

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514482

# 气动波纹管驱动器建模与变形特性的研究\*

张来喜<sup>1,2</sup>, 张晋凡<sup>1</sup>, 孟文强<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学机电工程学院 兰州 730050; 2. 成套装备智能化集成技术教育部重点实验室 兰州 730050)

**摘要:** 软体驱动器作为软体机器人的核心部件,其变形和运动特性直接决定软体机器人的工作性能。针对传统气动人工肌肉驱动气压偏高、结构可设计性受限的问题,提出了一种矩形波纹管驱动器。通过有限元仿真对比三角形、抛物线形、矩形及半圆形波纹管结构的性能,结果表明矩形结构的综合评定系数最优,兼具优良的轴向伸长能力与径向稳定性。实验验证显示,在纯气压载荷作用下,该驱动器在 60 kPa 气压时的最大伸长行程可达 53.2%,且伸长量与波纹数量呈线性关系,与输入气压呈非线性关系;进一步仿真分析表明,在气压与自由端切向载荷耦合作用下,驱动器可通过调节内部气压有效抑制弯曲变形。据此建立的等效抗弯刚度模型揭示,等效抗弯刚度随波纹数量增加而降低,随输入气压增大呈近似线性增长趋势。动力学建模方面,基于三元模型构建驱动器自由端受压缩力作用下的运动方程,采用递推最小二乘法辨识模型参数。实验结果表明,该模型在不同负载条件下均能准确预测驱动器动态响应,位移预测误差约为 2 mm。通过结构设计、仿真分析与实验验证相结合的方法,系统阐明了矩形波纹管驱动器的静动态变形规律,建立了相应的等效抗弯刚度模型与三元动力学模型,为其在软体机器人驱动与执行领域的进一步应用奠定了理论基础。

**关键词:** 气动软体驱动器;波纹管结构;伸长特性;耦合变形;三元模型

**中图分类号:** TH113 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.1599

## Research on modeling and deformation characteristics of pneumatic bellows actuators

Zhang Laixi<sup>1,2</sup>, Zhang Jinfan<sup>1</sup>, Meng Wenqiang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Key Laboratory of Intelligent Integration Technology for Complete Equipment, Ministry of Education, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** As the core component of soft robots, the deformation and motion characteristics of soft actuators directly determine the operational performance of the robots. To overcome the high driving pressure and limited structural design flexibility in traditional pneumatic artificial muscles, this study proposes a rectangular bellows actuator. Through finite element simulation comparing the performance of triangular, parabolic, rectangular, and semicircular bellows structures, the results indicate that the rectangular structure achieves the optimal comprehensive evaluation coefficient, combining excellent axial elongation capability with radial stability. Experimental verification shows that under pure pneumatic loading, the actuator can reach a maximum elongation stroke of 53.2% at 60 kPa, with the elongation exhibiting a linear relationship with the number of bellows and a nonlinear relationship with the input pressure. Further simulation analysis reveals that under the coupled action of air pressure and tangential load at the free end, the actuator can effectively suppress bending deformation by adjusting the internal pressure. An equivalent bending stiffness model is subsequently established, indicating that the stiffness decreases with increasing bellows number while exhibiting an approximately linear increase with rising internal pressure. In terms of dynamic modeling, a motion equation for the actuator under compressive load at the free end is constructed based on a three-element model, and the model parameters are identified using the recursive least squares method. Experimental results confirm that the proposed accurately predicts the dynamic response of the actuator under different load conditions, with a displacement prediction error of approximately 2 mm. Through the integration of structural design, simulation analysis, and

收稿日期:2025-09-10 Received Date: 2025-09-10

\* 基金项目:国家自然科学基金(52265013)项目资助

experimental validation, the static and dynamic deformation laws of the rectangular bellows actuator are systematically elucidated, and corresponding equivalent bending stiffness and three-element dynamic models are established, laying a theoretical foundation for its further application in driving and execution fields of soft robotics.

**Keywords:** pneumatic soft actuators; bellow structure; elongation characteristics; coupled deformation; three-element model

## 0 引 言

近些年来,得益于材料科学、生物力学、控制、机电等学科的发展进步,软体机器人得到了飞速的发展<sup>[1]</sup>。软体机器人的设计灵感来源于自然界的动植物或其器官与组织,因其主体采用软材料,可在一定的限度内任意变化形态,理论上具有无限自由度,可实现类生物体的弯曲、伸长和扭转等高冗余复杂的动作。材料和运动特性的优势使得软体机器人具有更高的柔顺性、安全性和适应性,在人机交互、医疗保健、复杂地形勘探和复杂易碎物体的抓持等方面具有无可比拟的优势<sup>[2-5]</sup>。

软体驱动器作为软体机器人的关键部件,除了为软体机器人提供动力源以外,其运动形式和变形特性直接影响着软体机器人的工作性能。近些年来软体机器人的发展与研究主要集中在新型智能材料驱动器的应用上,如磁控体<sup>[6]</sup>、水凝胶<sup>[7]</sup>、形状记忆聚合物<sup>[8-9]</sup>、电活性聚合物等<sup>[10]</sup>,基于上述材料的效应如电场、磁场、温度场和 pH 值等即可产生特定的变形。软体驱动形式上主要表现为气动、线索驱动和智能材料驱动等,其中气动的方式最早应用于软体机器人,气体驱动具有质量轻、无污染、效率高和实现简单的特点,备受广大研究者的关注,是软体机器人研究领域的热点研究方向。

具有伸缩特性的软体驱动器在软体机器人领域的应用非常广泛<sup>[11]</sup>。早在 20 世纪 50 年代,美国原子物理学家 Mckibben 就提出了最早的人工肌肉驱动器<sup>[12-13]</sup>,后续众多研究者又基于 Mckibben 型气动肌肉开发了具有多种运动形式的气动人工肌肉驱动器。Pillsbury 等<sup>[14]</sup>对比研究了收缩型和伸展性气动人工肌肉的性能,并通过实验和建模分析了其在不同气压和编织角度下的变形特性。Guan 等<sup>[15]</sup>受到象鼻肌纤维的启发,通过构建编织管与增强框架复合结构,建立了涵盖轴向、弯曲及扭转变形的统一运动学模型,并基于此提出了多自由度象鼻机械臂。Connolly 等<sup>[16]</sup>通过改变纤维角度来调控驱动器的变形行为,结合有限元仿真和实验数据发现:单一纤维角度可主导特定运动,多角度纤维组合缠绕可消除扭转或增强复合运动,组合多段这种驱动器即可执行特定任务。

上述纤维约束型软体驱动器具有结构简单,输出力大的优点,但是其外部的约束结构之间以及外部约束与橡胶管之间的摩擦会带来迟滞效应,而且外部约束结构

的嵌入精度直接影响着驱动器的变形性能。所以后续的研究者往往采用多气室的驱动器结构,Xiao 等<sup>[17]</sup>设计了一种应用于波纹管驱动器的双闭环控制策略,可实现高精度轨迹跟踪的同时具有较好的轴向伸长特性。该课题组还提出一种由软橡胶波纹管层、纤维增强层与刚性关节构成的气动波纹管驱动器(pneumatic bellows actuator, PBA),该模块化设计能实现双向大变形并输出较大驱动力,基于此构建了软爬行机器人、夹具等多种功能软体机器人原型<sup>[18]</sup>。Colucci 等<sup>[19]</sup>提出一种采用波纹管构成对抗式气室的软气动执行器,其具有双向线性运动特性,建立了分析模型并进行了实验验证,展示了在机器人自适应夹具中的应用潜力。Han 等<sup>[20]</sup>基于线性波纹结构提出了一种新型高伸缩比气动人工肌肉,具备 64.7% 收缩比和 295.2 N 的输出力。本课题组基于分段常曲率假设和 Yeoh 模型,建立了气动网络软体驱动器的弯曲理论模型。通过仿真分析了结构参数与气压的影响,进而提出了变曲率驱动器设计,并通过仿真与实验验证了模型的有效性。最后,在此基础上设计了三指软体抓手,实验展示了其良好的抓持性能<sup>[21]</sup>。

本研究基于对多种波纹形式的对比分析,设计了矩形波纹结构的波纹管驱动器,并对其在纯气压载荷下的伸长特性进行了分析。通过失蜡法制备的驱动器样机在实验研究中表现出良好的伸长性能,在 60 kPa 气压下伸长行程可达 53.2%。进一步利用有限元方法,分析了驱动器在输入气压与自由端受切向载荷耦合作用下的变形行为,结果表明在一定范围内可通过调节内部气压有效抵抗弯曲变形。最后,基于三元模型对驱动器在自由端受压负载下的动态变形特性进行建模,经参数辨识后的模型能够较准确地描述其动力学行为。

## 1 驱动器力学特性分析

硅胶作为一种常见的超弹性材料,具有良好的弹性和耐磨性,化学性质稳定。选用双组份室温硫化硅胶 YG-E630 作为波纹管驱动器的制作材料,其邵氏硬度为 30。但是,硅胶的变形呈高度非线性,不能用传统的线弹性理论去表征或描述,需采用连续介质唯象理论的超弹性本构模型进行相关的仿真与分析。超弹性材料的应变能密度函数通常表示为右 Cauchy-Green 变形张量不变量的多项式形式,即:

$$\mathbf{W} = \mathbf{W}(I_1, I_2, I_3) \quad (1)$$

式中： $I_1$ 、 $I_2$  和  $I_3$  为应变张量不变量，无量纲，其表达式分别为：

$$\begin{cases} I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 = \lambda_1^2\lambda_2^2 + \lambda_2^2\lambda_3^2 + \lambda_3^2\lambda_1^2 \\ I_3 = \lambda_1^2\lambda_2^2\lambda_3^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  分别为长、宽、高 3 个方向的主伸长比，且满足：

$$\lambda_i = 1 + \varepsilon_i \quad (3)$$

式中： $\varepsilon_i$  为 3 个方向的主应变。

目前对于超弹性材料使用较为广泛的应变能密度函数有 Mooney-Rivlin 模型、Neo Hookean 模型、Yeoh 模型和 Ogden 模型。超弹性材料本构模型的参数确定是一个复杂的过程，通常需要结合实验数据（材料应力-应变曲线）和数值分析来完成。采用单轴拉伸试验测定材料的应力-应变数据，其实验过程简单，而且数据直观准确便于后续分析处理。根据现行 GB/T 528—2009《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》<sup>[22]</sup> 的规定，选用 1 型哑铃状试样，其尺寸如图 1 所示。其中试验长度不得超过要求的狭窄部分长度，狭窄部分的标准厚度为  $2.0 \pm 0.2$  mm，且试样的数量不得少于 3 个。

