

自复位SMA丝驱动连续体孔探弯曲机构设计*

王宜耀, 芦吉云, 崔胜明, 左洪福

(南京航空航天大学民航学院 南京, 210016)

摘要 针对孔探仪探头自适应弯曲的需求,设计了一种由形状记忆合金(shape memory alloy, 简称SMA)人工肌肉丝驱动的自复位弯曲机构。首先,搭建了SMA丝的性能测试平台,对不同电流激励下直径为0.8 mm的SMA丝的基本性能进行了测试;其次,设计了4段弯曲机构,建立其运动学模型,计算并试验测试了1根SMA丝通电激励下各关节的弯曲角度;最后,分别对单根及2根SMA丝通电,测试对比了机构整体弯曲角度,并利用光纤3D形状传感系统实现了此类机构的形态重构。结果表明:当电流在2.1~3.3 A变化时,SMA丝的收缩率由2.01%增大到4.54%,增加了2.26倍,在3.3 A电流下SMA丝的恢复应力为200 N;各关节弯曲角度的试验结果与理论值吻合较好;2根SMA丝通电下的机构整体弯曲角度最大可达114°,远大于单根丝的65°,具有良好的实用性。

关键词 孔探仪;自复位弯曲机构;动力学分析;形状记忆合金驱动

中图分类号 TH122

引言

航空发动机作为飞机飞行的动力来源,是保障飞机平稳飞行的关键。航空发动机内部结构复杂^[1],且长期处于高温、高压等恶劣条件下^[2],发动机内部容易发生故障^[3]。因此,对航空发动机内部采用合理、高效的探测手段十分必要。目前,发动机原位检修主要依赖孔探检测法,即利用工业内窥镜进行无损探伤,探头通过检修孔由导管引导检测发动机内部故障。对于压气机和涡轮转子叶片的损伤检测,需要配合转动人员协调穿绕探头。为了减少图像传感器磨损,探头需弯曲120°以上,这种情况下引导管柔性不足,可达性差,维修效率低下^[4]。针对这一问题,日本奥林巴斯(Olympus)和美国韦林(Everest)研制出智能孔探设备,利用伺服电机驱动钨丝,控制探头实现90°以上弯曲。

目前,基于柔性机器人^[5]的孔探检测法被广泛应用。相比于刚性机器人其可达性较好^[6],能够适应比较复杂的外部环境。由于发动机内部结构复杂,为了减少图像传感器的磨损,孔探仪探头的导向角度需要达到90°以上。孔探机器人的核心元件是弯曲关节,可以在弯曲关节中空部分放置高清摄像机镜头进行内部探伤^[7]。

针对连续体机器人的设计,国内外学者利用气

体、形状记忆合金和压电等多种驱动方式来实现机器人的运动,而采用SMA驱动具有结构简单、体积小、高功率密度以及驱动力大等优点^[8],因此得到了广泛应用。杭观荣等^[9]利用仿生学原理,设计了一款仿乌贼鳍推进器,采用长度为100 mm、直径为0.2 mm的SMA丝模拟乌贼的鳍结构,利用脉冲信号驱动SMA丝,实现了110°的大角度弯曲,这表明SMA丝具有良好的收缩特性。Almubarak等^[10]设计了一款八触手水母机器人,利用直径为0.127 mm、长度为95 mm的SMA丝驱动水母伞状体进行收缩与扩张,水母伞状体可产生20°的弯曲变形,实现了多方向游动。王扬威等^[11]利用直径为0.3 mm、长度为250 mm的SMA丝作为机械臂的驱动器,实现机械臂的水下弯曲,获得的最大弯曲角度为60°。Muralidharan等^[12]利用线圈直径为5.69 mm的SMA弹簧研制了一款机器鱼,在水中鱼尾最大摆动角度为50°。夏期荣等^[13]利用直径为0.15 mm的SMA丝设计了一款基于双向弯曲的柔性驱动器的机器鱼,驱动器每一侧均布置4路SMA丝,通过加热不同路数来实现机器鱼的摆动,摆动幅度最大为60°。上述研究通过脉宽调制(pulse width modulation, 简称PWM)技术控制SMA丝两端的电压,进而调节SMA丝的温度,令其收缩从而实现驱动机构的弯曲变形。Wang等^[14]利用4组纵向分布的直径为0.5 mm、长度为460 mm的SMA丝设计了

