doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.07.023

电流变液驱动多节分控式采摘手爪设计与试验

赵云伟　刘　政　李进州　卫　恒　刘晓敏
(北华大学机械工程学院, 吉林 132021)

摘要: 为实现多类型果蔬采摘,仿人指设计了一种电流变液驱动多节分控式柔性采摘手爪,该手爪采用模块化集成式设计,柔性手爪由微泵驱动。分控式手指内包含 3 个多腔室的柔指关节,利用内置电流变液微阀通断实现类人指的各关节独立弯曲变形。研究了手指多节分控原理,建立了电流变微阀阈值模型、柔指关节变形模型和手指运动学模型,并进行了相关试验验证,获得了微阀阈值、关节变形规律、手指正压力、手指运动位姿和工作空间。试制了两指采摘手样机,搭建试验平台进行了多种果蔬抓持测试和采摘试验。结果表明,柔性手指动作灵活、柔顺多样,可实现单输入多模态变形,共包含 7 种动作模式,指关节弯曲角度为 121°,手指最大正压力为 2.3 N。两指采摘手具有包、捏、夹等多种取物模式,物形适应性好,适用于小而轻质果蔬采摘。

关键词: 果蔬采摘手爪; 电流变液驱动; 多节分控; 电流变液微阀
中图分类号: TH138.5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)07-0251-13　　**OSID**:

Design and Experiment of Multi-segmented Picking Gripper Driven by Electrorheological Fluid

ZHAO Yunwei　LIU Zheng　LI Jinzhou　WEI Heng　LIU Xiaomin
(*School of Mechanical Engineering*, *Beihua University*, *Jilin* 132021, *China*)

Abstract: Aiming to achieve the harvesting of various types of fruits and vegetables, a multi-segment independently controlled flexible picking gripper driven by electrorheological fluid (ERF) was designed based on a human-finger-inspired structure. The gripper adopted a modular and integrated design, and the flexible fingers were directly driven by micro-pumps. The finger comprised three multi-chamber flexible joints, each containing an embedded ERF microvalve. The electrorheological fluid served as both the actuation and working fluid. By leveraging its tunable rheological properties through the coordinated operation of the microvalve array, independent bending deformation of each joint was achieved. A comprehensive study was conducted on the control principles of the multi-segment finger. This involved developing theoretical models for the current-controlled microvalves, the deformation of the flexible joints, and the finger's overall kinematics, all of which were validated experimentally. The models quantified critical performance metrics, such as the microvalve threshold pressure, the normal output force and deformation as functions of air pressure, and the finger's kinematic workspace. Furthermore, a two-finger picking gripper prototype was fabricated, and an experimental platform was constructed to conduct grasping and picking tests on various fruits and vegetables. Results demonstrated that the finger exhibited smooth, flexible, and diverse movements. The integrated microvalve system enabled a single input to produce human finger-like multi-modal deformation, the gripper offered a larger envelope workspace and superior shape adaptability. A maximum joint bending angle of 121° and a normal output force of 2.3 N were achieved. The two-finger picking gripper featured multiple grasping modes, including enveloping, pinching, and clamping, exhibiting excellent adaptability to different object shapes, which was suitable for harvesting small and lightweight fruits and vegetables.

Key words: fruit and vegetable picking gripper; electrorheological fluid actuation; multi-segment independent control; electrorheological fluid microvalve

收稿日期: 2025-10-22　修回日期: 2025-12-19
基金项目: 吉林省科技发展项目(YDZJ202201ZYTS624、YDZJ202401396ZYTS)和吉林市科技发展计划项目(20230302027)
作者简介: 赵云伟(1978—),男,教授,博士,主要从事智能精密制造、柔性驱动器和软体机器人研究,E-mail: jluzyw@163.com
通信作者: 刘晓敏(1980—),女,教授,博士,主要从事软体驱动器和软体机器人研究,E-mail: jlulxm@163.com

0 引言

为节约人力成本,提升果蔬的采摘效率,多模式采摘手爪是实现自主多样性采摘作业的关键[1-2]。目前,国外学者相继研制出草莓、番茄、黄瓜、苹果、荔枝和柑橘等软体采摘手爪。此类手爪多为刚性,虽然夹持力大但易损伤果实。

随着软体智能材料的发展,灵活柔顺、主动安全的软体夹持器成为研究热点[3-4],被广泛应用于农业果蔬采摘[5-7]。面对形状和尺寸各异的果蔬时,要求设计的采摘手爪具有高度灵活性和物形适应性。而采用单弯曲软体或柔性驱动器制成的采摘手爪[8-12],变形模式单一,物形适应性差,无法满足多类型物品的夹持需求,如赵云伟等[13]研制的气动柔性果蔬采摘手爪仅能完成球形和柱状果蔬采摘。

