

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.04.011

GMA 非线性振动系统混沌特性研究^{*}

闫洪波¹, 高 鸿¹, 郝宏波², 牛 禹¹

(1. 内蒙古科技大学 机械工程学院, 内蒙古 包头 014010;

2. 包头稀土研究院 白云鄂博稀土资源研究与综合利用国家重点实验室, 内蒙古 包头 014030)

摘要:针对超磁致伸缩驱动器非线性振动系统的混沌特性问题,对该系统的响应随激励频率、激励力参数变化进行了研究。在分析 GMA 工作原理的基础上,建立了 GMA 非线性振动系统的数学模型,给出了该系统的振动方程;利用 Matlab 软件进行了数值仿真分析,通过求解 GMA 非线性振动系统的响应随激励频率、激励力参数变化分岔图,确定了该系统产生混沌时激励频率、激励力参数的取值范围;采用 4 阶 Runge-Kutta 法绘制了 GMA 非线性振动系统的位移时间历程图、相图、Poincaré 映射图、幅值谱图;使用 ADAMS 软件对位移时间历程曲线进行了实验仿真验证对比。研究结果表明:GMA 非线性振动系统具有混沌特性;通过对该系统的混沌特性研究,得到的结论为该系统的混沌特性应用提供了理论依据和技术支持。

关键词:超磁致伸缩驱动器;非线性振动系统;混沌特性;分岔

中图分类号:TH113.1;O322

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)04-0399-06

Chaotic characteristics of giant magnetostrictive actuator nonlinear vibration system

YAN Hong-bo¹, GAO Hong¹, HAO Hong-bo², NIU Yu¹

(1. College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China;

2. State Key Laboratory of Bayan Obo Rare Earth Resource Researches and Comprehensive Utilization,
Baotou Research Institute of Rare Earths, Baotou 014030, China)

Abstract: Aiming at the chaotic characteristics of the nonlinear vibration system of giant magnetostrictive actuator, the response of the system was studied with the variation of excitation frequency and excitation force parameters. Based on the analysis of the working principle of GMA, the mathematical model of GMA nonlinear vibration system was established and the vibration equation of the system was given. The numerical simulation analysis was carried out by using Matlab software. By calculating the response of the GMA nonlinear vibration system with the excitation frequency and the excitation force parameter, the range of excitation frequency and excitation force parameters of the system was determined. The displacement time history diagram, phase diagram, Poincaré map and amplitude spectrum of GMA nonlinear vibration system were drawn by the fourth-order Runge-Kutta method. The ADAMS software was used to verify the simulation of the displacement time history curve. The results indicate that the GMA nonlinear vibration system has chaotic characteristics. By studying the chaotic characteristics of the system, the conclusions obtained can provide theoretical basis and technical support for the application of chaotic characteristics of the system.

Key words: giant magnetostrictive actuator(GMA); non-linear vibration system; chaos characteristics; bifurcation

收稿日期:2019-08-19

基金项目:科技部创新方法工作专项资助项目(2017M010660);内蒙古自治区自然科学基金重大项目(2018ZD10)

作者简介:闫洪波(1981-),男,河南洛阳人,副教授,主要从事稀土超磁致伸缩材料工业化应用及实施方面的研究。E-mail: nkdyhb@imust.cn

0 引 言

超磁致伸缩材料(giant magnetostrictive materials, GMM)作为一种新型功能材料,能够实现磁能与机械能互相转换,与其他智能材料相比,其具有居里温度高、磁-机械耦合系数高、频响特性好、磁致伸缩应变量大等优点^[1-2]。目前,GMM 被广泛应用于驱动电液伺服阀、机械振动控制、微型机电系统、主动安装等领域^[3-7]。

