

势阱深度对双稳态电磁发电系统 发电性能的影响研究*

张小静, 刘丽兰, 任博林, 李淑超

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

摘要: 电磁式振动能量捕获技术从单稳态系统发展到多稳态系统,拓宽了响应频带,增大了输出电压,能够获得较好的发电性能.以附加线性振子的双稳态电磁式振动能量捕获器为研究对象,主要研究了势阱深度对双稳态系统发电性能的影响,并基于最优发电性能下的势阱深度,研究了双稳态系统结构参数中质量比与调频比对系统发电性能的影响.通过数值仿真结果说明,在外部激励频率为低频时:势阱深度较大时,双稳态系统的振子只能在一个阱内发生小幅振动运动;当势阱深度小到一定程度时,双稳态系统的振子跨过势垒在两个阱间内发生大幅混沌运动或周期运动,其优于小幅振动运动时的平均输出功率.通过数值模拟,得到双稳态系统具有较高的发电性能下的最优质量比、调频比以及阻尼比参数.

关键词: 双稳态系统; 势阱深度; 质量比; 调频比; 平均输出功率

中图分类号: TH113.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.21656/1000-0887.370246

引 言

收集环境中的振动能并且进行能量的转换,不仅是一种节能环保的措施,也是对振动能这种新形式能源的开发利用^[1-2].目前国内外学者围绕非线性振动能量捕获器开展了大量研究,主要侧重于单、双、多稳态振动能量捕获器的研究^[3-5].

双稳态发电系统相对于单稳态系统能够实现非共振激励下的大幅、宽频周期甚至混沌运动,输出电压明显提高,因而双稳态振动能量捕获器成为了目前研究的重点.孙舒等^[6]通过在悬臂梁压电振子基本结构中增加一对永磁铁,在合适的磁铁间距条件下,产生非线性磁力,这种外加磁力悬臂梁压电振子会构成一个双稳态系统,通过数值仿真和实验研究,指出在低频率激励下双稳态压电系统比现行系统的发电性能高.Remick等^[7]设计出一种将一个线性振子的主系统耦合到一个小压电组件中的能量捕获系统,研究指出该系统在重复的脉冲激励下,产生持续高效率的非线性能量捕获性能.Scapolan等^[8]提出一种非线性阻尼振动能量采集系统,通过数值模拟,表明随时间周期变化的阻尼器可以实现参数共振,提高能量采集性能.蓝春波和秦卫阳^[9]提出了一种带碰撞的磁斥力双稳态压电能量采集系统,指出在简谐激励下合理的碰撞能够使得双稳态系统由单阱周期运动变为大幅运动,从而提高能量捕获效率.Mann等^[10-11]

* 收稿日期: 2016-08-05; 修订日期: 2016-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(11572243)

作者简介: 张小静(1990—),女,硕士生(E-mail: duoduollp@163.com);

刘丽兰(1979—),女,副教授(通讯作者. E-mail: liulilans@163.com).

对基于双稳态势阱的电磁式发电系统进行了数值计算和实验验证,发现混沌等宽频运动,指出这种双稳态势阱系统能拓宽能量采集器的频响范围.Jung 等^[12]研究了一种由末端带有磁铁的悬臂梁和两个外部旋转磁铁构成的振动压电能量采集器,通过调整磁铁间距和旋转角度,实现采集系统的单、双稳定状态.结果表明,双稳态比单稳态运动复杂,实现双稳态时的阱间运动能够大幅度提高响应频带.Xiao 等^[13]设计出一种 2 自由度的压电振动能量捕获器,将某一 1/4 汽车悬架模型与压电材料作为研究对象,指出这种 2 自由度振动能量采集系统可以应用在车辆方面,并将垃圾或有害的环境振动能量转化为电能.

目前的研究工作多集中于增加势阱的数目(如多稳态^[14]等)、动态放大器^[15]及内共振^[16]等来改善能量捕获器的动力学响应以获取较高的输出功率.与双稳态相比,多稳态能量捕获器的响应幅值相对变小,因而,目前能量捕获器研究多集中于双稳态;而势能函数形状(势阱的深浅及稳态平衡点的距离)对能量捕获器的动力学性能有着重要的影响,目前能量捕获器的动力学研究在势阱深度方面的研究存在不足.本文以双稳态电磁式振动能量捕获器为研究对象,通过数值仿真分析非线性恢复力中刚度系数比值与势阱深度的关系,获得可产生最大发电量的最优刚度系数比值,并在此基础上进一步研究系统结构参数中质量比、调频比以及阻尼比对发电性能的影响规律,获得较佳结构参数配置.