* 国家自然科学基金资助项目(U1933202);南京航空航天大学创新计划资助项目(xcxjh20210714)

收稿日期:2022-07-16;修回日期:2022-09-03

一款仿生物脊柱柔性机械臂,通过对 SMA 丝施加预拉力,SMA 丝伸长 4.8% 后加载电压,SMA 丝受热收缩驱动获得最大弯曲角度为 35°。潘浩等^[15]利用球轴承和弯曲弹簧结合双程 SMA 丝设计了一种可自主弯曲的孔探机构,试验发现直径为 0.5 mm 的 SMA 丝在电流激励下能够产生稳定收缩,最大收缩率为 4.02%,相变恢复力为 83 N,基于此设计了包括球轴承、SMA 丝、弯曲弹簧(内径为 9 mm)和基座的弯曲机构,在长度为 100 mm 的单根 SMA 丝驱动下机构的最大弯曲角度为 22.3°。

笔者提出一种自复位 SMA 人工肌肉丝驱动连续体机器人设计方法,首先,利用 SMA 超弹性杆作为刚柔并济的支撑结构,实现了连续体机构的大角度弯曲;其次,考虑了 SMA 人工肌肉丝在不同电流下的收缩行为与恢复应力,揭示了电流与机构弯曲角度之间的规律;最后,采用光纤 3D 形状传感器感知机构变形时的位置状态,实现了机构的弯曲形态重构。

1 结构设计

笔者设计的弯曲机构共由 4 段弯曲关节组成,其模型如图 1 所示。弯曲关节是由 5 个不锈钢圆盘与 SMA 超弹性杆构成,由于视频工业内窥镜探头直径一般在 2.4~20 mm 之间,因此不锈钢圆盘的外径设为 16 mm,内径为 9.6 mm,高度为 5 mm。Olympus 工业内窥镜利用 4 根钨丝驱动探头弯曲,本研究采用 4 根 SMA 丝的通电收缩的特性驱动整个弯曲机构的偏转。

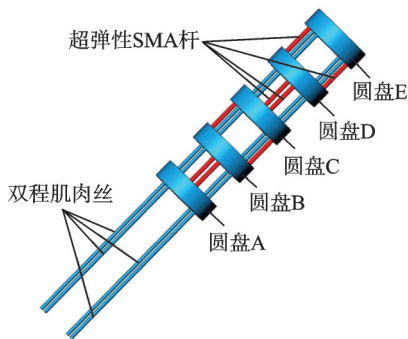


图 1 4 段弯曲关节模型

Fig.1 Four segment curved joint model

为了能够控制机构整体弯曲角度大于 90°,需合理设计超弹性支撑杆的长度。超弹性杆的形变量 ϵ_r 一般能够达到 8%,取超弹性杆的直径 d 为 1 mm,假设弯曲变形为圆弧弯曲,超弹性杆弯曲时的几何关系如图 2 所示。根据图 2 建立 ϵ_r 与关节最大弯曲角度 β_{max} 及长度 l 之间的关系

$$\epsilon_r = \frac{\Delta l}{l} = \frac{(\frac{l}{\beta_{max}} + \frac{d}{2})\beta_{max} - l}{l} = \frac{\beta_{max}}{2l} \quad (1)$$

