

DOI: 10.3901/JME.2010.14.091

# 形状记忆合金旋转驱动器结构设计方法

于 东<sup>1</sup> 张博明<sup>2</sup> 金龙学<sup>3</sup> 梁 军<sup>4</sup> 王晓宏<sup>4</sup>

(1. 哈尔滨工业大学机电工程学院 哈尔滨 150001;

2. 北京航空航天大学材料科学与工程学院 北京 100191;

3. 哈尔滨市计量检定测试院 哈尔滨 150001;

4. 哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所 哈尔滨 150001)

**摘要:** 形状记忆合金是一种高效的驱动器。当使用形状记忆合金以较大的驱动力和驱动行程进行双向驱动时, 需要增加偏置机构来完成对称动作。使用弹簧等作为偏置机构时, 需要有持续能源输入维持变形。为克服这种缺陷, 利用形状记忆合金单程记忆效应, 以链轮链条传动机构作为依托, 提出一种基于应变约束条件的旋转驱动器的结构设计方法。结构中以形状记忆合金作为无需能量输入的偏置机构, 实现在单程记忆效应下的大行程双向驱动, 并可消除链轮链条传动间隙。根据这种结构的特征, 给出结构几何参数的设计公式及输出转矩公式, 通过试验的方法研究旋转驱动器中形状记忆合金在应变约束条件下的应力应变特征, 给出驱动过程中存在的应变死区, 修正转角设计函数。

**关键词:** 形状记忆合金 形状记忆效应 链条 结构设计

**中图分类号:** TB381

## Structural Design Method of Rotation Gear Actuated by Shape Memory Alloys

YU Dong<sup>1</sup> ZHANG Boming<sup>2</sup> JIN Longxue<sup>3</sup> LIANG Jun<sup>4</sup> WANG Xiaohong<sup>4</sup>

(1. School of Electromechanical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 15001;

2. School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191;

3. Harbin computation Assay and Test Office of Heilongjiang Province, Harbin 150001;

4. Center for Composite Materials and Structure, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract:** Shape memory alloys (SMA) are highly active actuators. When shape memory alloys are used to realize a two-way actuation with a large driving force and a long driving stroke, a bias mechanism should be added to finish the symmetrical movement. When a spring is used as a bias mechanism, continuous energy input is required to keep the deformation. To overcome this shortcoming, a structural design method of rotation gear actuated by shape memory alloys based on constraint condition of strain is put forward. The structure is realized by sprocket feed and one-way shape memory effect and a two-way actuation is finished by the bias mechanism made up of shape memory alloy itself. Space of sprocket drive can be erased by the contraction of SMA. According to the feature of this structure, the formulas of geometric parameter design and torque are given. Under the constraint condition of strain, relations between stress and strain of shape memory alloys are studied through experiment. A strain dead zone existing during the actuation is given and an angle design function is corrected.

**Key words:** Shape memory alloys(SMA) Shape memory effect Chain Structural design

## 0 前言

从发现形状记忆效应至今, 形状记忆合金

(Shape memory alloy, SMA)已经广泛应用于航空航天、微电子机械系统(Micro electro mechanical systems, MEMS)微驱动、医疗、建筑以及生活用品等。在这些领域的研究中, 其中一部分是针对形状记忆合金作为一种驱动材料进行研究的。YU 等<sup>[1]</sup>研究了以 SMA 弹簧驱动翼型改变的结构; REY

20090729 收到初稿, 20100104 收到修改稿

等<sup>[2]</sup>利用 SMA 驱动发动机喷口变形抑制噪音; NAM 等<sup>[3]</sup>利用 SMA 驱动改变机翼结构刚度; PITT 等<sup>[4]</sup>使用 SMA 作为驱动器对进气道结构进行调节。袁振宇等<sup>[5-6]</sup>对 SMA 薄膜驱动器进行了相关研究。邓宗才等<sup>[7-8]</sup>对 SMA 在建筑结构的防震减灾进行了研究。这些以形状记忆合金作为驱动材料的相关研究,利用其形状记忆效应以及在约束条件下受激励产生回复力的原理,往往以型材或线圈弹簧的形式输出直线的驱动力和位移。SMA 的形状记忆效应分为单程记忆效应和双程记忆效应<sup>[9]</sup>。利用形状记忆合金的单程记忆效应时,其驱动力大,可回复位移也较大,但无法单独进行双向驱动,进行双向驱动时需要弹簧偏置结构对双向驱动进行补充,并且当形状记忆合金受激变形后激励源需要持续供给能量才能维持变形<sup>[10-11]</sup>;利用形状记忆合金的双程记忆效应时,可以实现双向驱动,但位移与驱动力都较小,并且双向的响应速度依赖于环境条件。本文研究了一种基于形状记忆合金单程记忆效应进行双向驱动的结构设计方法,并且反向驱动不需要偏置机构,维持变形不需要持续供给能量。