超磁致伸缩驱动器(GMA)在输入电流与输出位移之间,存在着非线性现象,严重破坏 GMA 的非线性稳定性^[8-9]。混沌是非线性系统中一种特殊的运动形式。如果 GMA 被置于一个非线性混沌系统的工作过程中,对 GMA 系统的长期预测、控制成为不可能,严重阻碍 GMA 在许多重要领域的应用。因此,研究非线性振动系统混沌特性,在 GMA 中起着重要作用。目前,对 GMA 非线性振动系统混沌特性的研究成果很少,但对其他非线性振动系统的混沌特性却开展了大量研究^[10-13]。

根据现有的非线性振动系统混沌特性研究成果,本文建立 GMA 非线性振动系统的数学模型,对其混沌特性进行研究。

1 GMA 结构与工作原理

GMA 结构如图 1 所示。

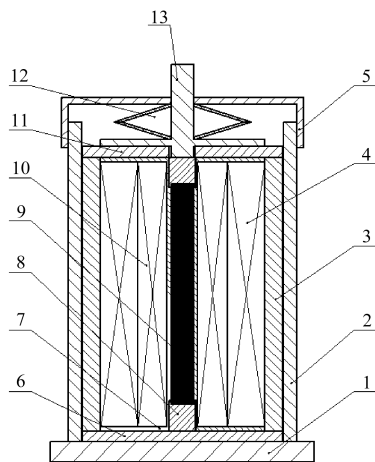


图 1 GMA 结构

1—底座;2—外壁套筒;3—导磁套;4—激励线圈;5—上端盖;6—下导磁环;7—线圈骨架;8—导磁片;9—GMM 棒;10—偏置线圈;11—上导磁环;12—碟簧;13—输出杆

由图 1 可知,GMA 的工作原理为:通过改变激励

线圈输入交流电流的大小,使 GMA 的内部磁场发生变化,因此 GMM 棒的轴向长度发生变化,实现了磁能与机械能的转换。输入直流电流产生偏置磁场,消除 GMA 的倍频现象;采用碟簧预紧结构给 GMM 棒施加一定的预压力,使 GMM 棒获得更大伸缩量;使用导磁套、导磁环和导磁片形成闭合磁路,可减少磁漏,也降低驱动器中磁场对外部设备的干扰^[14]。

2 GMA 非线性振动系统模型

基于 GMA 工作原理,GMA 等效力学系统模型如图 2 所示。

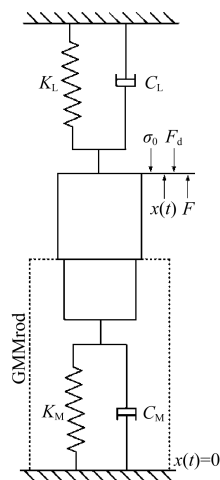


图 2 GMA 等效力学系统模型

图 2 中,GMA 可以看作是一个单自由度二阶质量弹性阻尼系统。

由文献[15]可知,GMM 棒的总应变 ζ 为:

$$\zeta = \frac{\sigma}{E_y^H} + \lambda - \left(\frac{c_D}{E_y^H} \right) \dot{\zeta} - \frac{\rho l_M^2}{3E_y^H} \ddot{\zeta} \quad (1)$$

式中: σ —材料应力; E_y^H —材料弹性模量; λ —各向同性材料的磁致伸缩长度; c_D —GMM 棒的内部阻尼系数; l_M —GMM 棒的有效长度; ρ —GMM 棒的质量密度。

其中:

$$\lambda = \frac{3\lambda_s}{2M_s^2} M^2 \quad (2)$$

式中: λ_s —各向同性材料的饱和磁致伸缩系数; M —磁化强度; M_s —饱和磁化强度。

对 GMM 棒进行受力分析,负载对 GMM 棒的作用力为:

$$F_d = m_L \ddot{x}(t) + c_L \dot{x}(t) + k_L x(t) + b x^3(t) \quad (3)$$

式中: F_d —负载的输出力; m_L —负载的等效质量; c_L —负载的等效阻尼系数; k_L —负载的等效刚度系数; b —

碟簧三次刚度项系数。

根据牛顿第三定律有:

$$F = - (F_d + \sigma_0 S_m) \tag{4}$$

式中: F —GMM 棒的输出力; S_m —GMM 棒的横截面积; σ_0 —预应力。

将式(3) 代入式(4) 可得:

$$F = - (m_L \ddot{x}(t) + c_L \dot{x}(t) + k_L x(t) + bx^3(t) + \sigma_0 S_m) \tag{5}$$