对圆盘 A 与圆盘 B 之间的超弹性杆进行分析,若要满足整体角度 90° 的弯曲,所需要达到的最大角度 β_1 为 45°,代入式(1)进行计算得到杆的长度 l 为 5 mm,为提供足够的裕量,取 $l=l_s=8$ mm, l_s 为超弹性杆的长度。因此,连续体机构总长度为 75 mm。

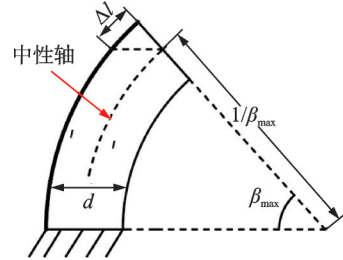


图 2 超弹性杆弯曲时的几何关系

Fig.2 Geometric relationship of bending hyperelastic bars

单个不锈钢圆盘的俯视示意图如图 3 所示。圆盘的上下左右共有 4 个通孔,4 根 SMA 肌肉丝分别从这 4 个通孔上端穿入、下端穿出,其长度为 850 mm,直径为 0.8 mm。同时,圆盘上还有 2 个分别与通孔呈 45° 夹角的半通孔,8 根直径为 1 mm、长度为 8 mm 的超弹性 SMA 杆分别插入半通孔内,用以支撑两两圆盘。

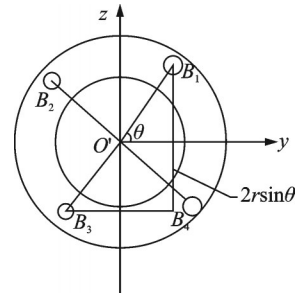


图 3 圆盘俯视图

Fig.3 Top view of the disk

2 动力学模型

忽略摩擦力等因素的影响,仅仅考虑双程 SMA 丝通电收缩导致机构的弯曲变形,关于该弯曲机构的力学模型描述如下。

通过给双程 SMA 丝施加不同大小的电流,可以得到弯曲机构在空间内的偏转状态,然后在圆盘端面以及超弹性 SMA 杆中心平面处建立空间直角坐标系,分别为 $[x_0, y_0, z_0], [x_1, y_1, z_1], [x_2, y_2, z_2], [x_3, y_3, z_3], [x_4, y_4, z_4], [x_5, y_5, z_5]$ 。4 段弯曲关节偏转状态如图 4 所示。

两两圆盘之间的夹角分别为 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 和 β_4 , 两两角度所在平面互相垂直。连接两两圆盘的SMA丝的长度分别设为 l'_i, l''_i, l'''_i 和 l_i , 支撑两两圆盘的超弹性SMA杆长度设为 l_s 。

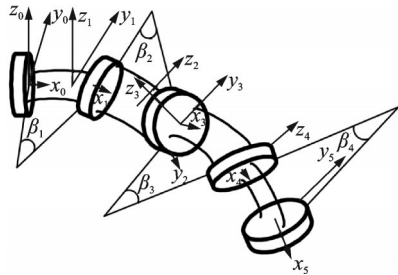


图4 4段弯曲关节偏转状态

Fig.4 The deflection state of four curved joints

通电后每段超弹性SMA杆弯曲为圆弧状, 可以近似为

$$l'_3 - l'_1 = 2(l_s - l'_1) \quad (2)$$

其中: l'_i 为连接A,B圆盘的SMA丝长度; l_s 为超弹性SMA杆的长度。

超弹性杆1截面处的示意图如图5所示。 B_1B_3 在超弹性SMA杆弯曲平面上的投影可以表示为

$$m_{B_1B_3} = 2r \sin \theta \quad (3)$$

其中: r 为超弹性SMA杆所在半通孔的圆心到圆盘圆心的距离; θ 为 B_1B_3 与 y 的夹角。

由圆环A,B之间的超弹性SMA杆1的弯曲截面结合式(2)、式(3)和图5中的三角函数关系可以得到

$$\begin{cases} l_s - l'_1 = 2l_d = m_{B_1B_3} \sin(\beta_1/2) = 2r \sin \theta \sin(\beta_1/2) \\ l_s - l'_2 = m_{B_2B_4} \sin(\beta_1/2) = 2r \cos \theta \sin(\beta_1/2) \end{cases} \quad (4)$$

