

DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2412427

# Pneu-net 型变曲率软体驱动器弯曲性能与控制的研究\*

张来喜<sup>1</sup>, 孟文强<sup>1</sup>, 倪庚焱<sup>1</sup>, 马凯威<sup>2</sup>, 徐丰羽<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学机电工程学院 兰州 730050; 2. 南京邮电大学自动化学院 南京 210046)

**摘要:**气动软体驱动器是气动软体机器人的基础和关键元件,在实现软体机器人弯曲运动方面有着无可比拟的优势。但是气动软体驱动器在结构和材料方面都存在明显的非线性,这对软体驱动器的建模和精确控制提出了很大的挑战。本文基于分段常曲率变形假设、Yeoh 超弹性材料本构模型和虚功原理建立了 pneumatic networks (pneu-net) 型常曲率软体驱动器的弯曲数学模型,通过有限元仿真研究了结构参数和输入气压对驱动器弯曲性能的影响。在此基础上提出了变参数变曲率驱动器设计,建立了其弯曲变形预测模型,并进行了多驱动器一致性误差分析,有限元仿真和实验验证了模型的有效性。最后对软体驱动器的力输出特性进行了实验测试,制作了一个三指软体抓手,通过实验展示了软体抓手抓持不同物体的性能。

**关键词:**气动软体驱动器;软体建模;弯曲性能;变曲率控制

中图分类号: TH113 TP242 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.1599

## Research on the bending performance and control of a variable curvature Pneu-net soft actuator

Zhang Laixi<sup>1</sup>, Meng Wenqiang<sup>1</sup>, Ni Gengyao<sup>1</sup>, Ma Kaiwei<sup>2</sup>, Xu Fengyu<sup>2</sup>

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

2. College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China)

**Abstract:** Pneumatic soft actuators are fundamental and critical components of pneumatic soft robot, offering unparalleled advantages in achieving bending motions. However, the nonlinearity of both structure and material property presents great challenge for modeling and control of soft actuators. Based on the assumption of piecewise constant curvature deformation, Yeoh hyperelastic material constitutive model, and the virtual work principle, a bending model of a pneumatic networks (pneu-net) soft actuator with constant curvature is established in this paper. Finite element simulations were conducted to investigate the effects of structural parameters and input air pressure on the bending performance of the actuator. On this basis, a variable parameter variable curvature actuator design was proposed, and a predictive model for its bending deformation was established. Consistency error analysis for multiple actuators was performed, and the model's validity was verified through finite element simulations and experiments. Finally, the force output characteristics of the soft actuators were experimentally tested. A three-finger soft gripper was developed, and the performance of gripping different objects was shown by experiments.

**Keywords:** pneumatic soft actuators; soft body modeling; bending performance; variable curvature control

## 0 引言

软体机器人以一些软体生物或其器官、组织为仿生原型,采用弹性材料构成其主要躯体并具有无限自由度,通过产生连续变形来模拟特定的运动形式,如蠕动爬行、

弯曲、扭转、抓取等<sup>[1]</sup>。尽管刚体机器人已经能够完成较为复杂的任务,如桥梁缆索检测等<sup>[2]</sup>,但软体机器人相比于传统的刚性机器人,其柔软的机体可以使其更高效、安全的进行人机交互,同时其安全性高、环境相融性强的优点也使之在工业生产、医疗服务、军事侦察等领域有着巨大的应用潜力<sup>[3-4]</sup>。

收稿日期:2024-01-22 Received Date: 2024-01-22

\* 基金项目:国家自然科学基金(52265013)项目资助

软体驱动器作为软体机器人的关键部件和其直接动力来源,其运动形式和动力学特性直接影响软体机器人的工作性能。目前,软体机器人的研究主要集中在应用性能优良的新型智能材料制作软体驱动器,如新型复合硅胶<sup>[5]</sup>、形状记忆合金<sup>[6-7]</sup>、电场活化聚合物<sup>[8]</sup>、响应水凝胶<sup>[9]</sup>、磁光热混合响应<sup>[10]</sup>等,这些物质基于自身材料特性可以在气压、温度、电场、酸碱度等环境变量的作用下产生特定的运动形式,从而完成预定的目标任务。但是,气动软体驱动器依然是最广泛采用的软体驱动器形式。对于弯曲型软体驱动器而言,文献[11]将四边形扩展图案折纸结构与可折叠气动波纹管相结合,提出了一种新型折纸式可折叠气动执行器。在建模的基础上进行参数优化,利用遗传算法实现输出转矩与动态响应之间的权衡,可用于可穿戴辅助应用。日本东京大学 Sun 等<sup>[12]</sup>提出了一种模仿软体动物果蝇幼虫爬行行为的真空驱动软体机器人,采用超弹性硅橡胶制成软体结构模拟幼虫的节段流体静力结构,使软机器人能够进行蠕动运动。文献[13]利用熔融沉积成型(fused deposition modeling, FDM)技术,采用带发泡剂的热塑性聚氨酯(thermoplastic polyurethanes, TPU)材料制作了柔性气动执行器,它们在100~500 kPa的压力下表现出可变刚度和挠度,使其可应用可在穿戴的手部康复设备上。上海交通大学 Wang 等<sup>[14]</sup>提出了一种由晶格超材料增强的弹性体管组成的气动软体机器人,通过晶格叠加表现出扭曲-弯曲-伸长复合变形,为设计具有复杂灵巧变形的柔性机器人提供了参考。文献[15]受到象鼻可操作性的启发,提出了一种由软气动执行器和干涉板组成的气动软机器人。通过实现不同图案的干涉板,可以对机器人的局部刚度进行预编程。北京信息科技大学高东等<sup>[16]</sup>将光纤布拉格光栅(fiber bragg grating, FBG)植入在软体驱动器中,实现软体机器人的姿态传感监测。

由于一体式驱动腔体在大变形状态下产生的弹性内力需要很大的驱动气压才能抵消,因此研究者在一体式驱动腔的基础上进行拓展形成了新的气压驱动结构。哈佛大学 Mosadegh 等<sup>[17]</sup>提出了一种新的设计方法,采用线性阵列式驱动单元,在相对较小的驱动器压下也能实现大范围的弯曲动作。文献[18]提出机理与数据驱动的软体驱动器弯曲角度软测量模型,具有收敛速度快、模型尺寸小、训练速度快、泛化性能好等优点。

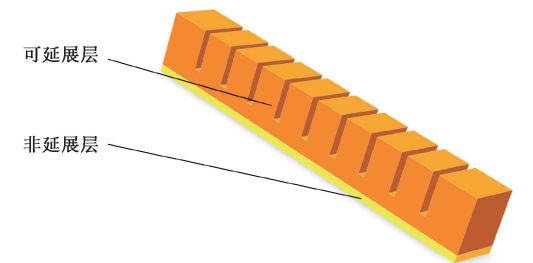
本文重点研究了 pneumatic networks(pneu-net)型软体驱动器的弯曲特性,基于分段常曲率假设、超弹性材料本构模型和虚功原理建立了 pneu-net 型软体驱动器的弯曲模型,通过有限元仿真研究了结构参数和输入气压对软体驱动器弯曲性能的影响,建立了基于常曲率模型的变曲率驱动器弯曲变形预测模型,实现了同气压下的变曲率控制,有限元仿真和实验都验证了弯曲模型的有效

性。最后又通过实验研究了驱动器的力输出特性,并制作了软体抓手对其抓取性能进行了有效测试。

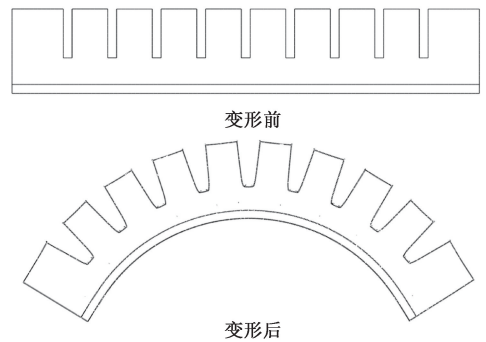
## 1 Pneu-net 型软体驱动器结构设计

### 1.1 Pneu-net 型软体驱动器的弯曲变形机理

如图1所示为 pneu-net 型软体驱动器的变形原理示意图,pneu-net 型软体驱动器采用线性阵列式驱动单元结构,上面线性排列着若干同结构参数的气腔,称为可延展层,下面为薄板结构的非延展层,如图1(a)所示。可延展层和非延展层可采用相同或不同的材料,一般情况下可延展层材料的可延展性要比非延展层更高。当向驱动器施加气压载荷后,可延展层的形变远大于非延展层,使软体驱动器向非延展层一侧产生凸状弯曲,如图1(b)所示。软体驱动器的运动形态主要取决于弹性材料在空间上的非对称分布和材料弹性模量的非均匀分布形式。



