

超磁致伸缩式振动能量回收装置建模与分析

柏果¹, 何忠波¹, 常铭², 周景涛¹, 郑佳伟¹

(1. 陆军工程大学石家庄校区 车辆与电气工程系, 河北石家庄 050003;

2. 陆军步兵学院石家庄校区 机械化步兵系, 河北石家庄 050083)

摘要: 根据超磁致伸缩材料的材料特性, 设计了一种柱棒式振动能量回收装置, 并对其工作原理进行了介绍。结合装置的结构特点, 分别建立了能量回收过程的物理模型和传递函数模型。根据所得到的传递函数模型, 重点对能量回收的电压输出进行了仿真分析, 分别得到了超磁致伸缩棒的质量、刚度、阻尼以及装置采集线圈的匝数对输出电压的影响, 为装置下一步的优化设计提供了参考依据。

关键词: 超磁致伸缩; 振动能量回收; 建模; 仿真分析

中图分类号: TM619; TM919

文献标识码: A

文章编号: 1001-3830(2020)01-0050-04

DOI: 10.19594/j.cnki.09.19701.2020.01.012

Modeling and analysis of giant magnetostrictive vibration energy harvesting device

BAI Guo¹, HE Zhong-bo¹, CHANG Ming², ZHOU Jing-tao¹, ZHENG Jia-wei¹

1. Department of Vehicle and Electrical Engineering, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China;

2. Department of Mechanized Infantry, Shijiazhuang Branch, Army Infantry Academy, Shijiazhuang 050083, China

Abstract: According to the material characteristics, a kind of rod vibration energy harvesting device is designed and its working principle is introduced. The physical and transfer function model of the energy recovery process are established combining with the structural characteristics of the device. According to the obtained transfer function model, the voltage output of energy recovery is simulated and analyzed. The influence of mass, stiffness, damping of the giant magnetostrictive rod and the turn number of the collecting coil of the device on the output voltage is obtained, respectively, which provides a reference for the further optimal design of the device.

Key words: giant magnetostrictive; vibration energy harvesting; modeling; simulation

1 引言

振动能量回收是指利用特定的回收装置将振动能源转化为液压能或电能等可用能量的技术, 是缓解能源压力的重要途径, 对于提升能源系统的利用率具有重大意义, 在机电领域有广泛的应用前景^[1-3]。超磁致伸缩式振动能量回收装置基于超磁致伸缩材料 (Giant Magnetostrictive Material, GMM) 的维拉里效应将机械振动能转化为电能, 具有输出功率高、工作稳定性强等优势, 可为微机电系统甚至是常用的中小型功率器件供电, 具有重要的发展潜力^[4-6]。目前, 针对超磁致伸缩致动器的研究十分全面, 体系也已经很成熟, 但对能量回收方面的深入研究并不多。本文根据实际机械振动的特点, 设计了一种基于超磁致伸缩棒的能量回收装置。为较为准确计算能量回收产生的电

动势, 建立了系统的输出模型, 并通过仿真进行了分析, 有助于下一步的工程实际应用。

2 能量回收装置与原理

2.1 基本结构

设计了如图 1 所示的超磁致伸缩式振动能量回收装置, 核心元件为 GMM 棒; 永磁体提供偏置磁场, 能够使系统工作于机电耦合系数较高的线性区间, 改变偏置磁体大小可调整偏置磁场强度^[7-8]; 由于超磁致伸缩棒抗压不抗拉, 脆性较大, 所以实际应用中一般都要设计预应力承力杆^[9]; 预紧弹簧为 GMM 棒提供预紧力, 通过调整盖帽和套筒之间的螺纹可调整预紧力大小; 盖帽、套筒和支座均采用高导磁材料, 整个装置构成闭合磁路, 实现输出效率最大化。