由圆环B,C之间的超弹性SMA杆2的弯曲截面可以推导出

$$\begin{cases} l_s - l''_1 = 2r \cos \theta \sin(\beta_2/2) \\ l_s - l''_2 = 2r \sin \theta \sin(\beta_2/2) \end{cases} \quad (5)$$

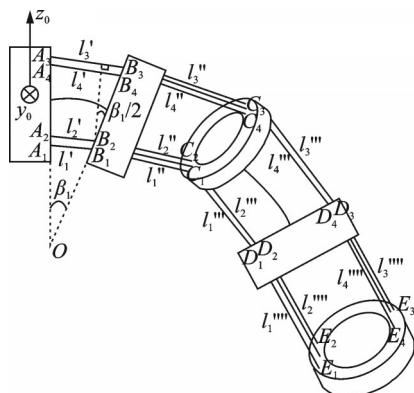


图5 超弹性杆1截面处的示意图

Fig.5 Schematic diagram at cross section of hyperelastic rod 1

由于 $l_i = l'_i + l''_i$, 对上述等式进行移项、合并操作后可以得到

$$\begin{cases} 2l_s - l_1 = 2r \sin \theta \sin(\beta_1/2) + 2r \cos \theta \sin(\beta_2/2) \\ 2l_s - l_2 = 2r \cos \theta \sin(\beta_1/2) + 2r \sin \theta \sin(\beta_2/2) \end{cases} \quad (6)$$

根据上述方程组可以反解出相应的弯曲角度为

$$\begin{cases} \beta_1 = 2 \sin^{-1} \left(\frac{2l_s(\sin \theta - \cos \theta) - l_1 \sin \theta + l_2 \cos \theta}{2r(\sin^2 \theta - \cos^2 \theta)} \right) \\ \beta_2 = 2 \sin^{-1} \left(\frac{2l_s(\sin \theta - \cos \theta) + l_1 \cos \theta - l_2 \sin \theta}{2r(\sin^2 \theta - \cos^2 \theta)} \right) \end{cases} \quad (7)$$

当 $l_i = l'_i + l''_i$ 时, 同理可推导得出 β_3, β_4 的理论计算公式为

$$\begin{cases} \beta_3 = 2 \sin^{-1} \left(\frac{2l_s(\sin \theta - \cos \theta) - l_1 \sin \theta + l_2 \cos \theta}{2r(\sin^2 \theta - \cos^2 \theta)} \right) \\ \beta_4 = 2 \sin^{-1} \left(\frac{2l_s(\sin \theta - \cos \theta) + l_1 \cos \theta - l_2 \sin \theta}{2r(\sin^2 \theta - \cos^2 \theta)} \right) \end{cases} \quad (8)$$

3 双程SMA丝的基本特性

为了测试直径为0.8 mm的SMA肌肉丝的基本力学性能, 搭建了如图6所示的SMA丝性能测试平台。SMA肌肉丝的上下两端通过拉伸试验机的夹具固定并保持竖直。万能拉伸试验机型号为INSTRON 3343B11502, 采用4通道实时数据显示, 试验速度范围为0.05~1 000 mm/min。在此试验条件下测试了SMA丝的收缩率与恢复应力。

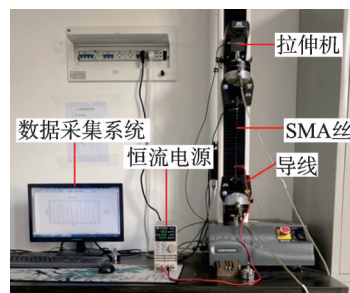


图6 SMA丝性能测试平台

Fig.6 SMA wire performance test platform

在拉伸试验机自带的软件中设置预载荷5 N, 每次保持待测SMA丝的长度不变(230 mm), 然后通过导线与恒流电源吉时利2281S-20-6连接, 分别测试了2.1~3.3 A电流条件下SMA丝的收缩率。电流-收缩率曲线如图7所示。可以看出, 随着电流的增大, 收缩率在不断增加, 最大收缩率为4.54%。