(a) 软体驱动器变形结构示意图  
(a) The schematic diagram of the soft actuator deformation structure



(b) 软体驱动器变形前后对比示意图  
(b) The comparison diagram of the soft actuator before and after deformation

图1 Pneu-net 型软体驱动器变形原理

Fig. 1 Pneu-net soft actuator deformation principle

### 1.2 驱动器的结构设计

研究表明,针对 pneu-net 型软体驱动器的结构形式,在具有相同表面积的气腔中,横截面为矩形的气腔弯曲性能最好<sup>[19-23]</sup>,因此本研究采用横截面为矩形气腔的软体驱动器结构,如图2所示。为了避免处于驱动器气腔下部的非延展层中部在气压载荷下产生凸起,在非延展层的中间嵌入了纸张层限制其变形<sup>[24]</sup>。

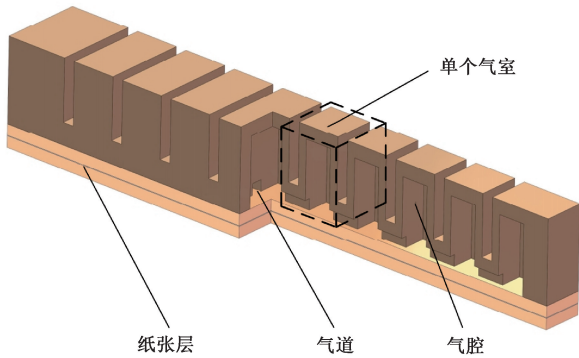


图2 Pneu-net型软体驱动器结构示意图

Fig. 2 The schematic diagram of Pneu-net soft actuator structure

## 2 同结构参数 pneu-net 型软体驱动器的弯曲数学模型

软体驱动器不同于传统的刚性运动部件,特点是变形连续且自由度高,其腔体结构的复杂性、几何变形的非线性以及对气压的迟滞特性,大大增加了建立数学模型的难度,目前依然没有较为统一的建模方法和控制算法。基于同结构参数的 pneu-net 型软体驱动器沿长度方向分布的各个气室结构参数完全一致的假设,本文采用基于串联机器人(denavit-hartenberg, D-H)变换的分段常曲率(piecewise constant curvature, PCC)模型来分析软体驱动器的输入气压与弯曲转角之间的关系。

### 2.1 分段常曲率假设

分段常曲率气动软体驱动器沿线性阵列分布的气室结构参数均相同,所以其非延展层的弯曲变形为等曲率变形。根据驱动器弯曲变形的连续性,驱动器总转角可看做是若干腔室弯曲转角的累加,定义驱动器的总转角为:

$$\varphi = n\theta \quad (1)$$

式中: $\varphi$ 为驱动器总转角, $n$ 为驱动器所包含气室的个数, $\theta$ 为单个气室的转角,如图3所示。

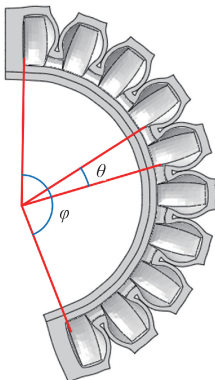


图3 驱动器弯曲转角示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the bending angle of the driver

### 2.2 Yeoh 本构模型

由于软体驱动器的变形量比较大,且其应力-应变是非线性的,不能应用刚体力学进行分析和建模,故采用应变能密度函数来描述其力学性能<sup>[25]</sup>。

应变能密度函数的通用形式为:

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad (2)$$

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

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (3)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (4)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1 \quad (5)$$

式中: $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 和 $\lambda_3$ 分别为长、宽和高3个方向的主伸长假比。

由于硅橡胶材料分子间存在范德华力,硅胶体积不可压缩,故 $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$ 。

Yeoh模型适合描述硅橡胶类材料的大变形,且形式相对简洁,其应变能密度函数的表达式为:

$$W = \sum_{i=1}^N C_{i0} (I_1 - 3)^i + \sum_{k=1}^N \frac{1}{d_k} (J - 1)^{2k} \quad (6)$$

式中: $N$ 为应变能密度函数的阶数, $C_{i0}$ 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 $J = 1$ 。

二阶是常用的形式,即当 $N = 2$ 时:

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 \quad (7)$$

驱动器的结构参数决定了其变形主要集中在长度方向上,忽略宽度方向的微小变形,即 $\lambda_2 = 1$ ,再令 $\lambda = \lambda_1 = 1/\lambda_3$ ,则:

$$I_1 = \lambda^2 + \frac{1}{\lambda^2} + 1 \quad (8)$$

在此基础上,Yeoh模型的二阶应变能密度函数表达式为:

$$W = C_{10} \left( \lambda^2 + \frac{1}{\lambda^2} - 2 \right) + C_{20} \left( \lambda^2 + \frac{1}{\lambda^2} - 2 \right)^2 \quad (9)$$

### 2.3 单个气室弯曲数学模型

根据虚功原理,软体驱动器在施加气压载荷后气体所做的功完全转化为驱动器变形后储存的能量,则满足:

$$W_g + W_a = 0 \quad (10)$$

式中: $W_g$ 为气体所做的功, $W_a$ 为驱动器变形前后能量的变化量。由此可得:

$$P \cdot dV_n = V_s \cdot dW \quad (11)$$

$$V_n = V - V_s \quad (12)$$

式中: $P$ 为驱动器的输入气压值, $V_n$ 为驱动器单个气室气腔的体积, $V_s$ 为单个气室对应硅胶材料的体积, $V$ 为单个气室在空间中所占的总体积。

如图4所示为驱动器结构示意图,具体参数取值见表1。由于硅橡胶材料不可压缩,所以变形前后单个气室

对应的硅胶材料的体积不变,故由几何关系可知:

$$V_s = LHB - l_1 h_1 b_1 - (l_2 + l_3) h_5 b_3 - l_3 (h_1 + h_2 - h_4) B - l_3 h_4 (B - b_4) \quad (13)$$

$$V = LHB - l_3 (h_1 + h_2 - h_4) B - l_3 h_4 (B - b_4) \quad (14)$$

式中:  $L = l_1 + 2l_2 + l_3, B = b_1 + 2b_2, H = h_1 + h_2 + h_3$ 。

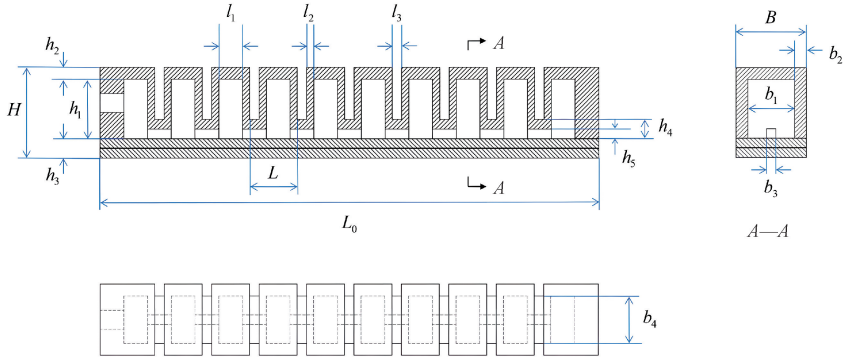


图4 软体驱动器结构参数示意图

Fig. 4 Structure parameters of the soft actuator

表1 软体驱动器结构参数

Table 1 Structure parameters of the reference soft actuator

参数名称	参数	数值/mm
驱动器总长度	$L_0$	105
单气室总长度	$L$	10
气腔长度	$l_1$	5
气腔长度方向壁厚	$l_2$	1.5
相邻气室间距	$l_3$	2
驱动器高度	$H$	19
气腔高度	$h_1$	12.5
气腔顶层壁厚	$h_2$	2.5
非延展层厚度	$h_3$	4
相邻气室连接处高度	$h_4$	4
相邻气腔气道高度	$h_5$	2
驱动器宽度	$B$	15
气腔宽度	$b_1$	10
气腔宽度方向壁厚	$b_2$	2.5
气道宽度	$b_3$	2
相邻气室连接处宽度	$b_4$	15

