

双晶悬臂梁压电发电装置发电能力的仿真*

龚俊杰, 许颖颖, 阮志林, 边义祥

(扬州大学机械工程学院 扬州, 225127)

摘要 针对双晶片悬臂梁式压电振子的理论模型,分析了压电振子的结构参数对压电发电装置发电能力的影响。运用 ANSYS 有限元软件建立了压电振子的压电耦合模型,研究了压电振子的配重质量、悬臂梁长度和金属基板厚度等结构参数对压电振子的固有频率以及压电发电装置发电量的影响规律。为了验证有限元模型的正确性,对典型结构参数压电悬臂梁的一阶固有频率和发电电压进行了实验测量。仿真结果表明,增加悬臂梁的配置质量和长度、减小悬臂梁基板的厚度都可以降低结构的固有频率,选择恰当的结构参数匹配可以使发电装置的固有频率接近外界的激振频率,从而实现最佳的发电性能。

关键词 压电发电; 双晶压电悬臂梁; 压电振子; 压电耦合模型; 发电能力; 仿真分析

中图分类号 TN384; TN712; TH16

1 问题的引出

压电发电是利用压电陶瓷的正压电效应来实现机械能向电能的转换,压电发电装置通过压电材料收集环境振动的能量然后将其转换成可以利用的电能,具有结构简单、体积小、成本低和能量密度大等优点。利用压电发电材料结合动力学系统、测试技术等对环境中的机械能进行能量回收已成为一项备受关注的高新技术,在军事、医疗和建筑等领域已展开了相关的研究^[1-4]。

压电发电装置中压电振子一般有悬臂支撑、固支支撑、自由支撑和简支支撑等方式^[5]。其中,悬臂式支撑方式为一端固定,另一端自由,其结构示意图如图 1 所示。图中金属片的两侧都黏贴了压电陶瓷片,称为双侧型压电振子,也称为压电双晶片。

目前的研究结果表明,压电发电装置的发电能力主要取决于压电振子的结构参数、施加的外力(或

加速度)和频率等,输出功率较为有限。如何有效地提高压电发电装置的发电能力、提高有限体积压电发电装置的机电能量转换效率,是迫切需要解决的关键问题^[1]。阚君武等^[6-7]建立了压电悬臂梁发电装置的仿真分析模型,研究了压电片与基板厚度等结构尺寸、激励方式及材料性能等对单、双晶压电梁发电能力的影响规律。魏双会等^[8]进行了压电发电器的建模研究,提出了一种新的压电发电机模型建立方法,运用该方法推导了 2 种结构压电发电器的性能参数表达式用于压电发电器的性能预测。王光庆^[9]提出了一种利用压电叠堆进行机电能量转换的压电发电装置,采用压电振动理论和杆的波动理论建立了发电装置的机电耦合分析模型及输出电压、电流与压电叠堆受力之间的关系表达式,研究了压电叠堆结构尺寸、材料参数、外力激振频率和幅值、系统惯性质量和弹簧刚度等对装置发电性能的影响规律。文献^[10-12]从理论、实验与有限元模拟 3 个方面分别研究了三角形、梯形和矩形形状压电悬臂梁的发电能力,结果表明,三角形和梯形悬臂梁的发电能力较好。文献^[13]对两种不同压电材料的微压电发电机在不同激振频率与外接电阻负荷下的输出功率和能量转换效率进行了理论与数值模拟研究,结果表明,存在一个最佳的外接电阻使得放大器的输出功率最大,在一定范围内提高振动频率也可以提高输出功率。Sameh 等^[14]研究了带质量块的单层压电悬臂梁能量采集装置在不同激振频率和外接

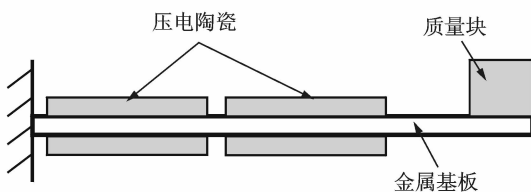


图 1 双晶片悬臂梁式压电振子结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PZT Bimorph cantilever

* 国家自然科学基金资助项目(51275447)

