

蠕动式软体管道机器人设计及测试

Design and implementation of peristaltic soft pipe robot

张 禹 王 宁 赵文川 陆登宇

ZAHNG Yu WANG Ning ZHAO Wen-chuan LU Deng-yu

(沈阳工业大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

(Shenyang University of Technology, School of Mechanical Engineering, Shenyang, Liaoning 110870, China)

摘要: 基于硅橡胶材料的超弹性特征, 参考蠕虫类生物结构和运动特点, 以六棱柱型驱动器和圆柱型驱动器为机器人主体, 设计了一种蠕动式软体管道机器人, 并分析该机器人在管道中的两种运动模式。结果表明, 所设计的蠕动式软体管道机器人结构和运动模式是可行的。

关键词: 硅橡胶; 蠕动式; 仿真分析; 气动; 软体驱动器; 管道机器人

Abstract: Based on the movement principle of the crawling worm in nature and the characteristics of its structure and movement, a soft pipe crawling robot is designed with the hexaprism driver and the cylindrical driver as the main body of the robot. Two kinds of motion modes of the robot in the pipeline are analyzed. By using the finite element analysis technology, the deformation of the hexagonal prism driver and the cylindrical driver are verified to meet the robot motion requirements. Finally, the motion parameters of the robot in different motion modes are obtained through experimental tests, and the motion performance of the robot is determined. The results show that the structure and motion mode of the robot are feasible.

Keywords: silicon rubber; peristaltic type; simulation analysis; pneumatic; software driver; pipeline robot

管道机器人是一种可以搭载传感器和相关作业工具, 并自行在管道内部或外部移动以完成不同操作的机器人^[1-2]。近年来, 随着仿生学和软体技术的快速发展, 利用硅胶材料的超弹性特征, 采用软体驱动器设计了以气体驱动的蠕动式软体管道机器人, 根据其运动模式, 该机器人主要可分为径向膨胀型机器人和弯曲型机器人。Connolly 等^[3]采用纤维增强软体执行器设计出一种分段蠕虫状软体管道爬行机器人; Calderón 等^[4]以收缩驱动器和伸长驱动器制作了软体管道机器人; Yamazaki 等^[5]

研发了一种名为 earthworm-type 25A 的管道检测机器人; 隋立明等^[6]设计了一种可在管道中运行的软体爬行机器人; 费燕琼等^[7]利用弯曲驱动器和摩擦片设计了一种气压驱动多气囊软体机器人。这些蠕动式软体管道机器人大多存在对运行管道、管径尺寸要求严格, 运动模式单一等不足。

试验拟采用六棱柱型驱动器和圆柱型驱动器设计一种具备两种运动模式的蠕动式软体管道机器人, 利用有限元分析技术验证其变形是否满足机器人运动需求, 并通过试验测试软体管道机器人在不同运动模式下的运动参数, 旨在为后续软体管道机器人的研究提供理论依据。

1 硅胶力学理论模型分析

软体驱动器是以硅橡胶为材料, 其力学性能通常用应变能密度函数表示和分析, 用应力—应变关系表达超弹性材料的应变势能^[8-9]。其中常用到应变势能模型有 Mooney-Rivlin 模型、Yeoh 模型和 Ogden 模型。由于硅橡胶是一种具有超弹性、能大变形、体积几乎不发生变化 (即不可压缩) 的非线性材料, 具有大变形特点及非线性力学性质。因此, 采用 Yeoh 模型对软体管道爬行机器人进行非线性力学分析^[10]。

基于 Yeoh 模型, 采用典型的二参数形式能量方程:

$$U = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_1 - 3)^2 = C_1\left(\lambda_1 - \frac{1}{\lambda_1}\right)^2 + C_2\left(\lambda_1 - \frac{1}{\lambda_1}\right)^4, \quad (1)$$

式中:

C_1, C_2 ——系数, $C_1 = 0.11, C_2 = 0.02$ 。

可得应力与弹性变形能的关系为:

$$\sigma = \frac{2}{\lambda_1} \left(\lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2} \right) \left(\frac{\partial U}{\partial I_1} + \lambda_2^2 \frac{\partial U}{\partial I_2} \right). \quad (2)$$