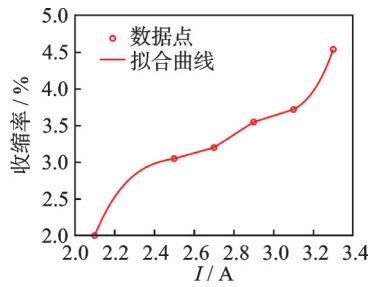


图 7 电流-收缩率曲线

Fig.7 Current-shrinkage curve

以电流 3.1 A 为例,给出 5 个周期内时间-位移曲线图,如图 8 所示。可以看出,每次收缩和恢复的位移处于 -8~0 mm 之间,具有较好的稳定性和重复性。3.3 A 下 SMA 丝的恢复应力如图 9 所示,可知最大恢复应力为 200 N。

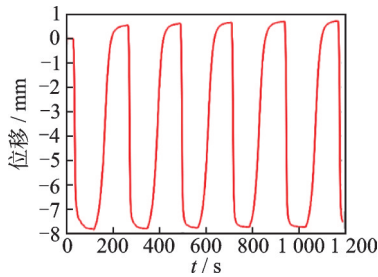


图 8 时间-位移曲线

Fig.8 Time-displacement curve

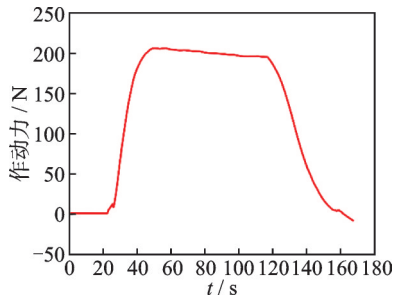


图 9 3.3 A 下 SMA 丝的恢复应力

Fig.9 Restoring force of SMA wire at 3.3 A

4 试验研究

4.1 弯曲机构动力学试验

为了测量 SMA 丝在通电时各个圆盘之间的夹角和整体弯曲角度,搭建了如图 10 所示的弯曲关节角度测试系统。SMA 丝上下端利用固定装置进行固定,保持整根 SMA 丝竖直。弯曲机构底部的圆盘嵌入基座里面,基座固定于光学平台上。

