

磁控形状记忆合金旋转执行器研究

鲁军, 王凤翔

(沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁省 沈阳市 110023)

Study on Rotating Actuator of Magnetically Controlled Shape Memory Alloy

LU Jun, WANG Feng-xiang

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, Liaoning Province, China)

ABSTRACT: Based on the properties of shape variation and memory effect of magnetically controlled shape memory alloy (MSMA), a MSMA rotating actuator was proposed in which the linear motion produced by the MSMA element could be converted into rotating movement through an overstepping clutch. On the basis of permanent magnet bias magnetic field, the rotating speed could be controlled by changing the amplitude and frequency of the excitation current of the controllable magnetic field. The magnetic field analysis and control characteristic were simulated by means of finite element method. The mechanical property of the rotating mechanism was analyzed. The expressions of displacement and rotating speed were derived. A MSMA rotating actuator prototype was designed and built. The experimental result was compared with the theoretical value and the difference between them was discussed. The experimental results of the prototype machine show the feasibility of the operation principle and the design method of the proposed MSMA rotating actuator.

KEY WORDS: magnetically controlled shape memory alloy; rotating actuator; overstepping clutch; bias field of permanent magnet; differential control

摘要: 基于磁控形状记忆合金(magnetically controlled shape memory alloy, MSMA)在磁场作用下变形并具有形状记忆功能的特性,提出一种通过超越离合器将MSMA元件产生的直线运动变为旋转运动的执行器结构,在永磁体偏置磁场基础上,通过改变控制磁场励磁电流的大小和频率可实现转速控制。采用有限元法进行MSMA执行器的磁场分析与控制特性仿真,分析旋转机构的机械特性,推导了位移与转速表达式。设计并研制MSMA旋转执行器试验样机,将试验结果与理论计算值进行对比,并分析二者存在差异的原因。样机试验结果表明MSMA旋转执行器机理和设计方法可行。

关键词: 磁控形状记忆合金; 旋转执行器; 超越离合器; 永磁偏置磁场; 差动控制

0 引言

磁控形状记忆合金是近几年出现的新型功能材料,由于该类材料不仅具有可用磁场控制的变形与形状记忆效应,而且具有很大的磁感生应变,兼具传感和驱动功能,成为目前功能材料研究的热点之一。与温控形状记忆合金相比,MSMA不仅变形率大,易于控制,而且具有较高的动态响应速度,是温控型形状记忆合金频率响应的80倍,具有较高的能量转换效率和功率密度,可以满足一般自动控制系统对执行器动态响应速度的要求^[1-4]。

文献[5-6]对MSMA元件在不同负载和磁场下的变形特性和形状记忆功能作了系统的试验研究。文献[7-8]对MSMA的静态和动态磁控特性以及磁场强度、负载力和温度对变形的影响进行了试验研究,为MSMA执行器的设计奠定了基础。

利用MSMA的磁控特性,较易产生可控的直线位移,因而其典型应用是直线执行器^[9-13]。对于不同结构和控制策略的MSMA直线执行器,如差动式MSMA直线执行器^[14-15]、蠕动式MSMA直线电机^[16]等,已进行了深入的研究,然而对于旋转式MSMA执行器的研究尚未见有报道。本文旨在探索旋转式MSMA执行器的工作机理,在差动式MSMA直线执行器的基础上,提出了一种旋转式MSMA执行器的结构,并研制了原理样机,验证了该旋转式MSMA执行器的可行性。

1 MSMA 旋转执行器工作原理

本文提出的MSMA旋转执行器的结构原理示意图如图1所示。该旋转式MSMA执行器由2个

基金项目: 国家自然科学基金项目(50177019); 教育部博士点科研基金项目(20040142004)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50177019).

