

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。

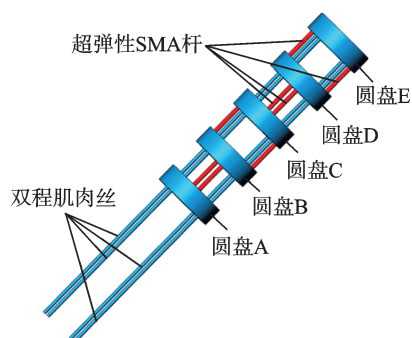


图1 4段弯曲关节模型

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 $\beta_{\max}$ 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。

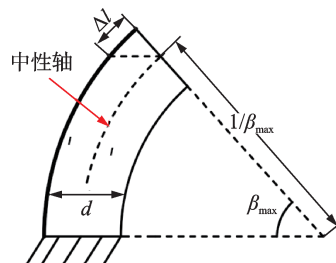


图2 超弹性杆弯曲时的几何关系

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。

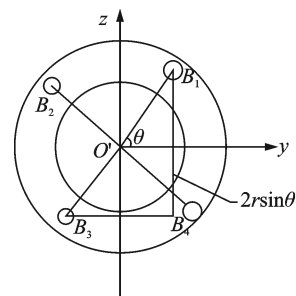


图3 圆盘俯视图

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'_1, l'_2, l'_3 和 l'_4 , 支撑两两圆盘的超弹性SMA杆长度设为 l_s 。

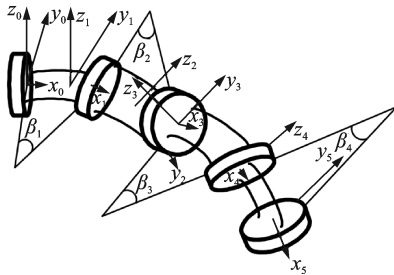


图4 4段弯曲关节偏转状态

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

$$\begin{cases} l_s - l'_1 = 2l_d = m_{B_1B_3} \sin(\beta_1/2) = 2r \sin \theta \sin(\beta_1/2) \\ l_s - l'_2 = m_{B_1B_4} \sin(\beta_1/2) = 2r \cos \theta \sin(\beta_1/2) \end{cases} \quad (4)$$

由圆环B,C之间的超弹性SMA杆2的弯曲截面可以推导出

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

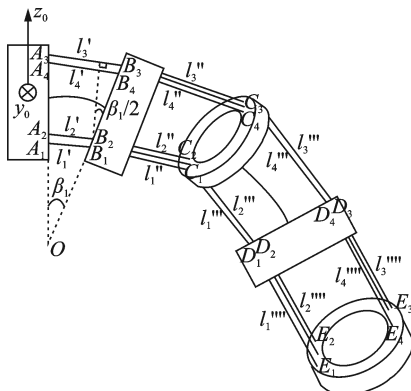


图5 超弹性杆1截面处的示意图

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。

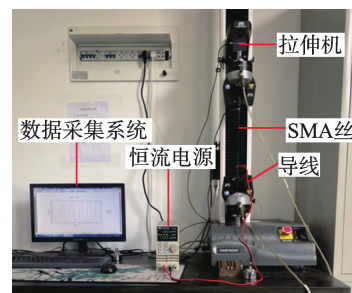


图6 SMA丝性能测试平台

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%。

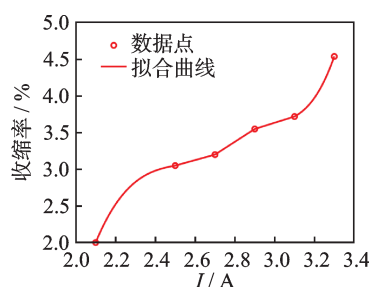


图7 电流-收缩率曲线

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 $-8 \sim 0$ 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。