由应变 $\zeta = x/l_M$, 将式(1,5) 联立可得 GMA 振动方程为:

$$m\ddot{x}(t) + c_1\dot{x}(t) + k_1x(t) + bx^3(t) = S_mE_y^H\lambda - \sigma_0S_m \tag{6}$$

式中:

$$m = m_M + m_L \quad c_1 = c_M + c_L \quad k_1 = k_M + k_L \tag{7}$$

$$m_M = \frac{\rho l_M S_m}{3} \quad c_M = \frac{c_D S_m}{l_M} \quad k_M = \frac{E_y^H S_m}{l_M} \tag{8}$$

式中: m_M —GMM 棒的等效质量; c_M —GMM 棒的等效阻尼系数; k_M —GMM 棒的等效刚度系数。

Jiles-Atherton 非线性滞回模型可以表示为^[16-17]:

$$M = \frac{M_s}{3a - \alpha M_s} H \tag{9}$$

$$M_{an} = M_s \left[\coth\left(\frac{H_e}{a}\right) - \frac{a}{H_e} \right] \tag{10}$$

$$H_e = H + \alpha M + H_\sigma \tag{11}$$

$$H = \chi_r H_0 \sin(\omega t) \tag{12}$$

式中: a —无磁滞磁化强度形状参数; M_{an} —无磁滞磁化强度; H_e —GMM 内部有效磁场; H —激励线圈通入交流电流产生激励磁场; αM —材料磁畴间相互作用产生的磁场; α —磁畴间耦合的平均磁场系数; χ_r —材料内部磁场分布影响因子; H_0 —激励磁场振幅; ω —激励磁场的频率; H_σ —预应力 σ_0 诱发的磁场。

将式(2,9,12) 代入式(6) 可得:

$$m\ddot{x}(t) + c_1\dot{x}(t) + k_1x(t) + bx^3(t) + C_0 - F_0 \cos(2\omega t) = 0 \tag{13}$$

其中:

$$C_0 = \sigma_0 A_M + \frac{3E_y^H A_M \lambda_s \chi_r^2 H_0^2}{4(3a - \alpha M_s)^2}$$
$$F_0 = \frac{3E_y^H A_M \lambda_s \chi_r^2 H_0^2}{4(3a - \alpha M_s)^2} \tag{14}$$

式中: m —负载的等效质量与 GMM 棒的等效质量之和; c_1 —负载的等效阻尼系数与 GMM 棒的等效阻尼系数之和; k_1 —负载的等效刚度系数与 GMM 棒的等效刚度系数之和; F_0 —GMA 系统的激励力。

3 数值仿真

设式(13) 方程的各参数取值如表 1 所示。

表 1 GMA 系统的各参数取值

参数	数值
GMA 系统的等效阻尼系数 c_1	0.25
GMA 系统的等效刚度系数 k_1	-1
碟簧三次刚度项系数 b	1
GMA 系统的等效质量 m/kg	1

为确定激励频率参数取值, 根据经验, 本文先设 $F_0 = 1 \text{ kN}$ 、激励频率 $\omega = 0 \sim 1 \text{ Hz}$, 步长 $\Delta\omega = 0.01$, 初始条件为 $[0 \ 0 \ 0]$, 用 4 阶 Runge-Kutta 法求 GMA 非线性振动系统响应随激励频率变化的分岔图, 如图 3 所示。