收稿日期: 2018-10-30 修回日期: 2019-04-09

通讯作者: 柏果 E-mail: 1026005364@qq.com

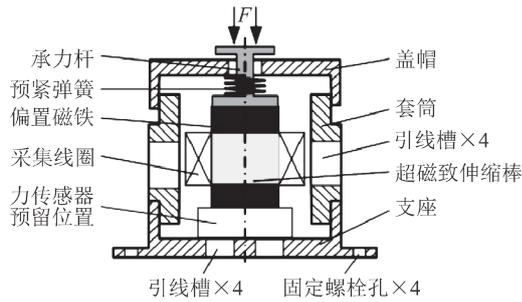


图1 能量回收装置结构图

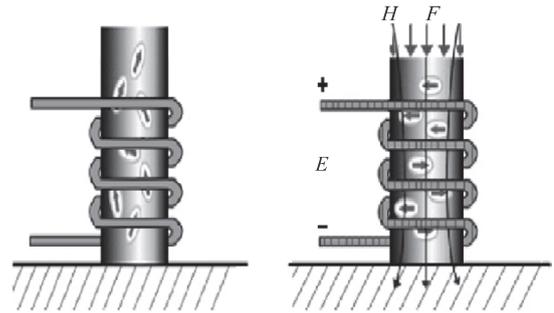


图2 装置工作原理图

2.2 工作原理

磁致伸缩材料在机械应力作用下，其内部磁化状态或磁通发生变化，这种现象称为磁致伸缩逆效应，又称维拉里效应。根据维拉里效应，如图2所示，在外界压力作用下，GMM棒形状发生变化，轴向产生应变，内部磁畴会发生偏转，从而在GMM棒内部产生磁场。若外界压力非恒定，则产生的磁场为变化的磁场，则通过GMM棒内的磁通量会发生变化。根据法拉第电磁感应定律，如果GMM棒外部绕有感应线圈，就会产生感应电动势^[10-11]。基于上述原理，可以对外界的振动进行能量回收。

3 电压输出模型

振动能量回收是从机械能到电磁能再到电能的过程，外力使线圈内的磁通发生变化，在线圈内感应产生电动势，故模型要建立输入力和输出电动势之间的关系，而GMM棒在偏置磁场作用下的振动过程和磁化情况比较复杂，所以对装置进行动力学建模时作出如下假设：

(1)GMM棒内的磁场强度 H 、磁化强度 M 、轴向应变 ε 和应力 σ 分布均匀。

(2)GMM棒等效为质量-弹簧-阻尼模型，且GMM棒的弹性模量 E 、等效阻尼 c 为常数。

(3)碟簧响应速度足够快，能够跟随GMM棒运动，即GMM棒与外界输入始终具有相同的位移。

基于以上假设，将基于超磁致伸缩的振动能量回收装置动力学模型简化为单自由度振动系统，如图3所示。 m 、 k 、 c 分别表示GMM棒的等效质量、等效刚度、等效阻尼，三者取决于GMM棒的材料、尺寸、加工工艺、偏置磁场和预压应力。

其中 F 为施加在GMM棒上的外力，也是系统源动力。以系统稳态平衡点为坐标原点，竖直向下方向为坐标轴正向，由牛顿第二定律可以得到系统的动力学微分方程：

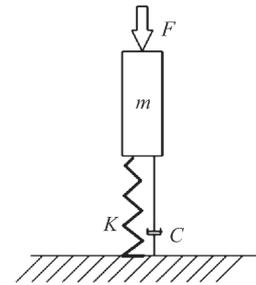


图3 装置动力学等效模型

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F \quad (1)$$

由GMM棒的位移可得到其应变

$$\varepsilon = x/l \quad (2)$$

其中， l 为GMM棒的纵向长度。施加偏置磁场后，棒的应变与棒内产生的磁场强度近似为线性关系，即

$$\varepsilon = d(H_0 + H) \quad (3)$$

其中， d 为GMM棒轴向压磁系数； H_0 为偏置磁场强度； H 为外力激发的磁场强度；由电磁场理论有：

$$B = \mu(H_0 + H) \quad (4)$$

最后整理可得到输出电动势 e 与输入力 F 之间的关系：

$$e = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d(nBA)}{dt} = nA \frac{dB}{dt} = nA\mu \frac{dH}{dt} \quad (5)$$

其中， Φ 为通过棒内的磁通量； n 为线圈匝数； B 为棒内的磁感应强度； A 为棒的横截面积； μ 为棒的磁导率。再结合(2)与(3)式，可得：

$$e = \frac{nA\mu}{ld} \frac{dx}{dt} \quad (6)$$

记 $N = \frac{nA\mu}{ld}$ ，则有：

$$e = N \frac{dx}{dt} \quad (7)$$

对(1)式与(7)式进行拉普拉斯变换，得：

$$(ms^2 + cs + k)X(s) = F(s) \quad (8)$$

$$e(s) = NsX(s) \quad (9)$$

所以可得传递函数:

$$G(s) = \frac{e(s)}{F(s)} = \frac{Ns}{ms^2 + cs + k} \quad (10)$$

在单位阶跃信号 $F(s)=1/s$ 输入下,系统的单位阶跃响应为:

$$e(s) = \frac{N}{ms^2 + cs + k} \quad (11)$$

将(11)式整理成二阶以下的分量叠加形式:

$$e(s) = \frac{N}{(s+a)(s+b)} \quad (12)$$

其中, $a+b=c/m$, $ab=k/m$ 。

对(12)式进行拉氏反变换,得系统单位阶跃响应为:

$$e(t) = \frac{N}{b-a}(e^{-at} - e^{-bt}) \quad (13)$$

4 系统性能仿真分析

由于能量回收装置特殊的应用环境,其峰值、峰值时间等参数更值得关注,选择以单位阶跃信号为输入,研究该输入下的系统响应特性。由于输入是力,系统单位阶跃响应指输入 1 N 阶跃力时装置的电压输出。

