

新型振动能量采集系统的设计与性能测试

张庆新, 林 凯, 高云红, 王路平, 付启航, 许 瑾

(沈阳航空航天大学 自动化学院, 辽宁 沈阳 110036)

摘 要: 利用磁控形状记忆合金(MSMA)逆效应设计了一种新型高效振动能量采集器, 建立并分析了振动能量采集器的结构模型, 对采集器的各部分结构进行了理论分析与计算。通过 ANSYS 仿真软件对所设计的采集器结构进行了有限元分析, 验证了各部分结构参数和材料选型正确性。在仿真的基础上, 通过搭建实验平台, 进行了 MSMA 振动能量采集器样机测试实验, 改变输入应力频率和幅值, 得到不同输入条件下感应电压的输出曲线。实验结果证明了利用 MSMA 材料将机械振动能转化为电能的可行性和有效性。

关键词: 磁控形状记忆合金; 能量采集; 仿真; 能量转换

中图分类号: TN384

文献标识码: A

DOI: 10.11977/j.issn.1004-2474.2018.02.016

Design and Performance Test on a New Vibration Energy Collecting System

ZHANG Qingxin, LIN Kai, GAO Yunhong, WANG Luping, FU Qihang, XU Jin

(Institute of Automation, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110036, China)

Abstract: A new type of high efficiency vibration energy harvester is designed by using the reverse effect of magnetic shape memory alloy (MSMA) in this paper. The structure model of the vibration energy harvester is established and analyzed, and the structure of each part of the collector is analyzed and calculated. And through the ANSYS simulation software, the finite element analysis of the designed collector structure is carried out, and the correctness of each part of the structural parameters and material selection is verified. On the basis of simulation, by building the experimental platform, the prototype test of the MSMA vibration energy harvester is carried out. The output curve of the induction voltage under different input conditions is obtained by the stress change of the input frequency and amplitude. The experimental results verify the feasibility and effectiveness of using MSMA material to convert mechanical vibration energy into electrical energy.

Key words: magnetic shape memory alloy; energy acquisition; simulation; energy conversion

0 引言

随着能源问题的日益突出, 能量收集技术已经成为当今世界的一大热点。太阳能、热能、振动能等能量源越来越受到各国研究人员的青睐。振动能量因其分布广泛, 能量密度高, 绿色无污染, 安全可靠及应用范围广等优点, 正在逐渐代替太阳能而成为最有发展潜力的能量源。目前, 振动能量采集技术主要包括电磁式和采用智能材料两种。电磁式采集由线圈和永磁体构成, 体积较大, 结构复杂, 且产生感应电动势较小, 输出电压较低^[1]。智能材料主要以压电材料(PZT)及超磁致伸缩材料(Terfenol-D)为主。文献[2]表明, 由于压电材料本身易碎的特性限制了其所能承受的外应力范围, 且变形量和磁电

转换效率低, 并不具有可逆性, 制约了该类振动能量采集器的发展。超磁致伸缩材料虽可适用于较高的温度, 且承载能力大, 但无记忆功能, 也不具有可逆性^[3]。磁控形状记忆合金(MSMA)是近年来新兴的一种可应用于能量采集领域的 Ni-Mn-Ga 合金智能材料, 研究发现, MSMA 的形状记忆功能具有可逆性, 其变形量和磁电转换效率远大于 PZT 和 Terfenol-D^[4-5], 这为振动能量采集提供了新的途径。

本文基于 MSMA 逆磁致伸缩效应设计了一种新型高效振动能量采集器, 实现了机械能-磁场能-电能相互转化。仿真和实验结果均验证了设计的可行性。

收稿日期: 2017-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277126); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划基金资助项目(LR2013007); 辽宁省自然科学基金资助计划项目(2014024014); 航空科学基金资助项目(2014ZB54010)

