

# 形状记忆合金变刚度软作动器设计\*

任旭, 杨书吉, 文浩, 金栋平

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

**摘要** 软体材料作动器具有良好的目标抓取适应性,为实现软作动器结构的轻量化,保证抓取与承载能力,采用形状记忆合金丝作为驱动元件,设计出一种可变刚度的软作动器。首先,基于形状记忆合金(shape memory alloy,简称 SMA)一维本构关系建立了作动器的弯曲变形力学模型;其次,通过实验对力与变形之间的关系进行了验证,弯曲变形与理论结果一致;最后,通过回弹结构的动力学设计,使得该作动器能够在恢复阶段快速回到初始形态。实验结果显示,加热用于变刚度的形状记忆合金丝可显著提升作动器的负载能力,从而达到变刚度的效果。

**关键词** 形状记忆合金;可变刚度;本构模型;软体作动器

**中图分类号** TP242;TH11

## 引言

机器人通常由刚性部件通过控制系统、驱动机构及关节等来完成各种复杂的动作<sup>[1]</sup>。为适应不同的工作环境和特定的任务需求,完全由刚性部件构建的机器人则难以胜任<sup>[2]</sup>。受到自然界生物的启发,人们越来越趋于采用具有极低刚度与高适应性的软作动器来代替刚性抓取器,如生物肌肉<sup>[3]</sup>、章鱼触手和啄木鸟的脖子<sup>[4]</sup>等。

目前,软作动器有多种驱动形式。例如,气泵软作动器通过内部气压调节实现变形并维持形状<sup>[5]</sup>;线缆驱动的软作动器是通过电机带动线缆来驱使软作动器变形<sup>[6]</sup>。然而,这类作动器需外置动力装置,不够轻便。基于电活性聚合物的作动器驱动力小、寿命短且响应时间长<sup>[7]</sup>。工业上广泛使用的压电材料也可被用于软作动器,但压电材料变形有限,同时驱动电压较高<sup>[8]</sup>。此外,形状记忆聚合物(shape memory polymer,简称 SMP)因具有变刚度的特性也被用于软作动器中,但 SMP 自身刚度较低,很难用于抓取大质量物体<sup>[9]</sup>。

作为一种智能材料,SMA 凭借超弹性、记忆效应、良好阻尼特性和耐腐蚀等性能得到广泛应用<sup>[10-11]</sup>,尤其是极高的驱动力质量比及快速响应能力使其非常适合作为软作动器的驱动元件<sup>[12-14]</sup>。潘浩等<sup>[15]</sup>利用 SMA 丝的大驱动力设计了一种可弯曲的机构用于探测领域。Li 等<sup>[16]</sup>提出通过加热固定的 SMA 丝来实现可变刚度。Rodrigue 等<sup>[17]</sup>研究了如何

利用 SMA 丝来获得较大的初始变形角度。Lee 等<sup>[18]</sup>利用 SMA 丝模拟肌腱以形成像肌肉一样的往复变形。Kim 等<sup>[19]</sup>提出利用多组 SMA 驱动器模仿鱼鳍运动的装置。Simone 等<sup>[20]</sup>利用 SMA 线束来构建柔软的机械手指,以获得更高的驱动力。Wang 等<sup>[21]</sup>在 SMA 驱动的机械手指关节处嵌入 SMP,在变形时呈现低刚度,在抓取物体后呈现高刚度。针对目前 SMA 作动器的研究,其样机或由多种驱动形式组成,或过于复杂,并且在形变恢复、提高整体结构的刚性和承载力方面缺乏相应的研究。

笔者提出一种制备简易的可变刚度软作动器,以聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane,简称 PDMS)为基质,采用嵌入式设计,确保表面被柔软的基质覆盖。作动器使用 2 根 SMA 丝,一根嵌入到聚合物基质的偏心位置以驱动作动器,另一根嵌入聚合物基质的中性层以实现可变刚度。同时,采用聚氯乙烯(polyvinyl chloride,简称 PVC)薄板提高结构的整体刚度并帮助作动器快速恢复变形。理论和实验表明,提出的 SMA 丝一维本构理论能够准确预测实际的弯曲变形,作动器恢复变形的能力较好,且通过调节刚度可以提升作动器的负载能力。

## 1 机理与模型

### 1.1 一维本构模型

采用 Brinson<sup>[22]</sup>提出的 SMA 丝一维本构力学模

\* 国家自然科学基金重点资助项目(11832005,11732006)

