doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.06.003

细长果蔬采摘软体气动抓手设计与参数优化

贾江鸣[1]　叶玉泽[1]　程培林[1]　胡润泽[1]　武传宇[1,2]

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 2. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州 310018)

摘要: 为实现细长果蔬的无损采摘,设计一种充气呈螺旋运动的软体气动抓手。对该抓手进行有限元静力学仿真分析,采用 3 因素 3 水平的中心组合设计与响应面分析方法,研究各因素对软体气动抓手螺旋特性的交互影响。以软体气动抓手的螺旋直径和螺距为响应值,分别建立二次回归模型,得到模型的决定系数分别为 0.998 7 和 0.935 1,各因素对螺旋直径和螺距的影响显著性顺序从大到小均为:壁厚、内腔室高度、腔室角;以软体气动抓手的仿真直径 35 mm、仿真螺距[50 mm,150 mm]为目标函数对各试验因素进行优化,最优设计结果为壁厚 2.51 mm、腔室角 30.52°、内腔室高度 11.91 mm。制作软体气动抓手并进行仿真试验对比,结果表明,螺旋直径与螺距的误差均小于 5%。对该抓手在不同气压下的抓取力进行试验,结果显示,软体气动抓手在气压 0.13 MPa 下至少具有 3.37 N 的抓取力;通过抓取不同尺寸、不同柔软度细长果蔬的试验证明了软体气动抓手抓取的有效性;以水果黄瓜为采摘对象,在 3.6 s 内实现了黄瓜的抓取与断梗。

关键词: 细长果蔬; 采摘机器人; 软体气动抓手; 螺旋运动; 响应面; 仿真优化

中图分类号: TP241　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)06-0026-09　　**OSID**:

Design and Parameter Optimization of Soft Pneumatic Gripper for Slender Fruits and Vegetables Picking

JIA Jiangming[1]　YE Yuze[1]　CHENG Peilin[1]　HU Runze[1]　WU Chuanyu[1,2]

(1. *Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou* 310018, *China*
2. *Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology of Zhejiang Province, Hangzhou* 310018, *China*)

Abstract: In order to realize the nondestructive picking of slender fruits and vegetables, a soft pneumatic gripper with aeration and spiral motion was proposed. Based on the finite element static simulation analysis of the gripper, the interaction effect of each factor on the spiral characteristics of the soft pneumatic gripper was studied by using the three-factor and three-level central combination design and response surface analysis method. The quadratic regression model was established with the spiral diameter and pitch of the soft pneumatic grip as the response values, and the determining coefficients of the model were 0.998 7 and 0.935 1, respectively. The order of significance of the influence of each factor on the spiral diameter and pitch was as follows: wall thickness, cavity width and cavity angle. The simulation diameter of the soft pneumatic gripper was 35 mm, and the simulation pitch [50 mm,150 mm] was taken as the objective function to optimize each influencing factor. The optimal design results were 2.51 mm of wall thickness, 30.52° of chamber angle and 11.91 mm of chamber height. The results of experiment and simulation showed that the error of screw diameter and pitch was less than 5%. The grasping force of the soft pneumatic gripper was measured under different air pressures, and the results showed that the soft pneumatic gripper had the maximum grasping force of 3.37 N at 0.13 MPa. Finally, the effectiveness of the soft pneumatic gripper was demonstrated by grasping slender fruits and vegetables of different sizes and softness. Finally, the cucumber was picked as the object, and the cucumber was successfully captured and the stem was broken in 3.6 s.

Key words: slender fruits and vegetables; picking robot; soft pneumatic gripper; spiral motion; response surface; simulation and optimization

收稿日期: 2020-12-25　修回日期: 2021-01-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51975537)和浙江省基础公益研究计划项目(LGN18E050002)

作者简介: 贾江鸣(1979—),男,讲师,博士,主要从事人工智能算法和软体机器人研究,E-mail: Jarky@zstu.edu.cn

通信作者: 武传宇(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事机构学、机器人技术和智能农业装备研究,E-mail: cywu@zstu.edu.cn

0　引言

近年来，随着中国经济的发展，劳动力紧缺对农业发展的限制已显现，特别是劳动密集型的果蔬采摘产业尤为突出，因此在果蔬采摘领域急需各种类型的采摘机器人[1-5]。由于果蔬柔嫩，在收获过程中有效减少果蔬损伤一直是农产品领域的研究热点[6-8]。在多数果蔬采摘作业中，均需通过采摘抓手对果蔬的夹持作用实现摘取。因此，避免夹持损伤成为实现采摘抓手无损采摘的重点和关键，农业采摘抓手对农业现代化发展具有重要意义[9-11]。

针对有效采摘不同果蔬的问题，诸多学者进行了农业采摘抓手的研究[12-16]；这些研究设计的抓手对类椭圆形果蔬具有较大优势，但对大长径比果蔬的抓取仍存在较大困难。为了采摘黄瓜和茄子等大长径比类果蔬，文献[17]设计了黄瓜采摘抓手，该抓持器由 2 个基于气动柔性驱动器的弯曲关节构成，其机械结构简单、输出力较大，对黄瓜抓取成功率和断梗率较高，抓手的柔顺度有待进一步提高。文献[18]研究的黄瓜采摘抓手的夹持装置由两根夹持手指和吸盘构成，在收获过程中夹持手指承载主要载荷，吸盘起辅助固定作用，由于吸盘承受的载荷较小，在抓取过程难以实现稳定抓取。文献[19]设计了一种两指茄子采摘机器人抓手，其中夹持装置是由电机驱动的两根金属手指，该抓手能够实现 3 ~ 6.5 cm 茄子的抓取。文献[20]设计了茄子抓手，其真空吸附系统和四指配合使用能够实现对茄子的柔性稳定抓取。文献[21]针对黄瓜采摘设计了一种两指式抓手，该抓手由伺服电机驱动，其结构简单、控制方便，但对黄瓜表皮硬度有很高的依赖性。文献[22]针对海参捕获设计了一种水下远程遥控抓手，该抓手能够实现多个自由度的转动，并精准捕获海参。文献[23]设计的甜椒采摘机械手是由与齿轮连接的两根金属手指构成，其结构简单、运动流畅。以上果蔬采摘抓手均为传统的刚性抓手，其精密的驱动部件和传动部件降低了抓手在非结构化环境中应用的可靠性和耐久性，同时需要依靠精密的传感部件和复杂的传感策略才能实现对细长果蔬的无损采摘，因此限制了刚性采摘抓手的应用。

