

# 压电发电悬臂梁的非线性动力学建模及响应分析\*

郭抗抗<sup>1,2</sup> 曹树谦<sup>1,2†</sup>

(1. 天津大学机械工程学院, 天津 300072) (2. 天津市非线性动力学与混沌控制重点实验室, 天津 300072)

**摘要** 以单晶悬臂梁压电发电装置为研究对象, 在考虑压电材料非线性的情况下, 利用广义 Hamilton 原理、Rayleigh - Ritz 法、Euler - Bernoulli 梁理论及压电元件恒定电场假设建立了悬臂梁压电发电装置的分布式机电耦合模型, 通过数值计算分析谐振频率附近解的特性与系统参数及初始条件的关系, 揭示了压电材料非线性、外激励参数对系统响应的影响规律, 并通过实验验证了解析解的正确性. 结果表明, 压电材料的非线性特性会导致近似解的共振峰向左偏移, 呈现软特性的非线性特征; 当激励频率变化时, 系统响应存在多解、跳跃等现象, 主共振解的真正实现与初始条件的选取有关.

**关键词** 压电发电悬臂梁, 非线性建模, 主共振, 跳跃现象

DOI: 10.6052/1672-6553-2013-068

## 引言

微机电系统 (MEMS) 的发展开辟了一个全新的技术领域, 系统或产品微型化、智能化、集成化的发展方向势必要求其供电部分应具有体积小、能量密度高、集成度高、寿命长甚至长期无需更换等特点. 传统的供电电池不仅质量大, 体积大, 供能寿命有限, 需要定期更换, 而且还会带来材料浪费, 环境污染等问题. 目前用于向 MEMS 供电的振动能量采集装置主要有电磁式、静电式和压电式, 相对于其他发电方式, 压电发电装置利用压电材料的正压电效应将周围环境中的振动动能转化成可利用的电能具有明显优势<sup>[1]</sup>, 其结构简单、绿色环保、能量密度大、无电磁干扰, 可直接输出较高电压, 易于加工和实现微型化、集成化等, 因此备受关注<sup>[2]</sup>.

压电发电装置的核心元件是压电振子, 双晶或单晶悬臂梁是压电振子常用的结构形式<sup>[3]</sup>. 压电振子的工作模式可分为  $d_{31}$  和  $d_{33}$  两种, 其中  $d_{31}$  模式下压电振子的谐振频率较低, 更符合悬臂梁压电发电装置低频的工作环境要求<sup>[4]</sup>.

Sodano HA 等<sup>[5]</sup> 针对无附加质量的压电双晶悬臂梁, 建立了机电耦合动力学和电学模型, 并利用数值方法和实验方法对理论模型进行了验证.

Roundy S 等<sup>[6]</sup> 制备了双晶悬臂式压电发电模型, 并在梁的末端添加质量块以降低结构频率, 应用等效电路法对该模型进行了建模分析, 并通过实验给出了输出电压、功率与负载电阻的关系. duToit NE<sup>[7]</sup> 应用 Hamilton 原理、Rayleigh - Ritz 法及压电元件恒定电场假设, 对带集中质量的悬臂梁进行了建模分析. Jitsaria JA 等<sup>[8]</sup> 同样将双晶压电悬臂梁发电装置作为研究对象, 分别采用等效电路法、能量法以及 Euler - Bernoulli 与 Timoshenko 相结合的梁理论分析法对模型进行了描述, 并通过数值模拟和实验对上述三种方法进行了对比分析. Erturk A 等<sup>[9]</sup> 分别对串、并联的双晶压电悬臂梁进行了理论建模, 分别给出了基础平动和转动激励下系统的单模态及多模态频响方程, 并通过实验予以验证. 阚君武等<sup>[10]</sup> 建立了单、双晶压电梁发电能力的仿真分析模型, 研究了结构尺寸、激励方式及材料性能等对其发电能力的影响规律. 袁江波等<sup>[11]</sup> 对悬臂梁压电振子进行了有限元分析, 并对其发电性能进行了实验研究.

