

PDMS/PTFE 限制层材料软体机械手设计与性能试验

朱银龙 杨梓康 赵 虎 王 旭 刘 英
(南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037)

摘要: 为抑制软体驱动器弯曲过程中的不必要变形,提高软体机械手抓取能力,提出一种限制层材料为 PDMS 和 PTFE 混合制备的软体机械手。通过调整 PDMS 和 PTFE 之间的质量比来改变限制层刚度,进而改变软体机械手的弯曲角度。考虑到软体机械手工作时,应变层变形远大于限制层,采用 Yeoh 和 Neo-Hookean 形式的应变能方程表述应变层和限制层材料力学行为。基于模型和力矩平衡原理建立软体驱动器弯曲角度数学模型,进而研究限制层材料和结构参数对软体机械手弯曲性能的影响。利用单轴拉伸试验获取不同质量比的 PDMS 和 PTFE 混合制备的限制层样品应力应变曲线,并拟合获取 Yeoh 模型材料参数,进而进行有限元仿真分析,确定限制层材料的最佳比例。对不同限制层材料制成的驱动器进行弯曲角度测试,试验结果与理论分析偏差在 5% 以内,验证了数学模型的准确性。同时,驱动器的末端力测试结果表明,限制层 PDMS/PTFE 质量比为 8:1 的驱动器明显优于纯硅胶软体驱动器,最大末端力可达 2.45 N。使用软体机械手对多种物品进行抓取试验,其最大抓取质量达 420 g。

关键词: 软体机械手; 驱动器; 有限元仿真; 弯曲特性; 限制层材料; PDMS/PTFE

中图分类号: TP241 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)10-0441-09 **OSID:** 

Influence Analysis of PDMS/PTFE Limiting Layer Material on Grasping Performance of Soft Manipulators

ZHU Yinlong YANG Zikang ZHAO Hu WANG Xu LIU Ying
(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: To suppress unnecessary deformation during the soft actuator's bending and improve the soft manipulator's gripping ability, a soft manipulator with limiting layer materials of PDMS and PTFE was proposed. The stiffness of the limiting layer can be changed by adjusting the mass ratio of PDMS and PTFE, which directly affected the bending angle of the soft manipulator. Considering that the deformation of the strain layer was much larger than that of the constraint layer when the soft manipulator worked, Yeoh and Neo-Hookean form of strain energy function were used to describe the mechanical behavior of the strain layer and the constraint layer respectively. Based on the above models and the principle of torque balance, a mathematical model of the bending angle of the soft actuator was established, and then the influence of the material of the limiting layer and actuator structural parameters on its bending performance was investigated. The stress-strain curve of the limiting layer sample made of PDMS and PTFE with different mass ratios was obtained by uniaxial tensile test, and the material parameters of the Yeoh model were fitted, and then finite element simulation analysis was carried out to determine the optimal proportion of the restricted layer material. Finally, the bending angle of the actuators made of different limiting layers was tested, and the deviation between experimental results and theoretical analysis was within 5%, verifying the mathematical model's accuracy. The end force test results showed that the actuator with the PDMS/PTFE ratio of 8:1 was better than that of pure silicone soft actuator, and the maximum end force can reach 2.45 N. Using a soft manipulator for grasping experiments on various items, the maximum grasping mass was 420 g.

Key words: soft manipulator; actuator; finite element simulation; bending characteristics; materials for limiting layer; PDMS/PTFE

收稿日期: 2023-05-18 修回日期: 2023-07-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51305209)、江苏省高等学校自然科学研究项目(18KJA4600050、21KJB460010)、江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目(GDZB-024)和机器人学国家重点实验室开放项目(2018-016)

作者简介: 朱银龙(1981—),男,副教授,博士,主要从事机器人与智能农业装备研究,E-mail: ylzhu@njfu.edu.cn

通信作者: 刘英(1965—),女,教授,博士生导师,主要从事人工智能、机器人应用与农产品检测研究,E-mail: lying_new@163.com

0 引言

软体机器人是一个新兴的研究领域^[1-2],主要采用柔性材料制作,具有良好的环境适应性,可以替代传统的刚性机器人完成某些特定工作,在医疗康复、救援勘探、果蔬采摘等领域有着广阔应用前景^[3-4]。软体机械手是软体机器人的一个重要分支,相比于传统的刚性机械手,具有更好的人机交互性^[5-7]。应用于农业生产领域的夹持和搬运作业时,可有效提升农业生产力。常见的软体机械手采用气压驱动,一般由两个及以上软体驱动器构成^[8-9]。气动软体驱动器主要有气动网格型和纤维增强型两种^[10-12]。气动网格型驱动器,具备响应速度快、负载能力高、环境适用性强等特点^[13-17]。但气压较高时,驱动器在径向方向上会产生膨胀,影响驱动器弯曲性能。

近年来,学者采用各种方法如通过纤维缠绕驱动器或加入纸张等材质制造变刚度层以提高软体机械手变形能力^[18-23]。李健等^[24]设计的草莓单指采摘软体抓手,对单指抓手的上下端面进行锯齿状处理,优化了弯曲过程中产生的褶皱现象,在维持一定支撑力的同时,提升了软体机械手的弯曲能力。武兆平等^[25]提出了一种嵌入铰链连接刚性单元作为内骨骼的柔性抓手,极好地兼顾了刚性和柔顺性,增强了抓手的形状适应性和抓取能力。郭钟华等^[26]受草本植物茎与花冠结构启发,设计了一种螺旋状抓手的夹持器,通过逐个腔室嵌入筋板的方式提高了抓手的末端输出力。JIANG 等^[27]设计的链式干扰软体机械手,其内部嵌入链状颗粒结构,且整个硅胶弹性体外部被纤维线包裹住,限制机械手的径向变形,增强抓取能力。BERNAT 等^[28]设计的一种磁流变两指软抓手,使用硅胶、铁粉等制成磁流变弹性体抓手,通过磁场作用控制抓手的开合,其优点之一是在不受外部刺激时可以保持闭合状态。GAO 等^[29]设计了一种由变刚度柔性驱动器组成的抓手,可以对驱动器施加负压,提高了层状结构间的摩擦力,阻碍层与层之间的相对运动,从而增加刚度和承载能力。然而这些方法都存在一些问题,比如:纤维和纸张都是非超弹性材料,无法和驱动器本身完全贴合,在整体充气变形过程中,材料之间容易发生错动,同时容易导致结构复杂。本文提出一种限制层材料为 PDMS、PTFE 的软体驱动器。通过调节两种材料的质量比,改变软体驱动器的刚度,进而改变软体机械手的抓取能力。基于 Yeoh、Neo-Hookean 模型和力矩平衡原理建立软体驱动器弯曲角度与气压之间的数学模型。根据该模型,分析驱动器限制层