针对上述问题，本文借鉴藤蔓卷曲现象原理，设计一种螺旋缠绕型软体气动抓手。以软体气动抓手的壁厚、腔室角和内腔室高度为试验因素，以该抓手的螺旋半径和螺距为优化目标，采用有限元分析和响应面分析法对软体气动抓手进行优化设计。

1　抓手设计与制作

由于部分农作物果实的形状为细长形且表皮较柔软、易损伤（如黄瓜、茄子、辣椒等），使用传统的刚性采摘抓手难以实现无损采摘[24-25]。受藤蔓卷曲启发，设计如图 1a 所示的螺旋型软体气动抓手，以缠绕的方式紧密包裹细长果蔬。软体气动抓手的螺旋直径和螺距对抓取的细长果蔬的直径有重要影响，螺距决定了抓取过程中细长果蔬受力的均匀性。为设计螺旋型软体气动抓手的尺寸，以市场上水果黄瓜为典型抓取对象，并对水果黄瓜的几何特性进行测量。测量 100 根水果黄瓜的直径和长度，求取平均直径和平均长度分别为 35 mm 和 150 mm。本文设计的螺旋型抓手长度 $L = 200$ mm，软体气动抓手腔室之间的距离 $s = 1.6$ mm，腔室之间通道的尺寸为 $b \times b = 2$ mm $\times$ 2 mm，软体气动抓手的宽度为 W，高度为 H，壁厚为 t，腔室角为 θ，内腔室高度为 h。

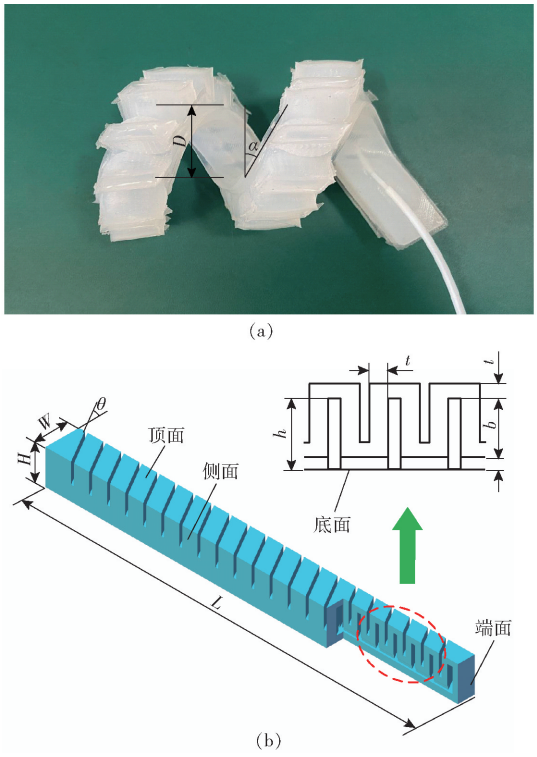


图 1　软体气动抓手结构图

Fig. 1　Structure diagrams of soft pneumatic gripper

目前，软体气动抓手的制作方法主要包括模具铸造法、失蜡法和 3D 打印一体成型方法，本文选用模具铸造法作为软体气动抓手的制作方法，制作过程如图 2 所示。首先，用 3D 打印制作所需的 3 个铸造模具（PLA - F170 型，Stratasys），分别为模具 1、模具 2、模具 3，并将模具 1 和模具 2 组装为模具 4。其次，将脱泡液体硅胶倒入模具 3 和组装好的模具 4 中，并将其放入内部温度为 60℃ 的真空干燥箱中

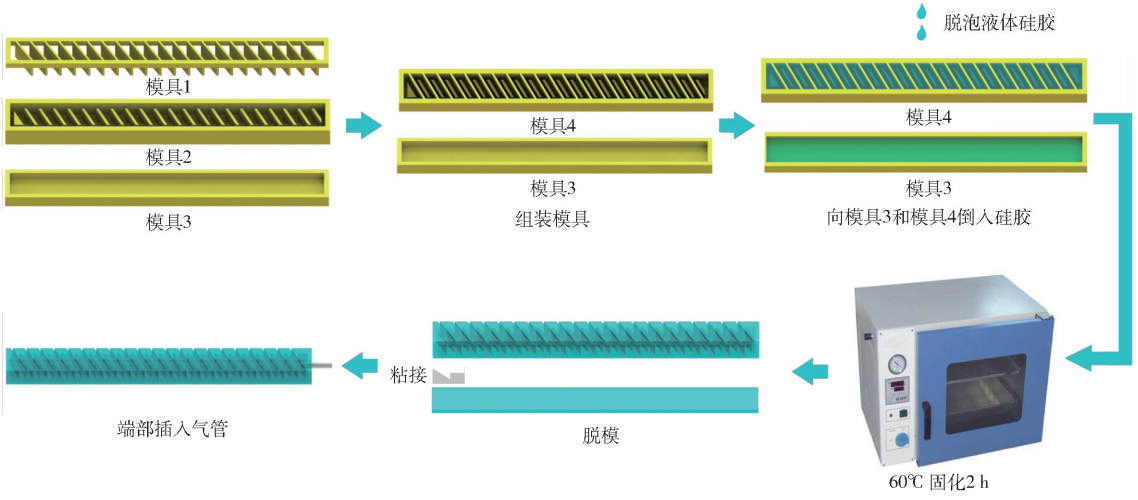


图 2 软体气动抓手的制作过程

Fig. 2 Fabricating process of soft pneumatic gripper

固化 2 h。从模具 4 中取出固化的软体气动抓手上层。然后,用脱泡液体硅胶粘合软体气动抓手的上层和下层,并将其放入内部温度为 60℃ 的真空干燥箱中固化 2 h。最后,取出制作完成的软体气动抓手,并在其端部插入气管。