收稿日期:2012-12-29;修回日期:2013-02-19

电阻负载下的输出功率,并进行了形状改进设计。研究发现,当激振频率与系统的固有频率接近时,输出功率最大,选择最佳的外接电阻可以使输出功率最大,在相同条件下梯形截面悬臂梁的发电能力优于矩形截面。文献[15]以能量转换因子最大化为目标函数对矩形压电悬臂梁进行了拓扑优化,并对优化后的3种不同形状的悬臂梁进行了分析与比较。

笔者在理论研究的基础上,对影响双晶压电悬臂梁发电能力的质量配重大小、悬臂梁长度和金属基板厚度等参数进行仿真分析,研究压电悬臂梁的最优结构参数设计规律。为了验证有限元模型和计算结果的正确性,对典型结构参数的压电悬臂梁进行固有频率和发电电压的实验测量。

2 压电振子发电量的理论计算

作为压电发电装置的核心部件,压电振子的发电能力是关键,发电电荷量(Q)是衡量压电振子发电能力的主要性能。图2为双晶悬臂梁式压电振子的理论模型^[16-17]。上下两层为压电晶体,中间接触面为金属基板,梁的宽度为 b ,长度为 l 。

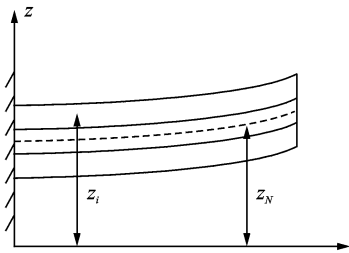


图2 双晶片悬臂梁压电振子的理论模型

Fig. 2 Theoretical model of PZT Bimorph cantilever

当施加瞬时外力后,悬臂梁的中性轴产生弯曲变形,设其弯曲半径为 R ,则任一层上的点产生的轴向应变变为

$$\epsilon_x = \epsilon_x(z) = \frac{Z_N - Z}{R} \quad (1)$$

其中: Z_N 为中性轴高度。

根据应力应变关系,压电陶瓷片各点处的应力为

$$\sigma_i = E_i(\epsilon_x - d_{31i}\bar{E}_i) \quad (2)$$

其中: E_i 为材料的弹性模量; d_{31i} 为压电耦合系数; \bar{E}_i 为 z 向电场分量;下标 i 表示第 i 层。

根据梁横截面上的轴力、弯矩与应力之间的合成与平衡关系,得到中性轴的高度和曲率分布为

$$Z_N = \frac{\sum z_i E_i A_i}{\sum E_i A_i} \quad (3)$$

$$C_M = \frac{\sum E_i A_i}{\sum_i E_i A_i \sum_i E_i (I_i + A_i z_i^2) - (\sum_i z_i E_i A_i)^2} \quad (4)$$

其中: A_i 为第 i 层的横截面面积; z_i 为第 i 层横截面形心的高度; I_i 为第 i 层横截面面积相对于其形心轴的惯性矩。

若选取复合梁的中性轴为 z 坐标的零点,则 $z_N = 0$,式(4)简化为

$$C_M = \frac{1}{\sum_i E_i (I_i + A_i z_i^2)} \quad (5)$$

其中: $\hat{z}_i = z_i - z_N$ 。

根据第1类压电方程,压电陶瓷产生电场的电位移为

$$D_i = \epsilon \bar{E}_i + d_{31i} \sigma_i \quad (6)$$

其中: ϵ 为介电常数。

考虑其中的任一层压电陶瓷可以忽略下标 i ,由于电场 \bar{E}_i 沿厚度积分为零,所以将式(1),(2),(5)代入式(6),得到

$$D = d_{31} \sigma = d_{31} E_p (z_N - z) C_M M \quad (7)$$

其中: E_p 为压电陶瓷材料的弹性模量。

将式(7)沿厚度积分得

$$D_i = d_{31} E_p C_M M \int_{z_p - \frac{l}{2}}^{z_p + \frac{l}{2}} (z_N - z) dz = d_{31} E_p C_M M t (z_N - z_p) \quad (8)$$