材料和结构参数对弯曲角的影响。利用有限元仿真分析得到限制层材料的最佳质量比。对不同限制层材料的驱动器进行弯曲性能测试,以验证理论模型的准确性。

1 软体机械手结构设计、制作及建模

1.1 软体机械手结构设计

气动软体机械手由安装底座和 3 个软体驱动器组成,每个驱动器根部连接着气管,通过夹具圆周固定在安装底座上,整体结构如图 1 所示。该软体驱动器拥有良好的灵活性和刚度,组装成的软体机械手更容易抓取物体,且不易损坏物体的表面。

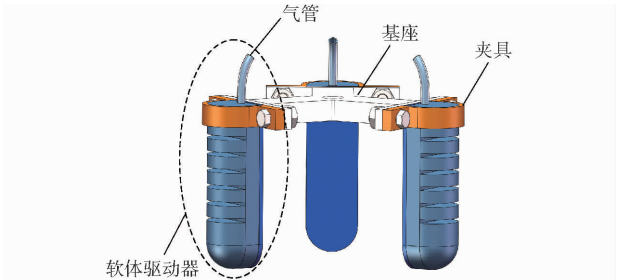


图 1 软体机械手整体结构图
Fig. 1 Overall structure of soft hand manipulator

气动软体驱动器作为主要承力部分,结构由应变层和限制层构成,灰蓝色部分为应变层,深蓝色为限制层。上部应变层是半圆形多腔室状结构,间隙部分为矩形腔道,下部限制层为厚度均一的平板状结构。内部腔室互相独立均匀排列,并由限制层将应变层封闭连接一体,整体通过驱动器根部的气管进行充放气。其半圆形腔室截面如图 2 所示, R 、 h 、 r 、 t 分别为截面半径、截面高度、截面壁厚以及驱动器限制层厚度。

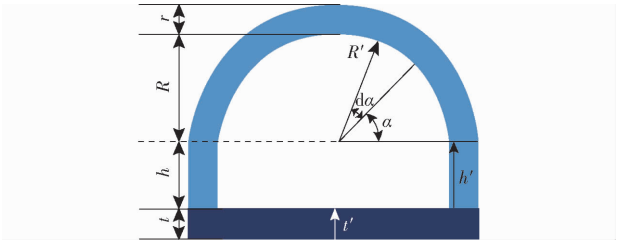


图 2 腔室截面图
Fig. 2 Section of chamber

1.2 软体驱动器制作流程

为了对软体驱动器进行试验验证,根据以上分析得到的结构和材料参数,对软体驱动器进行实物制作,本文均采用软材料固化成型法进行制作,制作流程如图 3 所示。

1.3 软体驱动器弯曲变形数学建模

为了描述软体驱动器弯曲角度和充气压力之间的关系,需要对其运动特性进一步分析,并建立驱动

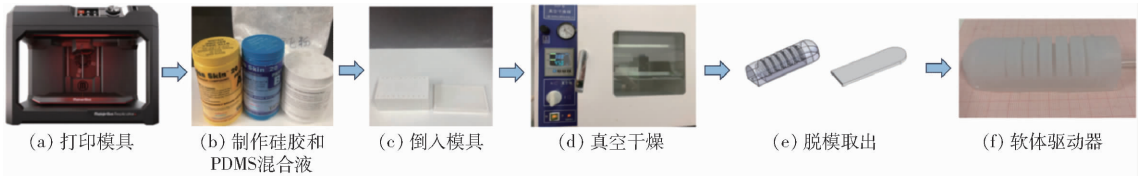


图 3 软体驱动器制作流程图

Fig.3 Flow chart of soft actuator production

器变形的理论模型。当对软体驱动器输入气压 P , 腔室的应变层发生膨胀变形, 而底部限制层轴向应变较小使得驱动器向下均匀弯曲运动, 基于此变形特点, 采用分段常曲率模型来求解。即假设每对腔室的弯曲曲率恒定, 各个独立腔室弯曲后的圆弧段连接组成整个驱动器的弯曲圆弧段。每对腔室对应一个弯曲角 φ , 驱动器弯曲角为 $\theta/2$, 建立的弯曲模型如图 4 所示, 包括几何关系

$$\begin{cases} L = L_0 + \Delta L \\ \theta = \frac{L_0}{a} \varphi \\ \Delta L = \theta \Delta H \end{cases} \quad (1)$$

式中 L_0 ——驱动器未变形状态初始长度
 L ——驱动器充气变形后的轴向长度, 该长度与距限制层底面高度有关
 ΔL ——驱动器变形前后的长度变化量
 ΔH ——驱动器水平方向截面相对于底面的偏移距离
 θ ——驱动器变形状态下的弯曲圆心角
 a ——一对腔室对应的长度

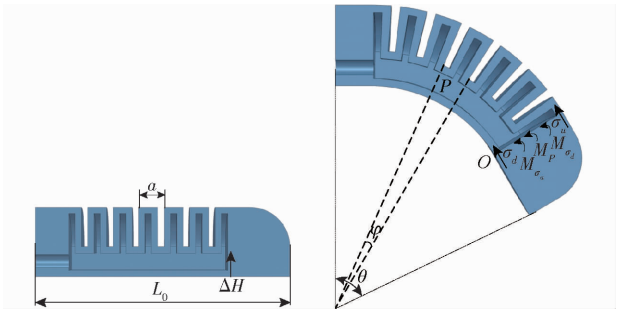


图 4 变形前后软体驱动器示意图

Fig.4 Schematic of soft actuator before and after deformation

软体驱动器变形时, 应变层变形远大于限制层。另外, 软硅胶是一种大变形不可压缩材料, 采用 Yeoh 形式的应变能密度函数描述应变层力学特性, 其简化的典型二项参数形式为