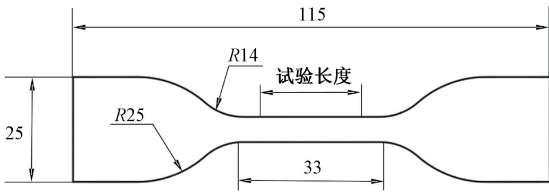


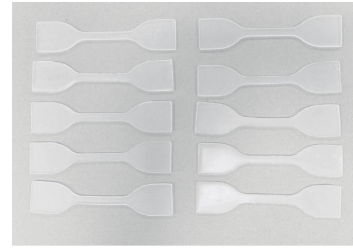
图 1 1 型哑铃状拉伸试样尺寸

Fig. 1 Dimension diagram of type 1 dumbbell-shaped tensile test specimen

利用拓竹 P1S 3D 打印机打印拉伸试样的模具并浇筑试样，如图 2 所示。其中如图 2(a) 所示为哑铃状试样模具，如图 2(b) 所示为拉伸试样样本。试样夹持器的移动速度为  $500 \pm 50$  mm/min，如果试样在狭窄部分以外断裂，另取一试样进行重复试验。试验中所选用的拉伸试验机型号为 INSTRON-5866，力传感器量程为 1 kN，如图 3 所示。



(a) 哑铃状试样模具  
(a) Bar-shaped specimen mold



(b) 拉伸试样样本  
(b) Tensile specimen sample

图 2 哑铃状试样模具和拉伸试样样本

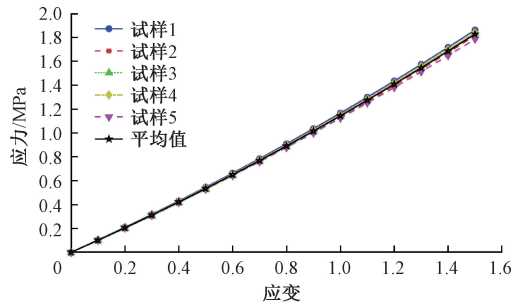
Fig. 2 Dumbbell-shaped specimen mold and tensile test specimen sample



图 3 INSTRON-5866 型拉伸试验机

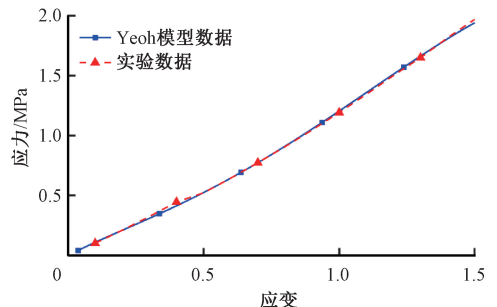
Fig. 3 INSTRON-5866 material stretching test machine

Abaqus 作为一款功能强大的有限元分析软件，其材料库不仅支持多种本构模型，还提供了试验数据的拟合评估工具，无需第三方工具即可直观比较拟合效果并选择更适合的本构模型，如图 4 所示。



(a) 应力-应变曲线对比

(a) Comparison of stress-strain curves



(b) 本构模型拟合曲线对比

(b) Comparison of constitutive model fitting curves

图 4 拉伸试样应力-应变曲线及本构模型拟合

Fig. 4 Tensile test specimen stress-strain curve and constitutive model fitting

其中图 4(a) 所示为 YG-E630 多个试样及其平均值的应力-应变曲线对比图,图 4(b) 所示为平均值与拟合 Yeoh 模型的对比图,二者吻合性较好,故选择 Yeoh 模型作为 YG-E630 硅胶材料的本构模型,用于波纹管驱动器的有限元仿真与分析。

Yeoh 模型的应变能密度函数表示为:

$$W = \sum_{i=1}^N C_{i0}(I_1 - 3)^i + \sum_{k=1}^N \frac{1}{d_k}(J - 1)^{2k} \quad (4)$$

式中:  $C_{i0}$  和  $d_k$  为材料参数;  $J$  是材料变形前后的体积比,对于硅橡胶类不可压缩材料  $J$  取 1;  $N$  代表应变能密度函数的阶数,二阶是常用的形式,即当  $N=2$  时,有:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 \quad (5)$$

根据 Abaqus 拟合出的 Yeoh 模型曲线,取  $C_{10} = 0.1937 \text{ MPa}$ ,  $C_{20} = 0.0466 \text{ MPa}$ 。

## 2 波纹管波纹形式选型与结构设计

### 2.1 基于有限元分析方法的波纹选型

波纹结构为具有波纹状的薄壳结构,其能够在波纹起伏的方向保持一定柔性的同时,在沿波纹脊谷的平行方向上具有较大的刚度。通过设计波纹结构的方向可以调控波纹管驱动器在不同方向上的刚度,从而实现在外部气压作用下产生定向膨胀。波纹管驱动器的波纹形状会直接影响其变形性能和力学特性,针对现有的波纹结构形式,选取三角形、抛物线形、矩形和半圆形结构的 4 种波纹形式作为对比研究对象。为使研究结果具备可比性,4 种形式波纹管驱动器的结构参数(如单波波长

度、波纹半径和壁厚等)均完全相同。

由于软体驱动器变形量大,材料和变形均表现出很强的非线性,解析建模存在很大的困难。Abaqus 在非线性的处理方面表现出强大的分析计算能力,故选用 Abaqus 作为仿真软件对 4 种波纹结构的驱动器变形性能进行仿真计算,为波纹管的波纹结构选型提供依据。

将不同结构形式的波纹管驱动器模型导入到 Abaqus 中,材料属性设置一致,材料参数设置为由单轴拉伸数据得到的模型参数。在驱动器的固定端施加约束,向驱动器内部气腔的所有表面施加均布压强载荷,采用六面体网格对整个驱动器进行网格划分。如图 5 所示为矩形波纹形式的驱动器有限元仿真,其中载荷加载情况如图 5(a) 所示,网格划分结果如图 5(b) 所示。

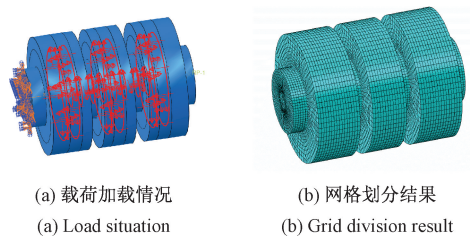


图 5 波纹管驱动器有限元仿真

Fig. 5 Finite element simulation of bellows actuators

在忽略驱动器自身重力的情况下分别施加 0 ~ 50 kPa 的气压进行仿真分析,如图 6 所示为一定气压下 4 种结构形式的驱动器位移云图对比。

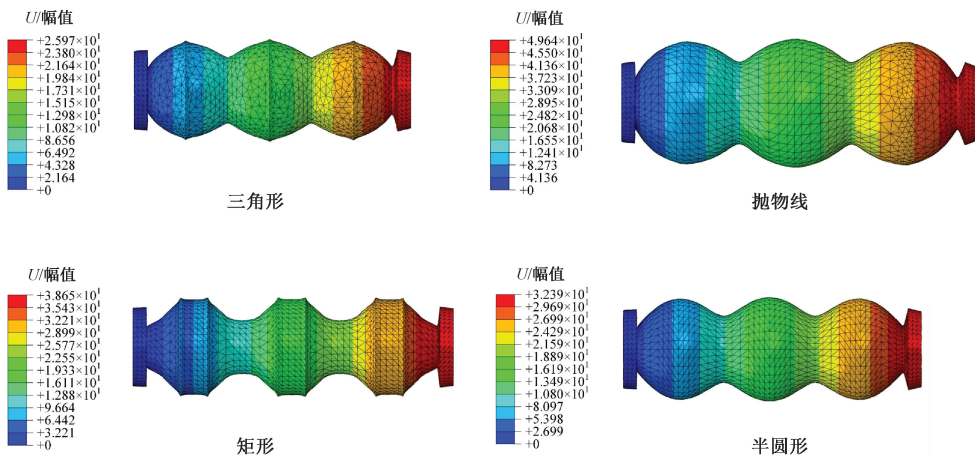


图 6 位移云图对比

Fig. 6 Comparison of displacement contour map

提取 4 种波纹形式的驱动器在不同气压下自由端中心点的位移和最大径向变形量,引入轴向伸长量和径向膨胀量两个指标,并定义综合评定系数  $C$  对驱动

器的性能进行定量评价。波纹管驱动器的变形需求主要为轴向的伸长,故径向膨胀量越小越好,定义综合评定系数  $C$  为:

$$C = \sum_{i=1}^N (W_1 \cdot e_{1i} - W_2 \cdot e_{2i}) \quad (6)$$

式中:  $e_{1i}$  和  $e_{2i}$  分别为驱动器在第  $i$  个气压节点对应的轴向伸长率和径向膨胀率;  $W_1$  和  $W_2$  分别为轴向伸长率和径向膨胀率的权数, 取值分别为 0.8 和 0.2。如果  $W_1$  取的过大, 则会导致变形后的驱动器壁厚较薄, 承载能力较差。  $e_{1i}$  和  $e_{2i}$  的表达式分别为:

$$\begin{cases} e_{1i} = \frac{l_i - l_0}{l_0} \times 100\% \\ e_{2i} = \frac{r_i - r_0}{r_0} \times 100\% \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $l_0$  为波纹管驱动器的原始长度;  $l_i$  为第  $i$  个气压节点处波纹管驱动器自由端的伸长量;  $r_0$  为波纹管驱动器初始时刻波纹半径最大处的半径值;  $r_i$  为第  $i$  个气压节点处膨胀后的半径值。

对仿真数据进行处理, 以 10 kPa 的气压变化为增量, 对 10~50 kPa 气压下的位移云图进行了统计与分析, 4 种结构形式波纹管驱动器综合评定系数结果如表 1 所示。结果显示, 矩形波纹结构的驱动器对应的综合评定系数值最大, 其值为 1.58, 具有最佳的轴向伸长性能。