对单根 SMA 丝加载不同电流,第 2、第 4 段关节偏转角度分别如图 11,12 所示。其中:红色折线图代表待测角度的试验值;蓝色折线图代表待测角度的理论值。

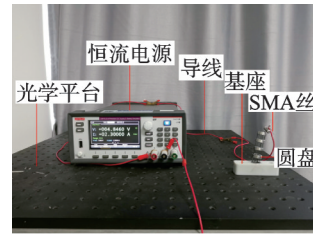


图 10 弯曲关节角度测试系统

Fig.10 Bend joint angle test system

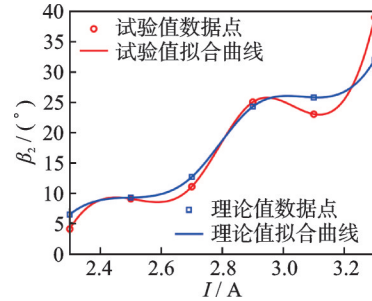


图 11 第 2 段关节偏转角度

Fig.11 Angle of the second joint

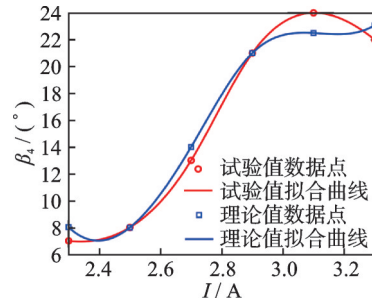


图 12 第 4 段关节偏转角度

Fig.12 Angle of the fourth joint

由图 11,12 可以看出: β_2 和 β_4 的试验值和理论值都随着电流的增加而逐渐增大,并且变化趋势也大致相同;当电流为 3.3 A 时, β_2 的理论值为 32° ,试验值为 39° ,两者相差 7° ; β_4 的理论值为 23° ,试验值为 22° ,两者相差 1° ,试验值与理论值基本吻合。对比试验结果发现,理论值大于试验值,这是由于在试验过程中角度的测量存在误差。继续对单根丝和 2 根丝通电整体机构弯曲角度进行了测量,分别如图 13,14 所示。

由图 13 可以看出:当激励电流为 2.3 A 时,弯曲

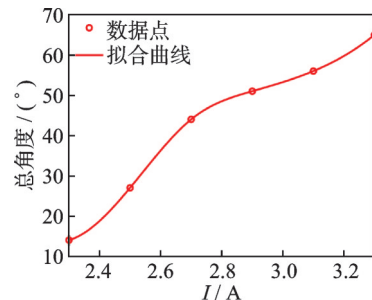


图 13 单根丝通电整体机构弯曲角度

Fig.13 Overall angle diagram of a wire energized

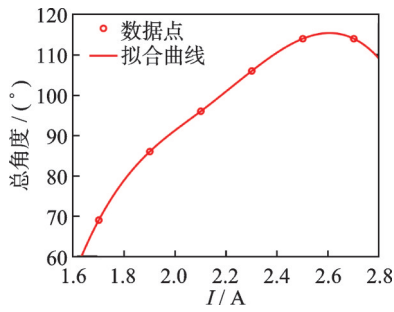


图14 2根丝通电整体机构弯曲角度

Fig.14 Overall angle diagram of two wires energized

机构整体偏转角度为14°;随着电流的增加,机构的偏转角度急剧增加;电流增加至3.3 A时,偏转角度达到了最大值65°。

由图14可以看出:机构的整体角度随着电流的增大逐渐增加,在电流为1.7 A时,总体角度为69°,超过了单根丝作用下机构的最大偏转角度;当电流增大到2.5 A时,机构整体偏转角度达到了114°;随后继续增加电流,偏转角度保持不变。

4.2 形态重构试验

为了获得连续体弯曲机构通电后的形态,搭建了3D形状传感试验系统和形态重构试验系统,分别如图15,16所示。将毛细软管对称粘贴于5个圆盘两侧外表面,在弯曲机构上端形成一个圆弧状的软管回路,将多芯螺旋光纤传感器的一端穿入毛细软管中,初始状态下圆弧段下方75 mm线段表示连续体机构所在区域,光纤传感器的另一端则通过光频域反射系统(optical frequency domain reflectometry,

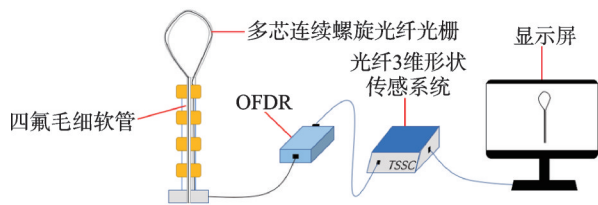


图15 3D形状传感试验系统

Fig.15 3D shape sensing experiment system

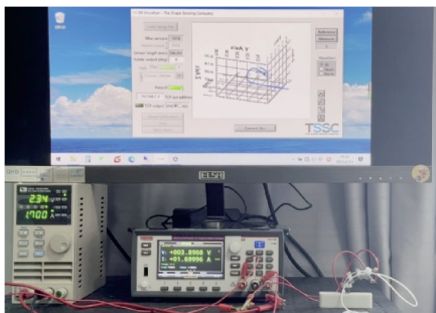


图16 形态重构试验系统

Fig.16 Morphological reconstruction experiment system

简称 OFDR)与3D 光纤形状传感系统(the shape sensing company, 简称 TSSC)相连接。当 SMA 丝在电流激励下,机构产生弯曲与扭转变形,与其相连的多芯螺旋光纤随之变形,由此获得连续体机构的弯曲变化形态。

