

Integrated Analysis of Giant Magnetostrictive Energy Harvesting and Nonlinear Vibration Control with Wind Load

Zhenyu Wang, Zhengqi Qin, Jian Zang, Zhen Zhang

College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning
Email: qinzhengqi1974@163.com

Received: Nov. 7th, 2019; accepted: Nov. 22nd, 2019; published: Nov. 29th, 2019

Abstract

In this paper, the mechanism of energy collection integration of nonlinear energy sink (NES) and giant magnetostrictive material (GMM) under wind load is studied. This system has good effect of vibration suppression and energy harvesting with wind load. By using Hamilton principle and Newton's second law, the mathematical model driven by displacement is established, and the simulation is carried out with Runge-Kutta algorithm. The vibration suppression effect of the system is investigated, and the energy harvesting effect of GMM is analyzed. Finally, a comparative analysis of mass and wind load parameters is carried out. The results show that the integrated system of giant magnetostrictive energy harvesting and nonlinear vibration control with wind load has good effect of vibration reduction and energy harvesting.

Keywords

Single Degree of Freedom System, Nonlinear Vibration Control, Nonlinear Energy Sink (NES), Energy Harvesting with Wind Load, Giant Magnetostrictive Material (GMM)

风载作用下的超磁致伸缩能量采集与非线性振动控制一体化分析

王振宇, 秦政琪, 臧健, 张振

沈阳航空航天大学, 航空宇航学院, 辽宁 沈阳
Email: qinzhengqi1974@163.com

收稿日期: 2019年11月7日; 录用日期: 2019年11月22日; 发布日期: 2019年11月29日

摘要

研究了风载作用下非线性能量阱(NES)减振和超磁致伸缩材料(GMM)能量采集一体化机理,该系统拥有良好的振动抑制效果和风载作用下的能量采集性能。利用Hamilton原理建立了位移驱动下的数学模型,并用Runge-Kutta算法进行了数值仿真,考察该系统的振动抑制效果,分析了超磁致(GMM)结构的能量采集效应。最后,进行了质量和风载相关参数的对比分析。研究表明,风载作用下的超磁致伸缩能量采集与非线性振动控制一体化系统具有良好的减振和能量采集效果。

关键词

单自由度系统, 非线性振动控制, 非线性能量阱(NES), 风载能量采集, 超磁致伸缩材料(GMM)

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. 介绍

振动广泛存在于各种各样的工程条件中,尤其在航空领域,振动问题一直是备受关注的研究课题。整星隔振技术,基于“改善力学环境”这一思想而出现。整星振动控制主要分为被动、主动以及主被动一体化三种形式,而在现实环境中,由于主被动一体化的整星振动控制受到外用电源的限制而不能实现。因此,对于振动能量的采集及应用就显得尤为重要。

非线性能量阱(NES)是一种利用非线性能量吸收为基础的非线性吸振器,由一个质量弹簧阻尼器组成,使得刚度本质上是非线性的,振动能量通过阻尼耗散,从而实现减振效果[1]。

近年来,非线性能量阱(NES)受到广泛的关注。研究指出,NES具有吸振频带宽、吸振效率高,可以传递能量的特点,且这种传递是不可逆的[2]。除此之外,由于NES的高效减振性能,许多人对其复杂的动力学特性进行了研究。Wierschem等人[3]对不同质量下的NES能量传递效率进行了研究,发现在合适范围内,NES质量越小,主系统能量传递效率越高。在此基础上,Gendelman等人对简谐激励下的NES系统进行了振动抑制的分析,运用平均-多尺度方法,给出了耦合振动中能量传递的证据[4]。