2 有限元分析

通过仿真工具研究不同参数下抓手的变形情况。该抓手是由硅橡胶(超弹性材料)制作,在气压的作用下发生非线性大变形,传统基于小变形假设的线弹性理论将难以解释其变形过程。通常,硅橡胶材料的本构模型是基于材料的应力-应变关系与唯象理论建立的。通过单轴拉伸试验得到的应力-应变关系数据代入本构模型中拟合出模型参数,拟合结果能预测柔性材料的拉伸和剪切等力学行为并较准确地描述非线性材料的大变形特性。目前常用的硅橡胶材料的本构模型有 Neo - Hookean、Ogden、Mooney - Rivlin、Yeoh、Arruda - Boyce、Blatz - Ko、Saint Venant - Kirchhoff 等[26]。本文设计软体气动抓手的制作材料为 dragon skin 30,文献[27]研究表明,Yeoh 模型拟合出的材料常数更加符合材料的真实情况。Yeoh 模型应变能函数为

$$\Psi = C_{10}(I_C - 3) + C_{20}(I_C - 3)^2 + C_{30}(I_C - 3)^3 \tag{1}$$

式中 Ψ——应变能函数

C_{10}、C_{20}、C_{30}——材料常数,分别取 0.1、0.119、0.000 604

I_C——柯西-格林张量的第一主不变量

本文利用 ABAQUS 有限元仿真软件分析软体气动抓手的变形特性及抓取仿真。首先,使用三维建模软件 SolidWorks 建立该抓手的三维模型并保存为“.x_t”格式,将该模型导入 ABAQUS 的前处理界面中。其次,选择材料的本构模型为 Yeoh 模型,并分别设置材料常数 C_{10}、C_{20} 和 C_{30} 为 0.1、0.119 和 0.000 604。然后,为了适应结构复杂性,划分软体气动抓手的网格结构为四面体网格。由于该抓手的材料为不可压缩的硅橡胶材料,因此本文采用杂交单元的仿真模式。最后,限制该抓手前端面的变形,并在内腔室表面施加 0.08 MPa 的均布压强。以上设置完成后开始仿真,仿真完成后可在 ABAQUS 后处理面板查看变形仿真及抓取结果,如图 3、4 所示。

3 试验设计与结果分析

3.1 试验因素与水平

由初步的抓取试验可知,软体气动抓手的壁厚、内腔室高度和腔室角对其螺旋半径和螺距均有影响,以下使用响应面优化法以壁厚、内腔室高度和腔室角作为影响因素,以螺旋半径和螺距为优化目标对软体气动抓手的尺寸参数进行优化。通过单因素仿真确定软体气动抓手的螺旋直径为 35 mm(水果黄瓜平均直径)时,其壁厚、内腔室高度和腔室角的范围分别为 2 ~ 3 mm、8 ~ 12 mm 和 30° ~ 60°。采用 3 因素 3 水平中心组合设计的 Box - Behnken 试验,壁厚、内腔室高度和腔室角编码如表 1 所示,并在最大气压为 0.08 MPa(仿真气压)下分别开展螺旋直径和螺距的仿真优化试验。

3.2 试验方案与结果

采用 Design-Expert 8.0(Stat-EaseIne,USA)进行试验设计、数据处理与统计分析。根据 Box - Behnken 试验结构对仿真优化试验进行设计,以各影响因素水平为自变量,以仿真半径与螺距为优化目标,试验结果如表 2 所示。