为了提升软体手爪的适应性,许多学者仿生物结构特征研制出多种类型软体手爪,如仿象鼻抓持器[14-15]、仿章鱼触手抓持器[16-18]等,该类手爪通过卷曲方式缠绕抓取,可抓取物品类型比较单一。与之相比,仿人指手爪采用了多节分段式结构,抓持时与物体表面贴合度高,可实现从大范围包络到精细捏夹的多样化抓取[19]。此类手爪采用多腔室多通道设计[20-23]、变腔室多通道设计[24-25]或者限制层分段变刚度控制[26-28]实现分段弯曲变形。多通道和变腔室设计的手指结构复杂、管线冗余,分段变刚度设计虽能实现多节分控但贴合度变差。而采用内置电流变微阀的多腔室单通道方式[29-30],简化了通道数量,令手指结构更为简洁。所设计多节分控式柔性手指,其微阀与柔性手指集成一体,通过电场调控阀体内电流变液的流变特性,即可实现手指单输入多模态变形,其控制简单、响应迅速、动作模式多样,满足形状和尺寸各异的果蔬抓持需求。

本文针对果蔬采摘,设计一种电流变液驱动多节分控式采摘手,研究手指结构设计、制作工艺与多节分控原理,建立电流变微阀阈值模型、柔指关节变形模型和手指运动学模型,制作样机并进行手指正压力测试和两指手爪抓持试验,验证其性能。

1 采摘手爪结构设计

1.1 整体设计

电流变液驱动采摘手爪采用模块化集成式设计,其二指平行对称结构柔性采摘手爪与电控系统和液压动力单元集成一体,去除了外部缆线实现无系留,可便携安装于移动平台或滑轨上实现自动化采摘作业。整体结构如图 1 所示,电控系统位于顶端,由控制系统和高压模块组成。液压动力单元采用自制的活塞式液压泵与采摘手爪直连,直接为果蔬采摘提供动力。采摘作业时,两指弯曲变形协调运动形成包、捏、夹等多种抓持模式,可完成不同类型和尺寸果蔬抓取。采摘手总质量为 1 140 g,其设计采摘质量小于 500 g、直径范围为 30 ~ 80 mm 的果蔬。抓持过程中的手指夹持力可由液压泵进行实时调节和控制,同时柔软的指体设计可以有效避免损伤果蔬。

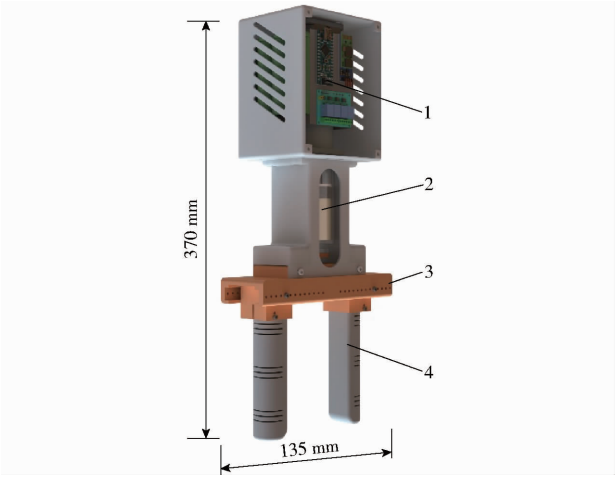


图 1 采摘手爪整体结构图

Fig. 1 Overall structure of picking gripper

1. 电控系统 2. 活塞式液压泵 3. 连接支架 4. 柔性手爪

1.2 柔性采摘手爪设计

为实现目标果蔬的有效包裹和灵活抓取,柔性手指仿人指结构采用分段式设计。柔性手指为细长拱形柱状,分为 4 段,包含 4 个指节和 3 个关节,每个指节内置刚性指骨,相邻指骨由多腔室柔指关节相连。

指体设计为上下两层(图 2),上层为可变形层,主要包含指骨、柔指关节和电流变微阀等,为避免损伤果蔬,指体采用硅胶软质材料;同时为减轻手指重量并增强指骨与硅胶指体结合强度,指骨设计为拱形蜂窝状结构;指体下层为不可拉伸层,于底面覆盖

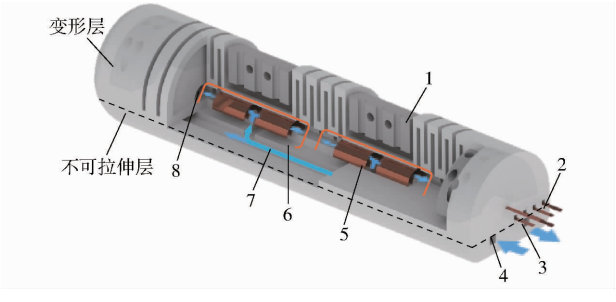


图 2 手指结构图

Fig. 2 Configuration and components of finger

1. 指骨 2. 微阀引线 3. 排气口 4. 导流口 5、6. 电流变微阀 7. 下层 U 形导液通道 8. 上层导液通道

一层纸质限制层以约束指体变形，令手指在压力流体作用下产生弯曲变形，在限制层上方设计了一个U形导液通道，用于导入压力流体和排出关节腔室及阀体内的气体。

手指采用单通道设计以便于集成安装和供液，通道内集成微型电流变阀。为实现手指多节分控，电流变微阀成对放置在相邻两个柔指关节指骨下方的导液通道内，以控制相邻关节腔内流体的导入和截流。当从流入口和U形导液通道导入电流变液体后（此时电流变液作为工作液也作为驱动液），导入的流体将分别经由电流变微阀流入相邻柔指关节腔室。在流体压力的作用下，腔室受压膨胀变形驱使柔性手指产生类人指的多段弯曲，实现单输入多模态变形。

