

Integrated Analysis of NES Vibration Reduction and Dual-Purpose Isolator Energy Harvesting

Taiyou Hou, Wei Li

College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning
Email: hty125@126.com, 1358513240@qq.com

Received: May 9th, 2019; accepted: May 23rd, 2019; published: May 30th, 2019

Abstract

In this paper, a new model of nonlinear energy sink (NES) coupled with dual-purpose isolator is proposed, and its analytical solution and numerical solution are solved by harmonic balance-arc extension method and fourth-order Runge-Kutta method verification analysis. By comparing the amplitude-frequency response of the main system, it is proved that the coupled system has excellent vibration-damping performance. The relationship between system displacement velocity and flux density is studied, and the influence of system parameters on voltage and energy is analyzed. The results show that the coupled system can achieve energy harvesting. Further comparison and analysis of the energy dissipation performance of the new coupling system and the traditional NES system, the results show that the coupled system has a higher energy dissipation rate.

Keywords

Nonlinear Energy Sink, Harmonic Balance, Electromagnetic Induction, Energy Harvesting

基于NES减振与双向隔振器能量采集一体化分析

侯太友, 李 威

沈阳航空航天大学, 航空宇航学院, 辽宁 沈阳
Email: hty125@126.com, 1358513240@qq.com

收稿日期: 2019年5月9日; 录用日期: 2019年5月23日; 发布日期: 2019年5月30日

摘要

本文提出一种非线性能量汇(NES)与双向隔振器相耦合的新模型, 并利用谐波平衡-弧长延拓法和四阶龙格库塔法对其进行了解析解与数值解的验证分析。通过对比主系统的幅频响应, 证明耦合系统具有优良的减振性能。研究系统位移速度和磁通密度关系, 并分析耦合系统参数对电压和能量的影响, 结果表明耦合系统实现了能量采集。对比耦合系统和单一NES系统的能量耗散性能, 结果表明耦合系统具有更高的能量耗散率。

关键词

非线性能量汇, 谐波平衡, 电磁感应, 能量采集

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

振动广泛存在于车辆、飞机、航空航天等工程条件下。振动会损坏设备, 降低机器的使用寿命。然而振动也是一种可再生资源, 通过能量的转换可以为无线传感器提供电能。近几十年来, 利用非线性能量汇(NES)和能量转换器获得系统能量的研究取得了很大的进展。NES 系统由粘滞阻尼器、小质量块和具有三次刚度非线性的弹簧组成。NES 系统中的非线性刚度可以捕获外部动能, 并被阻尼器所消耗掉, 设计良好的 NES 系统在实现系统减振的同时也提高了系统的靶能传递[1] [2]。

近年来, 一种基于电磁、静电和压电的振动能量采集装置被广泛应用于独立的电力系统中[3] [4] [5]。陈立群等人提出了一种利用 2:1 内共振的电磁能量采集系统[6]。Blokhina 等人讨论了在恒电荷模式下静电振动能量采集器的稳态行为[7]。Lefeuvre 等人介绍了三种基于压电元件输出电压的新型发电机, 并与常规的压电发电机进行了比较[8]。本文研究了一种双向隔振器[9]与 NES 相耦合的减振和能量采集一体化的新系统。通过谐波平衡法和弧长延拓法研究该非线性系统的幅频响应特征, 并通过四阶龙哥库塔数值解加以验证。研究基础激励下耦合系统的电压输出特性, 同时对比了 NES 系统参数对能量采集的影响, 结果表明优化系统参数可以输出更多的电能。最后对比分析耦合系统和单一 NES 系统, 结果表明耦合系统具有更高的能量吸收性能。

2. 模型建立

图 1 给出了可以同时进行减振和能量采集的双功能隔振器示意图[9], 通过质量块 m_1 的振动推动中间磁铁的运动, 由于磁铁和外围线圈的相对运动引起线圈中的磁通量发生改变, 根据电磁感应原理将产生感应电流, 与外接设备相连可以采集到电能; 相应的力学模型图 2(b)所示。通过牛顿第二定律可以得到如下方程。

$$m_1 \ddot{x}_1 + (c_a + c_m)(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + (k_s + k_{m1})(x_1 - x_2) + k_{m3}(x_1 - x_2)^3 = 0 \quad (1)$$

其中 x_1 和 x_2 表示隔振器的相对位移, m_1 是减振质量, c_a 和 c_m 分别表示空气通过孔口时产生的粘性阻尼和线圈中产生的涡流引起的磁阻尼, k_s 表示机械弹簧恢复力的线性刚度系数, k_{m1} 和 k_{m3} 分别表示固定磁铁和悬浮磁体产生的排斥恢复力的线性和非线性刚度系数。