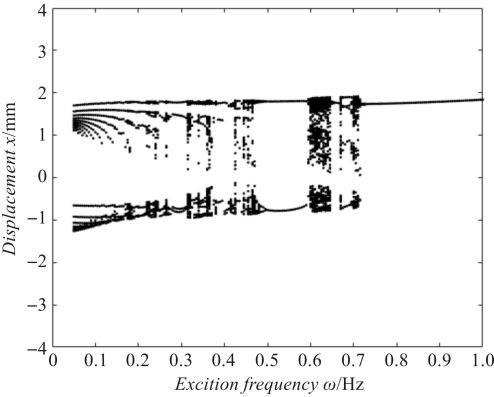
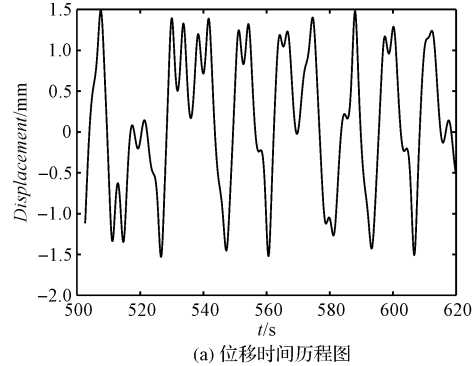


图 3 GMA 非线性振动系统随激励频率变化的分岔图

从图 3 可以看出:GMA 非线性振动系统响应随激励频率增大出现多次分岔, 且在如 0.25 Hz、0.45 Hz、0.5 Hz、0.65 Hz 等多个激励频率附近达到混沌状态。

笔者取激励频率为 0.5 Hz 时, 采用 4 阶 Runge-Kutta 法绘制 GMA 系统的位移时间历程图、相图、Poincaré 映射图、幅值谱图, 如图 4 所示。