表 1 4 种波纹结构形式的驱动器综合评定系数

Table 1 Comprehensive evaluation coefficient of four types of bellows actuators

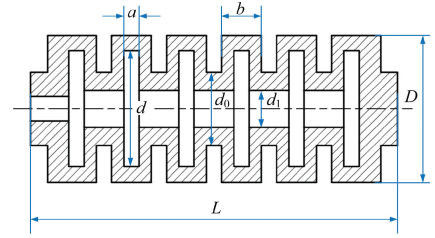
波纹类型	综合评定系数 $C$
三角形	0.645
抛物线形	1.373
矩形	1.578
半圆形	0.964

从变形机理上看, 矩形软体波纹管利用两个长侧壁纯粹弯曲作为主导变形模式, 将输入能量高效、直接地转化为轴向线性位移; 同时, 4 个直角充当了天然的刚性导向轨, 有效抵抗了侧向弯曲和屈曲失稳, 确保了运动的直线性与可预测性。相比之下, 圆形波纹管(抛物线形和半圆形)的均匀收缩机制易引发失稳且有效面积变化大, 导致输出力非线性; 而三角形波纹管则因尖角处无法避免的应力集中和“弯曲-折叠”混合变形模式, 引入了疲劳弱点并限制了行程效率。因此, 矩形结构在追求大行程、高精度和长寿命的应用中, 展现出了超越其他几何形状的综合变形特性, 实现了效率、稳定性与可控性的最佳平衡。

## 2.2 波纹管驱动器结构设计

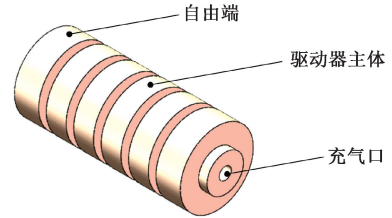
如图 7 所示为基于波纹管结构设计的以矩形为波纹形状的驱动器结构, 这种结构具有较好的伸缩特性, 而且

在径向保持相对较小的膨胀。其中, 如图 7(a) 所示为驱动器内部结构, 如图 7(b) 所示为驱动器外观形状。驱动器的结构参数如表 2 所示。



(a) 驱动器内部结构

(a) The internal structure of the actuator



(b) 驱动器的外观

(b) The appearance of the actuator

图 7 波纹管驱动器的结构

Fig. 7 Structural of the bellows actuator

表 2 波纹管驱动器的结构参数

Table 2 Geometric parameters of the bellows actuator

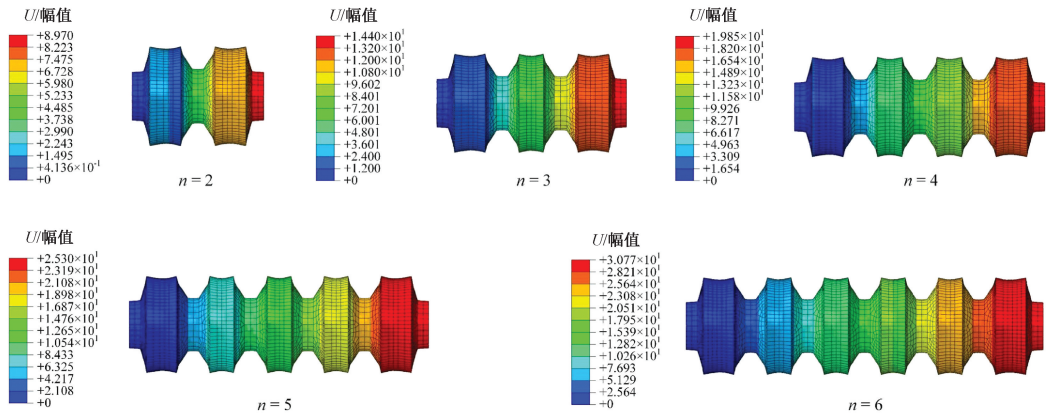
参数名称	参数	数值/mm
总长	$L$	60.0
波纹直径	$D$	24.0
气室直径	$d$	19.0
连接处直径	$d_0$	12.0
气路直径	$d_1$	6.0
气室宽度	$a$	2.5
单波纹宽度	$b$	6.5

## 3 实验验证

### 3.1 纯气压载荷下的伸长特性研究

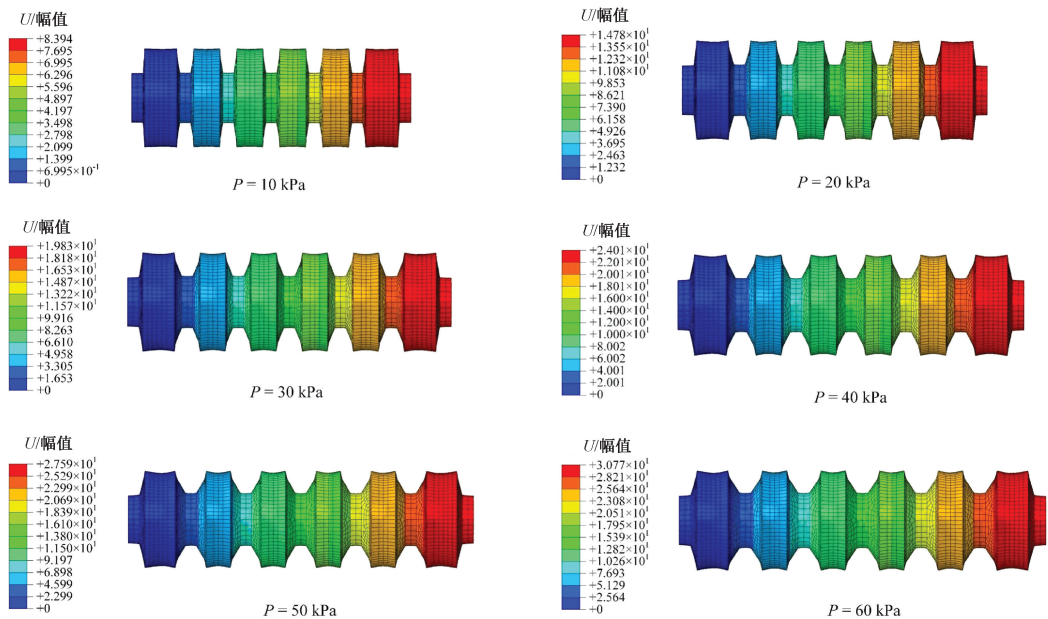
为了分析所设计驱动器的伸长特性, 研究其伸长量和输入气压与波纹数量之间的关系, 利用 Abaqus 软件对不同数量波纹的驱动器在一定气压载荷下的变形进行了仿真和分析, 其位移云图如图 8 所示。其中, 如图 8(a) 所示为确定气压载荷下不同波纹数量的驱动器位移云图, 如图 8(b) 所示为确定波纹数量下不同气压载荷下的驱动器位移云图。

不同波纹数量和输入气压对驱动器伸长特性的影



(a) 确定气压载荷下不同波纹数量的驱动器位移云图

(a) Displacement cloud diagrams of the actuators with different numbers of bellows under a fixed pressure



(b) 确定波纹数量下不同气压载荷下的驱动器位移云图

(b) Displacement cloud diagrams of the actuators under different pressure at a fixed numbers of bellows

图 8 驱动器位移云图

Fig. 8 Displacement contour map of the actuator

响如图 9 所示,其中伸长量和波纹数量的关系如图 9(a) 所示,伸长量和输入气压的关系如图 9(b) 所示。

由图 9 可知,波纹管驱动器的伸长量  $\Delta L$  和波纹数量  $n$  呈线性关系,伸长量  $\Delta L$  和输入气压  $P$  呈非线性关系。根据上述曲线中的数据进行拟合,伸长量和波纹数量及输入气压之间的关系式分别如式(8)和(9)所示。

$$\Delta L = a_1 n + b_1 \tag{8}$$

$$\Delta L = a_2 P^3 + b_2 P^2 + c_2 P + d_2 \tag{9}$$

式中: $a_1$ 、 $b_1$ 、 $a_2$ 、 $b_2$ 、 $c_2$  和  $d_2$  均为常数。

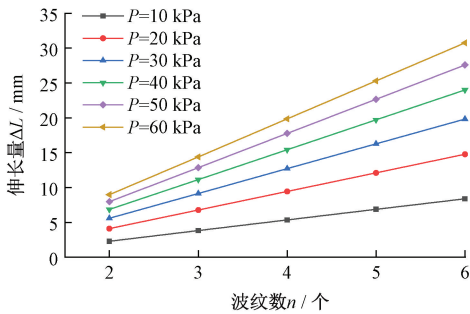
### 3.2 波纹数量的多目标优化方法(Pareto 最优分析)

为从结构层面更全面地评价不同波纹数量对性能的

影响,采用多目标优化方法对波纹数量  $n=2\sim 6$  的矩形波纹管作进一步分析。考虑到较高气压下驱动器变形显著、结构性能差异更易突显,选取 60 kPa 为典型工况,对不同波纹数量对应的轴向伸长量  $\Delta L$  和径向膨胀率  $e_2$  进行性能比较。

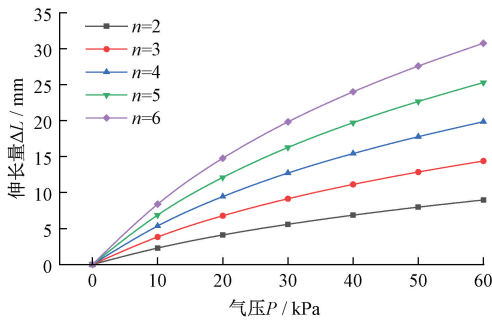
根据驱动器实际工作要求, $\Delta L$  体现轴向输出能力,应尽量增大; $e_2$  反映径向鼓胀程度,与维持直线性相关,应尽量减小。二者彼此存在一定制约,难以通过单一指标判定结构优劣。为此,基于非支配性判别构建双目标优化模型: $\max \Delta L(n)$ ,  $\min e_2(n)$ 。

在 Pareto 最优性框架下,若方案 A 在两个目标上均



(a) 伸长量和波纹数量的关系

(a) The relationship between elongation and the bellows number



(b) 伸长量和输入气压的关系

(b) The relationship between elongation and pressure

图9 波纹数量和输入气压对驱动器伸长特性的影响

Fig. 9 Influence of the bellows number and input pressure on the elongation characteristics of the actuator