变形后的单个气室气腔的体积表示为:

$$V_n = \frac{1 + \lambda}{2} V - V_s \quad (15)$$

式中:  $\lambda$  为单个气室在长度方向的主伸长比,由文献[23]可知:

$$\lambda = \frac{R\theta}{R\sin\theta} = \frac{\theta}{\sin\theta} \quad (16)$$

式中:  $R\sin\theta$  近似等效为变形前的气室长度,  $R\theta$  为气室变形后对应的弧长。

将式(13)~(16)代入式(11),并对  $\theta$  求导,可得输入气压与单个气室转角的关系式:

$$P = \frac{2V_s \frac{dW}{d\theta} \sin^2\theta}{V(\sin\theta - \theta\cos\theta)} \quad (17)$$

上式中的结构参数均已知,且只含驱动气压  $P$ 、单个气室转角  $\theta$  两个未知数,代入式(1)即可根据输入驱动气压  $P$  求得驱动器的总体转角  $\varphi$ ,并可依此得出同气压下各个结构参数和转角之间的关系。

### 3 软体驱动器弯曲特性分析

#### 3.1 本构模型材料参数的测定

根据 GB/T 528—2009 对硅橡胶材料进行单轴拉伸试验,以确定 Yeoh 本构模型中的材料参数。选取试样类型为哑铃状试样 1 型,试验长度为  $25.0 \pm 0.5$  mm,标准厚度为  $2.0 \pm 0.2$  mm,拉伸试验机型号为 INSTRON-5866,如图 5 所示。夹持器的移动速度为 500 mm/min,将拉伸试验的数据进行处理得到应力应变曲线,然后在仿真软件 ABAQUS 中与 Yeoh 模型进行拟合,Yeoh 模型与拉伸试验所得的数据吻合性很好,拟合曲线如图 6 所示。



图5 INSTRON-5866 型材料拉伸机

Fig. 5 INSTRON-5866 material stretching test machine

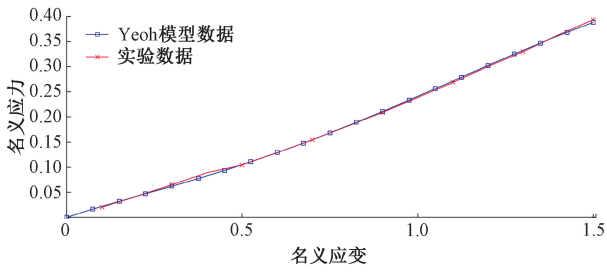


图 6 单轴拉伸实验数据与 Yeoh 模型拟合结果

Fig. 6 Uniaxial stretching test data and fitting result with the Yeoh model

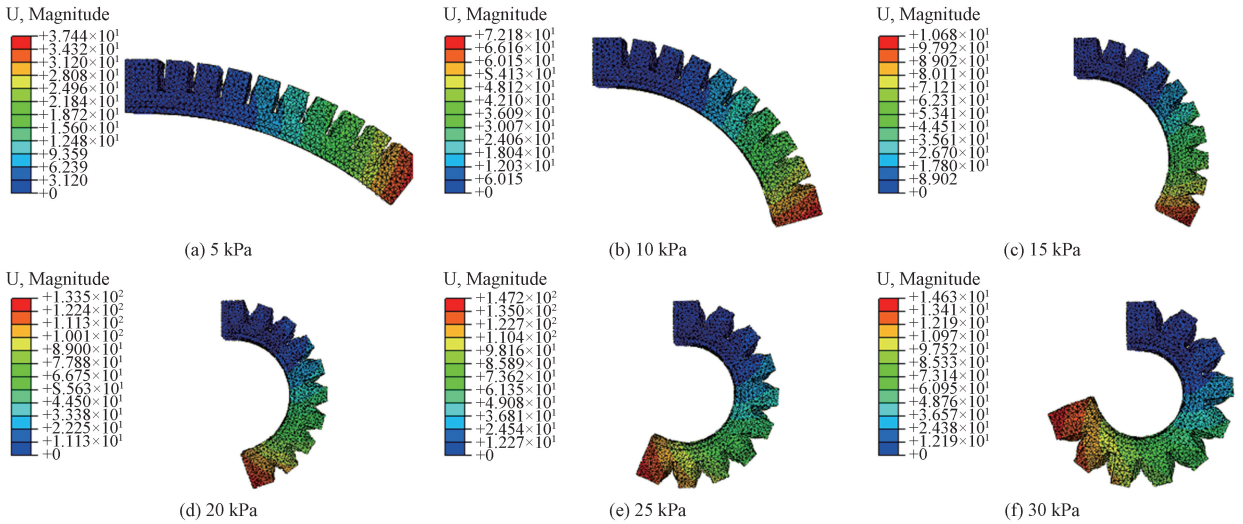


图 7 不同气压下驱动器位移云图

Fig. 7 The actuator displacement contour map under different pressures

然后提取驱动器非延展层的坐标轨迹,由于驱动器两端部的壁厚较大,变形不明显,所以只提取中间有气腔和气道的部分,如图 8 所示。

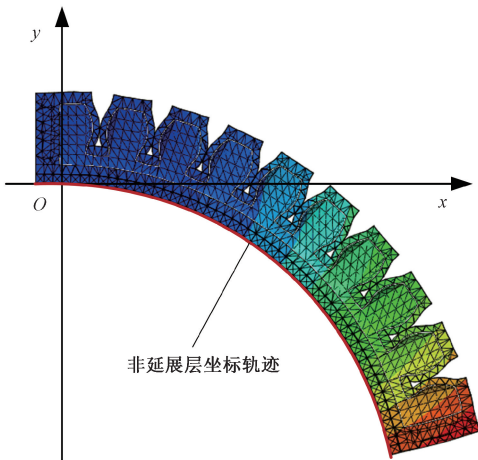


图 8 非延展层坐标轨迹提取示意图

Fig. 8 Extraction of the coordinate trajectory of the inextensible layer

### 3.2 驱动器的有限元仿真

通过有限元仿真可以预测驱动器在不同气压和给定参数下的变形行为,将依据驱动器结构参数建立的驱动器模型导入 ABAQUS 软件,设置材料属性。

Yeoh 模型的参数采用拉伸实验拟合所得的参数,故取  $C_{10} = 0.0397 \text{ MPa}$ ,  $C_{20} = 0.0092 \text{ MPa}$ ,对于纸张层,杨氏模量设置为  $6500 \text{ MPa}$ ,泊松比为  $0.2^{[24]}$ ,设置好载荷及其约束条件后进行网格划分。需要注意的是,对于硅橡胶类不可压缩且变形量大的超弹性材料,其网格类型只能划分为杂交单元,故选用二次杂交四面体实体单元  $C_3D_{10}H^{[26]}$ ,如图 7 所示为驱动器在不同气压下的有限元分析结果。

将提取的坐标点利用最小二乘法拟合圆并进行参数估计,通过计算拟合圆与提取数据坐标点之间的平均残差验证了分段常曲率假设的有效性,表 2 为参考驱动器在不同气压下拟合出的圆参数及其平均残差。

表 2 不同气压下拟合出的圆参数及其平均残差  
Table 2 Parameters of the fitting circular and average residuals under different pressures

驱动气压/kPa	曲率半径/mm	平均残差
5	137.85	-0.000 000 1
10	69.61	-0.000 000 6
15	43.79	-0.000 002 6
20	31.43	-0.000 033 1
25	24.37	-0.000 117 9
30	21.10	-0.000 201 3

### 3.3 结构参数和输入气压对弯曲特性的影响

由于驱动器弯曲变形发生在长度方向,本文只讨论定长情况下驱动器的弯曲性能。根据控制单一变量的原则,通过有限元仿真研究了气腔宽度  $b_1$ 、气道宽度  $b_3$ 、相邻气室连接处宽度  $b_4$ 、气腔高度  $h_1$  和非延展层厚度  $h_3$  对驱动器弯曲性能的影响,如图9所示。由图可知:在相同气压下,单个气室转角  $\theta$  与  $b_1$ 、 $b_3$  和  $h_1$  呈正相关,与  $b_4$  和  $h_3$  呈负相关。这5个结构参数对驱动器弯曲性能的影响程度由大到小依次为气腔宽度  $b_1$ 、相邻气室连接处宽度  $b_4$ 、非延展层厚度  $h_3$ 、气腔高度  $h_1$  和 气道宽度  $b_3$ ,判定标准为结构参数取相同增量时单个气室转角  $\theta$  的变化量。同时,当结构参数相同时,单个气室转角  $\theta$  随着输入气压的增大而增大,在气压较大时这种趋势更为显著。驱动器的结构参数对其弯曲性能的有限元仿真结果与理论模型一致。需要注意的是,对一些结构参数的取值要适中,过大或过小可能会导致驱动器产生刚度降低、最大可承受压力降低和弯曲性能不好等问题,直接导致软体驱动器的性能下降或功能受限。

