

# V型双稳态压电发电机建模与输出特性分析

毛新华,何青,褚东亮

(华北电力大学 能源动力与机械工程学院,北京 102206)

**摘要:**为对真实环境中宽带低频的振动能量实现有效收集,设计了一种不含磁铁的V型结构双稳态压电发电机,给出了压电发电机的机-电转换模型,并对输出特性进行了仿真分析。结果表明,初始夹角在一定范围内时,V型压电发电机发生随机共振,系统有效收集宽带低频的振动能量。该结构不含磁铁,有利于微型化和集成化。

**关键词:**能量收集;双稳态;非线性振动;压电发电机;数学建模;输出特性

**中图分类号:**TN385;TM359.3 **文献标识码:**A

## Dynamic Modeling and Output Characteristic Analysis of a V-shaped Bistable Piezoelectric Generator

MAO Xinhua, HE Qing, CHU Dongliang

(School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** For harvesting effectively the broadband and low-frequency vibration energies in real environment, a V-shaped bistable piezoelectric generator which does not contain magnet is designed in this work. And its mechanical-electric transfer model is established. The output characteristic of the piezoelectric generator is simulated and tested. The results showed that the V-shaped piezoelectric generator can generate stochastic resonance when the initial angle is within a certain range, and the system can effectively harvest the broadband low frequency vibration energies. The structure of V-shaped piezoelectric generator does not contain magnets, so, it is easy to realize miniaturization and integration.

**Key words:** energy harvesting; bistable; nonlinear vibration; piezoelectric generator; mathematical modeling; output characteristics

### 0 引言

悬臂梁压电振子从环境中提取能量,且结构简单,无污染,输出电压高,在无线传感器网络节点供电方面具有较广的应用价值。目前悬臂梁压电振子的研究主要是基于线性压电方程理论。但该研究理论在实际应用中存在明显局限性,即在真实环境中的振源以低频较多,具有随机性和较大的波动性,悬臂梁压电振子谐振频率较高,且只能针对某一固定频率谐振时才能正常供电,无法在弱信号、低频率的真实环境中为传感器节点供电<sup>[1-5]</sup>。双稳态随机共振是一种特殊的非线性振动,它不需要振源频率与压电振子的固有频率相等就能产生双稳态振动,并获得较大的输出振幅。目前双稳态压电发电机以磁铁提供非线性力的研究较多,Lihua Tang等<sup>[6]</sup>设计

了悬臂梁自由端带有磁铁结构的振动能量收集器,以固定端磁铁与悬臂梁自由端磁铁之间的排斥力作为非线性力,通过调节两磁铁间的距离,产生双稳态随机共振现象,从而增大悬臂梁结构的变形幅度,提高压电发电机的能量转换效率。Erturk A等<sup>[7]</sup>采用极性相同的磁铁-悬臂梁结构,使悬臂梁在非线性和非线性磁场作用下受到非线性吸引力,通过结构参数调整产生双稳态随机振动,进而提高了发电机的谐振性能和能量转换效率。上述研究均以磁铁为非线性力源,其振动能量收集结构存在着结构复杂,难以微型化和集成化等问题。目前,围绕不含磁铁结构的压电振动发电机的设计、研究还较少。

针对上述问题,本文设计了一种V型结构的双稳态压电发电机,该结构不含磁铁,依靠弹性梁的曲

收稿日期:2014-07-30

基金项目:中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(13XS13)

作者简介:毛新华(1976-),男,河南新乡人,博士生,主要从事振动能量的收集及研究。E-mail:30400414@qq.com。

屈变形产生双稳态随机共振现象。建立了压电发电机的机电转换模型,分别对低频激励和宽频激励模式的输出特性进行了仿真分析,分析了初始夹角对输出特性的影响规律。

### 1 双稳态发电机结构及系统模型

#### 1.1 换能结构及受力分析

双稳态压电发电机的换能结构如图 1 所示。该结构由金属框架、长度为  $L$  的薄壁弹性梁、PVDF 压电薄膜、质量块组成。弹性梁与质量块间采用球形铰链连接,两弹性梁与金属框架间采用固定连接。初始位置时,两弹性梁与基座间夹角均为  $\alpha$ 。金属立板 1 与基座为固定链接,金属立板 2 采用滑动式,用以调节质量块的轴向受力,最大调节距离为  $\delta$ 。因发电机结构完全对称,受力分析时可左边为研究对象,质量块上、下振动过程时受到两弹性梁的作用力  $F_i$ ,其轴向压缩分量和剪切分量为  $F_a$ 、 $F_p$ ,其竖直方向的合力分量为  $F_y$ ,由图 1(b)和文献[8]可得

$$F_y = (2F_i/L)^2 \sin(\alpha + \varphi) \quad (1)$$

$$F_i = EI \int_0^{\beta} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\cos(\beta - \varphi) - \cos(\beta - \alpha)}} d\varphi \quad (2)$$