不劣于方案 B,且至少在一个目标上优于 B,则认为 A 支配 B;反之,若某方案无法被其他方案同时在两个目标上超越,则该方案被视为非支配解。基于该准则对 5 种波纹数量进行判别,得到的结果如表 3 所示。

表 3 60 kPa 下不同波纹数量的多目标优化结果

Table 3 Multi-objective optimization results for different bellows numbers under 60 kPa

波纹数量( $n$ )	$\Delta L/\text{mm}$	$e_2$	是否 Pareto 最优
2	8.39	0.023 00	是
3	14.78	0.023 10	否
4	19.83	0.023 01	是
5	24.21	0.023 43	否
6	27.79	0.023 33	是

分析结果显示, $n=2$ 、 $n=4$  和  $n=6$  属于非支配解,分别对应径向稳定性较强、性能折中最优和轴向伸长量最大的 3 类代表性方案。结合实际应用中对直线运动精度和输出行程的综合要求,可将  $n=4$  和  $n=6$  视为更合理的波纹数量。该结论与前述基于加权综合评定系数  $C$  的结构判定结果一致,说明所采用的结构选型方法具有可靠性。

### 3.3 自由端受切向载荷下的耦合变形特性

为了探究波纹管驱动器在轴向伸缩变形过程中受外部干扰时的直线保持能力,对其在气压载荷与自由端切向载荷共同作用下的变形耦合特性进行了仿真分析。在纯气压载荷的基础上增加自由端受切向载荷的分析步,设置切向载荷的大小为 0.5 N,并在约束管理器中将自由端面与其几何中心设置为耦合的约束,如图 10 所示为双载荷作用下的载荷加载情况。

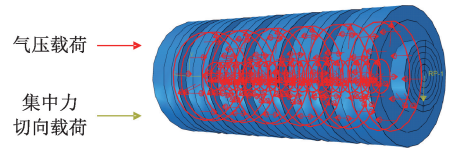


图 10 双载荷加载情况(气压和切向集中力)

Fig. 10 Two-load loading condition (air pressure and tangential concentrated force)

在上述双载荷的作用下,波纹管驱动器的变形表现为伸长和弯曲的耦合变形。在不同波纹数量及不同气压载荷条件下,提取波纹管双载荷耦合变形下的轴线。仿真结果表明:即使在较小的切向载荷下波纹管也会在伸长的同时产生较大的弯曲变形,其刚度较低。而且这种弯曲变形呈非线性,如图 11 所示为同波纹数量驱动器在不同气压载荷下的耦合变形云图。在位移云图中提取波纹管驱动器在受上述双载荷下变形后的轴线,对其耦合变形进行分析,如图 12 所示。

由材料力学的相关理论可知,悬臂梁的挠曲线方程为:

$$\frac{1}{\rho(x)} = \frac{d\theta}{ds} = -\frac{M(x)}{EI} \quad (10)$$

式中: $\rho$  为挠曲线上 $(x,y)$ 点处的曲率半径(m); $\theta$  为挠曲线上点 $(x,y)$ 的切线与  $x$  轴的夹角(rad); $s$  为挠曲线的弧长(m); $M(x)$  为弯矩( $\text{N}\cdot\text{m}$ ); $EI$  为梁的抗弯刚度。

在小变形范围内,即挠度远小于梁长时,由于  $\theta$  的数值很小, $\theta = \tan \theta = \sin \theta$ ,且  $y'^2 = \tan^2 \theta = 0$ ,水平方向的位移与挠度  $w$  相比可以略去不计。挠曲线上任一点处的曲率为:

$$\frac{1}{\rho(x)} = \pm \frac{\omega''}{[1 + (\omega')^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (11)$$

因此式(10)可简化为:

$$\frac{1}{\rho(x)} = \pm \omega'' \quad (12)$$

与小挠度变形不同的是,在梁的大挠度变形计算中, $\theta$  的数值不是一个很小的量,因此  $y' = \tan \theta$  不能忽略。由于变形较大,因此弯曲变形后水平方向的位移  $u$  也不能忽略,所以在弯矩方程  $M(x)$  中要引入水平位移带来的

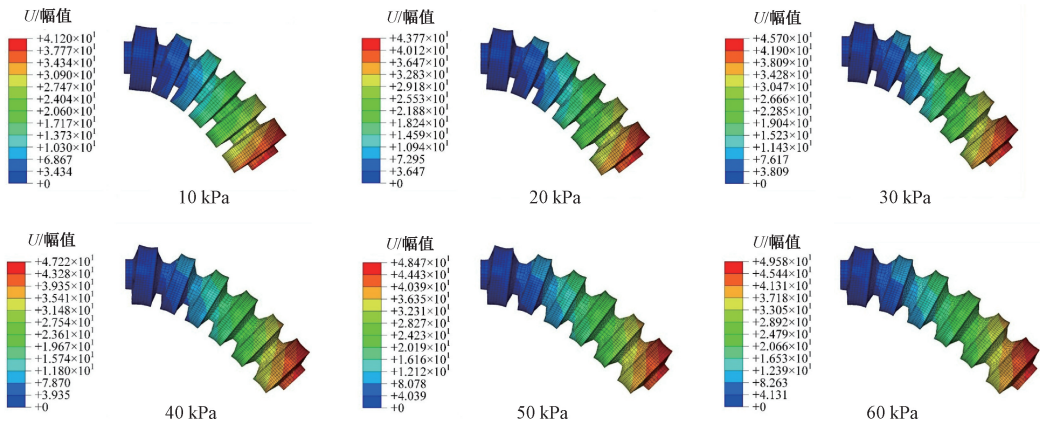


图 11 不同气压下的耦合变形云图

Fig. 11 Cloud diagrams of coupled deformation under different pressures

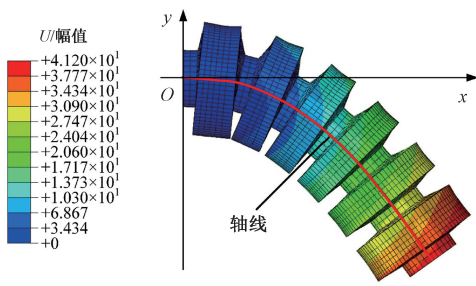


图 12 波纹管变形后轴线提取示意图

Fig. 12 Diagram of centerline extraction for the deformed bellows actuator

影响<sup>[23]</sup>。故弯矩方程可表示为:

$$M(x) = -F(L - u - x) \quad (13)$$

式中:  $F$  表示波纹管自由端承受的集中载荷;  $L$  表示波纹管在特定气压载荷下的长度;  $u$  表示集中载荷所引起的水平位移;  $x$  表示计算点到固定端的长度。

经整理,式(12)可表示为:

$$\cos \theta \frac{d\theta}{dx} = -\frac{M(x)}{EI} \quad (14)$$

将式(13)代入式(14)可得:

$$EI \cos \theta \frac{d\theta}{dx} = FL - Fu - Fx \quad (15)$$

将式(15)积分可得:

$$EI \sin \theta = FLx - Fux - \frac{1}{2}Fx^2 + C \quad (16)$$

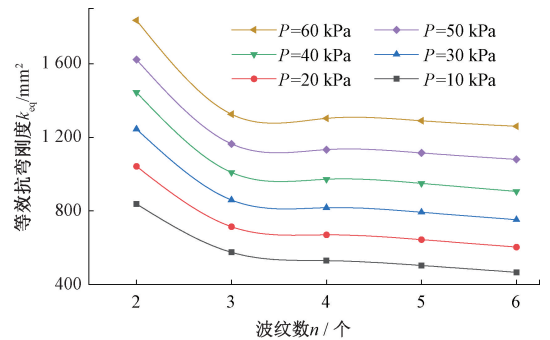
由固定端处的转角  $\theta_A = 0$  的边界条件可知  $C=0$ 。

因为波纹管驱动器内部为气腔,且各个截面的对中性轴的惯性矩不相同,不能使用梁理论来研究其抗弯刚度,故在此处引入等效抗弯刚度来描述波纹管驱动器在气压、自由端集中载荷的双重作用下的弯曲特性。假设各个截面的抗弯刚度均相等且数值上等于等效抗弯刚

度,则等效抗弯刚度的表达式为:

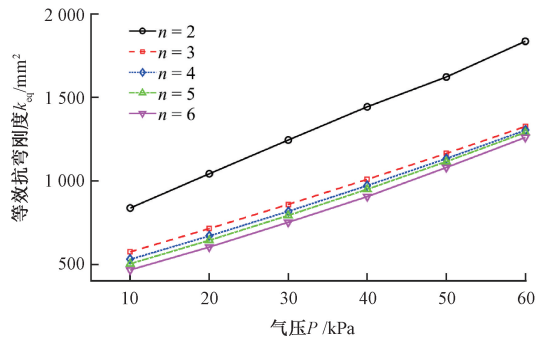
$$k_{eq} = \frac{2Fx(L - u) - Fx^2}{2\sin \theta} \quad (17)$$

将不同波纹数量和不同气压载荷下的等效抗弯刚度数据进行比较,如图 13 所示。如图 13(a)所示为等效抗弯刚度和波纹数量的关系曲线,如图 13(b)所示为等效抗弯刚度和输入气压的关系曲线。



(a) 等效抗弯刚度和波纹数量的关系

(a) The relationship between equivalent bending stiffness and the bellows number



(b) 等效抗弯刚度和输入气压的关系

(b) The relationship between equivalent bending stiffness and the pressure

图 13 波纹数量和气压对驱动器等效抗弯刚度的影响  
Fig. 13 Influence of the bellows number and input pressure on the actuator equivalent bending stiffness

据图 13 可知,所述的波纹在数量范围内,输入气压一定的情况下,波纹管等效抗弯刚度随着波纹数量的增加总体上呈下降趋势。这主要是因为随着波纹数量的增加,会降低波纹管整体的有效刚度,所以在相同气压下波纹数量越多越容易弯曲。在波纹数量相同的情况下,波纹管等效抗弯刚度随着输入气压的增大基本呈线性变化,在一定程度上驱动器能够通过调节内部输入气压来有效的抵抗弯曲。

