第40卷第1期　　计 算 力 学 学 报　　Vol. 40, No. 1
2023 年 2 月　　Chinese Journal of Computational Mechanics　　February 2023

DOI:10.7511/jslx20210820001

逆压电效应对双稳态压电俘能器的性能影响研究

李园芳[1]，　何孔智[1]，　张　宇*[1]，　康小方[2]

(1.安徽农业大学 工学院,合肥 230036; 2.安徽建筑大学 土木工程学院,合肥 230601)

摘　要:为了研究逆压电效应对压电俘能效果的具体影响,本文首先分析了双稳态压电俘能器的分布参数型能量表达式,然后应用广义 Hamilton 变分原理推导了该俘能系统的动力学方程,最后采用谐波平衡法获得了动力响应解析解。通过对比不同激励频率下的数值仿真结果,讨论了逆压电效应对俘能系统动力响应的影响规律。结果表明,逆压电效应在不同工况下对俘能效果的影响并非单纯起抑制作用,在一定激励强度的高频激励下,逆压电效应对俘能效果的影响起增强作用;弱强度激励下的俘能效果则全程受到抑制作用。

关键词:逆压电效应;双稳态;压电俘能器;谐波平衡法

中图分类号:O322　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1007-4708(2023)01-0153-06

1　引　言

压电俘能技术是通过收集环境中无处不在的振动能量,并将其转化为电能的一种技术[1]。该技术很早就渗透进社会生活的各个方面,而伴随着MEMS电子产品的设计与发展[2],压电技术也开始与其相融合,并逐步应用到医疗植入设备、无线传感网络和穿戴式设备等方面,获得了学术界和工业界的青睐[3]。

国内外学者基于压电俘能器的工作原理是正压电效应理论[4]的基础上,对压电俘能器系统进行了不断的研究。Lee 等[5]设计出悬臂梁式扬声器件,证明了在压电材料中正压电效应与逆压电效应是同时存在的。姚林泉等[6]通过研究悬臂梁俘能器在压电效应下的弯曲行为,发现了压电效应与电场之间的关系。Wieland 等[7]则创新性地发现对骨质结构施加电场,该结构中的逆压电效应会引发一定的应变。

Erturk 等[8]同样也总结过,忽略逆压电效应是在一定程度上简化了压电俘能器的建模分析过程,而大多数文献都忽略了逆压电效应对压电俘能器动力学特性的影响。于是本文在磁性双稳态悬臂梁俘能器的建模上考虑了逆压电效应的影响,在前人研究的基础上,详细分析建立了逆压电效应影响下的双稳态压电俘能器系统的能量表达式,利用广义 Hamilton 变分原理建立了该系统的动力学方程,然后采用谐波平衡法得到了响应位移、输出电压和功率的解析解,通过对比不同工况下的模拟结果,详细分析了逆压电效应对俘能系统动力响应的影响特点及规律。

2　逆压电效应下双稳态悬臂梁俘能器建模

图 1 为双稳态悬臂梁俘能器建模模型,外接电路为双压电层串联,x 方向为悬臂梁的水平轴方向,z 方向为悬臂梁的厚度方向,受到外界激励在悬臂梁夹紧端的横向位移为 $l(x,t)$,在 z 轴方向的基础运动位移为 $w_b(t)$。该建模中悬臂梁长为 l_b,宽为 b,末端磁铁和另外两块磁铁相同,长宽高分别为 $2b_m \times h_m \times h_m$,质量为 M_c,悬臂梁质量为 M_x。

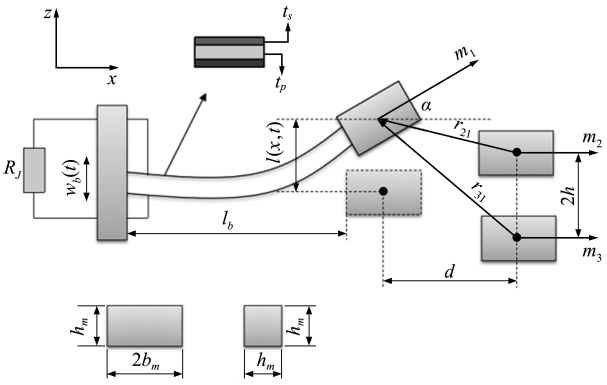


图 1　双稳态悬臂梁俘能器模型

Fig. 1　Bi-stable cantilever beam energy harvester model

收稿日期:2021-08-20;**修改稿收到日期**:2021-11-17.