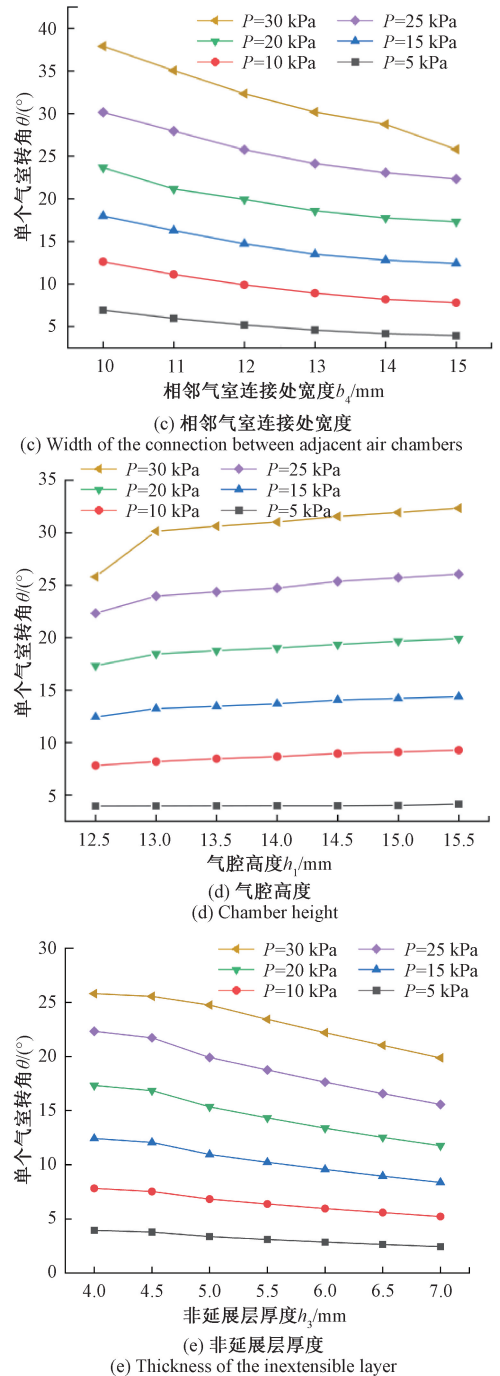
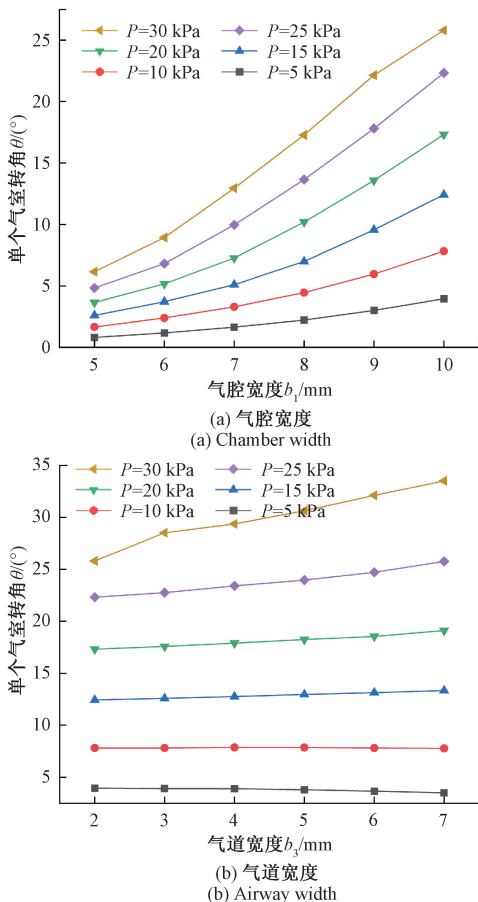


图9 驱动器结构参数对其弯曲性能的影响

Fig. 9 The influence of the actuator structural parameters on bending performance

### 3.4 基于常曲率模型的变曲率驱动器弯曲变形预测

基于同参数结构线性排列气室的 Pneu-net 型软体驱动器,本文设计了不同参数结构气室线性排列的变曲率弯曲变形驱动器,可实现同气压下驱动器的非延展层变曲率分布。驱动器的弯曲变形在不同气室的连接处满足一阶连续<sup>[27]</sup>,因此后一段驱动器的曲率中心位于上一段

驱动器末端点与曲率中心的连线上, 基于此构建了变曲率弯曲驱动器的数学模型, 如图 10 所示。

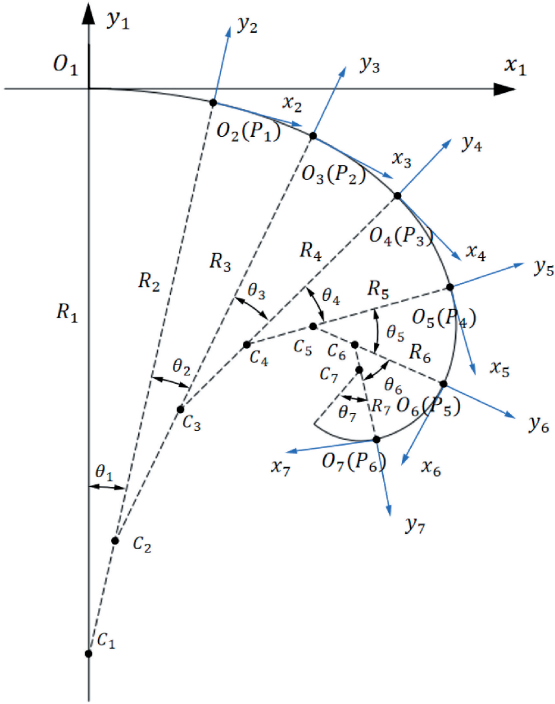


图 10 变结构参数变曲率驱动器弯曲模型

Fig. 10 Bending model of the variable curvature actuator with variable structural parameters

对同参数结构线性排列气室驱动器的研究与分析表明, 定参数结构对应的气室段的驱动器长度  $l$  和弯曲角  $\theta$  均已知, 所以其对应的非延展层曲率半径为:

$$R_n = \frac{l_n}{\theta_n} \quad (18)$$

第  $n$  段结构参数的驱动器末端点  $p_n$  (第  $n+1$  段结构参数的驱动器的起始端点坐标) 变形后的横纵坐标在笛卡尔坐标系  $x_n O_n y_n$  中可表示为:

$$\begin{aligned} {}^n p_{nx} &= R_n \sin \theta_n \\ {}^n p_{ny} &= R_n (\cos \theta_n - 1) \end{aligned} \quad (19)$$

确定了每一段不同结构参数的驱动器节段变形后的位姿, 即可在此基础上得出变结构参数变曲率驱动器的变形位姿:

$${}^A p_p = {}^A R \cdot {}^B B_p + {}^A p_{B-org} \quad (20)$$

式中:  ${}^A p_p$  表示点  $p$  在坐标系  $\{A\}$  中的位置,  ${}^B B_p$  表示点  $p$  在坐标系  $\{B\}$  中的位置,  ${}^A R$  表示坐标系  $\{B\}$  相对于坐标系  $\{A\}$  的旋转矩阵,  ${}^A p_{B-org}$  表示坐标系  $\{B\}$  相对于坐标系  $\{A\}$  的平移矢量。

变曲率驱动器可看作是由  $n$  段不同气室参数结构的驱动器串联而成, 则:

$${}^1 p_n = {}^1 T_2 {}^2 T_3 {}^3 T_4 \cdots {}^{n-1} T_n \cdot {}^n p_n \quad (21)$$