化简得应力与主伸长比的关系式为:

$$\sigma = \frac{\lambda_1^4 - 1}{\lambda_1^3} \left[2C_1 + 4C_2 \left(\lambda_1 - \frac{1}{\lambda_1} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

作者简介: 张禹 (1970—), 男, 沈阳工业大学教授, 博士。

E-mail: 1322061316@qq.com

收稿日期: 2020-03-10

2 蠕动式软体管道机器人设计

2.1 设计依据

借鉴蠕虫的运动方式,结合径向膨胀型软体管道机器人和轴向弯曲型软体管道机器人的运动特点,设计以六棱柱型驱动器和圆柱型驱动器为结构单元的蠕动式软体管道机器人。通过对六棱柱型驱动器6个基础矩形型腔分别通气,使六棱柱型驱动器产生径向膨胀变形或轴向弯曲变形,继而改变六棱柱型驱动器与管道间的摩擦力。再对圆柱型驱动器通放气使其产生母线方向的伸缩变形,并牵引与之前后端相连接的六棱柱型驱动器移动,对各驱动器周期性的充放气可实现机器人在管道中的蠕动运动。针对不同管径的管道,改变通气方式,使六棱柱型驱动器发生不同的形变,机器人可具备两种不同的管道运行方式。并且六棱柱型驱动器的各基础型腔对称分布,使机器人整体结构稳定,有助于加强机器人在管道中运动的稳定性。

2.2 结构设计

蠕动式软体管道机器人结构模型见图1,其结构由两个六棱柱型驱动器和一个圆柱型驱动器串联而成。

六棱柱型驱动器是由6个形状、尺寸相同的矩形型腔和1个空心正六棱形硅胶柱组成,采用硅胶粘接技术将各部分粘连起来。矩形型腔是由若干个气腔相连组成的褶皱形结构。圆柱型驱动器是采用两个相同的半圆形型腔粘连而成的类波纹管型结构。六棱柱型驱动器的硅胶柱采用空心结构,既可减轻机器人本体质量,节约成本,减少前进过程中阻力,又可增强驱动器弯曲能力,加快机器人在管道中的运行速度。蠕动式软体管道机器人的结构参数如表1所示。

2.3 运动模式分析

基于六棱柱型驱动器通气后产生的两种形变状态,软体管道机器人在管道中可具备两种不同的运动模式,即径向膨胀式运动和轴向弯曲式运动。管道中采用径向膨胀式运动模式爬行的一个周期,机器人运行步态示意图如图2所示。通过中间圆柱型驱动器的充气伸长推动前端前进,然后通过圆柱型驱动器的放气收缩拖动后端前移。前后端六棱柱型驱动器对其6个基础型腔充气,

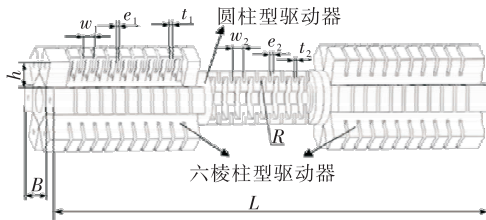


图1 管道机器人三维模型图

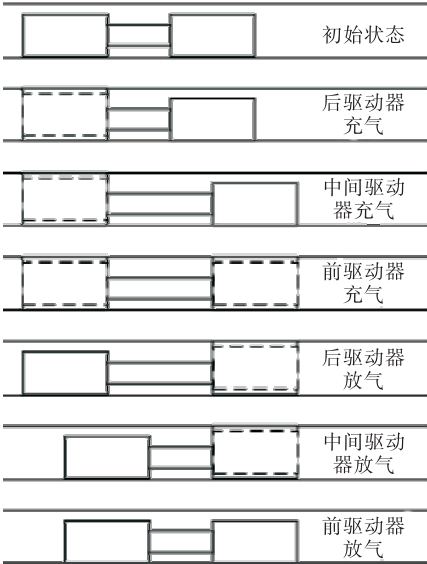
Figure 1 Three-dimensional model diagram of pipeline robot

使驱动器整体径向膨胀挤压管壁,改变其与管道间的摩擦力,使机器人前后产生摩擦力差,在管道中蠕动前行。采用此运动模式在管道中爬行时,机器人主要通过前后端驱动器膨胀挤压管壁产生足够的摩擦力以保持一端的固定。因此,管道的内径尺寸不能大于六棱柱型驱动器的径向膨胀尺寸。