基金项目:安徽省教育厅自然科学重点项目(KJ2019A0747);安徽省自然科学基金资助项目(2008085QE245);安徽农业大学人才启动经费项目(rc412009).

作者简介:张　宇*(1986-),男,博士,讲师(E-mail:zxmandzy@126.com).

本文主要考虑条件为一阶模态，因此沿着梁夹紧端的横向位移 $l(x,t)=\phi(x)\eta_r(t)$ [9]，其中 $\phi(x)$ 为一阶模态振型函数，$\eta_r(t)$ 为模态坐标，悬臂梁俘能器的无阻尼频率[10]可由悬臂梁横截面的有效惯性矩 I_p 和压电层弹性常数 c_{11}^p 获得，如式(1)所示

$$\omega_{fn}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{6c_{11}^p I_p}{M_c l_b(2l_b^2+6l_b b_m+6b_m^2)}} \tag{1}$$

式中 $$I_p=2\left[\frac{bt_p^3}{12}+b\left(\frac{t_p+t_s}{2}\right)^3\right]+\frac{b\eta_p t_s^3}{12} \tag{2}$$

式中 t_p 为压电层厚度，t_s 为基础层厚度，$\eta_p=c_{11}^s/c_{11}^p$（基础层弹性常数/压电层弹性常数）。

从功能角度分析，该模型的 Hamilton 变分原理公式[12]可表示为

$$\int_{t_1}^{t_2}[\delta(T+W_e-U_L-U_M)+\delta W_{nc}]\mathrm{d}t=0 \tag{3}$$

式中 δ 为变分符号，T,W_e,U_L,U_M 和 W_{nc} 依次为逆压电效应影响下的系统动能、系统电能、悬臂梁的势能、磁力势能以及其他力所做的功。

基于以上分析，逆压电效应下的悬臂梁俘能器系统的总动能为

$$T=\frac{1}{2}M_x\int_0^{l_b}[l'(x,t)+w'_b(x,t)]^2 d_x+\frac{1}{2}M_c[l'(l_b,t)+w'_b(l_b,t)]^2 \tag{4}$$

在考虑逆压电效应情况下，压电层中的压电系数 e_{31} 为负，压电层应力表示为 $\overline{T}_1^P$，基础层应力表示为 $\overline{T}_1^S$，于是，悬臂梁的势能具体表示为

$$U_L=\frac{1}{2}\left(\int_{v_s}\overline{S}_1\overline{T}_1^S\mathrm{d}V_s+\int_{v_p}\overline{S}_1\overline{T}_1^P\mathrm{d}V_p\right)=\frac{1}{2}E_pI_p\int_{v_p}^{l_b}[l''(x)]^2\mathrm{d}x-\frac{1}{2}\int_0^{l_b}\vartheta_1\cdot v(t)l''(x)\mathrm{d}x \tag{5}$$

式中 E_pI_p 为悬臂梁的弯曲刚度，$l''(x)$ 为横向位移的二阶导数，带有 ϑ_1 的项为逆压电效应所影响的项，具体见式(6)，$v(t)$ 为压电层表面的电势差。

$$\vartheta_1=\frac{-e_{31}b}{2t_p}z^2\Big|_{z=z_1}^{z=z_1+t_p},\quad v(t)=R_J\dot{q} \tag{6a,6b}$$