式中:  ${}^1 p_n$  为变形后第  $n$  段驱动器的末端点在初始坐标系中的坐标,  ${}^n T$  为后一个坐标系相对于前一个坐标系的齐次变换矩阵。引入它是因为复合变换式 (20) 对点  ${}^n p_n$  是非齐次的, 它综合地表示了平移变换和旋转变换两者的复合;  ${}^n p_n$  为点  $p_n$  在第  $n$  个坐标系当中的表示。

其中, 齐次变换矩阵的通式为:

$${}^{n-1} T_n = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{n-1} & -\sin \alpha_{n-1} & 0 & R_{n-1} \sin \theta_{n-1} \\ \sin \alpha_{n-1} & \cos \alpha_{n-1} & 0 & R_{n-1} (\cos \theta_{n-1} - 1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (n \geq 2) \quad (22)$$

式中:  $\alpha_{n-1}$  为坐标系  $\{N\}$  相对于坐标系  $\{N-1\}$  的旋转角,  $R_{n-1}$  是驱动器第  $n-1$  节段所对应的曲率半径。

由图 10 可知:

$$\alpha_n = \theta_n (n \geq 1) \quad (23)$$

## 4 驱动器性能实验

### 4.1 软体驱动器的制作

驱动器的制备材料选择的是邵氏硬度为 15 的 YG-G15 型双组份硅胶, 采用模塑成型的方法制备, 具体制作过程如图 11 所示。

### 4.2 气动系统实验平台搭建

为了验证同结构参数常曲率弯曲模型和变结构参数变曲率弯曲模型的准确性, 搭建了气动实验平台, 其原理如图 12 所示。其中虚线为气路, 实线为信号路, 空压机提供系统的动力源, 压缩空气经气动三联件过滤并降低压力, 再经电气比例阀调压后作为软体驱动器气源。实验平台所用的主要元件如表 3 所示。

### 4.3 弯曲特性测试与误差分析

为了验证软体驱动器的实际性能与弯曲模型的准确性, 分别记录同参数结构和变参数结构驱动器在不同输入压力下的弯曲状态, 同结构参数驱动器实验结果如图 13(a) 所示, 变结构参数驱动器实验结果如图 13(b) 所示。

为了更准确的描述材料在不同气压下的行为, 需要结合实验数据和物理机理综合考虑, 在此基础上将实验数据进行参数修正和拟合。结合实验数据, 采用 ExpDec2 模型拟合弯曲模型中的材料参数  $C_{10}$  和  $C_{20}$  随气压变化的函数, 如图 14 所示。

对比模型的预测值、有限元仿真和实验数据以验证常曲率模型和变曲率模型的准确性, 图 15 所示为驱动器在不同压力驱动下的弯曲变形对比图。由图可知:

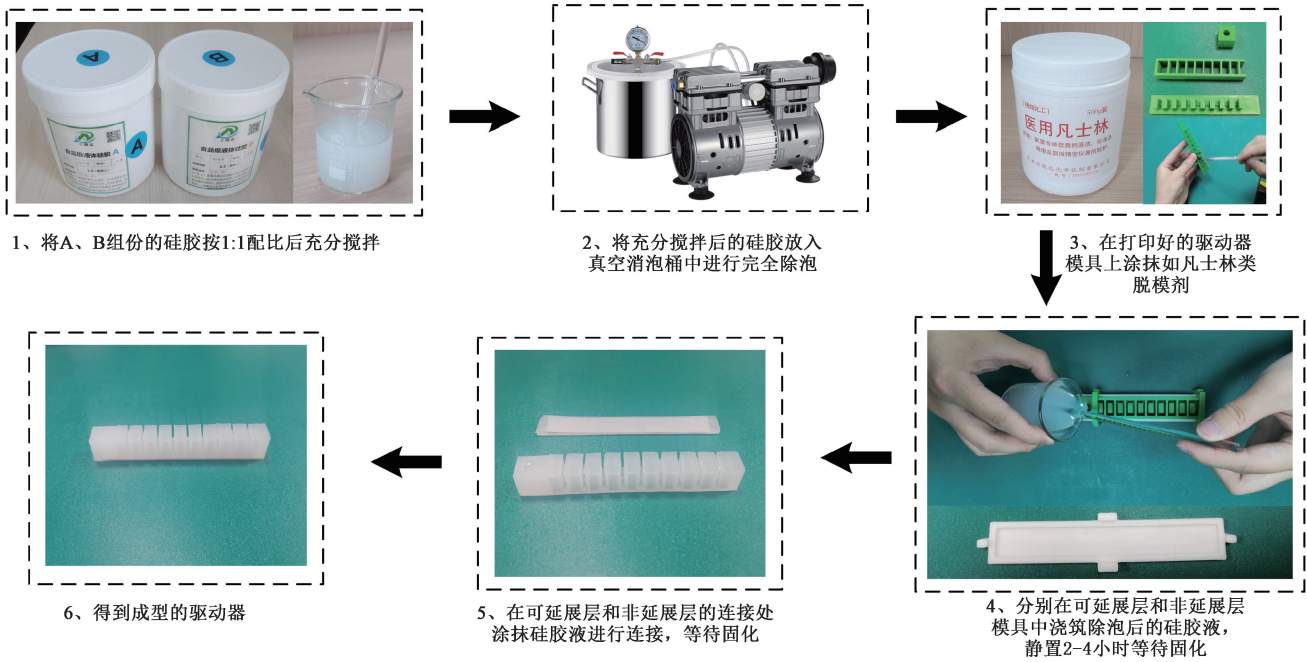


图 11 驱动器制作过程  
Fig. 11 Making steps of the actuator

表 3 气动实验平台元件表

Table 3 Components of the pneumatic 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, 储气罐容积 8 L	武汉芝浦工具有限公司
过滤减压阀	AW20-02B	调压范围 0.05~0.85 MPa, 过滤精度 5 μm	日本 SMC 公司
电气比例阀	ITV1010-041S	调压 0.005~0.1 MPa, 线性性 1% F. S. 之内	日本 SMC 公司
测力传感器	DJSX-16-2KG	测量范围 0~20 N, 滞后 0.1% F. S., 非线性性 0.1% F. S.	上海狄佳传感科技有限公司
数显变送器	DJYB-800A	电源电压 18~30 V, 频率 50 Hz/60 Hz, 测量误差 60.1% F. S.	上海狄佳传感科技有限公司
PCI 卡	PCI-1721-BE	4 路 AO, 16 路 DI、DO	研华
工控机	IPC610-L	Core i7-6700, 3.4 GHz/64 GB	研华

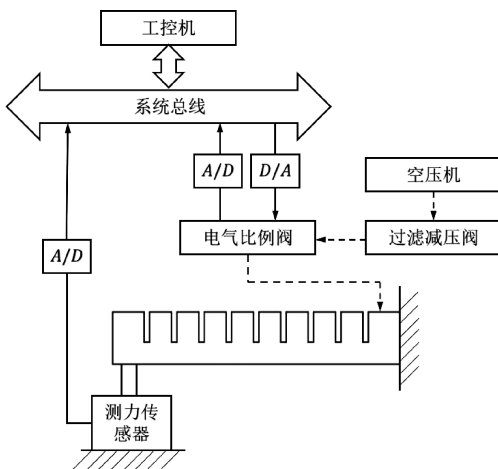
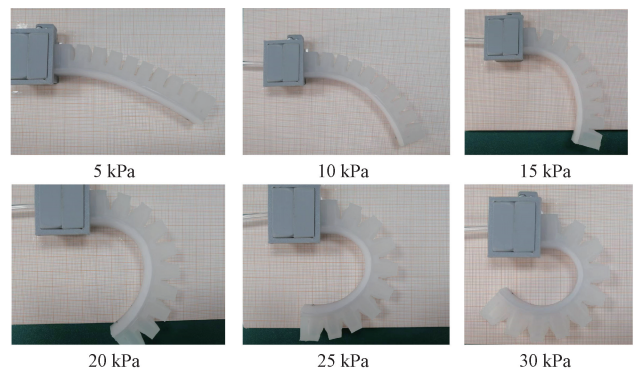


图 12 气动实验平台原理图

Fig. 12 The schematic diagram of the pneumatic experimental platform



(a) 同结构参数常曲率驱动器  
(a) Constant curvature actuator with same structural parameters



