三指柔性气动夹爪结构设计与实验

皮　杰[1]　柳　军[1]　徐　磊[1]　严旎娜[1]　周科宏[2]　钱明艳[1]

（1. 江苏省农业科学院农业设施与装备研究所，南京 210014；2. 江苏大学农业工程学院，镇江 212013）

摘要：针对水果表皮脆弱易损、不适合采用传统刚性夹爪抓取的问题，基于章鱼触手结构特征，结合仿生学原理和增材制造技术，设计并制作了一种结构简单、具有自适应性的由3个柔性手指和固定组件组成的适用于水果采摘的气动柔性夹爪。采用ANSYS模拟和测试柔性手指在不同气压下的弯曲情况，发现柔性手指可在低压下具有较大的弯曲变形，最大弯曲角为22.4°，气压为100 kPa时，产生最大压力为2.38 N；柔性夹爪的夹持力实验表明，在0～100 kPa的压力范围，柔性夹爪可自适应抓取质量564 g、直径100 mm内的水果，并且水果表面没有损伤，抓取效果良好，达到设计目标要求。

关键词：柔性夹爪；仿生；自适应抓取；气动；实验

中图分类号：TP241；S225　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-1298(2020)S1-0093-09

Structure Design and Experiment of Three Finger Flexible Pneumatic Gripper

PI Jie[1]　LIU Jun[1]　XU Lei[1]　YAN Ni'na[1]　ZHOU Kehong[2]　QIAN Mingyan[1]

(1. *Institute of Agricultural Facilities and Equipment*, *Jiangsu Academy of Agricultural Sciences*, *Nanjing* 210014, *China*
2. *School of Agricultural Engineering*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: In order to solve the problem that the fruit skin is fragile and not suitable to be grasped by traditional rigid gripper, based on the structural characteristics of octopus tentacle, combined with bionics principle and additive manufacturing technology, a kind of pneumatic flexible gripper with simple structure and adaptability, which was composed of three flexible fingers and fixed components, was designed and manufactured. ANSYS was used to simulate and test the bending of flexible fingers under different pressures. It was found that the flexible fingers could have large bending deformation under low pressure. The maximum bending angle was 22.4° and the maximum pressure was 2.38 N when the air pressure was 100 kPa. In order to test the gripping ability of the flexible gripper, a special test device was designed to study the clamping performance of the flexible gripper. The results showed that there was a good linear relationship between the grasping force of the flexible gripper and the input air pressure. Under the pressure of 100 kPa, the maximum grasping force was 5.53 N, and the actual load of the flexible gripper was 564 g. The maximum gripping diameter of the flexible claw can reach 100 mm. The effect was good and reached the design target.

Key words: flexible gripper; bionics; adaptive grasping; pneumatic; experiment

0　引言

针对水果的特殊性、娇嫩性，采用柔性夹爪来抓取水果可以有效避免水果表面损伤[1-4]。与传统刚性夹爪相比，柔性夹爪由柔性材料或可伸缩材料制成，本身具有较好的适应性，可通过较大的变形来更好地贴合目标物体的形状，以抓取尺寸不等的物体[5]，且具有灵活性高、安全性好等特点。

目前，国内外已有很多学者设计出各种柔性夹爪，比如多指型[6-8]、真空吸力型、粘附型[9-12]等。比利时Octinion公司[13]开发的小型草莓采摘机器人，其夹爪采用3D打印技术(3D printing technology)

收稿日期：2020-07-30　修回日期：2020-09-16

基金项目：江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(19)3074)和农业部长江中下游设施农业工程重点实验室项目

作者简介：皮杰(1989—)，女，助理研究员，主要从事智能农业设施装备研究，E-mail：pijiejaas@163.com

通信作者：柳军(1984—)，男，副研究员，主要从事智能农业设施装备、传感器与无损检测技术研究，E-mail：nkyliu@163.com

打印完成。文献[14]设计的鳍条结构甜椒采摘夹爪,能够顺应物体表面形状产生弯曲。文献[15]研制的番茄采摘机器人、文献[16]研发的多腔体气动软体夹爪,自适应能力强,但对抓取物体的包裹性不强,末端接触力较小,抓取物体时稳定性不够高。文献[17]开发的一种装有颗粒物的袋状结构夹爪,通过施加真空调整夹爪刚度,适合抓取各种硬质的小尺寸物体,但该夹具不适用于抓取水果等脆弱物体。文献[18]提出针对褐菇采摘的柔性手爪,仅用较小的抓持力即可实现褐菇的无损采摘。文献[19]提出一种具有有效长度可调的气动柔性仿生夹爪,能够牢固地抓取 2 ~ 170 mm 内的物体。文献[20]研制了离子液凝胶软体机器人操作手。

本文基于章鱼触手结构特征提出一种适用于水果抓取的气动柔性夹爪,夹爪在一定的气压下实现抓持和放松 2 种状态,建立单个柔性手指的有限元模型,进行有限元分析和实验验证,并搭建实验平台,对柔性夹爪进行夹持力测试,以及多种果蔬和物体抓取实验,以期对农业柔性夹爪的设计和应用提供参考。

1 夹爪设计

柔性夹爪是柔性机器人设计中的关键部件,它的性能直接影响机器人的工作效率和品质。基于国内外柔性夹爪案例,结合仿生学理念和软体机器人技术,设计了三指柔性夹爪,其结构如图 1 所示。夹爪包括 3 个气动柔性手指和夹爪固定组件,三指呈圆周等距安装,每对相邻手指之间夹角呈 120°。

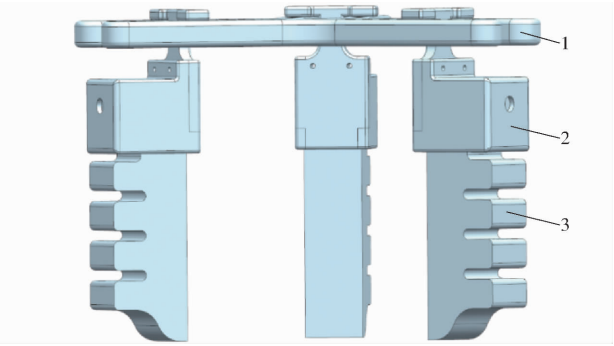


图 1 柔性夹爪结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of flexible claw

1. 底座 2. 固定端 3. 柔性手指

1.1 手指设计

在设计手指时,需要充分考虑抓取对象的应用要求:

(1)抓取目标对象。本文提出的柔性夹爪主要针对的是椭圆形或圆形、直径不大于 100 mm、质量不大于 500 g 的小型水果,如苹果、橙子、草莓、葡萄、蓝莓、小番茄、桃子、猕猴桃等。

(2)抓取对象表面脆弱,易破损,从材料选取和结构设计角度来看,应选取食品级的柔性材料,安全无毒,手指设计应尽可能柔软,具有良好的自适应形变及柔性弯曲变形能力。

(3)为适应不同水果尺寸,手指应能进行吸气和充气 2 种操作,实现正向和反向弯曲 2 种形态。

(4)手指结构应便于制作。

根据柔性夹爪的抓取对象特征,确定该柔性夹爪设计目标:采用柔性材料制作手指活动部分,夹爪初始开口直径不小于 120 mm,负载能力不小于 500 g,夹爪抓取位置为水果下部 1/3 处至底部,因此手指有效变形长度不小于 75 mm。

柔性夹爪仿照章鱼触手结构特征和运动模式进行设计。章鱼触手捕捉猎物时,采用包覆方式包裹住物体,稳定可靠。章鱼触手肌肉组织主要有横肌、纵肌、斜肌 3 种,当一侧的纵肌缩短,其他肌肉组织相互配合,使得另一侧的纵肌被动拉伸,产生沿收缩方向的弯矩,使章鱼触手发生弯曲运动[21-22]。据此,本文经过多次有限元模拟和实验分析,确定手指结构设计如图 2 所示。

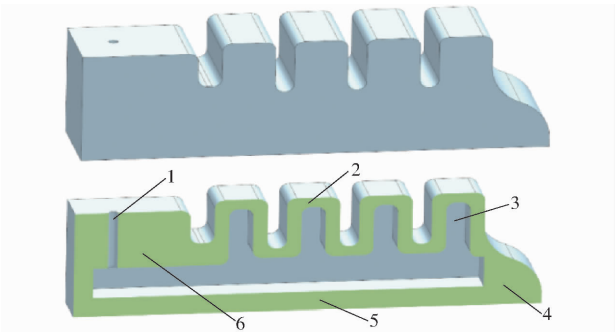


图 2 柔性手指结构设计示意图

Fig. 2 Schematic diagram of flexible finger structure design

1. 气孔 2. 手指顶层 3. 气囊 4. 指尖 5. 底层 6. 手指端部

单个柔性手指由 4 部分组成,即手指端部、顶层、指尖、底层。手指端部设有通气孔,可通过导气管连接外部气源;手指顶层带有 4 个气囊结构,均为空心弹性腔室,与手指端部通气孔相连通;手指指尖设计为实心尖端结构,有助于接触和抓取物体;手指底层设为不可拉伸层,嵌入不可拉伸组织,为减少抓取时的滑动,底层设有表面特征结构。柔性手指总长 100 mm,有效变形长度为 80 mm。

1.2 夹爪固定组件设计

夹爪固定组件包括手指固定端和夹爪底座,如图 3 所示。为缩短制作周期,该部分组件均采用 3D 打印机制作完成。固定端用于固定柔性手指端部和连接外部气源,分为背板和外壳,均采用尼龙碳纤材料打印,外壳中心位置设有通孔,与手指端部气孔位置相对应;固定端通过螺丝固定于夹爪底座,夹爪底

座设有间距为 5 mm 的定位孔，使获得可调的初始开口距离，用以抓取不同直径的目标物体，其开口直径最大可调为 150 mm。夹爪底座可通过法兰等配件与机械臂连接。

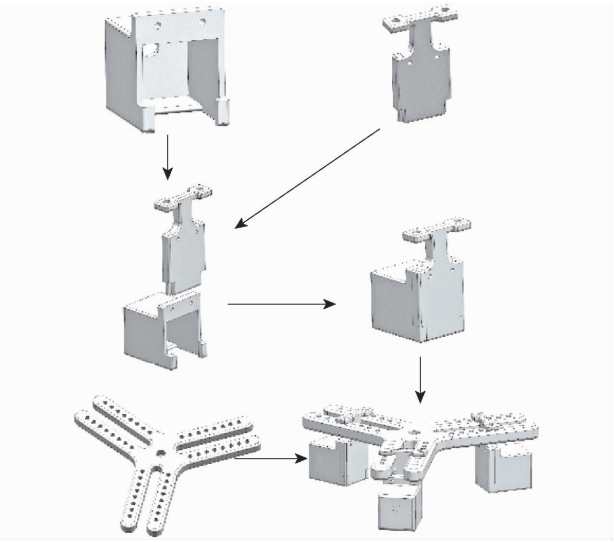


图 3　柔性夹爪固定组件

Fig. 3　Flexible jaw fixing assembly

2　柔性手指制备和有限元分析

2.1　柔性手指制备

经比较 Ecoflex 系列、Dragon skin 系列、Mold Max 系列硅胶性能，参考文献[23]，选用 Dragon skin 系列硅胶制作柔性手指。

柔性手指采用传统的铸造工艺制作，铸造模具由树脂材料采用 3D 打印而成，模具分为手指气囊凹模、气囊阳模和底模 3 部分，如图 4 所示。制作过程如图 5 所示。步骤 A，首先模具涂抹脱模剂，然后将硅橡胶的 1 号胶和 2 号胶混合均匀，放入真空压力下脱气 3 min，脱气后，将足量的混合溶液倒入手指气囊凹模中，最后将手指气囊阳模放入凹模中并压紧，硅胶有溢出说明硅胶充分填充。水平静置 4 h 后，小心脱模，得到成型的手指上半部分。步骤 B，在底模中倒入相同的混合硅胶，并放入限制纤维层以限制手指轴向变形，水平静置 30 min，此时底模部分初步凝固，将手指上半部分放在底模上，水平静置约 3.5 h 后，小心脱模，得到成型手指。