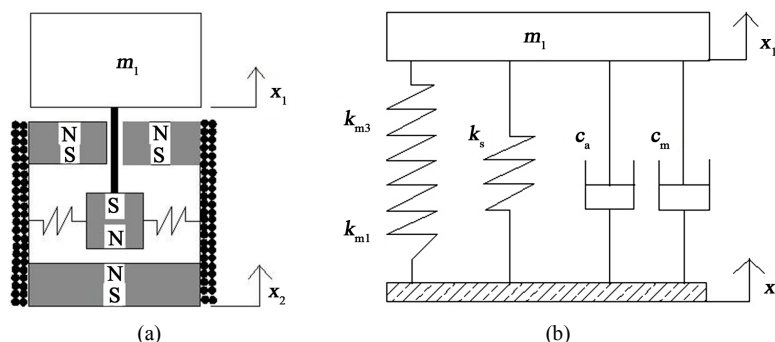


Figure 1. Dual-purpose vibration isolator schematic (a) and mechanical model diagram (b)
图 1. 双向隔振器原理图(a)和力学模型图(b)

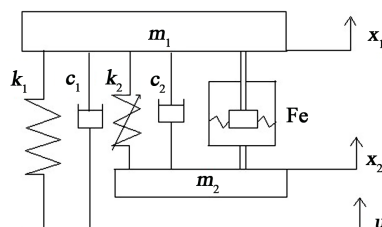


Figure 2. System model
图 2. 系统模型

如图 2 所示给出了 NES 和双向隔振器耦合系统连接在线性主系统上的力学模型, 由牛顿第二定律可以得到如下非线性控制方程。

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + k_1 (x_1 - u) + c_1 (\dot{x}_1 - \dot{u}) + k_2 (x_1 - x_2)^3 + c_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + Fe = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + k_2 (x_2 - x_1)^3 + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - Fe = 0 \\ Fe = (c_a + c_m)(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + (k_s + k_{m1})(x_1 - x_2) + k_{m3}(x_1 - x_2)^3 \end{cases} \quad (2)$$

其中 m_1 、 k_1 和 c_1 分别表示主系统的质量、线性刚度和阻尼; m_2 、 k_2 和 c_2 分别表示 NES 系统的质量、非线性线性刚度和阻尼, Fe 是隔振器提供的力。假设基础做简谐运动, 其中 f 是频率, A 是简谐激励的振幅。可以表示如下。

$$u = A \sin(2\pi ft) \quad (3)$$

由于耦合系统为强非线性激励系统, 本文通过谐波平衡法对方程(2)进行近似求解, 假设方程的解满足如下形式。

$$\begin{cases} x_1(t) = \sum_{i=1}^3 a_{i1}(t) \cos(i\omega t) + b_{i1} \sin(i\omega t) \\ x_2(t) = \sum_{i=1}^3 a_{i2}(t) \cos(i\omega t) + b_{i2} \sin(i\omega t) \end{cases} \quad (4)$$

将方程(4)代入方程(2), 并令 $\cos(i\omega t)$ 和 $\sin(i\omega t)$ ($i = 1, 3$) 的系数分别相等, 求解相关系数。对于给定的激励频率, 通过牛顿迭代和弧长延拓法求解方程(1)的位移:

$$x_1 = \sqrt{a_{11}^2 + b_{11}^2 + a_{31}^2 + b_{31}^2}; x_2 = \sqrt{a_{12}^2 + b_{12}^2 + a_{32}^2 + b_{32}^2} \quad (5)$$

根据参考文献[9] [10]选取如表 1 所示的数值仿真系统参数。

Table 1. System parameters
表 1. 系统参数

参数	数值	参数	数值
m_1	60 kg	m_2	7 kg
c_1	10 Ns/m	c_2	200 Ns/m
c_a	2.389 Ns/m	c_m	0.051 Ns/m
k_1	2.1346×10^6 N/m	k_2	3×10^7 N/m ³
k_s	688.8 N/m	k_{m1}	-70.22 N/m
k_{m3}	1.368×10^6 N/m ³	A	0.0002 m

在 30 Hz 的简谐激励下选取表 1 所示的系统参数, 如图 3(a)所示给出了经过谐波平衡法、牛顿迭代和弧长延拓法得到的解析解与四阶龙哥库塔法得到的数值解的结果对比图, 分析结果表明解析解与数值解一致重合, 说明了研究方法的可靠性。图 3(b)给出了当其他参数不变时令 $k_2 = 5 \times 10^7$ N/m³, $c_2 = 60$ Ns/m 时, 再次通过谐波平衡-弧长延拓法和四阶龙格库塔对比分析主系统的幅频响应的结果对比图, 结果表明解析解在 30 Hz 附近表现出很强的非线性弯曲现象, 但整体曲线与数值解基本一致重合, 再次证明了研究方法的正确性。由图 3 可知, 系统参数的选取范围直接影响系统的非线性特性。