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

其中 $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$

式中 W ——应变能密度函数
 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ——轴向、径向和厚度方向主拉伸比
 C_{10}, C_{20} ——硅橡胶材料的 Yeoh 模型材料参数, 由拉伸试验数据拟合确定

主应力 σ_{iu} 可由应变能函数对主伸长比求偏导数得到, 为

$$\sigma_{iu} = \frac{\partial W}{\partial \lambda_{iu}} - \frac{p}{\lambda_{iu}} = 2\lambda_{iu} [C_{10} + 2C_{20}(I_1 - 3)] - \frac{p}{\lambda_{iu}} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

式中 λ_{iu} ——应变层各方向上的拉伸比
 p ——静水压力, 可通过不可压缩条件确定
在驱动器弯曲变形过程中, 假设应变层在径向上没有变形, 所以存在径向拉伸比 λ_{2u} 为 1, 对应其径向应力 σ_{2u} 为 0。因此, 由式 (3) 可得静水压力 p 为

$$p = 2\lambda_{2u}^2 [C_{10} + 2C_{20}(I_1 - 3)] \quad (4)$$

由于材料的不可压缩假设和径向应变被忽略, 驱动器弯曲变形时, 硅胶层的厚度将减小。如果轴向拉伸比 λ_{1u} 为 λ_u , 则对应的应变层周向拉伸比 λ_{3u} 为 $1/\lambda_u$ 。同时考虑到周向应力 σ_{3u} 远小于轴向应力 σ_{1u} , 可计算出轴向应力 σ_{1u} 为应变层唯一主应力 σ_u 。

从 Yeoh 模型中可以得到应变层轴向应力与轴向应变的关系为

$$\sigma_u = 2 \left(\lambda_u - \frac{1}{\lambda_u} \right) [C_{10} + 2C_{20}(I_1 - 3)] \quad (5)$$

其中 $\lambda_u = L_1/L_0 = (L_0 + \theta h')/L_0$
式中 L_1 ——软体驱动器应变层充气变形后的轴向长度
 h' ——腔室应变层截面与限制层上表面之间的距离

σ_u ——应变层截面上产生的应力

Neo-Hookean 模型主要适用于小应变变形, 符合软体驱动器限制层的变形特性, 因此针对限制层用 Neo-Hookean 模型。其应变能密度函数 W 为

$$W = \frac{\mu}{2} (I_1 - 3) \quad (6)$$

式中 μ ——材料初始剪切模量, 由应力应变拉伸试验确定

假设限制层径向应变忽略不计, 同样有径向拉伸比 λ_{2d} 为 1。考虑到限制层的拉伸范围较小, 其径向应力 σ_{2d} 显著小于 σ_{1d} 。因此, σ_{1d} 被认为是限制层唯一不消失的主应力, 以后记为 σ_d 。假设在驱动器

限制层厚度方向有一个消失应力(即 $\sigma_{3d}=0$)^[30],可通过式(6)推出驱动器限制层关于 Neo - Hooken 模型的轴向应力与轴向应变关系为

$$\sigma_d=\frac{\partial W}{\partial \lambda_d}-\frac{p}{\lambda_d}=\mu\left(\lambda_d-\frac{1}{\lambda_d^3}\right)$$

(7)

其中 $\lambda_d=L_2/L_0=(L_0+\theta t')/L_0$
式中 L_2 ——软体驱动器限制层充气变形后的轴向长度

t' ——腔室限制层截面与点 O 之间的距离

σ_d ——限制层截面上产生的应力

由软体驱动器充气变形可知,充气压力 P 对腔室末端边界存在驱动力矩 M_p 。驱动器自身受力如图 4 所示,应变层部分应力 σ_u 产生阻力矩 M_{σ_u} ,驱动器限制层部分应力 σ_d 产生阻力矩 M_{σ_d} 。假设驱动器弯曲过程中,腔体截面的应变层和限制层所受应力分别保持一致。软体驱动器平衡状态可通过 $M_p=M_{\sigma_u}+M_{\sigma_d}$ 表示。

充气压力 P 作用的驱动力矩为

$$M_p=\int_0^h2PR(h'+t)dh'+$$

$$2\int_0^{\frac{\pi}{2}}\int_0^R P(R'\sin\alpha+h+t)R'd\alpha dR'$$

(8)

