

四指软体机械手机械特性分析与抓取试验

朱银龙¹ 赵虎¹ 苏海军² 冯凯¹ 华超¹ 刘英¹

(1. 南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037; 2. 俄亥俄州立大学机械与航空系, 哥伦布 OH 43210)

摘要: 软体机械手在易损物品抓取方面具有其独特的优势, 近年来成为机器人领域的研究热点。为便于评价软体机械手的整体性能, 实现其精确抓取控制, 需要对软体机械手进行建模分析与试验研究。本文设计了四指软体机械手, 每个手指单元内置用于实时检测机械手弯曲角的柔性应变传感器; 建立了不同气压作用下的弯曲角和末端输出力特性的数学模型, 并分析限制层刚度变化对软体手指输出特性的影响; 设计了软体机械手控制系统, 在此基础上开展软体手指的弯曲角和末端输出力特性试验, 试验结果表明调限制层刚度可有效改善输出力, 理论分析与试验结果吻合, 验证了数学模型的正确性。对几种不同质量的常用水果(如草莓、橘子、梨、苹果)的抓取试验结果表明, 软体机械手能够实现易损物体的无损抓取, 其包络抓取力最大为 11.89 N, 指尖抓取力最大为 2.81 N。

关键词: 软体机械手; 机械特性; 抓取试验; 软驱动器

中图分类号: TP241 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)09-0434-09 OSID: 

Mechanical Performance Analysis and Grasping Experiment for Four-finger Soft Manipulator

ZHU Yinlong¹ ZHAO Hu¹ SU Haijun² FENG Kai¹ HUA Chao¹ LIU Ying¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

2. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Ohio State University, Columbus OH 43210, USA)

Abstract: The soft manipulator has its unique advantages in picking some fragile objects, which has been the focus of research field of robot. In order to evaluate the overall performance of the soft manipulator and further realize the precise grasping control of manipulator, it is necessary to carry out modeling analysis and experimental research on the soft manipulator. A four-finger soft manipulator integrated with flexible strain sensor that can illustrate the bending angle of soft actuator was developed. Moreover, the mathematical model for predicting the bending angle and end output force of the soft actuator upon various pressure was established, and the influence of variable stiffness for constraint layer on output performance of soft manipulator was analyzed as well. Furthermore, hardware control system of soft manipulator was developed and experimented on the bending angle, and output force of the soft pneumatic actuator were performed. Experimental results showed that the force output of soft manipulator can be improved by changing the stiffness of constraint layer. In addition, the experimental data agreed well with the theoretical analysis results, which validated the correctness of the proposed mathematical model. Grasping tests on several commonly fruits of various shapes and length such as strawberry, orange, pear and apple demonstrated that the soft manipulator can achieve non-destructive grasping of fragile and fragile objects easily. The envelope grasping force of the soft manipulator was up to 11.89 N, and the fingertip grasping force was 2.81 N. The research results can provide theoretical guidance and reference for the widely application of soft manipulator.

Key words: soft manipulator; mechanical performance; grasping experiment; soft actuator

收稿日期: 2022-06-01 修回日期: 2022-07-06
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基金项目(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,主要从事软体机器人和智能农业装备研究,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、机器人应用和农产品检测研究,E-mail: lying_new@163.com

0 引言

机械手亦称末端执行器,是机器人完成操作任务的重要部件,根据执行任务和操作对象的不同,机械手主要分为夹持和吸附两种工作方式。现有的机械手多为刚性材料制成,输出力大,精度相对较高,但是缺乏环境适应性和交互安全性。为降低操作损伤,部分学者在刚性机器人的机械臂关节和机械手上覆盖软材料或安装力/力矩传感器^[1],为机器人提供感知能力,进行力的柔顺控制,但会进一步导致装置复杂,提升机械手成本。和传统的刚性机械手相比,软体机械手由于自身材料的柔顺性^[2-3],具有更多的自由度和灵活性^[4-5],比传统刚性机械手具有更好的环境适应能力和更为安全的人机交互特性^[6-9]。

近年来,随着材料科学、3D 打印技术的快速发展,软体机械手成为国内外研究的焦点^[10-12]。WANG 等^[13]使用多材料三维打印技术制造三指软体机械手,手指内部嵌入弯曲传感器实时测试手指弯曲角度。SHIN 等^[14]利用鳍条效应开发了一种摩擦垫以增加软体机械手的抓握力,并设计了中心夹具切换系统,以扩展机械手工作几何形状。HAO 等^[15]使用硅胶材料研制了长度可调节的通用型软体机械手,可正反操作,实现多种形状和尺寸物体的稳定抓取动作。项超群等^[16]提出了一种由伸长型及收缩型气动肌肉组成的变刚度软体机器人手臂,利用试验数据基于最小二乘法建立了单根气动肌肉气压、位移及刚度关系模型。

在抓取易损物品时,软体机械手可充分利用材料的柔顺性,主动适应操作物体尺寸和形貌特征,实现稳定、安全的抓取动作,能有效提高易损物体的操作安全^[17-20]。但是,由于软材料非线性响应和软体机械手复杂的几何形状,很难在样机制造之前预测软体机械手的性能(响应压力的变形和力输出)。为便于指导软体机械手的设计、制造和控制,需要建立软体机械手的数学模型。目前针对软体机械手的建模方法多基于分段常曲率法,利用力/力矩平衡方程、虚功原理等方法建立运动学模型。

POLYGERINOS 等^[21]根据充气压力和弹性内力采用软体驱动器末端点力矩平衡原理对纤维缠绕型软体驱动器建模分析,给出软驱动器弯曲瞬间的最大末端力,并采用有限元仿真分析和试验结果验证模型计算结果。费燕琼等^[22]设计了一种气压驱动多气囊软体机器人,研究了机器人运动过程中的非线性力学特性,得出软体机器人内部充气压力与前进距离之间的非线性关系模型。姚建涛等^[23]搭建

