

# 磁控形状记忆合金微位移执行器的研究与应用\*

杨耀华, 刘庆民\*, 纪华伟

(杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:**磁控形状记忆合金(MSMA)是一种新型智能材料。该类材料具有磁控形状记忆效应(MSME)、变形率和力能密度大、动态响应速度快、线性度好以及易于控制等优点。针对 MSMA 输入/输出的非线性特点,论述了磁场诱发的磁控形状记忆效应、应力诱发的伪弹性效应以及温度诱发的形状记忆效应。总结了块体、薄膜 MSMA 在微位移执行器领域的国内外研究及应用现状,并对 MSMA 微位移执行器的未来应用趋势进行了分析。研究结果表明,MSMA 驱动器是微位移执行器领域中最重要驱动方式之一。

**关键词:**磁控形状记忆合金;Ni-Mn-Ga;磁控记忆效应;执行器;应用

中图分类号:TG139+.6

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)05-0013-05

## A survey of the research and application status on micro-actuators driven by MSMA

YANG Yao-hua, LIU Qing-min, JI Hua-wei

(College of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Magnetic shape memory alloy (MSMA) is a new smart material. The material has advantages of magnetic shape memory effect (MSME), such as big deformation, high force density, quickly dynamic response speed, high linearity and easy to be controlled. Aiming at the problems about MSMA nonlinear characteristics, stress-induced pseudo-elastic effects and temperature-induced SME were introduced. The present situation of block MSMA and film MSMA in the micro displacement actuator domain domestic and foreign research application were summarized, and the future application tendency about MSMA micro displacement actuator was analyzed. The results indicate that the actuators driven by MSMA are one of the most important driving methods in the field of micro-actuators.

**Key words:** magnetic shape memory alloy (MSMA); Ni-Mn-Ga; magnetic shape memory effect (MSME); actuator; application

## 0 引 言

随着科学技术特别是现代工业中微型机器人和计算机控制系统的不断发展,采用新型智能材料设计出线性度好且易于控制的微位移执行器得到了越来越广泛的关注。磁控形状记忆合金(MSMA)是 20 世纪后期才被发现的具有磁控形状记忆效应的智能材料。AdaptaMat 的 Dr. Ullakko 经过几年的研究,最早提出了 MSMA 的微观结构和磁控特性,并预言 MSMA 将是一种新型执行器材料<sup>[1-3]</sup>。现阶段研究的智能材料执行器有压电,磁致伸缩,形状记忆合金,电、磁流变体,

磁控形状记忆合金等。与其它执行器相比,以 Ni-Mn-Ga 为代表的磁控形状记忆合金具有如下特点<sup>[4]</sup>:磁场驱动下的形状记忆效应具有变形率大,力能密度大,动态响应速度快(是温控形状记忆合金的 80 倍左右),线性度好,易于控制。因此,MSMA 凭借其独特的优越性能而广受关注。

MSMA 微位移执行器材料的尺寸是由位移大小、执行器受力情况和微位移执行器响应速度等要求决定的。块状 MSMA 材料的长度取决于形变量的大小,宽度则根据执行器的受力状况而确定,并且高度要远小于长度;薄膜型 MSMA 的厚度大多为几个微米。块状

收稿日期:2009-11-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50805042);浙江省自然科学基金资助项目(Y10808055)

作者简介:杨耀华(1983-),男,河南驻马店人,主要从事智能材料及自动控制方面的研究. E-mail: 348720581@163.com

通信联系人:刘庆民,男,教授,硕士生导师. E-mail: qingmin61@163.com

和薄膜型材料都具备 MSMA 的优点。目前美国的麻省理工学院、马里兰州大学,芬兰的赫尔辛基工业大学以及 AdaptaMat Ltd. 对 MSMA 材料的变形特性、变形机理、磁控特性、数学模型以及不同比例的化学成分的影响等<sup>[5-10]</sup>进行了大量的研究工作。其中应用领域以芬兰的 AdaptaMat Ltd. 最为领先,它是唯一能对外提供性能优良的 MSMA 材料样品的商业公司。国内主要有国家基金项目资助下的研究所和高校对 MSMA 材料的制作方法、微观结构、相变特性以及磁滞特性等性能和特点的研究,应用领域主要是沈阳工业大学研究制作的蠕动型直线驱动器。