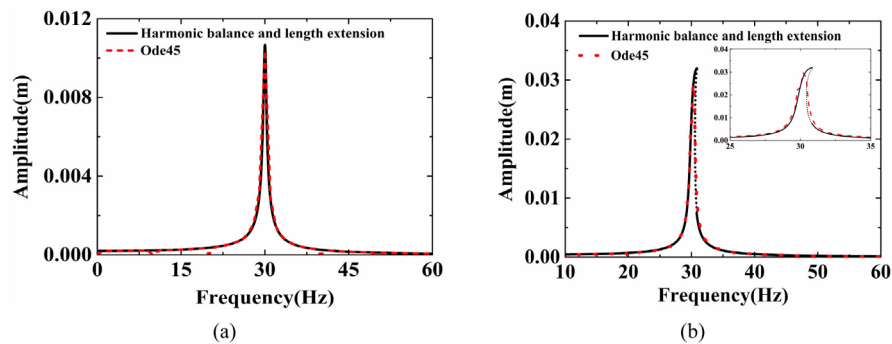


Figure 3. Numerical solution and analytical solution (a) and (b)
图 3. 数值解与解析解(a)和(b)

为了验证耦合系统抑制振动的有效性, 计算了不同频率下稳态响应的最大振幅, 图 4 对比了有无 NES-双向隔振器对系统的幅频响应的影响。结果表明所设计的耦合装置能有效地降低主系统的振动幅值, 尤其是在结构发生共振时效果更明显, 证明所研究的新型耦合系统具有更优良的减振性能。

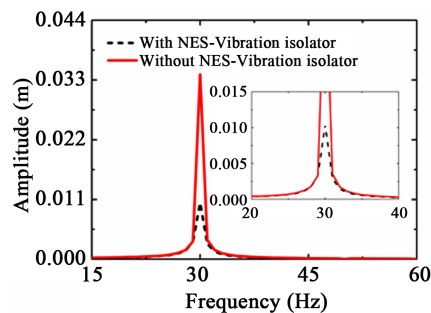


Figure 4. The amplitude-frequency response curves with and without the NES-Vibration isolator system
图 4. 有无 NES-双向隔振器对系统幅频响应的影响

3. 电压对比

这项工作的另一个重点是研究在相对位移下装置的电采集性能, 而系统位移在主系统固有频率处达到最大, 因此研究主系统固有频率的内在机制更为重要。选取数值仿真的激励频率为 30 Hz。图 5(a) 举例说明了在简谐基础激励下主系统 m_1 和 NES 系统 m_2 的位移关系, 结果表明系统稳定时主系统和 NES 耦合系统具有较稳定的位移差, 这为接下来的能量采集提供了理论依据。图 5(b) 举例说明了在简谐基础激励下主系统 m_1 和 NES 系统 m_2 的速率关系; 为接下来电压的对比分析提供参考依据。

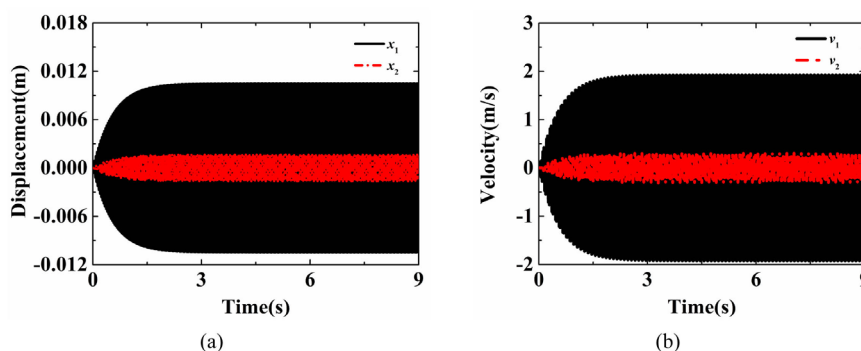


Figure 5. Displacement relationship (a) and velocity relationship (b)

图 5. 位移关系(a)和速率关系(b)

为了估算悬浮磁体在两个固定磁体之间垂直扫掠时的磁通密度 B , 可以得到如下表达式[9]。

$$\begin{cases} B \cong \sum_{i=1}^8 a_i \sin(b_i \chi + c_i) \\ \chi = x_1 - x_2 \end{cases} \quad (6)$$