了软体机械手遥操作系统,建立了软体驱动器的力学模型并借助仿真分析加以修正,为软体驱动器的控制提供了理论依据。顾苏程等^[24]基于 Yeoh 模型、Neo-Hookean 模型分别建立了充气压力与软体驱动器曲率的非线性数学模型和驱动器末端接触力理论模型,并开展了软体夹持器变形和末端接触力的仿真及实验。以上关于软体机械手的建模一般只给出数学模型,并未给出解析解或者数值解,或为了简化求解采用 Neo-Hookean 模型,致使偏差较大。

本文基于 Yeoh 模型建立软体机械手的弯曲角数学模型,利用数值解法得出充气压力与弯曲角的关系曲线,通过弯矩等效思想,描述软体机械手末端输出力,分析限制层材料刚度对软体机械手输出特性的影响,利用试验验证所建立模型的正确性,同时通过试验分析软体机械手的综合性能,将其应用到常见易碎易损水果的抓取操作中。

1 软体机械手建模

如图 1 所示,四指软体机械手由 4 个软体驱动器手指单元通过法兰组装构成,每个驱动器包括形变层和限制层两部分。形变层是由硅胶材料制成的多气囊结构,限制层是一层厚度均匀的硅胶,亦可根据需要置入多层层状材料,限制层表面嵌入用于测试弯曲角的软传感器,利用硅胶材料封装后与限制层联结固定。充气时,软驱动器产生弯曲变形。驱动器建模主要针对驱动器弯曲角、驱动器末端输出

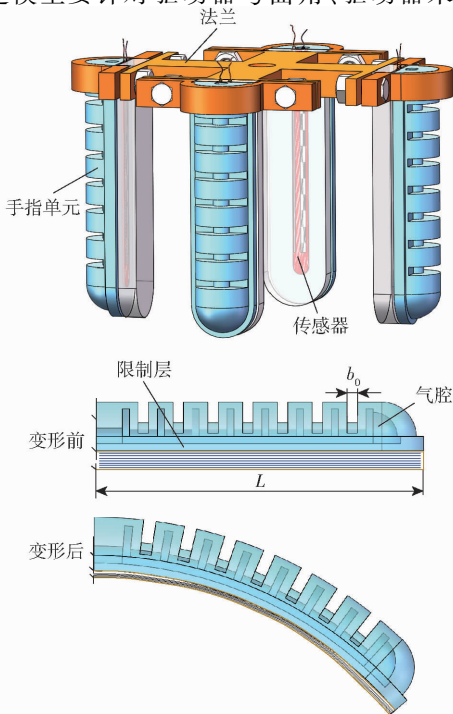


图 1 变刚度软体机械手及手指单元结构
Fig. 1 Structure of flexible actuator and soft gripper with variable stiffness

力,同时分析限制层刚度变化对驱动器输出特性的影响。

1.1 弯曲角模型

当驱动气压为 P 时,软体驱动器的弯曲角为 θ 。软体驱动器结构比较复杂,为简化分析,假设其变形为常曲率。在常曲率假设下,气囊和气囊间的腔道结构曲率相同,为简化分析,取其中任一腔道结构作分析。如图 2 所示,腔道初始长度为 b_0 ,变形后为 b_1 ,壁厚为 d_0 ,变形后为 d_1 ,弯曲角为 φ 。设软体驱动器的有效长度为 L ,整个弯曲角 θ 与腔道弯曲角 φ 间的关系为

$$\theta = L\varphi / (2b_0)$$

(1)

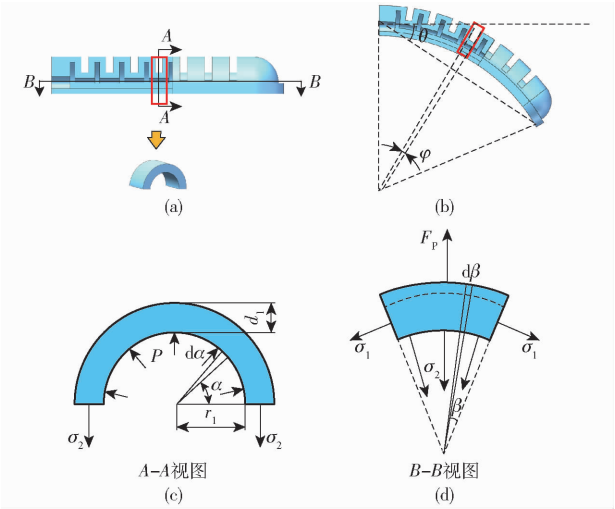


图 2 软体驱动器腔道结构示意图

Fig.2 Schematics of channel structure of software actuator

限制层变形前后长度变化很小,可以忽略。受限制层和周向约束的影响,驱动器周向变形也可忽略,并假设驱动器采用的硅胶为体积不可压缩材料(即 $\lambda_1\lambda_2\lambda_3=1$),为此,驱动器轴向、周向、厚度 3 个主方向的延伸率可以表示为

$$\begin{cases} \lambda_1 = (b_0 + r_1\varphi) / b_0 \\ \lambda_2 = r_1 / r_0 \\ \lambda_3 = d_1 / d_0 \end{cases}$$

(2)

采用 Yeoh 形式的应变能作为硅胶材料的本构模型,材料 3 个主方向真实应力可表示为

$$\sigma_i = \lambda_i \partial W / \partial \lambda_i - p = 2\lambda_i^2 [C_{10} + 2C_{20}(I_1 - 3)] - p$$

(3)

式中 C_{10} 、 C_{20} 为材料参数,拉伸试验数据拟合获取,分别为^[25]: $C_{10} = 0.11$, $C_{20} = 0.02$ 。第一主不变量 $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$ 。保持体积不变的静水压力为 p ,假设此处厚度方向应力 $\sigma_3 = 0$,可消去 p ,则轴向和周向的真实应力可表示为

$$\sigma_1 = 2(\lambda_1^2 - \lambda_3^2) [C_{10} + 2C_{20}(I_1 - 3)]$$

(4)

$$\sigma_2 = 2(\lambda_2^2 - \lambda_3^2) [C_{10} + 2C_{20}(I_1 - 3)]$$

(5)