根据得到的系统传递函数(10)式,用数值仿真的方法对其进行分析。为分析某参数对系统性能的影响,其它变量需设定初值,各变量初值如表 1 所示。在分析某一参数时,该参数变化,其余参数按表 1 保持不变。

表 1 各参数取值大小

参数名称及符号	单位	量值
线圈匝数 n	匝	100
GMM 棒质量 m	kg	0.015
GMM 棒等效刚度 k	N/m	0.785×10^7
GMM 棒阻尼 c	N·s/m	400
GMM 棒相对磁导率		9
GMM 棒磁致伸缩率 d	m/A	1.0×10^{-7}

4.1 线圈匝数的影响

线圈匝数 n 分别取 80、100、120、140,系统单位阶跃响应曲线如图 4 所示。

由仿真结果可知,随线圈匝数的增多,系统单位阶跃响应曲线峰值对应的时间不变,保持在同一

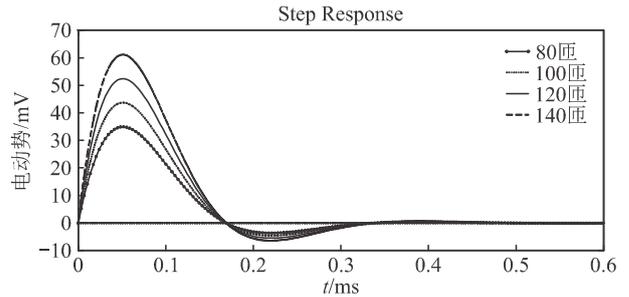


图 4 对应不同线圈匝数的系统单位阶跃响应曲线

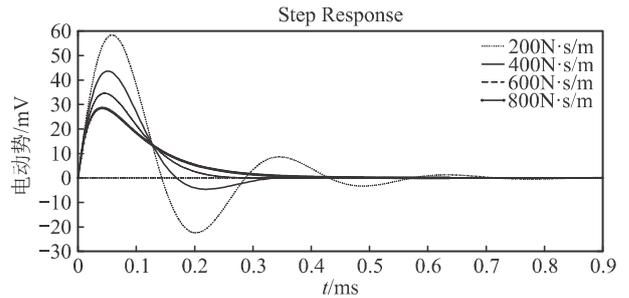


图 5 对应不同阻尼的系统单位阶跃响应曲线

个数;系统调节时间(单位阶跃响应进入稳态值的 $\pm 5\%$ 范围内所需的最短时间)均在 0.3 ms 附近;系统峰值增大较明显,线圈匝数每增大 20 匝,幅值增大大约 10 mV。线圈匝数的增大对系统来说是有利的,因为随匝数增大阶跃响应峰值增大较明显,且峰值时间与调节时间也基本不变,系统在相同的时间下能收集到更多的能量,但在实际工程中,由于受体积限制,需根据装置的整体设计选择合适的匝数。

4.2 GMM棒阻尼的影响

阻尼 c 分别取 200、400、600、800 N·s/m,系统单位阶跃响应曲线如图 5 所示。

由仿真结果可知,随 GMM 棒阻尼的增大,系统阶跃响应曲线峰值有很大程度的衰减,阻尼 c 从 200 N·s/m 取到 800 N·s/m,峰值从 59 mV 变成了 28 mV;其峰值时间略有缩短;系统调节时间明显变短,阻尼越小其振荡时间则更长。总体来看,GMM 棒阻尼的减小对系统是有利的,因为随阻尼减小峰值增大较明显,峰值时间基本不变,且调节时间明显变短,这样系统在相同的时间下能够得到更高的电压输出,从而收集到更多的能量。

4.3 GMM棒刚度的影响

GMM 棒等效刚度 k 分别取 1.25、2.5、5、 $10 \times 10^6 \pi$ N/m,系统单位阶跃响应曲线如图 6 所示。

由仿真结果可知,随 GMM 棒刚度的增大,系统阶跃响应曲线峰值有一定衰减,刚度每增大两倍,峰值减少大约 8 mV;系统峰值时间有一定缩短;系

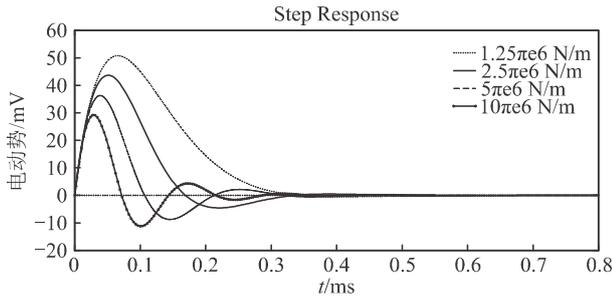


图6 对应不同刚度的系统单位阶跃响应曲线

统调节时间大幅缩短。GMM棒刚度的增大对系统来说是不利的,随刚度增大峰值明显减小,同时峰值时间和调节时间都有减短,系统所获得的能量也就变少了。GMM棒刚度增大会使得应力引起的应变减小,进而影响逆磁致伸缩效应,使得获得的能量变少。