(a) 位移时间历程图

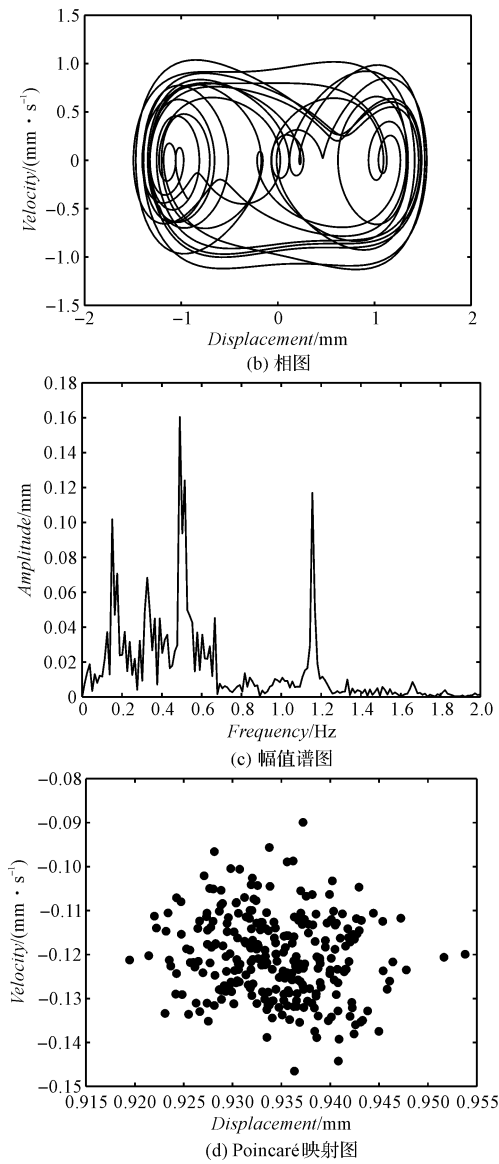


图 4 $\omega = 0.5 \text{ Hz}$ 时 GMA 系统的非线性响应

由图 4 可知：
位移时间历程图无规律且周期振动不稳定；相轨迹充满相空间的区域且为不封闭曲线；Poincaré 映射图非有限点集且非封闭曲线。
幅值谱图响应中有多种频率成分，如频率在 0.15 Hz 、 0.33 Hz 、 0.50 Hz 、 1.12 Hz 占有很大的比重，说明 GMA 非线性振动系统可以改变系统响应的线谱成分，且在 $0 \sim 0.21 \text{ Hz}$ 、 $0.23 \text{ Hz} \sim 0.36 \text{ Hz}$ 、 $0.41 \text{ Hz} \sim 0.87 \text{ Hz}$ 、 $0.98 \text{ Hz} \sim 1.67 \text{ Hz}$ 区间内，幅值谱图为连续曲线且具有宽频特性。
因此，可以判定 GMA 非线性振动系统具有混沌特性。
再次确定激励力参数取值。
由图 4 可知，取 $\omega = 0.5 \text{ Hz}$ 、激励力 $F_0 = 0 \sim 1 \text{ kN}$ ，步长 $\Delta F_0 = 0.01$ ，初始条件为 $[0 \ 0 \ 0]$ ，用 4 阶 Runge-

Kutta 法求 GMA 非线性振动系统响应随激励力变化的分岔图，如图 5 所示。

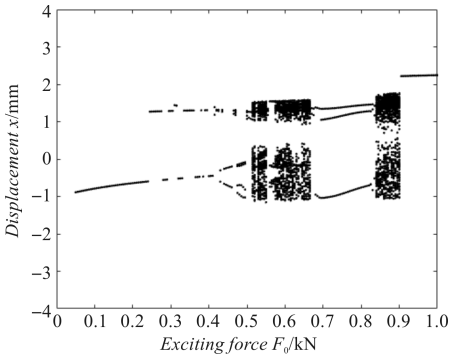
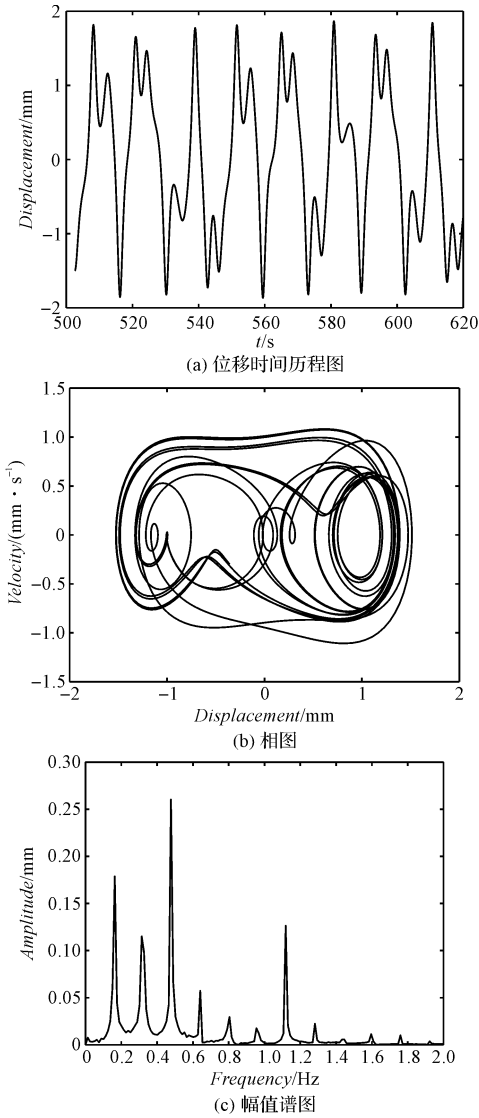


图 5 GMA 非线性振动系统随激励力变化的分岔图

从图 5 可知：GMA 非线性振动系统响应随激励力增大出现多次分岔，且在如 0.52 kN 、 0.67 kN 、 0.84 kN 、 0.90 kN 等多个激励力附近达到混沌状态。
取激励力为 0.6 kN 时，采用 4 阶 Runge-Kutta 法绘制的 GMA 系统的位移时间历程图、相图、Poincaré 映射图、幅值谱图，如图 6 所示。