作者简介: 张庆新(1970-), 男, 河北省人, 教授, 博士, 主要从事能量转换以及智能系统, 智能控制算法应用的研究。

1 振动能量采集器的结构模型

MSMA 的最大特点是具有磁致生变和形状记忆功能,这两种功能是由材料的磁各向异性决定的。通过磁场作用下,马氏体孪晶界移动,向磁场方向重取向,使晶体磁易轴与外部磁场方向一致而产生形变。当材料形变伸长后,对晶体长轴方向施加外部应力,磁易轴将再次重取向,使材料恢复形变,变为初始状态。由于磁回路中材料的磁导率发生改变,相应的磁感应强度也发生相对变化,进而通过磁回路中感应线圈的磁通量发生改变,产生感应电压。MSMA 振动能量采集器的结构模型如图 1 所示。将 MSMA 材料置于磁场中,为取得最佳变形效果,保持外部施加磁场的方向与材料的长轴方向垂直。当向材料施加自上而下的机械脉冲时,材料的磁导率发生变化,引发感应线圈的磁通量发生变化,产生交流感应电动势。

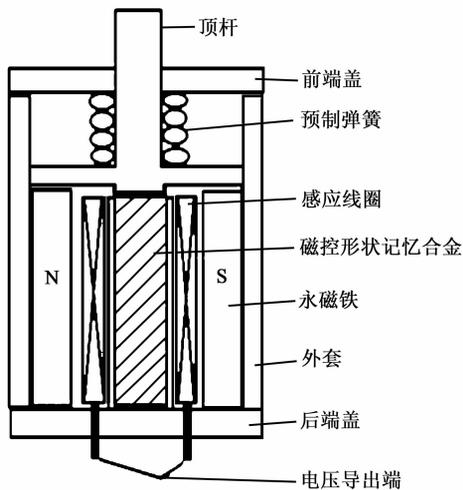


图1 MSMA 能量采集器结构模型

根据电磁感应定律能够得到输出感应电压为

$$U(t) = -N \frac{\partial \phi}{\partial t} = -NA \frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

式中: $U(t)$ 为线圈中的感应电压; $\phi = BA$ 为感应线圈中的磁通量; $B = \mu_0(H + M)$ 为磁感应强度, H 为施加的磁场强度, M 为材料磁化强度, μ_0 为真空磁导率; A 为线圈截面积; N 为线圈匝数。

2 振动能量采集器设计和有限元仿真分析

根据 MSMA 的逆特性以及电磁感应定律可知,处在恒温恒定磁场环境下的 MSMA 材料受应力作用而引发磁导率发生改变,进而导致磁回路中磁通量变化,产生感应电压^[5]。因此,在进行采集器总体设计时需要注意两个关键点:

1) 保证磁通量必须要经过 MSMA 材料,需要

合理计算线圈绕组的匝数,保证输出较高的感应电压。

2) 方便对 MSMA 材料施加可控应力,应考虑设计预压装置,保证材料最佳形变效果。

2.1 总体结构设计

图 2 为采集器结构图,所设计的 MSMA 振动能量采集器主要包括产生感应电压的线圈绕组、产生恒定偏置磁场的永磁铁、磁轭、MSMA 材料等。两块相同的永磁体用来产生偏置磁场,在两块永磁体之间放置导向套,MSMA 材料放置在导向套中,在永磁体四周放置“E 形”硅钢片作为磁轭,这样可使永磁体产生的磁场沿着硅钢片的方向,减少漏磁。

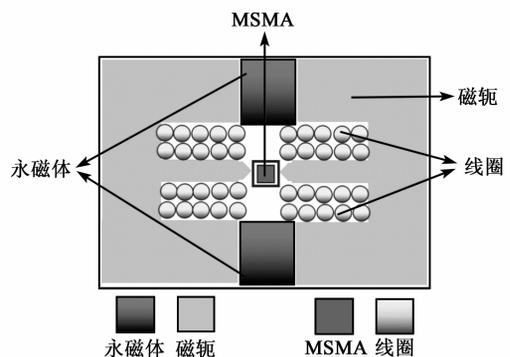


图2 采集器结构图

图 3 为采集器样机图。工作时,振动源通过预压装置对材料施加应力,从而使通过材料的磁场发生变化,绕在硅钢片上的感应线圈的两端便会有电压产生,通过外接电源管理部分就能实现振动能量的收集利用。