根据表2的数据样本,通过 Design-Expert 8.0

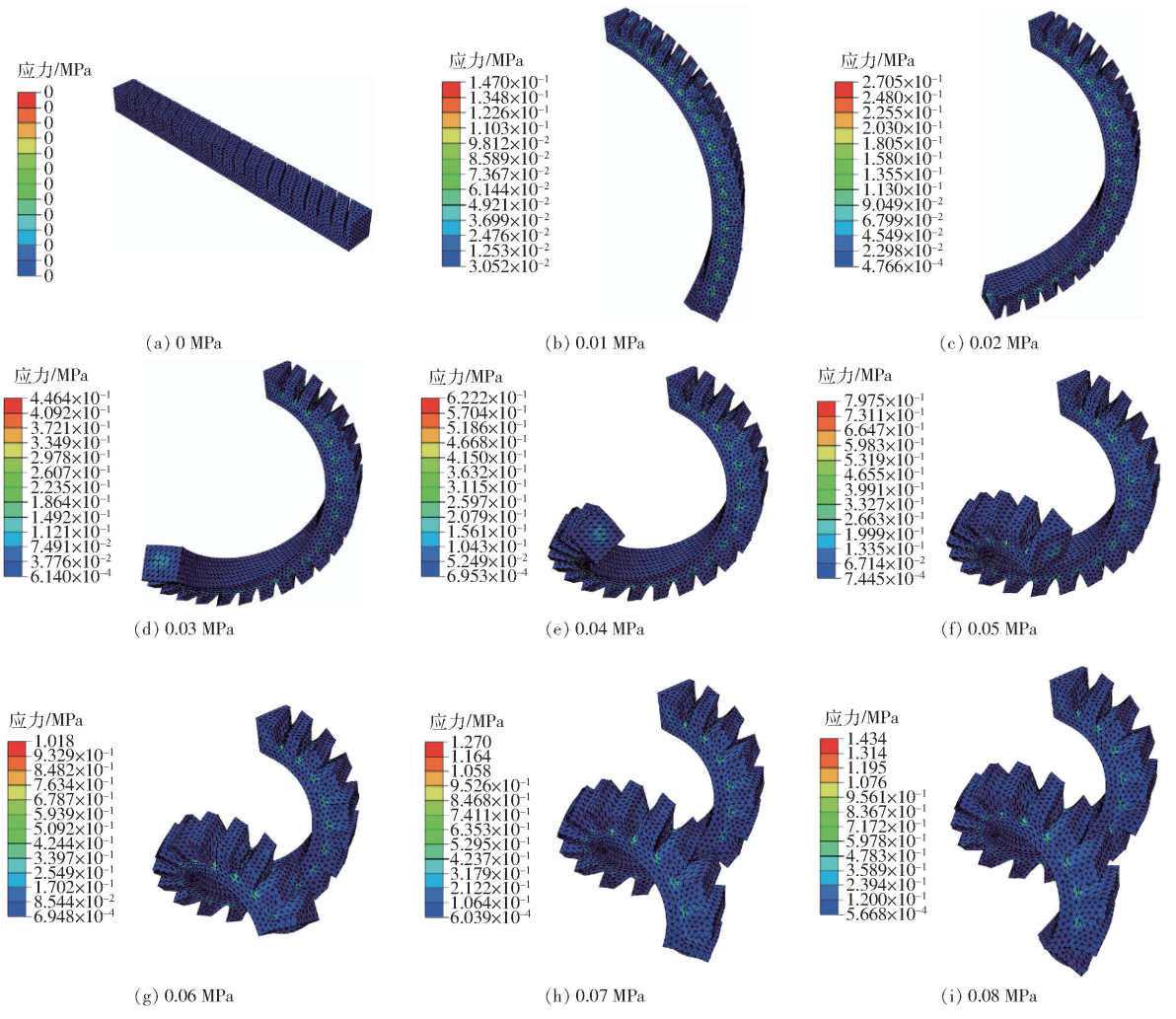


图 3　软体气动抓手在不同压力下的仿真变形图

Fig. 3　Simulated deformation diagrams of soft pneumatic gripper under different pressures

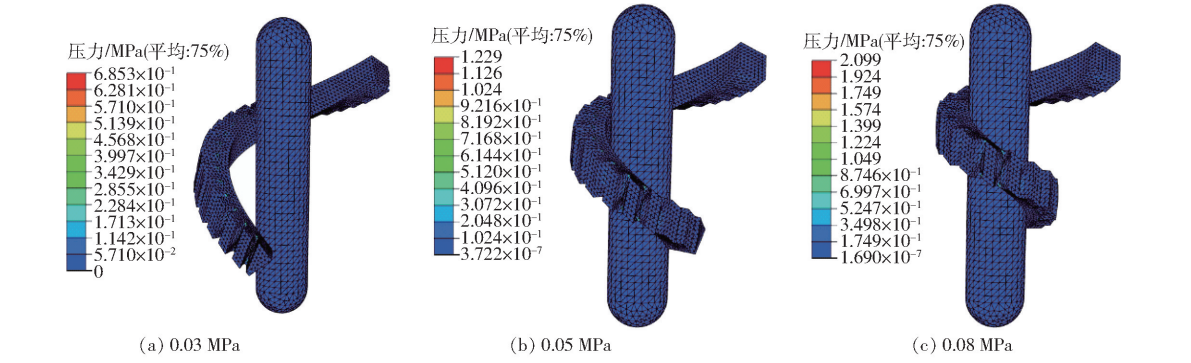


图 4　软体气动抓手在不同压力下对细长果蔬的抓取仿真图

Fig. 4　Simulated diagrams of soft pneumatic gripper grasping slender fruits and vegetables under different pressures

表 1　响应面试验因素编码

Tab. 1　Factors codes

编码	因素		
	壁厚 A/mm	内腔室高度 B/mm	腔室角 C/(°)
-1	2	8	30
0	2.5	10	45
1	3	12	60

软件得到仿真半径 Y_1 与螺距 Y_2 的二次多项式回归模型

$$Y_1 = 1/(0.027 - 0.01A + 9.624\times10^{-3}B + 5.564\times10^{-3}C - 2.108\times10^{-3}AB - 1.875\times10^{-3}AC + 2.314\times10^{-3}BC + 2.726\times10^{-3}A^2 - 6.299\times10^{-4}B^2 + 3.114\times10^{-4}C^2) \quad (2)$$

$$Y_2 = 1/(7.763\times10^{-3} - 2.849\times10^{-3}A + 2.204\times10^{-3}B - 1.788\times10^{-3}C - 5.19\times10^{-4}AB + 8.31\times10^{-4}AC + 3.994\times10^{-4}BC + 1.268\times10^{-3}A^2 - 8.429\times10^{-4}B^2 - 3.933\times10^{-4}C^2) \quad (3)$$

表 2 试验设计方案及响应值结果

Tab. 2 Experiment design and response values

序号	壁厚/mm	内腔室高度/mm	腔室角/(°)	仿真直径/mm	螺距/mm
1	2.0	10	30	30.64	66.52
2	3.0	12	45	38.05	126.78
3	3.0	10	60	40.82	256.06
4	2.5	8	60	48.82	282.00
5	3.0	10	30	60.14	137.08
6	2.5	12	60	22.56	135.02
7	2.5	10	45	36.49	129.12
8	2.5	8	30	69.08	155.12
9	2.5	10	45	37.02	142.41
10	2.0	12	45	19.23	70.20
11	2.5	12	30	34.41	114.82
12	3.0	8	45	89.16	315.44
13	2.0	10	60	20.83	120.2
14	2.5	10	45	36.88	121.04
15	2.5	10	45	36.10	116.75
16	2.5	10	45	35.98	138.46
17	2.0	8	45	35.08	134.2

由表 3 和表 4 可知,两回归模型的 P 均小于 0.01,表明回归模型高度显著;两模型失拟项的 $P>0.05$,说明模型失拟性不显著,回归模型拟合程度高。由壁厚、内腔室高度、腔室角的 P 可判断 3 个试验因素对仿真直径与螺距都有极显著影响,试验因素对仿真半径的影响从大到小依次为壁厚、内腔室高度、腔室角,对螺距的影响从大到小依次为壁厚、内腔室高度、腔室角;仿真直径回归模型 $P<0.05$,螺距回归模型 $P<0.05$,表明 3 个回归项在回归模型中交互影响显著;两模型的决定系数 R^2 分别为 0.998 7、0.935 1,均大于 0.93,表明各模型可以解释 93% 以上响应值变化,预测值与实际值之间具有高度的相关性,试验误差较小。变异系数分别为 15.37%、2.09%,精密度分别为 13.059、87.228,表明该仿真直径与螺距拟合回归模型具有较高的可靠性,因此可用模型对指数进行分析与预测。