此外,为了体现能量采集在振动抑制过程中的重要性,近几年,越来越多的能量采集方法被人们提出[5][6][7][8]。其中,基于电磁、压电等的多种振动能量采集装置被开发并应用,Chen等人设计了一种电磁能量收集器[9]。这种收集器,不需要外界电能的供给,是一种新型的能源再利用和解决污染的方案,但相对的,这种方法可能引起更多的振荡,这对于工程的引用相当不利。如今,随着磁致伸缩材料的出现,得到了广泛的研究[10][11],相比于压电材料而言,该能量采集材料密度更高,响应速度更快。Fang和Zhang等人[12][13]首次将超磁致伸缩材料(GMM)与NES相结合实现振动抑制以及能量采集,相比于磁致伸缩材料而言,超磁致伸缩材料具有更高的磁致伸缩系数,更适用于对振动能量的采集。Xu等[14]通过引入非线性输出频率响应扩展了相似模型,更好地将此研究应用于工程领域。

本文为寻求更好更有效的振动抑制及能量采集效率,提出一种新型单自由度结构系统,在方形钝体内部嵌入NES和GMM,使其在风载的作用下,实现振动的控制以及对振动能量的采集效果,将采集的能量转化并加以利用。通过对整个系统进行动力学分析,建立动力学方程,进行数值模拟,得到结果表

明该系统具有更好的减振性能。之后，根据能量守恒定律，分析对比系统能量转换效率，通过改变系统参数，对比时域影响，进一步研究该系统减振性能及能量采集效果，为非线性振动控制的分析提供了新的思路。

2. 动态模型

如图 1 所示，质量为 m_1 的方形钝体内部嵌入平行放置的 NES 和 GMM 系统，其整体由线性刚度为 k_1 的线性弹簧和阻尼为 c_1 的粘性阻尼器相连于底座。其中 NES 系统由阻尼 c_2 和具有立方刚度的弹簧 k_2 通过 m_2 与 GMM 系统相连，实现振动过程的传递。GMM 系统通过部分线圈和电阻 R 组成简单的循环电路。位移 x_1 和 x_2 分别代表在外部激励 u 和风载 U 作用下 m_1 和 m_2 的运动。该模型将 NES 与 GMM 平行放置，能量采集及振动控制效果更加显著，对其展开进行进一步的研究，有望应用于工程等领域。

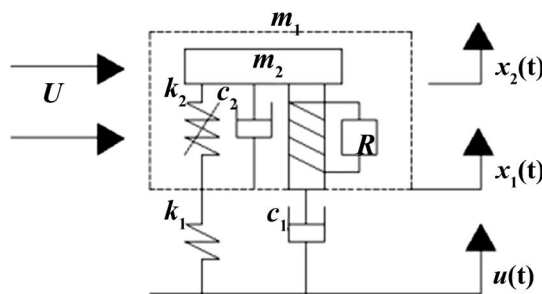


Figure 1. New single degree of freedom structure with wind load
图 1. 风载下的减振与能量采集一体化系统

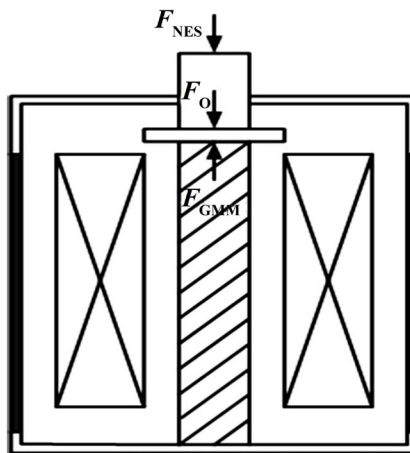


Figure 2. The cross section of a giant magnetostrictive energy harvester [13]
图 2. 超磁致伸缩能量采集器横截面[13]

利用牛顿第二定律，建立动力学方程如下：

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 (\dot{x}_1 - \dot{u}) - c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_1 (x_1 - u) - k_2 (x_2 - x_1)^3 + F_{NES} + F_U (\dot{x}_1) &= 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2 (x_2 - x_1)^3 - F_{NES} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

其中， F_{NES} 是施加在 NES 上的力； $F_U (\dot{x}_1)$ 表示风载作用在方形钝体 m_1 上的等效力，可假定如下所示[15]：

$$F_U (\dot{x}_1) = \frac{1}{2} \rho_a D U^2 \sum_{n=1,2,\dots} a_n \left(\frac{\dot{x}_1 - \dot{u}}{U} \right)^n \quad (2)$$