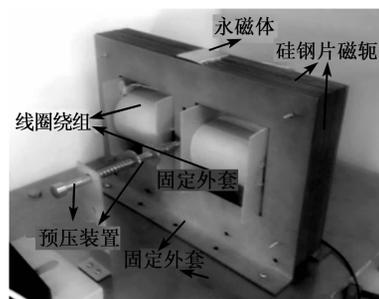


图3 采集器样机图

2.2 线圈绕组参数的确定

线圈绕组是 MSMA 振动能量采集器的重要组成部分,是影响输出感应电压的重要因素^[6-8]。

MSMA 材料在偏置磁场条件下,受到外部应力作用,材料自身的磁导率会发生变化(变化范围为 2~65)。研究表明,当 MSMA 材料沿短轴方向完全变形后的相对磁导率近似为 2。因此,空气气隙中的 H 为

$$H = \frac{B}{\mu_r \mu_0} \quad (2)$$

式中: $\mu_0 \approx 4\pi \times 10^{-7}$ H/m 为空气的相对磁导率; $\mu_r \approx 2$ H/m 为 MSMA 材料的相对磁导率; $B = 0.6$ T 为 MSMA 材料周围的磁感应强度。计算得出 $H = 2.39 \times 10^5$ A/m。

忽略磁路中磁动势影响,根据安培环路定律可知:

$$NI = HL \quad (3)$$

式中: I 为流经感应线圈中的最大电流值; $L \approx 5$ mm 为空气气隙间距。进而计算得出, $NI = HL = 1.195 \times 10^3$ A。

根据 MSMA 材料的特性、工作状态和电流密度,确定线圈绕组的直径及匝数。裸线直径 D 和电流密度 J 及 I 的关系为

$$D = 1.13 \sqrt{\frac{I}{J}} \quad (4)$$

其中 J 主要由线圈的发热和散热情况来确定。研究表明,在无有效散热装置的情况下,长期工作的线圈中 $J = 3 \sim 5$ A/mm²。选取 $J = 5$ A/mm², $I = 0.2$ A, 计算可得 $D = 0.226$ mm。

此外, N 的确定不仅与 J 有关,也与实际设计制作的线圈骨架有关。在能量采集器设计中,线圈骨架和尺寸需合理选择。根据所选的线圈骨架尺寸,可以求得线圈绕组的合理匝数为

$$N \approx \frac{lT}{C^2} \quad (5)$$

式中: C 为单个线圈绕组线径; l 为线圈缠绕的宽度; T 为线圈缠绕的厚度。

绕制线圈的总电阻为

$$R = \rho \frac{l}{S} \approx \frac{N \times 2 \times (Y + T + X + T)}{\pi \left(\frac{C}{2}\right)^2 \times 6 \times 10^7} \quad (6)$$

式中: $\rho \approx (1/6) \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ 为绕制线圈的电阻率; S 为线圈骨架的横截面积; X 和 Y 分别为线圈骨架内侧矩形口的长和宽。

通过以上分析和计算,确定的感应线圈绕组的设计参数如表 1 所示。

表 1 绕组参数详表

项 目	设计参数
$J/(A \cdot \text{mm}^{-2})$	5
L/mm	5
$N/\text{匝}$	6 000
D/mm	0.25
R/Ω	500

2.3 磁路材料选型

在磁路设计中综合考虑到价格成本、制备工艺和磁导率,最终采用硅钢片作为磁路材料。考虑剩余磁感应强度、矫顽力和最大磁能积因素,选择使用钕铁硼 N40(Nd₂Fe₁₄B)产生偏置磁场。