表 3 仿真直径二次多项式模型方差分析

Tab. 3 Variance analysis of second-order polynomial model of simulated diameter

方差来源	均方	自由度	平方和	P
模型	0.001 926	9	0.000 214	<0.000 1 **
A	0.000 851	1	0.000 851	<0.000 1 **
B	0.000 741	1	0.000 741	<0.000 1 **
C	0.000 248	1	0.000 248	<0.000 1 **
AB	1.78×10^{-5}	1	1.78×10^{-5}	0.000 2 **
AC	1.41×10^{-5}	1	1.41×10^{-5}	0.000 4 **
BC	2.14×10^{-5}	1	2.14×10^{-5}	0.000 1 **
A^2	3.13×10^{-5}	1	3.13×10^{-5}	<0.000 1 **
B^2	1.67×10^{-6}	1	1.67×10^{-6}	0.066 8
C^2	4.08×10^{-7}	1	4.08×10^{-7}	0.319 3
残差	2.49×10^{-6}	7	3.55×10^{-7}	
失拟项	2.01×10^{-6}	3	6.7×10^{-7}	0.064 2
纯误差	4.76×10^{-7}	4	1.19×10^{-7}	
总和	0.001 929	16		

注:** 表示该项极显著($P<0.01$),下同。

表 4 螺距二次多项式模型方差分析

Tab. 4 Variance analysis of second-order polynomial model of simulated pitch

方差来源	均方	自由度	平方和	P
模型	0.000 144	9	1.6×10^{-5}	0.002 2 **
A	6.49×10^{-5}	1	6.49×10^{-5}	0.000 3 **
B	3.89×10^{-5}	1	3.89×10^{-5}	0.001 2 **
C	2.56×10^{-5}	1	2.56×10^{-5}	0.003 9 **
AB	1.08×10^{-6}	1	1.08×10^{-6}	0.413 9
AC	2.76×10^{-6}	1	2.76×10^{-6}	0.207
BC	6.38×10^{-7}	1	6.38×10^{-7}	0.525 4
A^2	6.77×10^{-6}	1	6.77×10^{-6}	0.065 9
B^2	2.99×10^{-6}	1	2.99×10^{-6}	0.191 1
C^2	6.51×10^{-7}	1	6.51×10^{-7}	0.521 3
残差	1×10^{-5}	7	1.43×10^{-6}	
失拟项	8.27×10^{-6}	3	2.76×10^{-6}	0.053
纯误差	1.73×10^{-6}	4	4.34×10^{-7}	
总和	0.000 154	16		

根据回归模型分析结果,利用 Design-Expert 8.0 软件绘制各因素交互效应 3D 响应曲面图。图 5a 为腔室角位于中心水平(腔室角 $C=45°$)时,壁厚 A 与内腔室高度 B 对仿真直径 Y_1 交互作用的响应曲面图。当腔室角 $C=45°$时,仿真直径随着壁厚的增大与内腔室高度的减小而增大;在壁厚 A 较大($A>2.5$ mm)时,随着内腔室高度的减小,仿真直径增大较快;当壁厚 A 较小($A<2.5$ mm)时,随着内腔室高度的减小,仿真直径缓慢增大。当内腔室高度 $B=8$ mm 时,仿真直径随着壁厚 A 增大而快速增大,内腔室高度 $B=12$ mm 时,仿真直径随着壁厚 A 增大而缓慢增大,这是由于壁厚越薄驱动器上下两层的刚度差异越明显,导致在受力相同时,上层的变形效果较明显,从而上下两层形成位移差,软体气动抓手的变形半径越小。

图 5b 为壁厚位于中心水平(壁厚 $A=2.5$ mm)时,内腔室高度 B 与腔室角 C 对仿真直径 Y_1 交互作用的响应曲面图。当壁厚 $A=2.5$ mm 时,仿真直径随着腔室角 C 与内腔室高度的增大而减小;在腔室角 C 较小($C<42°$)时,随着内腔室高度的减小,仿真直径增大较快;当腔室角 C 较大($C>42°$)时,随着内腔室高度的减小,仿真直径缓慢增大。当内腔室高度 $B=8$ mm 时,仿真直径随着腔室角 C 增大而