相同的 MSMA 直线执行器和一个单向转轮组成。

当对 MSMA1 元件施加磁场 B_1 时, 该元件在磁场作用下产生伸长变形, 推动转轮左侧连杆下移, 通过连杆与转轮之间的摩擦力带动转轮左转一个角度。然后取消磁场 B_1 , MSMA1 在恢复弹簧压力下恢复到施加磁场前的形状, 左侧连杆上移复位。由于转轮仅可单方向转动, 因而当左侧连杆上移时不会带动转轮反转。当对右侧 MSMA2 元件施加磁场 B_2 时, 同样会产生右侧连杆上移使转轮左转的力。虽然从原理上讲只需要一个 MSMA 直线执行器即可, 然而采用对称的 2 个 MSMA 执行器, 可以使转轮受力平衡, 同时有利于增加转轮的驱动力和转速。

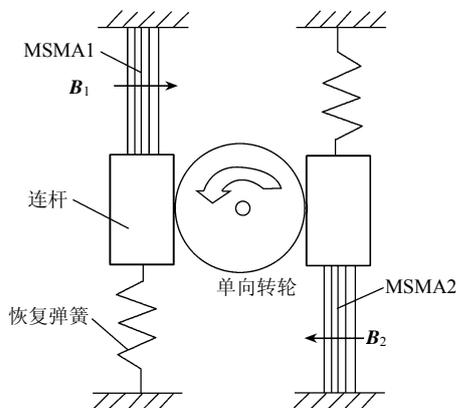


图 1 MSMA 旋转执行器工作原理示意图
Fig. 1 Schematic diagram of operation principle of MSMA rotating actuator

2 MSMA 旋转执行器的结构设计

2.1 旋转机构的选择

由图 1 所示旋转式 MSMA 执行器的工作原理可以看出, 由直线运动变为旋转运动的关键是实现单向转动的旋转机构。将往复直线运动变成圆周运动的常见机构是齿式、摩擦式棘轮机构和超越离合器。齿式棘轮机构的主要问题是棘爪在棘轮齿槽中的准确定位, 而摩擦式棘轮机构则可能因摩擦角变化出现楔块和摩擦轮之间卡死或打滑现象^[17]。

图 2 所示的楔块式摩擦超越离合器, 是一种随回转方向的变换而能自动接合或脱开的离合器, 可避免上述 2 种机构的缺陷且可以传递单向运动和转矩。该机构具有传递转矩大、接合平稳、噪声小、驱动机构简单等优点^[18]。

通过方案比较, 本文采用楔块式摩擦超越离合器, 为了加大摩擦力和直径, 在超越离合器外环上增加了一个尼龙套。

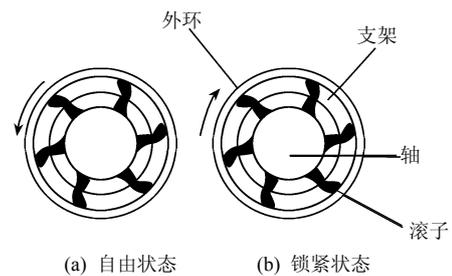


图 2 超越离合器

Fig. 2 Overstepping clutch

2.2 MSMA 旋转执行器的结构设计

MSMA 旋转执行器的结构如图 3 所示。为减小控制 MSMA 元件变形磁场的励磁功率, 采用 2 个永磁体产生恒定偏磁磁场, 磁化方向一致可使通过 2 个 MSMA 元件的磁场方向相同。励磁线圈用以产生可控磁场。2 个非导磁材料制造的连杆用以输出位移, 调整弹簧用来调节加在 MSMA 元件上的预压力和输出位移。辅轮用以控制连杆与超越离合器之间的摩擦力。超越离合器将连杆的上下往复运动转换为沿顺时针方向的旋转运动。