本文设计的磁路采用两层“E形”并联式结构,该结构能够有效减小磁阻。在磁路设计过程中,永磁体可作为等效电压源,其磁动势为 V_m ;磁路中的磁阻分为空气气隙磁阻 R_{mG} 、磁路(硅钢片)磁阻 R_{mS} ,则磁动势为

$$V_m = NI = \oint \mathbf{H} dl_G \quad (7)$$

式中 l_G 为空气气隙的长度。因此,穿过 MSMA 材料的 ϕ 可由磁路中硅钢片与空气磁阻进行计算,即

$$\phi = \frac{V_m}{R_{mG} + R_{mS}} \quad (8)$$

如果 ϕ_{PM} 为由恒定的永久磁铁产生的磁通量, R_{mPM} 为偏置气隙的磁阻, R_{mc} 为铁芯的磁阻, R_{MAMS} 为 MSMA 材料的磁阻。通过计算可得线圈的磁通量为

$$\phi_c = \frac{R_{mPM} \phi_{PM}}{R_{mPM} + R_{mc} + \frac{(R_{mG} + R_{MSMA})R_{mS}}{R_{mG} + R_{MSMA} + R_{mS}}} \quad (9)$$

当外部振动使 MSMA 产生形变时,随之改变线圈磁通量,进而会产生相应的感应电压,计算可得

$$u_e = N \frac{d\phi_c}{dt} = \frac{N}{l_{MSMA}} \frac{d\phi_c}{de} v \quad (10)$$

式中: l_{MSMA} 为 MSMA 材料的长度; v 为 MSMA 材料改变形状的速度。

2.4 预压装置设计

预压装置是连接外部振动源与 MSMA 振动能量采集器的缓冲装置,关系到 MSMA 振动能量采集器的转换效率。图 4 为预压装置结构图。

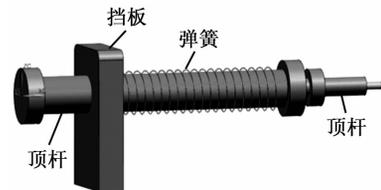


图 4 预压装置结构图

在本文设计中,预压装置由挡板、受力顶杆和弹簧等构成,保持受力顶杆中心线与 MSMA 材料中心线水平,从而保证机械振动应力能够水平作用到材料上;预压装置中的弹簧的作用主要是在施加振动应力前,对 MSMA 材料施加一定的预应力,

该预应力可以保证顶杆和 MSMA 材料能够紧密接触,这样不仅可以避免撞击对材料造成损伤的情况,而且可以采取合适的预应力来提高能量转换效率;顶杆的作用使机械振动应力与 MSMA 材料间接接触,目的也是保护材料免受损伤。图 5 为预压装置实物图。

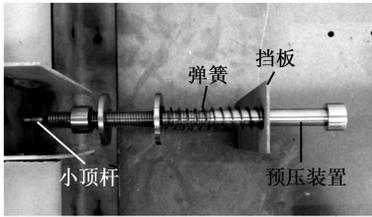


图 5 预压装置实物图

2.5 有限元分析

采用 ANSYS 有限元分析软件对所设计采集器进行电磁分析。主要目的是模拟 MSMA 材料所受到的偏置磁感应强度,从而验证采集器结构的正确性。图 6 为采用 ANSYS 进行电磁场有限元分析流程图。

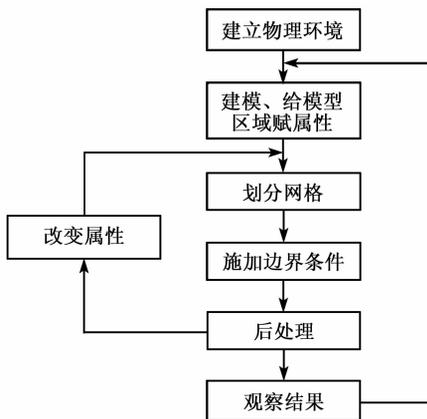


图 6 有限元分析流程图

考虑到只进行永磁体的电磁场分析,故分析方法选用三维静态磁场标量法,该方法包括 3 种三维实体单元,如表 2 所示。

表 2 三维实体单元

单元	维数	形状或特性	自由度
SOLID5	3-D	六面体,8个节点	每节点 6 个; 电势、磁标量
SOLID96	3-D	六面体,8个节点	磁标量位
SOLID98	3-D	六面体,10个节点	位移、电势、磁标量位