其中: z_p 为该压电层中心的坐标。

由于同一矩形层内电位移分布为常数,可得到该层压电陶瓷板上的电荷量为

$$Q = D b l = d_{31} E_p C_M M (z_N - z_p) b l \quad (9)$$

当压电发电装置中包含等厚度的双层压电晶片时,上层压电晶片由于 $z_N < z_p$,所以电荷量为负,而下层电荷量为等量正值。

规定压电晶片与基板的宽度均为 b ,压电晶片的厚度为 t_p ,基板的厚度为 t_{Cu} ,基板的弹性模量为 E_{Cu} 。通过计算压电振子中性轴的惯性矩和截面面积,代入式(9)得到上层压电晶片产生的电荷量为

$$Q = - \frac{6 d_{31} E_p M l (t_{Cu} + t_p)}{E_{Cu} t_{Cu}^3 + 2 E_p t_p (3 t_{Cu}^2 + 4 t_p^2 + 6 t_{Cu} t_p)} \quad (10)$$

假设 $t_p = t_{Cu} = t$,则式(9)可简化为

$$Q = - \frac{12 d_{31} E_p M l}{(E_{Cu} + 26 E_p) t^2} \quad (11)$$

从式(10),(11)可看出,压电振子的输出电荷量受到其结构尺寸以及压电转换系数和压电耦合系数的影响。其中,压电转换系数和压电耦合系数为压电材料的固有特性。因此,影响压电振子发电量的主要因素是结构形状和尺寸,当压电振子的宽度不

变时,影响发电量的主要因素为压电振子的长度与厚度。定性分析可知,在宽度确定的条件下,长而薄的压电振子发电量较大。考虑到发电量的难以测量以及发电量与发电电压之间的线性关系,也可以测量发电电压作为衡量发电性能的指标。

3 双晶悬臂梁发电量的实验测试

首先搭建实验平台,对典型结构与参数的双晶压电发电装置在振动模式下进行固有频率与发电电压的实验测量。得到结构的一阶固有频率和发电电压大小等数据为进行有限元计算与实验测量的比较提供数据,从而验证有限元模型的正确性,为建立正确的有限元模型提供依据。将悬臂梁压电振子一端固定在激振器上,另一端自由悬置,并在自由端施加 30 g 质量块。实验采用的 PZT-5 压电陶瓷和金属基板的结构尺寸如表 1 所示。

表 1 压电陶瓷和金属基板的结构尺寸

Tab. 1 The structural dimension of PZT and metal substrate

材料	长/mm	宽/mm	厚/mm
PZT-5	20	10	0.55
铍青铜	45	20	0.4

为了方便和准确获得压电悬臂梁的一阶固有频率,需要将测试得到的悬臂梁振动时域响应曲线通过傅里叶变换变成频域线性谱响应曲线。YE1311D 扫频信号发生器在一定频率范围内为 HEV-50 激振器提供正弦电压信号,通过 YE5850 电荷放大器驱动压电装置振动,经过 AZ308 信号调理仪对悬臂梁压电装置得到的电信号进行处理,并用动态测试软件对电信号结果进行曲线绘制与存储。通过低频扫频信号发生器对压电悬臂梁进行 2~1 kHz 扫频,观察悬臂梁的频谱变化。通过动态分析软件 CRAS 得到压电悬臂梁的线性谱如图 3 所示。对图 3 所示悬臂梁的线性谱进行分析,排除外界环境的干扰可得到在自由端配置了 30 g 质量块的悬臂梁一阶固有频率为 45.5 Hz。