2.2　有限元分析

硅橡胶是一种超弹性材料，变形过程中具有几何非线性和材料非线性，很难预测变形[24]，有限元分析是反映其变形原理的一种有效方法。本文采用有限元软件 ANSYS（ANSYS V17.0）进行手指状态模拟，分析其弯曲性能。根据文献[25]，柔性材料 Dragon skin 30 的断裂伸长率为 364%，密度为 1 080 kg/m^3，Ogden 模型参数：剪切模量 μ_1 =

(a) 气囊凹模　(b) 气囊阳模　(c) 底模

图 4　3D 打印模具

Fig. 4　3D printing mold

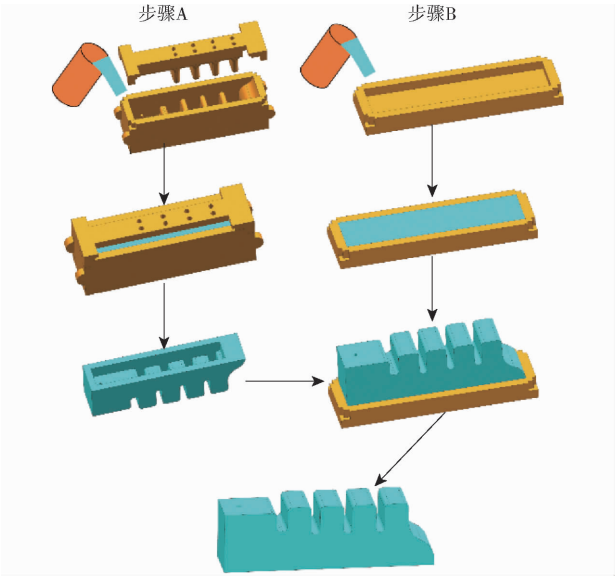
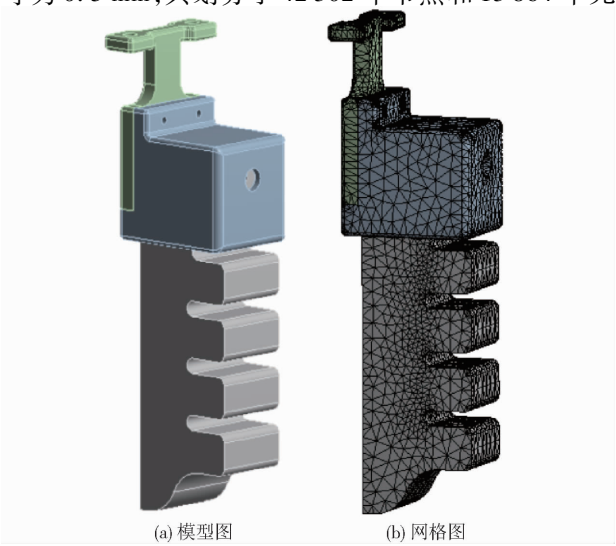


图 5　单个柔性手指制备过程

Fig. 5　Preparation process of single soft finger

0.264 MPa，应变硬化指数 α_1 = 3.015 8，可压缩参数 D_1 = 0 MPa^{-1}，固定端设为刚性材料，变形忽略不计。在 ANSYS Workbench 中创建 Static Structural 模块，添加材料属性，得到 ANSYS 模型，如图 6a 所示。通过对网格细化研究和模型简化，确定网格精度，采用六面体单元对模型进行网格划分，设置最小网格尺寸为 0.5 mm，共划分了 42 302 个节点和 13 864 个元