其中位移的相对关系如图 5(a)所示, 磁通密度拟合曲线函数各参数如表 2 所示[9]。

Table 2. Summation of sin function coefficients of fitted curve for the magnetic flux density, B

表 2. 磁通密度拟合曲线 sin 函数系数的求和, B

i	1	2	3	4	5	6	7	8
a_i	0.03026	0.004159	0.003037	0.001898	0.001071	0.000515	0.000318	3.45e-5
b_i	163.4	332.2	502.8	673.5	829.2	1026	1231	1520
c_i	5.063e-5	-3.141	-2.167e-3	3.143	0.001205	3.127	-7.962e-3	-3.065

其中线圈匝数 $N = 2000$, 线圈平均半径 $r = 22.6$ mm, 线圈内电阻 $R_{\text{coil}} = 1280 \Omega$, 外接元器件的电阻 $R_{\text{load}} = 900 \Omega$, 耦合系统产生的电压可以表示为[9]。

$$V = \frac{BN2\pi r (\dot{x}_1 - \dot{x}_2)}{R_{\text{coil}} + R_{\text{load}}} R_{\text{load}} \quad (7)$$

图 6 对比分析了系统参数和电压输出的关系。图 6(a) 给出了当 NES 阻尼 c_2 分别为 100 Ns/m、200 Ns/m、300 Ns/m、400 Ns/m 和 500 Ns/m 时与所产生电压的结果对比图, 对比结果表明耦合系统电压随阻尼系数的增大而减小, 并且在 30 Hz 附近变化更明显。因此我们可以通过调解 NES 的阻尼参数来实现对输出电压的控制。图 6(b) 给出了当 NES 非线性刚度 k_2 分别为 1×10^7 N/m³、 3×10^7 N/m³、 5×10^7 N/m³、 7×10^7 N/m³ 和 9×10^7 N/m³ 时与所产生的电压关系对比图, 结果表明随非线性刚度的变化对输出电压几乎没有

影响, 因此非线性刚度对耦合系统电压的输出可以忽略不计。图 6(c)给出了当 NES 质量 m_2 分别为 1 kg、3 kg、5 kg、7 kg 和 9 kg 时与所产生的电压关系对比图, 结果表明随着 NES 质量的增大耦合系统输出电压显著增加, 并且在 30 Hz 附近变化更明显, 研究表明适当增加 NES 系统的质量可以采集更多的电压。图 6(d)给出了外电阻 R_{load} 分别为 1 k Ω 、5 k Ω 、10 k Ω 、15 k Ω 和 20 k Ω 时与所产生的电压关系对比图, 结果表明外电阻对耦合系统电压的输出几乎没有影响。由参考文献[9]可知, 系统电压的输出和系统物理参数及振动有关, 由于不同 NES-双向隔振器的物理参数不同, 因此所需的不同耦合系统最优阻抗是不相同的。