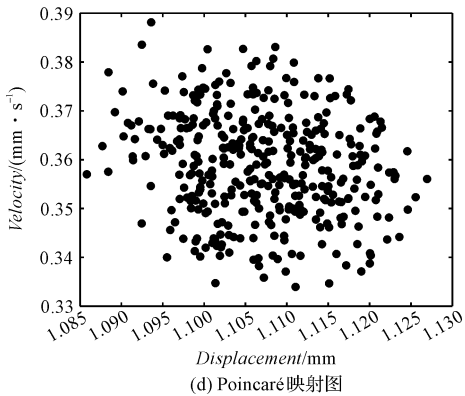


图 6 $F_0 = 0.6$ kN 时 GMA 系统的非线性响应

由图 6 可知:

位移时间历程图无规律,且周期振动不稳定;相轨迹充满相空间的区域,且长期无法封闭,相轨迹运动为往复运动,且周期是无限长的;

Poincaré 映射图既不是有限点集,也不是封闭曲线;

幅值谱图响应中有多种频率成分,如频率在 0.16 kN、0.31 kN、0.48 kN、1.12 kN 占有很大的比重,说明 GMA 非线性振动系统可以改变系统响应的线谱成分,且在 0.1 kN ~ 0.18 kN、0.26 kN ~ 0.38 kN、0.42 kN ~ 0.58 kN、0.59 kN ~ 0.67 kN、1.10 kN ~ 1.30 kN 区间内,幅值谱图为连续曲线且具有宽频特性。

因此,可以判定 GMA 非线性振动系统具有混沌特性。

4 ADAMS 仿真实验

为了验证 GMA 非线性振动系统的混沌特性,本文用 ADAMS 软件对 GMA 系统进行了仿真,在 ADAMS/View 下建立了单自由度质量-非线性弹簧系统试验模型,如图 7 所示。

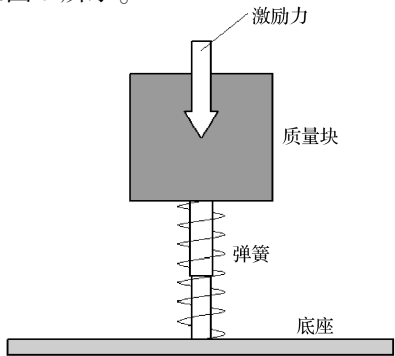


图 7 ADAMS 模型

由表 1 可知,设质量块为 1 kg,将质量块与底座用直线副约束,保留竖直方向上的自由度;激励力作用在质量块的中心;非线性弹簧上下两端分别作用在质量块和底座的质心,设非线性弹簧的初始偏移量为零;对 GMA 系统进行动力学仿真,绘制质量块位移随时间变化的曲线图,并与 4 阶 Runge-Kutta 法求解进行曲线对比,如图 8 所示。

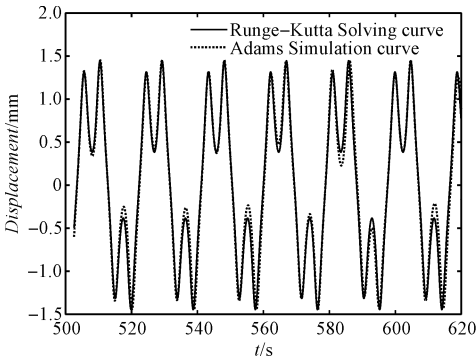


图 8 位移时间历程曲线对比

从图 8 可以看出:Runge-Kutta 求解曲线与 ADAMS 仿真曲线几乎吻合;ADAMS 仿真得到的位移时间历程曲线无周期运动,振动比较混乱,且没有稳定状态;通过 ADAMS 仿真验证 GMA 非线性振动系统具有混沌特性。

5 结束语

本文通过研究 GMA 非线性振动系统混沌特性,得到了以下研究结果:

- (1)通过分析 GMA 的工作原理,建立了 GMA 非线性振动系统的数学模型,给出了该系统的振动方程;
- (2)通过求解 GMA 系统响应随激励频率、激励力的分岔图,得到了 GMA 非线性振动系统产生混沌时激励频率、激励力的取值范围;绘制了激励频率为 0.5 Hz、激励力为 0.6 kN 时系统响应的位移时间历程图、相图、Poincaré 映射图和幅值谱图;结合 ADAMS 仿真实验验证了 GMA 非线性振动系统具有混沌特性;
- (3)提出了研究 GMA 非线性振动系统混沌的一般方法,建立了 GMA 非线性振动系统混沌特性研究的理论基础。