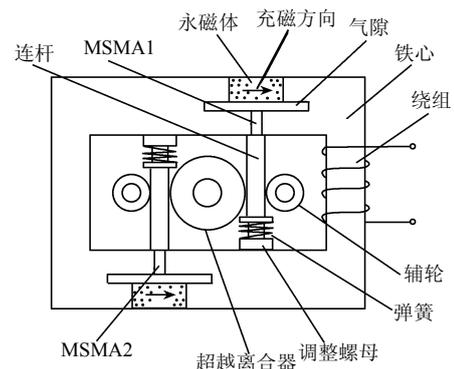


图 3 旋转式执行器结构图

Fig. 3 Structure of a rotating MSMA actuator

励磁绕组未通电时, MSMA 元件中仅有永磁体产生的偏磁磁场。当励磁绕组通入电流时, 在 2 个 MSMA 元件中产生的磁场方向相反。控制磁场与偏磁磁场相叠加后, 两元件中一个磁场增强而另一个减弱。磁场增强的 MSMA 元件伸长, 带动连杆移动, 通过摩擦力带动超越离合器转动。当励磁绕组通入一定频率和幅值的交流电流时, 两 MSMA 元件将轮流工作, 产生驱动左右连杆上下往复运动的驱动力, 使超越离合器连续旋转。显然, 通过改变励磁绕组电流的大小和频率, 可控制执行器的旋转速度。励磁绕组电流仅需在永磁体偏磁磁场基础上提供可控磁场, 故所需控制功率较小。同时由于采用差动控制的 2 套 MSMA 直线执行器, 从而提高了驱动效率。

3 MSMA 旋转执行器的特性分析

3.1 MSMA 直线执行器的磁控特性

设计中采用的MSMA元件的磁控特性曲线如图 4、图 5 所示^[7]。可以看出，在恒温 and 恒预压力下，磁通密度在 0.25~0.55 T 区间时 MSMA 元件变形率与所加磁场近似呈线性关系；当磁通密度继续增加时，变形率增加速度减缓，出现饱和现象。通过对相同预压力和磁场条件下 2 种温度的变形曲线对比可以看出，MSMA 的磁控特性受温度影响较大，变形率随温度升高明显增大。

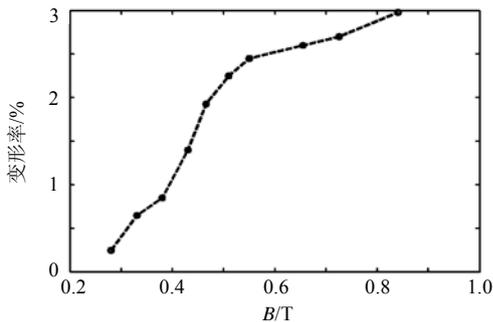


图 4 恒温 and 恒压力下变形与磁通密度的关系
Fig. 4 Strain versus magnetic field under constant temperature and compressive load

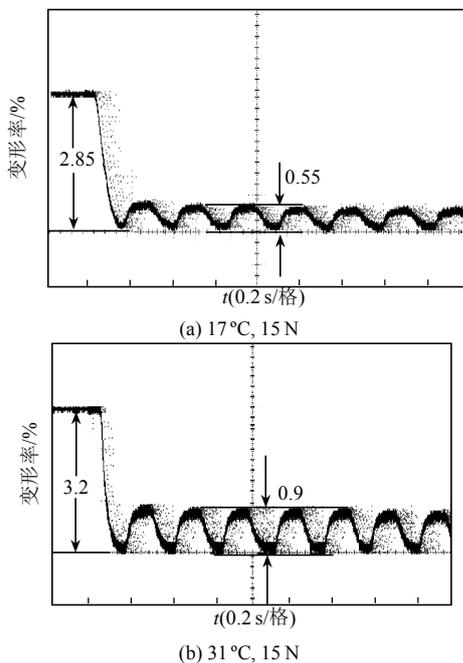
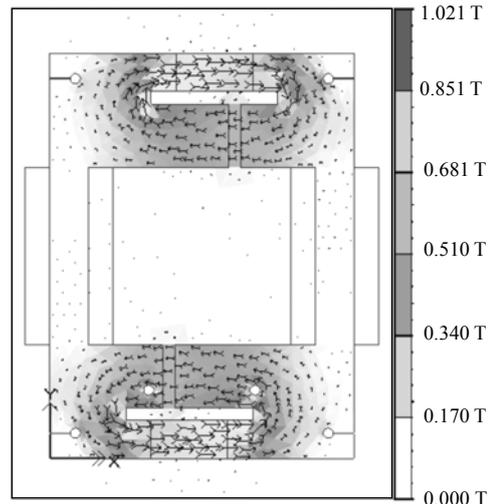