当管道的管径大于六棱柱型驱动器的径向膨胀尺寸时,机器人可采用轴向弯曲式运动模式,机器人一个周期爬行的步骤示意图如图3所示。此运动模式下,机器人爬行推动力仍靠中间圆柱型驱动器的伸缩提供,再分别对前后端六棱柱型驱动器顶部两个相邻基础型腔充气,使驱动器整体产生轴向弯曲变形,减小驱动器底部与管道的接触面积,减小摩擦,实现机器人在管道中的蠕动运

表1 结构参数表

Table 1 Structure parameter table mm		
部件	参数	取值
六棱柱驱动器	单个型腔宽度	8
	型腔间隔	2
	型腔高度	22
	单个型腔胀形壁厚度	2
	型腔个数	11
伸长驱动器	单个型腔宽度	8
	型腔间隔	2
	型腔半径	16
	单个型腔胀形壁厚度	2
	型腔个数	10
管道机器人	总长	342
	总宽	78.64



机器人运动方向向右

图2 径向膨胀式运动示意图

Figure 2 Schematic diagram of radial expansion motion

动。采用此运动模式在管道中爬行时,机器人前后端驱动器主要通过和管壁所接触的部分产生摩擦力保持固定。因此,在管道爬行过程中,需保证前后端驱动器至少有一个不通气。

3 仿真分析

3.1 六棱柱型驱动器

应用 ANSYS Workbench 仿真软件对各气动软体驱动器进行结构稳态分析,通过改变输入气压,使各气动软体驱动器获得相应的形变云图。其中,接触类型是根据实际情况,对各驱动装置接触面采用绑定接触,对各型腔膨胀壁采用摩擦接触,摩擦系数为 0.4。网格划分是将数模分割成若干个规则的几何体,再基于非线性六面体单元,通过扫掠而生成网格。位移约束是根据各驱动器在蠕动式软体管道机器人中的实际运动需求进行设定的,在六棱柱型驱动器两端的端面设定为全约束,在圆柱型驱动器其中一端的端面设定为全约束。

由于软体管道爬行机器人具备两种运动模式,则六棱柱型驱动器能产生两种不同的变形状态,故需对这两种情况分别进行仿真分析。对机器人轴向弯曲式运动模式下的六棱柱型驱动器进行有限元分析时,使其两相邻矩形型腔充入相同压力的气体,驱动器产生轴向弯曲形变,如图 4 所示。

由图 4 可知,当驱动压力为 50 kPa 时,驱动器与管壁接触面积最小,六棱柱型驱动器的弯曲变形满足机器人弯曲式运动模式的需求。仿真过程发现,随着驱动压力的增加,驱动器弯曲变形程度继续增大,但其与管壁接触面积基本不变,故将 50 kPa 定为机器人采用轴向弯曲式

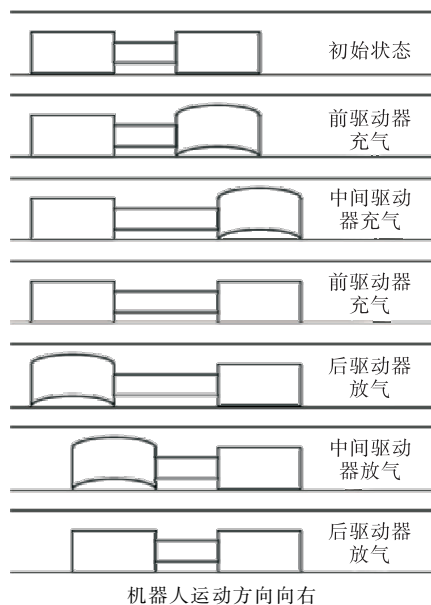


图 3 轴向弯曲式运动示意图

Figure 3 Schematic diagram of axial bending motion

运动模式时六棱柱型驱动器的驱动气压。

机器人径向膨胀式运动模式下的六棱柱型驱动器进行有限元分析时,对其驱动器 6 个矩形型腔同时充入相同压力的气体,其膨胀变形如图 5 所示。由图 5 可知,六棱柱型驱动器的径向膨胀变形能满足机器人径向膨胀式运动模式的需求。当驱动压力为 0~100 kPa 时,每间隔 10 kPa 对六棱柱型驱动器施加一个压力,得驱动压力与变形尺寸的关系图如图 6 所示。由图 6 可知,六棱柱型驱动器的径向膨胀变形随驱动气压的增加而增大。