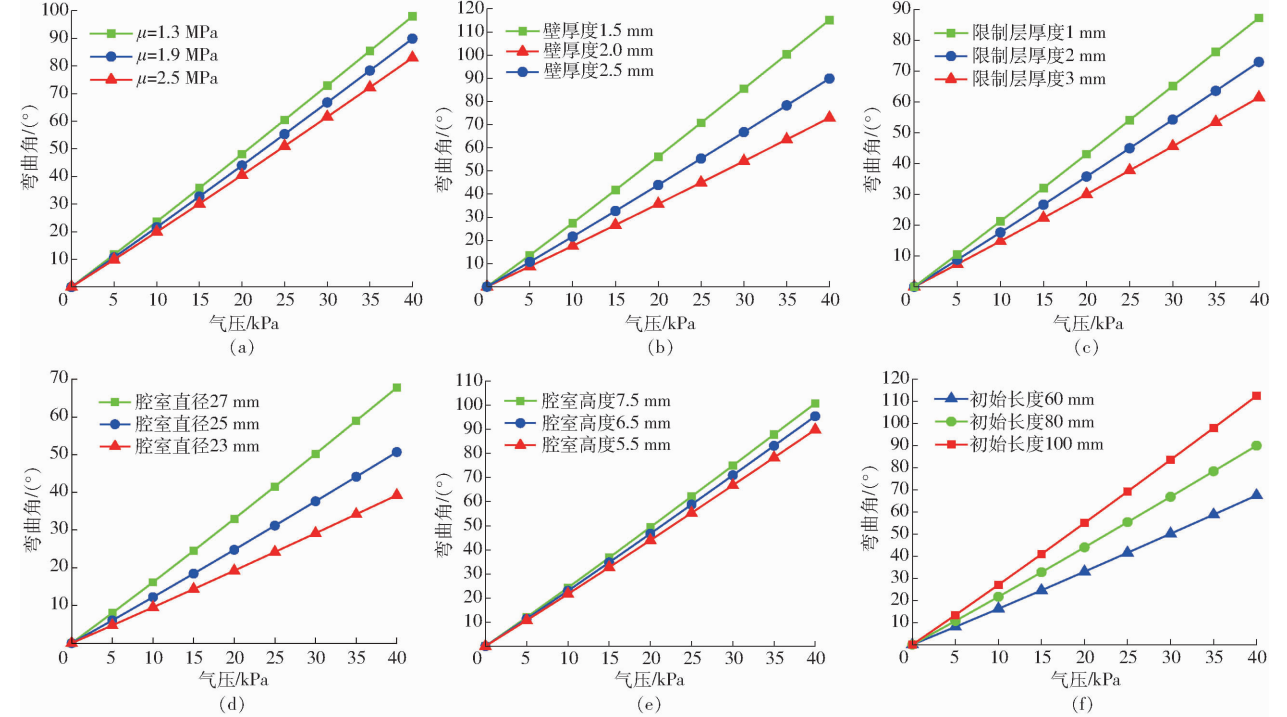


图 5 不同结构参数和限制层材料的软体驱动器理论弯曲角

Fig.5 Theoretical results of bending properties of soft actuator structure parameters and limiting layer materials

μ 较小时,说明限制层材料易拉伸、刚度较低。图 5b、5c 表明,较小的腔室壁厚 r 和限制层厚度 t ,无法抑制驱动器内部气压,导致整体更容易弯曲。由图 5d、5e 可见,随着腔室直径 R 和腔室高度 h 的增大,气体作用在腔室截面上的表面积相应增大,有利于驱动器弯曲。由图 5f 可见,驱动器长度对驱动器的弯曲影响较大。在同一气压情况下, L_0 与弯曲角成正比。根据理论分析结果确定软体驱动器结构参数,如表 1 所示。

在不改变结构参数条件下,通过改进限制层材

表 1 软体驱动器结构参数

Tab.1 Geometrical parameters of soft actuator

参数	数值
软体驱动器初始长度 L_0/mm	80
软体驱动器截面半径 R/mm	10.5
独立的腔室数量 n	7
软体驱动器腔室壁厚度 r/mm	2
软体驱动器腔室高度 h/mm	5.5
软体驱动器底层厚度 t/mm	2
总体尺寸 $L_0 \times W \times H/(\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm})$	$80 \times 25 \times 22$
总质量 G/g	29

料来提升软体驱动器的性能。

2 软体驱动器有限元分析

硅胶材料的本构模型采用唯象模型表述材料的应力与应变关系,通过单轴拉伸试验获取材料参数。使用 Dragon Skin 20 制作软体驱动器的应变层,根据文献[31]获得 Dragon Skin 20 硅胶材料在 Yeoh 模型中的材料参数 $C_{10}=0.11$ 、 $C_{20}=0.02$ 。

考虑到高压下,硅胶材料的限制层极易产生不必要的气球效应,因此需要一种变形小、刚度大的材料进行改进。选择聚二甲基硅氧烷(PDMS)制作限制层。但是,Dragon Skin 20 的应变层与 PDMS 的限制层粘合性较差。借鉴以往研究^[32],在 PDMS 中加入一定比例碳基材料可以获得良好的柔性敏感材料。尝试在 PDMS 中掺杂聚四氟乙烯(PTFE)来增强与硅胶材料的粘合性。针对不同质量比例 PDMS/PTFE 制作的哑铃状拉伸样品,通过多次单轴拉伸试验,找出 2 种材料的最佳质量比。拉伸样品采用 GB/T 528—2009 中哑铃状 2 型尺寸,如图 6 所示。依据 GB/T 528—2009 选取试验机拉伸速率 500 mm/min,试验数据显示限制层材料应力与应变呈近似线性关系。

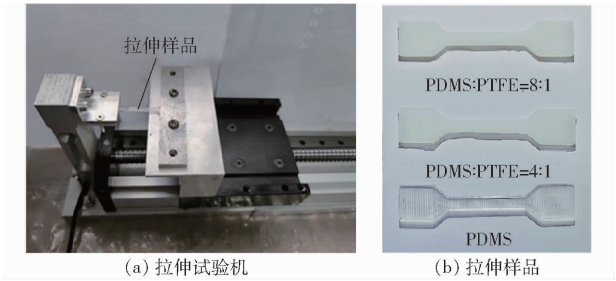


图 6 拉伸试验机与拉伸样品

Fig.6 Tensile testing machine and tensile sample

图 7 为不同质量比样品的拉伸应力-应变曲线,当限制层采用纯 PDMS 时(预聚物与固化剂质量比为 5:1),材料刚度相对较小,在应变超过 0.58,未掺杂 PTFE 的样品应力出现陡降,原因是样品被拉断失去张紧力,力瞬间下降。应变相同

时,PDMS/PTFE 质量比 8:1 的样品应力大于 PDMS/PTFE 质量比 4:1 的样品。可见,在 PDMS 中加入 PTFE 可改变限制层材料刚度,采用质量比 8:1 的 PDMS/PTFE 限制层满足抑制软体驱动器限制层膨胀的要求。