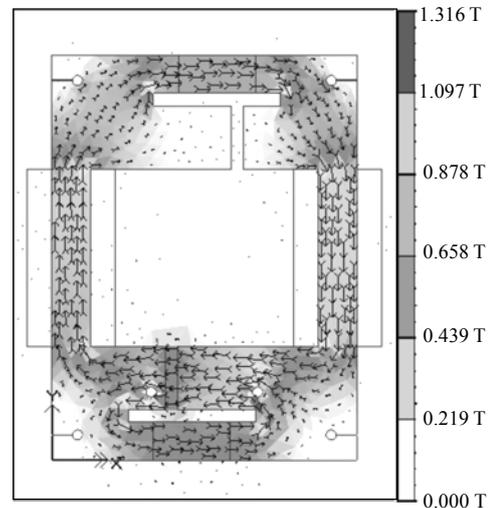
图 5 不同温度下 MSMA 元件的动态变形率
Fig. 5 Dynamic strains of MSMA under different temperatures

要使 MSMA 元件输出足够大的位移和驱动力，控制磁场要大于 MSMA 元件变形曲线拐点处的磁通密度(约 0.55 T)，故在本设计中选取最大合成磁场强度为 0.6 T。可选用 0.3 T 的偏磁磁场由永磁体产生，而另外 0.3 T 的控制磁场由励磁绕组产生。

采用有限元磁场分析法，基于上述对偏磁磁场和控制磁场的要求，可确定永磁体和铁心尺寸以及励磁线圈的安匝数。图 6 为旋转式 MSMA 执行器的磁场分布。无励磁电流时，永磁体在 MSMA 元件中产生的偏磁磁场约为 0.3 T，如图 6(a) 所示。当励磁绕组施加 1 A、20 Hz 正弦交流电流时，下面的 MSMA 元件中的磁通密度可达 0.6 T，而上面 MSMA 元件中的磁场几乎为零，如图 6(b) 所示，与设计要求相符。



(a) 永磁体偏磁磁场分布



(b) 偏磁磁场与控制磁场的合成磁场分布

图 6 偏磁磁场与合成磁场的磁场分布
Fig. 6 Distributions of bias and resultant magnetic fields

3.2 旋转机构的特性分析

据理论力学^[19]知识，旋转机构的受力如图 7 所示，图中忽略了超越离合器和连杆的重量，假定超越离合器沿顺时针方向转动。 F_1 为 MSMA 元件输出力， F_2 为恢复弹簧压力， N_1 为辅轮预紧力， N_3 为左侧连杆对超越离合器的作用力， F_4 为左侧连杆对超越离合器的滑动摩擦力。

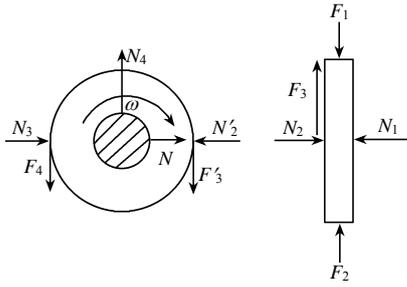


图7 超越离合器和连杆的受力分析

Fig. 7 Force analysis of overstepping clutch and link rod

对连杆可以列出如下方程:

$$\begin{cases} N_1 - N_2 = 0 \\ F_1 - F_2 - F_3 = ma \end{cases} \quad (1)$$

$$F_2 = kx = k(x_0 + \Delta x) \quad (2)$$

式中: m 为连杆质量; a 为加速度; k 为弹簧的弹性系数; Δx 为MSMA元件输出位移; x_0 为对应弹簧预应力时的变形量; x 为MSMA元件输出位移后弹簧总变形量。由于 Δx 很小, F_2 可近似看作恒力。