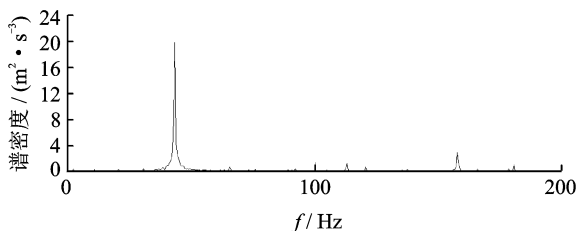


图 3 压电悬臂梁的线性谱

Fig. 3 Linear spectrum of PZT cantilever

调节 HEAS-50 功率放大器的激振电压,控制激振器的振幅为 1 mm,调节激振器的激振频率,在激振频率分别为 10,15,20,30,40,45,50 Hz 的外界激励下,测量压电悬臂梁装置的发电电压。通过 YE5850 电荷放大器驱动压电装置振动,经过 AZ308 信号调理仪对悬臂梁压电装置得到的电压信号进行处理,用动态测试软件对电压信号结果进行曲线绘制与存储。图 4 为压电悬臂梁在 20 Hz 激振频率下的输出电压信号。图 4 表明,在正弦激励信号作用下,输出电压信号波形比较稳定,电压波形为标准的正弦曲线。对输出电压信号进行分析与处理,得到悬臂梁装置的峰值发电电压为 5.1 V。

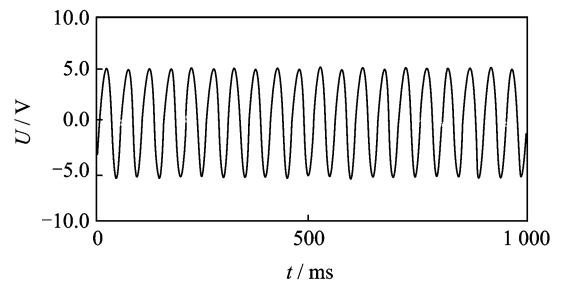


图 4 压电悬臂梁的输出电压信号

Fig. 4 The measured output voltage of PZT cantilever

在 7 种外界激振频率分别作用下压电悬臂梁的峰值输出电压如表 2 所示。可见,在自由端施加 30 g 质量块压电悬臂梁,在 20 Hz 的频率激振下,发电电压达到 5.1 V,随后略有降低,但当激振频率达到 45 Hz 时,发电电压达到 7.6 V 的最大值,然后又出现下降趋势。在实验过程中观察到,在 45 Hz 的激励频率下,外界激振频率接近结构的共振频率,悬臂梁装置的振动剧烈。虽然此时输出电压最大,但由于自由端质量块的惯性力较大,出现了明显的偏载以及滞后等不稳定现象。相比较而言,在 20 Hz 的激励频率下,悬臂梁装置的振动比较稳定,输出电压也较大,且电压信号输出比较稳定,所以后面的参数化讨论都是基于 20 Hz 的外界激振频率进行。

表 2 同激振频率作用下压电悬臂梁的输出电压

Tab. 2 The voltage output of PZT cantilever at different excitation frequency

激振频率/Hz	输出电压/V
10	0.5
15	2.4
20	5.1
30	3.5
40	5.7
45	7.6
50	6.2

为了使压电悬臂梁装置具有较强的发电性能,不仅需要综合考虑激振频率与结构固有频率之间的匹配关系,还要研究影响压电发电装置固有频率和发电量的相关结构参数。

4 双晶悬臂梁发电量的仿真分析

对压电悬臂梁结构发电量的仿真分析关键是对进行结构-电场之间的机电耦合分析,建立机电耦合有限元模型。笔者采用直接耦合法,对压电陶瓷材料采用 SOLID5 压电耦合单元,对金属基板采用 SOLID45 实体单元进行分析。压电发电装置有限元模型如图 5 所示。

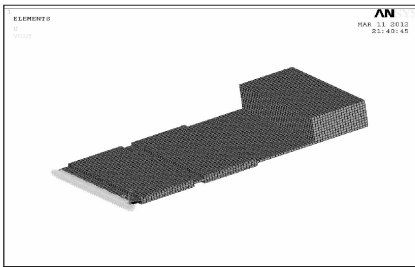


图 5 带有质量块的压电悬臂梁有限元模型

Fig. 5 The FEM model of PZT cantilever with proof mass

模型由铍青铜金属基板、上下两层共 4 片压电陶瓷晶片以及自由端的质量块 3 部分组成,共有 18 000 个单元,22 960 个节点。设置固定端处所有节点的自由度均为零,通过节点的耦合实现金属基板与压电陶瓷之间位移与力的等量传递。压电陶瓷和金属基板的力学性能参数如表 3 所示。