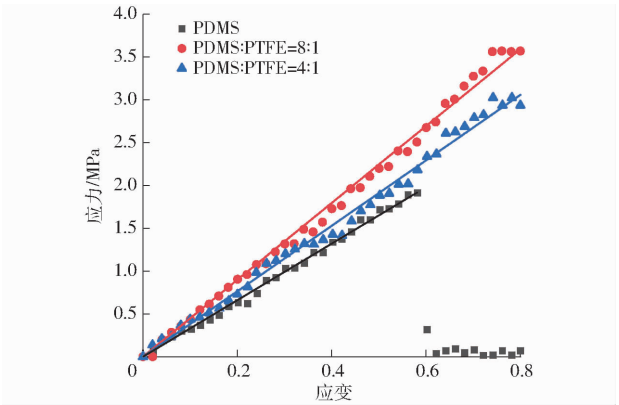


图 7 应力与应变拉伸试验结果

Fig.7 Results of stress and strain tensile test

使用 ABAQUS 软件对 3 种质量比的样品进行评估,得到在 Neo-Hookean 模型下的材料属性。纯 PDMS 的限制层材料 C_{10} 为 0.667。质量比 8:1 和 4:1 的 C_{10} 分别为 0.962、0.841。使用 SolidWorks 软件建立三维模型并导入 ABAQUS,接着将得到的限制层材料参数导入到有限元模型中,得到气压 0~40 kPa 下 PDMS/PTFE 质量比对软体驱动器弯曲性能的影响,结果如图 8 所示。

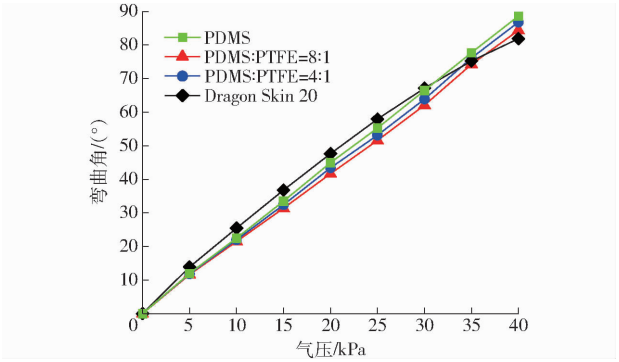


图 8 软体驱动器性能对比

Fig.8 Performance comparison of soft actuator

由图 8 可知,随着气压增大,未使用 PDMS/PTFE 限制层材料的软体驱动器,整体弯曲趋势逐渐降低。在气压 20 kPa 下,4 种限制层材料软体驱动器弯曲性能差异最大。

软体驱动器限制层优化前后仿真对比如图 9 所示。图 9a 为气压取 40 kPa 时 Yeoh 模型的纯硅胶软体驱动器弯曲状态仿真,在内部压力下径向膨胀较大,充气前后限制层底面偏移尺寸为 7.38 mm。纯硅胶软体驱动器内部无法承受较大气压,其整体径向变形严重,出现明显的气球效应。单独对软体驱

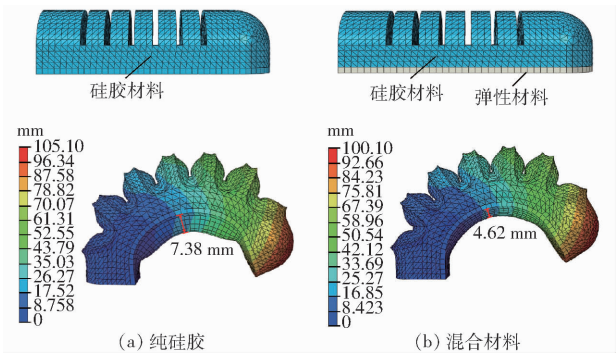


图9 软体驱动器优化前后的仿真对比

Fig.9 Simulation comparison of soft actuator before and after optimization

动器的限制层使用 Neo – Hookean 模型,材料参数 C_{10} 设置为 0.962,图 9b 为气压取 40 kPa 时优化软体驱动器弯曲状态仿真,充气前后底面偏移尺寸为 4.62 mm。仿真结果表明,PDMS/PTFE 质量比 8:1 的样品限制层有较高的初始剪切模量,可以有效约束驱动器限制层膨胀,从而提升性能。

3 软体机械手试验

3.1 试验平台搭建

气动软体驱动器控制系统主要包括气路系统和电路系统,其原理如图 10 所示。系统由压力泵、油雾分离器、单片机、比例阀、电磁阀等部件组成。其中,气路系统实现对驱动器腔室的充放气,电路系统则控制各个气动元件。试验中,通过空气压缩机、油雾分离器过滤干燥压缩空气,并调节减压阀气体压力至 50 kPa,以免充入气压过高,破坏软体驱动器。选取计算机作为上位机,利用 LabView 图形化编程软件制作控制界面,通过单片机串口对下位机发送指令,控制两位三通电磁阀的通断,气体充入软体驱动器,使其弯曲,并使用电气比例阀控制气压。