式中, ρ_a 是气体密度; D 是方形钝体的直径; a_n 是通过实验测量确定的经验系数[15] [16]。

如图 2 所示, 结合 GMM 的实际应用, 从应力状态推导得到以下方程:

$$F_{NES} = F_{GMM} - F_0 = (\sigma - \sigma_0) \frac{\pi d_{GMM}^2}{4} \quad (3)$$

其中, F_{GMM} 是 GMM 对方形钝体施加的力; F_0 是为了防止损坏 GMM 而施加的预加力; σ_0 是预应力; σ 和 d_{GMM} 分别是 GMM 伸缩杆的应力和直径。

考虑到 GMM 的本构关系, 磁致伸缩系数 λ 、总磁化强度 M 和应力 σ 间的关系如[13]所述:

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E_m} + \lambda = \frac{\sigma}{E_m} + \frac{3 \lambda_s M^2}{2 M_s^2} = \frac{x_1 - x_2 + \Delta_0}{l_{GMM}} \\ M = \frac{H_0 M_s}{3a - \tilde{\alpha} M_s} \left(1 - e^{-\frac{\sigma^2 (\tilde{\alpha} M_s - 3a)}{2 E_m \zeta (3a - \tilde{\alpha} M_s \tilde{\alpha})}} \right) \end{cases} \quad (4)$$

其中, λ_s 和 M_s 分别是饱和磁致伸缩系数和饱和磁化强度; ε 是应变; E_m 是杨氏模量; Δ_0 表示预应力引起的位移; l_{GMM} 是 GMM 的长度; 参数 $\tilde{a} = a + \frac{9 l_s s_0}{2 m_0 M_s^2}$, α 是磁场域相互作用的量; μ_0 是磁导率; H_0 是磁偏量; a 是磁致磁化因子; ζ 是单位体积能量维度系数; $\tilde{\alpha}$ 表示比例系数。

在超磁致能量采集器中, 磁感应强度 B 的表达式[17] [18]:

$$B = d_t \sigma + \mu_\sigma H \quad (5)$$

其中, d_t 表示电磁机械效应的参数; μ_σ 表示恒定应力下的磁导率。依据法拉第电磁感应定律, 得到电压 $U(t)$ 和功率 $P(t)$ 的表达式如下:

$$\begin{aligned} U(t) &= N_c \frac{d\phi}{dt} = N_c A_c \frac{dB}{dt} = N_c A_c \left(d_t \frac{d\sigma}{dt} + \mu_\sigma \frac{dM}{d\sigma} \frac{d\sigma}{dt} \right) \\ P(t) &= \frac{U^2(t)}{R} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, N_c 代表磁感应线圈的匝数; ϕ 表示磁通量; A_c 是磁感应线圈的横截面积。

综上, 动力学方程最终确定为:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 (\dot{x}_1 - \dot{u}) - c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_1 (x_1 - u) - k_2 (x_2 - x_1)^3 + (\sigma - \sigma_0) \frac{\pi d_{GMM}^2}{4} \\ + \frac{1}{2} \rho_a D U^2 \sum_{n=1,2,\dots} a_n \left(\frac{\dot{x}_1 - \dot{u}}{U} \right)^n = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2 (x_2 - x_1)^3 - (\sigma - \sigma_0) \frac{\pi d_{GMM}^2}{4} = 0 \\ \frac{\sigma}{E_m} + \frac{3 \lambda_s H_0^2}{2 (3a - \tilde{\alpha} M_s)^2} \left(1 - e^{-\frac{\sigma^2 (\tilde{\alpha} M_s - 3a)}{2 E_m \zeta (3a - \tilde{\alpha} M_s \tilde{\alpha})}} \right)^2 = \frac{x_1 - x_2 + \Delta_0}{l_{GMM}} \end{aligned} \quad (7)$$