然而上述文献中所有压电材料均假设为线性材料. 事实上, 非线性是压电材料的本质特征, 即使在低场下也有明显的非线性现象<sup>[12]</sup>. 在压电发电研究中, 压电材料非线性却几乎被忽略<sup>[13]</sup>. duToit

2013-06-02 收到第 1 稿, 2013-10-01 收到修改稿.

\* 国家自然科学基金资助项目 (11172199) 和天津市自然科学基金重点项目 (11JCZDJC25400)

† 通讯作者 E-mail: sqcao@tju.edu.cn

NE<sup>[7]</sup>研究发现,共振区内线性模型预测的结果与实验结果相差较大,并预测是忽略材料非线性所致.目前在压电发电研究中,只有少数文献考虑到压电材料非线性. Stanton SC 等<sup>[14]</sup>考虑压电材料三次非线性本构关系,通过理论建模分析了压电悬臂梁的发电特性,指出在较大激励振幅下,线性结果与实验结果相差较大,说明线性结果的局限性.

本文以带集中质量的单晶悬臂梁压电发电系统为研究对象.考虑非线性压电效应,即电致弹性和电致伸缩效应,利用广义 Hamilton 原理及 Rayleigh - Ritz 法建立其机电耦合模型;通过数值计算分析了压电材料非线性及外激励条件等对系统响应的影响.为深入研究材料非线性对压电俘能结构发电性能的影响规律提供一定的理论依据.

## 1 非线性动力学建模

针对基础激励下具有附加质量的单晶悬臂梁压电振子,考虑其  $d_{31}$  工作模式下的振动,如图 1 示.梁长为  $L$ ,宽为  $b$ ,厚为  $t_0$ ,单晶悬臂梁的上层为压电层(厚度为  $t_p$ ),下层为弹性金属结构层(厚度为  $t_s$ ),极化方向( $P$  方向)沿 3 方向, $x$  表示轴向坐标(沿着梁的长度方向,即 1 方向), $y$  表示纵向坐标(沿着梁的厚度方向,即 3 方向).

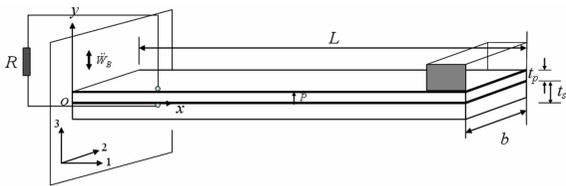


图1 悬臂式压电发电系统模型

Fig. 1 the vibrating model of piezoelectric cantilever with base excitation

对于弹性金属梁结构而言,其应力 - 应变具有如下线性关系:

$$T_1 = c_{11}^s S_1 \quad (1)$$

其中,  $c_{11}^s$  为刚度系数矩阵,  $T_1$  及  $S_1$  表示沿梁长度方向的应力、应变.

考虑非线性压电效应,压电材料的非线性本构关系可以表示为<sup>[15]</sup>

$$\begin{cases} T_1 = c_{11}^E S_1 - e_{31} E_3 - \gamma_{113} S_1 E_3 - \frac{1}{2} \beta_{133} E_3^2 + C_{111}^E S_1^2 \\ D_3 = \varepsilon_{33}^S E_3 + e_{31} S_1 + \frac{1}{2} S_1^2 \gamma_{113} + \beta_{133} S_1 E_3 + \nu_{333} E_3^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $E_3$  和  $D_3$  表示沿梁厚度方向的电场强度和电

位移,  $c_{11}^E$  为刚度系数,  $e_{31}$  为压电系数,  $\varepsilon_{11}^S$  为介电常数,  $C_{111}^E$  为二次非线性刚度系数,  $\gamma_{113}$  为电致弹性系数,  $\beta_{133}$  为电致伸缩系数.  $\nu_{333}$  为二次非线性介电常数.

基础激励下,压电悬臂梁存在机械能和电能的转换,适于机电耦合系统的广义 Hamilton 变分原理<sup>[7]</sup>

$$\int_{t_1}^{t_2} [\delta(T_k - U + W_e) + \delta W] dt = 0 \quad (3)$$

其中,  $T_k$  为系统动能,  $U$  为系统势能,  $W_e$  为压电陶瓷的电能,  $\delta W$  为外力做功的变分.