表 3 压电陶瓷和金属基板的性能参数

Tab. 3 The mechanical properties of PZT and metal substrate

材料	密度/(kg · m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比
PZT-5	7 500	106	0.32
铍青铜	8 230	130	0.42

4.1 有限元计算结果与实验结果的比较

为了便于进行实验与计算结果的比较,验证有限元模型的正确性,对与实验结构相同尺寸、配置相同质量块的压电悬臂梁进行仿真分析。在重力作用下,对压电悬臂梁进行有限元模态分析,得到自由端设置 30 g 质量块的压电悬臂梁前 4 阶固有频率如表 4 所示。

在自由端施加 30 g 质量块时,压电悬臂梁的一阶振动固有频率为 44.4 Hz,测试得到的一阶固有频率为 45.5 Hz,两者相对误差为 2%。在有限元模

表 4 压电悬臂梁的前四阶固有频率

Tab. 4 The first four order natural frequency of PZT cantilever

阶数	固有频率/Hz
1	44.4
2	306.2
3	364.0
4	1 430.0

拟中,在压电悬臂梁的固定端施加数学表达式为 $F=0.001\sin40\pi t$ 的正弦激励载荷,其频率为 20 Hz,振幅为 1 mm,设定恒定阻尼比为 0.02。在正弦载荷的激励下,对压电悬臂梁采用 Newmark 隐式积分方法进行计算。图 6 为悬臂梁在波峰时刻的电压分布云图。可见,压电悬臂梁在波峰(0.062 5 s)时刻产生最大电压,发生在靠近固定端的压电片上,靠近自由端压电片上的电压相对较低。

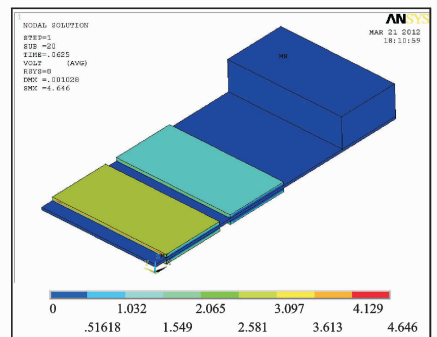


图 6 压电悬臂梁电压云图

Fig. 6 The output voltage nephogram of PZT cantilever

图 7 为靠近悬臂梁固定端处压电片上的某一节点在前 5 个正弦周期激励下的电压输出曲线。图 7 表明,在受到正弦载荷激励下,压电片上的输出电压随时间正弦波动,电压峰值达到 5.2 V。实验测试的输出电压为 5.1 V,相对误差为 2%。通过对自由端设置 30 g 质量块的压电悬臂梁有限元模拟结果与实验结果比较发现,有限元模拟值和实验测量

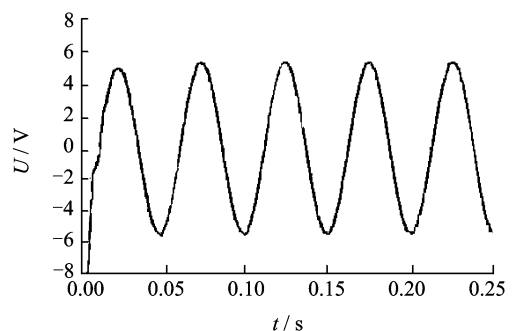


图 7 压电悬臂梁输出电压曲线

Fig. 7 The output voltage curve of PZT cantilever

值非常接近,从而验证了有限元模拟的可行性以及有限元模型的准确性。在此基础上,可以运用仿真的手段讨论悬臂梁的不同结构与参数设置对发电能力的影响规律。

4.2 配重对压电悬臂梁发电量的影响

通常情况下,环境振动的频率在 100 Hz 以下,因此需要控制悬臂梁装置自身的固有频率,以接近振源的振动频率,提高发电量。在悬臂梁自由端配置不同质量块调节其固有频率是最简单易行的方法。