3. 模拟分析

通过借鉴前人的计算方法, 运用 Runge-Kutta 法模拟动力学方程, 将二阶微分代数方程(DAEs)转化为一阶微分方程(DAEs), 然后运用 MATLAB 软件进行求解, 得到该模型的振动响应和系统能量的变化。最后, 通过改变相关参数, 进行对比分析。数值模拟中使用的参数见表 1。

Table 1. System parameters
表 1. 系统参数

参数	数值	参数	数值
m_1 (kg)	60	m_2 (kg)	7
c_1 (Ns/m)	10	c_2 (Ns/m)	1000
k_1 (N/m)	2.13146×10^6	k_2 (N/m ³)	500
R (Ω)	1	d_{GMM} (m)	0.0127
ζ (Pa)	8×10^3	d_c (m)	0.0162
σ_0 (Pa)	6.9×10^6	d_t (m)	1.79×10^{-8}
μ_0 (N/A ²)	$4\pi \times 10^{-7}$	D (m)	0.25
H_0 (A/m)	1.592×10^4	l_{GMM} (m)	0.115
M_s (A/m)	7.65×10^5	U (m/s)	1
a (A/m)	7012	ρ_a (kg/m ³)	1.2
E_m (N/m ²)	3×10^{10}	\tilde{c}	0.18
λ_s	1.003×10^{-3}	N_c	600
$\tilde{\alpha}$	-0.01	a_1	2.3

振动抑制效果的好坏，一直是振动控制环节的核心部分，其主要体现在振幅的衰减上。图 3 描述了在没有 NES-GMM 系统控制的情况下和有 NES-GMM 系统控制的情况下，其振幅的变化情况，观察可见，在没有 NES-GMM 系统时，该振动过程几乎没有衰减，而在加入 NES-GMM 系统后，系统振幅迅速衰减，且效果显著。通过放大观察发现，系统在 12 秒时，振幅几乎达到最小值，往后基本保持不变。可见，NES-GMM 系统对于振动的抑制效果是极好的。

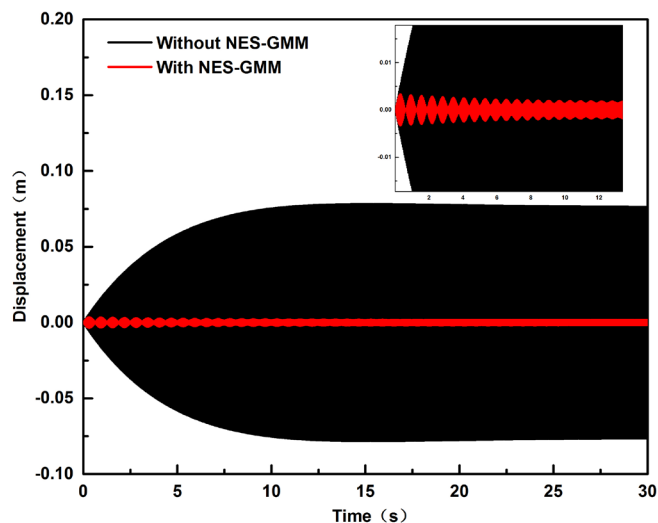


Figure 3. Amplitude response of the system under different conditions
图 3. 系统在不同情况下的振幅响应

在此基础上，为探究该结构的能量采集效果，并分析系统各部分之间的能量转化效率，对其进行进一步研究。其各部分能量表示如下：

$$T_{PS}(t) = \frac{1}{2} \left[\int_{V_t} \rho (\dot{u}_t^2 + \dot{v}_t^2) dV + \int_{V_b} \rho (\dot{u}_b^2 + \dot{v}_b^2) dV + \int_{V_c} \rho_c (\dot{u}_c^2 + \dot{v}_c^2) dV \right]$$