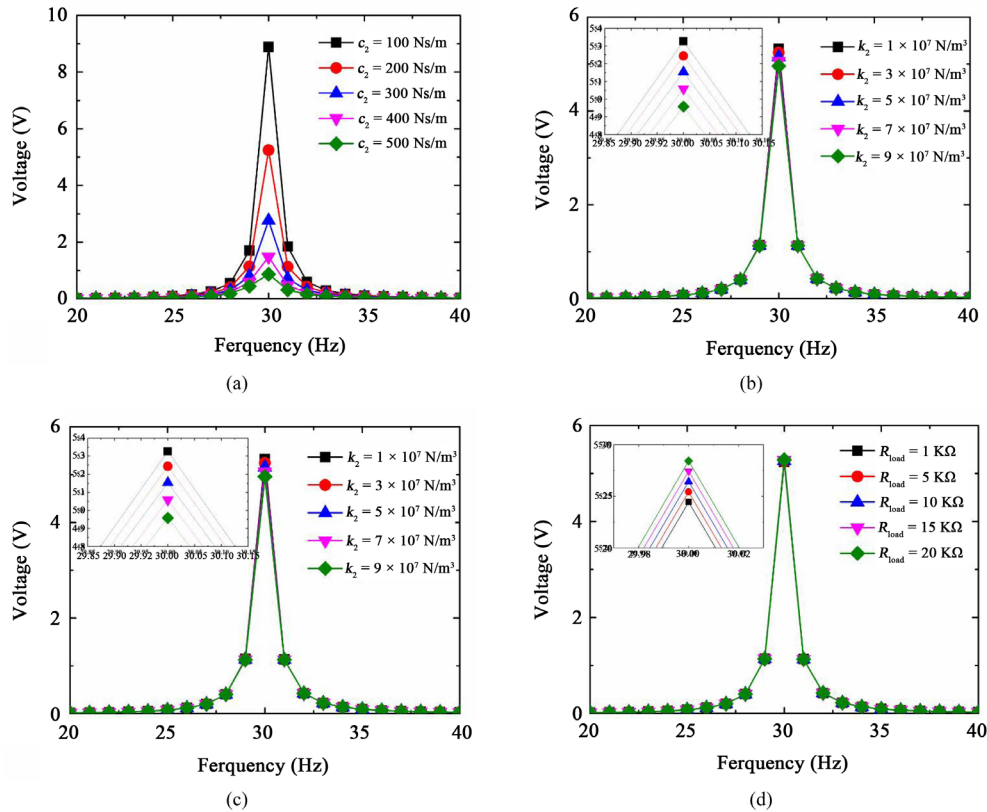


Figure 6. Influence of system parameters on output voltage
图 6. 系统参数对输出电压的影响

4. 能量分析

根据能量守恒原理系统的总能量 $E(t)$ 表示为[10]。

$$E(t) = T_{PS}(t) + V_{PS}(t) + W_{PS}(t) + T_{N-E}(t) + V_{N-E}(t) + W_{N-E}(t) + W_{ELE}(t) \quad (8)$$

其中 $T_{PS}(t)$ 和 $V_{PS}(t)$ 分别为基础结构响应的动能和势能, $W_{PS}(t)$ 为基础阻尼的耗散能, $T_{N-E}(t)$ 和 $V_{N-E}(t)$ 分别为 NES-双向隔振器耦合系统的动能和势能, $W_{N-E}(t)$ 为 NES-双向隔振器耦合系统的阻尼耗散能, $W_{ELE}(t)$ 为双向隔振器产生的电磁能, 并表示如下。

$$T_{PS}(t) = \frac{1}{2} m_1 \dot{x}_1^2(t) \quad (9)$$

$$V_{PS}(t) = \frac{1}{2} k_1 [x_1(t) - u(t)]^2 \quad (10)$$

$$W_{PS} = \int_0^t c_1 [\dot{x}_1(t) - \dot{u}(t)]^2 dt; W_{NES} = \int_0^t c_2 [\dot{x}_1(t) - \dot{x}_2(t)]^2 dt \quad (11)$$

$$T_{N-E}(t) = \frac{1}{2} m_2 \dot{x}_2^2(t) \quad (12)$$

$$V_{N-E}(t) = \frac{1}{4} (k_2 + k_{m3}) [x_1(t) - x_2(t)]^4 + \frac{1}{2} (k_s + k_{m1}) [x_1(t) - x_2(t)]^2 \quad (13)$$

$$W_{N-E}(t) = \int_0^t (c_2 + c_a + c_m) [\dot{x}_1(t) - \dot{x}_2(t)]^2 dt \quad (14)$$

$$W_{ELE}(t) = \int_0^t \left(\frac{BNl(\dot{x}_1(t) - \dot{x}_2(t))}{R_{coil} + R_{Load}} \right)^2 R_{Load} dt \quad (15)$$

为了深入研究 NES 与双向隔振器的内部机理, 对系统中输入能量的分布进行了初步的计算。当系统受基础位移激励时, 运用四阶龙哥库塔数值解对系统进行相关能量计算。基础系统吸收的能量占输入总能量的百分比表示如下。

$$\eta_{PS} = \frac{T_{PS}(t) + V_{PS}(t) + W_{PS}(t)}{E(t)} \times 100\% \quad (16)$$

NES-双向隔振器耦合系统吸收的能量占输入总能量的百分比表示如下。

$$\eta_{N-E} = \frac{T_{N-E}(t) + V_{N-E}(t) + W_{N-E}(t) + W_{ELE}(t)}{E(t)} \times 100\% \quad (17)$$

NES 阻尼耗散掉的能量占输入总能量的百分比表示如下。

$$\eta_{NES,W} = \frac{W_{NES}(t)}{E(t)} \times 100\% \quad (18)$$

NES-双向隔振器耦合系统采集的能量占总能量的百分比表示如下。

$$\eta_{ELE,W} = \frac{W_{ELE}(t)}{E(t)} \times 100\% \quad (19)$$

对振动控制的性能和能量收集效率进行了参数化研究, 进一步优化了所提出的模型。如前所述, NES 系统由质量块、三次刚度非线性的弹簧和粘滞阻尼器构成。在图 7 分别显示了当 NES 阻尼 c_2 变化时, 基础系统吸收的输入能量百分比(a), NES-双向隔振器耦合系统吸收的能量百分比(b), NES 阻尼的能量耗散百分比(c)和耦合系统采集到的能量百分比(d)的变化图。如图所示随着 NES 阻尼参数的变化, 输入能量在各个系统发生了显著变化。结果表明 NES 耦合系统的性能受 NES 阻尼参数 c_2 的影响很大, 随着阻尼参数 c_2 的减小耦合系统在较短时间内可以采集到更多的能量。