## 4 驱动器性能实验

### 4.1 驱动器的失蜡法制作

由于波纹管驱动器波纹结构的存在,采用分步制作然后粘连的方法存在较大困难,而且在波纹处粘连一定程度上会大幅影响波纹管驱动器的变形特性;采用 3D 打印技术直接打印驱动器本体的成本则比较昂贵。失蜡法主要是通过将气腔制成蜡芯,然后在成型后采用水浴加热将蜡芯融化即可得到完整的驱动器,非常适用于制作波纹管驱动器,而且蜡材料可重复利用,成本低,故采用失蜡法制作波纹管驱动器<sup>[24]</sup>。

如图 14 所示为反复试验之后设计的驱动器模具,主要由模具上盖、模具下箱、蜡芯和自由端端盖模具组成。为保证驱动器制作精度,首先利用模具上盖和模具下箱浇筑出驱动器主体,去除多余部分。然后利用端盖模具制作出端盖。最后将驱动器主体和端盖粘连起来,就可以得到完整的波纹管驱动器。需要注意的是,浇筑口需要开得较大,否则会造成波纹管浇筑不完全或内部残留大量气泡,导致驱动器制作失败。

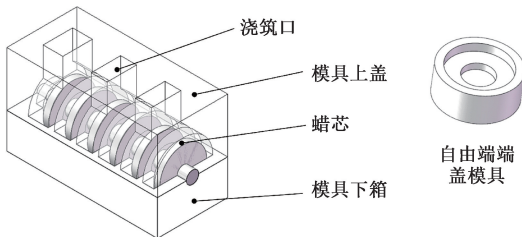


图 14 失蜡法制作驱动器的模具

Fig. 14 Molds for the fabrication of the actuator by the lost-wax method

蜡芯采用了如图 15 所示的两种铸造蜡蜡珠制作,绿色蜡珠(左)与白色蜡珠(右)的比例为 1:2,此比例下蜡溶液的流动性和凝固后的硬度比较好。由于蜡芯的硬度相对来说不是很高,故采用硅胶复模的方式来制作蜡芯,此方式不仅适用于制作任意形状的蜡芯,还利于凝固后的脱模过程,不会对蜡芯造成破坏。



图 15 蜡芯制作采用的两种铸造蜡蜡珠

Fig. 15 Two types of casting wax beads used in wax core fabrication

如图 16 所示为蜡芯的制作过程示意图,具体制作步骤为:

- 1) 采用 3D 打印机打印制作蜡芯的模具及其固定件;
- 2) 在蜡芯模具所有内表面涂抹凡士林脱模剂,以便于脱模;
- 3) 浇筑用于翻模的硅胶液,制作蜡芯模具公、母模;
- 4) 取出凝固后的公、母模进行固定并搭建蜡芯浇筑环境,浇筑蜡溶液至公、母模模具中;
- 5) 待蜡溶液冷却凝固完全后,拆开公、母模取出蜡芯。

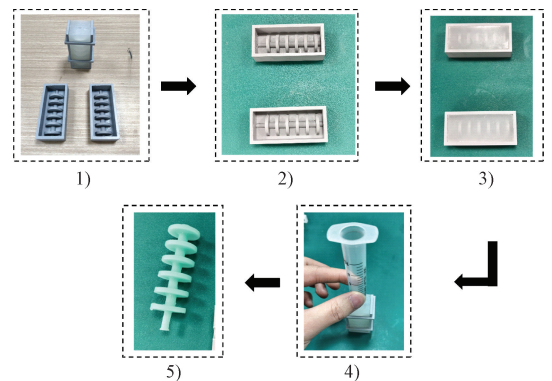


图 16 蜡芯的制作过程

Fig. 16 Wax core fabrication process

在蜡芯制作完成后,开始制作完整的波纹管驱动器,单个驱动器的制作过程如图 17 所示,具体制作步骤为:

- 1) 采用 3D 打印机打印制作驱动器的各部分模具;
- 2) 将模具内外涂抹凡士林脱模剂后进行组装固定,并用油泥填补连接处缝隙防止硅胶浇筑过程中外漏;
- 3) 将 YG-E630 硅胶原液与固化剂按 1:1 配置并充分搅拌均匀后放入真空消泡桶中进行完全除泡并浇筑;
- 4) 取出固化后的驱动器主体进行多次水浴加热,去除腔室中残余的蜡材料;

5) 修剪驱动器主体多余部分,并用硅胶液与自由端端盖进行粘连;

6) 得到最终的波纹管驱动器。

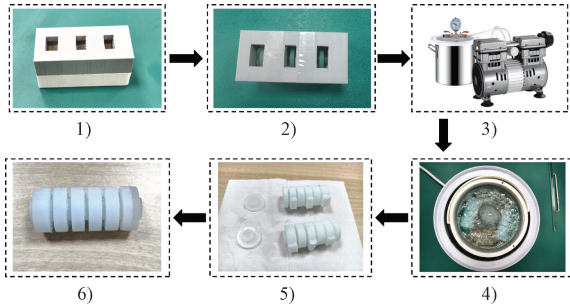


图 17 波纹管驱动器制作过程

Fig. 17 Fabrication process of the bellows actuator

#### 4.2 实验平台搭建

为验证并进一步分析驱动器的运动性能,搭建了如图 18 所示的驱动器性能实验平台。其工作流程为:空压机输出的气体经过滤减压阀进行初步过滤与调压,再由精密调压阀实现二次稳压,以确保输出气压的稳定;上位

机发送的控制信号经 AO 模块传输至电气比例阀,由该阀根据信号调节波纹管驱动器的内部输入气压;同时,安装于驱动器自由端前侧的激光位移传感器实时采集位移数据,并将其输出的电压信号通过 AI 模块回传至上位机。

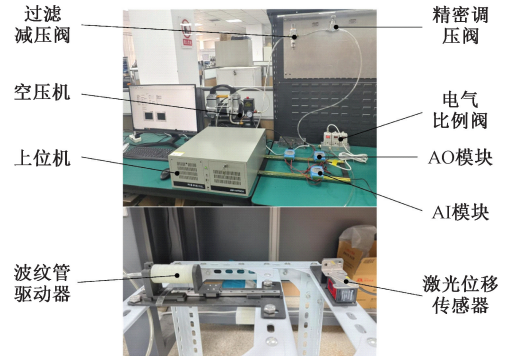


图 18 波纹管气动软体驱动器实验平台

Fig. 18 Experimental platform for a pneumatic soft bellows actuator

实验平台所用的主要元件如表 4 所示。

表 4 实验平台元件表

Table 4 Components of experimental platform

元件名称	型号	性能参数	生产厂家
空压机	ZP2 级 1280	额定排气压力 0.8 MPa, 容积 8 L	武汉芝浦工具有限公司
过滤减压阀	AW20-02B	调压区间 0.05~0.85 MPa, 过滤精度 5 $\mu\text{m}$	SMC 公司
精密调压阀	GPR20006L	工作压力 0.005~0.2 MPa, 调压区间 0.05~0.2 MPa	亚德客公司
电气比例阀	ITV1010-041S	输出压力 0.005~0.1 MPa, 线性度 1% F.S.	SMC 公司
工控机	IPC610-L	Core-i7-6700, 3.4 GHz/64 GB	研华
AO 模块	ADAM-4024	分辨率 12 位, 4 路 AO, 电流/电压输出	研华
AI 模块	ADAM-4017	分辨率 16 位, 8 路 AI, 电流/电压输入	研华
激光距离传感器	HG-C1200	测量范围 $\pm 80$ mm, 线性度 0.2% F.S., 输出 0~5 V	松下公司

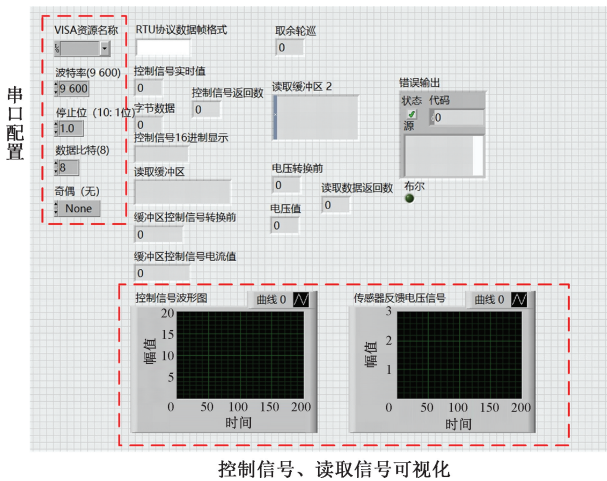
由于波纹管驱动器在受到较小的切向力载荷情况下也会产生较大的弯曲,故将波纹管驱动器的自由端与轴线垂直的方向进行约束,只保留轴线方向伸缩运动的自由度。采用直线导轨的约束方式避免了与水平面的摩擦,也避免了波纹管在大伸长量下产生的偏转,使得采集到的数据更精确有效。

利用 Labview 图形化编程软件进行实验平台上位机界面的设计, ADAM-4024 和 ADAM-4017 模块采用 Modbus-RTU 通讯协议实现模块与上位机的通讯,使用二进制的编码方式进行数据帧传递。如图 19 所示为气动实验平台上位机界面,主要包括串口配置、控制信号写入和传感器信号读取。

#### 4.3 实验与分析

研究者针对温/湿度变化对硅胶力学性能的影响进行了大量研究,研究表明硅胶的力学性能在较宽的温/湿度范围内都较为稳定,只有长期处于极端温/湿条件下,其力学性能才会产生较大的改变<sup>[25-26]</sup>。实验工作在恒温实验室环境中完成(环境温度  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ )。所用 YG-E630 硅胶为室温交联型超弹性材料,其在较宽温/湿度环境下的力学性能稳定。

利用图 18 所示实验平台对多个波纹管驱动器的伸长特性进行测试,如表 5 所示为纯气压载荷下波纹管驱动器在不同气压节点处多驱动器的实验、仿真伸长量统计表。



控制信号、读取信号可视化

图 19 实验平台上位机界面

Fig. 19 Experimental platform control interface

表 5 多驱动器实验、仿真伸长量统计表

Table 5 Statistical table of elongation for multi-actuator experiments and simulations