$$T_{NES} = \frac{1}{2} m \dot{u}_m^2$$

$$V_{NES} = \frac{1}{4} k (u_m - v)^4$$

$$W_{NES} = \int_0^t c (\dot{u}_m - \dot{v})^2 d\tau$$

$$W_h = \int_0^t \frac{U^2(t)}{R} d\tau$$

$$W_m = \frac{1}{2} B(t) H(t) A_{GMM} l_{GMM}$$

$$W_s = \frac{1}{2} \sigma(t) A_{GMM} (|u_m - v| + \Delta_0) \quad (8)$$

其中, T 代表动能, V 代表势能, 其下标 PS 和 NES 用以区分主系统和 NES 系统。 W_{NES} 、 W_h 、 W_m 以及 W_s 分别表示 NES 阻尼器耗散的能量, GMM 中获得的能量, GMM 的磁能和应变能。 综上, 依据能量守恒定律, 输入的总能量以及 NES-GMM 系统消耗和获取的能量所占比例可以表示为:

$$W_{in} = T_{PS} + T_{NES} + V_{NES} + W_{NES} + W_h + W_m + W_s$$

$$\eta_{NES,W} = \frac{W_{NES}}{W_{in}} \times 100\%$$

$$\eta_{GMM,h} = \frac{W_h}{W_{in}} \times 100\% \quad (9)$$

如图 4 所示, NES-GMM 系统能量的耗散和采集速度很快, 在短时间内, 耗散比便稳定在 40%, 采集比达到 60%, 能量采集率很高。 主系统输出的能量随时间不断流入 NES-GMM 系统, 被 NES 系统耗散或被 GMM 系统收集, 通过不断的循环, 从图 5 中可见, 在 25 s 左右, 系统能量达到最小值, 与此同时, NES-GMM 系统的能量也随主系统能量变化而不断变化。

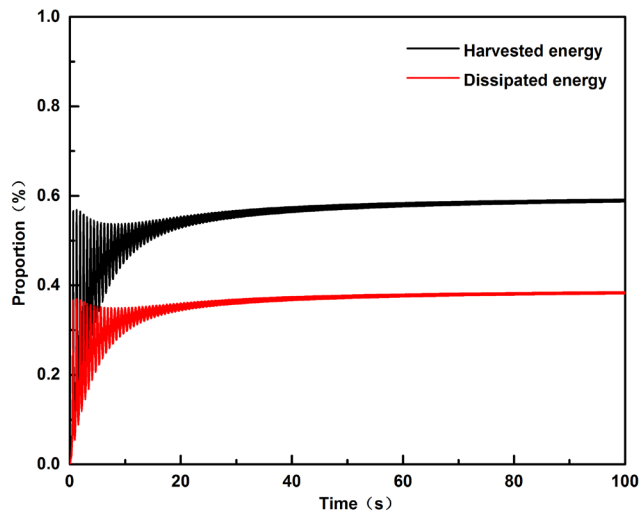


Figure 4. Percentage of dissipated and harvested energy in NES-GMM system
图 4. NES-GMM 系统的耗散能和采集能的百分比

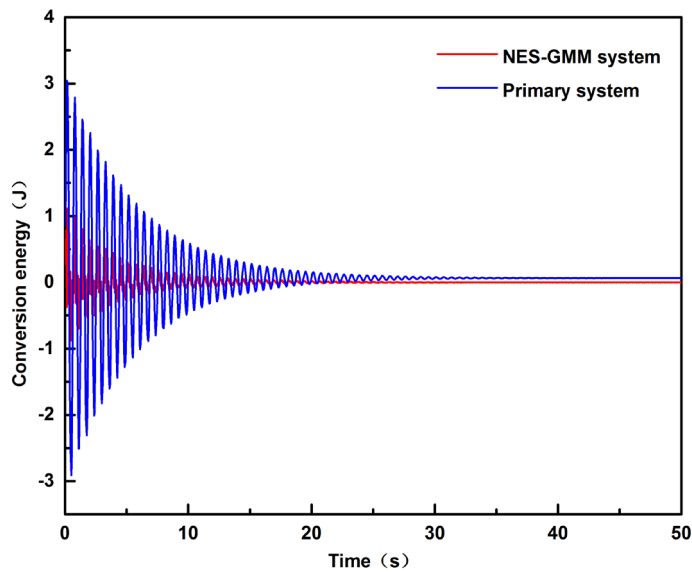


Figure 5. Energy change of main system and NES-GMM system
图 5. 主系统、NES-GMM 系统的能量变化