式中 z_1 为压电层下表面的竖向坐标，R_J 为串联电阻的大小，$\dot{q}$ 为电荷在时间 t 下的求导，基于逆压电效应是一种放电现象，从而俘能器系统的电能表达式也有所改变，具体表达式如下，

$$W_e=\frac{1}{2}\int_{v_p}E_3D_3\mathrm{d}v_p=\frac{1}{4}v^2(t)C_{R_P}+\frac{1}{4}\int_0^{l_b}\frac{e_{31}b}{t_p}z^2\Big|_{z=z_1+t_p}^{z=z_1}v(t)l''(x)\mathrm{d}x \tag{7}$$

式中 E_3 为以电压形式表示的电场，D_3 为串联电场中的电位移，C_{R_P} 为逆压电效应影响下的系统电容，可表示为

$$D_3=\varepsilon_{33}^S E_3+e_{31}\overline{S}_1 \tag{8a}$$

$$C_{R_p}=C_p-\frac{e_{31}t_{pc}bl_e}{c_{11}^p I_p}\vartheta_1 \tag{8b}$$

$$t_{pc}=\frac{t_p+t_s}{2},\quad C_p=\frac{\varepsilon_{33}^S bl_b}{2t_p} \tag{8c,8d}$$

式中 C_p 为不考虑逆压电效应下的系统电容，ε_{33}^S 为常应变条件下的介电常数。

外力做功 W_{nc} 考虑到，悬臂梁运动应对阻力所做的功和电荷通过电阻做的功，可表示为

$$\delta W_{nc}=v(t)\delta q-\int_0^{l_b}c_a\frac{\partial l(x,t)}{\partial t}\delta l(x,t)\mathrm{d}x-\int_{v_p+v_s}c_s\frac{\partial\overline{S}_1}{\partial t}\partial\overline{S}_1\mathrm{d}v \tag{9}$$

式中 c_a 为外部阻尼系数，c_s 为内部阻尼系数。

由于悬臂梁末端放置的是磁铁，根据磁偶极子模型[13]可得到系统的磁力势能

$$U_M=\frac{\delta_0}{4\pi}\left[\frac{m_2}{\|r_{21}\|_2^3}+\frac{3_2}{\|r_{31}\|_2^3}-\frac{3r_{21}(m_2\cdot r_{21})}{\|r_{21}\|_2^5}-\frac{3r_{31}(m_3\cdot r_{31})}{\|r_{31}\|_2^5}\right]\cdot m_1 \tag{10}$$

式中 δ_0 为真空磁导率，m_1,m_2 和 m_3 为各磁铁的极偶子的磁矩，α 为偏转角度，r_{21} 为磁铁 2 到磁铁 1 的向量，r_{31} 为磁铁 3 到磁铁 1 的向量。由于只考虑一阶模态，式(10)在一阶模态处展开得到

$$\delta U_M=[k_1\eta_r+k_2\eta_r^3+o(\eta_r^5)]\delta\eta_r \tag{11}$$

$$k_1=\frac{\delta_0M_0^2b_m^2h_m^4}{\pi(d^2+h^2)^{9/2}}[6\phi(l)^2(4d^4-27d^2h^2+4h^4)+2(d^2+h^2)[6\phi(l)\phi'(l)(d^2-4h^2)]+\phi'(l)^2(2d^4+d^2h^2-h^4)] \tag{12}$$

$$k_2=\frac{\delta_0M_0^2b_m^2h_m^4}{\pi(d^2+h^2)^{13/2}}[3(d^2+h^2)^3(4d^3-16dh^2)\cdot\phi(l)\phi'(l)^3+6\phi(l)^2\phi'(l)^2(d^2+h^2)^2\cdot(4d^4+4h^4-27d^2h^2)+60d\phi(l)^3\phi'(l)(d^2+h^2)(d^4-12d^2h^28h^4)+15\phi(l)^4[6\phi(l)^4-101d^4h^2+116d^2h^4-8h^6)+3\phi'(l)^4(d^2+h^2)^3(2d^4+d^2h^4-h^4)] \tag{13}$$