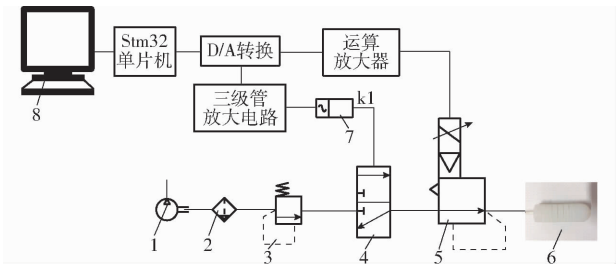


图10 软体驱动器试验原理图

Fig.10 Principle of soft actuator test

1. 气源 2. 油雾分离器 3. 减压阀 4. 电磁阀 5. 电气比例阀
6. 软体驱动器 7. 继电器 8. 上位机

根据图 10 试验原理搭建平台,如图 11 所示。试验中,将驱动器整体固定在坐标纸上,通过单片机控制比例阀气压,从而控制软体驱动器在气压 0 ~

40 kPa 范围内弯曲运动。

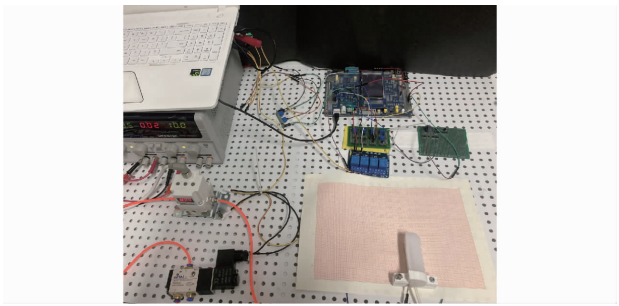


图11 软体驱动器试验平台

Fig.11 Soft actuator test platform

3.2 驱动器弯曲角试验

通过坐标纸,每 5 kPa 记录一次不同限制层材料驱动器的弯曲角度,气压 0 ~ 40 kPa 下 4 种不同限制层材料的软体驱动器试验结果如图 12 所示。针对限制层材料为 PDMS 的软体驱动器进行弯曲角试验,当充入气压超过 40 kPa 时,驱动器应变层和限制层结合处发生破裂,无法承受较大气压。在气压 30 ~ 40 kPa 区间,纯硅胶软体驱动器弯曲性能逐渐减弱,其内部气体大部分消耗在驱动器的膨胀。而 PDMS/PTFE 限制层的软体驱动器的弯曲角度近似线性增大。将限制层 PDMS/PTFE 质量比为 8:1 的驱动器试验结果与理论结果、有限元仿真进行对比,如图 13 所示。其结果可见,不同气压的作用下,驱动器的理论值和试验值较为吻合。理论、仿真与试验的变化趋势大致相同,三者数据最大偏差不到 5%,但在压力超过 15 kPa 后,仿真、试验结果渐渐低于理论结果。原因为驱动器应变层硅胶材料在承受较大气压时出现径向变形现象,导致仿真、试验弯曲角较小。

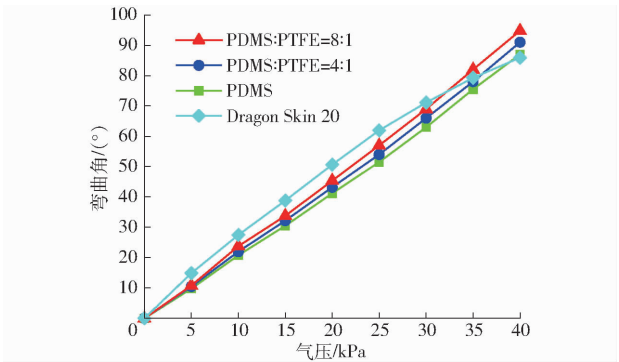


图12 不同气压下4种软体驱动器的弯曲性能曲线

Fig.12 Bending performance of four kinds of soft actuators under different air pressures

3.3 最大末端力试验

软体机械手对物体的稳定抓取,需要每个软体驱动器能够保持稳定的末端力,所以对 4 种驱动器分别做最大输出力试验。为了准确地测量驱动器的末端力,将 FGJ-5 型数字测力仪(0.01 N)与未充气

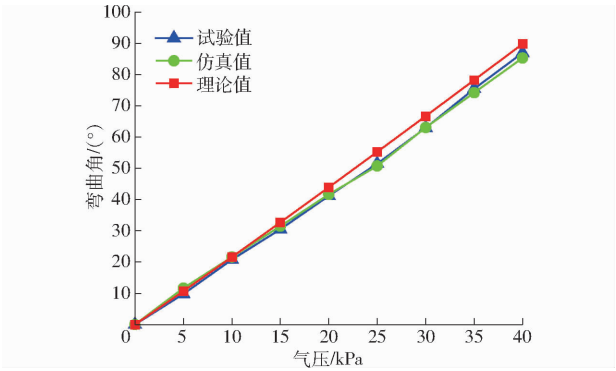


图 13 理论、仿真与试验的弯曲角度对比

Fig. 13 Comparison of bending angle between theory, simulation and test

的驱动器末端垂直相连并固定在平台上,每 5 kPa 记录一次测力计的数值,如图 14 所示。结果可知,限制层 PDMS/PTFE 质量比为 8:1 的驱动器末端力最大,气压 40 kPa 下,可达 2.45 N,与纯硅胶驱动器相比^[33],相同气压下末端力最大可提升 0.67 N。

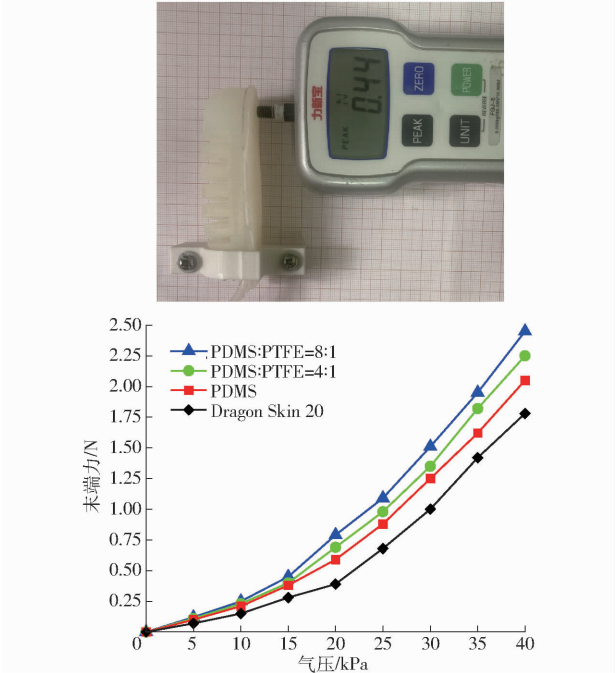


图 14 不同气压下软体驱动器的最大输出力

Fig. 14 Maximum output force of soft actuator under different air pressures

3.4 实物抓取试验

抓取能力是评判机械手性能的重要标准,抓取方式有指尖抓取和包络抓取,如图 15 所示。指尖抓取只能简单地接触物体表面,其抓取能力取决于驱动器的输出力和驱动器与物体之间的接触面状态。由于接触面积小,接触面摩擦力很难与物体自身重力平衡,因此指尖抓取能力只能针对体积和质量较小的物体。包络抓取时,物体与驱动器的接触面积较大,且驱动器的末端输出力直接抵抗物体的自身重力,适用于抓取体积、质量较大的物体。

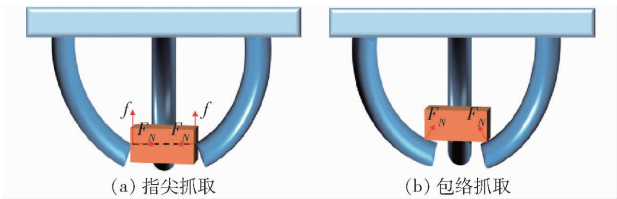


图 15 指尖抓取和包络抓取测试

Fig. 15 Fingertip grasp and envelope grasp test

选择限制层 PDMS/PTFE 质量比为 8:1 软体驱动器组成软体机械手。为了验证气动软体机械手两种抓取方式的可行性,选择不同形状、大小的物体进行抓取试验。如图 16 所示,将制作的 3 个软体驱动器通过法兰盘组合一体,并安装在 DOBOT Magician 机械臂上,调节比例阀气压控制机械手抓取猕猴桃、橙子、酸奶、洁面乳。

