

形状记忆合金(SMA)弹簧驱动器的变形研究^①

许红伟^② 费燕琼^③ 朱宇航 王 绪

(上海交通大学机器人研究所 上海 200240)

摘 要 建立了可作为软体机器人中的形状记忆合金(SMA)弹簧驱动器的变形模型,获得了模型的待定参数 A_1 、 A_2 、 A_3 、 B_1 、 B_2 、 B_3 ,并对该模型进行了实验验证。首先基于 Clausius-Clapeyron 方程和泰勒展开式,使用待定参数法建立了 SMA 弹簧的变形模型,描述了 SMA 弹簧的变形量、负载和温度之间的非线性关系;然后根据热平衡方程建立了电加热情况下的 SMA 弹簧温度变化模型,并获得了加热时间与弹簧温度的关系曲线;继而进行了零负载状态下的变形实验,根据实验结果计算出变形模型中的待定参数;最后通过定长通电驱动和定载荷通电驱动实验,验证了模型的正确性。所建模型能够为软体机器人中的 SMA 弹簧驱动器的控制方案建立提供参考。

关键词 形状记忆合金(SMA), 弹簧, 变形, 弹簧驱动器

0 引 言

由于结构限制,传统的刚性机器人对复杂环境的适应性较弱^[1]。因此,越来越多的研究者将目光投向通过变形产生运动的软体机器人^[2]。软体机器人模仿自然界的软体生物的运动方式,通过改变自身形状进行运动。由于其更好的环境适应性,软体机器人的研究具有广阔的前景^[3]。一些研究者已经成功设计出软体机器人。John 设计出一款柔性抓手,能够在被抓取的物体的形状变化的情况下良好工作^[4]。Robert 发明了一款四足软体机器人,由压缩空气驱动,能够完成行走动作^[5]。

形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)是一种新型材料。在低温状态下,它刚度很小,容易变形。当温度升高到一定程度,刚度急剧变大,形状恢复变形以前的状态,就像能够记忆形状。SMA 由于其特殊性质,经常被用作软体机器人中的驱动器,利用其温度变化时的伸缩驱动软体机器人产生变形。

直线的 SMA 丝伸缩范围有限,作为驱动器时机器人的变形量也收到限制。当前更常用的做法是把 SMA 制作成螺旋弹簧,可以明显增大驱动器的伸缩量。

许多软体机器人是用 SMA 弹簧驱动的。Margheri 和 Mazzolai 设计了一款仿章鱼触手机器人^[6,7]。用形状记忆合金弹簧作为人工肌肉,在触手内沿半径方向安装。通电时人工肌肉会收缩,使得触手变形。当人工肌肉按照合适的顺序变形时,触手就可以完成指定功能。Seok 设计了一款类似蠕虫的机器人^[8],本体是网状的,在本体上附加了若干形状记忆合金弹簧。当 SMA 弹簧加热收缩时,它驱动网状本体产生变形,半径变小。当这种变形连续且顺序合适时,机器人就可以像蠕虫一样蠕动。Menciassi 设计了一款模仿毛虫进行滚动的软体机器人^[9],用两条形状记忆合金弹簧驱动塑料本体。对 SMA 弹簧驱动器加热时,驱动器变短并迫使机器人本体弯曲成环形,并在重心偏移产生的力矩作用下滚动。Yuuta 和 Shinichi 设计了一款用形状记忆

① 国家自然科学基金(51475300)资助项目。
② 男,1992年生,硕士;研究方向:软体机器人,形状记忆合金驱动器;E-mail: xuhongwei@sjtu.edu.cn
③ 通讯作者, E-mail: fyq@sjtu.edu.cn
(收稿日期:2017-02-27)

合金弹簧驱动的环形机器人^[10]。通电时,形状记忆合金弹簧会收缩变短并导致机器人形状变为椭圆形,由于与地面接触点发生偏移,产生转矩,机器人将会滚动。

迄今为止,很少有针对形状记忆合金的深入研究。上述研究仅将形状记忆合金作为软体机器人的驱动器,并未关注其变形原理。为了更高效地使用形状记忆合金,有必要更深入地研究其变形机理。

本文参考已有的研究成果^[11,12],改进了其建模过程,并分析了电驱动过程,建立了形状记忆合金弹簧驱动器变形的数学模型。该变形模型描述形状记忆合金弹簧的变形量、负载和温度之间的非线性关系。同时根据热平衡方程,建立电加热情况下的形状记忆合金弹簧温度变化模型。然后进行了无负载状态下的形状记忆合金弹簧变形实验,根据实验结果计算出模型中的相关参数。基于上述变形模型和温度变化模型,进行模拟仿真和单一变量实验验证。结果表明,仿真结果和实验结果匹配良好。