考虑梁的一阶模态,并将压电元件上下表面两金属电极看作一个电极对,应用 Rayleigh - Ritz 法, Euler - Bernoulli 梁理论及压电元件恒定电场假设

$$u(x, t) = \psi_r(x) r(t) \quad (4)$$

$$S_1 = -y \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} = -\gamma \psi_r'' r(t) \quad (5)$$

$$E_3 = -\frac{\partial \psi_v(y)}{\partial y} v(t) = -\psi_v' v(t) = \frac{1}{t_p} v(t) \quad (6)$$

其中,  $u(x, t)$  为梁的横向相对位移,  $\Psi_r(x)$  表示悬臂梁的一阶弯曲模态振型函数,  $r(t)$  表示梁横向振动位移模态坐标,  $\Psi_v(x)$  表示电势分布函数,  $v(t)$  表示广义电压模态坐标.

从而得到系统的运动方程

$$M\ddot{r} + C\dot{r} + Kr - \theta v + \frac{3}{2} N_1 r v + \frac{3}{4} N_2 v^2 - \frac{3}{2} N_3 r^2 = -B_f \ddot{w}_B \quad (7)$$

$$\theta r + C_p v - \frac{3}{4} N_1 r^2 - \frac{3}{2} N_2 r v - \frac{3}{2} D_p v^2 + q = 0 \quad (8)$$

其中,  $M$  和  $K$  分别是层合梁振子的模态质量和模态刚度,  $\theta$  和  $C_p$  分别是机电耦合系数和压电元件的电容,  $N_1$ 、 $N_2$  及  $N_3$  是方程非线性项的系数,  $B_f$  为外部激励项系数.

设外加基础激励  $\ddot{w}_B = Z_e \cos(\Omega_e t)$ , 并假设负载电阻为纯电阻  $R_L$ , 于是(7)、(8)两式可化为

$$\begin{aligned} \ddot{r} + 2\zeta_m \omega_1 \dot{r} + \omega_1^2 r - \frac{\theta}{M} v + \frac{3}{2} \frac{N_1}{M} r v + \frac{3}{4} \frac{N_2}{M} v^2 - \\ \frac{3}{2} \frac{N_3}{M} r^2 = -\frac{B_f}{M} Z_e \cos(\Omega_e t) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\theta r + C_p \dot{v} - 3D_p v \dot{v} - \frac{3}{2} N_1 r \dot{r} - \frac{3}{2} N_2 \dot{r} v -$$

$$\frac{3}{2}N_2 r \dot{v} + \frac{1}{R_L} v = 0 \quad (10)$$

其中  $\omega_1$  为一阶固有频率,  $\zeta_m$  为阻尼比, 且

$$\begin{cases} \omega_1 = \sqrt{\frac{K}{M}} \\ \zeta_m = \frac{c}{2M\omega_1} \end{cases} \quad (11)$$

对上述动力学方程进行无量纲化处理, 定义特征时间、特征长度、特征电压分别为

$$t_c = \frac{1}{\omega_1}, x_c = t_p + t_s = t_0, v_c = \frac{x_c \theta}{C_p} \quad (12)$$

代入(9)、(10)得到无量纲动力学方程:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + 2\zeta_m \dot{x} + x - \frac{\theta^2}{MC_p \omega_1^2} u + \frac{3N_1 \theta t_0}{2MC_p \omega_1^2} x u + \\ \frac{3N_2 \theta^2 t_0}{4MC_p^2 \omega_1^2} u^2 - \frac{3N_3 t_0}{2M\omega_1^2} x^2 = \frac{B_f Z_e}{M\omega_1^2 t_0} \cos\left(\frac{\Omega_e}{\omega_1} \tau\right) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \ddot{u} + \dot{x} - \frac{3D_p \theta t_0}{C_p^2} u \dot{u} - \frac{3N_1 t_0}{2\theta} x \dot{x} - \frac{3N_2 t_0}{2C_p} \dot{x} u - \\ \frac{3N_2 t_0}{2C_p} x \dot{u} + \frac{1}{R_L C_p \omega_1} u = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