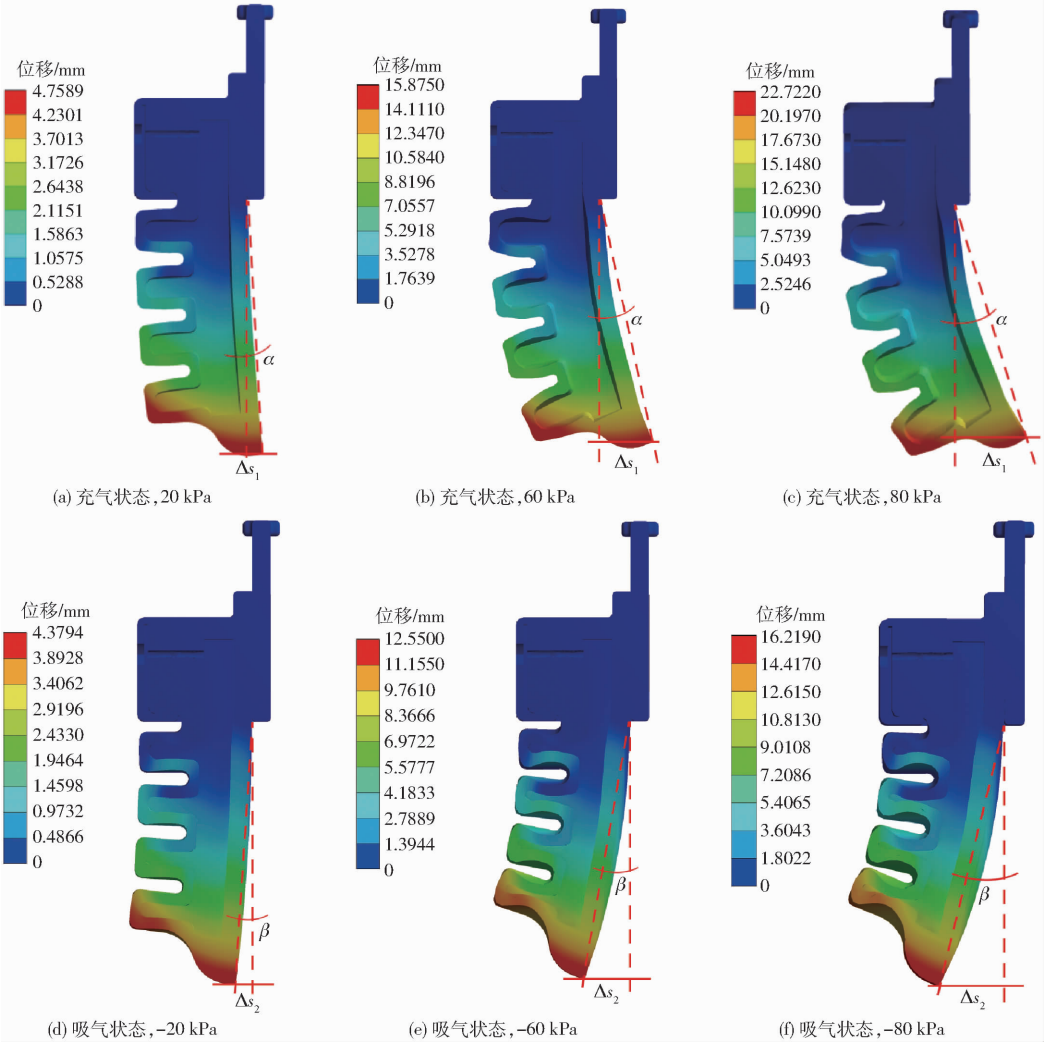
(a) 模型图　(b) 网格图

图 6　有限元模型图

Fig. 6　Finite element model diagrams

素，如图 6b 所示。在相应的手指内表面施加压力荷载，并在相互接触的表面之间产生相互作用，模拟柔性手指充气和吸气 2 种状态。

施加压力为 -100 ~ 100 kPa，间隔 10 kPa，计算柔性手指弯曲角和指尖位移，角度越大，则弯曲程度越大。模拟结果如图 7 所示。



(a) 充气状态，20 kPa (b) 充气状态，60 kPa (c) 充气状态，80 kPa

(d) 吸气状态，-20 kPa (e) 吸气状态，-60 kPa (f) 吸气状态，-80 kPa

图 7 有限元模拟变形图

Fig. 7 Finite element simulation deformation diagrams

手指充气状态模拟结果如图 7a ~ 7c 所示，选取手指指尖切线与垂直线之间的夹角为弯曲角。充气时，手指内表面施加正向气压，手指正向弯曲，随气压增大，应力和弯曲角 α 增大，指尖位移 Δs_1 增大。手指吸气状态模拟结果如图 7d ~ 7f 所示。吸气时，手指内表面施加负压，手指反向弯曲，随气压增大，应力和反向弯曲角 β 增大，指尖位移 Δs_2 增大。气压为 -80 kPa 时，手指气囊内表面完全接触，此时反向弯曲角为 13.01°，指尖位移为 16.219 mm。

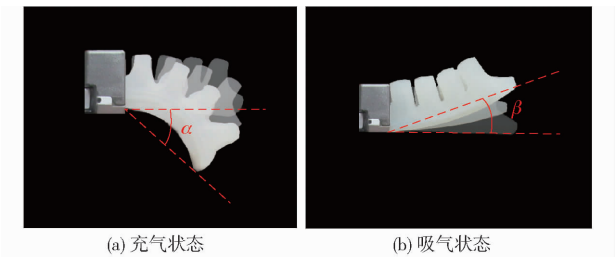
3 实验

通过实验评估柔性夹爪的单指弯曲能力和夹爪抓持能力。

3.1 单指实验

3.1.1 不同输入气压下，手指弯曲角度实验

在不施加外部荷载情况下，研究柔性手指弯曲角度与输入气压的关系。采用空气压缩机提供恒定气压，输入气压与 2.2 节中模拟气压相同，柔性手指弯曲行为由数码相机记录，实验结果如图 8 所示。



(a) 充气状态 (b) 吸气状态

图 8 柔性手指在不同压力下的弯曲变形图

Fig. 8 Diagrams of bending deformation of flexible fingers under different pressures

对比图 7 和图 8，手指在低压下具有较大的弯曲变形，变形趋势与有限元模拟结果一致。模拟结果与实验结果比较如图 9 所示。

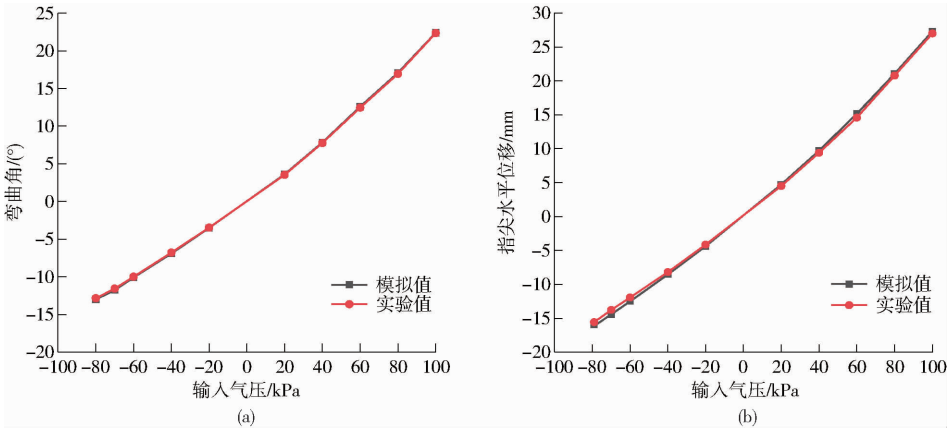


图 9　模拟与实验结果对比

Fig. 9　Comparison between simulation and experimental results

由于输入气压 −80 kPa 时，手指反向弯曲过程中，气囊发生相互接触，计算会自动结束，故吸气状态只到 −80 kPa。由图 9a 可知，弯曲角与输入气压呈现良好线性关系，随输入气压增大，实验值较有限元模拟值小，误差范围小于 2%；由图 9b 可知，指尖水平位移与输入气压呈现良好线性关系，随输入气压增大，实验值较有限元模拟值小，误差范围小于 5%。实验曲线与仿真曲线吻合较好，验证了柔性手指模型的正确性，表明了柔性手指良好的弯曲性能。

3.1.2　不同输入气压下，柔性手指压力实验

柔性夹爪在夹取水果过程中会在接触表面产生压力，如果压力过大，会损伤水果表层，因此，需对柔性手指变形后产生的压力进行实验。实验装置如图 10 所示，手指水平放置，手指端部固定，尖端自由，手指尖端接触固定的推拉力计，无变形时接触力为 0。向柔性手指输入气压，分别为 10 ~ 100 kPa，间隔 10 kPa，记录此过程中的最大压力，每个气压重复实验 10 次，最终取最大压力平均值，结果如图 11 所示。实验结果表明，柔性夹爪的单指压力与手指输入气压呈现良好的线性关系，气压为 100 kPa 时，产生最大压力为 2.38 N。