本研究主要介绍以 Ni-Mn-Ga 为代表的 MSMA 在微位移执行器中的国内外研究与应用现状,为 MSMA 微位移执行器的研究应用提供一定的借鉴。

## 1 磁控形状记忆合金的驱动原理

MSMA 作为执行器是与其在外加磁场作用下的奥氏体和马氏体之间的相互转换和孪晶界的移动密切相关的,即利用磁控形状效应材料的马氏体变体向磁场方向的重取向以及孪晶边界移动所产生的位移或应力作为执行器的驱动源。根据形状改变的不同诱发表,可以分为磁场诱发的磁控形状记忆效应,应力诱发的伪弹性效应和温度诱发的形状记忆效应。

### 1.1 磁控形状记忆效应

磁控形状记忆效应<sup>[11]</sup>(MSME)是指将 MSMA 的奥氏体相在外加磁场作用下产生马氏体相而发生形状的改变,或者是经相变形成的马氏体相经范性形变而改变形状后,通过改变温度或去掉磁场的方式经逆相变恢复到原来的奥氏体相,同时产生较大的回复力,可以为执行器提供一定的驱动力或位移,这就是磁控形状记忆效应的驱动原理。磁控形状记忆效应原理示意图如图 1 所示。由图示可知,磁控形状记忆效应具有磁滞性和可逆性。

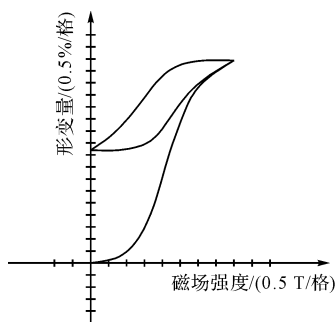


图 1 磁控形状记忆效应原理示意图

### 1.2 应力诱发的伪弹性效应

应力诱发的伪弹性效应<sup>[12-13]</sup>是指 MSMA 在某一温度和某一恒定磁场作用下施加一定的负载进行变形,由于应力能够诱发马氏体相变,因此 MSMA 的变形量较大;把负载卸载后,应力瞬间消失,变形后的马氏体很快就发生马氏体逆相变,恢复至奥氏体状态,同时恢复其变形前的形状,此过程即可作为执行器为外界提供一定的力和位移。应力诱发的伪弹性效应示意图如图 2 所示。

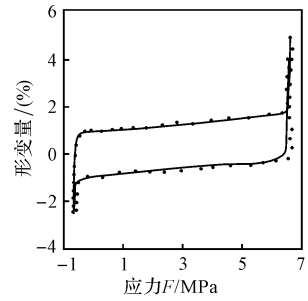


图 2 应力诱发的伪弹性效应示意图

伪弹性是指应力—应变曲线是非线性的,且卸载曲线存在滞后现象,和加载曲线也不重合,与传统材料的线性弹性应力—应变明显是不同的。由图 2 可以看出,该形状记忆效应具有滞后性和可逆性。

### 1.3 温度诱发的形状记忆效应

Ni-Mn-Ga 型 MSMA 的形变量也受到温度的影响<sup>[14]</sup>,其温度诱发的形状记忆效应和温控记忆合金(SMA)的类似,都是随着温度的改变,奥氏体和马氏体之间相互转变而产生形状记忆效应。但是 Ni-Mn-Ga 型 MSMA 的马氏体相变温度范围很宽( $M_s$  可以从 113 K 到 626 K),单晶  $Ni_{52}Mn_{16}Ga_{24}$  的磁滞应变在 290 K 时可以达到 1.15%。无负载状态下的马氏体相变应变曲线如图 3 所示。

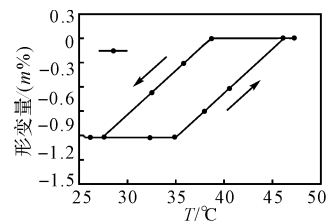


图 3 无负载下马氏体相变随温度变化曲线

由图 3 可知,马氏体和奥氏体相互转变的过程对应着材料在该方向的形变,当温度达到某一极限值后,材料的应变就会趋于稳定,这一极限温度就是马氏体奥氏体相互转变的开始或结束温度。同时 MSMA 在温控记忆效应中的形变曲线存在明显的热滞现象。