$$\tan \varphi = \frac{X \cos \alpha}{L - X \sin \alpha} \quad (3)$$

式中: $\beta$ 为弹性梁任意处的转角。 $F_i$ 中含有第一类非完全椭圆积分,具有较强的非线性,为系统实现双稳态振动提供了较强的非线性恢复力。

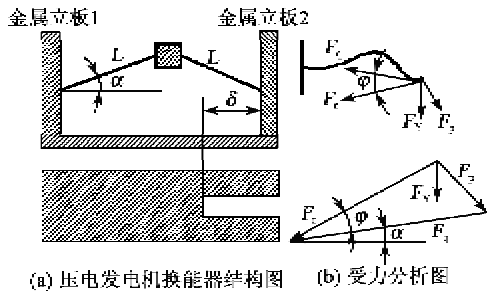


图 1 压电发电机换能结构及受力分析示意图

#### 1.2 机电转换模型

双稳态压电发电机系统是一个由质量系统、刚度系统、阻尼系统、机电耦合系统组成的复杂的振动系统,V型振动发电机受到初始预压力,在振动过程中,弹性梁发生屈曲跳转,系统输出振幅较大,其刚度系数、阻尼系数、机电耦合系数伴随有较大的非线性变化。依据牛顿定律得到系统的动力学方程为

$$M\ddot{X} + c(X)\dot{X} + k(X)X - \Theta V_R - F_y = -M\ddot{Y} \quad (4)$$

式中: $M$ 为系统总质量; $X$ 为质量块相对位移; $c(X) \approx c_1 + c_2 |X|$ 为非线性阻尼系数; $k(X) \approx k_1 + k_2 X^2$ 为非线性刚度系数; $\Theta \approx d_1 + d_2 \sqrt{|X|}$ 为机电耦合系数; $V_R$ 为负载端输出电压; $Y$ 为基础激励位移<sup>[9]</sup>。

V型压电振动发电机采用双晶梁结构,其压电振子共有 4 组压电片,采用先串再并的连接方式,且假设负载为纯电阻,其等效电路如图 2 所示。根据基尔霍夫定律建立压电发电机电学方程为

$$C_p V_R + V_R/R_L + g_{31} \dot{X} = 0 \quad (5)$$

$$C_p = \frac{C_{p1} C_{p2}}{C_{p1} + C_{p2}} + \frac{C_{p3} C_{p4}}{C_{p3} + C_{p4}} \quad (6)$$

式中: $C_{p1}$ 、 $C_{p2}$ 、 $C_{p3}$ 、 $C_{p4}$ 为压电层内部电容; $g_{31}$ 为压电耦合常数。式(4)、(5)构成了双稳态压电发电机电学系统的机电转化模型。

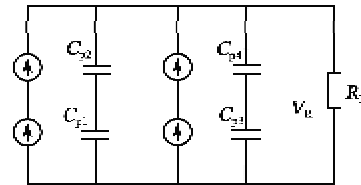


图 2 双稳态发电机等效电路图

### 2 输出特性及结构参数对输出性能的影响分析

#### 2.1 低频率激励环境下输出性能仿真

根据式(4)、(5)和双稳态压电发电机模型参数(见表 1),采用四阶龙格-库塔数值计算方法,利用 Matlab 软件进行数值仿真,得到弹性梁端部的输出振幅和压电发电机的输出电压,如图 3、4 所示。

表 1 双稳态压电发电机模型参数

$M/\text{kg}$	刚度系数	阻尼系数	
	$k_1, k_2 / (\text{N}/\text{m})$	$c_1, c_2 / (\text{N}/\text{s})$	
0.088 7	$1\ 660, 9.78 \times 10^6$	2.3, 3.4	
等效电容	机电耦合系数	压电耦合系数	
$C_p/\text{F}$	$d_1, d_2 / (\text{N}/\text{V})$	$g_{31} / [\text{V} \cdot (\text{m}/\text{N})]$	
$1.4 \times 10^{-7}$	0.004 7, 0.084 0	$-9.11 \times 10^{-3}$	
等效电阻	激振幅值	激振频率	初始夹角
$R_L/\Omega$	$A/\mu\text{m}$	$\Omega/\text{Hz}$	$a/(\circ)$
100	20	13	15