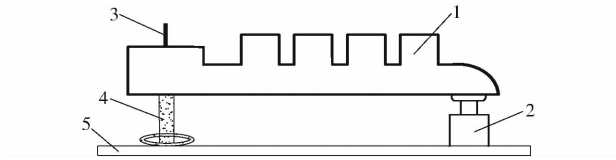


图 10　柔性手指压力测试装置图

Fig. 10　Diagram of flexible finger pressure test device

1. 柔性手指　2. 推拉力计　3. 气管　4. 固定支座　5. 实验台

3.1.3　手指表面特征实验

由于水果表面粗糙程度不同，为减少抓取时的滑动，在柔性手指底层设计表面特征结构以增大摩擦力。本文设计了 7 种表面特征结构（编号 1 ~ 7），如图 12 所示。为了测试不同表面特征结构产生的

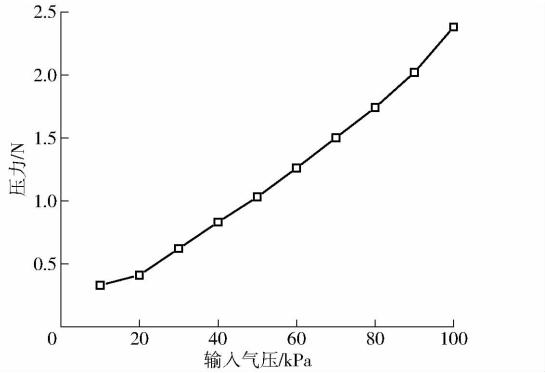


图 11　单个柔性手指输入气压与压力关系曲线

Fig. 11　Relationship of single flexible finger input air pressure and pressure

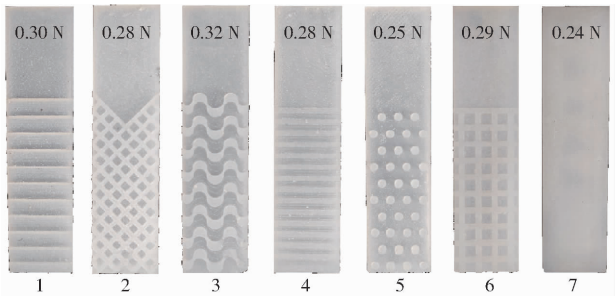
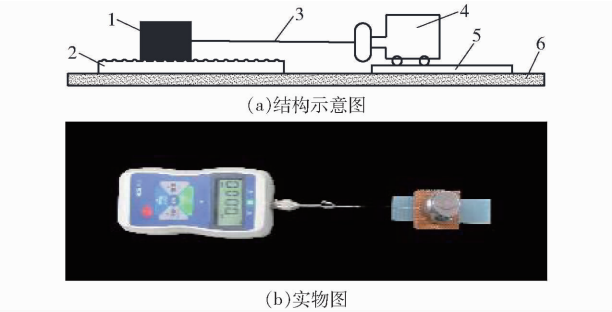


图 12　不同表面特征结构

Fig. 12　Different surface features

摩擦效果，在图 13 所示的实验平台上进行测试。手指底层固定于实验台上，有特征结构的底面向上，上置滑块。为模拟水果表皮效果，滑块底部为橡胶层，滑块与推拉力计相连接，滑块总质量为（200 ± 2）g，以保证法向力为（1.96 ± 0.02）N，推拉力计连接在水平滑杆上。实验开始时，驱动推拉力计做匀速直线运动，直至滑块滑落手指底层，读取此过程中最大拉力。每种手指底层重复实验 10 次，最终取最大拉力平均值。实验结果如图 12 所示，结果表明，与光滑表面结构相比，具有表面特征结构的实验组产生的摩擦效果较好；对比不同表面特征结构，第 3 号楔状波纹效果最佳。



(a)结构示意图

(b)实物图

图 13 摩擦力测试实验装置图

Fig. 13 Friction test experiment device diagrams

1. 滑块 2. 手指底面 3. 连接线 4. 推拉力计 5. 垫板 6. 实验台

3.2 柔性夹爪抓取实验

为测试柔性夹爪抓握能力,本文设置如图 14 所示的测试平台。柔性夹爪由机械臂固定,机械臂做垂直方向运动,测试对象为球体,并与固定于实验台的推拉力计相连接。

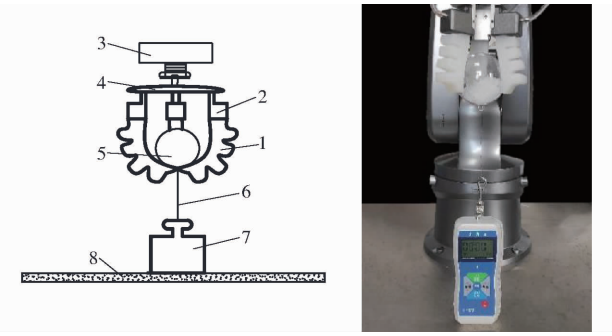


图 14 夹持力测试平台

Fig. 14 Clamping force test platform

1. 柔性手指 2. 手指固定结构 3. 机械臂 4. 法兰盘 5. 抓取目标 6. 连接线 7. 推拉力计 8. 实验台

3.2.1 不同压力下的夹持力测试

选取直径 8 cm,质量 35 g 的球体为抓取对象,输入气压分别为 10 ~ 100 kPa,间隔 10 kPa。柔性夹爪抓握住球体后,机械臂以 0.03 m/s 的速度垂直向上匀速移动,直至将球体从柔性夹爪中拉出为止,记录此过程中推拉力计显示的最大拉力,每个气压重复实验 10 次,最终取最大拉力平均值。实验结果如图 15 所示。

图 15 实验结果表明,柔性夹爪的夹持力与输入气压呈现良好的线性关系,在 100 kPa 压力下,最大拉力为 5.53 N,柔性夹爪实际可承受负载为 564 g,本文抓取目标对象为质量不大于 500 g 的水果,该夹爪满足负载要求。