1 附加线性振子的双稳态电磁式振动能量捕获系统力学模型

本文所研究的附加线性振子的双稳态电磁式振动能量捕获系统的力学模型如图 1 所示.其中,质量块 m_1 为永磁铁,质量块 m_2 是一个辅助的线性振子,附加到了电磁感应双稳态能量捕获器上. $dU/dx = -k_1x + k_3x^3$ 为双稳态振子非线性恢复力, k_2 是附加振子的线性刚度, c_1 是双稳态振子阻尼系数, c_2 是附加线性振子阻尼系数, ψ 是机电耦合系数, $\ddot{z} = -W\cos(\Omega\tau)$ 是基础激励加速度, $X(\tau)$ 是永磁铁 m_1 的绝对位移, $Y(\tau)$ 是质量块 m_2 的绝对位移.该模型中,它的输出电路只有一个负载电阻 R .基础激励 z 作用于双稳态能量捕获器质量块 m_1 ,使之与固定线圈发生相对运动,在能量收集电路中产生了电流 $i(\tau)$.

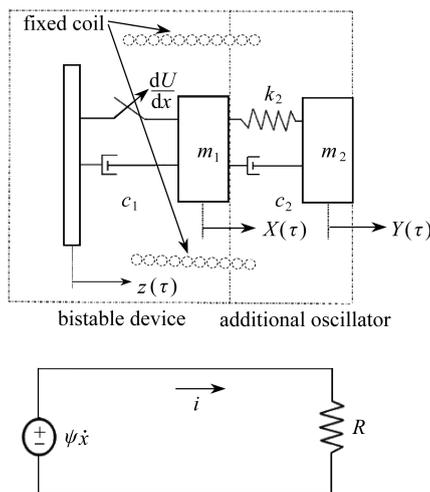


图 1 附加线性振子的双稳态能量捕获器及外部收集电路

Fig. 1 Bistable energy harvester with an auxiliary linear oscillator and external collection circuits

系统控制方程:

$$m_1(\ddot{x} + \ddot{z}) + c_1\dot{x} - k_1x + k_3x^3 - c_2\dot{y} - k_2y + \psi i = 0, \quad (1)$$

$$m_2(\ddot{x} + \ddot{y} + \ddot{z}) + c_2\dot{y} + k_2y = 0, \quad (2)$$

$$iR = \psi \dot{x}, \quad (3)$$

其中, x 是基础激励 z 与永磁铁 m_1 之间的相对位移, y 是永磁铁 m_1 与附加振子 m_2 之间的相对位移,

$$x = X - z, \quad (4)$$

$$y = Y - X - z. \quad (5)$$

将式(3)代入式(1)中,然后对式(1)、(2)进行无量纲化,得到

$$x'' + \gamma_1 x' - x + \beta x^3 - \mu f \gamma_2 y' - \mu f^2 y = p \cos(\omega t), \quad (6)$$

$$y'' + (1 + \mu) f \gamma_2 y' + (1 + \mu) f^2 y - \gamma_1 x' + x - \beta x^3 = 0, \quad (7)$$

其中

$$\mu = m_2/m_1, f = \omega_2/\omega_1, \omega = \Omega/\omega_1, p = W/\omega_1^2,$$

$$\gamma_1 = (c_1 + \varepsilon^2)/(m_1\omega_1), \gamma = c_1/(m_1\omega_1), \varepsilon^2 = \psi^2/R, \gamma_2 = c_2/(m_2\omega_2),$$

$$\beta = k_3/k_1, t = \omega_1\tau, \omega_1^2 = k_1/m_1, \omega_2^2 = k_2/m_2.$$

2 势阱深度对附加线性振子的双稳态电磁式振动能量捕获系统的发电性能影响

双稳态系统具有 3 个平衡点,其中包含 2 个稳定的平衡点和 1 个不稳定的平衡点,从而表现出双稳态特征.双稳态系统作为一种典型的非线性系统,在周期或随机激励下,可产生大幅周期或混沌运动.

2.1 非线性恢复力中刚度系数比值 β 与势阱深度的关系

双稳态装置的非线性恢复势能为

$$U(x) = -\frac{1}{2}k_1x^2 + \frac{1}{4}k_3x^4. \quad (8)$$

定义 β 为非线性恢复力中刚度系数比值,将 $\beta = k_3/k_1$ 代入到式(8)中,得到

$$U(x) = -\frac{1}{2}k_1x^2 + \frac{1}{4}\beta k_1x^4. \quad (9)$$

双稳态势能函数表现为具有一个势垒和两个势阱,示意图如图 2(a) 所示.其中势阱坐标为 $(\pm\sqrt{k_1/k_3}, -k_1^2/(4k_3))$,即 $(\pm\sqrt{1/\beta}, -k_1/(4\beta))$,势阱深度为 $h = |-k_1/(4\beta)|$.当 k_1 为某一确定值,则势阱深度 h 与 β 成反比关系,从数值仿真角度分析,结合图 2(b) 可知,势阱深度随着 β 值减小而增大.