如图 8 所示当 NES 刚度 k_2 变化时, 基础系统吸收的输入能量百分比(a), NES-双向隔振器耦合系统吸收的能量百分比(b), NES 阻尼的能量耗散百分比(c), 耦合系统采集到的能量百分比(d)的四个图的变化都不明显。这与图 6 中刚度与电压的对比结果一致, NES 非线性刚度的变化对系统的能量传递关系基本没有影响, 因此 NES 刚度的变化在系统之间能量的传递过程中可以忽略不计。

如图 9 所示给出了当 NES 质量 m_2 变化时, 基础系统吸收的输入能量百分比(a), NES-双向隔振器耦合系统吸收的能量百分比(b), NES 阻尼的能量耗散百分比(c)和耦合系统采集到的能量百分比(d)的变化图。结果表明, NES 的质量对耦合系统的能量采集率有显著的影响, 随着 NES 质量的增加, 初始阶段耦合系统可以在更短的短时间内采集更多的能量, 随后质量的增加对耦合系统的能量采集率并无明显影响。因此在一定范围内通过改变 NES 质量, 可以提高耦合系统的能量采集率, 为外界无线传感器等原件提供更多的电能。

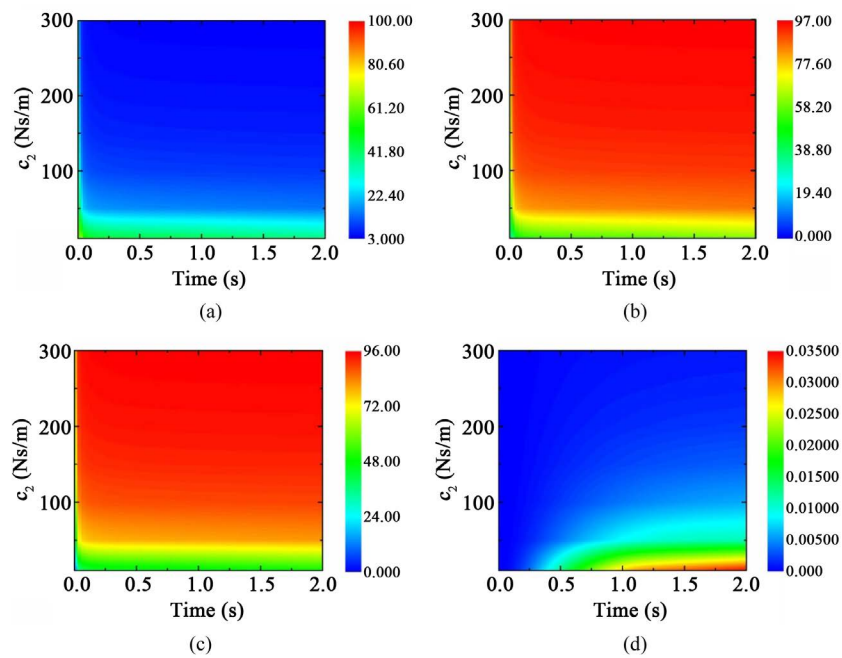


Figure 7. The percentage of input energy absorbed by the primary system (a), the percentage of energy absorbed by the NES-dual-purpose isolator coupling system (b), the energy variation of the NES damping dissipation (c), and the percentage of energy collected by the coupled system (d), when the NES damper c_2 varies

图 7. 当 NES 阻尼 c_2 变化时, 基础系统吸收的输入能量百分比(a), NES-双向隔振器耦合系统吸收的能量百分比(b), NES 阻尼的能量耗散百分比(c)和耦合系统采集到的能量百分比(d)