## 1 形状记忆合金单程记忆效应双向驱动的设计原理

通过对马氏体状态和奥氏体状态下的 NiTi 形状记忆合金进行拉伸试验发现,当 NiTi 形状记忆合金处于马氏体状态下时,弹性模量仅为奥氏体状态下 44%左右,在图 1 中是相同规格的 SMA NiTi 丝(Ni 原子百分比 49.5%,马氏体开始温度 20 °C,奥氏体结束温度 70 °C),分别处于马氏体状态和奥氏体状态下,在拉伸机上加载和卸载的过程。除了获得两种相状态下 NiTi 记忆合金弹性模量特征外,还发现处于奥氏体状态下的 NiTi 合金,在卸载过程中的应力值,在一定的应变范围之内始终大于处于马氏体状态下的记忆合金在同一应变范围内加载的应力值。这说明在一定的应变范围之内可以使用

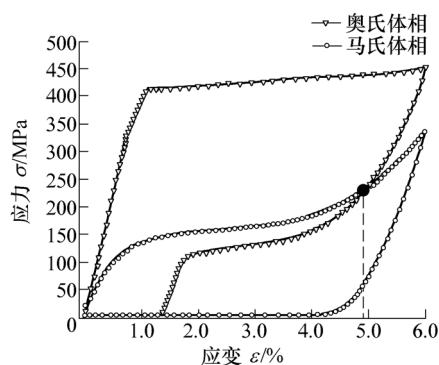


图 1 形状记忆合金在不同状态下应力应变关系

形状记忆合金在受到激励时产生的回复力来拉伸相同规格处于马氏体状态的形状记忆合金,当两侧具有对称的结构时,就可以实现形状记忆合金单程记忆效应的双向驱动,并且一个方向驱动结束后,不需要持续供给能量。

## 2 形状记忆合金旋转驱动器的设计方法

根据形状记忆合金在一定的应变范围内,马氏体状态下受拉发生塑性变形的应力小于其受热后发生奥氏体相变产生回复应力的原理,在形状记忆合金处于马氏体开始温度的环境中,以互相牵制的方式进行工作。通过一根围在链轮上的一段链条,其两端分别与两根 SMA 丝连接,SMA 的另一端固定不动,这样构成一个链轮可以旋转一定角度的驱动机构。与链轮同步的转轴可以作为转矩输出轴(图 2)。由于形状记忆合金在结构中使用狭长的丝状型材并且平行距离较近,使用水浴、气流等方式对其激励不易实现,因此,在这种旋转机构中使用电流对 SMA 丝加热驱动。驱动电流的大小根据 SMA 丝径、环境的散热条件以及要求的响应速度等条件进行选择,既要使 SMA 丝能够以较快的速度升温又不能让其过热损害形状记忆效应。

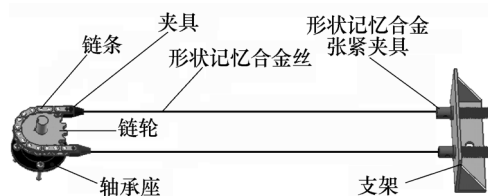


图 2 SMA 丝旋转驱动结构

在理想状态下,两根 SMA 在固定完成后,如果都具有  $\alpha\%$  的预应变,这时驱动其中一根 SMA 使其发生相变,在驱动力的作用下通过链条链轮的传动拉动另一根 SMA。当变形结束时,受激励 SMA 的应变大约恢复为 0,卸载 SMA 的变形大约为  $2\alpha\%$ ,同时链轮产生一个  $\alpha$  的转角。反过来,当驱动另外一根 SMA 时,产生相反过程,待驱动结束达到稳定状态时,链轮将发生反方向  $2\alpha$  的转角(图 3)。也可以直接将一根具有  $2\alpha\%$  预应变的 SMA 丝与一根处于原长状态的 SMA 丝固定,会产生相同转角的驱动效果。