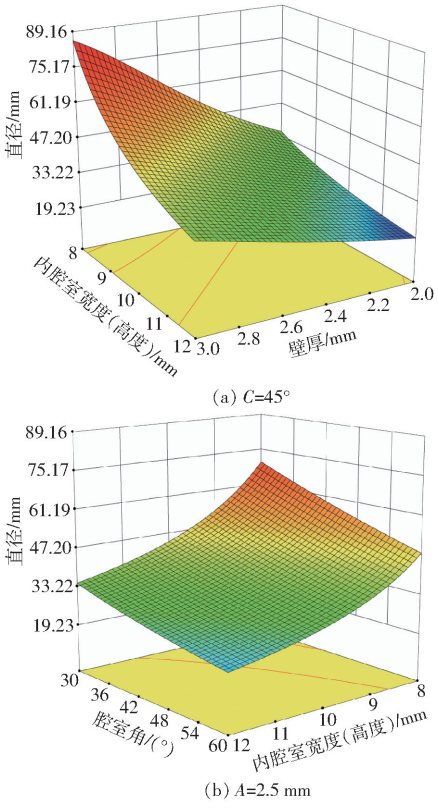


图 5　因素交互作用对仿真直径的影响

Fig. 5　Influence of factor interaction on simulated diameter

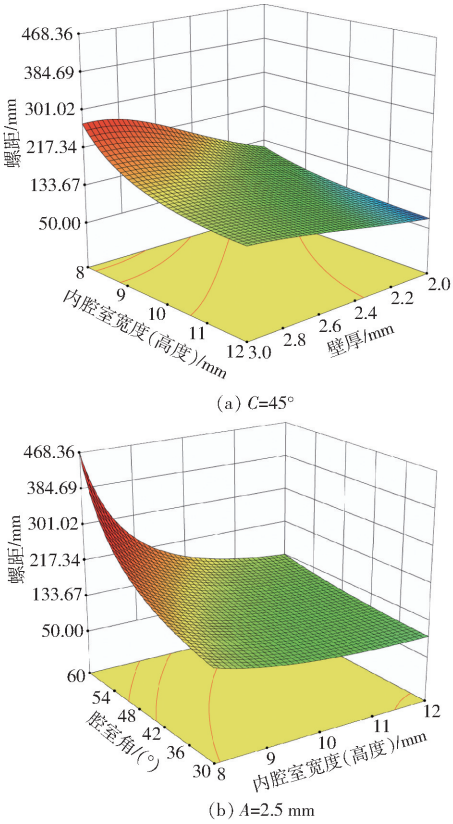


图 6　因素交互作用对仿真螺距的影响

Fig. 6　Influence of factor interaction on simulation pitch

快速减小，内腔室高度 $B=12$ mm 时，仿真直径随着腔室角 C 增大而缓慢减小。

由图 6a 可知，降低内腔室高度和提高壁厚有助于增大螺距；内腔室高度 B 为 12 mm 时，螺距随着壁厚增长而缓慢增大，且最小值为 125 mm；当内腔室高度 B 为 8 mm 时，螺距在壁厚 $A<2.8$ mm 时快速增大，壁厚 $A>2.8$ mm 时缓慢增长，此时螺距最小值为 120 mm，最大值为 265.95 mm，由此可见，壁厚对提高仿真螺距有显著作用。

图 6b 为壁厚位于中心水平（$A=2.5$ mm）时，内腔室高度 B 和腔室角 C 对仿真螺距影响的交互作用。由图 6b 可知，仿真螺距随着腔室角 C 增大而增大；当腔室角较小（$C<45°$）时，仿真螺距随着内腔室高度 B 增大而减小，腔室角较大（$C>45°$）时，仿真螺距随着内腔室高度 B 增大而急剧减小，这是因为当压力一定时，由于上下两层刚度差异，在腔室角较小时，导致弯曲分量在长度 L 方向上较大，当随着角度的增大，弯曲分量在长度 L 方向上越来越少，导致仿真螺距增大较快。

3.3　参数优化与对比试验

通过软体气动抓手螺旋直径与螺距的回归模型，运用 Design-Expert 8.0 软件中 Optimization 功能，以仿真直径 35 mm、仿真螺距[50 mm，150 mm]为目标函数，其变量的取值范围为壁厚A[2 mm，3 mm]、内腔室高度 B[8 mm，12 mm]、腔室角C[30°，60°]，对各参数进行优化求解，得到各因素最优工作参数为 $A=2.51$ mm，$B=11.91$ mm，$C=30.52°$。此时，仿真直径为 35 mm，仿真螺距为 100.05 mm。为验证模型准确性，以上述优化后的工作参数进行验证，试验重复 3 次，结果见表 5。由表 5 知，仿真直径、仿真螺距的相对误差均小于 5%，表明响应面仿真试验能够有效地实现优化。

表 5　模型预测值与试验值比较

Tab. 5　Comparison of model prediction value and test value

响应量	预测值/mm	试验值/mm	相对误差/%
Y_1	35	36.02	2.91
		33.73	3.62
		36.55	4.43
Y_2	100.05	103.94	3.89
		95.51	4.53
		96.75	3.30

4　软体气动抓手抓取试验

4.1　不同气压下的抓取力

本研究的抓取对象是细长果蔬，在满足柔性抓取的基础上以水果黄瓜为抓取对象，测量软体气动抓手在不同气压下的抓取力，如图 7a 所示。通过法

兰将软体气动抓手固定在机械臂(JAKA ZU3)末端,该抓手在气压为 0.08 ~ 0.13 MPa,步长为 0.01 MPa 下分别对水果黄瓜进行抓取。在每个气压下,待软体气动抓手螺旋抓取水果黄瓜后,向水果黄瓜下方悬挂砝码,持续增加砝码质量,直至水果黄瓜与抓手之间产生滑移时,记录悬挂砝码的总质量,该试验在相同条件下进行 5 次,以悬挂砝码总质量 m 的最小值作为软体气动抓手在该气压下的最大摩擦力。通过试验测得黄瓜与硅胶之间的静摩擦因数 μ 为 1.1,考虑黄瓜与在夹持过程中轴线与竖直方向存在微小的夹角 γ 为 6.48°。根据黄瓜的轴向摩擦力平衡可知

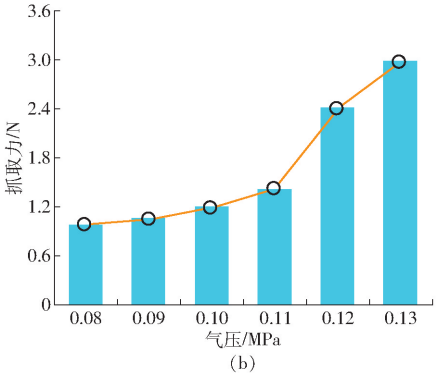
$$\mu(T+mg\sin\gamma)=mg\cos\gamma \tag{4}$$

式中 T——夹持力

试验结果如表 6 所示。



(a)



(b)

图 7 软体气动抓手抓取力测量

Fig. 7 Measurement of grasping force of soft pneumatic gripper

软体气动抓手在不同气压下的抓取力如图 7b 所示,软体气动抓手的抓取力随气压增大而增大。在软体气动抓手不发生破裂的情况下,该抓手在 0.13 MPa 下的最小抓取力为 3.37 N,可以稳定抓取水果黄瓜、长茄等细长果蔬。

4.2 不同尺寸目标物的抓取

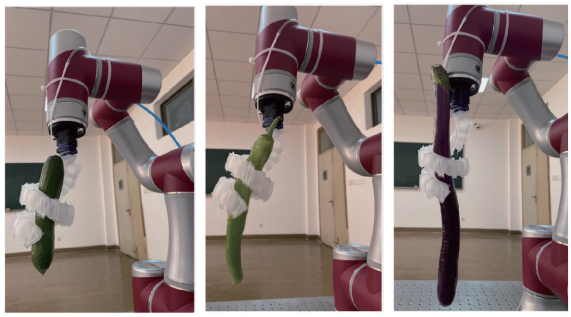
为了研究软体气动抓手抓取目标的适应性,固定在机械臂末端的软体气动抓手分别对水果黄瓜、尖椒和长茄(细长果蔬)进行抓取,如图 8 所示,在