收稿日期:2021-07-19;修回日期:2021-09-27

型,即认为马氏体相变过程为应力引起的相变过程与温度引起的相变过程所组成,可以很好地描述低温下SMA的力学行为。

Brinson一维本构模型为

$$\sigma - \sigma_0 = E(\xi)\epsilon - E(\xi_0)\epsilon_0 + \Omega(\xi)\xi - \Omega(\xi_0)\xi_0 + \Theta(T - T_0) \quad (1)$$

其中: $\sigma, \sigma_0$ 分别为当前和初始状态应力; $E$ 为SMA弹性模量; $\epsilon, \epsilon_0$ 分别为当前和初始状态应变; $\Omega = -E\epsilon_L$ 为相变系数, $\epsilon_L$ 为最大可恢复应变; $\Theta$ 为热膨胀系数; $\xi, \xi_0$ 分别为当前和初始状态的马氏体体积分数; $T, T_0$ 分别为当前和初始状态的温度。

等温加载并考虑初始条件为 $\sigma_0 = 0, \epsilon_0 = 0, \xi_0 = 0$ 和 $T = T_0$ ,式(1)简化为

$$\sigma = E(\xi)\epsilon + \Omega(\xi)\xi \quad (2)$$

其中

$$E(\xi) = E_a - \xi(E_a - E_m) \quad (3)$$

$$\Omega(\xi) = -\epsilon_L[\xi E_m + (1 - \xi)E_a] \quad (4)$$

其中: $E_a, E_m$ 分别为奥氏体与马氏体弹性模量。

当SMA材料中奥氏体向马氏体转变时,马氏体体积分数为

$$\xi = \frac{1}{2} \cos \left[ \frac{\pi(T - M_f)}{M_s - M_f} - \frac{\pi\sigma}{C_m(M_s - M_f)} \right] + \frac{1}{2} \quad (5)$$

当SMA材料中马氏体向奥氏体转变时,马氏体体积分数为

$$\xi = \frac{1}{2} \cos \left[ \frac{\pi(T - A_f)}{A_f - A_s} - \frac{\pi\sigma}{C_a(A_f - A_s)} \right] + \frac{1}{2} \quad (6)$$

其中: $M_s, M_f$ 分别为马氏体相变的起始温度和结束温度; $A_s, A_f$ 分别为奥氏体相变的起始温度和结束温度; $C_m, C_a$ 分别为马氏体和奥氏体相变极限曲线的斜率,被用于相变曲线拟合。

通过式(2)、式(5)和式(6),并结合表1提供的SMA材料相关参数,即可获得室温下(298 K)与高温下(358 K)的一维形状记忆合金本构关系,如图1所示。

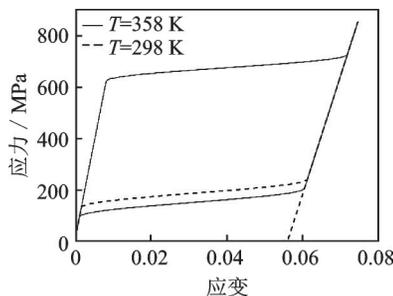


图1 形状记忆合金本构关系

Fig.1 Constitutive relationship of SMA

表1 SMA材料相关参数

Tab.1 Material parameters of SMA

参数	数值
马氏体弹性模量 $E_m$ /GPa	46
奥氏体弹性模量 $E_a$ /GPa	75
马氏体起始温度 $M_s$ /K	280
马氏体结束温度 $M_f$ /K	265
奥氏体开始温度 $A_s$ /K	340
奥氏体结束温度 $A_f$ /K	355
马氏体极限曲线斜率 $C_m$ /(MPa·K <sup>-1</sup> )	7.4
奥氏体极限曲线斜率 $C_a$ /(MPa·K <sup>-1</sup> )	7.4
最大可恢复应变 $\epsilon_L$	0.056

由图1可以看出,SMA在不同温度下产生同样应变所需要的应力是不同的。室温下,SMA受到140 MPa的应力就开始发生大的应变;高温下,则需要受到大于620 MPa应力才能发生大的应变。利用这一特性,可以通过调节SMA温度来控制其刚度水平。

### 1.2 作动器变形

作动器主体采用PDMS,内部嵌有2根SMA丝与聚氯乙烯(PVC)薄板。其中:SMA-1用于作动器驱动,并作预应变处理(室温下拉伸至最大可恢复应变状态);SMA-2用于实现可变刚度。