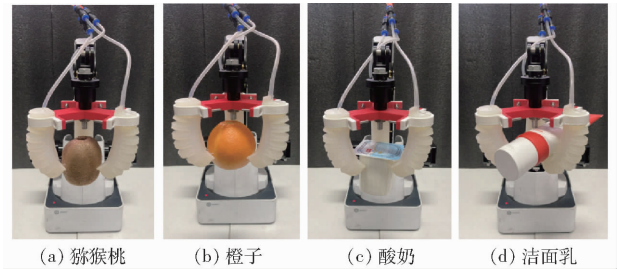


图 16 软体机械手抓取试验

Fig. 16 Soft manipulator grasping test

由于被抓物体的形状、大小、表面粗糙度不同,直接影响软体机械手的抓取试验结果。图 16a、16b 为指尖抓取方式抓取,两种水果质量接近,但是猕猴桃比橙子表面粗糙,软体机械手易于指尖抓取起猕猴桃,充入气压分别为 14、18 kPa。图 16c、16d 为包络抓取方式。

为了消除物体外在特征对抓取结果的影响,选择以抓砝码的方式确定软体机械手的最大负载能力,如图 17 所示。通过控制比例阀输出气压,每 10 kPa 软体机械手分别以指尖抓取、包络抓取的方式抓住载物盘,载物盘中加装有不同质量的砝码,直至其与机械手发生滑移,最终测出在气压 0 ~ 40 kPa 下软体机械手的负载能力,其抓取质量如表 2 所示。



图 17 气动软体机械手负载能力试验

Fig. 17 Load capacity test of pneumatic soft manipulator

表 2 抓取质量与所需气压
Tab.2 Grab mass and required air pressure

充气压力/kPa	质量/g
10	50
20	150
30	370
40	420

4 结 论

(1)基于 Yeoh 模型、Neo – Hooken 模型、力矩平衡原理建立了驱动器弯曲角度与充气压强之间的理论模型,分析了限制层材料及结构参数对其弯曲性能的影响,并将理论结果与有限元仿真值、试验值对比验证,偏差在 5% 以内,结果说明理论模型具有较好的准确性。

(2)对不同质量比的 PDMS/PTFE 混合材料进行研究,结果表明 PDMS/PTFE 质量比 8: 1 的材料弹性模量大,不易拉断,适宜制作驱动器的限制层。利用 ABAQUS 对软体驱动器进行有限元分析,仿真结果表明,限制层材料为 PDMS、PTFE 的软体驱动器,径向膨胀现象不明显,整体刚度大,提升了高气压下的弯曲性能。

(3)搭建测试软体驱动器的试验平台,得到不同气压下 4 种驱动器的最大输出力。结果表明,采用 PDMS/PTFE 限制层的软体驱动器输出力最大,相比于纯硅胶驱动器,输出力最大可提升 0.67 N。选择该型驱动器组成三指软体机械手,完成指尖、包络方式抓取物体,并利用抓砝码的方式测试出机械手的最大负载能力。限制层 PDMS/PTFE 质量比 8: 1 的软体驱动器极大提升了机械手的抓取性能。

参 考 文 献

[1] 杨妍,刘志杰,韩江涛,等. 软体机械臂的驱动方式、建模与控制研究进展[J]. 工程科学学报,2022,44(12):2124 – 2137.
YANG Yan, LIU Zhijie, HAN Jiangtao, et al. Overview of actuators, modeling, and control methods for soft manipulators[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(12): 2124 – 2137. (in Chinese)

[2] LI Y T, CHEN Y H, YANG Y, et al. Passive particle jamming and its stiffening of soft robotic manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(2):446 – 455.

[3] YAP H K, LIM J H, NASRALLAH F, et al. A soft exoskeleton for hand assistive and rehabilitation application using pneumatic actuators with variable stiffness[C] //IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2015:4967 – 4972.

[4] GEREZ L, GAO G, DWIVEDI A, et al. A hybrid, wearable exoskeleton glove equipped with variable stiffness joints, abduction capabilities, and a telescopic thumb[J]. IEEE Access, 2020, 8:173345 – 173358.

[5] WEI Y, CHEN Y, REN T, et al. A novel, variable stiffness robotic manipulator based on integrated soft actuating and particle jamming[J]. Soft Robotics, 2016, 3(3):134 – 143.

[6] 刘佳鹏,王江北,赵威,等. 多功能软体机械手的设计与建模[J]. 机械工程学报,2022,58(9):1 – 9.
LIU Jiapeng, WANG Jiangbei, ZHAO Wei, et al. Design and modeling of multifunctional soft manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(9):1 – 9. (in Chinese)

[7] 朱银龙,赵虎,苏海军,等. 四指软体机械手机械特性分析与抓取试验[J]. 农业机械学报, 2022,53(9):434 – 442
ZHU Yinlong, ZHAO Hu, SU Haijun, et al. Mechanical performance analysis and grasping experiment for four-finger soft manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(9):434 – 442. (in Chinese)

[8] 费燕琼,庞武,于文博. 气压驱动软体机器人运动研究[J]. 机械工程学报,2017,53(13):14 – 18.
FEI Yanqiong, PANG Wu, YU Wenbo. Movement of air-driven soft robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(13):14 – 18. (in Chinese)

[9] CHRISTIANSON C M, CUI Y, ISHIDA M, et al. Cephalopod-inspired robot capable of cyclic jet propulsion through shape change[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2020, 16(1):016014.