2.2 非线性恢复力中刚度系数比值 β 对双稳态发电系统动力学响应特性的影响

由图 2 可知,非线性恢复力中刚度系数比值 β 很大程度上影响着势能函数,势阱深浅与 β 成反比例关系.研究势阱深度对双稳态发电系统响应特性的影响转化为研究非线性恢复力中刚度系数比值 β 对双稳态发电系统响应特性的影响.

根据式(6)和式(7),系统参数取 $f = 1, \gamma = 0.01, \gamma_2 = 0.001, \varepsilon^2 = 0.04, \mu = 1, p = 0.2$,借助数值仿真,得到不同激励频率 $\omega = 0.2, 0.5, 0.7, 1, 2, 3$ 下,非线性恢复力中刚度系数比值 $\beta = 0.1, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3$ 对双稳态发电系统响应特性的影响,仿真结果如图 3 所示.

从图 3 可以看出:当外部激励频率 ω 值固定时, β 值变化对系统响应有着重要的影响.

1) 在 $\omega = 0.2$ 时:当 β 值很小($\beta = 0.1$) 时,势阱较深,系统只能在一个势阱内实现小范围振动;随着 β 值增大($\beta = 0.5$),系统能够跨过势垒,在两个势阱间做大幅混沌运动;当 β 值继续增大($\beta \geq 1$) 时,系统在两个势阱间做大幅周期运动,并且随着 β 值增大,其响应振幅减小,如图 3(a) 所示。

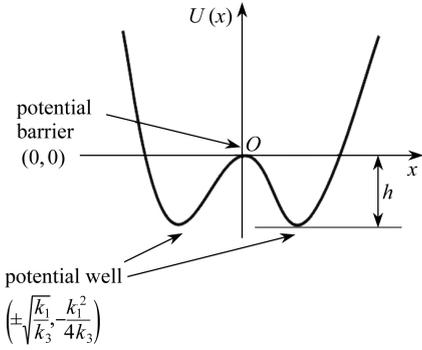


图 2(a) 势能函数示意图

Fig. 2(a) Schematic diagram of potential energy function

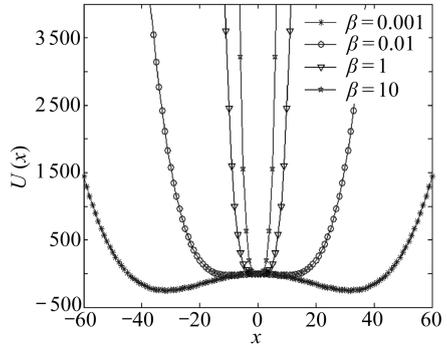
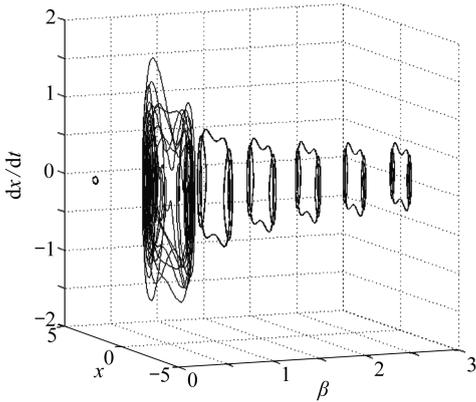
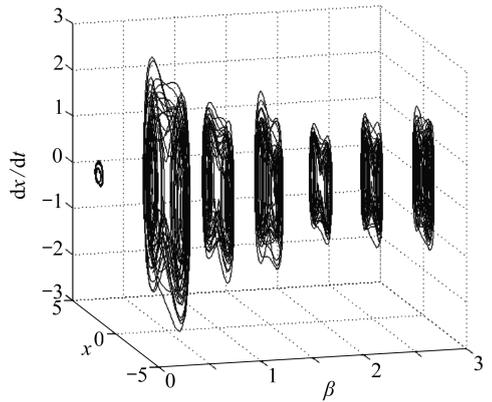


图 2(b) 不同 β 值时的势能函数

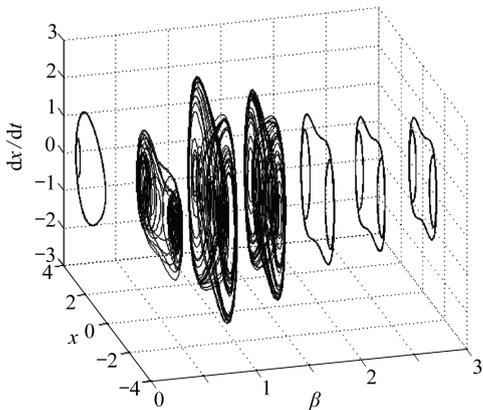
Fig. 2(b) Potential energy function with different β