变刚度软作动器的横截面结构如图2所示,其中:作动器长度 $L=100$  mm,宽度 $w=15$  mm,厚度 $t=5$  mm;SMA-1直径 $d_1=0.2$  mm,SMA-2直径 $d_2=0.3$  mm;PVC板厚度 $t_{PVC}=0.8$  mm。

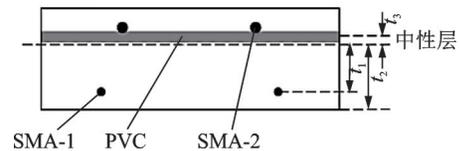


图2 变刚度软作动器的横截面结构

Fig.2 The cross-section structure of variable stiffness soft actuator

定义SMA-1与中性层距离为 $t_1$ ,作动器下表面到中性层距离为 $t_2$ ,PVC板对称面到中性层距离为 $t_3$ ,SMA-2直接铺设于PVC板上表面。由于中性层位置需计算后得到,这几个参数属于未知量。设计时可确定的量有:SMA-1到作动器下表面的垂直距离 $t_4 = t_2 - t_1 = 0.5$  mm;PVC板对称面到SMA-1丝的垂直距离 $t_5 = t_1 + t_3 = 2.4$  mm;SMA-1与SMA-2之间的垂直距离 $t_6 = 2.55$  mm。

首先,确定结构中中性层位置。根据静力学关系,横截面上的应力满足

$$\int_A \sigma dA = 0 \quad (7)$$

将式(7)展开,有

$$\int_{A_{PVC}} E_{PVC} y dA_{PVC} + \int_{A_{SMA-2}} E_a y dA_{SMA-2} + \int_{A_{PDMS}} E_{PDMS} y dA_{PDMS} = 0 \quad (8)$$

其中: $E_{PVC}$ 、 $E_a$ 和 $E_{PDMS}$ 分别为PVC板、SMA-2丝和PDMS基体的弹性模量; $A_{PVC}$ 、 $A_{SMA-2}$ 和 $A_{PDMS}$ 为相应部分的面积; $y$ 为dA到中性层的垂直距离。

弹性模量和面积由表1确定,通过式(8)可以获得结构参数 $t_1$ 、 $t_2$ 和 $t_3$ ,继而确定中性层的位置。

由于SMA-1丝是经过预处理之后嵌入的,具有初始残余应变 $\epsilon_L$ ,而同一层面的聚合物基质无应变。经加热相变后,SMA-1仍有一定应变,可以作为驱动力的来源。此时,SMA-1丝的应变为 $\epsilon_{SMA-1}$ ,故同一层面聚合物应变为

$$\epsilon_0 = (\epsilon_L - \epsilon_{SMA-1}) / (1 + \epsilon_L) \quad (9)$$

对于轴向压缩,有

$$\epsilon_{axis} (E_{PVC} A_{PVC} + E_{PDMS} A_{PDMS} + 2E_a A_{SMA-2}) = 2\sigma_{SMA-1} A_{SMA-1} \quad (10)$$

其中: $\epsilon_{axis}$ 为轴向压应变; $\sigma_{SMA-1}$ 为 $\epsilon_{SMA-1}$ 所对应的应力; $A_{SMA-1}$ 为SMA-1丝横截面积。

由于轴向压缩变形,作动器中无应力层并非纯弯曲时的中性层。在纯弯曲下,受拉力作用的一侧存在一个位置,该位置的拉应变与轴向压应变相等。设此位置到中性层的距离为 $t_0$ ,则

$$\epsilon_{axis} = 2\sigma_{SMA-1} A_{SMA-1} t_0 / W \quad (11)$$

其中: $W$ 为作动器的抗弯刚度。

$$W = E_{PVC} (I_{PVC} + t_3^2 A_{PVC}) + E_{PDMS} [I_{PDMS} + (t_2 - \frac{t}{2})^2 A_{PDMS}] + 2E_a [I_{SMA-2} + (t_3 + \frac{t_{PVC}}{2} + \frac{d_2}{2})^2 A_{SMA-2}] \quad (12)$$