气压 $P$ /kPa	伸长量/mm			平均绝对 误差/mm	
	仿真值	驱动器 1	驱动器 2		驱动器 3
10	8.39	8.2	8.1	8.6	0.23
20	14.78	14.6	14.7	14.8	0.09
30	19.83	19.9	20.1	20.1	0.20
40	24.21	24.7	24.7	24.8	0.52
50	27.79	28.5	28.6	28.7	0.81
60	30.97	31.7	31.8	31.9	0.83

由表 5 可知,采用上述失蜡法制造的波纹管驱动器其伸长量实验值与仿真值之间的误差较小,最大平均误差仅为 0.83 mm,伸长特性表现较为稳定,最大伸长行程可达 53.2%。二者之间的误差随气压的增大逐步增大,主要是由于在大变形时硅胶材料表现出高度非线性,并且在仿真过程中处理非线性问题的数值分析方法也会引入一定的误差。

## 5 基于三元模型的波纹管驱动器建模

波纹管驱动器作为软体机器人的核心部件,多用于软体机器人和康复医疗领域,如软体机器人关节驱动和人体辅助外骨骼穿戴设备。在上述情境下,波纹管驱动器的伸长特性会受到来自负载轴线方向压缩力的影响,而且压缩力又和驱动器的伸长量有关,伸长量的增大会导致来自负载的压缩力增大。目前唯象模型经常被用于

气动软体驱动器的动力学构建中,其中比较典型的三元模型最早用于描述气动人工肌肉的运动特性<sup>[27]</sup>。

### 5.1 三元模型动力学方程建立

三元模型利用弹簧、阻尼和施力 3 个单元的组合来描述软体驱动器的黏弹性,这些单元的参数均与输入气压有关。波纹管驱动器的运动特性与气动人工肌肉类似,也采用三元模型的唯象模型进行动力学方程的构建<sup>[28]</sup>。如图 20 所示为三元模型的原理图。

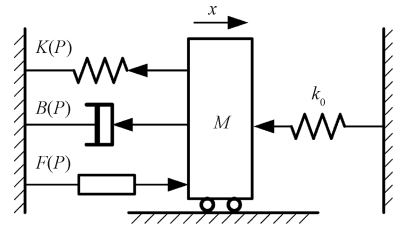


图 20 三元模型原理

Fig. 20 Diagram of the three-elements model

波纹管驱动器自由端受压缩力的动力学方程可被描述为:

$$F(P) - B(P)\dot{x} - K(P)x - k_0x = M\ddot{x} \quad (18)$$

式中:  $M$  为负载质量;  $x$ 、 $\dot{x}$  和  $\ddot{x}$  分别为波纹管驱动器自由端的位移、速度和加速度;  $K(P)$  和  $B(P)$  分别为三元模型中弹簧单元和阻尼单元的相关系数;  $F(P)$  则为施力单元所提供的驱动力。其中  $K(P)$ 、 $B(P)$  和  $F(P)$  可用多项式函数进行拟合,阶数越高则精度越高,但同时模型的复杂度也越高,出于实际应用的考虑选用一阶线性函数对弹簧单元、阻尼单元和施力单元进行拟合,如式(19)所示。

$$\begin{cases} K(P) = K_0 + K_1P \\ B(P) = B_0 + B_1P \\ F(P) = F_0 + F_1P \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $K_0$ 、 $K_1$ 、 $B_0$ 、 $B_1$ 、 $F_0$  和  $F_1$  均为未知参数。为了得到他们的具体数值,基于收集的实验数据进行参数辨识。

### 5.2 实验数据收集

对波纹管驱动器在输入气压和自由端受压缩力的双载荷作用进行实验,如图 21 所示。在自由端处加装了一个刚度系数  $k_0 = 0.098 \text{ N/mm}$  弹簧,通过波纹管驱动器的伸长压缩弹簧产生弹力模拟对波纹管驱动器的压缩作用。

为了对波纹管驱动器精确建模,进行多组平行试验并采集数据,以分析波纹管驱动器在该种情境下的动态特性。同时考虑到建模与控制的需求,保证波纹管内部的输入气压能够匹配控制信号的变化,将控制信号的输入频率控制在了 0.3 Hz 以下的低频段,输入信号的波形

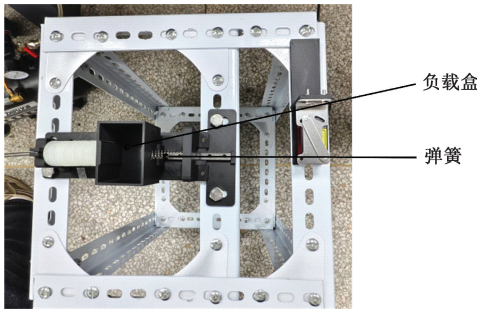


图 21 自由端受压缩力实验平台

Fig. 21 Free end compressive force test platform

为正弦波;负载的质量选在 400 g 以内。如图 22 所示为负载质量分别为 30、120、210、300 和 390 g 时波纹管输入气压  $P$  和自由端位移  $x$  的数据。

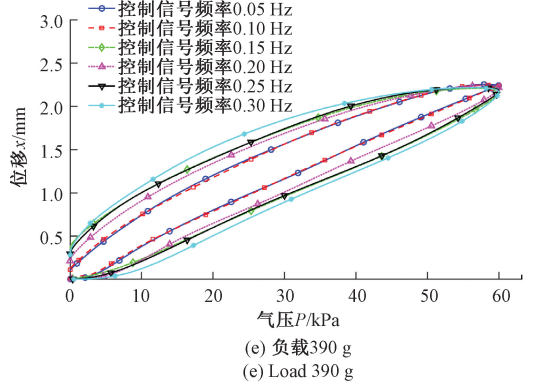
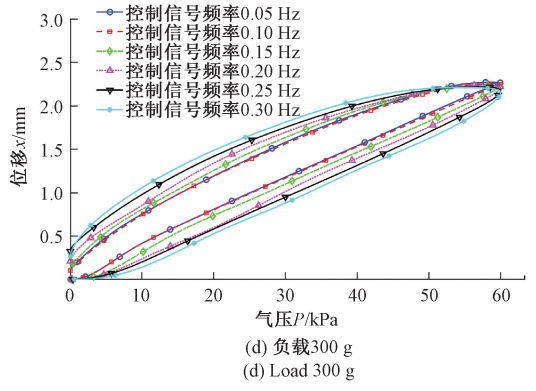
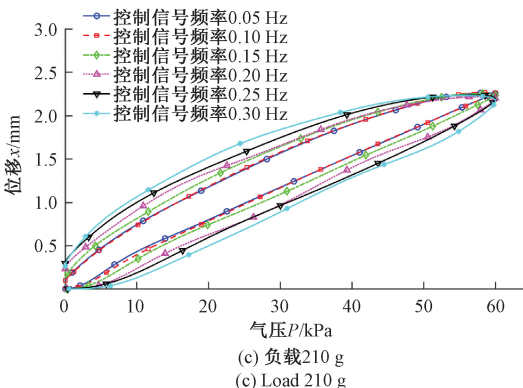
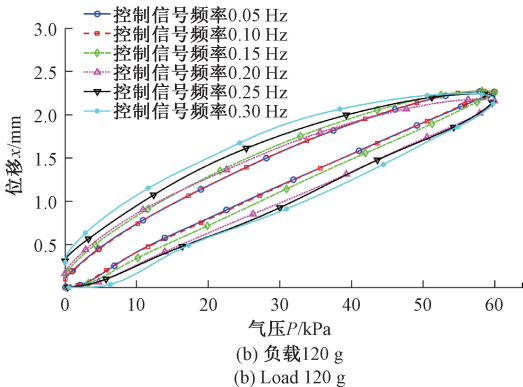
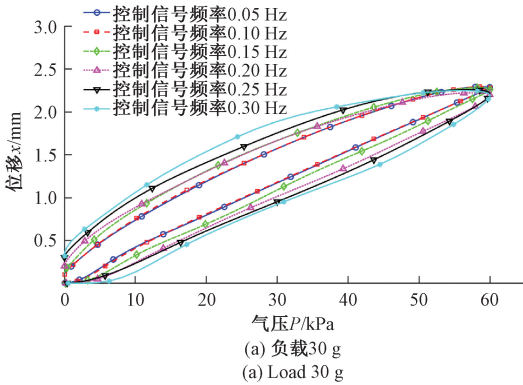


图 22 相同负载不同输入气压频率下的  $x$ - $P$  曲线  
Fig. 22  $x$ - $P$  curves under the same load with different input air pressure frequencies



由图 22 可知,负载为不同质量的情况下,在选定的低频段控制信号范围内,波纹管驱动器的  $x$ - $P$  曲线表现出明显的迟滞特性和时滞特性,而且驱动器的迟滞特性和时滞特性都随着控制信号频率的增大表现得更加显著,主要表现为固定气压节点处位移差的增大和最大位移量的减小,如图 23 所示。

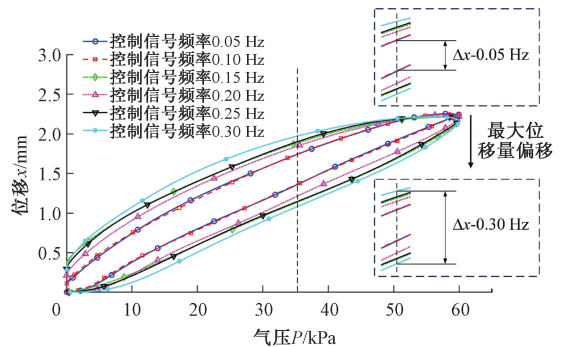


图 23 迟滞特性和时滞特性表现  
Fig. 23 Diagram of hysteresis and time-delay characteristics

受到电气比例阀调节精度的限制,当控制信号的输入频率过低时实验数据会出现毛刺,过高则会出现抖振,故选用 0.2 Hz 的控制信号频率作为实验数据。

如图24所示为0.2 Hz控制信号频率下不同负载质量的 $x$ - $P$ 曲线。

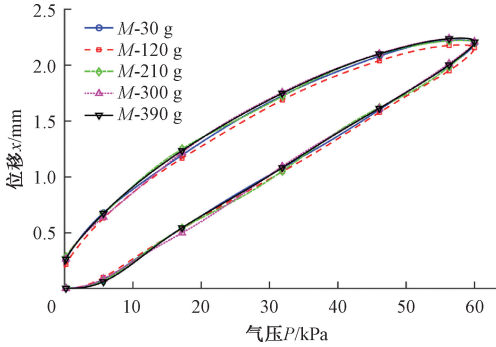


图24 相同控制信号不同负载下的 $x$ - $P$ 曲线

Fig. 24  $x$ - $P$  curves under the same control signal with different loads

由图24可知,选定范围内负载质量的变化对波纹管驱动器动态特性影响较小。经分析原因为:给定的质量范围内,波纹管本身的材料和结构具有的刚度完全能抵抗由于负载引起的变化,从而保持其动态特性稳定;弹簧的刚度远大于负载引起的力变化,使得弹簧压缩量和提供的反作用力对波纹管动态特性的影响较小;波纹管和弹簧系统存在较大的阻尼效应,掩盖了负载变化对于波纹管驱动器动态特性的影响。