参照人手指的外形尺寸，设计各指节比例分别为1∶2∶2∶1，手指总长、宽和高分别为110、25、20 mm。

1.3　电流变微阀设计

电流变微阀在手指多节分控过程中充当开关阀，工作时需截止压力流体流入柔指关节腔室。其设计要求是在手指抓取果蔬时，阀体具有抗挤压能力且动态响应快；在外加工作电场作用下，阀体内电流变液体有足够大的剪切屈服强度以截流压力流体，即阀体内电流变工作液在外电场作用下剪切屈服应力 τ_E 应满足：$\tau_E > \tau_{\min}$，$\tau_{\min}$ 为达到截流工作状态时所需电流变工作液的最小屈服应力。

针对这一需求，设计了一种“同心环式电极”半圆柱形电流变微阀，结构见图3。该阀体主要由上、下两个同心铜电极片组成，上下极片分别安装于通道内壁和通道内设置的半圆柱形凸台，极片之间留有狭小间隙 δ（$\delta = R_d - R_i$，R_d 和 R_i 分别为阀体内通道内径和凸台半径）。微阀结构简单易于集成，圆拱形设计使其具有较好的抗挤压能力；电流变工作液“毫秒级”的流变特性改变使微阀响应快速；半环状狭小间隙设计可在微阀工作时提供高电场强度，使电流变液产生高剪切屈服应力，从而截止压力流体。

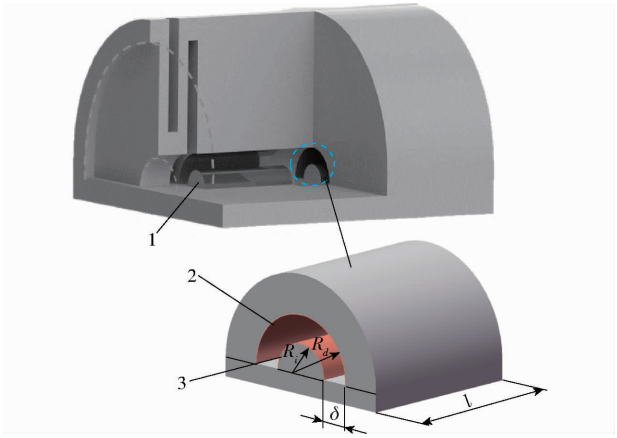


图3　电流变液微阀结构图

Fig. 3　Structure of electrorheological (ER) microvalve

1. 电流变液微阀　2. 上电极片　3. 下电极片

截流状态时，电流变微阀承压能力主要与阀体长度 l 和电极间隙 δ 有关。设计中阀体长度受指节外形尺寸限制，因而电极间隙成为设计的关键参数。若电极间隙过大，相同条件下阀的最大可承受流体压力能力减弱，需要提供更高的电压，而过高的电流密度易发生电击穿致使微阀失效；而过小的设计间隙，降低了电流变液的流动性易阻塞通道。

常见的电极间隙设计范围为0.25～2 mm[31]，参考手指外形设计参数，确定阀体设计长度和电极间隙分别为9 mm和1.5 mm。

1.4　柔指关节设计

为驱使相邻指节在压力流体作用下产生类人指的相对柔顺弯曲，柔指关节采用网格式半圆形腔室结构，见图4。中间采用“独立”腔室设计，受压后两侧膨胀用于增加关节的弯曲曲率；左右两端为“附合”腔室与指节复合一体，仅发生单侧膨胀，提升弯曲变形的同时保证柔指关节结构强度。当压力流体经由电流变微阀流入关节腔室后，腔室受压膨胀变形，受下方限制层约束，柔指关节产生类人指关节弧状弯曲变形。

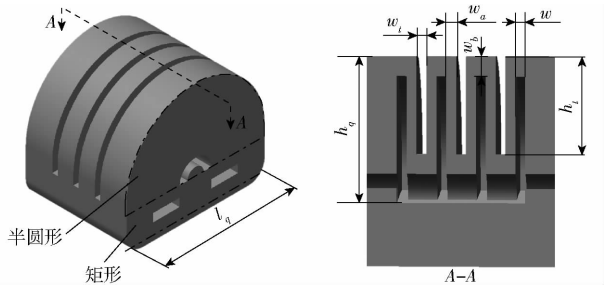


图4　柔指关节结构图

Fig. 4　Structure of flexible finger joint

所设计的柔性指关节在实际应用中，需要优化的方向为：①变形与刚度之间的矛盾，腔室数目与壁厚、间隙深度与宽度是影响这一设计结果的关键因素。大间隙、小壁厚、多数目的腔室设计有利于获得高变形率，但为保证关节刚度和结构强度，需尽量减小腔室数目与间隙深度，适当增加壁厚。因此针对一定变形范围需求，各设计参数存在最优值。②大输出力的需求，在柔性手指外形尺寸的限制下，保证合理壁厚条件下，应尽量增加腔室截面积以保证较大输出力，故选择半圆形截面腔室。除选择截面腔室参数外，可选择“独立腔室与附合腔室”的混合设计。