引入无量纲小参数  $\varepsilon$ , 令

$$\begin{cases} \kappa^2 = \frac{\theta^2}{MC_p \omega_1^2}, \alpha_1 = \frac{3N_1 t_0}{2\varepsilon \theta}, \alpha_2 = \frac{3N_2 t_0}{2\varepsilon C_p}, \alpha_3 = \frac{1}{R_L C_p \omega_1} \\ \alpha_4 = \frac{3N_3 t_0}{2\varepsilon M \omega_1^2}, \alpha_5 = \frac{3D_p \theta t_0}{\varepsilon C_p^2}, f = \frac{B_f Z_e}{M \omega_1^2 t_0 \varepsilon^2}, \Omega = \frac{\Omega_e}{\omega_1} \end{cases} \quad (15)$$

方程(13)、(14)又可进一步化为

$$\begin{aligned} \ddot{x} + x - \kappa^2 u + 2\varepsilon^2 \zeta_m \dot{x} + \varepsilon(\kappa^2 \alpha_1 x u + \frac{1}{2} \kappa^2 \alpha_2 u^2 - \\ \alpha_4 x^2) = \varepsilon^2 f \cos(\Omega \tau) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\ddot{u} + \alpha_3 u + \dot{x} - \varepsilon(\alpha_1 x \dot{x} + \alpha_2 \dot{x} u + \alpha_2 x \dot{u} + \alpha_5 u \dot{u}) = 0 \quad (17)$$

## 2 压电层合梁动态响应数值分析

采用四、五阶 Runge - Kutta 法对无量纲后的方程进行数值模拟, 分析悬臂式压电发电系统在不同基础激励及初始条件下的响应特性.

取方程各参数  $\varepsilon = 0.1, \kappa = 0.1, \zeta_m = 1, \alpha_1 = 1, \alpha_2 = 1, \alpha_3 = 0.1, \alpha_4 = 3.2, \alpha_5 = 1, f = 2.5, \sigma = -4$ , 初始条件为  $(x(0), \dot{x}(0), u(0), \dot{u}(0)) = (0, 0, 0, 0)$ , 计算得到原系统稳态解的时间历程图和相图, 如图2所示.

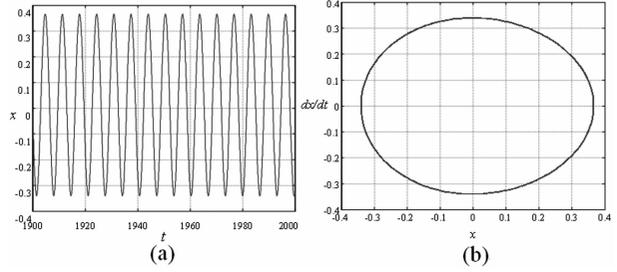


图2 系统的时间历程图(a)和相图(b)

Fig. 2 time history (a) and Phase trajectory (b)

若  $(x(0), \dot{x}(0), u(0), \dot{u}(0)) = (1, 0.5, 0, 0)$ , 得到原系统稳态解的时间历程图和相图, 如图3所示.

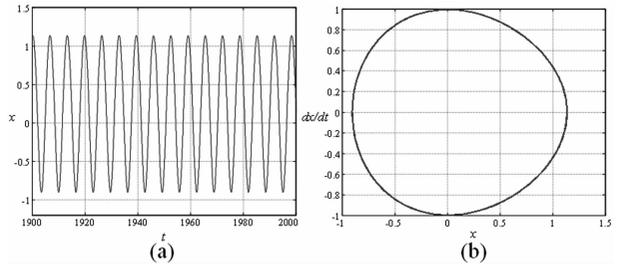


图3 系统的时间历程图(a)和相图(b)

Fig. 3 time history (a) and Phase trajectory (b)

从图2、图3可以看出, 在相同的系统参数和外激励 ( $\sigma = -4$ ) 下, 不同的初始条件对应的系统响应不同. 图2中的系统响应  $x$  稳定在振幅为 0.366 的极限环上; 图3中的系统响应  $x$  稳定在振幅为 1.137 的极限环上, 分别对应系统有两个稳定响应解. 由此可以看出, 多解支的真正实现与系统的初始条件有关.