整理上述公式，把式(4,5,7,9,11)代入哈密顿变分方程，从而得到逆压电效应下的俘能器系统的动力学方程如式(14)所示

$$M\ddot{\eta}_r + C\dot{\eta}_r + (K + k_1)\eta_r + k_2\eta_r^3 - (\xi + \xi_v)v = -A_f\ddot{w}_b \tag{14a}$$

$$\frac{1}{R_J}v + C_{R_P}v + \xi\dot{\eta}_r = 0 \tag{14b}$$

式中　M为模态质量且认定$M=1$，C为模态阻尼系数，近似认为一个固定值，K为复合梁的模态刚度，ξ为模态耦合项，$\xi_v v$为逆压电效应影响的项，若不考虑逆压电效应，$\xi_v=0$，A_f为外部激励系数，具体表达式如下。

$$K = \int_{v_p} c_{11}^p [E_p\phi''(x)]^2 \mathrm{d}v_p + \int_{v_s} c_{11}^s [E_p\phi''(x)]^2 \mathrm{d}v_s \tag{15a}$$

$$\xi = \vartheta_1 \int_0^{l_b} \phi''(x)\mathrm{d}x \tag{15b}$$

$$\xi_v = l_e(l_b + 2b_m - l_q)/(2c_{11}^p I_p) \tag{15c}$$

$$\ddot{w}_b = A_e\cos(\Omega t) \tag{15d}$$

式中　A_e为加速度下的激励幅值，Ω为激励频率，为了更好地探究数据对建模的影响，式(15)可进一步无量纲化为

$$\ddot{z}(\tau) + 2a_1\dot{z}(\tau) + z(\tau) + a_2 z(\tau) + a_3[z(\tau)]^3 - a_4 u(\tau) - a_5 u(\tau) = f\cos(\omega\tau) \tag{16a}$$

$$\dot{u}(\tau) + a_6 u(\tau) + \dot{z}(\tau) = 0 \tag{16b}$$

式中

$$\begin{cases} z(\tau) = \dfrac{\eta_r}{l_b},\ a_1 = \dfrac{C}{\omega_0},\ a_2 = \dfrac{K_1}{K},\ 3_2 = \dfrac{k_2 l_b^2}{K} \\ a_4(\tau) = \dfrac{\xi^2}{KC_{R_P}},\ \tau = \omega_0 t,\ u(\tau) = \dfrac{vC_{R_P}}{l_b\xi},\ \omega = \dfrac{\Omega}{\omega_0} \\ \omega_0 = 2\pi\omega_{fn},\ a_5 = \dfrac{3l_e(l_b + 2b_m - l_q)\vartheta_1}{l_b(2l_b^2 + 6l_b b_m + 3b_m^2)} \\ a_6 = \dfrac{1}{R_J C_{R_P}\omega_0},\ f = -\dfrac{A_f A_e}{Kl_b} \end{cases}$$

3　谐波平衡法分析求解

使用谐波平衡法对方程(16)进行求解，则可以设解的形式为

$$z = A(\tau) + B(\tau)\sin(\omega\tau) + C(\tau)\cos(\omega\tau) \tag{17a}$$

$$u = D(\tau)\sin(\omega\tau) + E(\tau)\cos(\omega\tau) \tag{17b}$$

式中　系数均未知，可以将式(17)代入式(14)，令各阶谐波系数相等，且考虑系统为稳态运动，化简可得

$$A\left(1 + a_2 + a_3A^2 + \frac{3}{2}B^2 + \frac{3}{2}C^2\right) = 0 \tag{18a}$$

$$\chi B - \gamma C - (a_4 + a_5)D = 0 \tag{18b}$$

$$\gamma B - \chi C - (a_4 + a_5)D = f \tag{18c}$$

$$D = \omega(\omega C + Ba_6)/(\omega^2 + a_6^2) \tag{18d}$$

$$E = \omega(Ca_6 - B\omega)/(\omega^2 + a_6^2) \tag{18e}$$

振动响应幅值和电压频率响应幅值可由式(18)化简得

$$Z^2 = B^2 + C^2 = f^2/[(\bar{\chi})^2 + (\bar{\gamma})^2] \tag{19}$$

$$V^2 = D^2 + E^2 = \omega Z/\sqrt{\omega^2 + a_6^2} \tag{20}$$

$$\bar{\chi} = 1 + a_2 - \omega^2\left(1 - \frac{a_4 + a_5}{\omega^2 + a_6^2}\right) + a_3\left(3A^2 + \frac{3}{4}Z^2\right) \tag{21a}$$

$$\bar{\gamma} = 2a_1 + \frac{\omega a_6(a_4 + a_5)}{\omega^2 + a_6^2} \tag{21b}$$