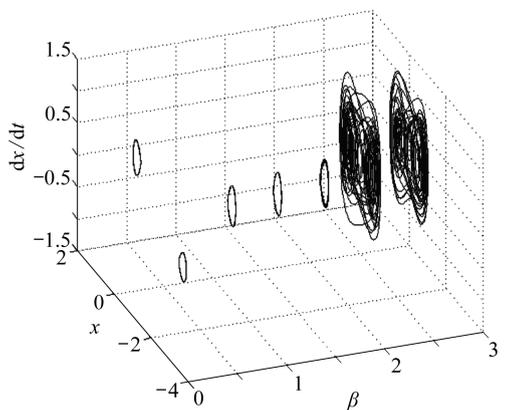
(a) $\omega = 0.2$



(b) $\omega = 0.5$



(c) $\omega = 0.7$



(d) $\omega = 1.0$

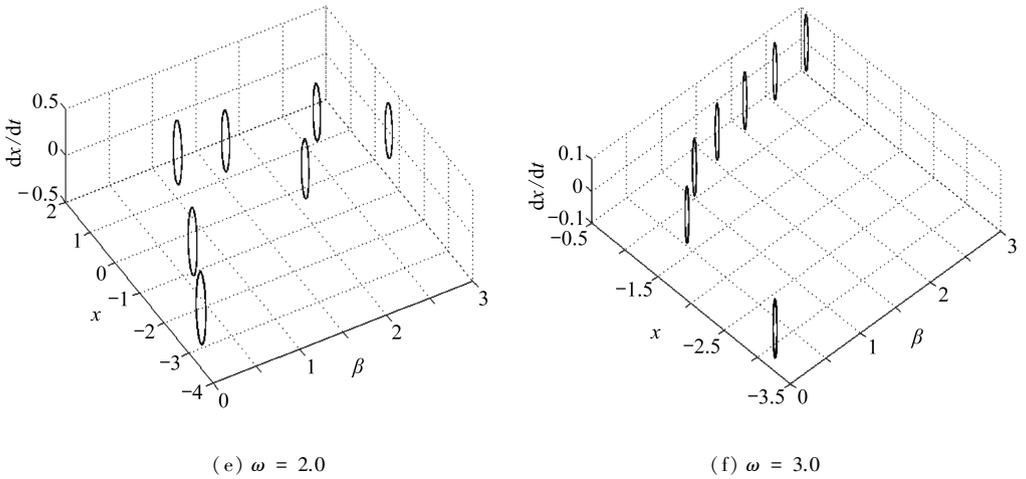


图3 双稳态系统的相图

Fig. 3 Phase diagram of bistable system

2) 在 $\omega = 0.5$ 时:系统发生混沌运动,随着 β 值增大,系统响应振幅增大,在 $\beta = 0.5$ 时,响应振幅达到最大值; β 值继续增大,响应振幅减小,如图 3(b) 所示。

3) 在 $\omega = 0.7$ 时:当 β 值很小($\beta = 0.1$) 时,系统做小幅周期运动;随着 β 值增大,系统做大幅混沌运动,并且随着 β 值增大,其响应振幅增大,在 $\beta = 1$ 时,响应振幅达到最大值; β 值继续增大,发生混沌运动的响应振幅减小;在 $\beta = 2$ 时,系统开始做大幅周期运动,并且随着 β 值增大,其响应振幅减小,如图 3(c) 所示。

4) 在 $\omega = 1.0$ 时:系统做小幅周期运动,并且随着 β 值增大,系统响应振幅增大;在 $\beta = 2.5$ 时,系统开始做大幅混沌运动,随着 β 值增大,响应振幅不变,如图 3(d) 所示。

5) 在 ω 取值为 2.0 和 3.0 时,系统只发生小幅周期运动,响应振幅不会随着 β 值发生变化,如图 3(e)、图 3(f) 所示。

综合来看,外部激励为低频时:当 β 值很小时,系统做小幅运动;随着 β 值增大,系统开始做大幅运动;振幅会出现最大峰值,最大峰值之后,随着 β 值的增大,系统振幅减小。当外部激励频率较大时,系统只做小幅周期运动,其响应振幅不会随着 β 值发生改变。

2.3 势阱深度对双稳态系统的发电性能影响

参考图 3,附加线性振子的双稳态系统在不同条件下会发生混沌运动或周期运动。发生混沌运动时,其响应值不可预测,通过研究发电系统的平均输出功率来研究势阱深度对系统发电性能的影响。定义发电系统的平均输出功率^[9]为

$$P = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} i^2 R dt = \frac{1}{n\Delta t} \sum_{j=1}^n i_j^2 R \Delta t, \quad (10)$$