通过进一步分析, 在 NES 系统中, 如图 6 所示, 动能大小不断往复变化, 绝对值逐渐趋近于 0, 即主系统最终停止振动, 由放大部分可见, 其耗散能量始终为正, 这表明 NES 耗散能量一直在增加, 只是速度逐渐减慢, 直到最后能量耗散停止。

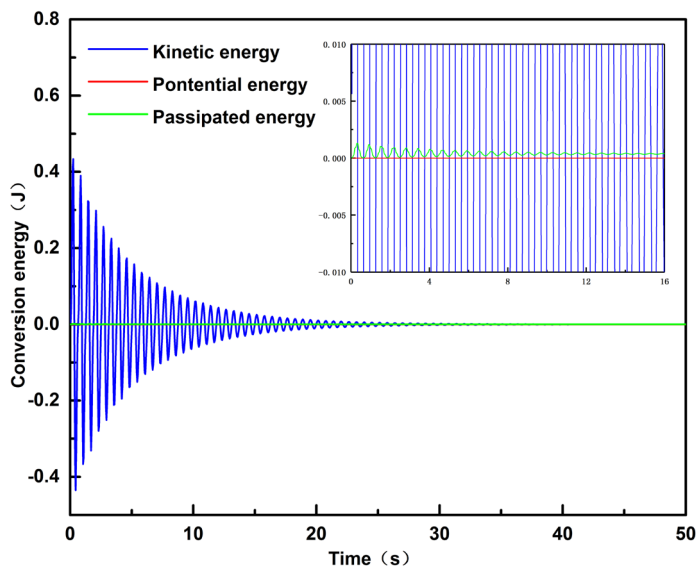


Figure 6. Changes of damping energy, kinetic energy and potential energy of NES system
图 6. NES 系统阻尼能、动能和势能的变化

相比于 NES 系统, 由于 GMM 系统的振动频率大, 超磁致伸缩杆的膨胀速度快, 因而磁能的变化相对较快。在图 7 中, 明显看到应变能逐步趋近于 0。放大发现, GMM 收集的能量始终在增加, 这也表明, GMM 系统有着良好的能量采集效果。

此外, 为得到更深入的研究结果, 对风载和 NES 参数进行研究, 在其他参数固定不变的情况下, 对 NES 质量 m_2 和风载速度 U 进行调整, 对比情况分别如图 8、图 9 所示。

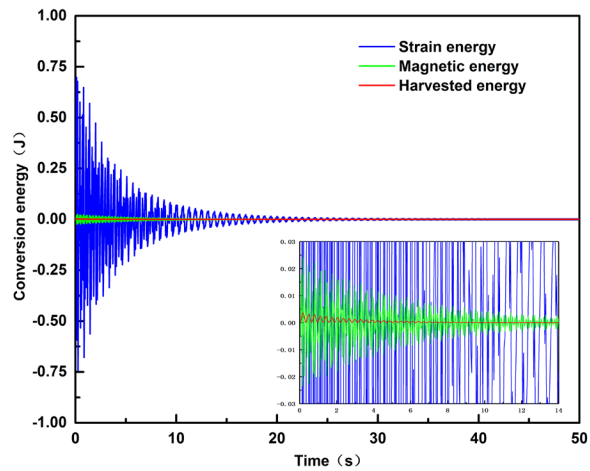


Figure 7. Changes of magnetic energy, acquisition energy and strain energy in GMM system
图 7. GMM 系统中磁能、采集能和应变能的变化