对于前一种情况可以根据式(1)对结构进行设计

$$\frac{La\%}{2\pi R} = \frac{\alpha}{360^\circ} \quad (1)$$

式中,  $L$  为 SMA 丝的原长,  $\alpha\%$  为单根 SMA 丝的预应变,  $R$  为链轮的分度圆半径,  $\alpha$  为链轮转动角度。

由此摆动机构产生的驱动力矩可由式(2)进行

表征

$$T = (F_1 - F_2)R \quad (2)$$

式中  $F_1$  为受激励形状记忆合金产生的回复力,  $F_2$  为未激励处于马氏体状态的形状记忆合金变形阻力,  $R$  为链轮分度圆半径。

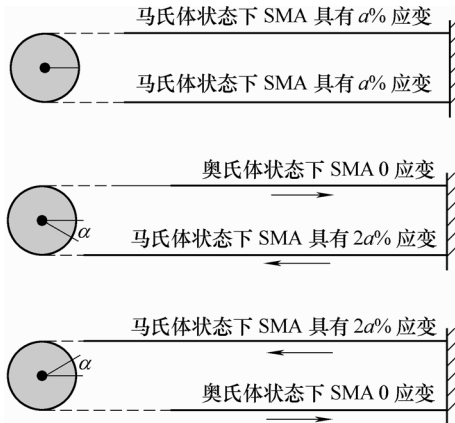


图3 理想状态下的形状记忆合金转动驱动机构

### 3 形状记忆合金转动驱动器设计约束条件

实际上, 形状记忆合金转动驱动器不能完全按照图3中的规律进行变形。因为在整个的驱动过程中两根 SMA 丝的应变之和为固定不变值。一旦设计的应变  $\alpha\%$  确定下来, 一根 SMA 变形获得  $\Delta\%$  的应变值时, 另外一根 SMA 将获得  $-\Delta\%$  的应变值, 两根 SMA 丝的应变值之和始终保持  $2\alpha\%$  不变, 即二者的应变关系满足

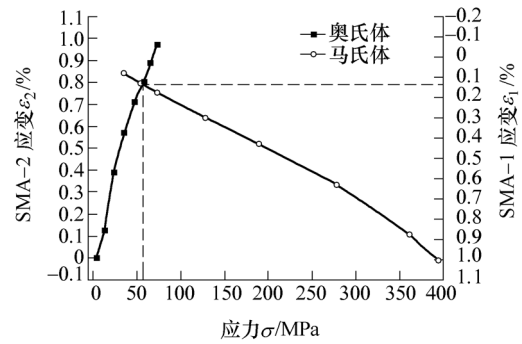
$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = K \quad (3)$$

在式(3)约束条件的控制下, 在每一个应变值下, 两根形状记忆合金丝都对应一个唯一的回复应力值, 图4是两根 SMA 丝在式(3)的约束下,  $K$  分别取 1%、2%、3%、4% 时的应力应变情况。

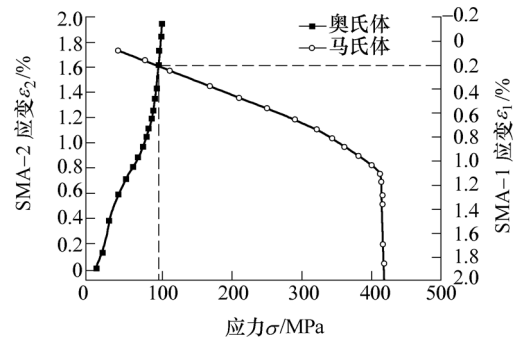
两根 SMA 在变形过程中都沿着各自的曲线按照应变约束条件移动, 两根曲线的交点是处于马氏体状态的 SMA 受拉应力值与 SMA 受激励产生回复应力值相等点, 到达该点后受力平衡, 整个旋转动作将停止, 而此时对应的应变值对于受拉处于马氏体状态的 SMA 来说是其可以在双向驱动中可以达到的最大应变值; 对受到激励处于奥氏体状态的 SMA 来说是其可在双向驱动中可达到的最小应变值。这个最小值不是 0, 即这种 SMA 旋转驱动器中存在一个驱动死区。当总应变  $K$  提高时, 这个应变死区也随之提高, 通过数值模拟和试验的方法可以获得不同总应变值下的死区应变值, 式(1)可修正为