将驱动器形变层与限制层分开研究,对于形变层,其受力如图 2c、2d 所示,气压作用与内力的平衡方程为

$$\begin{aligned} F_p &= 2\sigma_1 \sin \frac{\varphi}{2} \left[\pi(r_1 + d_1)^2 - \pi r_1^2 \right] / 2 + \\ &2 \int_0^{d_1} \int_0^\varphi \sigma_2 b_0 / \left[\varphi \cos \left(\frac{\varphi}{2} - \beta \right) \right] d\beta dt = \\ &\sigma_1 \sin \frac{\varphi}{2} \pi (2\lambda_2 \lambda_3 r_0 d_0 + \lambda_3^2 d_0^2) + \\ &4\lambda_3 d_0 \sigma_2 b_0 / \left(\varphi \sin \frac{\varphi}{2} \right) \end{aligned}$$

(6)

$$\begin{aligned} F_p &= \int_0^\pi \int_0^\varphi Pr_1 (b_1 / \varphi + r_1 \sin \alpha) \sin \alpha \cos \left(\frac{\varphi}{2} - \beta \right) d\alpha d\beta = \\ &Pr_1 \sin \left(\frac{\varphi}{2} \right) \left(\frac{4b_1}{\varphi} + r_1 \pi \right) \end{aligned}$$

(7)

由式(6)、(7)可得

$$P\lambda_2^2 r_0 (b_0 + \lambda_2 r_0 \varphi) / (b_0 d_0) (4b_0 / \varphi + \lambda_2 r_0 \pi) = \sigma_1 \pi (2\lambda_2 r_0 + \lambda_3 d_0) + 4\sigma_2 b_0 / \varphi$$

(8)

对于限制层,受力示意图如图 3 所示。

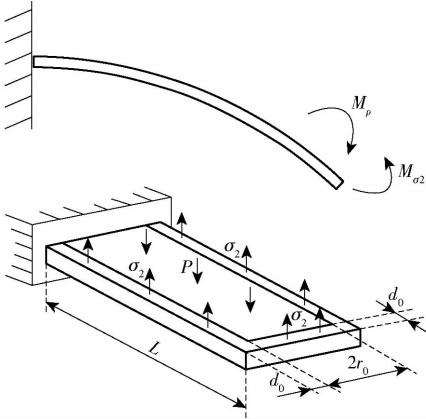


图 3 限制层受力分析示意图

Fig.3 Schematic of force on stiffness structure

限制层与形变层接触,将限制层视为一大变形梁,应力 σ_2 和气压 P 共同作用,端部弯矩为 $M_{\text{layer}} = M_p - M_{\sigma_2}$,可得

$$2\theta = M_{\text{layer}} L / (EI) = L\varphi / b_0$$

(9)

$$\begin{aligned} \text{又有 } M_p &= \int_0^{L-d_0} 2Pr_0 x dx, M_{\sigma_2} = \int_0^{L-d_0} 2\sigma_2 d_0 x dx + \\ &\int_{L-d_0}^L 2(r_0 + d_0) \sigma_2 x dx, \text{分别代入式(9)整理可得} \end{aligned}$$

$$EI\varphi / b_0 = Pr_0 (L - d_0)^2 - \sigma_2 d_0 (L^2 + 2Lr_0 - r_0 d_0)$$

(10)

式中 E ——限制层弹性模量

I ——限制层截面惯性矩

联立方程(1)、(8)、(10)并代入相关参数,可以得到充气压力 P 与驱动器弯曲角 θ 的关系如图 4 所示。由图 4 可知,弯曲角随着气压的增大而增大。

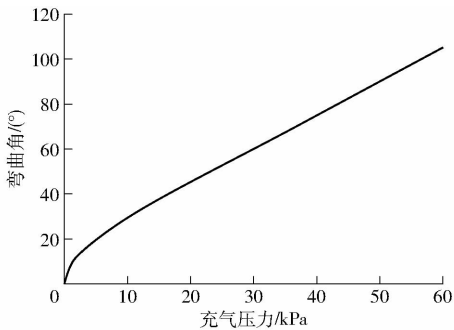


图4 软体驱动器弯曲角与气压之间的关系曲线

Fig.4 Relationship between bending angle of software actuator and air pressure

1.2 末端输出力模型

根据软体驱动器的弯曲特性模型,可知充气压力与弯曲角间的关系。当驱动器弯曲达到最大角度之前均会产生输出力。此处将驱动器和刚度层整体视为一个柔性杆,充气端固定,如图5所示。相当于对任一角度位置,存在等效力矩使驱动器弯曲角 θ ,此等效力矩与末端输出力 F 的矩平衡,结合几何关系和大变形理论模型可得^[25]

$$F = (M - M_1) / l = 4E_t I_t \theta_1 (\theta - \theta_1) / (L^2 \sin(2\theta_1)) \tag{11}$$

式中 E_t ——驱动器等效弹性模量
 I_t ——驱动器截面惯性矩

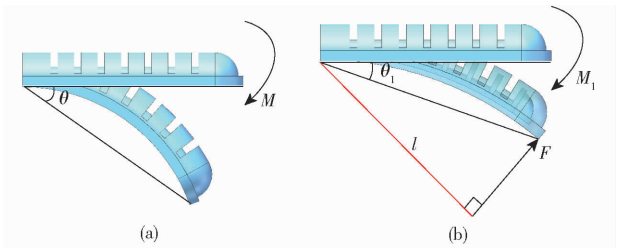


图5 末端输出力模型

Fig.5 Terminal output force models

考虑到刚度层选用材质的弹性模量远超形变层弹性模量,可用 E 代替 E_t 。

根据式(11)求解不同气压下驱动器弯曲至各个角度的末端输出力如图6所示。易见,在同一个弯曲角,末端输出力随充气压力的增大而增大。充气瞬间,弯曲角为 0° 时,驱动器输出力最大,随着弯曲角的增加,末端输出力逐渐减小。

变刚度软体机械手相比于普通软体机械手增加了变刚度结构,使其弹性模量和截面惯性矩会显著增加,对限制层抽真空后,由于层状材料间的摩擦力,提高了整体结构的刚度,从而提高了末端输出力。因此,一般情况下,在相同充气压力和弯曲角下,变刚度软体机械手的末端输出力均比软体驱动器的大。但是,由于在相同气压驱动下,变刚度软体机械手弯曲角比软体驱动器小,可能会导致在某些