3.2 圆柱型驱动器

圆柱型驱动器进行有限元分析时,对其型腔内充入不同大小压力的气体,其形变如图 7 所示。随着通气压

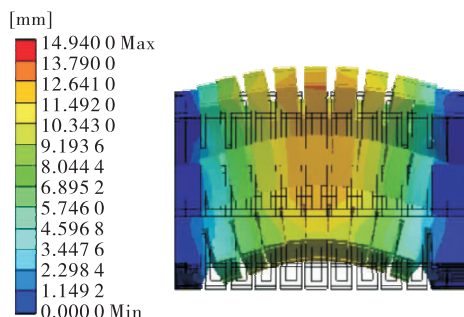


图 4 六棱柱型驱动器弯曲变形仿真图

Figure 4 Simulation of bending deformation of hexagonal prismatic driver (50 kPa)

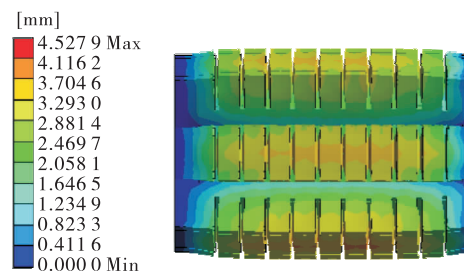


图 5 六棱柱型驱动器膨胀变形仿真图

Figure 5 Simulation diagram of expansion and deformation of six-prism driver

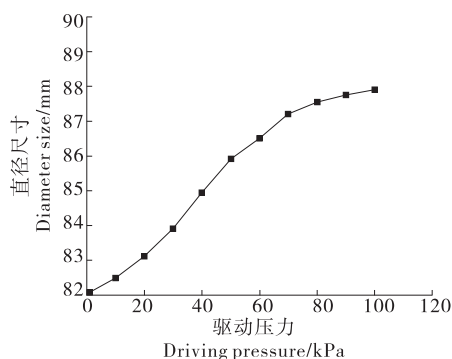


图 6 驱动压力与尺寸变形关系图

Figure 6 Relationship between driving pressure and dimensional deformation

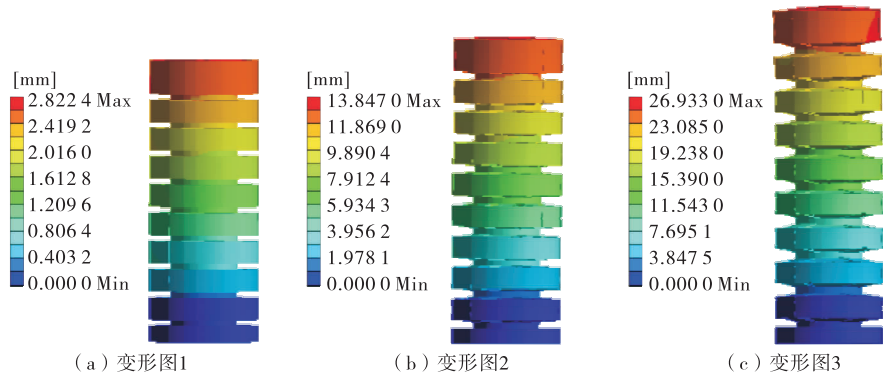


图 7 圆柱型驱动器轴向变形仿真图

Figure 7 Simulation of axial deformation of cylindrical actuator

力的增大,圆柱型驱动器轴向形变增加,可以满足蠕动式软体管道机器人的伸缩运动要求。当驱动压力为 0~20 kPa 时,每间隔 2 kPa 对圆柱型驱动器施加一个压力,得变形尺寸与驱动压力关系图如图 8 所示。由图 8 可知,圆柱型驱动器通气变形可分为 3 个阶段,坐标轴前段变化缓慢,中段开始极速提升,进入后段又开始减缓。