其中 P 为平均输出功率, T_1 和 T_2 为时刻, Δt 为计算步长, n 为 $T_1 \sim T_2$ 时间段内步长数。

由式(3)可知

$$i = \frac{\psi}{R} \dot{x}. \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)中,得到

$$P = \frac{1}{n\Delta t} \sum_{j=1}^n \left(\frac{\psi}{R} \dot{x}_j^2 \right) R\Delta t = \frac{1}{n\Delta t} \sum_{j=1}^n \frac{\psi^2}{R} \dot{x}_j^2 \Delta t. \quad (12)$$

将 $\varepsilon^2 = \psi^2/R$ 代入式(12),得

$$P = \frac{1}{n\Delta t} \sum_{j=1}^n \varepsilon^2 \dot{x}_j^2 \Delta t = \varepsilon^2 \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \dot{x}_j^2. \quad (13)$$

由式(13)可知,当 ε^2 为常数时,双稳态系统的平均输出功率与系统平均速度成正比.由图3可知,当外部激励频率一定时,系统的响应速度随着 β 的变化而不同.

根据式(6)、(7)和式(13)得到不同激励频率 ω 下非线性恢复力中刚度系数比值 β 与双稳态发电系统平均输出功率的关系曲线,如图4所示.

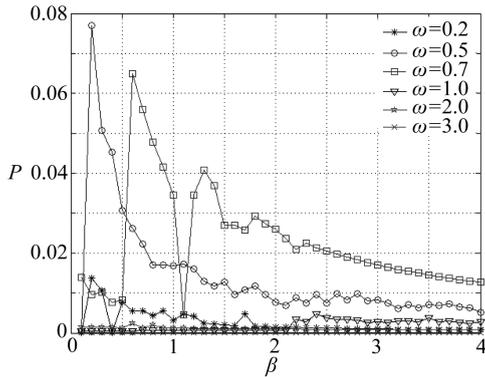


图4 平均输出功率

Fig. 4 Average power

从图4可以看出,在较低激励频率下,双稳态系统具有较高平均输出功率, ω 为 0.2 和 0.5 优于 ω 为 0.7, 1.0, 2.0, 3.0 时系统的平均输出功率. β 取值在 0.1~0.5 之间, 激励频率 $\omega = 0.5$ 时, 平均输出功率最大, 在 $\beta = 0.2$ 时出现极大值点; 在 β 取值 0.5~4 之间, 激励频率 $\omega = 0.7$ 时, 平均输出功率最大, 在 $\beta = 0.6$ 时出现极大值点. 结合图3可知, 系统参数为 $\beta = 0.2, \omega = 0.5$ 和 $\beta = 0.6, \omega = 0.7$ 时, 双稳态系统做大幅混沌运动.

3 结构参数的影响

除外部激励之外, 系统自身的结构参数也影响发电性能. 根据图4可知, 系统参数 $\beta = 0.2, \omega = 0.5$ 和 $\beta = 0.6, \omega = 0.7$ 时, 平均输出功率最优, 本节重点以上述两组参数为研究对象, 详细研究该参数下质量比 μ 和调频比 f 对系统发电性能影响.

3.1 质量比的影响 ($\mu = m_2/m_1$)

调频比 f 保持不变, 变化质量比 μ . 仿真结果如图5和图6所示.

1) 参数 $\beta = 0.2, \omega = 0.5$

当参数 $\beta = 0.2, \omega = 0.5$ 时, 质量比取值范围为 $\mu = 0.1, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4$, 不同质量比 μ 下的双稳态系统的相图如图5所示.

从图5可以看出: 当质量比 μ 很小时 (μ 取值 0.1 和 0.5), 系统只能做小幅运动; 随着质量比 μ 增大 ($\mu = 1$), 系统做大幅混沌运动; 在 $\mu = 1.5$ 时, 系统做周期运动; 质量比 μ 继续增大 (μ 取值 2 和 2.5), 系统做大幅混沌运动, 在 $\mu = 2.5$ 时系统响应振幅最大; 在质量比 $\mu = 3$ 时, 系统