## 2 磁控形状记忆合金在微位移执行器中的应用

### 2.1 块体 Ni-Mn-Ga MSMA

对块体 MSMA 的性能研究表明,块体 Ni-Mn-Ga

有一个易磁化方向和一个难磁化方向,其中在易磁化方向上最大的形变量可达到 10%。利用磁场诱发物体产生形变这一特性,AdaptaMat Ltd. 研制出了 A06-3 型执行器<sup>[15]</sup>(如图 4 所示)。该执行器采用长度为 15 mm 的 Ni-Mn-Ga 型 MSMA 材料,经试验验证其在磁场大小一定的条件下,当频率为 200 Hz 时,产生 0.6 mm 的最大形变量,此时变形量为 4%,这说明该材料具有共振特性。该执行器的最大驱动力为 2.5 N,在通电 1 ms 时就开始发生形变,达到 3% 变形率的时间仅为 2 ms。



图 4 A06-3 型执行器



图 5 A-0 2000 执行器

该公司还研制了另外一款 A-0 2000 执行器(如图 5 所示),该款执行器的直径为 260 mm,高度为 90 mm,其铁芯采用高频材料以减小铁芯中的涡流,同时可实现加载在 MSMA 上的磁场突变,故该执行器可以在直流或低频电流下使 MSMA 材料产生较大的力和位移。在预压力为 1.25 MPa 时,执行器的形变量可达 2.8%。

这两种执行器的原理都是利用通过绕线线圈的电流产生垂直于 MSMA 的磁场,在磁场的作用下,MSMA 材料发生形变,产生力和位移。MSMA 必须在外力作用下才能恢复形变,这里都采用弹簧提供预压力来实现材料在电流驱动下的动态形变。

执行器结构原理示意图如图 6 所示。这两款执行器均利用 MSMA 自身的性能产生形变,但是由于所采用的 MSMA 材料长度及执行器整体尺寸的限制,这两款执行器

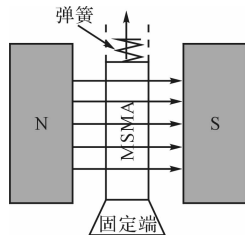


图 6 执行器结构原理示意图

的绝对位移量较小,用于演示 MSMA 材料的磁控变形特征是很明显的,但是应用于生产生活中,较小的绝对形变量就制约了其广泛的应用。此外,由于弹簧的响应频率和自身惯性的影响,限制了执行器的频率且增加了执行器的位置控制精度等一系列问题。

沈阳工业大学的王凤祥、张庆新等<sup>[16-17]</sup>对 MSMA 材料也做了比较多的应用研究,其设计制作的蠕动型直线驱动器(如图 7 所示)为 MSMA 执行器实现大位

移提供了可行性理论依据和实践经验。执行器是根据仿生学蠕动原理,采用改变磁场方向实现形变恢复,将 MSMA 小步距的位移连续累加以形成大行程的执行器。

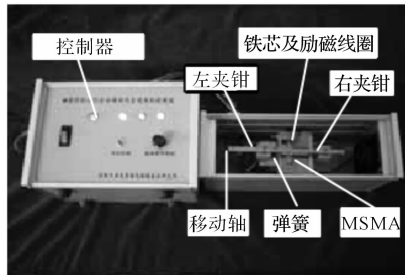


图 7 蠕动型直线驱动器

在图 7 中,根据控制器指令,若使直线执行器向左运动,则控制器发布指令使左夹钳松开,右夹钳夹紧,同时控制磁场方向由轴向转变为垂直于轴,使磁感线垂直穿过 MSMA,此时 MSMA 向左伸长,为了实现累积步长,在形变完成后,改变左右夹钳的夹持状态,然后改变磁场方向为沿轴向方向,通过水平方向磁场的回复作用,MSMA 向右收缩以恢复原形,重复上述过程,即可实现执行器的连续运动。

该款执行器在 AdaptaMat Ltd. 公司执行器原理基础上,采用蠕动结构以实现大的绝对位移量。由于执行器的研究本身就处于初始阶段,且该样机是在忽略温度对 MSMA 材料影响下建立的模型,其结构比较粗糙,误差也比较大。样机的输入/输出特性研究分析数据不充分,给执行器实现自动控制的控制特性研究带来了很大的困难。