选用 SOLID98 作为采集器电磁分析的单元类型,自由度选择为磁位能(MAG),过滤图形界面选择为 Magnetic-Nodal。由于 ANSYS 软件中的三维模型由 UG 软件导入得到,无须在 ANSYS 中重建模型,因此可直接进行材料属性的设置。表 3 为模

型参数表。

表 3 ANSYS 模型参数表

材料属性	几何属性
MSMA 相对磁导率:2 (变化范围为 2~65)	5 mm×5 mm×20 mm
硅钢片相对磁导率:10 ⁴	—
Nd ₂ Fe ₁₄ B 相对磁导率:1.05	4 cm×5 cm×5 cm
Nd ₂ Fe ₁₄ B 矫顽力:8×10 ⁵ A/m	—
空气磁导率:1	—

图 7 为设计的采集器三维模型的磁通密度矢量图。图 8 为磁通密度矢量的局部放大图。由图 8 可知,MSMA 材料周围环境的磁通密度为 0.60~0.76 T。研究表明,MSMA 材料在 0.55 T 以上的磁场感应强度中,材料形变缓慢,伸长量几乎已达到饱和,故 0.60~0.76 T 的电磁分析结果理论上已满足使 MSMA 材料形变率最大的要求^[9-10]。因此,我们可以确定所设计的振动能量采集器可以提供给 MSMA 材料合适的偏置磁场,并能够保证使 MSMA 材料具有较高的响应频率。

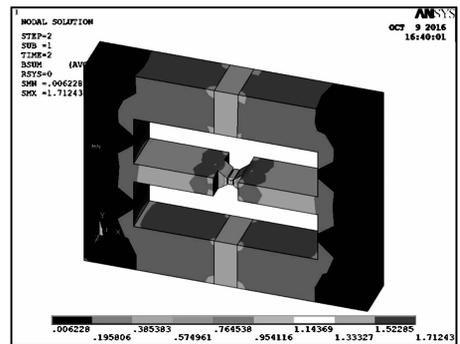


图 7 磁通密度矢量

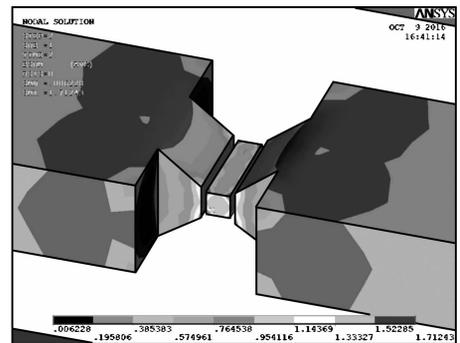


图 8 磁通密度矢量局部放大图

3 实验测试结果及分析

为了验证所设计 MSMA 振动能量采集器的正确性,搭建 MSMA 振动能量采集器实验平台如图 9 所示。利用位移传感器和力传感器分别监测 MSMA 变形量以及实际作用在 MSMA 上的应力情况。

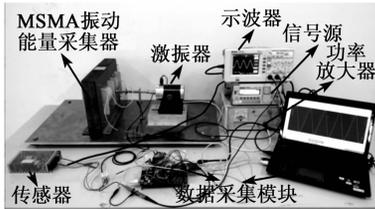


图 9 MSMA 振动能量采集器测试平台

图 10 为改变频率条件下感应输出电压波形图。由图可知,通过对振动能量采集器施加幅值相同、频率不同的机械应力时,该振动能量采集器的感应线圈两端出现的交流电压幅值发生变化,但交流电压频率与机械应力的频率保持一致。即对 MSMA 材料施加幅值为 5 N,频率为 50 Hz 的应力时,输出交流电压的峰值可达 1.28 V;对 MSMA 材料施加幅值为 5 N,频率为 100 Hz 的应力时,输出交流电压峰值可达 2.56 V。由此可见,在一定应力范围内,输出交流电压的幅值与机械应力的频率成一定正比关系。