开始做大幅周期运动,并且随着 μ 的增大,响应振幅会小幅减小。

2) 参数 $\beta = 0.6, \omega = 0.7$

参数 $\beta = 0.6, \omega = 0.7$ 时不同质量比 μ 下双稳态系统的相图如图6所示。

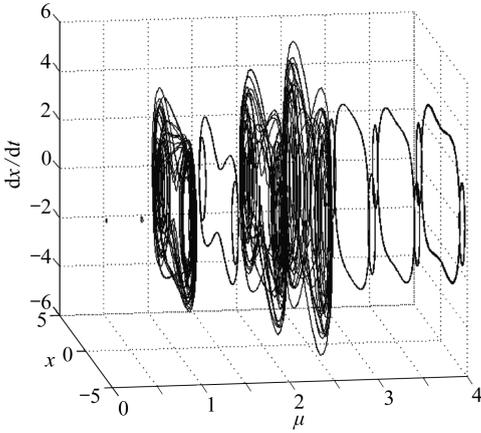


图5 $\beta = 0.2, \omega = 0.5$ 时双稳态系统的相图

Fig. 5 Phase diagram of bistable system under $\beta = 0.2, \omega = 0.5$

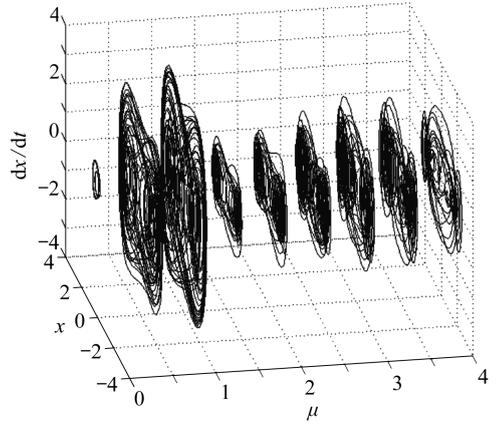


图6 $\beta = 0.6, \omega = 0.7$ 时双稳态系统的相图

Fig. 6 Phase diagram of bistable system under $\beta = 0.6, \omega = 0.7$

从图6可以看出:当质量 μ 很小时($\mu = 0.1$),系统同样只做小幅运动;随着质量比 μ 增大,系统开始做大幅混沌运动,并且响应振幅随着 μ 的增大出现极大值($\mu = 1$)后,系统做混沌运动的响应振幅跳跃到很小值($\mu = 1.5$),之后随着 μ 的增大系统做混沌运动的响应振幅会逐渐增大,在 $\mu = 4$ 时系统的响应振幅又开始减小。

3) 不同质量比 μ 下系统的发电性能

为较为准确地寻找出能量捕获器最大输出功率的参数影响点,将质量比取值步长细化为0.1,得到两组参数下双稳态系统随质量比的变化曲线,如图7所示。

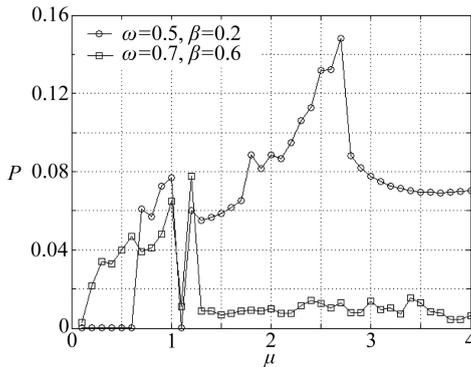


图7 不同质量比的双稳态系统的平均输出功率

Fig. 7 Average power of bistable system with different mass ratios

由图7可知,双稳态系统在 $\beta = 0.2, \omega = 0.5$ 明显优于 $\beta = 0.6, \omega = 0.7$ 时的平均输出功率。在 $\beta = 0.2, \omega = 0.5$ 时,双稳态系统在质量比 μ 为1.8~3时,平均输出功率最优,在 $\mu = 2.7$ 为最大极值点。

3.2 调频比的影响 ($f = \omega_2/\omega_1$)

根据图 7,进一步研究双稳态系统在 $\beta = 0.2, \omega = 0.5, \mu = 2.7$ 时,调频比 f 对双稳态发电系统发电性能的影响。

1) 系统动力学响应

调频比取值范围为 $f = 0.1, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4$ 时,系统相图如图 8 所示。

由图 8 可知,当调频比 f 很小时,系统做小幅运动(对应图中的一个点);随着 f 增大,系统开始做大幅混沌运动; f 继续增大,系统开始做大幅周期运动,响应振幅不会随 f 的增大而发生变化。双稳态系统在 $f = 1$ 即双稳态装置与附加线性振子共振时,混沌运动的响应振幅最大。

2) 系统发电性能

将调频比取值步长细化为 0.1,得到不同调频比时双稳态系统的平均输出功率如图 9 所示。

由图 9 可知,随着 f 增大,双稳态系统的平均输出功率增大,在 $f = 1$ 时,平均输出功率最大; f 继续增大,平均输出功率趋于稳定。在 f 取值 0.8~1 时,系统平均输出功率最优。