基于以上分析,根据柔指关节的设计需求(弯曲角度大于 110°),以半圆形截面混合腔室关节为例,采用仿真分析方法优化躯体各腔室设计参数,分别设计了腔室数目为 3 ~ 5 个、腔体高度范围为 14 ~ 16 mm、腔体宽度范围为 25 ~ 27 mm、间隙宽度范围为 1 ~ 3 mm、间隙深度范围为 8 ~ 12 mm 和侧壁厚度范围为 0.5 ~ 1.5 mm 的 13 组关节模型。利用 Abaqus 软件分别进行了关节弯曲变形和刚度仿真,具体仿真优化步骤:建立不同参数柔指关节三维模型,导入模型后,设置材料参数(材料参数由硅胶拉伸试验获得,$C_{10}=0.2681$,$C_{20}=0.0398$),分别添加力与变形仿真的边界条件和所需载荷,划分网格后提交作业。待仿真完成后,测量其弯曲角度和位移等。经优化后,柔指关节设计首选弹性模量较小、有益变形的 E630 硅胶材料,腔室数目确定为 4 个,中间为独立腔室,左右两侧为附合腔室,腔室截面选择半圆形。设计尺寸见表 1。

表 1 柔指关节结构参数

Tab. 1 Geometrical parameters of flexible finger joint

参数	数值
腔体高度 h_q/mm	15
腔体宽度 l_q/mm	26
内腔室宽度 w/mm	1
腔室周向壁厚 w_b/mm	2
腔室侧边壁厚 w_a/mm	1
间隙宽度 w_t/mm	1
间隙深度 h_t/mm	10

2 多节分控原理与控制系统设计

2.1 多节分控原理

柔性手指内共设置 4 个电流变微阀(f1、f2、f3、f4),分别对应控制 3 个柔指关节(基关节、近关节、远关节),其中 f1 对应控制基关节,f2 和 f3 同时用于控制近关节,f4 对应控制远关节。

以中远关节弯曲变形为例(图 5),为实现此种弯曲模式,电流变液微阀 f1 给电,保持截流工作状态,此时基关节腔室通道封闭;同时电流变液微阀 f2、f3、f4 失电,由液压泵泵入电流变流体,由导液通道经由微阀 f2、f3、f4 流入近关节和远关节腔室内,从而驱使近、远关节弯曲变形。

综上,若通过控制系统调控不同关节对应电流变微阀的通断,即可实现柔性手指单输入多节分控。在此控制方式下,柔性手指将完成类人指弯曲的 7 个动作模式。

2.2 手指控制系统

柔性手指控制系统组成和接线方式见图 6。其

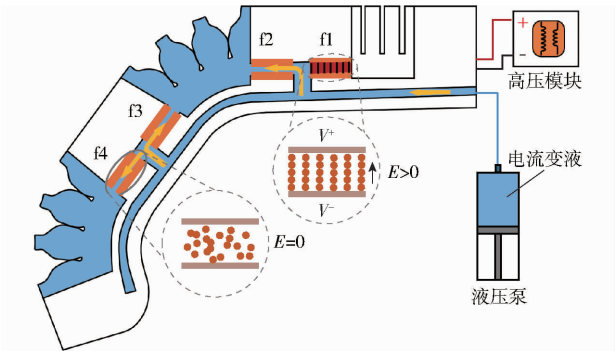


图 5 柔性手指多节分控原理图

Fig. 5 Schematic of the segmental independent control principle of flexible finger

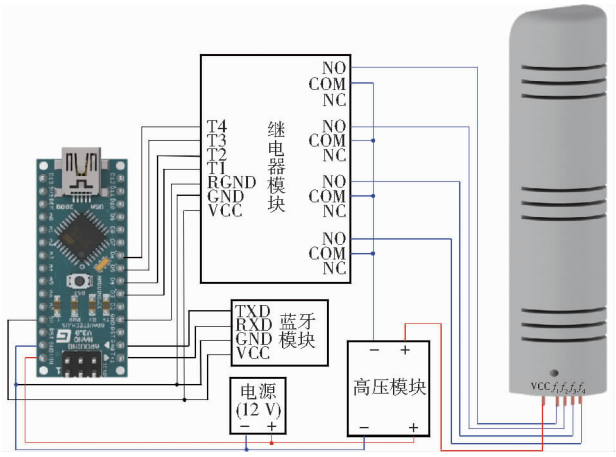


图 6 手指控制系统组成与接线方式

Fig. 6 Control system architecture and wiring configuration

中 4 路继电器分别对应柔性手指内 4 个内置微阀,高压模块为电流变液微阀提供工作所需高电压。工作时,控制器和高压模块先接通电源。蓝牙模块将接收的遥控器传输信号传递给控制器,控制器(Arduino Nano)发送指令经继电器模块控制内置电流变微阀给电或失电,供压后柔性手指可实现预设动作模式。

通过控制手指内 4 个电流变液微阀的通断,即可实现 7 种动作模式。其动作与电流变微阀控制策略见表 2,表中“+”表示阀接通电源,“-”表示阀未接通电源。

表 2 手指动作与电流变微阀控制策略

Tab. 2 Finger motions and electrorheological microvalve control strategies

动作	f1	f2	f3	f4
基关节弯曲	-	+	+	+
近关节弯曲	+	-	-	+
远关节弯曲	+	+	+	-
基近关节弯曲	-	-	-	+
基远关节弯曲	-	+	+	-
近远关节弯曲	+	-	-	-
全关节弯曲	-	-	-	-