1 SMA 弹簧驱动器通电变形模型

形状记忆合金弹簧的加热变形原理如图 1 所示。本节基于 Clausius-Clapeyron 方程和热平衡方程建立了记忆合金弹簧变形原理模型以及通电加热升温模型,两者结合可得 SMA 弹簧电驱动变形的模型。

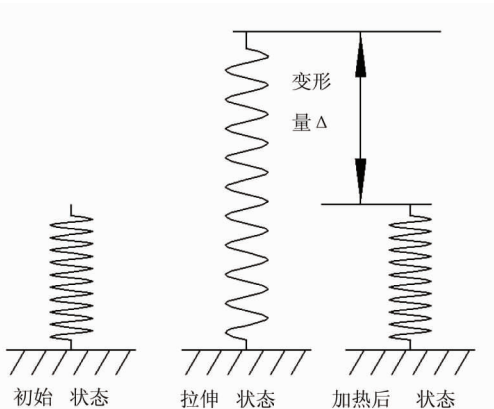


图 1 SMA 弹簧变形原理

1.1 SMA 弹簧变形原理及数学模型

假设形状记忆合金弹簧中的切应力 τ 、切应变

γ 和温度 T 之间的非线性关系为

$$\tau = \tau(\gamma, T) \quad (1)$$

式(1)在初始状态 (γ_0, T_0) 附近的二阶泰勒展开式为

$$\begin{aligned} \tau(\gamma, T) &= \tau(\gamma_0, T_0) + [(\gamma - \gamma_0) \frac{\partial}{\partial \gamma} + (T - T_0) \frac{\partial}{\partial T}] \\ &\tau(\gamma_0, T_0) + \frac{1}{2!} [(\gamma - \gamma_0) \frac{\partial}{\partial \gamma} + (T - T_0) \frac{\partial}{\partial T}]^2 \tau(\gamma_0, T_0) + \dots + \frac{1}{n!} [(\gamma - \gamma_0) \frac{\partial}{\partial \gamma} \\ &+ (T - T_0) \frac{\partial}{\partial T}]^n \tau(\gamma_0, T_0) \\ &= \tau(\gamma_0, T_0) + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \sum_{i=0}^n C_n^i \frac{\partial^n \tau(\gamma_0, T_0)}{\partial \gamma^i \partial T^{n-i}} \\ &\quad \cdot (\gamma - \gamma_0)^i (T - T_0)^{n-i} \end{aligned} \quad (2)$$

形状记忆合金变形时,遵循 Clausius-Clapeyron 方程:

$$\frac{d\tau}{dT} = \text{常数} \quad (3)$$

即应力相对于温度的变化率为常数,进而,应力相对于温度的高阶导数为零,即:

$$\frac{d^n \tau}{dT^n} = 0, \quad n \geq 2 \quad (4)$$

根据式(4),式(2)可以简化为

$$\begin{aligned} \tau(\gamma, T) &= \tau(\gamma_0, T_0) + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} [(\gamma - \gamma_0)^n \frac{\partial^n \tau(\gamma_0, T_0)}{\partial \gamma^n} \\ &+ n(T - T_0)(\gamma - \gamma_0)^{n-1} \frac{\partial^n \tau(\gamma_0, T_0)}{\partial \gamma^{n-1} \partial T}] \end{aligned} \quad (5)$$

切应变 γ 可以由形变量 δ 表示。根据弹簧特性,两者之间关系为

$$\gamma = \frac{d}{n\pi D^2} \delta \quad (6)$$

其中 D 为形状记忆合金弹簧直径, d 为弹簧丝直径, n 为弹簧圈数。将式(6)带入式(5),可得

$$\begin{aligned} \tau(\gamma, T) &= \tau(\gamma_0, T_0) + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \left[\left(\frac{d}{n\pi D^2} \delta \right)^n \frac{\partial^n \tau(\gamma_0, T_0)}{\partial \gamma^n} \right. \\ &\quad \left. + n(T - T_0) \left(\frac{d}{n\pi D^2} \delta \right)^{n-1} \frac{\partial^n \tau(\gamma_0, T_0)}{\partial \gamma^{n-1} \partial T} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