F_3 为一个与负载有关的力, 负载越大, 该力越大, 但不能超过最大静摩擦力 $F_{3\max} = f_1 N_2$ (f_1 为静摩擦系数), 否则连杆和超越离合器之间要打滑。

由图7可知, F_3 会对连杆产生一个转矩, 使其沿质心转动, 但由于连杆放置在护套中且转矩较小, 因此该转矩可以忽略不计。

当初速度为0时连杆的运动方程为

$$\Delta x = at^2 / 2 \quad (3)$$

由式(1)、(2)、(3)可得

$$F_{3\max} = f_1 N_1 = F_1 - kx - m \frac{2\Delta x}{t^2} \quad (4)$$

超越离合器的方程为

$$\begin{cases} N_2' - N_3 \mp N = 0 \\ F_3' + F_4 - N_4 = 0 \\ (F_3' - F_4) \times R = J\varepsilon \end{cases} \quad (5)$$

式中: J 为超越离合器的转动惯量; ε 为角加速度; N 在右侧连杆移动时取负号, 左侧连杆移动时取正号; $F_4 = f_2 N_3$ 为超越离合器转动时的滑动摩擦力; f_2 为滑动摩擦系数。

初速度为0时超越离合器的运动方程为

$$\theta = \varepsilon t^2 / 2 \quad (6)$$

由式(5)和(6)可得超越离合器转矩表达式

$$\begin{cases} M = (F_3' - F_4) \times R \\ M_{\max} = (f_1 N_1 - f_2 N_3) \times R = J \frac{2\theta}{t^2} \end{cases} \quad (7)$$

当MSMA元件输出力 F_1 一定时, 超越离合器直

径 R 、静摩擦系数 f_1 和辅轮预紧力 N_1 越大, 输出转矩越大, 带负载能力越强; 但由于相同条件下MSMA元件输出位移是确定的, 超越离合器直径越大, 每次转过的角度越小, 转速也越小; 静摩擦系数增大, 使滑动摩擦系数增大; 辅轮预紧力越大, 可能会使 $F_1 < F_3$, 导致超载情况, 因此, 需要合理确定转矩和转速之间的关系。

4 样机的设计、研制与试验

4.1 样机设计

低频磁场作用下, MSMA元件的应变 ε 和磁通密度 B 可表示为

$$\varepsilon = \sigma / C_{\text{eff}} + qH \quad (8)$$

$$B = q\sigma + \mu H \quad (9)$$

式中: σ 为材料在应变方向的压应力; H 为外加磁场强度; C_{eff} 为给定磁场下材料的弹性模量; q 为压磁系数; μ 为材料在给定应力下的磁导率。

设MSMA元件一端固定, 另一端的位移为 Δx , 则应变可表示为 $\varepsilon = \Delta x / l$, 式中 l 为MSMA元件的原长, 故式(8)可变为

$$\Delta x = l[\sigma / C_{\text{eff}} + qH] \quad (10)$$

当忽略线圈的漏磁即认为磁通全部穿过MSMA元件时, 线圈产生的磁通 Φ_c 可表示为

$$NI = \Phi_c R \quad (11)$$

式中: N 为线圈的匝数; I 为线圈电流; R 为磁路的总磁阻, 等于MSMA的磁阻加上外磁路的磁阻, 可由磁路的几何尺寸和材料导磁性能确定。

总磁通 $\Phi = \Phi_c + \Phi_0 = BA_r$, 式中: Φ_0 为永磁体产生的偏置磁通; A_r 为MSMA元件的横截面积。式(9)两边乘以 A_r 得

$$\Phi = q\sigma A_r + \mu H A_r \quad (12)$$

将式(10)、(11)和(12)联立可得位移表达式:

$$\Delta x = l \left[\left(\frac{1}{C_{\text{eff}}} - \frac{q^2}{\mu} \right) \sigma + \frac{qN}{\mu A_r R} I + \frac{B_0 q}{\mu} \right] \quad (13)$$