[10] 胡兵兵,金国庆. 一种仿虎甲幼虫的多驱动器软体机器人的设计与制造[J]. 机器人, 2018,40(5):626 – 633.
HU Bingbing, JIN Guoqing. Design and fabrication of a multi-actuator soft robot inspired by young tiger beetle[J]. Robot, 2018, 40(5):626 – 633. (in Chinese)

[11] 游显成,俞经虎,钱善华,等. 柔性软体机械手的设计及变形研究[J]. 现代制造工程, 2020(10):45 – 50.
YOU Xiancheng, YU Jinghu, QIAN Shanhua, et al. Research on design and deformation of flexible soft-bodied manipulator [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020(10):45 – 50. (in Chinese)

[12] 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.

[13] 陈子文,杨明金,李云伍,等. 基于气动无损夹持控制的番茄采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业工程学报,2021, 37(2):27 – 35.
CHEN Ziwen, YANG Mingjin, LI Yunwu, et al. Design and experiment of tomato picking end-effector based on non-destructive pneumatic clamping control[J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(2):27 – 35. (in Chinese)

[14] 贾江鸣,叶玉泽,程培林,等. 细长果蔬采摘软体气动抓手设计与参数优化[J]. 农业机械学报,2021,52(6):26 – 34.

- JIA Jiangming, YE Yuze, CHENG Peilin, et al. Design and parameter optimization of soft pneumatic gripper for slender fruits and vegetables picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 26 – 34. (in Chinese)
- [15] 魏树军, 王天宇, 谷国迎. 基于纤维增强型驱动器的气动软体抓手设计[J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 29 – 38.
WEI Shujun, WANG Tianyu, GU Guoying. Design of a soft pneumatic robotic gripper based on fiber-reinforced actuator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(13): 29 – 38. (in Chinese)
- [16] ZHANG X, TIAN M, RAZA T, et al. Soft robotic reinforced by carbon fiber skeleton with large deformation and enhanced blocking forces[J]. Composites Part B—Engineering, 2021, 223: 109099.
- [17] 冯乃诗, 王宏, 胡佛, 等. 软体机器人纤维增强式三腔体结构设计与分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(10): 1461 – 1466.
FENG Naishi, WANG Hong, HU Fo, et al. Design and analysis of fiber reinforced three cavity structure of soft robot hands[J]. Journal of Northeastern University, 2019, 40(10): 1461 – 1466. (in Chinese)
- [18] 谢绍辉, 丁龙伟, 戴宁, 等. 基于主应力线的软体气动弯曲驱动器设计[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(3): 663 – 671.
XIE Shaowei, DING Longwei, DAI Ning, et al. Design of soft pneumatic bending actuator based on principal stress line[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(3): 663 – 671. (in Chinese)
- [19] SONG S, DROTLEF D M, SON D, et al. Adaptive self-sealing suction-based soft robotic gripper[J]. Advanced Science, 2021, 8: 2100641.
- [20] MACCURDY R, KATZSCHMANN R, KIM Y, et al. Printable hydraulics: a method for fabricating robots by 3D co-printing solids and liquids[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2016: 3878 – 3885.
- [21] 韩非, 张道辉, 赵新刚. 基于弯曲度预测模型的软体手人机交互控制[J]. 自动化与仪表, 2022, 37(7): 43 – 47.
HAN Fei, ZHANG Daohui, ZHAO Xin'gang. Human-computer interaction control of soft hand based on bending prediction model[J]. Automation & Instrumentation, 2022, 37(7): 43 – 47. (in Chinese)
- [22] ZHONG G, DOU W, ZHANG X, et al. Bending analysis and contact force modeling of soft pneumatic actuators with pleated structures[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 193: 106150.
- [23] WANG Z, HIRAI S. Chamber dimension optimization of a bellow-type soft actuator for food material handling[C]//IEEE International Conference on Soft Robotics (Robosoft), 2018: 382 – 387.
- [24] 李健, 戴楚彦, 王扬威, 等. 基于草莓轮廓曲线的单指软体采摘抓手设计与优化[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(6): 1088 – 1096, 1134.
LI Jian, DAI Chuyan, WANG Yangwei, et al. Design and optimization of single-finger soft grasp based on strawberry curve[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2022, 56(6): 1088 – 1096, 1134. (in Chinese)
- [25] 武兆平, 李小宁, 郭钟华. 关节式内骨骼气动软体驱动器的结构设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(15): 17 – 24.
WU Zhaoping, LI Xiaoning, GUO Zhonghua. Structure design of pneumatic soft actuator with jointed endoskeleton[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(15): 17 – 24. (in Chinese)
- [26] 郭钟华, 吉成浩, 窦梦宇, 等. 轻韧型软体夹持器的仿生设计与研究[J]. 中国机械工程, 2023, 34(5): 595 – 602.
GUO Zhonghua, JI Chenghao, DOU Mengyu, et al. Bio-inspired design and research on light ductile soft grippers[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(5): 595 – 602. (in Chinese)
- [27] JIANG Y, CHEN D, LIU C, et al. Chain-like granular jamming: a novel stiffness-programmable mechanism for soft robotics[J]. Soft Robotics, 2019, 6: 118 – 132.
- [28] BERNAT J, GAJEWSKI P, KAPELA R, et al. Design, fabrication and analysis of magnetorheological soft manipulator[J]. Sensors, 2022, 22(7): 2757.
- [29] GAO Y, HUANG X, ISHAN S, et al. A novel variable stiffness compliant robotic manipulator based on layer jamming[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2020, 12(5): 051013.
- [30] POLYGERINOS P, WANG Z, OVERVELDE J, et al. Modeling of soft fiber-reinforced bending actuators[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(3): 778 – 789.
- [31] ZHU Y, CHU K, CHEN X, et al. Research and application of a multi-degree-of-freedom soft actuator[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2022, 338: 113492.
- [32] 汪延成, 鲁映彤, 丁文, 等. 柔性触觉传感器的三维打印制造技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2020, 56(19): 239 – 252.
WANG Yancheng, LU Yingtong, DING Wen, et al. Recent progress on three-dimensional printing processes to fabricate flexible tactile sensors[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(19): 239 – 252. (in Chinese)
- [33] ZHU Y, FENG K, HUA C, et al. Model analysis and experimental investigation of soft pneumatic manipulator for fruit grasping[J]. Sensors, 2022, 22(12): 4532.