其中: $I_{PVC}$ 、 $I_{PDMS}$ 和 $I_{SMA-2}$ 分别为PVC板、PDMS基质和SMA-2丝相对各自对称轴的惯性矩。

根据式(11)和式(12),可以获得零应力位置到中性层的距离 $t_0$ 。根据弯曲变形的几何特性,有

$$\epsilon_0 L = \theta (t_1 + t_0) \quad (13)$$

其中: $\theta$ 为需求解的弯曲角度。

由于 $\epsilon_0$ 未知,无法求得 $\theta$ ,需要与 $\epsilon_0$ 有关的约束条件。考虑到开始定义 $\epsilon_0$ 时是通过SMA-1处的实际应变计算得到,故通过实际变形计算得到的应变应该与 $\epsilon_0$ 相等,故

$$\epsilon_0 = \epsilon_{axis} + 2\sigma_{SMA-1} A_{SMA-1} t_1^2 / W \quad (14)$$

根据式(11)、式(13)和式(14),可以得到 $\sigma_{SMA-1}$ 和 $\epsilon_{SMA-1}$ 的关系,以及与之对应的 $\theta$ ,再通过Brinson一维本构模型获得平衡点,其对应的 $\theta$ 即为变形时的弯曲角度。SMA丝与作动器弯曲时的应力-应变曲线如图3所示,其中:实线为SMA-1丝的应力-应变关系曲线;虚线为作动器弯曲时的应力-应变曲线。两者交汇处即为平衡位置,即最大变形角度约为101°。

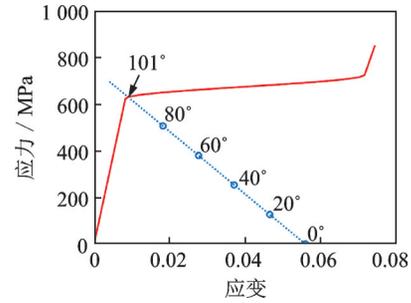


图3 SMA丝与作动器弯曲时的应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curve of SMA and actuator bending

## 2 作动器制备

为了在固化PDMS的同时固定嵌入的元件,需要相关模具。模具由3D打印制造,选用立体平版印刷(stereo lithography appearance,简称SLA)技术,材料为类ABS光敏树脂。

作动器制备流程如图4所示。为方便脱模,模具主体分为两部分,中间夹层为聚丙烯薄膜。由于PDMS材料与表面光滑的材料黏附性不高,固化后的PDMS容易脱模,如图4(a)所示。

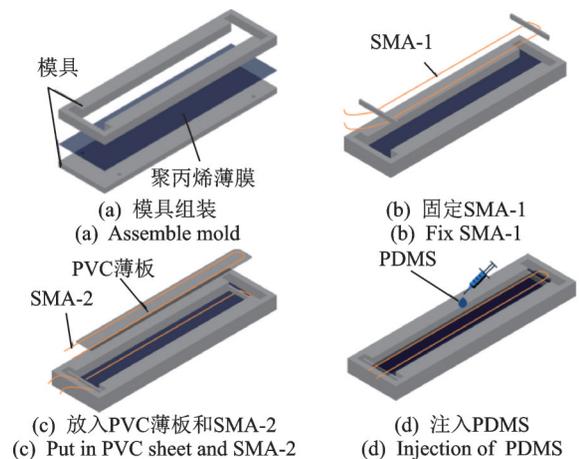


图4 作动器制备流程

Fig.4 Manufacturing process of the actuator

模具组装完成后,嵌入元件,包括SMA-1、SMA-2以及PVC薄板。为了将SMA-1精确嵌入到PDMS基质中,设计了凹槽部位,将预应变SMA-1穿过3D打印的通孔部件,嵌入到凹槽中,以实现位置固定,如图4(b)所示。

将 SMA-2 与 PVC 薄板一起放入模具中,并穿过 SMA-1 的通孔部件进行定位,如图 4(c)。

模具装配完成后,将 SMA 丝固定,再注入 PDMS。制备所用的 PDMS 材料来源于道康宁公司。将 PDMS 与催化剂以 10:1 质量比混合,混合过程尽量慢,以避免产生更多的气泡,并静止 30 min 使其其中气泡消去,再注入到树脂模具中,见图 4(d)。

最后,将注入 PDMS 的模具在 50℃ 恒温下固化 10 h。固化完成后脱模,得到所制备的软作动器。

### 3 实验结果

使用直流电源(KORAD KA3005D)对作动器的 SMA-1 进行通电加热(此时 SMA-2 不通电),加载电流从零开始逐渐增大,并在每次改变电流后给予作动器 30 s 以达到稳态,直至电流增大到作动器的弯曲角度不再发生明显变化为止。

实验表明,当加载电流到 0.8 A 时,继续增大电流,作动器弯曲角度变化不明显,此时最大弯曲角度如图 5 所示,  $\theta_{\max} = 114^\circ$ , 与理论计算结果有 13% 的误差。产生差异的原因除了模型的简化,还因为计算参数和实际参数有差异,主要是 SMA 材料给出最大可恢复应变  $\epsilon_L$  要小于实际预应变处理的值。