4　逆压电效应对俘能效果的影响分析

双稳态悬臂梁俘能器的有关参数列入表1[14]。

表1　双稳态悬臂梁俘能器的参数

Tab. 1　Parameters of bi-stable cantilever beam energy harvester

名称	符号	数值
悬臂梁长度	l_b	71.68 mm
磁铁水平间距	d	9.5 mm
磁铁竖向间距	h	8.5 mm
压电片弹性模量	c_{11}^p	67 GPa
基层弹性模量	c_{11}^s	212 GPa
压电系数	e_{31}	$-11.6\ \mathrm{C/m^2}$
负载电阻	R_J	$4\times10^{10}\ \Omega$
压电片介电常数	ε_{33}^S	31.8×10^{-9} F/m

4.1　数值结果对比

由于考虑到逆压电效应的影响，俘能器系统的能量表达式发生了一定改变，从而基于谐波平衡法分析的部分参数也会发生变化，为了探究逆压电效应对系统动力学方程中参数的影响程度，本文利用数值分析方法对比了有无逆压电效应影响下的部分数值，结果列入表2。

表2　有无逆压电效应的主要参数对比

Tab. 2　Comparison of main parameters with or without inverse piezoelectric

参数	无逆压电	有逆压电	相对差异
K	8.5095×10^4	9.8490×10^4	15.7%
k_1	-2.6537×10^5	-2.6332×10^5	−0.77%
k_2	7.1451×10^{10}	6.8549×10^{10}	−4.06%
a_2	−2.11837	−2.67358	−14.3%
a_3	4314.0	3576.0	−17.1%
a_6	1.4896	1.4959	0.42%
ω_{fn}	291.72	313.83	7.58%
C_{R_P}	5.7533×10^{-8}	5.3251×10^{-8}	−7.44%

4.2 势能函数的对比

基于表 2 的分析结果，双稳态俘能器系统的磁力势能也会受到一定影响，从而直接导致势阱特性的变化。为便于直观对比，考虑逆压电效应和不考虑逆压电效应的两条势能曲线如图 2 所示，可以看出，这两条势能曲线比较接近，当 $-0.0347 < x < 0.0347$，逆压电情况下的势能大于无逆压电情况下的势能，而在其他范围内，则结果相反。

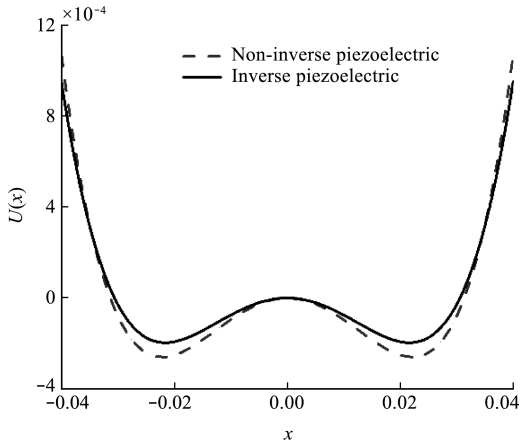


图 2 逆压电效应对势能曲线的影响

Fig. 2 Influence of the inverse piezoelectric effect on the potential energy curve

4.3 逆压电效应对系统频域图的影响

对比阱间运动和阱内运动[15]两种运动状态下，是否考虑逆压电效应对俘能器动力响应曲线的影响情况。当激励强度 $f=0.002$ 时，对梁端位移 Z、输出电压 V 和功率 P 分别进行了对比分析。