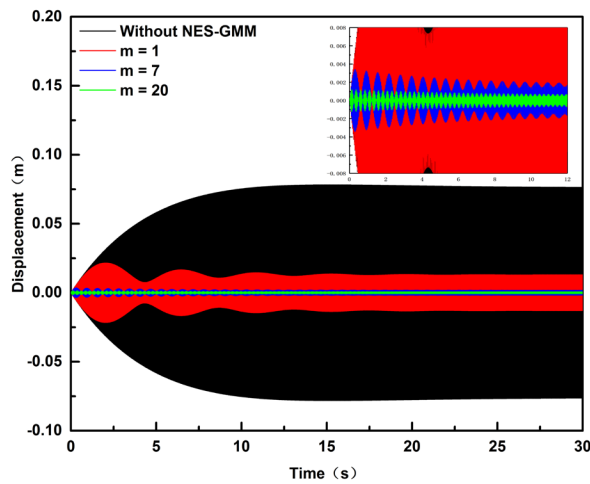


Figure 8. Comparison of amplitude attenuation effects: different masses of NES
图 8. 振幅衰减效果比较: 不同 NES 质量

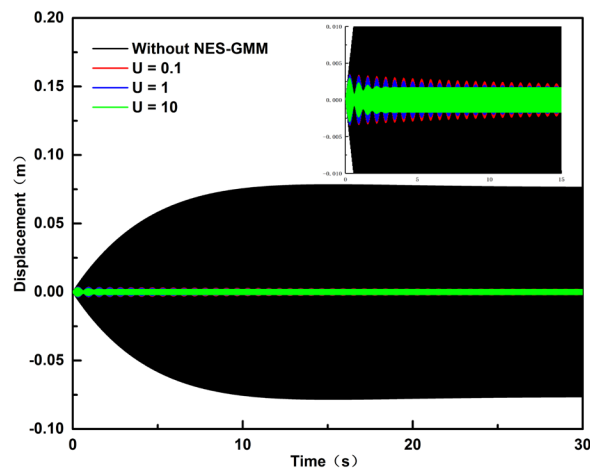


Figure 9. Comparison of amplitude attenuation effects: different speeds of wind load
图 9. 振幅衰减效果比较: 不同风载速度

可见,在改变 NES 质量的情况下,振幅的衰减速率明显不同,随着质量的在合理范围内的逐渐变大,振幅的衰减速度越来越快,且稳定时更接近于 0,这表明 NES 的质量与振动的抑制效果是密切相关的,且 NES 质量越大,振动抑制效果越好。而风载的改变并没有影响系统稳定时的振幅大小,只影响了振幅的衰减速度,当风载逐渐增大时,系统振幅的衰减速度也随之变快,但相对于质量的改变来说,影响相对较小。

4. 结论

本文提出了在方形钝体内部嵌入平行放置的 NES 和 GMM,形成一种新型的单自由度结构。运动方程由牛顿第二定律和假设模态法导出。通过数值模拟分析得到了该系统在风载作用下的振动效果以及能量的获取和耗散情况。在此基础上,还通过改变相关参数进行了对比分析。最终,得到以下几条结论:

- 1) 本文的构想在振动控制和能量采集领域是具有一定意义的,在理论上该结构的设计是完全可行的。
- 2) 该系统振动抑制和能量采集效果显著,振幅迅速衰减,在 12 秒左右趋近于零,大部分能量被 GMM 系统收集,采集比达到 60%,仅有 40%被 NES 系统耗散。
- 3) 通过改变 NES 的相关参数,可以提高振动控制的效果。NES 质量和风载大小的增加有助于系统振幅的衰减。