3　柔性采摘手爪数学建模

3.1　电流变液微阀理论模型

电流变液微阀是利用阀体内电流变工作液在电场作用下的电流变效应阻塞孔道间隙实现截流。其截流效果主要取决于电流变工作液的性能与外加电场强度。

图 7 为电流变液微阀模型，微阀流入口与流出口压差 Δp 可描述为 $\Delta p = p_i - p_o$，p_i和 p_o分别为流入口压强和流出口压强。由图中可见，施加电场后，阀体内的电流变液中分散相颗粒团聚成链令电流变液的屈服强度增强，阻塞流道使其流动性减弱。

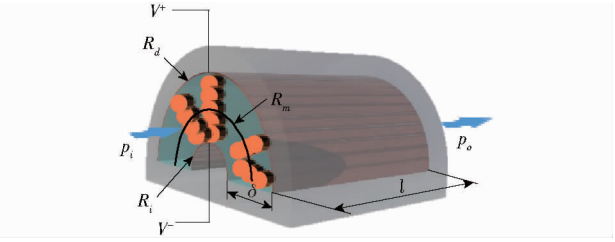


图 7　电流变液微阀模型

Fig. 7　Model of electrorheological (ER) microvalve

随着电流变液抗剪切屈服应力进一步增强，流出口压强将逐渐减小。当 $p_o = 0$ 时，即 $\Delta p = p_i$，此时微阀恰处于截流工作状态。在设定流入口压强下，施加电场后微阀可承受的压强即为阈值压强，其值与阀体内电流变液的抗剪切屈服应力有关，则微阀阈值压强 p_z可描述为[32]

$$p_z = \frac{2l}{\delta}\tau_E \tag{1}$$

式中　τ_E——电流变液抗剪切屈服应力

l——电流变液微阀长度

由电极间电流变液极化后形成的粒子链结合强度计算，可求得电流变液抗剪切屈服应力[33]为

$$\tau_E = CE^2\sin\alpha \tag{2}$$

其中

$$C = \frac{3}{2}\varepsilon_0\varepsilon_f\phi\beta^2 \tag{3}$$

式中　E——电极间电场强度

α——发生断裂时粒子链的倾斜角度

C——电流变液性能参数，与配比的电流变液中连续相和分散相介质性能相关

ε_0、ε_f——真空中和连续相的介电系数

β——连续相基液与分散相颗粒的相对介电系数比

ϕ——电流变液中分散相颗粒的体积分数

施加电压后，阀体内半圆形电极之间形成非均匀梯度电场。为研究微阀内电场强度对电流变液流变性能的影响，将半圆柱环式电极等效为平行板式电极，计算时将阀体内 R_m（$R_m = R_d/2 + R_i/2$）处的电场强度作为板式电极间匀场强，则阀体内电场强度 E 可等效为

$$E = \frac{2V}{(R_d + R_i)\ln(R_d/R_i)} \tag{4}$$

式中　V——高压模块供给电压

将方程(2)～(4)代入方程(1)中可得微阀阈值压强与电压的关系为

$$p_z = \frac{8lCV^2\sin\alpha}{\delta(R_d + R_i)^2\ln(R_d/R_i)^2} \tag{5}$$

由式(5)可知，当选定电流变工作液后，可通过电压来调节微阀阈值压强，从而调控微阀实现导流或截流。

3.2　柔指关节弯曲理论模型

柔指关节采用超弹性硅胶材料，受压形变时呈现大变形、非线性。因超弹性材料的各向同性和不可压缩性，采用 Yeoh 模型的二阶本构模型描述柔指关节的弯曲变形[23]。其应变能密度函数 W 为

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_2 - 3)^2 \tag{6}$$

其中

$$\begin{cases} I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 = \lambda_1^2\lambda_2^2 + \lambda_2^2\lambda_3^2 + \lambda_1^2\lambda_3^2 \\ (\lambda_1\lambda_2\lambda_3)^2 = 1 \end{cases} \tag{7}$$

式中　I_1、I_2——变形张量不变量

λ_1、λ_2、λ_3——轴向、周向和径向伸长比

C_{10}、C_{20}——硅胶材料系数

当柔指关节腔室受压膨胀时，其下方限制层处发生圆弧状弯曲变形，如图 8 所示。以限制层为研究对象，当底部在外力作用下向轴向、径向和周向 3 个方向拉伸变形时，其轴向变形最明显，将该方向拉伸比设为 λ_1。因上方腔室限制，其周向和径向仅发生微小变形，周向方向拉伸比 λ_2和径向方向拉伸比 λ_3相对轴向变化较小[34]，故假设

$$\begin{cases} \lambda_2 = \lambda_1^{\frac{1}{2}} \\ \lambda_3 = \lambda_1^{-\frac{3}{2}} \end{cases} \tag{8}$$