为了分析质量块质量大小与悬臂梁固有频率以及发电量之间的关系,分别对压电悬臂梁的自由端不加质量块、施加质量为 5, 10, 15, 20, 30 和 40 g 的质量块时的情况进行仿真分析。表 5 为配置不同质量块时压电悬臂梁的一阶固有频率和最大输出电压。表 5 表明,随着自由端质量块的质量增加,压电悬臂梁的第 1 阶固有频率明显下降,装置的最大输出电压也稳步上升。固有频率下降说明通过在悬臂梁的自由端配置不同质量块来调节装置的固有频率是最为简单有效的办法。发电电压上升说明,结构的一阶固有频率越接近外界的激振频率,装置的振动与变形越明显,从而发电能力越强。

表 5 不同质量块悬臂梁的一阶固有频率与输出电压

Tab.5 The first order natural frequency and output voltage of PZT cantilever with different proof mass

质量块/g	固有频率/Hz	最大电压/V
0	229.0	0.33
5	93.8	0.92
10	71.0	1.76
15	59.4	2.58
20	52.1	4.13
30	44.4	5.20
40	37.6	6.08

4.3 长度对压电悬臂梁发电量的影响

设定悬臂梁的宽度为 20 mm,厚度为 0.4 mm,并在悬臂梁的自由端配置 30 g 的质量块。在不改变梁的宽度、厚度以及质量块质量的前提下,单独分析梁的长度对压电发电装置发电能力的影响。分别对长度为 35, 40, 45, 50, 55 mm 的压电悬臂梁的固有频率及发电电压进行仿真分析。表 6 为不同长度压电悬臂梁的一阶固有频率和最大输出电压。

表 6 说明,随着悬臂梁长度的增加,其固有频率逐渐减小。由此可见,长度较长的悬臂梁有利于降低整体结构的固有频率。表 6 同时表明,装置的输出电压随着悬臂梁长度的增加而增大。这说明增加

悬臂梁的长度、使结构的一阶固有频率接近外界激振频率可以提高装置的发电能力;但在实际结构设计过程中还需要考虑压电振子的强度问题,防止过长的悬臂梁在实际振动中产生较大的弯曲正应力而导致结构的强度破坏。

表 6 不同长度悬臂梁的一阶固有频率与输出电压

Tab.6 The first order natural frequency and output voltage of PZT cantilever with different length

长度/mm	固有频率/Hz	最大电压/V
35	61.0	2.44
40	48.6	3.92
45	44.4	5.20
50	36.6	6.18
55	31.2	6.88

4.4 厚度对压电悬臂梁发电量的影响

为了研究基板厚度对结构固有频率以及发电电压的影响规律,在不改变压电陶瓷晶片结构尺寸和 30 g 配重的前提下,取长为 45 mm,宽为 20 mm 的悬臂梁,分别取 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 mm 厚度的金属基板,对压电悬臂梁结构的固有频率及发电电压进行模拟仿真。表 7 为不同厚度压电悬臂梁的一阶固有频率和最大输出电压。表 7 表明,随着悬臂梁厚度的加大,梁的抗弯刚度变大,导致其固有频率随之增加。最大输出电压较为复杂:当梁的厚

表 7 不同厚度悬臂梁的一阶固有频率与输出电压

Tab.7 The first order natural frequency and output voltage of PZT cantilever with different thickness

厚度/mm	固有频率/Hz	最大电压/V
0.1	5.8	0.14
0.2	15.6	3.74
0.3	28.7	8.34
0.4	44.4	5.20
0.5	71.2	1.52

度较小与较大时,结构的一阶固有频率远离激振频率,输出电压较小;当厚度为 0.3 mm 左右时,激振频率与固有频率接近,发电能力最佳。可见,在强度许可的条件下,应选择较薄的悬臂梁作为基板。