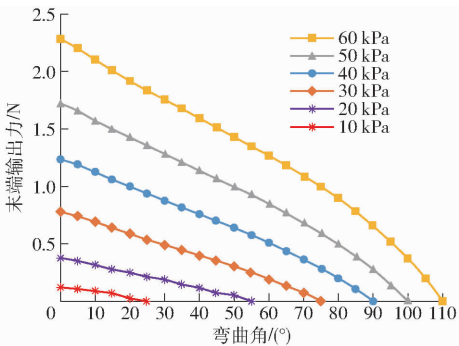


图6 软体驱动器各弯曲角末端输出力

Fig.6 Output force at end of each bending angle of software actuator

角度下,变刚度软体机械手末端输出力比软体驱动器小。

1.3 限制层刚度调节分析

软体机械手变刚度原理是堵塞作用,主要利用层状物质在外界压力作用下片层之间的摩擦力显著增大,引起的片层流动或者柔性状态向固体或者刚性状态的转变。如图7所示,变刚度结构由片层填充物、包覆薄膜组成,通过抽真空的方式在薄膜表面产生气压差,增加层状材料间的摩擦力,提高整体结构的刚度。

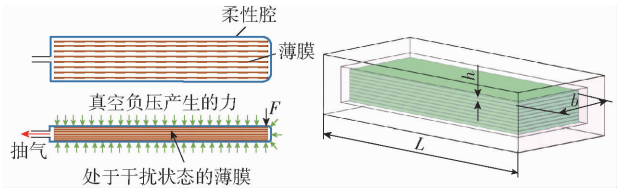


图7 限制层刚度调节简化示意图

Fig.7 Simplified diagram of variable stiffness

未抽真空时,层状材料相互不接触,截面惯性矩可表示为 $nbh^3/12$, n 为层状材料的层数, h 为单层层状材料厚度, b 为单层层状材料的宽度。抽真空时,层状材料相互接触,可将其看成一个整体,此时截面厚度为 nh ,截面惯性矩可表示为 $b(nh)^3/12$ 。理论上,抽真空后,整体截面惯性矩呈 n^2 倍增加。由于材料间接触和摩擦,与实际情况尚有差异,为便于分析,实际抓取时手指弯曲刚度 K 定义为

$$K = FL \sin(2\theta) / (2\theta^2) \tag{12}$$

式中 F ——软体手指输出力

2 软体手指性能试验

2.1 试验平台

试验平台主要包括气路控制、电路以及传感模块。气路包括气泵、油雾分离器、电磁阀和比例阀,最后连接软体手。电路主要有DAC模块、继电器组模块、电磁阀模块以及比例阀模块。传感系统主要有ADC模块、弯曲传感器、手指压力传感

器。控制系统原理图和平台实物图如图 8、9 所示。

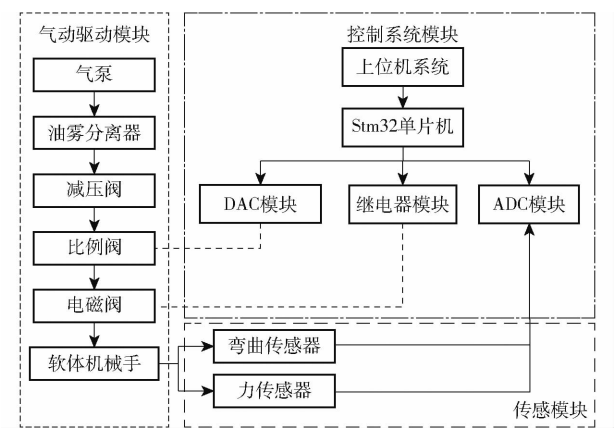


图 8 控制系统整体框图

Fig. 8 Block diagram of control system

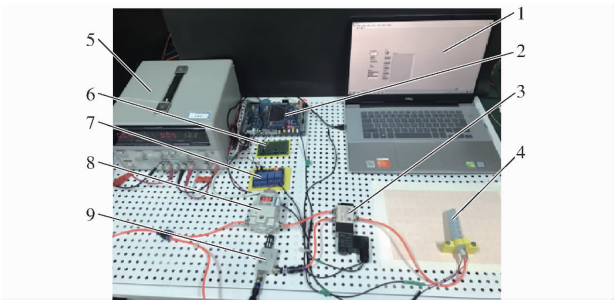


图 9 试验平台实物图

Fig. 9 Picture of experimental platform

1. 计算机 2. Stm32 3. 伺服阀 4. 软体手指 5. 直流电源 6. 放大电路 7. 继电器 8. 比例阀 9. 真空发生器

为便于测试手指弯曲角，采用 Spectrasymbol flex sensor 2.2 弯曲传感器，将其浇筑在手指限制层内部，如图 10 所示。使用前进行标定试验，采用分压电路获取弯曲传感器电压，分压电阻 R_1 为 22 k Ω 。由标定结果可知，角度和电阻几乎呈线性关系，对其进行拟合可得

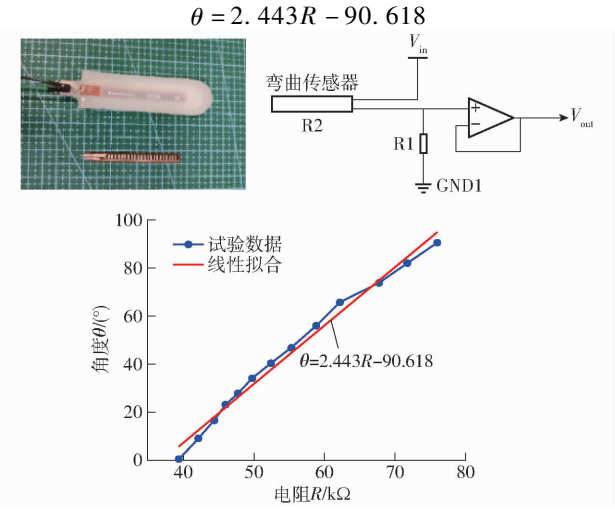


图 10 角度传感器标定

Fig. 10 Calibration test of angular sensor

2.2 弯曲角测试

通过比例阀施加 0 ~ 50 kPa (间隔 10 kPa) 气压，读取弯曲传感器的电压，换算为弯曲角，如图 11 所示。随着气压的增加，软体手指弯曲角也相应增加。试验结果与模型分析结果比较吻合，验证了本文对软体机械手建模的有效性。