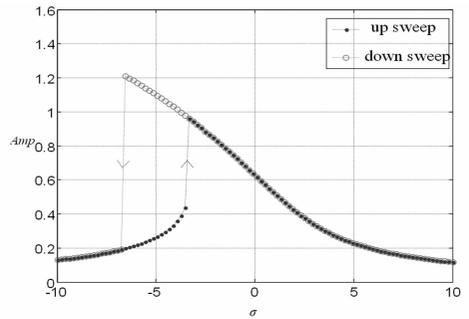


图4 系统主共振的跳跃现象

Fig. 4 the jumping phenomenon of the primary resonance

为了进一步搞清系统响应的多解、跳跃现象以及不同解支的稳定性, 通过数值的方法对原方程分别进行升、降频扫描模拟, 如图4所示. 从该图可以看出, 升频扫描下系统响应在  $\sigma = -3.737$  时向上跳跃; 降频扫描下则在  $\sigma = -6.162$  处向下跳跃. 在

-3.737 到 -6.162 区间内系统出现多解现象, 上下两个解支对应两个稳定焦点, 对于该区间内的某一固定  $\sigma$  而言, 响应解落在上解支还是下解支取决于初始条件的选取。

图 5 给出了对应线性系统, 即不考虑材料非线性影响时 ( $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_4 = \alpha_5 = 0$ ) 系统的主共振幅频响应曲线。对比可以看出, 由于压电材料非线性的影响, 系统主共振的幅频响应曲线出现了共振峰偏移以及共振点附近的多解和跳跃现象, 同时共振频带也明显拓宽。

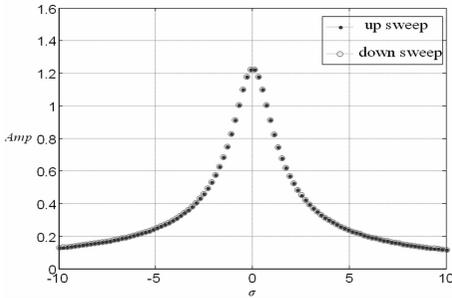


图 5 对应线性系统的主共振幅频响应

Fig. 5 the amplitude - frequency response of the primary resonance for  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_4 = \alpha_5 = 0$

图 6 给出系统响应随非线性刚度系数  $\alpha_4$  的变化曲线。当  $\alpha_4 = 0$  时, 没有跳跃现象; 当  $\alpha_4$  不为 0 时, 则发生跳跃现象, 即响应在某一确定激励频率下存在多解; 随着  $\alpha_4$  的增大, 近似解的共振峰向左

偏移增大, 呈现软特性的非线性性质, 共振区对应频率减小。

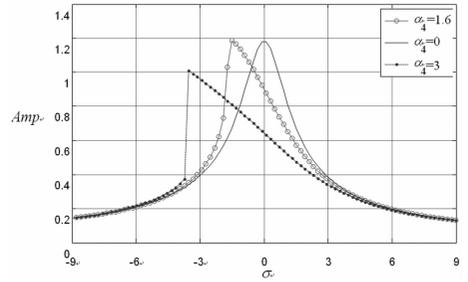


图 6  $\alpha_4$  变化时稳态主共振的幅频响应曲线

Fig. 6 the amplitude - frequency response of the primary resonance with different  $\alpha_4$

### 3 实验研究

为了验证上述的分析结果, 建立悬臂式压电发电实验装置, 如图 7 所示。主要参数值见表 1。

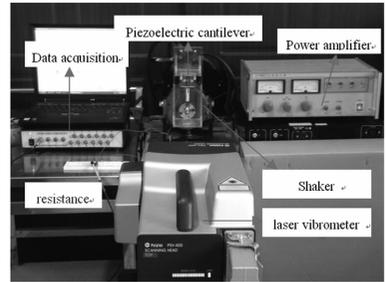


图 7 实验装置图

Fig. 7 Experimental setup

表 1 压电悬臂梁结构参数

Table 1 Geometrical parameters of piezoelectric cantilever

Cantilever properties					Piezoelectric laminate properties			Substrate properties	
Parameter	Length	Width	End mass	Thickness	Relative permittivity	Density	Coupling coefficient $d_{31}$	Thickness	Density
Value	80mm	10mm	5g	0.23mm	3500	7500kg/m <sup>3</sup>	$-280 \times 10^{-12} \text{C/N}$	0.19mm	7500kg/m <sup>3</sup>