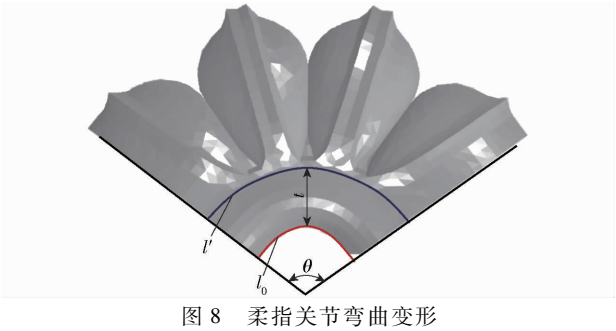


图 8　柔指关节弯曲变形

Fig. 8　Bending model of flexible finger joint

由图 8 中几何关系可知，轴向拉伸比为

$$\lambda_1 = \frac{l'}{l_0} = 1 + \frac{t}{l_0}\theta \tag{9}$$

式中 l'、l_0——限制层上表面和限制层底面不可拉伸层弧长

θ——柔性手指关节弯曲角度

t——限制层厚度

忽略重力的影响，假设压力流体所做的功全部转化为硅胶材料的应变能，则依据虚功原理可得

$$p\frac{\partial V_p}{\partial \theta} = V_g\frac{\partial W}{\partial \theta} \tag{10}$$

式中 V_g、V_p——关节硅胶体积和腔室膨胀体积

p——腔室内流体压强

关节各腔室结构和参数皆相同，在流体压强 p 的作用下，单个气室的受力变形如图 9 所示，腔室截面由半圆形和矩形组成（图 9a）。由腔室结构设计参数，可计算得单个腔室硅胶体积 V_g' 为

$$V_g' = \left[2h + \frac{1}{2}\pi(R + w_b)\right](R + w_b)\cdot (2w_a + w) - \left(2h + \frac{1}{2}\pi R\right)R_w \tag{11}$$

式中 h、R——腔室截面矩形高和半圆形半径

R_w——通道外壁半径

w——内腔室宽度

w_a——腔室侧边壁厚

w_b——腔室周边壁厚

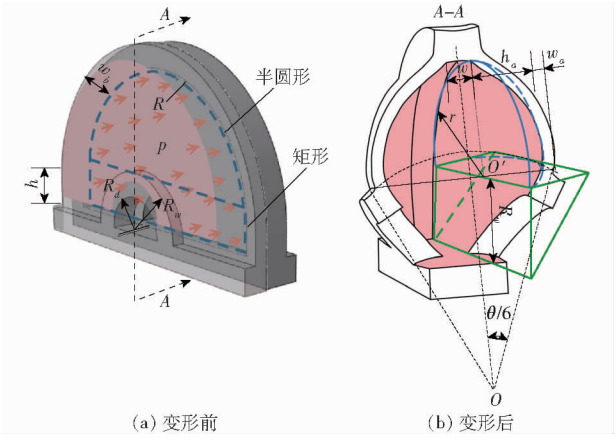


图 9 单个腔室变形分析

Fig. 9 Theoretical model of single-chamber expansion

施压后，柔指关节的“独立”腔室向两侧膨胀鼓包变形，而“附合”腔室仅单侧变形（图 9）。以“独立”腔室为研究对象，假设“附合”腔室单侧变形与“独立”腔室的一侧变形相同，则“独立”腔室单侧的弯曲角度为柔指关节弯曲角度 θ 的 1/6。因半圆形和矩形组成的腔室截面，腔室单侧面膨胀变形后上方类似半球冠，下方类似直角棱柱（图 9b），则单个腔室总的膨胀体积 V_p' 为

$$V_p' = 2V_q + 2V_z \tag{12}$$

式中 V_q、V_z——球冠体积和棱柱体积

忽略膨胀后壁厚变化影响，则球冠体积和棱柱体积分别为

$$\begin{cases} V_q = \dfrac{\pi h_a}{12}(3r^2 + h_a^2) \\ V_z = h_a R R_w \end{cases} \tag{13}$$

式中 r——球冠底圆半径

h_a——膨胀高度

根据几何关系可知

$$\begin{cases} r = R + h - R_w \\ h_a = \left(R_w + t + \dfrac{l_0}{\theta}\right)\sin\dfrac{\theta}{6} - \dfrac{w + 2w_a}{2} \end{cases} \tag{14}$$

结合式(6)，将计算得到的柔指关节总的硅胶体积($3V_g'$)和全部腔室膨胀体积($3V_p'$)代入式(10)，可以推导出压强 p 与柔指关节弯曲角度 θ 之间关系为

$$p(\theta) = V_g\frac{\dfrac{t}{l_0}(C_{10}A_1 + 2C_{20}A_2A_3)}{\left(2B_1 + \dfrac{\pi}{2}h_a^2\right)\left[\dfrac{1}{6}\left(R_w + t + \dfrac{l_0}{\theta}\right)\cos\dfrac{\theta}{6} - \dfrac{l_0}{\theta^2}\sin\dfrac{\theta}{6}\right]} \tag{15}$$

其中

$$\begin{cases} A_1 = 2\lambda_1 + 1 - 3\lambda_1^{-4} \\ A_2 = \lambda_1^3 + \lambda_1^{-2} + \lambda_1^{-1} - 3 \\ A_3 = 3\lambda_1^2 - 2\lambda_1^{-3} - \lambda_1^{-2} \\ B_1 = \dfrac{\pi}{4}r^2 = RR_w \end{cases} \tag{16}$$