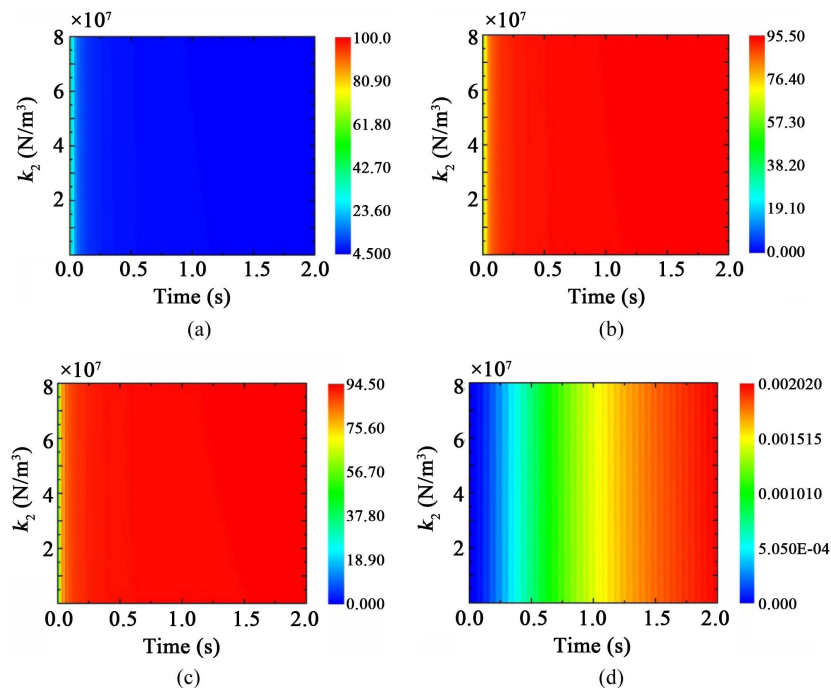


Figure 8. The percentage of input energy absorbed by the primary system (a); the percentage of energy absorbed by the NES-dual-purpose isolator coupling system (b); the energy variation of the NES damping dissipation (c); and the percentage of energy collected by the coupled system (d); when the NES stiffness k_2 varies

图 8. 当 NES 刚度 k_2 变化时, 基础系统吸收的输入能量百分比(a); NES-双向隔振器耦合系统吸收的能量百分比(b); NES 阻尼的能量耗散百分比(c)和耦合系统采集到的能量百分比(d)

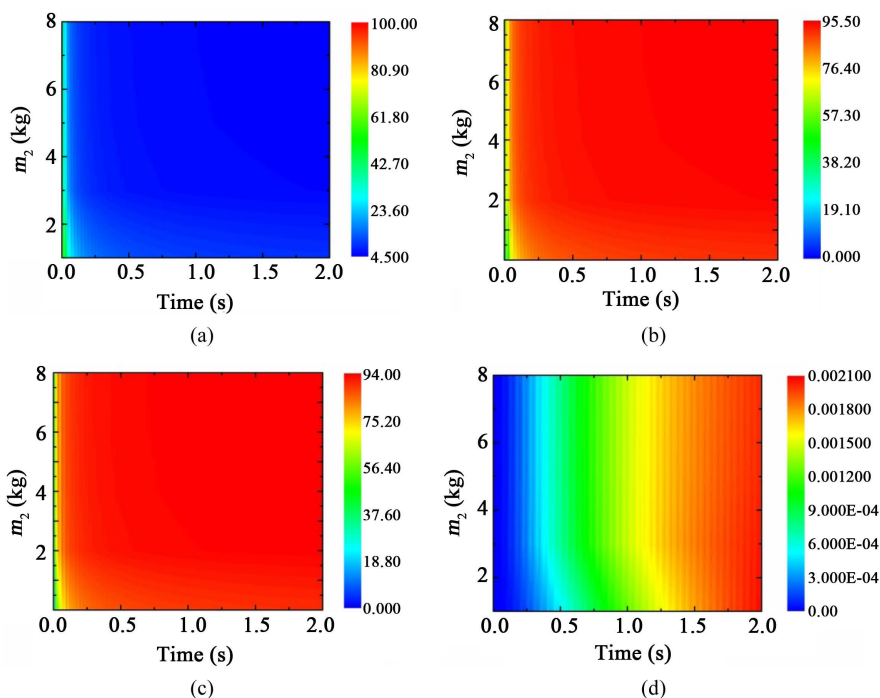


Figure 9. The percentage of input energy absorbed by the primary system (a); the percentage of energy absorbed by the NES-dual-purpose isolator coupling system (b); the energy variation of the NES damping dissipation (c); and the percentage of energy collected by the coupled system (d); when the NES damper m_2 varies

图 9. 当 NES 质量 m_2 变化时, 基础系统吸收的输入能量百分比(a); NES-双向隔振器耦合系统吸收的能量百分比(b); NES 阻尼的能量耗散百分比(c)和耦合系统采集到的能量百分比(d)

如图 10 所示给出了 NES-双向隔振器耦合系统和单一 NES 系统对主系统的能量耗散百分比随时间变化的对比图。在系统基础受到简谐激励的 3 s 时间内耦合系统吸收了主系统能量的 95.1%, NES 系统吸收了主系统能量的 93.8%, 结果表明耦合系统的能量耗散率比单一 NES 系统提高了 1.3%, 证明耦合系统具有更优良的能量耗散性能。