根据圆柱螺旋弹簧切应力计算公式,形状记忆合金弹簧上的负载为

$$\begin{aligned} P(\delta, T) &= \frac{\pi d^3}{8D} \tau(\delta, T) \\ &= \frac{\pi d^3}{8D} \tau(\gamma_0, T_0) + \frac{\pi d^3}{8D} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \left[\left(\frac{d}{n\pi D^2} \delta \right)^n \right. \\ &\quad \left. + n(T - T_0) \left(\frac{d}{n\pi D^2} \delta \right)^{n-1} \frac{\partial^n \tau(\gamma_0, T_0)}{\partial \gamma^{n-1} \partial T} \right] \end{aligned} \tag{8}$$

对式(8)进行参数化可得:

$$\begin{aligned} P(\delta, T) &= \frac{\pi d^3}{8D} \tau(0, T_0) + A_1 \delta + B_1 (T - T_0) \\ &\quad + A_2 \delta^2 + B_2 (T - T_0) \delta \\ &\quad + A_3 \delta^3 + B_2 (T - T_0) \delta^2 \\ &\quad + A_3 \delta^3 + B_2 (T - T_0) \delta^2 + \cdots \\ &\quad + A_i \delta^i + B_i (T - T_0) \delta^{i-1} + \cdots \end{aligned} \tag{9}$$

A_i 和 B_i 为待定参数。 $i > 3$ 时,高阶项 $A_i \delta^i + B_i (T - T_0) \delta^{i-1}$ 绝对值很小,可以忽略。这样最终得到形状记忆合金弹簧变形模型为

$$\begin{aligned} P(\delta, T) &= A_1 \delta + B_1 (T - T_0) + A_2 \delta^2 \\ &\quad + B_2 (T - T_0) \delta + A_3 \delta^3 + B_3 (T - T_0) \delta^2 \end{aligned} \tag{10}$$

为了得到参数 A_i 和 B_i 的值,进行了无负载状态下的加热变形实验,得到加热时间 t 与变量 δ 的关系曲线如图 2 所示。

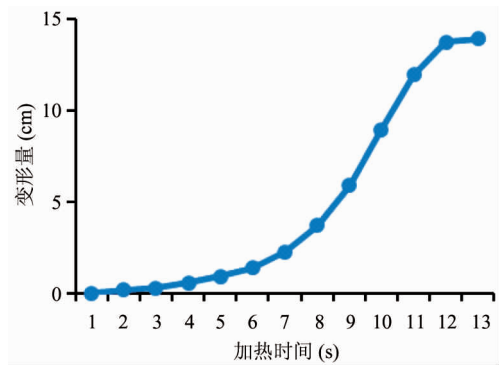


图 2 加热自由变形曲线

1.2 SMA 弹簧加热升温模型

形状记忆合金弹簧加热过程中的热平衡方程为 $U^2/R - hA_s(T - T_f) = mcdT/dt$ (11)

式中 U 为加热电压, R 为弹簧电阻, h 为热传导参数, A_s 为热交换面积, T 为温度, T_f 为环境温度, m

为弹簧质量, c 为弹簧比热容。

求解微分方程(式(11)),可得加热时间与弹簧温度的关系方程

$$T = const \times e^{-\frac{hA_s}{mc}t} + \frac{U^2}{RhA_s} + T_f \tag{12}$$

从而得加热升温曲线(图 3)。

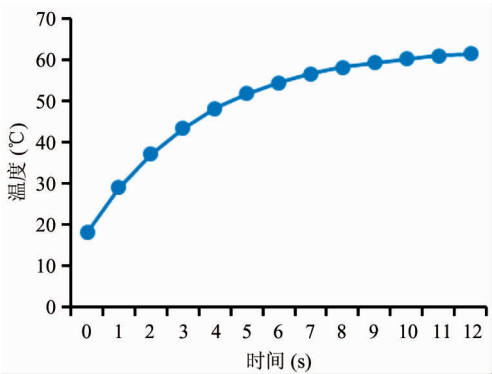


图 3 加热升温曲线

根据式(12)和已得到的 $t - \delta$ 关系曲线,可得一系列温度 T 与 δ 对应点坐标,将这些点坐标带入式(10),得到本实验中所用 SMA 弹簧驱动的参数 A_i 和 B_i ($i = 1, 2, 3$) 的值:

$$\begin{aligned} A_1 &= -3010, \quad A_2 = 20143, \quad A_3 = 9204 \\ B_1 &= 0.1979, \quad B_2 = 66.81, \quad B_3 = -485.9 \end{aligned}$$