基于式(15)可推导出柔指关节弯曲角度 θ 与压强 p 之间的关系式

$$\theta = \theta(p) \tag{17}$$

由式(17)可知，通过调节柔指关节腔室内流体压强 p，可控制关节弯曲角度实现类人手指关节的弯曲变形。

3.3 手指运动学模型

采用齐次坐标变换矩阵，依据柔指关节弯曲变形模型建立柔性手指的运动学模型，可获得柔性手指运动位姿和指尖工作空间。

柔性手指分为 4 段 3 关节，仅关节处发生弯曲变形。图 10 为柔性手指坐标系。在柔性手指指根处建立手指坐标系 $O(x, y, z)$，沿手指方向为 z 向，手指弯曲平面为 xz 平面。取 7 个特征点依次建立坐标系 $O_i(x_i, y_i, z_i)$ $(i = 1, 2, \cdots, 7)$。3 个柔指关节结构和尺寸相同，指关节长度为 l_g，其余 4 段指节长度分别为 L_{zj} $(j = 1, 2, 3, 4)$。

手指上各特征点在本地坐标系中位置可表示为 ${}^i\boldsymbol{P}_i = [0\ 0\ 0\ 1]^{\mathrm{T}}$，则任一特征点 ${}^i\boldsymbol{P}_i$ 在指根坐标系的描述，可通过坐标变换获得，即

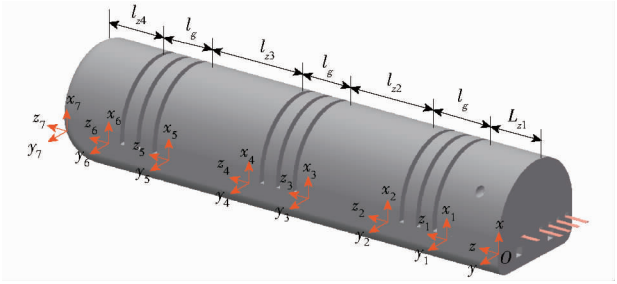


图 10　柔性手指坐标系

Fig. 10　Coordinate system of flexible finger

$$ {}_{i}^{0}\boldsymbol{P} = {}_{1}^{0}\boldsymbol{T}\cdots{}_{i-1}^{i-2}\boldsymbol{T}\,{}_{i}^{i-1}\boldsymbol{T}\,{}^{i}\boldsymbol{P}_{i} \tag{18} $$

式中　${}_{i}^{i-1}\boldsymbol{T}$——手指上特征点从 i 坐标系向 $i-1$ 坐标系转化时的齐次坐标变换矩阵

其中，相邻特征点的变换矩阵为

$$ {}_{i}^{i-1}\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & 0 & \sin\theta_i & x_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_i & 0 & \cos\theta_i & z_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{19} $$

式中　θ_i——柔指关节弯曲角度，可由式(17)获得

根据柔指关节变形和手指几何结构，可知手指各段非线性，变参数 x_i、z_i 分别为

$$ \begin{cases} x_i = \dfrac{l_g}{\theta_i}(1-\cos\theta_i) \\ z_i = \dfrac{l_g}{\theta_i}\sin\theta_i \end{cases} \quad (i=2,4,6) \tag{20} $$

$$ \begin{cases} x_i = l_{zj}(1-\cos\theta_i) \\ z_i = l_{zj}\sin\theta_i \end{cases} \quad (i=1,3,5,7) \tag{21} $$

将式(19)～(21)代入式(18)可得不同压力和动作模式下手指上各关键点的位置变化。

4　试验

4.1　微阀截流性能

电流变液微阀性能测试系统主要由三通导流装置、电流变微阀、压强传感器(XGZP6847A 型)、活塞式液压泵和高压模块组成(图 11)。三通导流装置由透明亚克力材料制成，包含 1 个流入口和 2 个流出口，在端部连接电流变微阀，其流出口与微阀流入口相连。上方流出口连接压强传感器，利用压强传感器测得微阀处于截流工作状态时流入口压强，即电流变微阀的阈值。

测试时，液压泵将电流变液以恒定流量 Q = 185 mL/min 注入三通导流装置。图 12 为测得不同电压下电流变微阀截流工作状态时流入口的压强变化。由图中可见，初始阶段，因施加电场后阀体内电流变工作液的固相颗粒形成的链状结构阻塞通道，随着液压泵活塞的推进，流入口压强持续增加；低电压(2.7 kV 和 3.7 kV)下，当入口压强高于电流变微阀阈值后，阀体内电流变液内链状结构被破坏，此时微阀截流失效，当液压泵停止注入电流变液后，入口压强随之回落趋于平稳，此时测得电流变微阀的阈值分别为 93、142 kPa；当电压增至 4.7 kV 时，此时电场强度足以维持致密而稳定的链状结构，能够抵抗液压泵所能输出的最大流动压力，此时微阀在液压泵运行全程中处于完全截流状态，该电压下的微阀阈值为 231 kPa，远高于手指工作压强。结果表明，设计的电流变微阀满足多关节分控柔性手指中所需阀的开关闭合设计需求。