3.2.2 不同直径物体的夹持力测试

选取 7 个不同直径的球体为抓取对象,直径分别为 3、4、5、6、7、8、9 cm,每个球体装入一些填充物,以保证每个球体质量相同,均为 35 g。柔性夹爪保持相同的开口直径为 6 cm,输入气压分别为 60 kPa 和 80 kPa,重复球体被拉出柔性夹爪过程,读取此过程中拉力最大值并记录。每种气压下的每个球体重复实验 10 次,记录每次实验的拉力最大值,最终取平均值。实验结果如图 16 所示。

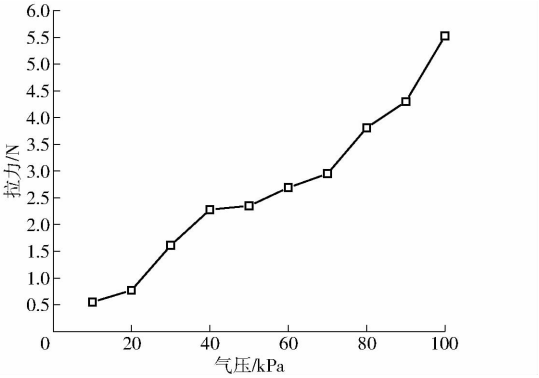


图 15 不同压力下的夹持力

Fig. 15 Clamping force under different pressures

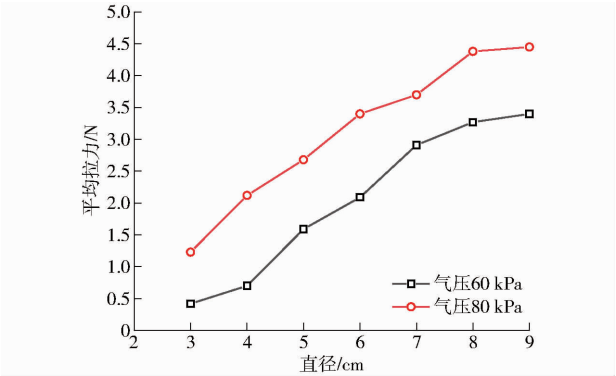


图 16 实验结果

Fig. 16 Experimental results

图 16 实验结果表明,柔性夹爪保持相同开口直径和输入气压时,夹持力整体变化趋势为线性变化,随抓取对象直径的增大而增大;抓取对象直径小于开口直径时,夹持力增大速率大于抓取对象直径大于开口直径时的速率;抓取对象直径和质量相同时,输入气压越大,夹持力越大。分析表明,当抓取的水果直径小于夹爪开口直径时,需要更大的压力保证其不掉落。

3.2.3 不同果蔬和物体抓取实验

进行不同果蔬和物体的抓取实验,以验证柔性夹爪的抓取多样性和实用性。规定柔性夹爪抓住物体并坚持 10 s 不掉落为一次有效抓取。本次选取物体包括质量较大的甜瓜、长方形的盒装牛奶、表皮很光滑的番茄、易碎的生鸡蛋、圆柱形的笔筒、可变形的袋装牛奶、长条形的水果黄瓜、较软的葡萄、质量和直径均较小的蓝莓,抓取目标物体及其质量、尺寸和输入气压如表 1 所示,其中球形物体测量方式如图 17 所示,抓取效果如图 18 所示。其中,甜瓜质量最大,为 510 g,黄瓜边长最长,边长为 182 mm,

表 1　不同物体的抓取

Tab. 1　Grabbing different objects

目标物体	质量/g	尺寸/mm	最大直径/mm	输入气压/kPa
甜瓜	510	92×80×85（长×宽×高）	92	100
盒装牛奶	265	65×40×105（长×宽×高）		70
番茄	380.8	79×62×60（长×宽×高）		80
鸡蛋	51	55×36×36（长×宽×高）	55	30
笔筒	210	115（长）	80	60
袋装牛奶	192.5	135×80（长×宽）		30
水果黄瓜	101.8	182（长）	29	40
葡萄	18.2	32×32×31（长×宽×高）	32	30
蓝莓	1.7	16×10×10（长×宽×高）	16	30

直径最小的为蓝莓，直径为 10 mm。从抓取结果看，该柔性夹爪可抓取范围较大，能较好地抓取大体积、大质量、不同刚度的物体。

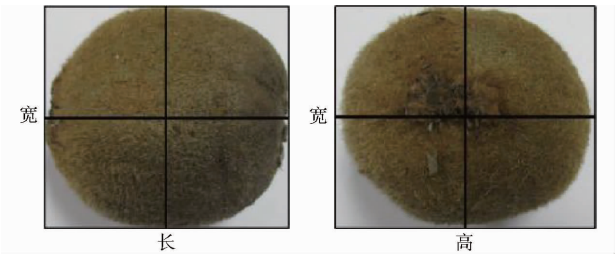


图 17　球形物体测量方式

Fig. 17　Measurement of spherical objects

4　结论

（1）基于章鱼触手结构特征和运动模式设计了一种适用于水果抓取的气动柔性夹爪，主要针对椭圆形或圆形、直径不大于 100 mm、质量不大于 500 g、表皮脆弱易损的小型水果。