从图 3 可以看出，在阱间和阱内运动两种状态下，由于考虑到逆压电效应的影响，俘能器系统消耗了一定的能量，从而梁端位移曲线均倾向于左移，但是在阱间运动下，随着激励频率的增加，导致式(18)参数 χ 和 γ 受到的影响增大，从而逆压电效应下的梁端位移值逐渐大于无逆压电效应下的梁端位移值。

图 4 是基于谐波平衡法计算的式(20)得出的电压频率响应，其曲线形状变化与振动响应幅值的变化规律基本类似。

图 5 给出的是阱间和阱内运动时逆压电效应对输出功率影响的曲线，相比梁端位移和输出电压的频响曲线，考虑逆压电效应对输出功率频响曲线的影响尤为明显。这主要是因为逆压电效应除了对已有参数的影响外，还会对俘能系统的电容产生较大影响，从而增加了输出功率频响曲线的变化量。

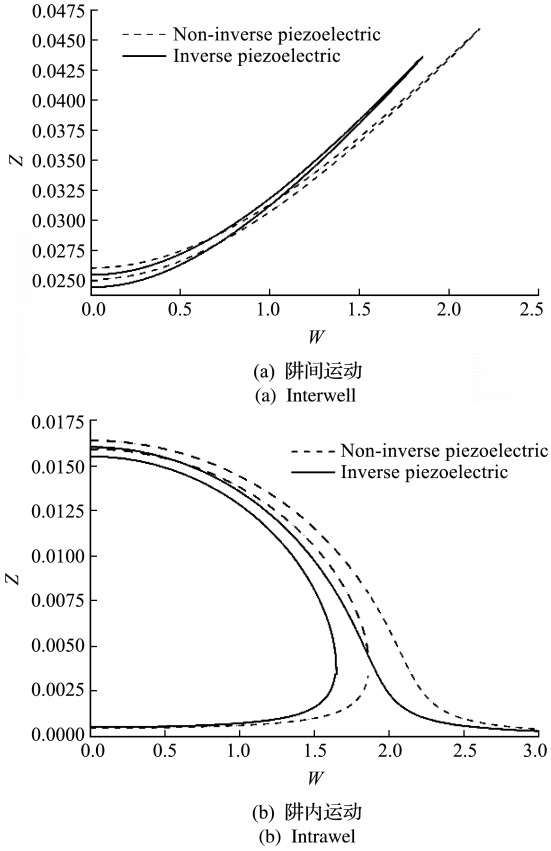


图 3 逆压电效应对梁端位移的影响

Fig. 3 Influence of inverse piezoelectric effect on the displacement of the beam end