对2根 SMA 丝同时施加 1.7 A 电流时,机构的偏转形态如图17所示。通过对比发现:蓝色曲线长度小于红色曲线,该连续体机构产生了压缩变形,表明 SMA 丝通电收缩时超弹性杆产生了压缩;同时曲线由竖直状态发生了弯曲和扭转,表明 SMA 丝驱动整个机构产生了弯曲。机构变形前曲线起始坐标为 A (0.024, 0.233, 0), 终点坐标为 B (0.141, 0.258, 0.080); 机构变形后曲线起始坐标为 A' (0.019, 0.230, 0.002), 终点坐标为 B' (0.131, 0.225, 0.050)。机构整体的弯曲角度为 65°, 与实测角度差别不大,证明了采用 3D 光纤形状传感系统可以对弯曲机构进行形态重构。

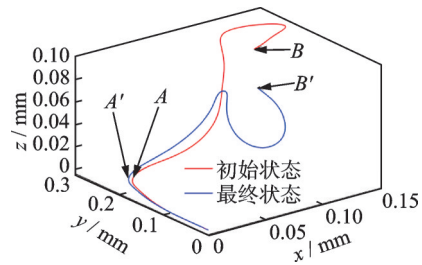


图17 施加1.7 A 电流时机构的偏转形态

Fig.17 Deflection morphology of mechanism at 1.7 A

5 结论

1) 设计了一种由 SMA 人工肌肉丝驱动的自复位连续体弯曲机构,搭建了 SMA 丝性能测试平台,对不同电流激励下直径为 0.8 mm 的 SMA 丝的性能进行了测试。当电流在 2.1~3.3 A 变化时,SMA 丝的收缩率由 2.01% 增大到 4.54%,增加了 2.26 倍,在 3.3 A 电流的激励下 SMA 丝的恢复应力为 200 N。

2) 建立了弯曲机构动力学模型,论证了超弹性杆长度的设计,计算了弯曲角度的理论值,并对机构在电流激励下产生的弯曲角度进行了试验,证明了理论模型的可靠性。

3) 通过对 SMA 丝进行电流激励,使连续体机构发生弯曲。3.3 A 电流激励下,单根丝驱动机构的最大弯曲角度为 65°;2.5 A 电流激励下,2根丝驱动机构的最大弯曲角度为 114°,且电流继续增大,最大弯曲角度不变。因此,电流 2.5 A 是激励的临界值。利用 3D 光纤形状传感技术对此类弯曲机构进行了形态重构,相关研究具有实用性。

4) 对SMA人工肌肉丝驱动的自复位连续体弯曲机构进行了研究,未来可以用柔性材料制成的镂空管包裹圆盘外侧,能够更好地保护内部机构,同时也能减少机构因自重导致的整体试验角度测量误差。在SMA丝的首尾处使用轻质固定装置可以提高角度测量的精度。目前设计的自复位弯曲机构是在单根和2根丝驱动下进行的,未来可以将多根丝同时通电以提升自复位效率。