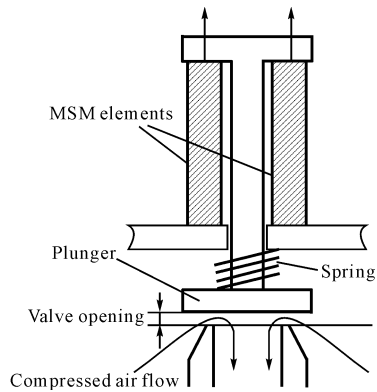


图 8 MSMA 磁控阀

此外,Suorsa 等根据磁控记忆原理已经研制出了 MSMA 磁控形状记忆合金阀<sup>[18]</sup>,主要是利用 MSMA 的微形变量及其线性度好,易于控制的优点,实现对流体等的精密控制。MSMA 磁控阀的工作原理如图 8 所示。当需要减小流体流入量时,增加 MSMA 的磁场强度,则 MSMA 在磁场的作用下产生变形伸长,由于上

端固定,MSMA 只能向下推动弹簧和活塞移动,这样阀门开度就减小,压缩的流体流入通道内的量就随之减少。反之,减小通过 MSMA 的磁场强度,MSMA 在弹簧作用下回复形变,阀门开度增大,从而进入通道的流体流量也增加。

### 2.2 薄膜型 Ni-Mn-Ga MSMA

到目前为止,对 Ni-Mn-Ga 材料的研究工作主要集中在块体材料上。但是,块体材料的高脆性导致其加工困难,块体响应速度较薄膜型的也慢。因此,对金属薄膜来说,其本身也是一种独立的应用材料,对其进一步的应用是提高材料自身性能的重要手段。Ni-Mn-Ga MSMA 薄膜材料的制备研究,为 MSMA 能够进入小体积、大应变微执行器领域并得到广泛应用提供了可能。目前,国内对 Ni-Mn-Ga MSMA 薄膜材料的制备研究应用主要是采用直流磁控溅射的方法<sup>[19]</sup>,在不同基底、不同溅射条件和热处理状态下得到性能不尽相同的 MSMA 薄膜。J. W. Dong, L. C. Chen 和 C. J. Palmstrm 等人<sup>[20]</sup>首先利用分子束外延法在基片上沉积得到 Ni-Mn-Ga 合金薄膜。Qi Pan 等<sup>[21]</sup>使用同样的方法得到了 90 nm 厚的 Ni-Mn-Ga 薄膜并观察了其磁畴形态。Shoji Ishida 等人<sup>[22]</sup>对该类型的合金薄膜的相变结构进行了分析,并从理论上预测了其具有磁控形状记忆功能。Oleg Heczko, Aleksndr Soroka 和 Simo-pekka Hannula 等<sup>[23]</sup>对 Ni-Mn-Ga 晶体采用自上而下 (the top-down approach) 逐渐变薄的方法得到了厚度为 90 μm 厚的薄膜,并对其性能进行了实验分析,得出该薄膜能在较低的磁场下发生形变的结论,证实了该类型合金薄膜在实现高精度微位移执行器的可能性。以上分子束外延法和磁控溅射均属于物理气相沉积方法。

薄膜型 MSMA 现阶段大多处于试验设想阶段,还没有出现性能比较好的样机。Ni-Mn-Ga MSMA 薄膜材料在旋转磁场下形变的示意图如图 9 所示。磁场大小不变,方向为沿顺时针



图 9 薄膜型 MSMA 在旋转磁场下的形变示意图

(或逆时针)360°的连续转动。在垂直穿过薄膜的磁场作用下,薄膜将根据垂直穿过的磁场强度大小而发生对应的形变。由于薄膜的形变量和磁场是近似的线性关系,因而在旋转磁场的作用下,薄膜将连续的收缩变形。利用这一原理,笔者进行了相关的制动器的研究,主要是用于泵阀等流体及光的流量控制方面。

M. Kohl, D. Brugger, M. Ohtsuka 等<sup>[24]</sup>提出了一种薄膜型 MSMA 微位移执行机构的原理图(如图 10 所示)。该执行机构外围是由永磁体和软磁芯组成的一个闭合的磁回路,通过电阻丝来实现薄膜温度的调节。由于温度对磁场下的 Ni-Mn-Ga MSMA 材料磁控形变有较大的影响,在较低温度时,薄膜在磁铁的作用下一端上翘,以使磁性回路能够闭合;温度升高,当薄膜温度达到并超过马氏体逆相变温度时,薄膜就会逐渐地由马氏体转变为奥氏体,磁力逐渐减小,而薄膜的形状回复力逐渐增大,此时,薄膜开始反向变形,直至如图 10(b)所示形状。