4.4 GMM棒质量的影响

质量 m 分别取 0.01、0.015、0.02、0.025 kg,绘制系统单位阶跃响应曲线如图7所示。

由仿真结果知,随GMM棒质量的增大,系统阶跃响应曲线峰值呈一定程度的非线性减小,质量从 0.01 kg 增加 0.015 kg,峰值减小约 5 mV;但系统峰值时间延长,系统调节时间也明显延长。GMM棒质量增加对系统的利弊无法通过仿真结果直接判断,因为随质量增加响应曲线峰值减小,但峰值时间又有延长,同时调节时间也有延长,需通过具体计算进行判断,不过总体上看,在一定范围内,GMM棒质量对系统的电压输出影响不大。

5 结论

为准确计算超磁致伸缩能量回收装置的电压输出,设计了一种柱棒式超磁致伸缩能量回收装置,通过建立电压输出模型对其相应特性进行了研究,并通过数值仿真对模型进行了分析,得到了GMM棒质量、刚度、阻尼以及线圈匝数对输出电压的影响。由仿真结果可知,线圈匝数增多对系统输出是有利的,但在实际工程应用中要通过装置体积和使用效率来选择具体匝数;GMM棒质量对系统输出影响不大,在实际工程应用时不用重点考虑,应重点考虑装置体积限制,通过材料密度确定GMM棒的质量;GMM棒刚度和阻尼增大对系统输出是不利的,在材

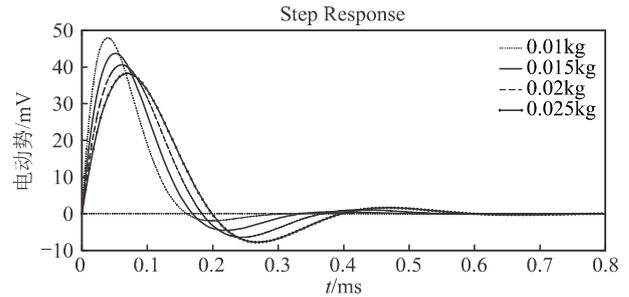


图7 对应不同质量的系统单位阶跃响应曲线

料选取时应尽可能选择刚度和阻尼较小的材料。本文的研究以及分析结果对于超磁致伸缩能量回收装置的结构设计、优化和控制具有指导意义。

参考文献:

- [1] 沙山克普里亚,丹尼尔茵曼. 能量收集技术[M]. 南京:东南大学出版社,2011.
- [2] Committee on America's Energy Future, National Academy of Sciences, National Academy of Engineering, National Research Council. America's Energy Future: Technology and Transformation [M], Washington: The National Academies Press, 2009.
- [3] Hu J. Optimal design of vibration-based energy harvesting systems using magnetostrictive material (MsM) [D]. Raleigh: North Carolina State University, 2010.
- [4] 刘成龙. 基于超磁致伸缩材料的能量收集装置研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2015.
- [5] 王亚文. 磁致伸缩振动能量采集器发电理论的研究[D]. 广州:广东工业大学,2018.
- [6] 殷毅. 稀土超磁致伸缩材料及其应用研究现状[J]. 磁性材料及器件,2018,2018,49(3): 57-60.
- [7] 王博文,曹淑瑛,黄文美. 磁致伸缩材料与器件[M]. 北京:冶金工业出版社,2008.
- [8] Stachowiak D. The influence of magnetic bias and prestress on magnetostriction characteristics of a giant magnetostrictive actuators [J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2013.
- [9] Braghin F, Cinquemani S, Resta F. A low frequency magnetostrictive inertial actuator for vibration control [J]. Sensors and Actuators, 2012.
- [10] 王志华. 超磁致伸缩式与永磁式振动发电的理论及实验研究[D]. 天津:河北工业大学,2010.
- [11] 唐志峰,吕福在,项占琴. 影响超磁致伸缩执行器中逆效应性能的主要因素[J]. 机械工程学报,2007,43(12): 133-143.

作者简介:柏果(1994—),男,汉族,四川达州人,硕士研究生,研究方向为智能材料及应用。