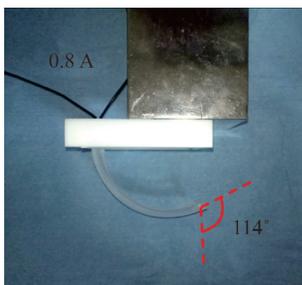


图5 作动器最大弯曲角度

Fig.5 Maximum bending angle of actuator

逐渐降低施加的电流载荷直至回到零,并在每次改变电流后给予作动器 120 s 的时间以达到稳定状态,记录作动器的弯曲角度,从而得到整个升降温过程中作动器的角度曲线。同样,为了进行对比,另一个作动器去除 PVC 薄板与 SMA-2,仅嵌入 1 根用于驱动的 SMA-1 丝(简称单 SMA 丝作动器),重复上述过程,可获得另一条曲线,即图 6 所示的作动器弯曲角度与电流的关系。可以看出,仅对 SMA-1 加热的情况下,两者在升温过程中表现出的力学性能基本一致,在降温过程中则存在较大差异。主要原因为:①制备的作动器相较于单 SMA 丝作动器,松开的响应时间更快;②制备的作动器恢复形变能力更强,有约 5° 的残余变形,而单 SMA 丝作动器有 20° 以上的残余变形。

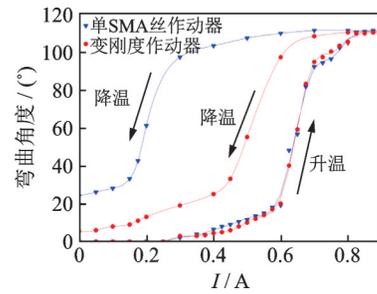


图6 作动器弯曲角度与电流的关系

Fig.6 The bending angle of actuator versus the current

在验证了作动器的变形能力后,将 3 个作动器结合起来实现物体抓取功能,其照片如图 7 所示。

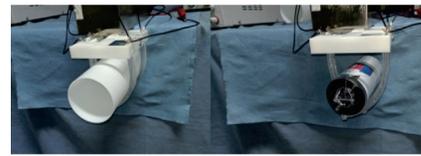


图7 3个作动器抓取物体照片

Fig.7 The photo of grabbing objects by three-actuators

为测试作动器的负载能力,这里使用霍丁格必凯公司的 S 型拉力称重传感器,通过测试作动器水平方向的拉力进行衡量。将作动器末端与拉力传感器相连,由于末端受到约束的作用,驱动作动器时会产生水平方向上的拉力。功率放大器与数据采集使用 QuantumX MX840,分析软件为 catmanAP。为同时给 SMA-1 和 SMA-2 通电,实验中使用 2 台 DC 电源独立供电(KORAD KA3005D 和 PEAKMETER PM3005B)。

给予 SMA-1 丝足以产生相变的电流,约 15 s 后,温度基本达到平稳状态,测量记录该过程的拉力数据。在预先给 SMA-2 丝通电和使用单 SMA 丝作动器的情况下,重复以上操作,共可得 3 条拉力曲线,水平拉力变化如图 8 所示。在给 SMA-1 通电后,蓝色曲线为单 SMA 丝作动器的受力曲线;红色曲线为 SMA-2 不通电情况下的受力曲线;绿色曲线为 SMA-2 通电情况下的受力曲线。可以看出,在 SMA-2 丝通电的情况下,水平拉力有约 25% 的提升,表明高温下的 SMA-2 使得作动器的承载能力更好。