4 试验与测试

4.1 控制系统

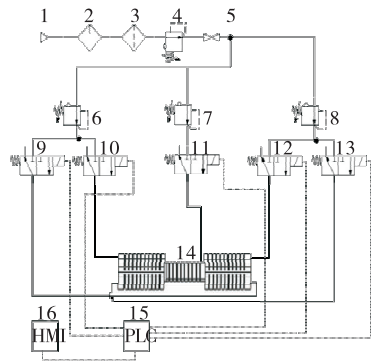
由图 9 可知,该控制系统包括气泵、减压阀、电磁换向阀、PLC 可编程控制器和 HMI 人机交换界面。整个系统中,气泵提供驱动压力,调压阀调节整个回路中的压力,HMI 对 PLC 发送指令,PLC 控制各电磁换向阀的通断顺序,从而实现蠕动式软体管道机器人采用不同的运动模式在管道中运行。

4.2 软体管道机器人运动试验

根据六棱柱型驱动器和圆柱型驱动器的有限元分析及多次试验结果,机器人在管道中采用径向膨胀式运动时所运行管道内径范围为 82~88 mm,试验选用内径为 84 mm 的透明管道作为试验管道,根据管道内径尺寸可将六棱柱型驱动器的驱动气压定为 40 kPa,由于蠕动式管道机器人单次蠕动距离的大小是机器人的一个重要性

能指标,故将圆柱型驱动器的驱动气压定为 20 kPa,此时轴向形变达最大长度 80 mm。图 10~13 给出了软件机器人运动试验数据。

由图 10 可知,机器人运行单周期时间为 12 s。此运动模式下,软体管道爬行机器人一个周期的运动过程如图 11 所示,此时的移动距离为 80 mm,平均运行速度为 400 mm/min。



1. 气泵 2. 油雾分离器 3. 过滤器 4、6~8. 减压阀 5. 节流阀 9~13. 二位三通电磁换向阀 14. 蠕动式软体管道机器人样机 15. PLC 16. HMI 实线为气路 虚线为电路

图 9 软体管道机器人控制系统

Figure 9 Software pipeline robot control system

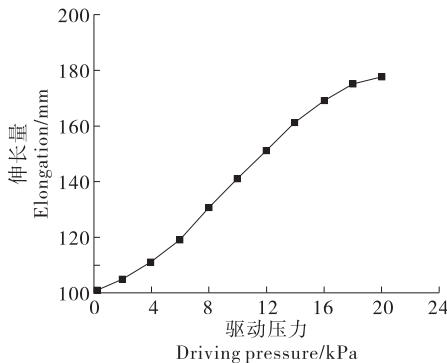


图 8 驱动压力与伸长量关系图

Figure 8 Relationship between driving pressure and elongation

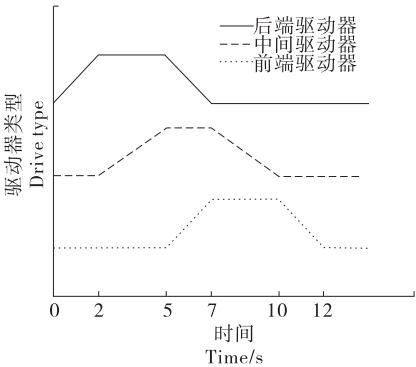


图 10 径向膨胀式运动各驱动器充放气时序图

Figure 10 Charging and deflating timing charts of the radial expansion motion actuators