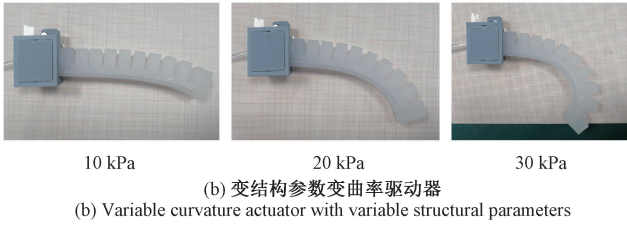


图 13 驱动器弯曲实验

Fig. 13 Bending experiment of the actuator

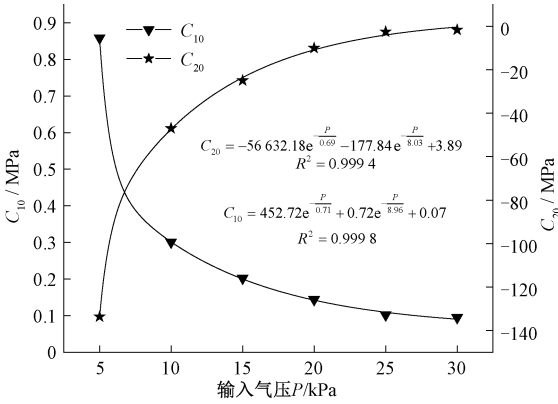


图 14 材料参数随输入气压的拟合曲线图

Fig. 14 Fitting curve of material parameters with input pressure

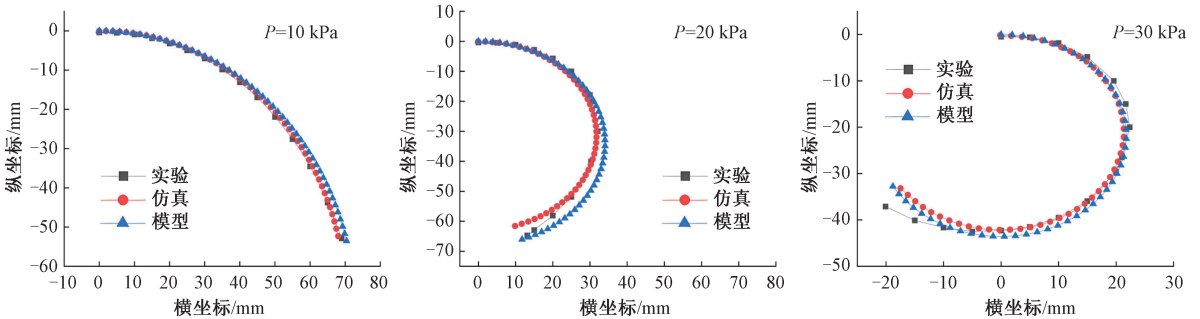
同结构参数常曲率模型和变结构参数变曲率模型得到的轨迹与实验和仿真轨迹均比较接近,表明了理论模型的有效性。

在此基础上,分别计算实验、仿真和模型数据三者之间的均方根误差 (root mean squared error, RMSE),其计算规则为:

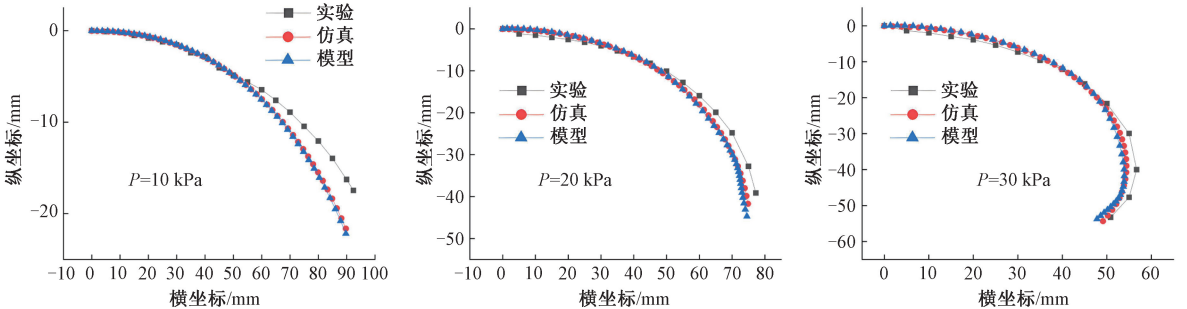
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2]}{n}} \quad (24)$$

式中:  $n$  为数据点的个数,  $(x_i, y_i)$  为有限元仿真和模型数据对应的非延展层坐标值,  $(x'_i, y'_i)$  为实验数据对应的坐标值,计算的均方根误差统计表如表 4 所示。

由表 4 可知,实验轨迹同有限元仿真和模型预测轨迹均比较接近,且其均方根误差均在可接受范围内。实验同有限元仿真轨迹之间的误差较小,轨迹基本吻合。造成误差的原因主要是软体驱动器制做过程中尺寸精度难以保证,存在较小的误差,同时粘合可延展层和非延展层时可能导致不同粘合处厚度不均,以上问题都会影响驱动器的弯曲效果。实验同模型预测轨迹之间的误差比较大,造成误差的原因主要有 4 方面:1)模型中存在一定的近似与假设;2)模型的制作误差;3)硅橡胶类超弹性材料在大应变下会表现出高度非线性特性;4)数据的处理方式也会产生一定的误差。



(a) 同结构参数常曲率驱动器  
(a) Constant curvature actuator with same structural parameters



(b) 变结构参数变曲率驱动器  
(b) Variable curvature actuator with variable structural parameters

图 15 驱动器弯曲变形对比图

Fig. 15 Comparison of actuator bending deformation

表4 均方根误差统计表  
Table 4 Root mean square error (RMSE) statistics

		气压值 $P/kPa$	5	10	15	20	25	30
同结构参数驱动器	RMSE	实验-仿真	1.067	0.765	1.336	0.915	1.932	1.139
		实验-模型	2.750	0.315	0.511	2.411	4.071	2.134
		气压值 $P/kPa$	10	20	30			
变结构参数驱动器	RMSE	实验-仿真	1.547	1.427	0.850			
		实验-模型	1.751	2.720	2.646			
		气压值 $P/kPa$	10	20	30			

4.4 驱动器的力输出特性

为了分析软体驱动器非延展层内侧的输出力  $F_N$  (正压力) 与输入气压的关系, 搭建了输出力测试平台, 如图 16 所示。

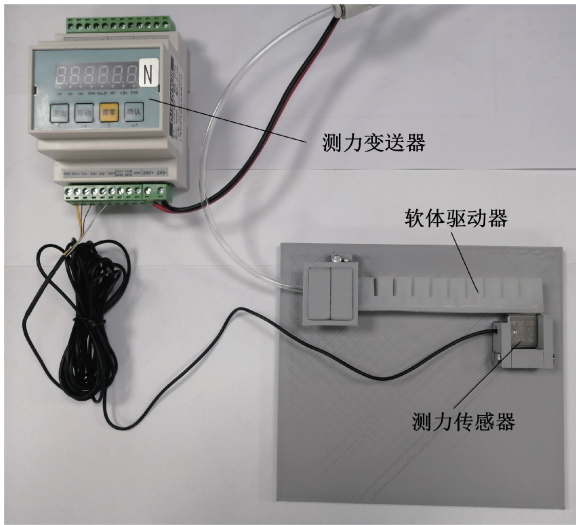


图 16 软体驱动器输出力测试平台

Fig. 16 Soft actuator force testing platform

将测力传感器进行标定并置零, 软体驱动器的末端放置在测力传感器的自由端, 通过加压后测力传感器的自由端限制驱动器的变形来测量驱动器的输出力。向驱动器施加增量为 5 kPa 的气压, 得到软体驱动器的输出力与输入气压的关系, 如图 17 所示。

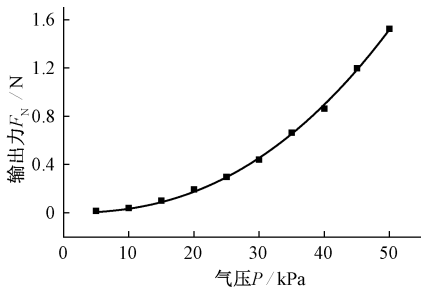


图 17 软体驱动器输出力与输入气压的关系

Fig. 17 Relationship between the output force of the soft actuator and the input pressure