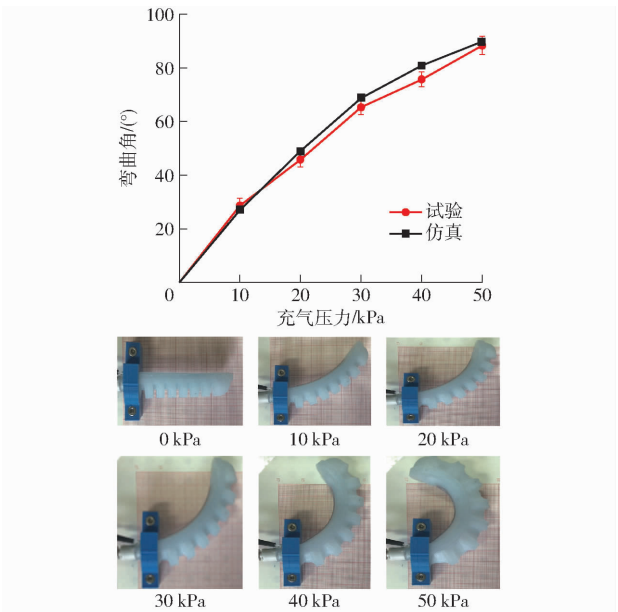


图 11 软体手指弯曲角试验

Fig. 11 Bending angle experiment of soft actuator

从式 (10)、(11) 可知，限制层刚度越大，软体手指的弯曲角越小；限制层刚度越大，手指末端输出力越大。为此，拟在限制层内置入纸张并研究其对弯曲角和末端输出力的影响。研究 5 种不同材质的纸张特性 (牛皮纸 A、普通 A4 纸 B、皮草纸 C、水彩纸 D、油纸 E)，利用材料拉伸试验机测试纸张的拉伸应力，材料拉伸应力曲线如图 12a 所示。每种材质的纸张取 10 张置入限制层，抽真空后利用中间加载试验测试限制层刚度，结果如图 12b 所示。从图中可以看出，牛皮纸 A 限制层位移最小，油纸 E 最大，普通 A4 纸 B、皮草纸 C 和水彩纸 D 位移相差不大，反之放入牛皮纸 A 限制层刚度最大。该试验现象的原因主要是：①弹性模量越大，其位移越小。②纸片的表面摩擦因数不同，对限制层腔体抽真空后负压造成的静摩擦力也不同。为在软体手指的弯曲角和末端输出力二者取得平衡，试验采用普通 A4 纸嵌入软体手指限制层内部。

分别对置入 5、10 张普通 A4 纸的软体机械手指的弯曲角进行测试，结果如图 13 所示。可见，随着纸张层数的增加，手指弯曲角变小，但是与未嵌入纸张的软体手指弯曲角变化趋势有所不同。该现象的原因是：①限制层置入纸张层数越多，抵抗气压变形的能力越强。②充气压力为 10 ~

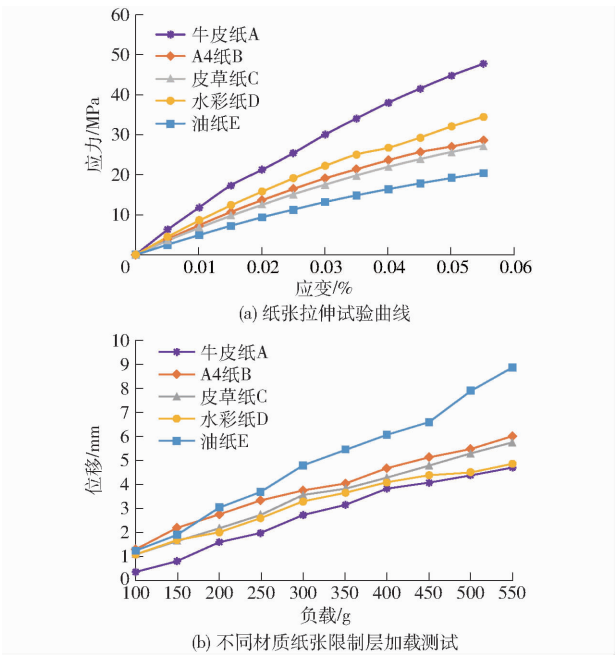


图 12 变刚度层状材料性能试验

Fig. 12 Experiment for planar material of variable stiffness structure

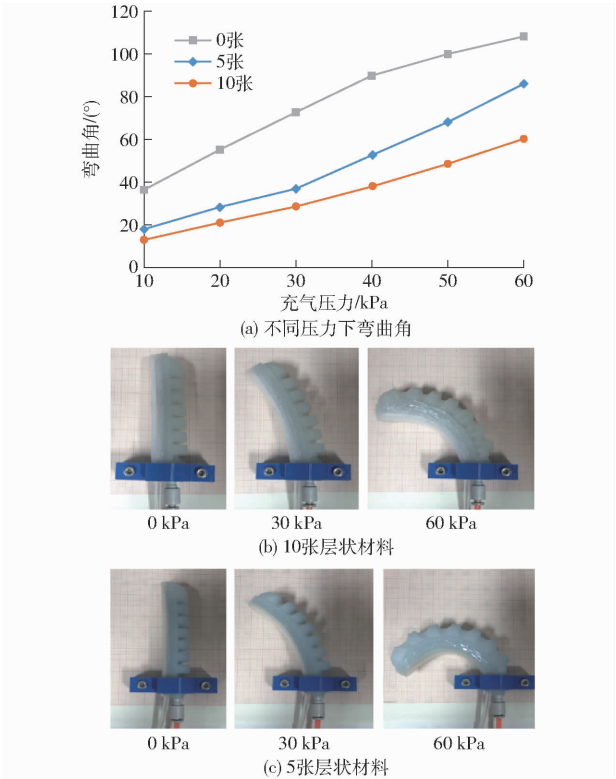


图 13 软体机械手弯曲角测试

Fig. 13 Bending angle test of soft manipulator

30 kPa 时,软体手指无法克服限制层内部 A4 纸层与层之间的摩擦力,故其角度增长趋势较为缓慢。气压增大至 30 kPa 以后,弯曲角增加趋势明显。

2.3 末端输出力试验

利用如图 14 所示的方案测试软体机械手的末

端输出力。采用夹具固定变刚度软体机械手充气端,将推拉力计安装在 0°对应的位置上,利用凯夫拉线将机械手末端与推拉力计测头连接,然后向腔体内部充入压缩气体,记录不同压力下推拉力计的示数,再将推拉力计安装在其他测量位置上,重复上述步骤。