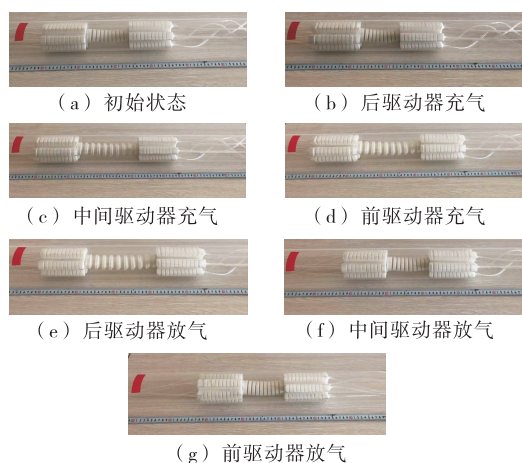


图 11 径向膨胀式运动

Figure 11 Radial expansion movement

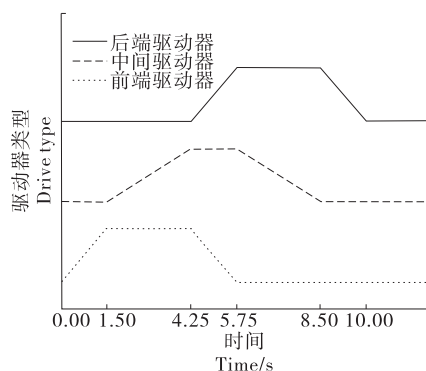


图 12 轴向弯曲式运动各驱动器充放气时序图

Figure 12 Timing chart of the axial flexure motion of the actuators

机器人在管道中采用轴向弯曲式运动时,选用内径为 115 mm 的透明管道,根据仿真结果将六棱柱型驱动器的驱动气压定为 50 kPa,为了防止机器人在此模式运动时出现摩擦力不足,前后端驱动器反向移动的情况,经试验测试将圆柱型驱动器的驱动气压定为 14 kPa。

由图 12 可知,机器人运行单周期时间为 10 s。此运动模式下,机器人一个周期运动过程如图 13 所示,此时的移动距离为 60 mm,平均运行速度为 360 mm/min。

5 结论

设计制作了一种蠕动式气动软体管道机器人,并对其进行了运动模式分析,表明该机器人具有结构简单,运动形式多样的特点。仿真分析表明六棱柱型驱动器和圆柱型驱动器的变形满足所设计管道机器人的运动需求;测试结果表明蠕动式软体管道机器人能采用不同运动模式在不同管径的管道中进行有效运动,并得出该软体管道机器人不同运动模式下的运行速度。后续可从以下几个方面进行改进:优化组成蠕动式软体管道机器人的软体驱动器,增强各气动软体驱动器的变形能力,加快机器

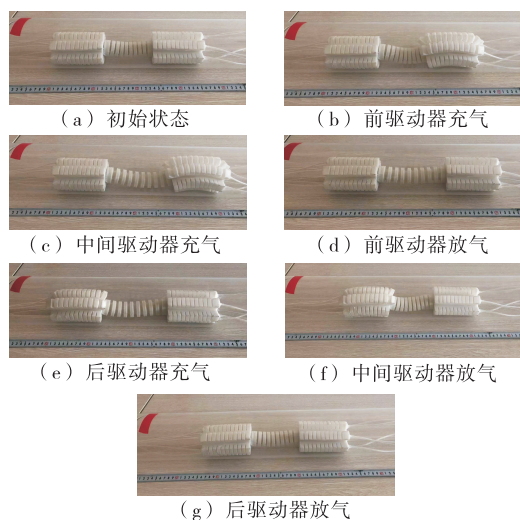


图 13 轴向弯曲式运动

Figure 13 Axial bending motion

人的运行速度;还可增强蠕动式软体管道机器人的智能性,深入研究机器人的智能控制系统。

参考文献

- [1] SINGH P. A compact and compliant external pipe-crawling robot[J]. IEEE Trans, 2013, 29(1): 251-260.
- [2] SHAO Lei, WANG Yi, GUO Bao-zhu. A review over state of the art of in-pipe robot [C]//IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Qingdao: IEEE, 2015: 2 180-2 185.
- [3] CONNOLLY F, POLYGERINOS P, WALSH, C. J. Mechanical programming of soft actuators by varying fiber angle[J]. Soft Robotics, 2015, 2(1): 26-32.
- [4] CALDERON A A, UGALDE J C, ZAGAL J C. Design, fabrication and control of a multi-material-multi-actuator soft robot inspired by burrowing worms[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Qingdao: IEEE, 2016: 31-38.
- [5] YAMAZAKI S, TANISE Y, YAMADA Y. Development of axial extension actuator for narrow pipe inspection endoscopic robot[C]//IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Japan: IEEE, 2016: 634-639.
- [6] 隋立明, 刘亭羽, 席作岩. 气动软体爬行机器人驱动方式的分析与实验[J]. 液压与气动, 2018(11): 99-103.
- [7] 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.
- [8] 庄茁. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [9] 李晓芳, 杨晓翔. 橡胶材料的超弹性本构模型[J]. 弹性体, 2005(1): 50-58.
- [10] 孙沂琳, 张秋菊, 陈宵燕. 气动软体驱动器设计与建模[J]. 食品与机械, 2018, 34(11): 101-105.