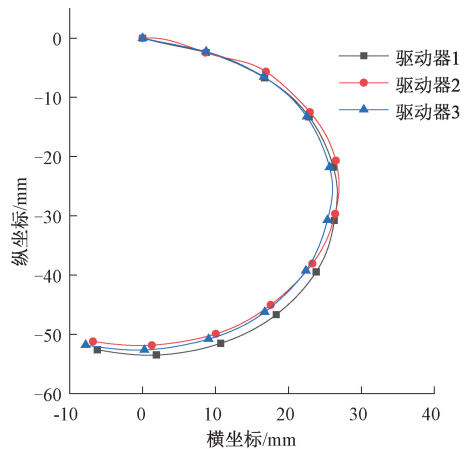
随着腔室内压强的增大, 软体驱动器非延展层内侧的正压力呈 Allometric 模型分布, 当气压达到 50 kPa 时, 输出力可达 1.5 N 左右。输出力同输入气压的关系可表示为:

$$F_N = a \cdot P^b \quad (25)$$

式中:  $a$ 、 $b$  为常数。

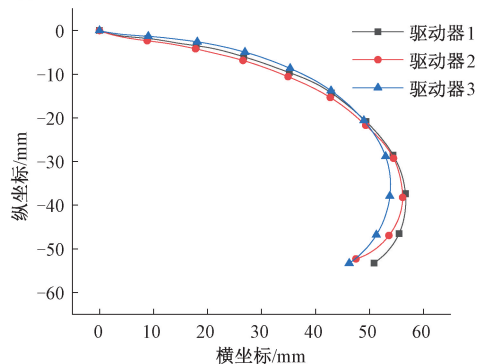
4.5 多驱动器一致性误差分析

软体机器人由于材料的特殊性, 在变形特性上和力输出特性方面往往存在一致性差异。对此分别制作了 3 个同规格的驱动器进行平行实验, 以研究多驱动器在同工况下的变形一致性和输出力一致性, 如图 18 所示。



(a) 常曲率驱动器变形对比

(a) Comparison of deformation in constant curvature actuators



(b) 变曲率驱动器变形对比

(b) Comparison of deformation in variable curvature actuator

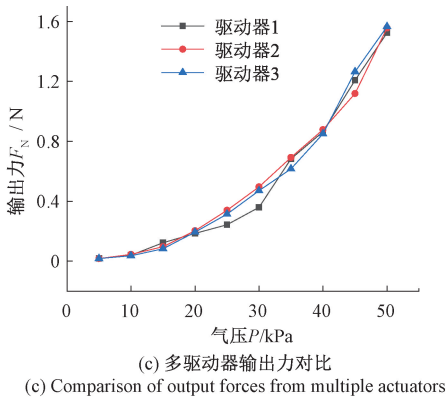


图 18 多驱动器一致性对比图

Fig. 18 Multi-actuator consistency comparison

图 18(a) 为 3 个和图 18 (b) 分别为 3 个同规格的常曲率驱动器和变曲率驱动器在同输入气压下的变形曲线, 图 18 (c) 为 3 个参考驱动器的力输出曲线。

在此基础上计算出了多驱动器的变形一致性误差  $e_1$  和力输出一致性误差  $e_2$ , 其计算规则分别如式 (26) 和 (27) 所示。

$$e_1 = \frac{RMSE_{12} + RMSE_{13} + RMSE_{23}}{3} \quad (26)$$

式中:  $RMSE_{12}$ 、 $RMSE_{13}$  和  $RMSE_{23}$  分别表示同规格驱动器弯曲轨迹两两之间的均方根误差。

$$e_2 = \frac{\sum_{i=1}^3 RMSE_{FN_i}}{3} \quad (27)$$

$$RMSE_{FN_i} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_p} (F_{ij} - \bar{F}_{ij})^2}{n_p}} \quad (28)$$

式中:  $RMSE_{FN_i}$  表示第  $i$  个驱动器的力输出值与多驱动器力输出平均值的均方根误差,  $F_{ij}$  表示第  $j$  个气压节点时驱动器  $i$  的力输出值,  $\bar{F}_{ij}$  表示第  $j$  个气压节点时 3 个驱动器在该处的输出力平均值,  $n_p$  为测量输出力时所选取的气压节点个数,  $n_p = 10$ 。

多驱动器的一致性误差统计表如表 5 所示。

表 5 一致性误差统计表

Table 5 Consistency error statistics

常曲率驱动器	$e_1$	$RMSE_{12}$	$RMSE_{13}$	$RMSE_{23}$
变形一致性误差	0.854	1.229	0.430	0.904
变曲率驱动器	$e_1$	$RMSE_{12}$	$RMSE_{13}$	$RMSE_{23}$
变形一致性误差	0.869	0.761	0.624	1.221
多驱动器输出力	$e_2$	$RMSE_{FN_1}$	$RMSE_{FN_2}$	$RMSE_{FN_3}$
一致性误差	0.033	0.034	0.034	0.030

综合图 16 和表 5 可知,即使是同一结构参数的驱动器,在同一气压载荷驱动下弯曲变形和输出力都存在一定的差异,但一致性误差的结果均在可接受范围内。分析产生一致性误差的原因如下:1) 制做驱动器的硅胶材料在生产过程中可能存在微小的不均匀性,如分子链长度、交联密度、添加剂分布等;2) 软体驱动器在制作过程中产生的厚度不均、形状偏差等制作误差;3) 硅胶的老化程度不同;4) 硅胶材料在多次变形后产生的应力松弛现象。以上因素都会影响到驱动器的力学性能,导致变形程度和输出力不一致,产生一致性误差。

## 5 弯曲型软体驱动器的应用

根据弯曲型软体驱动器的变形特性,可将其应用于软体抓手和边界形状控制。由输出力和输入气压关系,可得到驱动器在特定输入气压下的输出力。为验证软体驱动器的应用,制作了一个三指软体抓手,其可抓取物体的质量为:

$$m = \frac{\eta \mu F_N}{g} \quad (29)$$

式中:  $\eta$  表示软体抓手抓指的个数,  $\mu$  表示软体驱动器硅胶表面与被抓取物体之间的摩擦系数,  $g$  表示重力加速度。

如图 19 所示为软体抓手和抓取部分物体的效果图,软体抓手所能抓取的最大物体质量不仅仅取决于软体抓手的输出力,还取决于二者之间的摩擦系数。由图 19 (b) ~ (g) 可以看出,该软体抓手能够轻松抓取不同形状、体积和质量的物体,而且对于被抓取物体的表面轮廓有良好的适应性。在柔软易碎物品的抓取上有独特的优势,展现出良好的适应性、稳定性和灵活性,最大能抓取约 350 g 的物体,远远大于其自身的质量。相比常曲率软

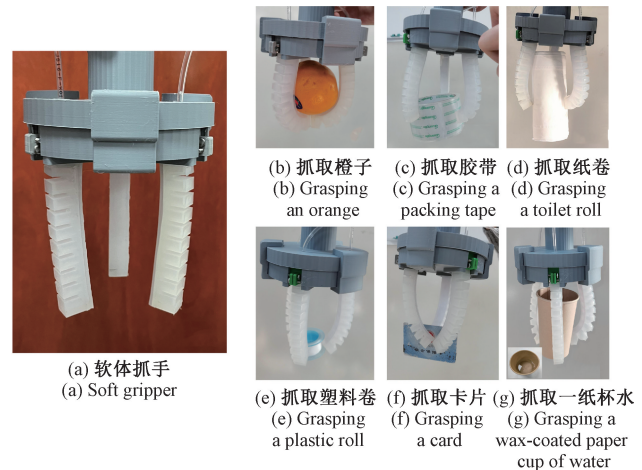


图 19 软体抓手及抓取性能实验测试

Fig. 19 Experimental testing of soft gripper and its grasping performance

体执行器,变曲率软体执行器在末端更具灵活性,尤其在抓取尺寸较小的物体时具有明显的优势。

## 6 结 论

本文基于分段常曲率假设、Yeoh 本构模型和虚功原理建立了同结构参数常曲率 pneu-net 型软体驱动器的弯曲数学模型,通过有限元仿真分析了结构参数对弯曲性能的影响。在此基础上提出了变结构参数变曲率驱动器结构,建立了其数学模型,并通过有限元仿真和实验验证了理论模型的有效性,分析了多驱动一致性误差,实现了同气压下驱动器的变曲率控制。最后对软体驱动器的输出力进行了测试,并制作了一个三指软体抓手进行了不同物体的抓取测试。

实验结果表明:同结构参数驱动器实际轨迹与模型预测轨迹之间的均方根在气压 10 kPa 下达到最小值 0.315,在 25 kPa 气压下达到最大值 4.071;变结构参数驱动器实际轨迹与模型预测轨迹之间的均方根在气压 10 kPa 下达到最小值 1.751,在 20 kPa 气压下达到最大值 2.72。常曲率多驱动器一致性误差为 0.854;变曲率驱动器变形一致性误差为 0.869;多驱动器输出力一致性误差为 0.033。软体抓手可抓取如社保卡等薄壁物体,桔子等水果类物体和其它不规则形状的物体,最大可抓取 350 g 重量的物体。研究对多腔室变曲率软体驱动器的建模与控制研究提供了新的思路,该软体驱动器相比于传统的刚性部件在物体抓持上具有更高的自适应性和柔顺性,并在康复医疗领域有应用前景。

## 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 ] XU F Y, DAI S Y, JIANG Q SH, et al. Developing a climbing robot for repairing cables of cable-stayed bridges[J]. *Automation in Construction*, 2021, 129: 103807.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] KWOK K W, WURDEMANN H, AREZZO A, et al. Soft robot-assisted minimally invasive surgery and

interventions: Advances and outlook[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2022, 110(7): 871-892.