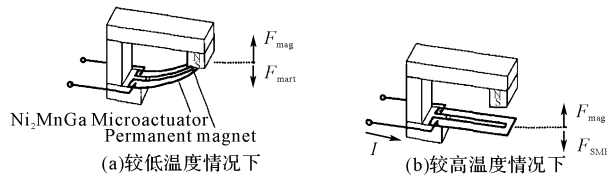


图 10 一种薄膜型 MSMA 微位移执行机构的原理图

利用这个原理,本研究开发出新的微扫描仪。微扫描仪的大小为 5 mm × 0.5 mm × 0.01 mm,预计该扫描仪在低于 80 Hz 的较大频宽内最大的扫描角度可达 120°,Ni-Mn-Ga 微执行器的厚度为 10 μm。

目前,MSMA 材料及其执行器未能得到广泛的应用,但其双向应变效应的优异性能,以及磁场对 MSMA 马氏体相变作用的新机制,都将使该材料受到特别的重视。从原理上来讲,MSMA 的形状记忆效应不同于目前常用的磁致伸缩效应,也不同于温度控制的现有形状记忆合金和压电材料。因而可以利用此原理开发出许多新的材料<sup>[25-26]</sup>和新的应用领域<sup>[27-28]</sup>。

### 3 结束语

随着对 MSM 材料研究的逐渐深入和对加工工艺的完善,MSMA 这一智能材料凭借其形变率大、力能密度高、频响快、线性度好、易于控制等优点,在现有的执行器应用领域外,还可在传感器、自动控制系统、表层智能结构、飞机机翼调控系统、超大功率超声换能技术等方面得到应用。

总之,伴随科学技术特别是现代工业中微型机器人和计算机控制系统的不断发展以及对 MSMA 性能研究的日益成熟与完善,MSMA 驱动的微位移执行器有可能成为微执行器中最为重要的方式之一。

### 参考文献 (References) :

[1] ULLAKKO K. Magnetically controlled shape memory alloys: a new class of actuator materials[J]. *Journal of Materials*