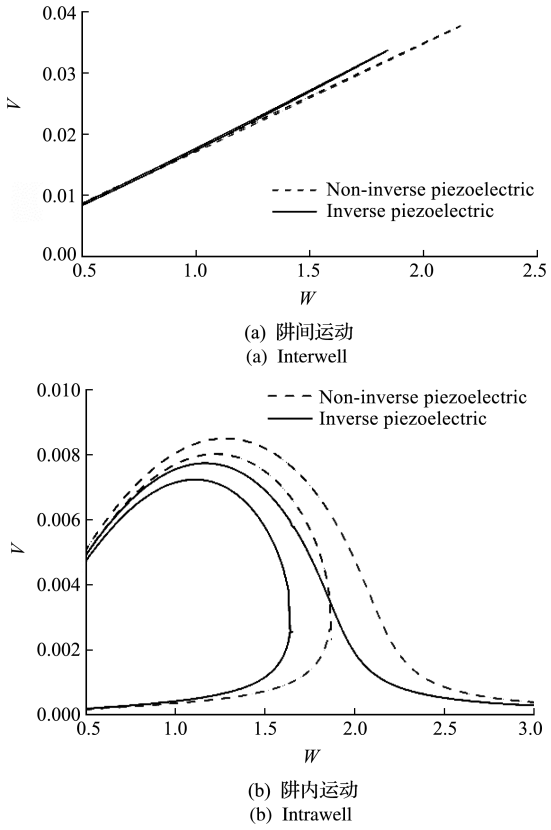
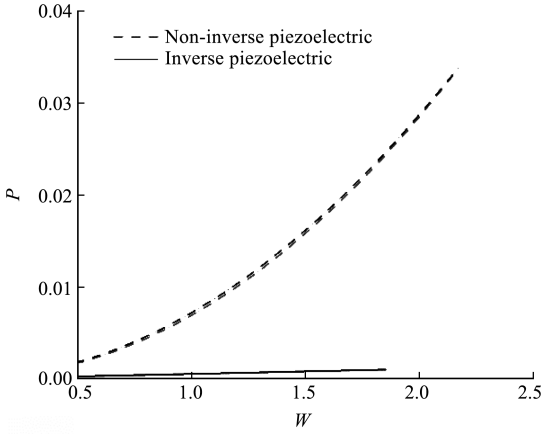
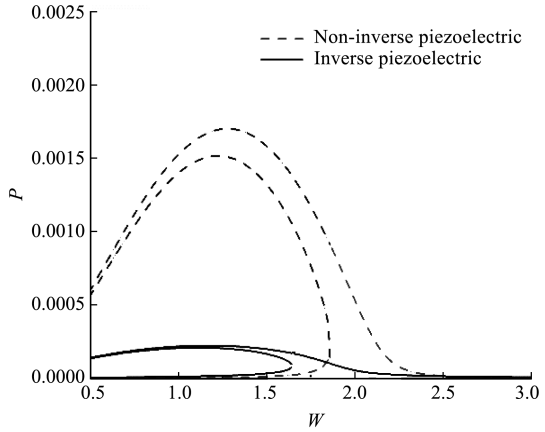


图 4 逆压电效应对输出电压的影响

Fig. 4 Influence of the inverse piezoelectric effect on the output voltage



(a) 阱间运动
(a) Interwell



(b) 阱内运动
(b) Intrawell

图 5　阱内运动时逆压电效应对输出功率的影响
Fig. 5　Influence of the inverse piezoelectric effect on the output power

5　总　结

本文分析了考虑逆压电效应的双稳态悬臂梁俘能器系统的各能量表达式，利用力电耦合系统的广义 Hamilton 变分原理推导了该系统的动力学方程。并将俘能效果与未考虑该效应的俘能器进行对比，得出以下结论。

（1）逆压电效应会对俘能系统的能量表达式产生一定程度的影响，基于谐波平衡法分析下的数值结果产生了一定相对差异，导致系统的势能表达式受到的影响最为明显。

（2）在一定的激励强度下，随着激励频率的增加，逆压电效应对梁端位移和输出电压的影响并非单纯地抑制或者增强。在低频激励下，逆压电效应有微弱的抑制作用；而在高频激励下，逆压电效应可以增强梁端位移和输出电压；而由于逆压电效应对俘能系统的电容产生较大影响，从而增加了输出功率频响曲线的变化量。

参考文献（References）：

[1] Choudhary A, Saxena S. Design of MEMS-based cantilever-type piezoelectric energy harvester for low frequency vibrations-science direct[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, **30**: 132-136.

[2] Piazza G, Stephanou P J, Pisano A P. Piezoelectric aluminum nitride vibrating contourmode MEMS resonators[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2007, **15**(6): 1406-1418.

[3] Yang Z B, Zhou S X, Zu J, et al. High-performance piezoelectric energy harvesters and their applications [J]. *Joule*, 2018, **2**(4): 642-697.

[4] Kim H S, Kim J H, Kim J. A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2011, **12**(6): 1129-1141.

[5] Lee S S, White R M. Piezoelectric cantilever voltage-to-frequency converter[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1998, **71**(1-2): 153-157.