假定在温度不变的条件下, C_{eff} 、 q 、 μ 为常量, 在 σ 一定时, Δx 与 I 呈近似线性关系^[20]。在温度为 31 °C、频率为 5 Hz 时, 由实验曲线^[8]和式(8)、(9)可确定式(13)中的系数 $C_{\text{eff}} = 1.65 \times 10^8$ Pa, $q = 2.04 \times 10^{-8}$ m/A。

由转动原理可以推导出转速表达式

$$n = \frac{60f}{\pi d} \Delta x \quad (14)$$

式中: f 为励磁电流的频率; d 为超越离合器的外径。

当控制电流和频率已知时,可由式(13)和(14)计算旋转式 MSMA 执行器的每步直线位移和相应的旋转速度。

4.2 样机研制

所研制的磁控形状记忆合金旋转执行器外形如图 8 所示。MSMA 元件采用芬兰 AdaptaMat 公司生产的产品,永磁体采用稀土永磁钕铁硼材料,铁心用硅钢片叠压而成。MSMA 元件两侧的铁心呈楔形,目的是通过聚磁作用以增强 MSMA 元件中的磁通密度。执行器通过非导磁连杆输出力和位移。

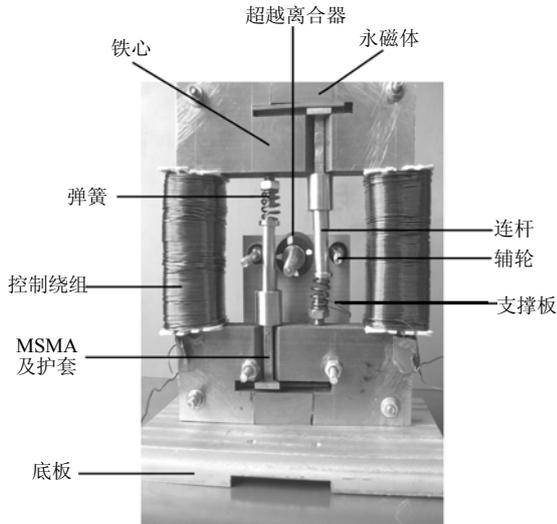


图 8 MSMA 旋转执行器样机照片

Fig. 8 Photo of MSMA rotating actuator

4.3 试验结果及分析

在保持样机弹簧预应力、连杆与超越离合器之间摩擦力不变时,分别改变控制绕组电流大小和频率,可测得 MSMA 旋转执行器的输出位移和转速,并可由式(13)和(14)计算出相应的理论值。不同控制电流和频率下的位移和转速计算值与实验结果的对比曲线如图 9 所示。

根据分析,位移和转速实验值略小于理论值,这是因为: 1) 连杆输出位移时,驱动力与弹簧中心线可能不完全重合,产生一定的横向位移导致轴向位移输出减小; 2) 超越离合器滚子存在一定的间隙,在锁紧过程中会产生位移损失。由图 9 可以看出,理论值与实验结果基本一致,但理论上位移仅与电流大小有关,与频率无关,而图 9(a)位移实验值却随电流频率增大而增加。造成该现象的原因是:如图 5 所示,MSMA 的变形率对于温度比较敏感。虽然不同频率的电流产生的控制磁场大小相同,然而线圈、铁心中产生的损耗不同,频率增加