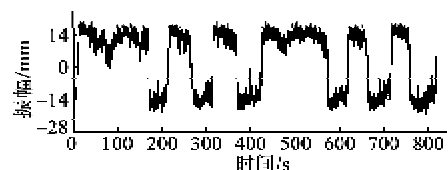


图 3 低频激励时弹性梁输出振幅仿真结果

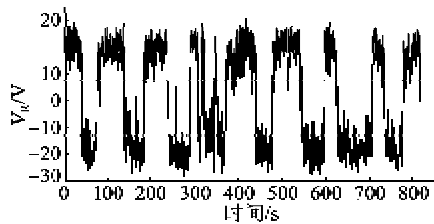


图4 低频激励时压电发电机输出电压仿真结果

仿真结果表明,在振源频率为 13 Hz,初始夹角为 15°时,压电发电机的输出最大振幅和最高瞬时电压分别为 14 mm 和 18 V,这说明系统发生了随机共振现象。与文献[10]相比,不含电磁的 V 型结构的双稳态压电发电机在低频振源激励下同样具有较大的输出振幅和较高的输出电压,因不含磁铁结构,V 型压电双稳态发电机更有利于微型化,易与其他电子设备集成。

### 2.2 宽频环境激励下的输出特性

真实环境中的振源频率不仅是低频特性,且其频率也是多变的,振源具有较宽的频带,为了模拟真实环境宽频带激励的,本文使振源激励的振幅不变,改变振源频率值,得到振幅输出均值,仿真结果如图 5 所示。由图可知,V 型结构的压电振动发电机在宽频激励的环境下也具有较高的输出振幅。

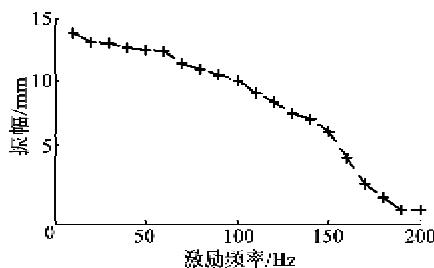


图5 宽频激励时激励频率与振幅均值关系

### 2.3 初始夹角对输出性能的影响分析

根据图 1(a)可知,改变  $\delta$  值能改变  $\alpha$  值的大小,当  $\alpha$  的值被改变时,依据式(1)可知,非线性力  $F_v$  也将随之改变,系统也将在单稳态和双稳态之间变换。为研究  $\alpha$  对压电发电机输出特性的影响规律,设定  $\alpha$  值分别为 10°、15°、20°、25°、35°,然后分别求出其输出振幅的均值,仿真结果如图 6 所示。由图可知,当  $\alpha \leq 10^\circ$  或  $\alpha \geq 35^\circ$  时,压电发电机输出振幅的均值都较低,这是因为弹性梁在这两个角度范围存在较大的结构阻尼,无法形成双稳态系统;当  $10^\circ < \alpha < 35^\circ$  时,系统形成双稳态,压电发电机输出振幅均值较高,且变化不大; $\alpha$  值相同时,随着频率( $f$ )的增大,双稳态压电发电机输出振幅均值逐渐降低,这说

明双稳态压电发电机在低频域有较大的输出振幅。

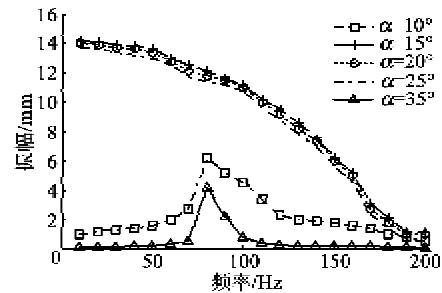


图6  $\alpha$  值不同时,输出振幅特性曲线

### 3 结论

本文设计了一种不含磁铁结构的 V 型结构的双稳态压电振动发电机,并进行了结构分析和受力分析,得到了双稳态压电发电机的机-电转换模型,依据发电模型进行了输出特性的仿真分析,并研究了不同初始夹角对输出特性的影响,主要结论如下:

- 1) 通过调整参数,可改变 V 型压电振动发电机受到的初始预压力,使其在外界激励下发生非线性随机共振,提高了压电发电机的输出振幅。
- 2) V 型结构的压电发电机有良好的低频拾振性能和频率谐振性能,能在低频或宽频的振源激励下具有较高的输出电压。
- 3) V 型结构的压电发电机不含磁铁结构,更有利于微型化和集成化。

### 参考文献:

[1] 闫震,何青. 激励环境下悬臂梁式压电振动发电机性能分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(30):140-145.  
YAN Zhen, HE Qing. Performance analysis on incentive environment of micro cantilever piezoelectric vibration generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(30):140-145.

[2] 赵兴强,温志渝. 基于压电材料的振动能量收集器的谐振频率调节[J]. 压电与声光,2013,35(2):241-244.  
ZHAO Xingqiang, WEN Zhiyu. Resonant frequency adjusting of vibration energy harvester based on piezoelectric materials [J]. Piezoelectric & Acoustooptics, 2013, 35(2):241-244.

[3] 朱莉娅,陈仁文,雷娴. 压电振动发电机的研究现状与发展趋势[J]. 中国机械工程,2011. 22(24): 3016-3022.  
ZHU Liya, CHEN Renwen, LEI Xian. Current status and development trends of vibration-based piezoelectric generator[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(24):3016-3022.

(下转第 247 页)