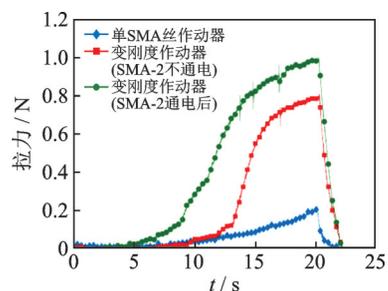


图8 水平拉力变化

Fig.8 Horizontal tension versus time

## 4 结论

1) 利用SMA丝在一定应变范围内表现出的高温时大刚度、常温时低刚度特性,将其搭载于聚合物基质中,设计制作了一种新型软作动器。

2) 制备出的新型软体作动器实现了最大变形角度为 $114^\circ$ 的大变形能力。

3) 通过嵌入PVC薄板提高了作动器的恢复形变能力,用于可变刚度的SMA-2丝,提高了作动器的负载能力。

### 参 考 文 献

- [1] SHEPHERD R F, ILIEVSKI F, CHOI W, et al. Multigait soft robot [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, 108(51):20400-20403.
- [2] LASCHI C, CIANCHETTI M. Soft robotics: new perspectives for robot bodyware and control[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2014, 2(7):3.
- [3] KIM S, LASCHI C, TRIMMER B. Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics [J]. Trends in Biotechnology, 2013, 31(5):287-294.
- [4] KIM H I, HAN M W, WEI W, et al. Design and development of bio-mimetic soft robotic hand with shape memory alloy[C]//IEEE International Conference on Robotics & Biomimetics. Zhuhai, China:IEEE, 2015.
- [5] GORISSEN B, CHISHIRO T, SHIMOMURA S, et al. Flexible pneumatic twisting actuators and their application to tilting micromirrors[J]. Sensors and Actuators A Physical, 2014, 216:426-431.
- [6] MANTI M, HASSAN T, PASSETTI G, et al. A bioinspired soft robotic gripper for adaptable and effective grasping[J]. Soft Robotics, 2015, 2(3):107-116.
- [7] CONN A T, ROSSITER J. Towards holonomic electro-elastomer actuators with six degrees of freedom [J]. Smart Materials & Structures, 2012, 21(3):035012.
- [8] USHARANI R, UMA G, UMAPATHY M, et al. Design of high output broadband piezoelectric energy harvester[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2017, 31(7):3131-3142.
- [9] YANG Y, CHEN Y. Novel design and 3D printing of variable stiffness robotic fingers based on shape memory polymer[C]//IEEE international conference on biomedical Robotics & Biomechanics. Singapore: IEEE, 2016.
- [10] QIN Y, LEI W, BO L, et al. A novel implementation of a flexible robotic fin actuated by shape memory alloy [J]. Journal of Bionic Engineering, 2012, 9(2): 156-165.
- [11] HOON J, SHINGO L, SHINJI O, et al. Development of multi-fingered prosthetic hand using shape memory alloy type artificial muscle [J]. Computer Technology and Application, 2012, 3(7):477-484.
- [12] SILVA A, SANTOS A, SOUTO C, et al. Artificial biometric finger driven by shape-memory alloy wires [J]. Artif Organs, 2013, 37(11):965-972.
- [13] ANDRIANESIS K, TZES A. Development and control of a multifunctional prosthetic hand with shape memory alloy actuators [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2015, 78(2):257-289.
- [14] JIE H, YANG J, LIU C, et al. Soft and smart modular structures actuated by shape memory alloy (SMA) wires as tentacles of soft robots[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(8):85026.
- [15] 潘浩,熊克,芦吉云,等.形状记忆合金丝驱动的可弯曲孔探仪机构设计[J].振动、测试与诊断, 2021, 41(2):236-241.
- PAN Hao, XIONG Ke, LU Jiyun, et al. Design of flexible hole detector mechanism driven by shape memory alloy wire[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(2):236-241. (in Chinese)
- [16] LI J, YIN H, TAN Y. A novel variable stiffness soft finger actuated by shape memory alloy [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2017, 53(4):727-733.
- [17] RODRIGUE H, WANG W, KIM D R, et al. Curved shape memory alloy-based soft actuators and application to soft gripper [J]. Composite Structures, 2017, 176:398-406.
- [18] LEE J H, CHUNG Y S, RODRIGUE H. Long shape memory alloy tendon-based soft robotic actuators and implementation as a soft gripper [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1):1-12.
- [19] KIM H S, HEO J K, CHOI I G, et al. Shape memory alloy driven undulatory locomotion of soft biomimetic ray robot [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2021, 16:066006.
- [20] SIMONE F, YORK A, SEELECKE S. Design and fabrication of a three-finger prosthetic hand using SMA muscle wires[C]//SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring. San Diego, United States: SPIE, 2015.
- [21] WANG W, AHN S H. Shape memory alloy-based soft gripper with variable stiffness for compliant and effective grasping [J]. Soft Robotics, 2017, 4(4):379-389.
- [22] BRINSON L C. One-dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: thermomechanical derivation with non-constant material functions and redefined martensite internal variable [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1993, 4(2):229-242.



第一作者简介:任旭,男,1994年10月生,硕士。主要研究方向为工程动力学与控制。

E-mail:renxu@nuaa.edu.cn