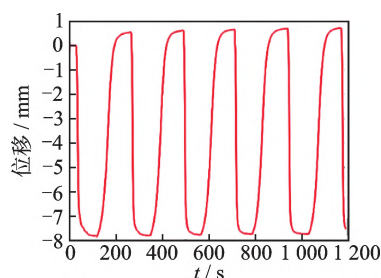


图8 时间-位移曲线

Fig.8 Time-displacement curve

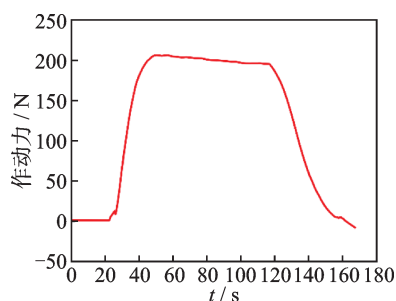


图9 3.3 A 下 SMA 丝的恢复应力

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。

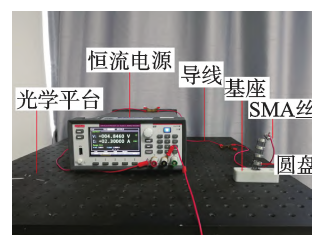


图10 弯曲关节角度测试系统

Fig.10 Bend joint angle test system

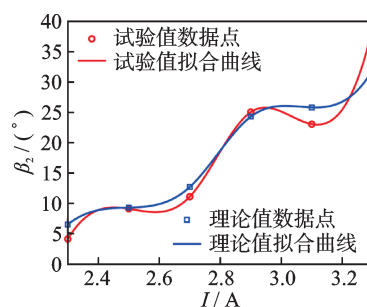


图11 第2段关节偏转角度

Fig.11 Angle of the second joint

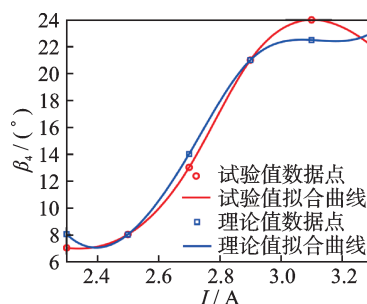


图12 第4段关节偏转角度

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

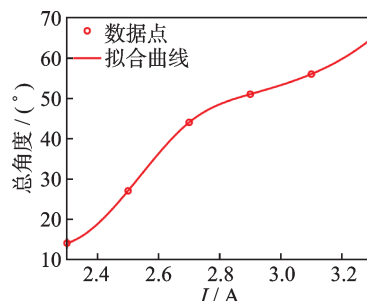


图13 单根丝通电整体机构弯曲角度

Fig.13 Overall angle diagram of a wire energized

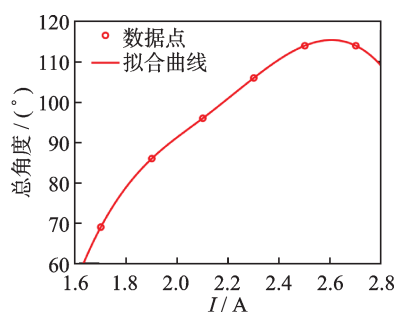


图14 2根丝通电整体机构弯曲角度

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° 。

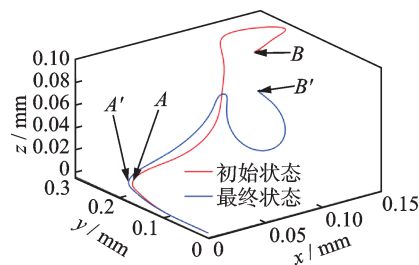
由图14可以看出:机构的整体角度随着电流的增大逐渐增加,在电流为 1.7 A 时,总体角度为 69° ,超过了单根丝作用下机构的最大偏转角度;当电流增大到 2.5 A 时,机构整体偏转角度达到了 114° ;随后继续增加电流,偏转角度保持不变。

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,

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 $2.1\sim 3.3\text{ A}$ 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。