$$\frac{L(a\% - \varepsilon_a)}{2\pi R} = \frac{\alpha}{360^\circ} \quad (4)$$

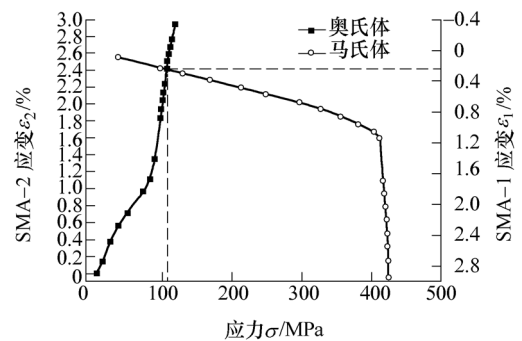
式中  $\varepsilon_a$  为死区应变值。



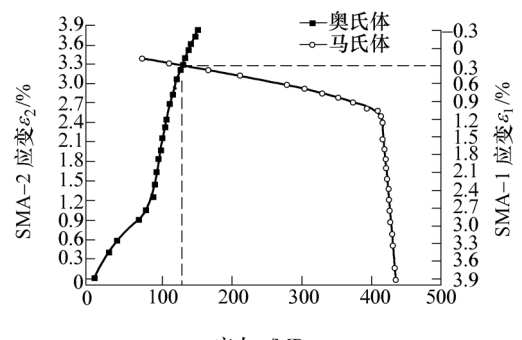
(a) 总应变 1%



(b) 总应变 2%



(c) 总应变 3%



(d) 总应变 4%

图4 两根 SMA 丝在应变约束条件下的应力应变关系

使用链条与链轮作为传动机构时, 链轮与链条有较大的间隙, 往复运动中会有一定的空程。使用在纵向可以产生应变变化的形状记忆合金驱动结构旋转时, 恰恰可以消除往复运动的空程, 充分发挥链条链轮传动机构的优势, 但是在设计过程中还要充分考虑这个问题, 因此式(4)可进一步修正为

$$\frac{L(a\% - \varepsilon_a) - \Delta\varepsilon}{2\pi R} = \frac{\alpha}{360^\circ} \quad (5)$$

式中  $\Delta\varepsilon$  为链轮链条往复运动过程中的间隙。

当旋转角度设计完成后, 输出转矩可以通过对 SMA 丝径的设计来达到目标值。

当链轮的几何尺寸确定后, 链轮转轴产生的转矩主要与形状记忆合金的回复力密切相关。图 5 中所示是在给定链轮分度圆直径 39.5 mm, SMA 丝径 1 mm 等参数下, 根据式(2)计算获得的转矩与应变的对应关系, 其转矩特征主要受激励形状记忆合金的回复力影响。

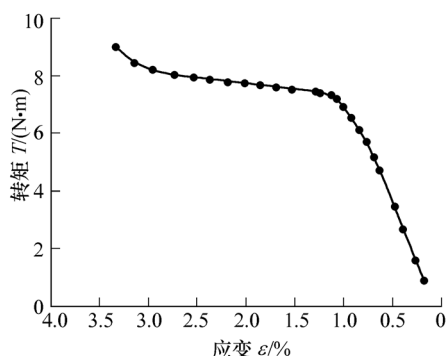


图 5 给定参数下输出转矩与应变的对应关系

由于形状记忆合金受温度影响与控制, 因此结构一般应置于通风良好的环境, 以利于形状记忆合金的冷却。如果结构置于封闭环境, 则要考虑增加强制风冷等冷却措施, 来提高两次驱动间的时间间隔。

## 4 结论

(1) 利用形状记忆合金在一定应变范围内受激励产生回复力大于该应变范围内马氏体状态下 SMA 发生塑性变形应力的特点, 可以使用 SMA 的单程记忆效应进行双向驱动。

(2) 给予形状记忆合金一定应变后, 以互锁的方式安装在链轮链条等结构中, 可以实现旋转驱动。

(3) 形状记忆合金旋转驱动器在转角设计过程中, 主要根据应变约束条件进行设计, 并且充分考虑应变死区以及链轮链条机构往复运动间隙的影响。

## 参 考 文 献

[1] YU Dong, ZHANG Boming, LIANG Jun. A changeable aerofoil actuated by shape memory alloy springs[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 485(1-2):

243-250.