表 6 软体气动抓手在不同气压下的抓取力

Tab. 6 Clamping force of soft pneumatic gripper under different air pressures N

序号	气压/MPa					
	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13
1	1.13	1.20	1.38	1.61	2.74	3.37
2	1.15	1.21	1.37	1.62	2.73	3.38
3	1.12	1.21	1.35	1.62	2.74	3.39
4	1.13	1.21	1.38	1.64	2.74	3.42
5	1.13	1.22	1.38	1.61	2.76	3.40
最小值	1.12	1.20	1.35	1.61	2.73	3.37

商场购买水果黄瓜、尖椒和长茄各 30 根,测量其质量与直径取平均值如表 7 所示。



(a) 水果黄瓜 (b) 尖椒 (c) 长茄

图 8 软体气动抓手的抓取测试

Fig. 8 Grasping test of soft pneumatic gripper

表 7 不同目标物的质量

Tab. 7 Weight of different targets

果蔬类别	质量/g	直径/mm
水果黄瓜	107.46	36.71
尖椒	80.68	23.41
长茄	132.52	29.65

该抓手在气压 0.08 MPa 时,抓取直径 35 mm 的黄瓜质量为 164 g,则抓取较小直径的尖椒、长茄需要更大的气压,因此设定试验压力为 0.11 MPa 并向抓手中充气,直至抓手能够稳定抓取不同尺寸、质量的果蔬,如水果黄瓜、尖椒和长茄。提升机械臂的过程中,抓手能够牢固抓取细长果蔬,且该类果蔬外表皮组织无损伤。试验结果表明,该抓手对细长果蔬无损抓取有效,同时证明了该抓手应用在细长果蔬无损采摘领域的潜力。

4.3 采摘试验

为了进一步验证软体气动抓手可以实现细长果实的采摘,在该抓手的末端安装断梗装置(气剪)并与 JAKA 机械臂末端相连,如图 9 所示。将细绳与黄瓜梗末端相连悬挂在支架上。首先,向抓手中充入 0.08 MPa 的气压使其螺旋变形抓取黄瓜,软体气动抓手能够稳定抓取黄瓜的时间为 2.2 s;然后驱动气剪切断黄瓜梗,成功实现黄瓜的采摘,中间耗时为

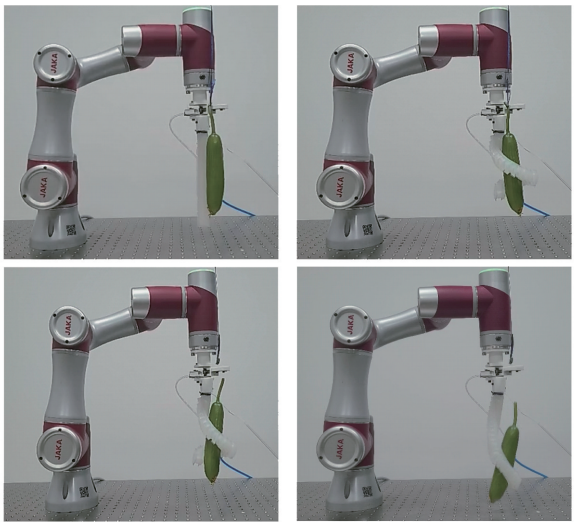


图 9　软体气动抓手对黄瓜的采摘试验

Fig. 9　Picking experiment of soft pneumatic gripper on cucumber

0.5 s；最后，打开放气阀将软体气动抓手中的气体排尽，该抓手恢复初始状态，黄瓜与抓手分离，中间耗时为 0.9 s。因此软体气动抓手采摘黄瓜的总耗时为 3.6 s。

5　结论

（1）设计了一种螺旋变形的软体气动抓手。以该抓手的螺旋直径和螺距作为关键性能参数，对壁厚、内腔室高度和腔室角进行了参数优化。

（2）应用 ABAQUS 有限元仿真软件对该抓手的变形特性进行仿真分析，采用 3 因素 3 水平中心组合设计的 Box－Behnken 试验，结果显示，各因素对螺旋直径和螺距影响的显著性顺序从大到小均为：壁厚、内腔室高度、腔室角，优化后的壁厚、内腔室高度和腔室角分别为 2.51 mm、11.91 mm 和 30.52°，此时螺旋直径和螺距分别为 35 mm 和 100.05 mm。

（3）对优化后的软体气动抓手在不同气压下的抓取力进行测量，结果表明，该抓手在气压 0.13 MPa 下至少具有 3.37 N 的抓取力。抓取试验表明，该抓手对水果黄瓜、尖椒和长茄等细长果蔬可进行无损抓取。动态采摘试验表明，在 3.6 s 内可完成水果黄瓜的无损采摘。

参　考　文　献

[1] 王甲甲，程志强，张伏，等. 果园采摘机械手研究现状综述［J］. 农机化研究，2020，42(5)：258－262.
WANG Jiajia，CHENG Zhiqiang，ZHANG Fu，et al. Design of the divided no-till wheat planter orchard picking manipulator research[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2020，42(5)：258－262.（in Chinese）

[2] 高文硕，宋卫东，王教领，等. 果蔬菌采摘机械研究综述［J］. 中国农机化学报，2020，41(10)：9－15.
GAO Wenshuo，SONG Weidong，WANG Jiaoling，et al. Review on fruit，vegetable and fungus picking machinery[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2020，41(10)：9－15.（in Chinese）

[3] 苑进. 选择性收获机器人技术研究进展与分析［J/OL］. 农业机械学报，2020，51(9)：1－17.
YUAN Jin. Research progress analysis of robotics selective harvesting technologues[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(9)：1－17. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20200901&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.001.（in Chinese）

[4] 罗陆锋，邹湘军，叶敏，等. 基于双目立体视觉的葡萄采摘防碰空间包围体求解与定位［J］. 农业工程学报，2016，32(8)：41－47.
LUO Lufeng，ZOU Xiangjun，YE Min，et al. Caculation and localization df bounding volume of grape for undamaged fruit picking based on binocular stereo vision[J]. Transactions of the CSAE，2016，32(8)：41－47.（in Chinese）

[5] 王飞涛，樊春春，李兆东，等. 机器人在设施农业领域应用现状及发展趋势分析［J］. 中国农机化学报，2020，41(3)：93－98，120.
WANG Feitao，FAN Chunchun，LI Zhaodong，et al. Application status and development trend of robots in the field of facility agriculture[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2020，41(3)：93－98，120.（in Chinese）