[6] 姚林泉，丁　睿. 非线性压电效应下压电弯曲执行器的弯曲[J]. 计算力学学报，2006，**23**(1)：52-57.（YAO Lin-quan, DING Rui. Bending of piezoelectric bending actuator considering nonlinear piezoelectric effect[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2006, **23**(1): 52-57. (in Chinese)）

[7] Wieland D C F, Krywka C, Mick E, et al. Investigation of the inverse piezoelectric effect of trabecular bone on a micrometer length scale using synchrotron radiation[J]. *Acta Biomaterialia*, 2015, **25**: 339-346.

[8] Erturk A, Inman D J. Issues in mathematical modeling of piezoelectric energy harvesters[J]. *Smart Materials and Structures*, 2008, **17**(6): 065016.

[9] Meirovitch L, Parker R G. Fundamentals of Vibrations[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2001, **54**(6): B100-B101.

[10] 贺学锋，印显方，杜志刚，等. 悬臂梁压电振动能采集器的集总参数模型和实验验证[J]. 纳米技术与精密工程，2012，**10**(2)：108-112.（HE Xue-feng, YIN Xian-fang, DU Zhi-gang, et al. Lumped-parameter model and experimental verification for cantilevered piezoelectric vibration energy harvester[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2012, **10**(2): 108-112. (in Chinese)）

[11] Roundy S, Wright P K. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics[J]. *Smart Materials and Structures*, 2004, **13**(5): 1131-1142

(12).

[12] Stanton S C, Mcgehee C C, Mann B P. Nonlinear dynamics for broadband energy harvesting: Investigation of a bistable piezoelectric inertial generator[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2010, **239** (10): 640-653.

[13] Landecker P B, Villani D D, Yung K W. An analytic solution for the torque between two magnetic dipoles [J]. *Magnetic and Electrical Separation*, 1999, **10** (1): 29-33.

[14] 张 宇,汪 权,王建国.具有弹性放大器的双稳态压电俘能器建模及参数影响分析[J].计算力学学报,2020,**37**(2):199-204.(ZHANG Yu, WANG Quan, WANG Jian-guo.(Modeling and parameter influence analysis of bistable piezoelectric energy harvester with an elastic magnifier[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2020, **37**(2): 199-204. (in Chinese))

[15] 朱 培,任兴民,秦卫阳,等.非线性双稳态压电俘能系统阱间阱内运动谐波分析[J].机械科学与技术,2018,**37**(2):187-192.(ZHU Pei, REN Xing-min, QIN Wei-yang, et al. Harmonic analysis of a bistable piezoelectric energy harvester on intrawell and interwell oscillations [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2018, **37**(2): 187-192. (in Chinese))

Research on the influence of inverse piezoelectric effect on the performance of bi-stable piezoelectric energy harvester

LI Yuan-fang[1], HE Kong-zhi[1], ZHANG Yu*[1], KANG Xiao-fang[2]

(1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;
2. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: In order to study the specific influence of the inverse piezoelectric effect on the piezoelectric energy harvesting efficiency, this paper analyzed the energy expressions of distributed parameter model of a bi-stable piezoelectric energy harvester. Then the dynamic equation of the energy harvesting system was derived using the generalized Hamilton variational principle. Finally, the analytical solutions of the dynamic response were obtained by applying harmonic balance method. The influence of the inverse piezoelectric effect on the dynamic response of the energy harvesting system was discussed by comparing the numerical simulation results under different excitation frequencies. The results show that the influence of the inverse piezoelectric effect on the piezoelectric energy harvesting efficiency under different working conditions is not simply a restraining effect. Under a high frequency excitation with a certain excitation intensity, the inverse piezoelectric effect enhances the piezoelectric energy harvesting efficiency. However, the energy harvesting effect under low excitation is suppressed throughout the whole process.

Key words: inverse piezoelectric effect; bi-stable; piezoelectric energy harvester

引用本文/Cite this paper:

李园芳,何孔智,张 宇,等.逆压电效应对双稳态压电俘能器的性能影响研究[J].计算力学学报,2023,**40**(1):153-158.

LI Yuan-fang, HE Kong-zhi, ZHANG Yu, et al. Research on the influence of inverse piezoelectric effect on the performance of bi-stable piezoelectric energy harvester[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2023, **40**(1): 153-158.