- Engineering and Performance**, 1996, 5(3):405–409.
- [2] ULLAKKO K, JOKINEN T, SUORSA I. Magnetic shape memory materials-new possibilities to create force and movement by magnetic fields[C]//Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines and Systems, Shenyang, China, 2001:20–23.
- [3] ULLAKKO K, SUORSA I, PAGOUNIS E. Magnetic shape memory actuator performance[J]. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 2004(3):2029–2030.
- [4] KAKESHITA T, FUKUDA T. Recent topics in microstructure control by magnetic field in Ni<sub>2</sub>MnGa and CoPt and new transformation behavior in Ti-Ni-Fe alloys[J]. **The European physical Special Topics**, 2008, 158(1):73–78.
- [5] ULLAKKO K, HUAHG J K, KOKORIN V V, et al. Magnetically controlled shape memory effect in Ni<sub>2</sub>MnGa intermetallics[J]. **Scripta Materialia**, 1997, 36(10):1133–1138.
- [6] AYUELA A, ENKOVAARA J, ULLAKKO K, et al. Structural properties of magnetic Heusler alloys[J]. **J. PHYS: CONDENS**, 1999(11):2017–2026.
- [7] SOZINOV A, LIKHACHEV A A, ULLAKKO K, Magnetic and magnetomechanical properties of Ni-Mn-Ga alloys with easy axis and easy plane of magnetization[C]//Smart Structures and Materials, Newport Beach, USA, 2001:189–196.
- [8] COUCH R N, CHOPRA I, WUTTI M R. Experimental Characterization of NiMnGa Ferromagnetic Shape Memory Alloy Bars Under Variable Loading Conditions[C]//Smart Structures and Materials 2002: Smart Structures and Integrated Systems, 2002:29–39.
- [9] COUCH R N, CHOPRA I. Experimental Characterization of NiMnGa Magnetic Shape Memory Alloy Rods Under Dynamic Magnetic Fields[C]//Smart Structures and Materials, 2003: Active Materials: Behavior and Mechanics, 2003:169–180.
- [10] JIANG Cheng-bao, FENG Gen, GONG Sheng-kai, et al. Effect of Ni excess on phase transformation temperatures of NiMnGa alloys[J]. **Materials Science and Engineering**, 2003, 342(1–2):231–235.
- [11] CHMIELUS M, CHERNENKO V A, KNOWLTON W B, et al. Training, constraints, and high-cycle magneto-mechanical properties of Ni-Mn-Ga magnetic shape-memory alloys[J]. **Eur. Phys. J. Special Topics**, 2008, 158(1):79–85.
- [12] 彭志明, 单晶 Ni-Mn-Ga 孪晶界迁动机制研究及应力诱发马氏体相变模拟[D]. 上海: 上海交通大学材料科学与工程学院, 2007.
- [13] KART S Ö, ULUDOGAN M, KARAMAN I, et al. DFT studies on structure, mechanics and phase behavior of magnetic shape memory alloys: Ni<sub>2</sub>MnGa[J]. **phys. stal. sol (A): Application and Materials Science**, 2008, 205(5):1026–1035.
- [14] HECZKO O, ULLAKKO K. Effect of temperature on magnetic properties of Ni-Mn-Ga magnetic shape memory (MSM) alloys[J]. **IEEE Transactions on Magnetics**, 2004, 37(4):2672–2674.
- [15] TELLINEB J, SUORSA I, JÄÄSKELÄINEN A, et al. Basic Properties of Magnetic Shape Memory Actuators[C]//8th International Conference Actuator 2002, Bremen, Germany, 2002:566–569.
- [16] 张庆新. 磁控形状记忆合金特性及其执行器应用基础研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学电气工程学院, 2006.
- [17] ZHANG Qing-xin, WANG Feng-xiang. A Novel Linear Actuator and Its Controlling System[C]//Proceeding of IEEE International Conference on Automation and Logistics, China: Jinan, 2007:979–984.
- [18] SUORSA I, TELLINEN J, PAGOUNIS E, et al. Applications of magnetic shape memory actuators[C]//8<sup>th</sup> International Conference Actuator 2002, Germany: Bermen, 2002:158–161.
- [19] 金 岚. 磁控溅射法制备铁磁形状记忆合金 Ni-Mn-Ga 薄膜的性能研究[D]. 镇江: 江苏大学材料学院, 2009.
- [20] DONG J W, CHEN L C, PALMSTRÜM C J, et al. Molecular beam epitaxy growth of ferromagnetic single crystal (001) Ni<sub>2</sub>MnGa on (001) GaAs[J]. **Applied Physics Letters**, 1999, 75(10):1143–1145.
- [21] PAN Q, DONG J W, PALMSTRM C J, et al. Magnetic domain observations of freestanding single crystal patterned Ni<sub>2</sub>MnGa films[J]. **Applied Physics**, 2002, 91(10):7812–7814.
- [22] ISHIDA S, ASANO S, TANAKA Y. Structural phase stability in Ni<sub>2.17</sub>Mn<sub>0.83</sub>Ga film[J]. **Materials Transitions**, 2002, 43(5):867–870.
- [23] HECZKO O, SOROKA A, HANNULA S. Magnetic shape memory effect in thin foils[J]. **Applied Physics Letters**, 2008, 93(2):1–3.
- [24] KOHL M, BRUGGER D, OHTSUKA M, et al. A novel actuation mechanism on the basis of ferromagnetic SMA thin films[J]. **Sensors and Actuators**, 2004, 114(2–3):445–450.
- [25] KOIKE K, OHTSUKA M, MATSUMOTO M, et al. Effects of Fe and Co addition on the magnetoresistance in Ni-Mn-Ga films[J]. **Eur. Phys. J. Special Topics**, 2008, 158(1):143–148.
- [26] KARACA H E, KARAMAN I, BASARAN B, et al. Magnetic field-induced phase transformation in NiMnCoIn magnetic shape-memory alloys—a new actuation mechanism with large work output[J]. **Advances Functional Materials**, 2009, 19(7):983–998.
- [27] TABRIZI V A, MOALLEM M. Nonlinear Position Control of Antagonistic Shape Memory Alloy Actuators[C]//Proceedings of the 2007 American Control Conference, New York, USA, 2007:88–93.
- [28] AMBROSINO C, CAPOLUONGO P. Fiber bragg grating and magnetic shape memory alloy: novel high-sensitivity magnetic sensor[J]. **IEEE Sensors Journal**, 2007, 7(2):228–229.