [8] YUAN J, XIE T, CHEN W, et al. Performance of a drum transducer for scavenging vibration energy[J]. *J Intell Mater Syst Struct*, 2009, 20(9): 1771-1777.
- [9] GUAN M J, LIAO W H. On the efficiencies of piezoelectric energy harvesting circuits towards storage device voltages[J]. *Smart Mater Struct*, 2007, 16(2): 498-505.
- [10] GUAN M J, LIAO W H. Characteristics of energy storage devices in piezoelectric energy harvesting systems[J]. *J Intell Mater Syst Struct*, 2008, 19(6): 671-680.
- [11] XUE H, HU Y, WANG Q. Broadband piezoelectric energy harvesting devices using multiple bimorphs with different operating frequencies[J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 2008, 55(9): 2104-2108.
- [12] YANG Z, YANG J. Connected vibrating piezoelectric bimorph beams as a wide-band piezoelectric power harvester[J]. *J Intell Mater Syst Struct*, 2009, 20(3): 569-574.
- [13] LUO C, HOFMANN H F. Wideband energy harvesting for piezoelectric devices with linear resonant behavior[J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 2011, 58(7): 1294-1301.
- [14] LALLART M, ANTON S R, INMAN D J. Frequency self-tuning scheme for broadband vibration energy harvesting[J]. *J Intell Mater Syst Struct*, 2010, 21(6): 897-906.
- [15] CHALLA V R, PRASAD M G, FISHER F T. Towards an autonomous self-tuning vibration energy harvesting device for wireless sensor network applications[J]. *Smart Mater Struct*, 2011, 20(2): 025004.
- [16] ZHU D, TUDOR M J, BEEBY S P. Strategies for increasing the operating frequency range of vibration energy harvesters; a review[J]. *Meas Sci Technol*, 2010, 21(2): 022001.
- [17] LARSON G D, CUNEFARE K A. Quarter-cycle switching control for switch-shunted dampers[J]. *J Vib Acoust*, 2004, 126(2): 278-283.