5 结论

1) 不同的质量配置是调节悬臂梁一阶固有频率最简单有效的方法,增加质量块的质量可以降低结构的固有频率。选取合适的配重可以使装置实现最佳的发电性能。

2) 增加悬臂梁的长度可以降低结构的固有频率,使结构的一阶固有频率接近外界激振频率,从而提高装置的发电能力。

3) 改变悬臂梁基板的厚度可以改变梁的抗弯刚度,从而调节结构的固有频率。在材料的强度范围内选择恰当厚度的基板,同样可以提高装置的发电能力。

参 考 文 献

- [1] Henry A S, Daniel I. A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials[J]. Shock and Vibration Digest, 2004, 36(3): 197-205.
- [2] Lefeuvre E, Badel A, Richard C, et al. A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2006, 126 (2): 405-416.
- [3] 王强, 骆英, 顾建祖. 基于压电材料的振动能量获取技术的研究[J]. 电子元件与材料, 2008, 27 (3): 47-50.
Wang Qiang, Luo Ying, Gu Jianzu. Research on harvested technique of vibration energy based on piezoelectric materials[J]. Electronic Components and Materials, 2008, 27 (3): 47-50. (in Chinese)
- [4] 陈丽娟, 许晓慧, 吴在军, 等. 无线传感器网络的节点能量自供给方法[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32 (6): 994-998.
Chen Lijuan, Xu Xiaohui, Wu Zaijun, et al. Research on energy harvesting method for wireless sensor network node[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2012, 32(6): 994-998. (in Chinese)
- [5] Bailey T, Hubbard J E. Distributed piezoelectric-polymer active vibration control of a cantilever beam[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1985, 8 (5): 605-611.
- [6] 阚君武, 唐可洪, 王淑云, 等. 压电悬臂梁发电装置的建模与仿真分析[J]. 光学精密工程, 2008, 16(1): 71-75.
Kan Junwu, Tang Kehong, Wang Shuyun, et al. Modeling and simulation of piezoelectric cantilever generators[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(1): 71-75. (in Chinese)
- [7] 阚君武, 唐可洪, 任玉, 等. 压电单晶梁发电机的能量效率[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2399-2405.
Kan Junwu, Tang Kehong, Ren Yu, et al. Energy efficiency of piezoelectric monomorph cantilever generator[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16 (12): 2399-2405. (in Chinese)
- [8] 魏双会, 褚金奎, 杜小振. 压电发电机建模研究[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(6): 27-30.
Wei Shuanghui, Chu Jinkui, Du Xiaozhen. Study on analytical model for piezoelectric generator[J]. Transducer and Microsystem Technology, 2008, 27(6): 27-30. (in Chinese)
- [9] 王光庆. 压电叠堆式发电装置的建模与仿真分析[J]. 中国机械工程, 2009, 20(19): 2298-2304.
Wang Guangqing. Modeling and simulation of a piezoelectric stacked generator[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(19): 2298-2304. (in Chinese)
- [10] Chen Zhongsheng, Yang Yongmin, Deng Guanqian. Analytical and experimental study on vibration energy harvesting behaviors of piezoelectric cantilevers with different geometries[C]//1st International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. Nanjing, China: IEEE Computer Society, 2009.
- [11] Frank G, Peter W. Characterization of different beam shapes for piezoelectric energy harvesting [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2008, 18 (10):1-7.
- [12] Yuan Jiangbo, Xie Tao, Chen Weishan. Energy harvesting with piezoelectric cantilever[C]//2008 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings. Beijing: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2008.
- [13] Lu F, Lee H P, Lim S P. Modeling and analysis of micro piezoelectric power generators for micro-electromechanical-systems applications[J]. Smart Materials and Structures, 2004, 13(1): 57-63.
- [14] Sameh B A, Fehmi N, Abdessattar A. Shape improvement for piezoelectric energy harvesting applications[C]//3rd International Conference on Signals, Circuits and Systems, Medenine. Tunisia: IEEE Computer Society, 2009.
- [15] Zheng Bin, Chang C J, Gea H C. Topology optimization of energy harvesting devices using piezoelectric materials[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2009, 38(1): 17-23.
- [16] Marc S W. Working equations for piezoelectric actuators and sensors[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 1999, 8(4): 529-533.
- [17] 陈伟. 压电发电装置的研制及其发电性能的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.



第一作者简介: 龚俊杰,男,1969年8月生,副教授。主要研究方向为工程问题的建模与仿真、复合材料力学与压电发电。曾发表《复合材料波纹梁吸能能力的数值模拟》(《航空学报》2005年第26卷第3期)等论文。
E-mail: gjunj@126.com