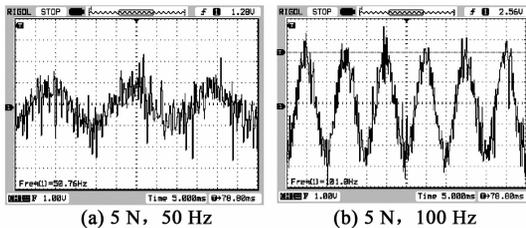


图 10 改变频率条件下感应输出电压波形图

图 11 为改变幅值条件下感应输出电压波形图。由图可知,通过对振动能量采集器施加幅值不同、频率相同的机械应力时,该振动能量采集器的感应线圈两端出现的交流电压幅值也会发生变化,同时交流电压频率与应力施加频率保持一致。即对 MSMA 材料施加幅值为 5 N,频率为 50 Hz 的应力时,输出交流电压的峰值可达 1.28 V;对 MSMA 材料施加幅值为 15 N,频率为 50 Hz 的应力时,输出交流电压峰值可达 3.04 V。

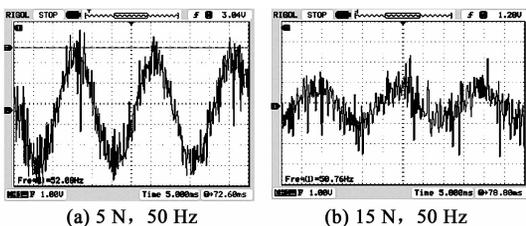


图 11 改变幅值条件下感应输出电压波形图

4 结束语

本文基于 MSMA 材料设计了一种新型高效振动能量采集器。通过理论分析和计算,确定了采集

器磁轭、线圈绕组、能量采集系统的尺寸等性能参数。利用 ANSYS 软件对采集器系统进行了仿真,验证了各部分结构参数和材料选型正确性。最后通过搭建 MSMA 振动能量采集器和电源管理实验平台,进行了系统实验,实验结果验证了该系统的正确性,有很好的发展前景。

参考文献:

- [1] 曹会云. 电磁式振动能量收集和存储系统的研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2012.
- [2] 阎瑾瑜. 压电效应及其在材料方面的应用[J]. 数字技术与应用,2011,56(1):100-102.
- [3] FIALA P, DREXLER P. Power supply sources based on resonant energy harvesting[J]. *Microsyst Technol*, 2012,23(18):1181-1192.
- [4] 张庆新,王凤翔,李文君,等. Ni_2MnGa 合金磁性形状记忆效应及特性研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2005, 34(8): 1263-1266.
- [5] 张庆新,李岩,林凯,等. MSMA 振动能量采集器的设计与实现[J]. *压电与声光*, 2016,38(5):740-743. ZHANG Qingxin, LI Yan, LIN Kai, et al. Design and implementation of MSMA vibration energy harvester [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2016, 38(5): 740-743.
- [6] ALJANAIDEH O, AI JANAIDEH M, RAKHEJA S, et al. Compensation of rate-dependent hysteresis nonlinearities in a magnetostrictive actuator using an inverse Prandtl-Ishlinskii model[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013,22(2):27-36.
- [7] ZHANG Qingxin, LI Jian, YU Li, et al. Thermo magneto mechanical model and simulation of vibration generator of magnetically controlled shape memory alloy [C]//Qingdao, China: The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC), 2015:4979-4983.
- [8] RICHELLI A, COMENSOLI S, KOVACS-VAJNA Z M. A DC/DC boosting technique and power management for ultralow-voltage energy harvesting applications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012,59(6): 2701-2708.
- [9] NISKANEN A J, LAITINEN I. Design and simulation of a magnetic shape memory (MSM) alloy energy harvester[J]. *Advances in Science & Technology*, 2013, 78(3):58-62.
- [10] 文玉梅,江小芳,杨进,等. 采用复合磁电换能器的振动能量采集器研究[J]. *传感技术学报*, 2009, 22(9): 1243-1248.