实验装置主要包括 PolytecPSV - 400 激光测振仪、YE5871 功率放大器、激振器、INV306DF 智能信号采集处理分析仪等。激光测振仪内置信号发生器, 可输出扫频信号以及频率、幅值可调的正弦信号。激励信号经功率放大器对激振器进行振动控制, 并采用加速度传感器测得激励幅值的大小, 为悬臂式压电发电装置提供激励源。利用激光测振仪获得梁的振动响应, 同时利用数据采集器采集电压响应数据。

选取外激励幅值为  $1.5g$  ( $g = 9.8\text{m/s}^2$ ), 频率为  $8.2\text{Hz}$  测得压电发生装置的响应特性如图 8 所

示, 系统做周期运动。不改变激励的幅值, 逐渐增大激励频率, 测量系统在不同激励频率下的稳态响应特性, 如图 9 所示。

从图 9 可以看出, 稳态位移响应的峰值有向左偏移的趋势, 实验结果定性反映出压电发电系统的软非线性特性, 与数值模拟结果的结论一致。综上分析表明, 压电结构固有的材料非线性特性能有效降低结构的共振频率, 这一点更有利于结构适应具有宽、低频特点的环境振动。非线性是压电材料的固有特性, 在对压电结构的设计中, 考虑这一特性有利于优化结构工作频带与环境振动频带的吻合

性,从而提高发电效率.

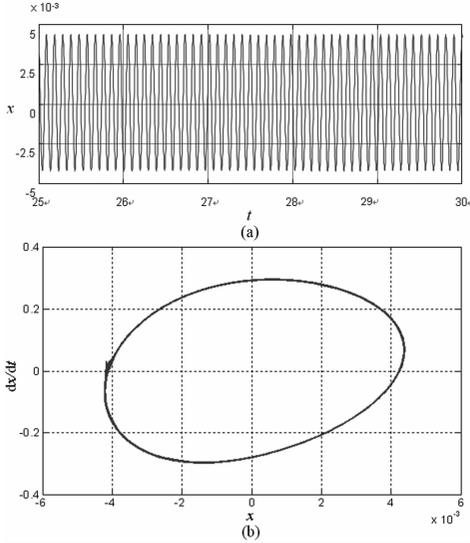


图8 时域图(a)及相图(b)

Fig. 8 time domain graph(a) and phase diagram(b)

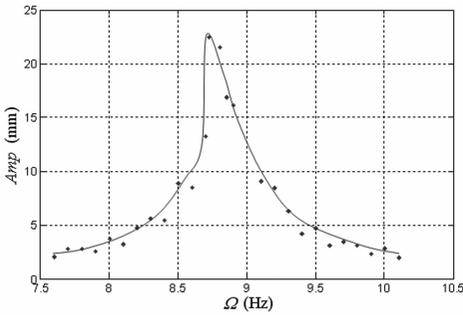


图9 不同激励频率下系统的稳态位移响应幅值

Fig. 9 the amplitude - frequency response with different excitation frequency

## 4 结论

本文建立了带有集中质量的悬臂式压电发电系统的非线性动力学模型. 通过数值和实验研究了不同的结构参数数及外激励参数下系统响应特性. 结果表明, 压电结构主共振状态下, 结构具有较大的振动幅值, 可从外界提取更多的能量. 此时压电材料固有的非线性特性对结构主共振响应的影响较为突出. 系统的响应共振峰向左偏移, 对应外激励频率小于系统的固有频率. 当外激励频率变化时响应振幅发生跳跃现象, 响应解的真正实现取决于解的稳定性条件及初始条件的选取.

本文结论为研究压电悬臂式发电系统的非线性动力学机理奠定了一定的基础, 为结构设计中参数的选择及发电性能的优化提供一定的理论依据.