2 实验验证

本节对 SMA 弹簧驱动通电加热变形模型进行了实验验证,并与模型仿真结果进行了比较。由于 SMA 弹簧驱动器的变形特性与弹簧本身的尺寸、SMA 材料的组成成分有关,不同弹簧的 A_i 和 B_i 参数不相同,需要重新进行实验、计算。

2.1 定长通电加热实验

将 SMA 弹簧驱动器的长度固定,对其通电加热,利用数字拉力计测量变形过程中的拉力,并通过摄像机记录驱动器的拉力随通电时间变化情况,如图 4 所示。

分别进行了驱动器长度为 120mm、150mm 和 180mm 的定长通电加热实验,实验曲线与仿真结果如图 5 所示。

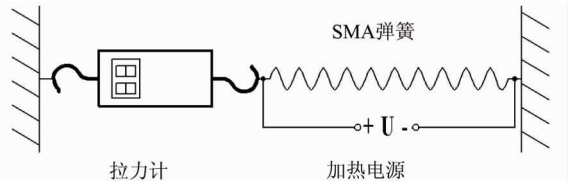
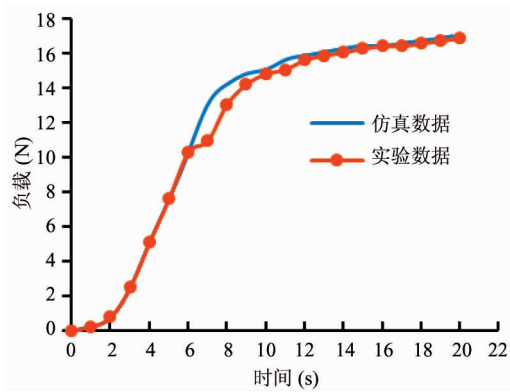
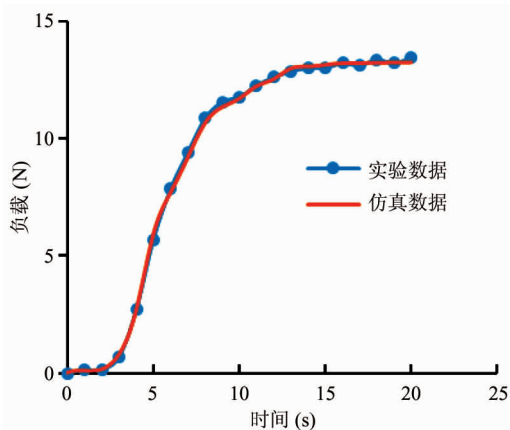