参考文献

- [1] Taghipour, J. and Dardel, M. (2015) Steady State Dynamics and Robustness of a Harmonically Excited Essentially Nonlinear Oscillator Coupled with a Two-DOF Nonlinear Energy Sink. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **62-63**, 164-182. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.03.018>
- [2] Kopidakis, G., Aubry, S. and Tsironis, G.P. (2001) Targeted Energy Transfer through Discrete Breathers in Nonlinear Systems. *Physical Review Letters*, **87**, Article ID: 165501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.165501>
- [3] Wierschem, N.E., Luo, J., Al-Shudeifat, M., et al. (2014) Experimental Testing and Numerical Simulation of a Six-Story Structure Incorporating Two-Degree-of-Freedom Nonlinear Energy Sink. *Journal of Structural Engineering*, **140**, Article ID: 04014027. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000978](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000978)
- [4] Gendelman, O., Manevitch, L.I., Vakakis, A.F. and M'Closkey, R. (2001) Energy Pumping in Nonlinear Mechanical Oscillators: Part I—Dynamics of the Underlying Hamiltonian Systems. *Journal of Applied Mechanics*, **68**, 34-41. <https://doi.org/10.1115/1.1345524>
- [5] Zhou, S., Cao, J., Inman, D.J., Lin, J., Liu, S. and Wang, Z. (2014) Broadband Tristable Energy Harvester: Modeling and Experiment Verification. *Applied Energy*, **133**, 33-39. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.077>
- [6] Naifar, S., Bradai, S., Viehweger, C. and Kanoun, O. (2017) Survey of Electromagnetic and Magnetoelectric Vibration Energy Harvesters for Low Frequency Excitation. *Measurement*, **106**, 251-263. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.074>
- [7] Zhou, S. and Zuo, L. (2018) Nonlinear Dynamic Analysis of Asymmetric Tristable Energy Harvesters for Enhanced Energy Harvesting. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, **61**, 271-284. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2018.02.017>
- [8] Palneedi, H., Annapureddy, V., Priya, S. and Ryu, J. (2016) Status and Perspectives of Multiferroic Magnetoelectric Composite Materials and Applications. *Actuators*, **5**, 9. <https://doi.org/10.3390/act5010009>
- [9] Chen, L.Q. and Jiang, W.A. (2015) Internal Resonance Energy Harvesting. *Journal of Applied Mechanics*, **82**, Article ID: 031004. <https://doi.org/10.1115/1.4029606>
- [10] Wang, L. and Yuan, F.G. (2008) Vibration Energy Harvesting by Magnetostrictive Material. *Smart Materials and Structures*, **17**, 45009-45014. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/17/4/045009>
- [11] Davino, D., Giustiniani, A. and Visone, C. (2009) Analysis of a Magnetostrictive Power Harvesting Device with Hysteretic Characteristics. *Journal of Applied Physics*, **105**, 07A939. <https://doi.org/10.1063/1.3077208>
- [12] Fang, Z.W., Zhang, Y.W., Li, X., et al. (2017) Complexification-Averaging Analysis on a Giant Magneto-Strictive Harvester Integrated with a Nonlinear Energy Sink. *Journal of Vibration and Acoustics*, **140**, Article ID: 021009. <https://doi.org/10.1115/1.4038033>
- [13] Fang, Z.W., Zhang, Y.W., Li, X., Ding, H. and Chen, L.Q. (2016) Integration of a Nonlinear Energy Sink and a Giant

Magnetostrictive Energy Harvester. *Journal of Sound and Vibration*, **391**, 35-49.

<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.12.019>

- [14] Xu, K.F., Zhang, Y.W., Lu, Y.N. and Chen, L.Q. (2018) Dynamic Analysis of Nonlinear Energy Sink and Gaint Magnetostrictive Material Energy Harvester on Account of Nonlinear Output Frequency Response Functions. *International Conference on Modelling, Identification and Control*, Guiyang, 2-4 July 2018, 1-3. <https://doi.org/10.1109/ICMIC.2018.8529952>
- [15] Barrero-Gil, A., Alonso, G. and Sanz-Andres, A. (2010) Energy Harvesting from Transverse Galloping. *Journal of Sound and Vibration*, **329**, 2873-2883. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2010.01.028>
- [16] Parkinson, J.V. and Smith, J.D. (1964) The Square Prism as an Aeroelastic Nonlinear Oscillator. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, **17**, 225-239. <https://doi.org/10.1093/qjmam/17.2.225>
- [17] Berbyuk, V. (2007) Towards Dynamics of Controlled Multibody Systems with Magnetostrictive Transducers. *Multibody System Dynamics*, **18**, 203-216. <https://doi.org/10.1007/s11044-007-9078-y>
- [18] Berbyuk, V. and Sodhani, J. (2008) Towards Modelling and Design of Magnetostrictive Electric Generators. *Computers & Structures*, **86**, 307-313. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2007.01.030>