参考文献 (References):

[1] 黄文美,郜春艳,王博文,等. 超磁致伸缩材料高频磁能损耗特性测试与分析[J]. 农业机械学报,2019,50(2):427-

- 433.
- [2] 郑佳伟,何忠波,李冬伟,等. 伺服阀用超磁致伸缩致动器弓张结构设计与研究[J]. 振动与冲击,2018,37(24):30-37.
- [3] BRAGHIN F, CINQUEMANI S, RESTA F. A low frequency magnetostrictive inertial actuator for vibration control[J]. **Sensors & Actuators A Physical**, 2012,180(6):67-74.
- [4] JIA Z Y, LIU H F, WANG F J, et al. Research on a novel force sensor based on giant magnetostrictive material and its model[J]. **Journal of Alloys & Compounds**, 2011, 509(5):1760-1767.
- [5] YANG J, WEN Y, LI P, et al. Energy harvesting from ambient vibrations with arbitrary in-plane motion directions using a magnetostrictive/piezoelectric laminate composite transducer[J]. **Journal of Electronic Materials**, 2014,43(7):2559-2565.
- [6] YOSHIOKA H, SHINNO H, SAWANO H. A newly developed rotary-linear motion platform with a giant magnetostrictive actuator[J]. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 2013,62(1):371-374.
- [7] MOON S J, LIM C W, KIM B H, et al. Structural vibration control using linear magnetostrictive actuators[J]. **Journal of Sound & Vibration**, 2007,302(4):875-891.
- [8] GAO X, LIU Y. Research of giant magnetostrictive actuator's nonlinear dynamic behaviours[J]. **Nonlinear Dynamics**, 2018,92(3):793-802.
- [9] LIU Y, GAO X, LI Y. Giant magnetostrictive actuator nonlinear dynamic Jiles-Atherton model[J]. **Sensors and Actuators A: Physical**, 2016, 250(2):7-14.
- [10] 刘树勇,位秀雷,王 基,等. 非线性隔振系统反馈控制动力学特性研究[J]. 噪声与振动控制,2018,38(2):11-17.
- [11] LI Y, BAI H, HE Z, et al. Chaotic characteristics of nonlinear metal rubber vibration isolation system[J]. **Zhongguo Jixie Gongcheng/China Mechanical Engineering**, 2015, 26(14):1871-1876.
- [12] 张 勇,胡永才,舒永录. 新三维非线性混沌系统的动力学特性分析[J]. 浙江大学学报:理学版,2016,43(4):401-405.
- [13] 李玉龙,白鸿柏,何忠波. 金属橡胶非线性减振系统混沌特性研究[J]. 北京理工大学学报,2016,36(5):491-497.
- [14] 闫洪波,高 鸿,郝宏波,等. 超磁致伸缩驱动器驱动磁场研究与仿真分析[J]. 兵器材料科学与工程,2019,42(4):102-108.
- [15] 曹淑瑛,王博文,闫荣格,等. 超磁致伸缩致动器的磁滞非线性动态模型[J]. 中国电机工程学报,2003,23(11):145-149.
- [16] JILES D C, ATHERTON D L. Theory of ferromagnetic hysteresis (invited)[J]. **Journal of Applied Physics**, 1984,55(6):2115-2120.
- [17] 赵 越,李 琳,刘 任,等. 基于损耗统计理论的动态 J-A 磁滞模型[J]. 电工电能新技术,2019,38(5):90-96.

[编辑:程 浩]

本文引用格式:

闫洪波,高 鸿,郝宏波,等. GMA 非线性振动系统混沌特性研究[J]. 机电工程,2020,37(4):399-404.

YAN Hong-bo, GAO Hong, HAO Hong-bo, et al. Chaotic characteristics of giant magnetostrictive actuator nonlinear vibration system[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2020,37(4):399-404.《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>