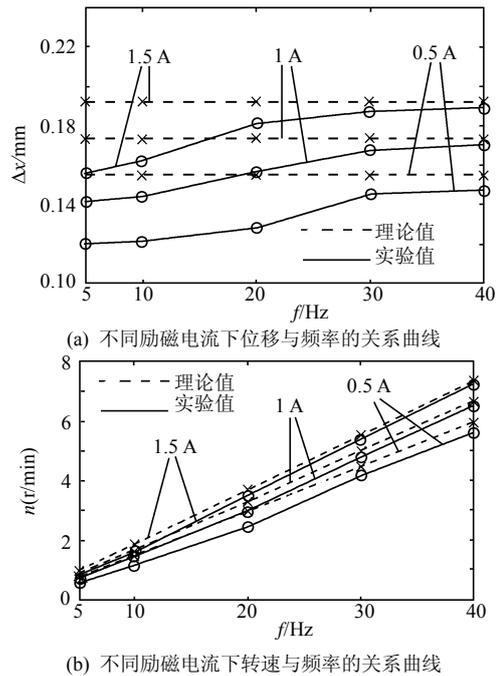


图 9 不同频率下转速和位移计算值与实验值的对比

Fig. 9 Comparison of theoretical value with tested results of rotating speed and displacement for different frequencies

后由于损耗增加使 MSMA 元件的温度增高,导致变形率增大,因此位移曲线随频率增大呈上升趋势,而在位移的理论计算中没有考虑温度的影响。

5 结论

MSMA 元件的磁控特性,不仅可用于直线驱动,而且可用于旋转驱动。本文提出一种旋转式 MSMA 执行器,由 2 个相同的 MSMA 直线执行器和一个单向转轮组成。控制绕组通入交流电流时,两 MSMA 元件轮流工作,产生使连杆往复直线运动的驱动力,通过超越离合器驱动转轮单方向连续旋转。通过改变控制绕组电流的大小和频率,可控制执行器的旋转速度。控制绕组仅需在永磁体偏磁场基础上提供可控磁场,故所需控制功率较小。同时由于采用差动控制的 2 套 MSMA 直线执行器,从而提高了驱动效率。样机试验结果验证了该旋转式 MSMA 执行器工作原理和设计方案的可行性。

本文研制的样机只是一种初步设计,尚存在诸多问题需要解决,如: 1) 虽然 MSMA 元件输出机械功率密度较高,然而由于 MSMA 材料磁导率较小,使其产生足够大应力和应变的磁场需要较大体积的铁心和控制绕组,从而降低了整个装置的功率密度; 2) MSMA 执行器的位移和转速受温度影响较大。上述问题需要通过改进材料性能、优化执行器设计和控制策略等不同途径加以解决。