- [2] REY N M, TILLMAN G, MILLER R M, et al. Shape memory alloy actuation for a variable area fan nozzle[C]// Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, Newport Beach, CA: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2001: 371-382.
- [3] NAM C, CHATTOPADHYAY A, KIM Y. Application of shape memory alloy (SMA) spars for aircraft maneuver enhancement[C]// Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, San Diego, CA, United States: The International Society for Optical Engineering, 2002: 226-236.
- [4] PITT D M, DUNNE J P, WHITE E V. SAMPSON smart inlet design overview and wind tunnel test Part I-Design overview[C]// Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, San Diego, CA, United States: The International Society for Optical Engineering, 2002: 13-23.
- [5] 袁振宇, 徐东, 刘毓舒, 等. NiTi 形状记忆合金薄膜的制备及形变特性[J]. 功能材料与器件学报, 2006, 12(3): 229-232.
- YUAN Zhenyu, XU Dong, LIU Yushu, et al. Preparation and application of NiTi shape memory alloy thin films[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2006, 12(3): 229-232.
- [6] 程秀兰, 蔡炳初, 徐东, 等. 形状记忆合金驱动的微执行器[J]. 功能材料与器件学报, 2002, 8(3): 319-324.
- CHENG Xiulan, CAI Bingchu, XU Dong, et al. Microactuators actuated by shape memory alloys[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2002, 8(3): 319-324.
- [7] 邓宗才, 李庆斌. 形状记忆合金混凝土轴心构件的变形特性[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(11): 1 544-1 547.
- DENG Zongcai, LI Qingbin. Deformation behavior of concrete axial specimens with symmetrically embedded shape memory alloy wires[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2002, 42(11): 1 544-1 547.
- [8] 孙宏俊, 邓宗才, 李建辉. 形状记忆合金在结构减隔震中的应用[J]. 建筑技术, 2006, 37(2): 143-145.
- SUN Hongjun, DENG Zongcai, LI Jianhui. Application of shape memory alloy to the seismic isolation and

(下转第 100 页)

- KANG Jian, WU Yongtai. Research on magnet constricted vacuum plasma arc welding process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1987, 8(1): 17-22.
- [8] 陈集, 赵红, 范德民, 等. 纵向磁场约束等离子弧的试验研究[J]. 齐齐哈尔轻工业学院学报, 1997, 13(1): 41-44.
- CHEN Ji, ZHAO Hong, FAN Demin, et al. The experimental study of the plasma arc restricted by the axis magnetic field[J]. Journal of Qiqihar Light Industry Institute, 1997, 13(1): 41-44.
- [9] 殷树言. 气体保护焊工艺基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- YIN Shuyan. The basis of arc gas shielded welding process[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [10] 华爱兵. 磁旋弧 MAG 焊接机理及应用研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2008.
- HUA Aibing. Research on the mechanism and application of rotating MAG welding process under the effect of the magnetic field[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2008.
- 
- 作者简介: 华爱兵(通信作者), 男, 1977 年出生, 博士研究生。主要从事高效焊接工艺及焊接过程自动化等方面的研究工作。
- E-mail: huaaibing@2008.sina.com



(上接第 94 页)

- dissipation of civil structures[J]. Architecture Technology. 2006, 37(2): 143-145.
- [9] 赵连城, 蔡伟, 郑玉峰. 合金的形状记忆效应与超弹性[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- ZHAO Liancheng, CAI Wei, ZHENG Yufeng. Shape memory effect and superelasticity in alloys[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002.
- [10] ELZEY D M, SOFLA A Y N, WADLEY N G. A shape memory-based multifunctional structural actuator panel[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(7): 1 943-1 955.
- [11] ELZEY D M, SOFLA A Y N, WADLEY N G. Shape memory-based multifunctional structural actuator panels[C]// Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, San Diego, CA, United States: The International Society for Optical Engineering, 2002: 192-200.
- 
- 作者简介: 于东(通信作者), 男, 1978 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为智能材料与结构。
- E-mail: yudong@hit.edu.cn
- 张博明, 男, 1966 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为复合材料。
- E-mail: zbm@hit.edu.cn