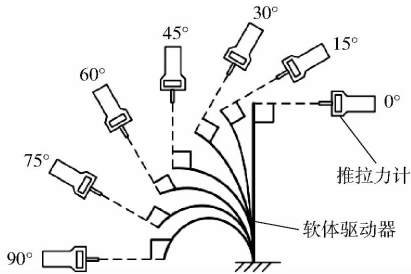


图 14 末端输出力示意图

Fig. 14 Schematic of terminal output force

根据上述试验步骤,分别针对变刚度层有、无抽真空的情况进行试验,得到 2 种情况下不同弯曲角位置的末端输出力如表 1、2 所示。

表 1 非真空下变刚度机械手的末端输出力

Tab. 1 End output force of manipulator with variable stiffness off

充气压力/kPa	弯曲角/(°)							N
	0	15	30	45	60	75	90	
10	0.20	0	0	0	0	0	0	
20	0.34	0.10	0	0	0	0	0	
30	0.58	0.38	0.18	0	0	0	0	
40	0.73	0.42	0.24	0.18	0	0	0	
50	1.13	0.75	0.48	0.26	0.15	0	0	
60	1.83	1.61	1.32	0.77	0.41	0.18	0	

表 2 真空下变刚度机械手的末端输出力

Tab. 2 End output force of manipulator with variable stiffness on

充气压力/kPa	弯曲角/(°)							N
	0	15	30	45	60	75	90	
10	0.28	0.12	0	0	0	0	0	
20	0.46	0.21	0	0	0	0	0	
30	0.80	0.48	0.24	0	0	0	0	
40	0.98	0.64	0.5	0.29	0	0	0	
50	1.7	1.14	0.84	0.6	0.28	0	0	
60	2.13	1.93	1.64	1.32	0.92	0.54	0	

由表 1、2 可知,同一气压下,末端输出力随弯曲角的增大而减小。弯曲到最大角度时,末端输出力为 0,并且在相同弯曲角下,充气压力越大,末端输出力越大,且增长趋势变快。图 15 为角度为 0°时不同气压下末端输出力的对比,可见真空发生时引起层状干扰作用,层状结构相互挤压,层与层之间的压力增大,进而摩擦力随之增大,整体结构刚度提

升,导致其末端输出力大于未抽真空状态下的,其末端输出力最大可达 2.13 N。比较图 6 和图 15,未置入 A4 纸的软体手指末端输出力在各个气压下的最大值相同。

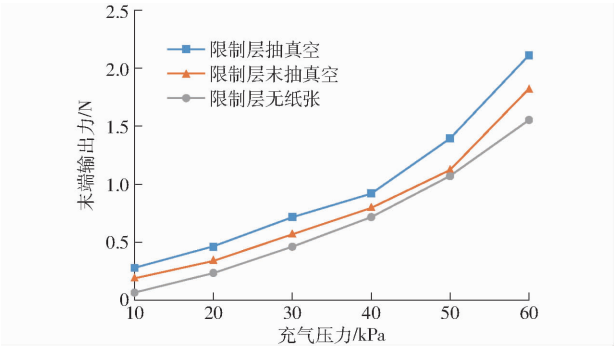


图 15 角度为 0°时不同气压下末端输出力对比
Fig. 15 Comparison of terminal output force under different air pressures when angle was 0°

3 软体机械手抓取试验

3.1 抓取方式

常见软体机械手抓取方式有指尖抓取和包络抓取,如图 16 所示;指尖抓取指机械手的指尖与抓取物体的表面接触,接触面积较小,通常用于对体积较小物体的抓取,包络抓取指机械手根据抓取物体的轮廓,将整个物体包裹住,接触面积大,通过接触产生的摩擦力和弯曲产生的弯矩提供抓取力,因此包络抓取能够提供更大的抓取力,抓取更加稳定,适用于体积较大物体的抓取。

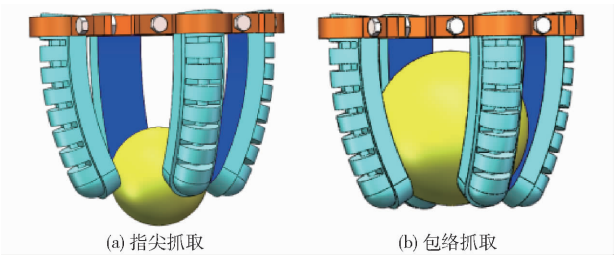


图 16 软体机械手抓取方式
Fig. 16 Grabbing mode of soft manipulator

如图 17 所示,将软体机械手安装在越疆公司的 DOBOT Magician 机械臂上,利用测力计 (Shimpo FGJ-50 型),测试两种抓取方式的抓取力,试验结果如表 3 所示。

由表 3 可知,随着气压的增大抓取力也增大,且包络抓取力均大于指尖抓取力,指尖抓取力 F_f 最大为 2.81 N,而包络抓取力 F_e 最大为 11.89 N。此现象主要原因为:指尖抓取时机械手指尖与抓取物体的表面接触面积较小,主要利用机械手各手指单元的末端输出力克服物体重力,而包络抓取时机械手将整个物体包裹住,接触面积大,通过接触产生的摩