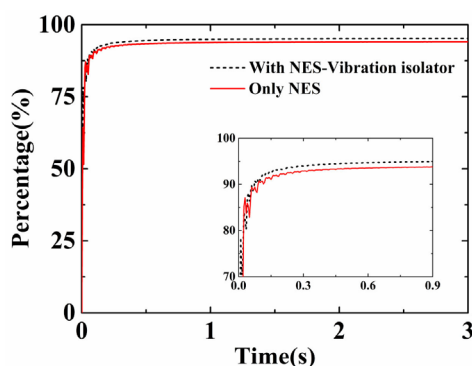


Figure 10. Energy dissipation of NES coupling system with or without vibration isolator

图 10. 有无隔振器的 NES 耦合系统的能量耗散

5. 结论

本文探讨了一种将非线性能量汇(NES)与双向隔振器结合起来实现振动抑制和能量采集的新方法。介绍了一种由 NES、弹簧和磁铁组成的可以进行减振和能量采集耦合系统, 建立了数学模型, 利用谐波平

衡 - 弧长延拓法和四阶龙格库塔对动力学方程进行了数值模拟, 计算了不同频率下的稳态响应幅值、输出电压和能量关系。通过傅里叶变换求得系统主频率, 系统地评估了 NES-双向隔振器的减振性能。然后, 对求得的耦合系统感应电压进行了参数分析。最后从能量在系统之间的传递关系入手, 讨论了 NES 参数对能量在系统之间传递的影响, 并进一步对比分析了系统的能量耗散率。

结合本文的研究, 得到以下结论:

- 1) 解析解与数值解的对比结果一致重合, 证明了数值仿真结果的正确性。
- 2) 对比分析不同频率下系统的幅频响应, 结果表明了 NES-双向隔振器耦合系统具有更优良的减振性能。
- 3) 从能量转换的角度分析, 耦合系统可以将系统能量转化为所需的电能输出, 实现了对系统的能量采集, 并且比传统 NES 系统具有更高的能量耗散率。

基金项目

感谢国家自然科学基金(11772205, 11572182, 51775541, 11672188)和辽宁省教育厅科研基金(L201703, L201737, L201762)的资助。

参考文献

- [1] Vakakis, A.F., Gendelman, O.V., Bergman, L.A., McFarland, D.M., Kerschen, G. and Lee, Y.S. (2009) Nonlinear Targeted Energy Transfer in Mechanical and Structural Systems II. Springer, Netherlands, 161-229.
- [2] Gendelman, O.V. (2011) Targeted Energy Transfer in Systems with External and Self-Excitation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, **225**, 2007-2043. <https://doi.org/10.1177/0954406211413976>
- [3] Santos, M.P.S.D., Ferreira, J.A.F., Simões, J.A.O., Pascoal, R. and Furlani, E.P. (2016) Magnetic Levitation-Based Electromagnetic Energy Harvesting: A Semi-Analytical Non-Linear Model for Energy Transduction. *Scientific Reports*, **6**. <https://doi.org/10.1038/srep18579>
- [4] Lu, Y., Capo-Chichi, M., Leprince-Wang, Y. and Basset, P. (2017) A Flexible Electrostatic Kinetic Energy Harvester Based on Electret Films of Electrospun Nanofibers. *Smart Materials and Structures*, **27**. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa87da>
- [5] Xiong, L., Tang, L., Liu, K., et al. (2018) Broadband Piezoelectric Vibration Energy Harvesting Using a Nonlinear Energy Sink. *Journal of Physics D Applied Physics*, **51**. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aab9e3>
- [6] Chen, L.Q. and Jiang, W.A. (2015) Internal Resonance Energy Harvesting. *Journal of Applied Mechanics*, **82**, 031004. <https://doi.org/10.1115/1.4029606>
- [7] Blokhina, E., Galayko, D., Basset, P., et al. (2013) Steady-State Oscillations in Resonant Electrostatic Vibration Energy Harvesters. *IEEE Transactions on Circuits & Systems I Regular Papers*, **60**, 875-884. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2012.2209295>
- [8] Lefeuvre, E., Badel, A., Richard, C., et al. (2006) A Comparison between Several Vibration-Powered Piezoelectric Generators for Standalone Systems. *Sensors & Actuators a Physical*, **126**, 405-416. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2005.10.043>
- [9] Mahdi, M.S.M. and Hamzeh, B. (2019) A Dual-Purpose Vibration Isolator Energy Harvester: Experiment and Model. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **118**, 360-376. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.08.054>
- [10] Fang, Z.W., Zhang, Y.W., Li, X., et al. (2017) Integration of a Nonlinear Energy Sink and a Giant Magnetostrictive Energy Harvester. *Journal of Sound & Vibration*, **391**, 35-49. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.12.019>

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2325-498X，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ijm@hanspub.org