参 考 文 献

- [1] LI Z L, SHI D Q, LI S L, et al. A systematical weight function modified critical distance method to estimate the creep-fatigue life of geometrically different structures [J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 126: 6-19.
- [2] 曹隽, 李东旭. 航空发动机维修中孔探技术的应用探讨[J]. *内燃机与配件*, 2021(23): 148-149.
CAO Juan, LI Dongxu. Application of borescope technology in aero-engine maintenance[J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2021(23): 148-149.(in Chinese)
- [3] 李东辉, 喻甲其, 杨梅. 航空发动机故障诊断与研究[J]. *设备管理与维修*, 2022(5): 148-149.
LI Donghui, YU Jiaqi, YANG Mei. Diagnosis and research of aircraft engine faults [J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2022(5): 148-149.(in Chinese)
- [4] 孙浩伟. 工业内窥镜在CFM56型民用航空发动机维修中的应用[J]. *科技资讯*, 2019, 17(19): 77-78.
SUN Haowei. Application of Industrial endoscope in maintenance of CFM56 civil aero engine [J]. *Science & Technology Information*, 2019, 17(19): 77-78.(in Chinese)
- [5] 毛婷, 彭瀚旻, 查泽琳, 等. 形状记忆合金驱动连续跳跃柔性机器人[J]. *振动、测试与诊断*, 2021, 41(3): 447-452.
MAO Ting, PENG Hanmin, ZHA Zelin, et al. Continuous jumping soft robot driven by shape memory alloy [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2021, 41(3): 447-452.(in Chinese)
- [6] BABU S P M, SADEGHI A, MONDINI A, et al. Antagonistic pneumatic actuators with variable stiffness for soft robotic applications[C]//2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). Seoul, Korea (South): IEEE, 2019: 283-288.
- [7] BARAKAT M T, GIROTRA M, BANERJEE S. Initial application of deep learning to borescope detection of endoscope working channel damage and residue[J]. *Endoscopy International Open*, 2022, 10(1): E112-E118.
- [8] BASILIO S J M, CUNHA M F, EMILIAVACA A, et al. A compact rotary motor actuated by shape memory alloy mini springs[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2020, 31(15): 1808-1820.
- [9] 杭观荣, 王振龙, 王扬威, 等. 肌肉性静水骨骼原理的仿乌贼鳍推进器[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2009, 41(11): 59-64.
HANG Guanrong, WANG Zhenlong, WANG Yangwei, et al. Squid fin-like propeller based on the principle of muscular hydrostat [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2009, 41(11): 59-64.(in Chinese)
- [10] ALMUBARAK Y, PUNNOOSE M, MALY N X, et al. KryptoJelly: a jellyfish robot with confined, adjustable pre-stress, and easily replaceable shape memory alloy NiTi actuators [J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(7): 075011.
- [11] 王扬威, 兰博文, 刘凯, 等. 形状记忆合金丝驱动的柔性机械臂建模与试验[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2018, 52(4): 628-634, 673.
WANG Yangwei, LAN Bowen, LIU Kai, et al. Modeling and experiment of flexible manipulator actuated by shape memory alloy wire [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2018, 52(4): 628-634, 673.(in Chinese)
- [12] MURALIDHARAN M, PALANI I A. Development of subcarangiform bionic robotic fish propelled by shape memory alloy actuators [J]. *Defence Science Journal*, 2021, 71(1): 94-101.
- [13] 夏期荣, 董二宝, 杨杰. 基于SMA柔性驱动器的机器鱼设计与试验[J]. *新技术新工艺*, 2018(8): 17-21.
XIA Qirong, DONG Erbao, YANG Jie. Design and experiment of robotic fish based on SMA flexible actuators [J]. *New Technology & New Process*, 2018(8): 17-21.(in Chinese)
- [14] WANG S, ZHU Q, XIONG R, et al. Flexible robotic spine actuated by shape memory alloy [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2014, 11(4): 56.
- [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. Mechanism design of bendable pore-probe driven by shape memory alloy wire [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2021, 41(2): 236-241.(in Chinese)



第一作者简介:王宜耀,男,1996年10月生,硕士生。主要研究方向为测试计量技术及仪器。
E-mail:wyy3975@163.com

通信作者简介:芦吉云,女,1980年4月生,博士、讲师。主要研究方向为面向飞机维护的传感与驱动技术。
E-mail:lujiyun@nuaa.edu.cn