- [ 5 ] LI Y X, WU ZH F, CHEN Y F, et al. Multi-material embedded 3D printing for one-step manufacturing of multifunctional components in soft robotics[J]. *Additive Manufacturing*, 2024, 85: 104178.
- [ 6 ] XU Y, ZHUO J SH, FAN M Y, et al. A bioinspired shape memory alloy based soft robotic system for deep-sea exploration[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2024, 6(5): 202300699.
- [ 7 ] SUI M L, OUYANG Y M, JIN H, et al. A soft-packaged and portable rehabilitation glove capable of closed-loop fine motor skills[J]. *Nature Machine Intelligence*, 2023, 5(10): 1149-1160.
- [ 8 ] 刘意, 刘志伟, 梁永日. 离子型电活性聚合物驱动器的研究进展[J]. *高分子通报*, 2023, 36(1): 21-40.  
LIU Y, LIU ZH W, LIANG Y R. Research progress of ionic electroactive polymer actuators[J]. *Polymer Bulletin*, 2023, 36(1): 21-40.
- [ 9 ] PANTULA A, DATTA B, SHI Y P, et al. Untethered unidirectionally crawling gels driven by asymmetry in contact forces[J]. *Science Robotics*, 2022, 7(73): eadd2903.
- [ 10 ] HAN B, MA ZH CH, ZHANG Y L, et al. Reprogrammable soft robot actuation by synergistic magnetic and light fields[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(13): 2110997.
- [ 11 ] CHEN H Y, MA Y Y, CHEN W D. Design and optimization of an origami-inspired foldable pneumatic actuator[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023, 9(2): 1278-1285.
- [ 12 ] SUN X Y, NOSE A, KOHSAKA H. A vacuum-actuated soft robot inspired by drosophila larvae to study kinetics of crawling behaviour[J]. *Plos One*, 2023, 18(4): 0283316.
- [ 13 ] DEZAKI M L, BODAGHI M, SERJOU EI A, et al. Soft pneumatic actuators with controllable stiffness by bio-inspired lattice chambers and fused deposition modeling 3D printing[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2023, 25(6): 2200797.
- [ 14 ] WANG D, JIANG CH R, GU G Y. Findings from Shanghai Jiao Tong University reveals new findings on robotics[J]. *Robotics and Mochine Learning Daily*

- News, 2024, 2:26.
- [15] MA K, CHEN X D, ZHANG J, et al. Inspired by physical intelligence of an elephant trunk: Biomimetic soft robot with pre-programmable localized stiffness[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 8(5): 2898-2905.
- [16] 高东, 孟凡勇, 宋言明, 等. 植入光纤光栅的软体驱动器形状传感研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 155-163.  
GAO D, MENG F Y, SONG Y M, et al. Research on the shape sensing of embedded fiber bragg grating for soft actuator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 155-163.
- [17] MOSADEGH B, POLYGERINOS P, KEPLINGER C, et al. Pneumatic networks for soft robotics that actuate rapidly [J]. Advanced Functional Materials, 2014, 24(15): 2163-2170.
- [18] 乔景慧, 李洪达, 陈宇曦, 等. 机理与数据驱动的软体手弯曲角度软测量模型[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(6): 147-158.  
QIAO J H, LI H D, CHEN Y X, et al. Soft sensor model of bending angle integrated mechanism and data for soft gripper[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(6): 147-158.
- [19] KATZSCHMANN R K, MARCHESE A, RUS D. Autonomous object manipulation using a soft planar grasping manipulator[J]. Soft Robotics, 2015, 2(4): 155-164.
- [20] ALICI G, CANTY T, MUTLU R, et al. Modeling and experimental evaluation of bending behavior of soft pneumatic actuators made of discrete actuation chambers[J]. Soft Robotics, 2018, 5(1): 24-35.
- [21] WAKIMOTO S, SUZUMORI K, OGURA K. Miniature pneumatic curling rubber actuator generating bidirectional motion with one air-supply tube[J]. Advanced Robotics, 2012, 25(9-10): 1311-1330.
- [22] HELPS T, ROSSITER J. Proprioceptive flexible fluidic actuators using conductive working fluids [J]. Soft Robotics, 2018, 5(2): 175-189.
- [23] 王田苗, 郝雨飞, 杨兴帮, 等. 软体机器人: 结构, 驱动, 传感与控制[J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 1-13.  
WANG T M, HAO Y F, YANG X B, et al. Soft robotics: Structure, actuation, sensing and control [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(13): 1-13.
- [24] POLYGERINOS P, LYNE S, ZHENG W, et al. Towards a soft pneumatic glove for hand rehabilitation[C]. 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2013: 1512-1517.
- [25] GARIYA N, KUMAR P. A comparison of plane, slow pneu-net, and fast pneu-net designs of soft pneumatic actuators based on bending behavior [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 65: 3799-3805.
- [26] MANNS M, MORALES J, FROHN P. Additive manufacturing of silicon based PneuNets as soft robotic actuators [J]. 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems, 2018: 328-333.
- [27] 范需, 戴宁, 王宏涛, 等. 气动网格软体驱动器弯曲变形预测方法[J]. 中国机械工程, 2020, 31(9): 1108-1114.  
FAN X, DAI N, WANG H T, et al. Predictive methods for the bending deformation of pneumatic mesh-based soft actuators [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(9): 1108-1114.

## 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,现为兰州理工大学副教授,主要研究方向为机械系统动力学和机器人技术。

E-mail:laixi\_zh@163.com

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



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 in 2022 from Lanzhou University of Technology. He is currently a M. Sc. candidate at Lanzhou University of Technology. His main research interests include soft robotics, robot modelling and control.



**倪庚垚**,2022 年于青岛大学获得学士学位,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:15163678789@163.com

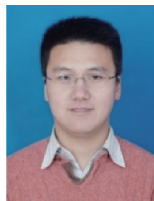
**Ni Gengyao** received his B.Sc. degree in 2022 from Qingdao University. He is currently a M.Sc. candidate at Lanzhou University of Technology. His main research interests include soft robotics, robot modelling and control.



**马凯威**,2013 年于安阳工学院获得学士学位,2016 年于厦门理工学院获得硕士学位,2020 年于东南大学获得博士学位,现为南京邮电大学讲师,主要研究方向为软体机器人、机器人建模与控制。

E-mail:makaiwei@njupt.edu.cn

**Ma Kaiwei** received his B.Sc. degree in 2013 from Anyang Institute of Technology, received his M.Sc. degree in 2016 from Xiamen University of Technology, and received his Ph.D. degree in 2020 from Southeast University. He is now a lecture in Nanjing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include soft robotics, robot modelling and control.



**徐丰羽**,2002 年于长春工业大学获得学士学位,2005 年于合肥工业大学获得硕士学位,2009 年于东南大学机械获得博士学位,现为南京邮电大学教授,主要研究方向为机器人及自动化,具身智能装备控制技术。

E-mail:xufengyu598@163.com

**Xu Fengyu** received his B.Sc. degree in 2002 from Changchun University of Technology, received his M.Sc. degree in 2005 from Hefei University of Technology, and received his Ph.D. degree in 2009 from Southeast University. Now he is a professor in Nanjing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include robotics and automation and embodied intelligent equipment control technology.