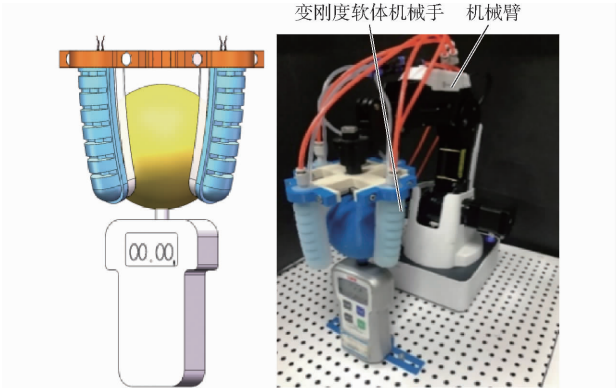


图 17 软体机械手抓取试验示意图

Fig. 17 Schematic of soft manipulator grasping experiment

表 3 不同抓取策略下抓取力

Tab.3 Grasping force under different grasping strategies

抓取方式	充气压力/kPa					
	10	20	30	40	50	60
指尖抓取	0.56	1.08	1.68	2.14	2.42	2.81
包络抓取	0.98	1.92	3.23	5.15	8.76	11.89

擦力和弯曲产生的弯矩提供抓取力,包络抓取能够提供更大的抓取力,抓取更加稳定。

3.2 水果抓取试验

为了进一步验证变刚度机械手用于果蔬采摘的可行性,将选择不同形状、大小的物体进行抽真空下变刚度软体机械手指尖和包络抓取试验,如图 18 所示,对橙子、梨以及苹果采用包络抓取,对小橘子、圣女果以及草莓采用指尖抓取。试验中,通过调节软体机械手工作气压和刚度,各操作对象均被稳定、无

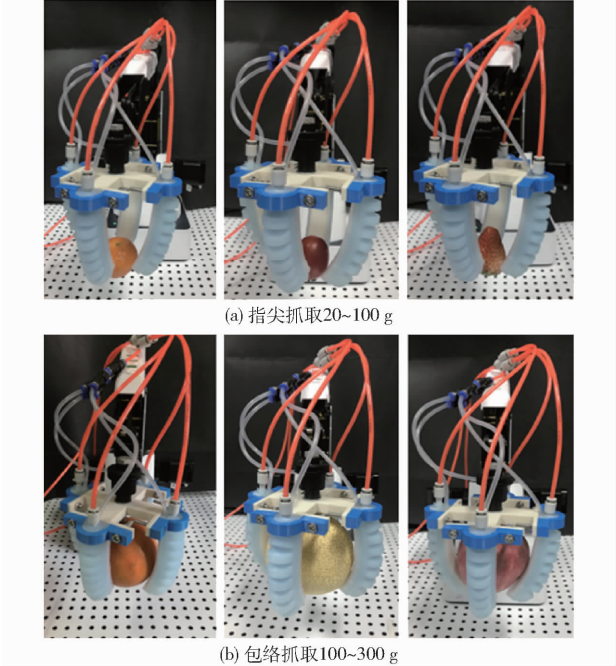


图 18 变刚度机械手抓取不同物体演示

Fig. 18 Variable stiffness manipulator grasping different objects demonstration

损抓取,被抓取物体的质量、所需气压和弯曲刚度如表 4 所示。

表 4 抓取对象质量与所需气压

Tab.4 Grasping object mass and required air pressure			
物体	质量/g	气压/kPa	弯曲刚度/(N·m·rad ⁻¹)
梨	321.4	40	0.401
苹果	169.6	25	0.074
橙子	254.7	30	0.165
小橘子	32.5	20	0.072
圣女果	22.0	10	0.034
草莓	24.2	15	0.055

4 结论

(1)以提升软体手的抓取能力为目的,设计了

一种内嵌传感器的四指软体机械手,建立了软体驱动器的弯曲特性和末端输出力的数学模型,可预测施加不同气压时的软体驱动器性能,试验结果表明模型准确度较高。

(2)分析了限制层刚度变化对软体手指性能的影响,开展了软体手指的弯曲试验、末端输出力的测量试验,结果表明限制层置入层状材料层数越多,弯曲角越小;层状材料层数越多,软体手指末端输出力越大。

(3)通过抓取试验验证软体机械手用于果蔬采摘的可行性,测出软体机械手最大输出力可达 11.89 N。限制层刚度变化能极大提升软体机械手的承载能力,在果蔬采摘时,可根据采摘对象调节刚度保证易碎易损果蔬的无损采收。

参 考 文 献

[1] 赵京,张自强,郑强,等. 机器人安全性研究现状及发展趋势[J]. 北京航空航天大学学报, 2018,44(7):1347-1358. ZHAO Jing, ZHANG Ziqiang, ZHENG Qiang, et al. Research status and development trend of robot safety[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018,44(7): 1347-1358. (in Chinese)

[2] ROBERTSO M A, SADEGHI H, FLOREZ J M, et al. Soft pneumatic actuator fascicles for high force and reliability[J]. Soft Robotics, 2017, 4(1):23-32.

[3] POLYGERINOS P, CORRELL N, MORIN S A, et al. Soft robotics; review of fluid-driven intrinsically soft devices; manufacturing, sensing, control, and applications in human-robot interaction[J]. Advanced Engineering Materials, 2017, 19(12): 1700016.

[4] 张进华,王韬,洪军,等. 软体机械手研究综述[J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 19-28. ZHANG Jinhua, WANG Tao, HONG Jun, et al. Review of soft-bodied manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017,53(13):19-28. (in Chinese)

[5] ZHANG Z, NI X, WU H, et al. Pneumatically actuated soft gripper with bistable structures[J]. Soft Robotics, 2022, 9(1): 57-71.

[6] 张忠强,邹娇,丁建宁,等. 软体机器人驱动研究现状[J]. 机器人, 2018,40(5):648-659. ZHANG Zhongqiang, ZOU Jiao, DING Jianning, et al. Research status of the soft robot driving[J]. Robot, 2018,40(5): 648-659. (in Chinese)

[7] 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)

[8] NAVAS E, FERNÁNDEZ R, SEPÚLVEDA D, et al. Soft gripper for robotic harvesting in precision agriculture applications[C]// 2021 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC). IEEE, 2021: 167-172.