参考文献

- [1] Jokinen T, Ullakko K, Suorsa I. Magnetic shape memory materials-new possibilities to create force and movement by magnetic fields [C]. The Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems, Shenyang, China, 2001.
- [2] 吴新杰, 王凤翔, 张庆新. 磁控形状记忆合金执行器及其应用前景[J]. 材料导报, 2003, 17(9): 16-18.
Wu Xinjie, Wang Fengxiang, Zhang Qingxin. Magnetically controlled shape memory alloy actuators and their potential applications [J]. Material Review, 2003, 17(9): 16-18(in Chinese).
- [3] 王凤翔, 张庆新, 吴新杰, 等. 磁控形状记忆合金执行器工作原理及其应用[J]. 科学技术与工程, 2003, 3(6): 577-581.
Wang Fengxiang, Zhang Qingxin, Wu Xinjie, et al. Operation principle and application of magnetically controlled shape memory alloy actuators[J]. Science Technology and Engineering, 2003, 3(6): 577-581(in Chinese).
- [4] 宫峰飞. 铁磁 NiMnGa 形状记忆合金研究的新进展[J]. 材料导报, 2003, 17(8): 1-4.
Gong Fengfei. Recent developments in ferromagnetic NiMnGa shape memory alloys[J]. Material Review, 2003, 17(8): 1-4(in Chinese).
- [5] Couch R N, Chopra I. Experimental characterization of NiMnGa ferromagnetic shape memory alloy bars under variable Loading Conditions[C]. The International Society for Optical Engineering, Seattle, USA, 2002.
- [6] Couch R N, Chopra I. Experimental characterization of NiMnGa magnetic shape memory alloy rods under dynamic magnetic fields[C]. The International Society for Optical Engineering, Mexico, 2003.
- [7] Wang Fengxiang, Li Wenjun, Zhang Qingxin, et al. Experimental study on characteristics of NiMnGa magnetically controlled shape memory alloy[J]. Journal of Material Science & Technology, 2006, 22(1): 55-58.
- [8] 张庆新, 王凤翔, 李文君, 等. NiMnGa 合金磁控形状记忆效应及外特性[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(8): 1263-1266.
Zhang Qingxin, Wang Fengxiang, Li Wnjun, et al. Magnetic shape memory effect and external characteristic of NiMnGa alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(8): 1263-1266(in Chinese).
- [9] Tellinen J, Uorsa I, Jääskeläinen A, et al. Basic properties of magnetic shape memory actuators[C]. The 8th International Conference on Actuator, Bremen, Germany, 2002.
- [10] Suorsa I, Tellinen J, Pagounis E, et al. Applications of magnetic shape memory actuators[C]. The 8th International Conference on Actuator, Bremen, Germany, 2002.
- [11] Wang Fengxiang, Zhang Qingxin, Li Wenjun, et al. Actuation principle and property of magnetically controlled shape memory alloy [C]. IEEE International Conference on Mechatronics, 2005, Taipei.
- [12] Wang Fengxiang, Li Wenjun, Zhang Qingxin, et al. Design and control of linear actuators made by magnetically controlled shape memory alloy[C]. IEEE International Conference on Mechatronics, Taipei, 2005.
- [13] 张庆新, 王凤翔, 李文君, 等. 磁控形状记忆合金直线执行器[J]. 中国机械工程, 2004, 15(20): 1787-1790.
Zhang Qingxin, Wang Fengxiang, Li Wenjun, et al. Linear actuator of magnetically controlled shape memory alloy[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(20): 1787-1790 (in Chinese).
- [14] Wang Fengxiang, Li Wenjun, Zhang Qingxin, et al. Operation principle and design of a differential magnetic shape memory actuator [C]. IEEE Industry Applications Conference, Hong Kong, 2005.
- [15] 王凤翔, 李文君, 张庆新, 等. 差动式磁控形状记忆合金执行器研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 135-139.
Wang Fengxiang, Li Wenjun, Zhang Qingxin, et al. Study on differential actuator of magnetically controlled shape memory alloy [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18): 135-139(in Chinese).
- [16] 王凤翔, 张庆新, 吴新杰, 等. 磁控形状记忆合金蠕虫型直线电机研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 140-144.
Wang Fengxiang, Zhang Qingxin, Wu Xinjie, et al. Study on inchworm linear motor of magnetically controlled shape memory alloy[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 140-144(in Chinese).
- [17] 殷鸿梁, 朱邦贤. 间歇运动机构设计[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1996: 15-31.
- [18] 周明衡. 离合器、制动器选用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 112-127.
- [19] 胡守信. 理论力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1986: 10-22.
- [20] Suorsa I, Pagounis E, Ullakko K. Magnetic shape memory actuators performance[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004 (272): 2029-2030.



鲁军

收稿日期: 2007-12-15。

作者简介:

鲁军(1965—), 男, 博士研究生, 沈阳理工大学教师, 研究方向为智能材料及智能控制系统, lujunst@126.com;

王凤翔(1938—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为特种电机及其控制、电力电子与能量转换技术。

(编辑 刘浩芳)