### 5.3 参数辨识

使用递推最小二乘法(recursive least squares, RLS)对系统中的未知参数进行参数辨识。递推最小二乘法相比于普通最小二乘法其计算量更小,可以减少数据在计算机中所占的存储量,如果有需要的话还可以根据每一次采集到的数据进行实时辨识。

对于如图20所示的动力学系统,将式(19)代入式(18),并令 $z = \ddot{x} + k_0 x/M$ ,可得:

$$z(k) = \mathbf{h}(k)\boldsymbol{\theta} + e(k) \quad (20)$$

式中: $z(k)$ 为系统输出变量的第 $k$ 次实验观测值,且:

$$z(k) = \ddot{x}(k) + \frac{k_0}{M}x(k) \quad (21)$$

$$\mathbf{h}(k) = \frac{1}{M} [1 \ P(k) \ -\dot{x}(k) \ -P(k)\dot{x}(k) \ -1 \ -P(k)x(k)] \quad (22)$$

$$\boldsymbol{\theta} = [F_0 \ F_1 \ B_0 \ B_1 \ K_0 \ K_1]^T \quad (23)$$

其中: $x(k)$ 为波纹管驱动器自由端的第 $k$ 次观测值, $\mathbf{h}$ 为样本集合, $e(k)$ 为随机误差。

令 $k = 1, 2, \dots, m$ ,则有:

$$\mathbf{Z}_m = \mathbf{H}_m \boldsymbol{\theta} + \mathbf{E}_m \quad (24)$$

式中: $\mathbf{Z}_m = [z(1) \ z(2) \ \dots \ z(m)]^T$ ;  $\mathbf{H}_m = [\mathbf{h}(1) \ \mathbf{h}(2) \ \dots \ \mathbf{h}(m)]^T$ ;  $\mathbf{E}_m = [e(1) \ e(2) \ \dots \ e(m)]^T$

最小二乘法的核心思想就是寻找一个 $\boldsymbol{\theta}$ 的估计值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ ,使得每一次测量的 $\mathbf{Z}_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 与由估计值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 确定的测量估计 $\hat{\mathbf{Z}}_i = \mathbf{H}_i \hat{\boldsymbol{\theta}}$ 之差的平方和最小,即:

$$J(\hat{\boldsymbol{\theta}}) = (\mathbf{Z}_m - \mathbf{H}_m \hat{\boldsymbol{\theta}})^T (\mathbf{Z}_m - \mathbf{H}_m \hat{\boldsymbol{\theta}}) = \min \quad (25)$$

使式(25)最小由极值定理得:

$$\left. \frac{\partial J}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right|_{\boldsymbol{\theta} = \hat{\boldsymbol{\theta}}} = -2\mathbf{H}_m^T (\mathbf{Z}_m - \mathbf{H}_m \hat{\boldsymbol{\theta}}) \quad (26)$$

整理式(26)可得 $\boldsymbol{\theta}$ 的一般最小二乘估计为:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_m = (\mathbf{H}_m^T \mathbf{H}_m)^{-1} (\mathbf{H}_m^T \mathbf{Z}_m) \quad (27)$$

参数递推估计是指每获得一次新的观测数据后,在上一次参数估计结果的基础上,结合新引入的观测数据,依据递推算法对原有估计进行修正,从而递推地更新得到新的参数估计值。随着每一次新观测数据的逐次引入,顺次进行参数估计,直到参数估计值达到需求的精度范围内为止。利用 $m$ 次测量数据的基础上新获得一组输入输出数据时,由式(20)可得:

$$z(m+1) = \mathbf{h}^T(m+1)\boldsymbol{\theta} + e(m+1) \quad (28)$$

式中: $\mathbf{Z}_{m+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_m \\ z(m+1) \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{H}_{m+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_m \\ \mathbf{h}(m+1) \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{E}_{m+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_m \\ e(m+1) \end{bmatrix}$ 。

同理,根据式(27),有:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{m+1} = (\mathbf{H}_{m+1}^T \mathbf{H}_{m+1})^{-1} (\mathbf{H}_{m+1}^T \mathbf{Z}_{m+1}) \quad (29)$$

在此基础上增设信息阵,即:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_m = (\mathbf{H}_m^T \mathbf{H}_m)^{-1} \\ \mathbf{P}_{m+1} = (\mathbf{H}_{m+1}^T \mathbf{H}_{m+1})^{-1} \end{cases} \quad (30)$$

并令 $\mathbf{K}_{m+1} = \mathbf{P}_{m+1} \mathbf{h}^T(m+1)$ 为增益矩阵,并进行整理可得递推最小二乘法的递推算法如式(31)所示。

$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{\theta}}_{m+1} = \hat{\boldsymbol{\theta}}_m + \mathbf{K}_{m+1} [z(m+1) - \mathbf{h}(m+1) \hat{\boldsymbol{\theta}}_m] \\ \mathbf{P}_{m+1} = \mathbf{P}_m - \mathbf{P}_m \mathbf{h}^T(m+1) [1 + \mathbf{h}(m+1) \mathbf{P}_m \mathbf{h}^T(m+1)]^{-1} \mathbf{h}(m+1) \mathbf{P}_m \\ \mathbf{K}_{m+1} = \mathbf{K}_m \mathbf{h}^T(m+1) [1 + \mathbf{h}(m+1) \mathbf{P}_m \mathbf{h}^T(m+1)]^{-1} \end{cases} \quad (31)$$

为方便起见,取 $\hat{\boldsymbol{\theta}}_0 = 0$ ,  $\mathbf{P}_0 = \alpha \mathbf{I}$ ,其中 $\alpha$ 为正实数,取值为1000;参数精度 $\varepsilon$ 为 $10^{-8}$ 。随着递推的进行,初始值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}_0$ 和 $\mathbf{P}_0$ 对估计结果的影响会越来越小。以0.2 Hz控制信号频率,负载为30、120、210、300和390 g时的实验数据为训练集,将训练集的5组数据整合后作为参数辨识的依赖数据。如图25所示为递推最小二乘法的程序流程图,表6为辨识得到的模型参数。

获得这些参数后,基于三元模型的动力学方程,根据输入气压数据集 $\mathbf{P}$ 和负载质量 $\mathbf{M}$ 求取波纹管驱动器自由端的理论位移数据集 $\mathbf{X}_k$ ,将其与实验收集到的位移

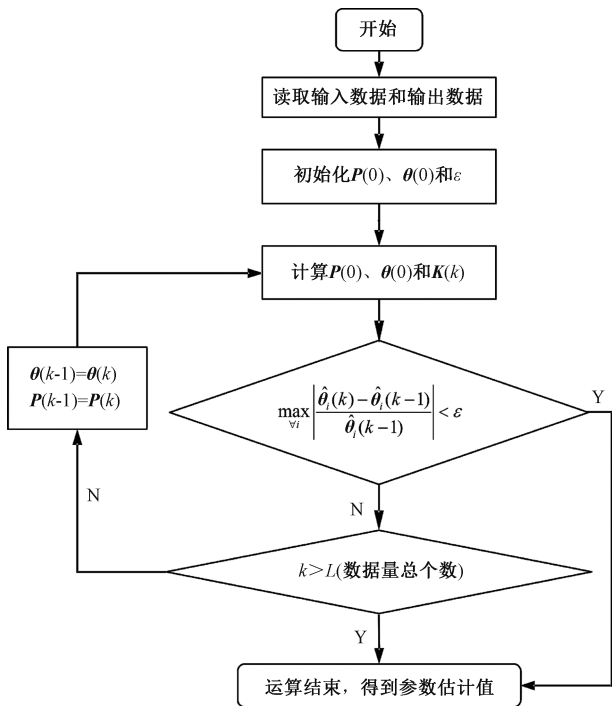


图 25 递推最小二乘法辨识流程

Fig. 25 Recursive least squares identification procedure

表 6 参数辨识结果

Table 6 Parameter identification results

参数	估计值
$K_0$	4 661.97
$K_1$	932.20
$B_0$	556.87
$B_1$	0.96
$F_0$	2 122.58
$F_1$	8.61

观测值数据集  $X$  进行对比,可以分析所辨识出参数的准确性并进行模型验证。

实验结果与模型预测值的对比表明,所建立的三元模型能有效描述波纹管驱动器在不同负载条件下的动态特性。在负载质量分别为 30、120、210、300 与 390 g 的 5 组实验中,驱动器自由端位移的实验观测数据与模型预测数据在整个运动周期内均呈现高度一致的变化趋势。两者曲线在形态上均表现出相似的周期性响应与迟滞特征,且随着负载增加,位移幅值呈现规律性减小,模型均能准确捕捉这一变化规律。

从定量结果来看,实验值与预测值之间的最大偏差约为 2 mm,该误差在各负载条件下分布均匀,未表现出明显的系统性偏差。尤其在低至中等负载范围内,两条曲线几乎完全重合;在较高负载下,仅于运动方向转换或

响应峰值处出现轻微分离,误差仍处于较低水平。这表明所辨识的模型参数具有较好的泛化能力,所构建的动力学方程能可靠反映驱动器在轴向压缩力与气压耦合作用下的动态行为。

总的来看,基于递推最小二乘法辨识参数的三元模型,在不同负载条件下均可高精度预测波纹管驱动器的位移响应,验证了该模型在描述其受压缩负载动态特性方面的有效性与适用性,为实现变形的精确控制奠定了理论基础。