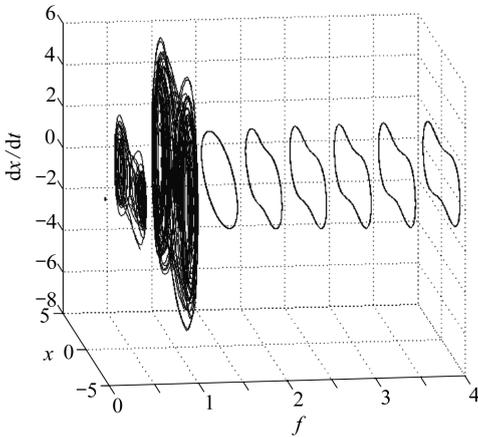


图 8 不同调频比的双稳态系统的相图

Fig. 8 Phase diagram of bistable system with different tuning ratios

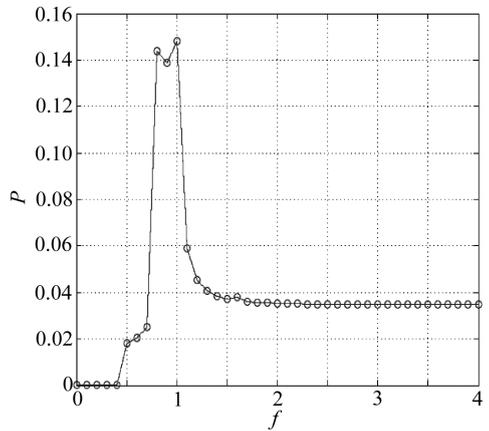


图 9 不同调频比的双稳态系统的平均输出功率

Fig. 9 Average power of bistable system with different tuning ratios

3.3 阻尼比的影响 ($\gamma = c_1/(m_1\omega_1)$)

本文中双稳态发电系统阻尼比表达式为 $\gamma = c_1/(m_1\omega_1)$, 根据 3.1 与 3.2 小节,在优化了非线性刚度强度、质量比和调频比的基础上,借助数值分析,图 10 和图 11 给出了阻尼比变化对系统动力学响应及发电功率的影响规律。

1) 系统动力学响应

由图 10 可知,当 $\gamma = 0$ 时,系统做大幅混沌运动;随着 γ 增大,系统发生混沌运动的幅值减小;当 γ 继续增大后,在 $\gamma = 1.4$ 时系统开始做小幅周期运动,并且随着 γ 值的增大,运动幅值逐渐减小,系统不能有效地进行发电。

2) 系统发电性能

图 11 反映出与图 10 相同的变换规律,即在 $\gamma = 0$ 时,双稳态系统的平均输出功率最大;随着 γ 值增大,平均输出功率逐渐减小。综合图 10 和图 11 可以得出,在 $\gamma = 0$ 时,即无阻尼情况下,系统响应幅值最大,系统的发电性能最好。

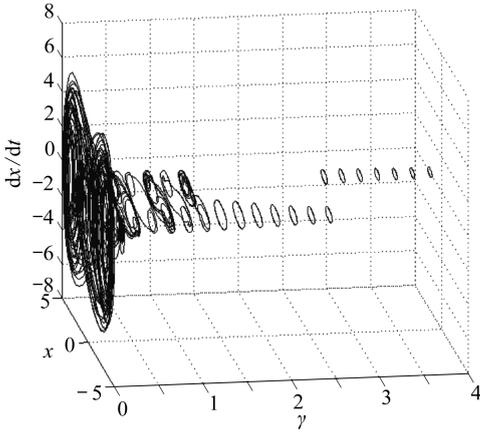


图 10 不同阻尼比的双稳态系统的相图

Fig. 10 Phase diagram of bistable system with different damping ratios

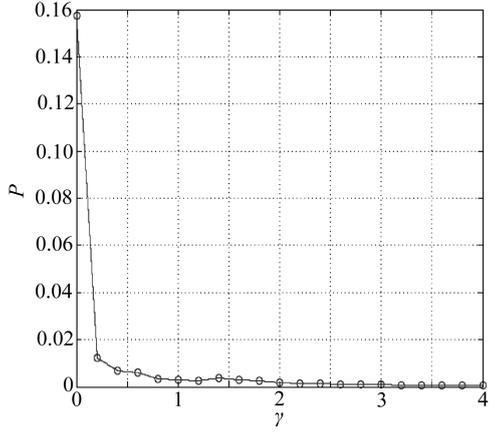


图 11 不同阻尼比的双稳态系统的平均输出功率

Fig. 11 Average power of bistable system with different damping ratios

4 结 论

本文以附加线性振子的双稳态电磁式振动能量捕获器为研究对象,应用数值仿真,主要研究了势阱深度对双稳态电磁式振动能量捕获系统发电性能的影响,并基于最优发电性能下的势阱深度,研究了系统结构参数质量比、调频比以及阻尼比对系统发电性能的影响,所得结论概括如下:

- 1) 非线性恢复力中刚度系数比值 β 会影响双稳态装置的非线性恢复势能函数, β 值越小,势能函数表现为双势阱越明显,势阱深度越大。
- 2) 在低频率激励下,系统响应幅值较大,系统有较高的平均输出功率;当系统在某一较低激励频率时,系统在较小 β 下拥有好的发电性能。
- 3) 系统结构参数质量比、调频比以及阻尼比对系统的发电性能有重要影响。通过数值模拟,得到系统有较高发电性能时的最优质量比、调频比以及阻尼比参数。

参考文献(References):

- [1] Berdy D F, Valentino D J, Peroulis D. Kinetic energy harvesting from human walking and running using a magnetic levitation energy harvester[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, **222**: 262-271.
- [2] XIE Long-han, CAI Ming-jing. Increased energy harvesting and reduced accelerative load for backpacks via frequency tuning[J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2015, **58/59**: 399-415.
- [3] Triplett A, Quinn D D. The effect of non-linear piezoelectric coupling on vibration-based energy harvesting[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2009, **20**(16): 1959-1967.
- [4] Panyam M, Masana R, Daqaq M F, et al. On approximating the effective bandwidth of bi-stable energy harvesters[J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2014, **67**: 153-163.