[9] SONG S, DROTLEF D M, SON D, et al. Adaptive self-sealing suction-based soft robotic gripper[J]. Advanced Science, 2021, 8(17): 2100641.

[10] BISHOP-MOSER J, KOTA S. Design and modeling of generalized fiber-reinforced pneumatic soft actuators[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(3): 536-545.

[11] CONNOLLY F, WALSH C J, BERTOLDI K. Automatic design of fiber-reinforced soft actuators for trajectory matching[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2017, 114(1): 51-56.

[12] 姚兴田,王旭光,张磊,等. 基于滑块摇杆机构的柔性三指机器人手爪研究[J]. 农业机械学报,2021,52(8):396-405. YAO Xingtian, WANG Xuguang, ZHANG Lei, et al. Flexible robot hand based on slider and rocker mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8):396-405. (in Chinese)

[13] WANG Z, TORIGOE Y, HIRAI S. A prestressed soft gripper: design, modeling, fabrication, and tests for food handling[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2017, 2(4): 1909-1916.

[14] SHIN J H, PARK J G, KIM D I, et al. A universal soft gripper with the optimized fin ray finger[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2021, 8(3):889-899.

[15] HAO Y, GONG Z, XIE Z, et al. Universal soft pneumatic robotic gripper with variable effective length[C]// 2016 35th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2016: 6109-6114.

[16] 项超群,郝丽娜,张颖,等. 软体手臂刚度特性分析[J]. 农业机械学报, 2017,48(6):407-412.

- XIANG Chaoqun, HAO Li'na, ZHANG Ying, et al. Analysis of stiffness characteristics of soft arm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 407–412. (in Chinese)
- [17] 皮杰, 柳军, 徐磊, 等. 三指柔性气动夹爪结构设计与实验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 93–101.
PI Jie, LIU Jun, XU Lei, et al. Structure design and experiment of three finger flexible pneumatic gripper[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 93–101. (in Chinese)
- [18] DILIBAL S, SAHIN H, DANQUAH J O, et al. Additively manufactured custom soft gripper with embedded soft force sensors for an industrial robot[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2021, 22(4): 709–718.
- [19] ZAIDI S, MASELLI M, LASCHI C, et al. Actuation technologies for soft robot grippers and manipulators: a review[J]. Current Robotics Reports, 2021, 2(3): 355–369.
- [20] SHAH D S, POWERS J P, TILTON L G, et al. A soft robot that adapts to environments through shape change[J]. Nature Machine Intelligence, 2021, 3(1): 51–59.
- [21] POLYGERINOS P, WANG Z, OVERVELDE J T B, et al. Modeling of soft fiber-reinforced bending actuators[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(3): 778–789.
- [22] 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)
- [23] 姚建涛, 陈新博, 陈俊涛, 等. 软体机械手遥操作系统的设计与分析[J]. 中国机械工程, 2020, 31(16): 1968–1977.
YAO Jiantao, CHEN Xinbo, CHEN Juntao, et al. Design and analysis of soft manipulator teleoperation systems[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(16): 1968–1977. (in Chinese)
- [24] 顾苏程, 王保兴, 刘俊辰, 等. 纤维增强型软体夹持器变形及末端接触力[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(2): 447–456.
GU Sucheng, WANG Baoxing, LIU Junchen, et al. Deformation and end contact force of fiber-reinforced soft gripper[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(2): 447–456. (in Chinese)
- [25] 华超, 褚凯梅, 陈昕, 等. 软体水果采摘机械手系统设计分析与试验[J]. 林业工程学报, 2021, 6(3): 127–132.
HUA Chao, CHU Kaimei, CHEN Xin, et al. Design, analysis and experimental study of soft picking manipulator system for fruit harvesting[J]. Journal of Forestry Engineering, 2021, 6(3): 127–132. (in Chinese)

(上接第 433 页)

- [21] STIGGER T, PFURNER M, HUSTY M. Workspace and singularity analysis of a 3-RRR parallel manipulator[C]// Mechanisms and Machine Science, Springer, Cham., 2018.
- [22] LI Ju, MCCARTHY J M. Analysis of two spherical parallel manipulators with hidden revolute joints[J]. Journal of Mechanisms & Robotics, 2017, 9(3): 031007.
- [23] JHA R, CHABLAT D, ROUILLIER F, et al. Workspace and singularity analysis of a Delta like family robot[C]// 4th IFToMM International Symposium on Robotics and Mechatronics, Poitiers, France, 2015
- [24] 吉昊, 沈惠平, 杨廷力. 一种新型低耦合度半对称 2T1R 并联机构的拓扑设计及运动学[J]. 机械传动, 2020, 44(1): 13–22.
- [25] 沈惠平, 曾博雄, 尤晶晶, 等. 具有解析式位置正解的三平移并联机构设计与分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 383–391, 426.
SHEN Huiping, ZENG Boxiong, YOU Jingjing, et al. Topology design and analysis of three-translation parallel mechanism with analytical direct position solutions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 383–391, 426. (in Chinese)
- [26] 沈惠平, 赵一楠, 许正骁, 等. 低耦合度半对称三平移并联机构拓扑设计与运动学分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 404–411.
SHEN Huiping, ZHAO Yinan, XU Zhengxiao, et al. Topological design and kinematics analysis of novel asymmetric 3 translation parallel manipulator with low coupling degree[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 404–411. (in Chinese)
- [27] 沈惠平, 周金波, 尤晶晶, 等. 具有解析式位置正解的 2T1R 并联机构运动性能分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 398–409.
SHEN Huiping, ZHOU Jinbo, YOU Jingjing, et al. 2T1R parallel mechanism with analytic positive position solutions and its kinematic performance based optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 398–409. (in Chinese)
- [28] 赵一楠. 基于拓扑特征的三平移并联机构的拓扑设计、运动学与刚度分析[D]. 常州: 常州大学, 2020.
ZHAO Yinan. Topological design, kinematics and stiffness analysis of three-translational parallel mechanism based on topological characteristics[D]. Changzhou: Changzhou University, 2020. (in Chinese)