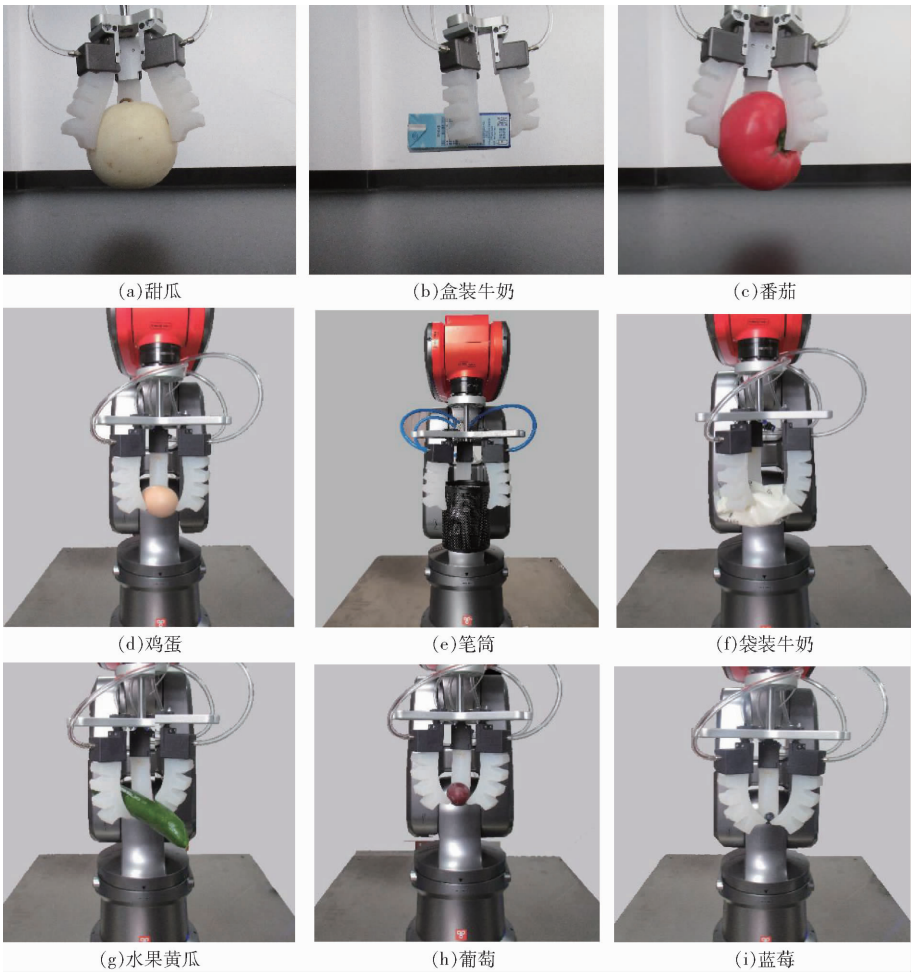


图 18　不同物体的抓取实验

Fig. 18　Experiments on grabbing different objects

（2）柔性夹爪由 3 个气动柔性手指和固定组件组成，三指呈圆周等距安装，驱动方式为气动。柔性手指活动部分采用硅胶材料制作，模具和固定端、支座均由 3D 打印制作完成，缩短了制作周期。

（3）为测试柔性手指的弯曲性能，采用有限元软件 ANSYS 模拟柔性手指工作状态，结合实验分析进行评估。结果表明：柔性手指可在低压下具有较

大弯曲变形,变形后压力与手指输入气压呈良好线性关系,气压为 100 kPa 时,产生最大压力为 2.38 N。并测试不同柔性手指表面特征的摩擦效果,表明摩擦效果最好的为楔状波纹。

(4)为测试柔性夹爪的抓握能力,设计专用测试装置对柔性夹爪的夹持性能进行实验研究。结果表明:柔性夹爪的夹持力与输入气压呈良好线性关系,在压力 100 kPa 下,最大拉力为 5.53 N,柔性夹爪实际可承受负载 564 g;柔性夹爪保持相同开口直径和输入气压时,夹爪夹持力的整体变化趋势为线性变化,随抓取对象直径的增大而增大,当抓取的水果直径小于夹爪开口直径时,需要更大的压力保证其不掉落。

(5)通过抓取其他果蔬和物体,证明柔性夹爪的抓取多样性和实用性。

(6)该柔性夹爪的固定支座设计了间距为 5 mm 的定位孔,以获得可调的初始开口距离,用以抓取不同直径的目标物体,其开口直径最大可调为 150 mm。

(7)通过实验证明,本文设计的柔性夹爪可完成小型水果的抓取作业,满足设计目标。由于柔性夹爪在抓取过程中的抓握位置、接触面积、接触表面粗糙度等因素对抓取性能都有一定的影响,此外,如果改变柔性夹爪尺寸、形状或者材料性能参数,可以改善柔性夹爪的可抓取尺寸和质量。

参 考 文 献

[1] 鲍官军, 张水波, 陈亮, 等. 基于气动柔性驱动器的球果采摘末端抓持器[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(5): 242 - 246.
BAO Guanjun, ZHANG Shuibo, CHEN Liang, et al. Design of spherical fruit end-grasper based on FPA [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 242 - 246. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20130542&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.042. (in Chinese)

[2] 彭艳,刘勇敢,杨扬,等. 软体机械手爪在果蔬采摘中的应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2018,34(9): 11 - 20.
PENG Yan, LIU Yonggan, YANG Yang, et al. Research progress on application of soft robotic gripper in fruit and vegetable picking[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(9): 11 - 20. (in Chinese)

[3] ELANGO N, FAUDZI A A M. A review article: investigations on soft materials for soft robot manipulations[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015,80(5 - 8): 1027 - 1037.

[4] 赵云伟, 耿德旭, 刘晓敏, 等. 气动柔性果蔬采摘机械手运动学分析与实验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(8):31 - 42.
ZHAO Yunwei, GENG Dexu, LIU Xiaomin, et al. Kinematics analysis and experiment on pneumatic flexible fruit and vegetable picking manipulator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(8):31 - 42. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20190804&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.004. (in Chinese)

[5] CHEN Y, GUO S, LI C, et al. Size recognition and adaptive grasping using an integration of actuating and sensing soft pneumatic gripper[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 104:14 - 24.

[6] 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)

[7] GUNJI D, MIZOGUCHI Y, TESHIGAWARA S, et al. Grasping force control of multi-fingered robot hand based on slip detection using tactile sensor[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA, USA, May, 2008: 2605 - 2610.

[8] IMAI Y, NAMIKI A, HASHIMOTO K, et al. Dynamic active catching using a high-speed multifingered hand and a high-speed vision system[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, LA, USA, 2004:1849 - 1854.

[9] TAKAHASHI T, SUZUKI M, AOYAGI S. Octopus bioinspired vacuum gripper with micro bumps[C]//2016 IEEE 11th Annual International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS). IEEE, 2016.