## 6 结 论

1) 以气动波纹管驱动器为研究对象,基于对多种波纹形式的有限元仿真对比分析确定了矩形目标波纹形式,并设计了矩形波纹管驱动器的具体结构。

2) 通过有限元仿真分析了纯气压载荷下波纹数量和输入气压与驱动器伸长量之间的关系。结果表明:伸长量和波纹数量之间呈线性关系,伸长量和输入气压之间呈非线性关系,在一定的变形范围内,伸长量随着波纹数量和输入气压的增大而增大。

3) 通过有限元仿真分析了气压载荷和自由端受切向载荷下的耦合变形,结果表明,即便在较小的切向载荷下驱动器也会产生较大的弯曲,并基于仿真数据利用挠曲线相关理论建立了此种工况下驱动器的等效抗弯刚度模型。在输入气压一定的情况下,其等效抗弯刚度随着波纹数量的增加总体上呈下降趋势;在波纹数量相同的情况下,波纹管等效抗弯刚度随着输入气压的增大基本呈线性变化,表明在一定程度上驱动器能够通过调节内部输入气压来有效的抵抗弯曲。

4) 通过实验验证了纯气压载荷下驱动器仿真数据的准确性与可靠性,最大伸长行程可达 53.2%。基于传统的三元模型对波纹管自由端受压缩力时的运动特性进行建模,利用递推最小二乘法辨识得到了模型中的参数,并通过对比验证了该模型可较好地描述波纹管驱动器的动力学特性。

在后续的研究中,将改善驱动器的结构以提高驱动器的抗弯刚度,保证其变形时的直线性和稳定性;同时,将考虑更多工况下驱动器的变形特性,为波纹管驱动器在未来更广泛的应用建立理论基础。

## 参考文献

- [1] YASA O, TOSHIMITSU Y, MICHELIS M Y, et al. An overview of soft robotics[J]. Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems, 2023, 6(1): 1-29.
- [2] AI SH, CHEN Y T. Multifunctional gripper design at the end of the robot[J]. Instrumentation, 2022, 9(4): 17-25.

- [ 3 ] GAO S Y, YANG CH X, CHEN H T, et al. Bioinspired origami-based soft prosthetic knees[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 10855.
- [ 4 ] NGUYEN L V, NGUYEN K T, HO V A. Terra dynamics of monolithic soft robot driven by vibration mechanism[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2025, 41:1436-1455.
- [ 5 ] 耿鹏,何彦霖,杨溢,等. 软体机械臂控制方法研究现状及展望[J]. *仪器仪表学报*,2023,44(11):85-98.  
GENG P, HE Y L, YANG Y, et al. Research status and prospects of control methods for soft robotic arms[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023,44(11): 85-98.
- [ 6 ] 周明行,毛燧,黄显. 磁性材料控制与生物医学应用研究进展[J]. *电子测量与仪器学报*,2023,37(8):1-10.  
ZHOU M X, MAO S, HUANG X. Advances in control and biomedical applications of magnetic materials[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023,37(8):1-10.
- [ 7 ] LÓPEZ-DÍAZ A, VÁZQUEZ A S, VÁZQUEZ E. Hydrogels in soft robotics: Past, present, and future[J]. *ACS Nano*, 2024, 18(32): 20817-20826.
- [ 8 ] GU T F, JI T, BI H J, et al. 4D printed and multi-stimulus responsive shape memory polymer nanocomposites developed on hydrogen bonding-metal-phenolic sacrificial network: Application for hazardous chemical operations soft robots [J]. *Applied Materials Today*, 2023, 35: 102009.
- [ 9 ] 于猛,程祥,彭世刚,等. 柔性触觉反馈驱动器研究进展[J]. *仪器仪表学报*,2024,45(3):1-16.  
YU M, CHENG X, PENG SH G, et al. Recent progress on soft haptic feedback actuators[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024,45(3):1-16.
- [ 10 ] WANG F, SHEN W H, WU Y J, et al. Ultralow voltage high-performance nanocellulose-based electro-ionic actuators for soft robots[J]. *Soft Robotics*, 2025, 12(3): 327-336.
- [ 11 ] 张来喜,文伟韬,孟文强,等. 单气腔仿肺软体驱动器建模与变形特性分析[J]. *仪器仪表学报*,2024, 45(7):176-188.  
ZHANG L X, WEN W T, MENG W Q, et al. Modeling and deformation characteristics analysis of a single air-cavity lung-like soft actuator [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(7): 176-188.
- [ 12 ] BALDWIN H A. Realizable models of muscle function[J]. Springer, 1969: 139-148.
- [ 13 ] DAERDEN F, LEFEBER D. Pneumatic artificial muscles: Actuators for robotics and automation [J]. *European Journal of Mechanical & Environmental Engineering*, 2002, 47(1):11-21.
- [ 14 ] PILLSBURY T E, WERELEY N M, GUAN Q H. Comparison of contractile and extensile pneumatic artificial muscles [J]. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26(9): 095034.
- [ 15 ] GUAN Q H, SUN J, LIU Y J, et al. Novel bending and helical extensile/contractile pneumatic artificial muscles inspired by elephant trunk [J]. *Soft Robotics*, 2020, 7(5): 597-614.
- [ 16 ] CONNOLLY F, POLYGERINOS P, WALSH C J, et al. Mechanical programming of soft actuators by varying fiber angle[J]. *Soft Robotics*, 2015, 2(1): 26-32.
- [ 17 ] XIAO H, MENG Q X, LAI X ZH, et al. Design and trajectory tracking control of a novel pneumatic bellows actuator [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2023, 111(4): 3173-3190.
- [ 18 ] XIAO H, MENG Q X, LAI X ZH, et al. Design, performance analysis and applications of pneumatic bellows actuator for building block soft robots [J]. *Information Sciences*, 2024, 676: 120814.
- [ 19 ] COLUCCI G, DURETTO S, TAGLIAVINI L, et al. A bi-directional pneumatic actuator for sustainable robotic systems[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2025, 393: 116800.
- [ 20 ] HAN K, KIM N H, SHIN D. A novel soft pneumatic artificial muscle with high-contraction ratio [J]. *Soft Robotics*, 2018, 5(5): 554-566.
- [ 21 ] 张来喜,孟文强,倪庚垚,等. Pneu-net 型变曲率软体驱动器弯曲性能与控制的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(7):321-334.  
ZHANG L X, MENG W Q, NI G Y, et al. Research on the bending performance and control of a variable curvature Pneu-net soft actuator[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(7): 321-334.
- [ 22 ] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定: GB/T 528 - 2009/ISO 37: 2005[S]. 北京:中国标准出版社,2009.

- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration of China. Rubber, vulcanized or thermoplastic-determination of tensile stress-strain properties: GB/T 528-2009/ISO 37:2005[S]. Beijing: China Standard Press, 2009.
- [23] 孟小舜. 基于大挠度理论的钓鱼竿调性曲线计算及其设计方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.  
MENG X SH. Calculation and design method of fishing rod bending curve based on large deflection theory[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [24] 赵宇豪, 赵慧, 谭代彬. 基于波纹管软体驱动器的设计与制作[J]. 现代制造工程, 2022(3): 35-40, 69.  
ZHAO Y H, ZHAO H, TAN D B. Design and manufacture of soft actuator based on bellows [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022(3): 35-40, 69.
- [25] 苗哲, 贾春, 吴超, 等. 极端环境温度对硅橡胶材料性能的影响研究进展[J]. 绝缘材料, 2024, 57(9): 15-25.  
MIAO ZH, JIA CH, WU CH, et al. Research progress in effects of extreme ambient temperature on properties of silicone rubber materials[J]. Insulating Materials, 2024, 57(9): 15-25.
- [26] 孙全吉, 张辉, 张鹏, 等. 单组分脱酸型室温硫化硅橡胶耐高温性能的影响因素研究[J]. 有机硅材料, 2021, 35(6): 31-35.  
SUN Q J, ZHANG H, ZHANG P, et al. Study on influencing factors of high temperature resistance of deacidified RTV-1 silicone rubber[J]. Silicone Material, 2021, 35(6): 31-35.
- [27] 邢科新, 徐建明, 何德峰, 等. 气动肌肉的三元素模型辨识研究[J]. 高技术通讯, 2013, 23(5): 497-503.  
XING K X, XU J M, HE D F, et al. Research on identifying the three-elements model for pneumatic muscle[J]. Chinese High Technology Letters, 2013, 23(5): 497-503.
- [28] ZHAO SH Y, YAN Z, MENG Q X, et al. Modified three-element modeling and robust tracking control for a planar pneumatic soft actuator[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(9): 9237-9247.

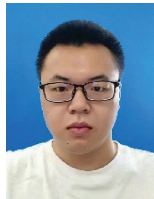
## 作者简介



**张来喜** (通信作者), 1996年于南京化工学院获得学士学位, 2002年于中国科学院研究生院获得硕士学位, 2013年于东南大学获得博士学位, 现为兰州理工大学教授, 主要研究方向为机械系统动力学、软体机器人、机器人建模与控制。

E-mail: laixi\_zh@163.com

**Zhang Laixi** (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Nanjing Institute of Chemical Technology in 1996, his M.Sc. degree from Graduate University of the Chinese Academy of Sciences in 2002, and his Ph.D. degree from Southeast University in 2013. He is currently a professor at Lanzhou University of Technology. His main research interests include dynamics of mechanical systems, soft robotics, robot modelling and control.



**张晋凡**, 2024年于西华大学获得学士学位, 现为兰州理工大学硕士研究生, 主要研究方向为软体机器人、机器人建模与控制。

E-mail: zhangjinfan56@163.com

**Zhang Jinfan** received his B.Sc. degree from Xihua University in 2024. He is currently a master's candidate at Lanzhou University of Technology. His main research interests include soft robotics, robot modelling and control.



**孟文强**, 2022年于兰州理工大学获得学士学位, 现为兰州理工大学硕士研究生, 主要研究方向为软体机器人、机器人建模与控制。

E-mail: mwq1659650580@163.com

**Meng Wenqiang** received his B.Sc. degree from Lanzhou University of Technology in 2022. He is currently a master's candidate at Lanzhou University of Technology. His main research interests include soft robotics, robot modelling and control.