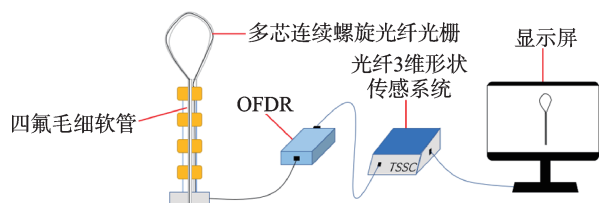


图15 3D形状传感试验系统

Fig.15 3D shape sensing experiment system

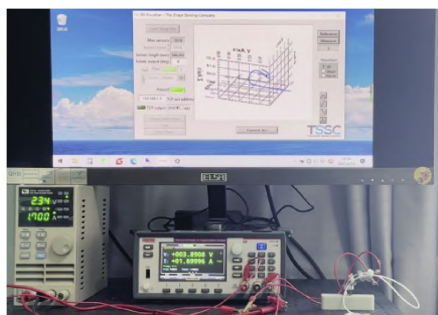


图16 形态重构试验系统

Fig.16 Morphological reconstruction experiment system

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

Advances and Challenges of Industrial Ultrasonic Phased Array Inspection and Monitoring Systems

Ji Xuanrong, DENG Qiao, SONG Yongfeng, YUAN Maodan

(State Key Laboratory of Precision Electronic Manufacturing Technology and Equipment, Guangdong University of Technology
Guangzhou, 510006, China)

Abstract Industrial phased array ultrasonic testing (PAUT) systems have played an important role in critical industries such as aerospace, special equipment manufacturing and petrochemical, effectively mitigating potential safety risks. This paper first elucidates the principles of signal acquisition and imaging of PAUT systems and introduces general phased array testing process optimization and data analysis methods. Secondly, it analyzes the recent advancements in PAUT systems, covering their applications in nonlinear ultrasonic imaging, ultrasonic guided wave, air-coupled ultrasound, electromagnetic acoustic transducer, and laser ultrasound, combining PAUT technology with structural health monitoring (SHM), its applications in real-time monitoring of additive manufacturing, low-cost monitoring and cloud monitoring are explored, with implantable phased array probes applied to smart material monitoring. Finally, it discusses the challenges faced by industrial phased array ultrasonic testing and monitoring systems and summarizes the trends towards high performance, intelligence, multi-functionality, and flexibility.

Keywords ultrasonic non-destructive testing; phased array imaging; beamforming; full matrix capture; structural health monitoring

Design of a Continuous Body Hole-Probing Bending Mechanism Driven by Self-Resetting SMA Filaments

WANG Yiyao, LU Jiyun, CUI Shengming, ZUO Hongfu

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics Nanjing, 210016, China)

Abstract A self-resetting bending mechanism driven by a shape memory alloy (SMA) artificial muscle wire is designed for the adaptive bending of hole detector probes. Firstly, the performance test platform of SMA wire is built, and the basic characteristics of SMA wire with a diameter of 0.8 mm is tested under different currents. Secondly, a 4-segment bending mechanism based on SMA wires is designed, its kinematic model is established, and the bending angle of each segment under the excitation of a single SMA wire is theoretically calculated and tested. Finally, both a single and two SMA wires are energized respectively and then the overall bending angles of the mechanism are tested and compared with its original shape. Additionally, the shape reconstruction of such mechanisms is achieved using a fiber-optic 3D shape sensing system. The results show that: the shrinkage rate of the SMA wire increases from 2.01% to 4.54%, when the current varies from 2.1 to 3.3 A, which increase by 2.26 times. And the restoring stress of the SMA wire is 200 N at a current of 3.3 A. The test results of the bending angles of the joints match well with the theoretical values. The overall bending angle of the mechanism under energization of the two SMA wires can reach up to 114°, which is much larger than the deflection angle of 65° achieved with a single wire, showing good practicality.

Keywords borescope; self-reset bending mechanism; dynamic analysis; shape memory alloy drive