[10] TOMOKAZU T, KIKUCHI S, SUZUKI M, et al. Vacuum gripper imitated octopus sucker-effect of liquid membrane for absorption-[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. IEEE, 2015:2929 - 2936.

[11] GLICK P, SURESH S A, III D R, et al. A soft robotic gripper with gecko-inspired adhesive[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018,3(2):903 - 910.

[12] KAKINUMA Y, AOYAMA T, ANZAI H. Development of high-performance ER gel based on the principle of electro-adhesive effect[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2010, 21(15):1501 - 1508.

[13] PRETER A D, ANTHONIS J, BAERDEMAEKER J D. Development of a robot for harvesting strawberries[J]. IFAC - Papers Online, 2018,51(17): 14 - 19.

[14] HEMMING J, VAN TUIJL J, GAUCHEL W, et al. Field test of different end-effectors for robotic harvesting of sweet-pepper [J]. Acta Horticulturae, 2016,1130: 567 - 574.

[15] YAGUCHI H, NAGAHAMA K, HASEGAWA T, et al. Development of an autonomous tomato harvesting robot with rotational plucking gripper[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016: 652 - 657.

[16] ILIEVSKI F, MAZZEO A D, SHEPHERD R F, et al. Soft robotics for chemists[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2011,50(8): 1890 - 1895.

[17] BROWN E, RODENBERG N, AMEND J, et al. Universal robotic gripper based on the jamming of granular material[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010,107(44):18809 - 18814.

[18] 卢伟,王鹏,王玲,等.褐菇无损采摘柔性手爪设计与结构优化[J].农业机械学报, 2020,51(11):28 - 36.
LU Wei, WANG Peng, WANG Ling, et al. Design and structure optimization of flexible gripper for mushroom nondestructive picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(11):28 - 36. (in Chinese)

[19] HAO Yufei, GONG Zheyuan, XIE Zhexin, et al. A soft bionic gripper with variable effective length[J]. Journal of Bionic Engineering,2018,15(2):220 - 235.

[20] SHEN H. A study of welding robot path planning application based on genetic ant colony hybrid algorithm[C]// Advanced Information Management, Communicates, Electronic & Automation Control Conference. IEEE,2017: 1743 - 1746.

[21] GUTFREUND Y, FLASH T, FIORITO G,et al. Patterns of arm muscle activation involved in octopus reaching movements [J]. Journal of Neuroscience: the Official Journal of the Society for Neuroscience, 1998, 18(15):5976 - 5987.

[22] KIER W M, SMITH K K. Tongues, tentacles and trunks: the biomechanics of movement in muscular-hydrostats[J]. Zoological Journal of the Linnean Society,1985,83(4):307 - 324.

[23] FEI Y Q,WANG J B,PANG W. A novel fabric-based versatile and stiffness-tunable soft gripper integrating soft pneumatic fingers and wrist[J]. Soft Robotics, 2018, 6(1): 1 - 20.

[24] ZHONG G, HOU Y, DOU W. A soft pneumatic dexterous gripper with convertible grasping modes[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019,2(28):445 - 456.

[25] WANG Z, OR K, HIRAI S. A dual-mode soft gripper for food packaging[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2020, 125: 103427.

(上接第 92 页)

[16] 马旭,谭永炘,齐龙,等.水稻秧盘育秧精密播种流水线软硬秧盘自动叠放装置[J/OL].农业机械学报,2016,47(3):29 - 36.
MA Xu, TAN Yongxin, QI Long, et al. Automatic tray stacking device for hard and soft tray of rice precision seeding for nursing seedlings pipeline[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 29 - 36. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20160305&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.005. (in Chinese)

[17] 楼建忠,徐高杨,陈家,等.一种自动穴盘供给装置:106379745[P].2019 - 03 - 08.

[18] 炜康.基于图论的重载夹持装置构型及其优化[D].长沙:中南大学,2010.
WEI Kang. Configuration and optimization of heavy load clamping device based on graph theory[D]. Changsha: Central South University, 2010. (in Chinese)

[19] 李丰延,成铭,王瑞,等.快递包装夹持装置的设计与研究[J].包装工程,2018,39(13):123 - 128.
LI Fengyan, CHENG Ming, WANG Rui, et al. Design and research of express package clamping device[J]. Packaging Engineering,2018,39(13):123 - 128. (in Chinese)

[20] 叶秉良,朱浩,俞高红,等. 旋转式水稻钵苗移栽机构动力学分析与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(5):53 - 61.
YE Bingliang,ZHU Hao,YU Gaohong,et al. Dynamics analysis and tests of rotary transplanting mechanism for rice pot-seedling [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(5):53 - 61. http://www.J-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20160508&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.008. (in Chinese)

[21] YE Bingliang,YI Weiming,YU Gaohong,et al. Optimization design and test of rice plug seedling transplanting mechanism of planetary gear train with incomplete eccentric circular gear and non-circular gears[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering,2017,10(6):43 - 55.

[22] 徐建飞,范纪华,任亮,等.基于 ADAMS 和 ANSYS 工业机器人运动仿真与有限元分析[J]. 机床与液压,2018,46(18): 31 - 34.
XU Jianfei,FAN Jihua,REN Liang,et al. Motion simulation and finite element analysis of industrial robot based on ADAMS and ANSYS[J]. Machine Tool & Hydraulics,2018,46(18):31 - 34. (in Chinese)

[23] 余俊炜,许洪斌,徐涛金,等.一种绳牵引上肢康复机器人结构设计与有限元分析[J].机械传动,2018,42(12):99 - 103.
YU Junwei, XU Hongbin, XU Taojin, et al. Structural design and finite element analysis of a rope-drawn upper limb rehabilitation robot[J]. Mechanical Transmission,2018,42(12):99 - 103. (in Chinese)

[24] 浦广益.ANSYS Workbench 基础教程与实例详解[M].北京:中国水利水电出版社,2013.

[25] 郑兆启,李树君,王冰,等.鲜切果蔬包装机输送机构仿真与试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(7):252 - 258.
ZHENG Zhaoqi, LI Shujun, WANG Bing, et al. Simulation and experiment on conveying mechanism of fresh-cut fruit and vegetable packaging machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 252 - 258. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20160735&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.035. (in Chinese)