[6] 魏国莲，林成全. 果蔬自动化采摘机的机械结构设计与试验［J］. 农机化研究，2020，42(9)：117－124.
WEI Guilian，LIN Chengquan. Mechanical structure design and test of automatic fruit and vegetable picker[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2020，42(9)：117－124.（in Chinese）

[7] 杨长辉，刘艳平，王毅，等. 自然环境下柑橘采摘机器人识别定位系统研究［J/OL］. 农业机械学报，2019，50(12)：14－22，72.
YANG Changhui，LIU Yanping，WANG Yi，et al. Research and experiment on recognition and location systerm for citrus picking robot in natural environment[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(12)：14－22，72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20191202&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.002.（in Chinese）

[8] 曹煦，苏铭. 计算机视觉在果蔬机械采摘中的应用研究［J］. 农机化研究，2021，43(6)：239－242.
CAO Xu，SU Ming. Application research of computer vision in fruit and vegetable machinery picking[J]. Journal of Agricultural

Mechanization Research, 2021, 43(6): 239 - 242. (in Chinese)
[9] 刘凡, 杨光友, 杨康. 农业采摘机器人柔性机械手研究[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(3): 173 - 178.
LIU Fan, YANG Guangyou, YANG Kang. Research on flexible manipulator for agricultural picking robot[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(3): 173 - 178. (in Chinese)
[10] 付舜, 王毅. 类球果蔬采摘末端执行器设计及分析[J]. 湖南农业科学, 2017(3): 16 - 19.
FU Shun, WANG Yi. Design and analysis of end-effector for spherical fruit and vegetable picking[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2017(3): 16 - 19. (in Chinese)
[11] 李国利, 姬长英, 顾宝兴, 等. 多末端苹果采摘机器人机械手运动学分析与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 14 - 21,29.
LI Guoli, JI Changying, GU Baoxing, et al. Kinematics analysis and experiment of apple harvesting robot manipulator with multiple end-effectors[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 14 - 21,29. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20161203&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.003. (in Chinese)
[12] 刘继展, 李萍萍, 倪齐, 等. 番茄采摘机器人真空吸盘装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 170 - 173,184.
LIU Jizhan, LI Pingping, NI Qi, et al. Design and test of the vacuum suction device for tomato harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(10): 170 - 173,184. (in Chinese)
[13] 张曼, 徐瑞峰, 冯青春, 等. 单驱双夹式草莓末端执行器设计[J]. 农机化研究, 2019, 41(6): 93 - 97,103.
ZHANG Man, XU Ruifeng, FENG Qingchun, et al. Design of single-drive dual-clip strawberry end effector[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(6): 93 - 97,103. (in Chinese)
[14] MATTEO R, MARCO C, BURKHARD C, et al. Design and test of a gripper prototype for horticulture products[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017, 44:266 - 275.
[15] JOHN R A J, ERIC B, NICHOLAS R, et al. A positive pressure universal gripper based on the jamming of granular material[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2012, 28(2): 341 - 350.
[16] 唐伟. 苹果采摘机器人末端执行器无损主动抓取技术研究[D]. 镇江:江苏大学, 2017.
TANG Wei. Research on non-destructive and active grasp technology for end-effector of apple picking robot[D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2007. (in Chinese)
[17] 钱少明, 杨庆华, 王志恒, 等. 黄瓜抓持特性与末端采摘执行器研究[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 107 - 112.
QIAN Shaoming, YANG Qinghua, WANG Zhiheng, et al. Research on holding characteristics of cucumber and end-effector of cucumber picking[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7): 107 - 112. (in Chinese)
[18] HENTEN E V, HEMMING J, TUIJL B V, et al. An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses[J]. Autonomous Robots, 2002, 13(3):241 - 258.
[19] 刘长林, 张铁中, 杨丽. 茄子采摘机器人末端执行器设计[J]. 农机化研究, 2008,30(12): 62 - 64.
LIU Changlin, ZHANG Tiezhong, YANG Li. Design of end-effecter of eggplant harvesting robot[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008,30(12): 62 - 64. (in Chinese)
[20] HAYASHI S, GANNO K, KUROSAKI H, et al. Robotic harvesting system for eggplants trained in v-shape (part 1)-system composition and fruit detection[J]. Shokubutsu Kojo Gakkaishi, 2003, 15(4):205 - 210.
[21] 周思路. 黄瓜采摘机械手结构优化及其机器视觉研究[D]. 长春:吉林大学, 2019.
ZHOU Silu. A study of cucumber picking manipulator on structural optimization and machine vision[D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)
[22] YU Fusheng, GUO Haizhi, SHEN Xiaoqian, et al. Design and motion analysis of rov robot for catching sea cucumber[J]. International Journal of Simulation Systems, Science and Technology,2016,17(25):38.1 - 38.7.
[23] SHIVAJI B, KOICHI O, HIDETO S. Design and modeling of gripper and cutting tool system for sweet pepper harvesting robot hand[C]//The 20th MAGDA Conference in Pacific Asia, Kaohsiung, 2011.
[24] 傅隆生, 张发年, 槐岛芳德, 等. 猕猴桃采摘机器人末端执行器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 1 - 8.
FU Longsheng, ZHANG Fanian, GEJIMA Yoshinori, et al. Development and experiment of end-effector for kiwifruit harvesting robot[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 1 - 8. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20150301&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.001. (in Chinese)
[25] 段红燕, 李世杰, 杨浩. 串番茄采摘末端执行器的设计与夹持实验[J]. 农机化研究, 2021, 43(1): 57 - 61.
DUAN Hongyan, LI Shijie, YANG Hao. Design and clamping experiment of end effector for picking string tomato[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(1): 57 - 61. (in Chinese)
[26] MOKARRAM H, PAUL S. More hyperelastic models for rubber-like materials: consistent tangent operators and comparative study[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Materials,2013,22(1 - 2):27 - 50.
[27] PREVIATI G, GOBBI M, MASTINU G. Silicone gels-comparison by derivation of material model parameters[J]. Polymer Testing, 2017, 58:270 - 279.