## 参 考 文 献

- 1 Cook-Chennault K A, Thambi N, Sastry A M. Powering MEMS portable devices-a review of nonregenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems. *Smart Materials and Structures*, 2008, 17(4):043001
- 2 Ammar Y, Buhrig A, Marzencki M, et al. Wireless sensor network node with asynchronous architecture and vibration harvesting micro power generator. In: Proceedings of the 2005 Joint Conference on Smart Objects and Ambient intelligence; Innovative Context-Aware Services; Usages and Technologies, 2005:287~292
- 3 Lu F, Lee H P, Lim S P. Modeling and analysis of micro piezoelectric power generators for micro-electromechanical-systems applications. *Smart Materials and Structures*, 2004, 13: 57~63
- 4 Roundy S, Wright P K, Rabaey J. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. *Computer Communicate*, 2003, 26(11): 1131~1144
- 5 Sodano H A, Park G, Inman D J. Estimation of electric charge output for piezoelectric energy harvesting. *Strain*, 2004, 40: 49~58
- 6 Roundy S, Wright P K. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics. *Smart Materials and Structures*, 2004, 13: 1131~1142
- 7 duToit N E. Modeling and design of a MEMS piezoelectric vibration energy harvester [PhD Thesis]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2005
- 8 Ajitsaria J, Choe S Y, Shen D and Kim D J. Modeling and analysis of a bimorph piezoelectric cantilever beam for voltage generation. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16: 447~454
- 9 Erturk A, Inman D J. An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations. *Smart Materials and Structures*, 2009, 18(2): 1~18
- 10 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. 光学精密工程, 2008, 16(1): 71~75 (Kan J W, Tang K H, Wang S Y. Modeling and simulation of piezoelectric cantilever generators. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(1): 71~75(in Chinese))
- 11 袁江波,谢涛,陈维山等. 悬臂梁压电发电装置的实验研究. 振动与冲击, 2009, 28(7): 69~72 (Yuan J B,

- Xie T, Chen W S, et al. Experimental study on electricity-generating capacity for a piezoelectric cantilever. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(7): 69 ~ 72 (in Chinese))
- 12 曹树谦,高健. 压电层合圆板的非线性动力学模型与主共振响应. 天津大学学报, 2007, 40(2): 139 ~ 146 (Cao S Q, Gao J. Nonlinear Dynamic Model and Primary Resonance of Piezoelectric Laminated Disk. *Journal of Tianjin University*, 2007, 40(2): 139 ~ 146(in Chinese))
- 13 Stanton R C, Erturk A, Mann B P, et al. Resonant manifestation of intrinsic nonlinearity within electroelastic micropower generators. *Applied Physics Letters*, 2010, 97: 1 ~ 3
- 14 Stanton S C, Erturk A, Mann B P, et al. Nonlinear piezoelectricity in electroelastic energy harvesters-Modeling and experimental identification. *Journal of applied physics*, 2010, 108: 1 ~ 9
- 15 Gao J, Cao S Q. Second-order approximation of primary resonance of a disk-type piezoelectric stator for traveling wave vibration. *Nonlinear Dynamics*, 2010, 61: 591 ~ 603

## NONLINEAR MODELING AND ANALYSIS OF PIEZOELECTRIC CANTILEVER ENERGY HARVESTER \*

Guo Kangkang<sup>1,2</sup> Cao Shuqian<sup>1,2†</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China )

(2. Tianjin Key Laboratory of Nonlinear Dynamics and Chaos Control, Tianjin 300072, China )

**Abstract** The electromechanical coupling model of cantilevered piezoelectric harvester was developed by considering the nonlinearities of piezoelectric material, based on Hamilton theory, Rayleigh-Ritz method, Euler-Bernoulli beam theory and constant electrical field across the piezoelectric element. The response characteristics of the system were investigated numerically, and the influences of piezoelectric material nonlinear coefficient on the system response were analyzed. By exploring the nonlinear characteristics of the piezoelectric vibrator near the resonant frequency, the nature of the multi-solutions and jump phenomena in the resonance region was revealed. The results were verified experimentally. which provides a theoretical basis for the study of nonlinear mechanism of piezoelectric power generation system.

**Key words** piezoelectric cantilever for power generation, nonlinearity, primary resonance, jump phenomena

Received 2 June 2013, revised 1 October 2013.

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (11172199) and the Key Project of Tianjin Municipal Natural Science Foundation (11JCZDJC25400)

† Corresponding author E-mail: sqcao@tju.edu.cn