- [5] ZHOU Zhi-yong, QIN Wei-yang, ZHU Pei. Improve efficiency of harvesting random energy by snap-through in a quad-stable harvester[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, **243**: 151-158.
- [6] 孙舒, 曹树谦. 双稳态压电悬臂梁发电系统的动力学建模及分析[J]. *物理学报*, 2012, **61**(21): 210505-1-210505-12. (SUN Shu, CAO Shu-qian. Dynamic modeling and analysis of a bistable piezoelectric cantilever power generation system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(21): 210505-1-210505-12. (in Chinese))
- [7] Remick K, Joo H K, McFarland D M, et al. Sustained high-frequency energy harvesting through a strongly nonlinear electromechanical system under single and repeated impulsive excitations [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2014, **333**(14): 3214-3235.
- [8] Scapolan M, Tehrani M G, Bonisoli E. Energy harvesting using parametric resonant system due to time-varying damping [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2016, **79**: 149-165.
- [9] 蓝春波, 秦卫阳. 带碰撞双稳态压电俘能系统的俘能特性研究[J]. *物理学报*, 2015, **64**(21): 183-194. (LAN Chun-bo, QIN Wei-yang. Vibration energy harvesting from a piezo electric bistable system with two symmetric stops [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(21): 183-194. (in Chinese))
- [10] Mann B P, Sims N D. Energy harvesting from the nonlinear oscillations of magnetic levitation [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, **319**(1/2): 515-530.
- [11] Mann B P, Owens B A. Investigations of a nonlinear energy harvester with a bistable potential well [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, **329**(9): 1215-1226.
- [12] Jung J, Kim P, Lee J I, et al. Nonlinear dynamic and energetic characteristics of piezoelectric energy harvester with two rotatable external magnets [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2015, **92**: 206-222.
- [13] XIAO Han, WANG Xu, John S. A dimensionless analysis of a 2DOF piezoelectric vibration energy harvester [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2015, **58/59**: 355-375.
- [14] Kim P, Seok J. A multi-stable energy harvester: dynamic modeling and bifurcation analysis [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2014, **333**(21): 5525-5547.
- [15] Gibert J M, Alazemi S, Paige F E, et al. New insights into piezoelectric energy harvesting using a dynamic magnifier [C]//*ASME 2012 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*. 2012: 1-5.
- [16] CHEN Li-qun, JIANG Wen-an. Internal resonance energy harvesting [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2015, **82**(3): 031004.

Influence of Potential Well Depth on Power Generation Performance of Bistable Electromagnetic Energy Harvesting Systems

ZHANG Xiao-jing, LIU Li-lan, REN Bo-lin, LI Shu-chao

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering,
Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, P.R.China)

Abstract: With the development of the electromagnetic vibration energy harvesting technology from single-to multi-stable-state systems, the response frequency bandwidth was broadened and the output voltage was increased, hence better power generation performance was obtained. The bistable electromagnetic vibration energy harvester with a linear vibrator was investigated, the effects of potential well depth on the power generation performance was studied, and the influences of the system structure parameters of the mass ratio and the tuning ratio were analyzed based on the potential well depth under the optimal power performance. Numerical simulation results show that, when the external excitation is at low frequencies, the potential well depth will be larger, and the vibrator of the bistable system can only work in small vibration; when the potential well depth is small to a certain extent, the vibrator will enter large chaotic or periodic motion across the barrier between 2 potential wells, with the average output power higher than that during the small motion. Through numerical simulation, the optimal mass ratio, tuning ratio and damping ratio of the system were obtained.

Key words: bistable system; potential well depth; mass ratio; tuning ratio; average output power

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China(11572243)

引用本文/Cite this paper:

张小静, 刘丽兰, 任博林, 李淑超. 势阱深度对双稳态电磁发电系统发电性能的影响研究[J]. 应用数学和力学, 2017, **38**(6): 622-632.

ZHANG Xiao-jing, LIU Li-lan, REN Bo-lin, LI Shu-chao. Influence of potential well depth on power generation performance of bistable electromagnetic energy harvesting systems[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2017, **38**(6): 622-632.