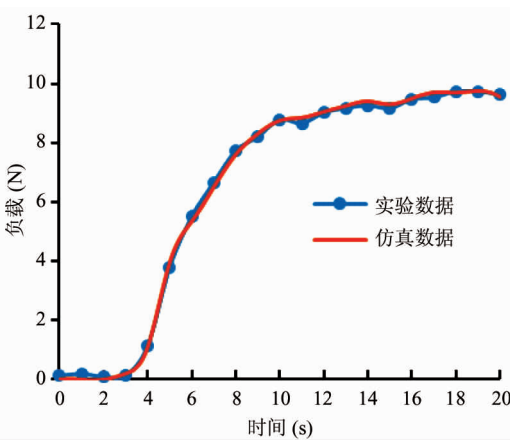
图 4 定长加热实验



(a) 180mm



(b) 150mm

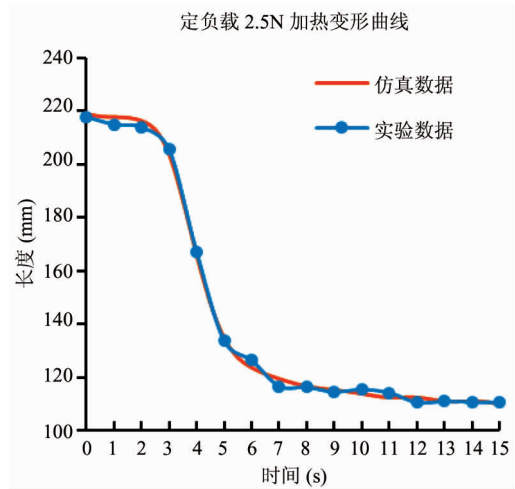


(c) 120mm

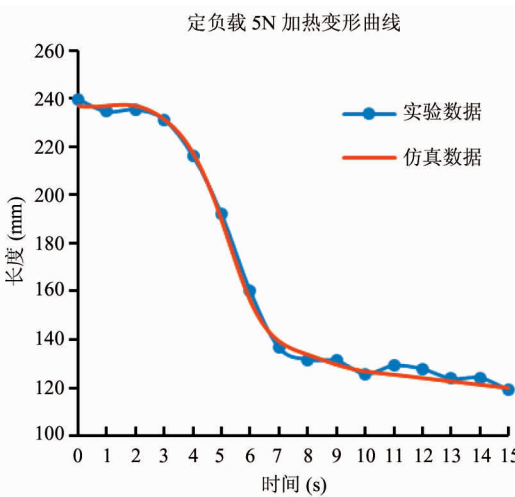
图 5 定长通电加热负载曲线

2.2 定负载通电加热实验

对 SMA 弹簧启动器施加固定负载,并使其一端固定、另一端自由移动,记录驱动器长度随通电时间变化情况。分别进行了负载为 2.5N 和 5N 的定负载通电加热实验,实验曲线与仿真结果如图 6 所示。



(a) 2.5N



(b) 5N

图 6 定负载通电加热变形曲线

可见实验结果与根据变形模型得出的仿真结果匹配较好,验证了变形模型的可行性。

3 结 论

形状记忆合金弹簧经常在软体机器人中用作驱动器。本文研究了形状记忆合金的变形特征并建立了相关模型,同时根据热平衡方程得出了加热时间

与变形量间的非线性关系曲线,并通过零负载通电加热变形实验获得了其相关参数。然后通过单一变量实验对模型的正确性进行了验证。本文中的模型能够为软体机器人中的 SMA 弹簧驱动器的控制方案建立提供参考。

参考文献

[1] Bauer S, Bauer-Gogonea S, Graz I, et al. A soft future: from robots and sensor skin to energy harvesters. *Advanced Materials*, 2014, 26(1):149-162

[2] Trimmer B. Soft robots. *Current Biology*, 2013, 23(15): R639-R641

[3] Trimmer B, Lin H, Amanda B, et al. Towards a biomorphic soft robot: design constraints and solutions. In: Proceedings of the IEEE Ras & Embs International Conference on BioRob Biomechanics, Rome, Italy, 2012. 599-605

[4] Amend J R, Brown E, Rodenberg N, et al. A positive pressure universal gripper based on the jamming of granular material. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, 28(2): 341-350

[5] Shepherd R F, Ilievski F, Choi W, et al. Multigait soft robot. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2011, 108(51): 20400-20403

[6] Margheri L, Laschi C, Mazzolai B. Soft robotic arm inspired by the octopus: I. From biological functions to artificial requirements. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2012, 7(2): 025004

[7] Mazzolai B, Margheri L, Cianchetti M, et al. Soft-robotic arm inspired by the octopus: II. From artificial requirements to innovative technological solutions. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2012, 7(2): 025005

[8] Seok S, Onal C D, Cho K J, et al. Meshworm: a peristaltic soft robot with antagonistic nickel titanium coil actuators. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(5): 1485-1497

[9] Lin H T, Leisk G G, Trimmer B. Goqbot: a caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2011, 6(2): 26007-26020

[10] Sugiyama Y, Hirai S. Crawling and jumping by a deformable robot. *International Journal of Robotics Research*, 2006, 25(5-6): 603-620

[11] 陈安明,钱学军. 形状记忆合金弹簧力学特性和数学模型的研究. *江苏机械制造与自动化*, 1999, 1: 14-16 + 23

[12] 王金辉,徐峰,阎绍泽等. SMA 弹簧驱动器驱动机理及实验. *清华大学学报(自然科学版)*, 2003, 43(2): 188-191

Research on deformation of SMA spring actuators

Xu Hongwei, Fei Yanqiong, Zhu Yuhang, Wang Xu

(Institute of Robotics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

Abstract

A deforming model of shape memory alloy (SMA) spring actuators applicable to soft robots was built with its undetermined parameters of A1, A2, A3, B1, B2 and B3 being obtained, and some experiments were performed to verify the model. Firstly, the undetermined parameter method was used to build a deforming model of SMA springs based on the Clausius-Clapeyron equation and Taylor expansion, and the nonlinear relations among SMA springs' deformation, load and temperature were described. Secondly, based on the heat balance equation, a temperature changing model of SMA springs under electric heating was built, and a curve was shown to describe the relationship between the heating time and the spring temperature. Thirdly, the deforming experiment was performed in the condition that spring is free. Lastly, the models' validity was verified through specified load experiments and specified deformation experiments. The established models were proved to be referential for building the controlling system of soft robots.

Key words: shape memory alloy (SMA), spring, deformation, spring actuator