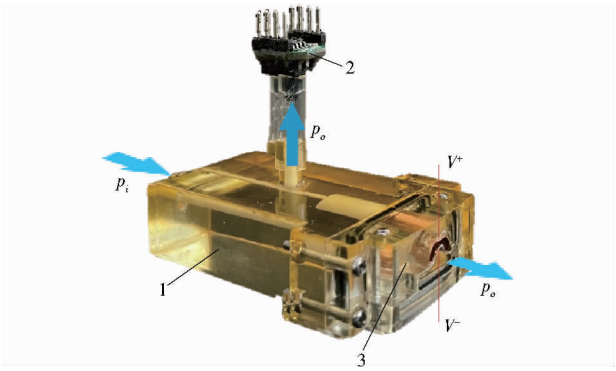


图 11　微阀性能测试系统

Fig. 11　Microvalve performance testing system

1. 三通导流装置　2. 压强传感器　3. 电流变微阀

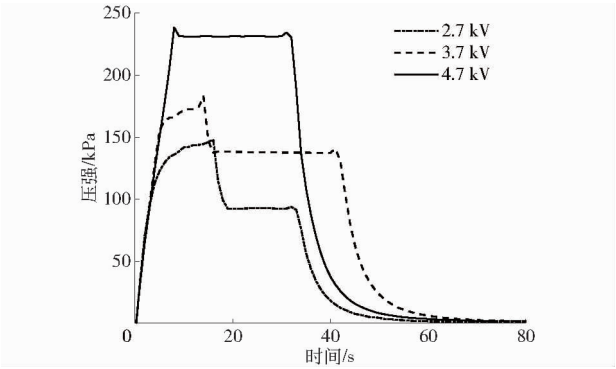


图 12　微阀工作状态下入口压强变化曲线

Fig. 12　Microvalve threshold pressure resistance test

图 13 为电流变微阀阈值压强随电压变化曲

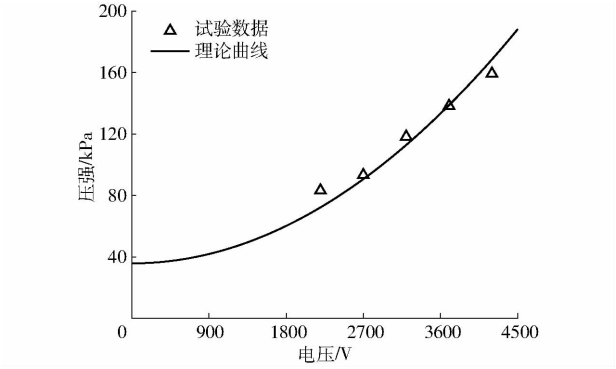


图 13　微阀阈值压强随电压变化曲线

Fig. 13　Relationship between valve voltage and threshold pressure

线,将表 3 中参数代入公式(5)中可得理论曲线,由图可见电流变微阀阈值随着电压的增加呈非线性增加,理论模型与试验结果吻合,通过调节微阀供给电压可以调控微阀阈值。可见电流变微阀的阈值可调可控,可以满足截止不同压力流体的需求。

表 3 泵参数与阀几何参数

Tab. 3 Pump parameters and valve geometrical parameters

参数	数值
液压泵最大压强/kPa	240
微阀内腔半径 R_d/mm	3
微阀凸台半径 R_i/mm	1.5
微阀长度 l/mm	9
微阀间隙 δ/mm	1.5

4.2 手指静力学试验

(1)弯曲变形

图 14 为柔指关节弯曲角度随施加压强变化曲线,由图中可见,理论计算结果与试验数据趋势一致,吻合较好,随压强增加柔指关节随之呈类似手指关节弧状弯曲。在 50 kPa 下弯曲角度可达 121°,接近人指关节的弯曲角度。

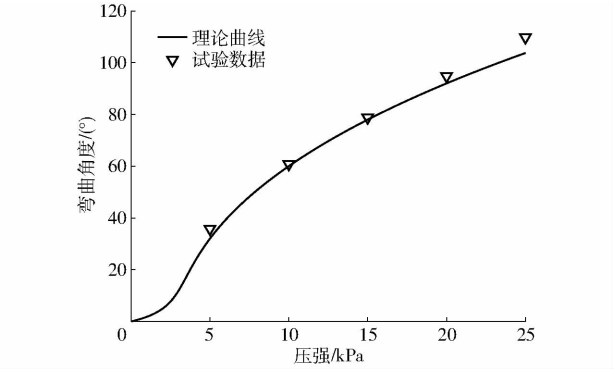


图 14 关节弯曲角度随压强变化曲线

Fig. 14 Variation of flexible finger joint bending angle with pressure

将式(17)求得的各柔指关节弯曲角度代入式(18),可得柔性手指上各关键点的位置矢量。调节柔性手指内的压强和微阀的通断组合方式,可获得柔性手指运动位姿和工作空间。图 15 为 50 kPa 下柔性手指运动位姿,由图可见,图例中红色矩形表示微阀闭合,白色矩形表示微阀导通,在内置各微阀通断组合配合下,柔性手指可实现设定的 7 种动作位姿(表 2)。

依据上述手指的位姿变换,由 3 个柔指关节依次施压,柔性手指的指尖运动轨迹可得柔性手指最大的运动空间,见图 16。图中蓝色区域为柔性手指运动空间,红色区域为人指的运动空间。柔性手指的运动空间与人手指运动空间相似,呈上尖下圆的

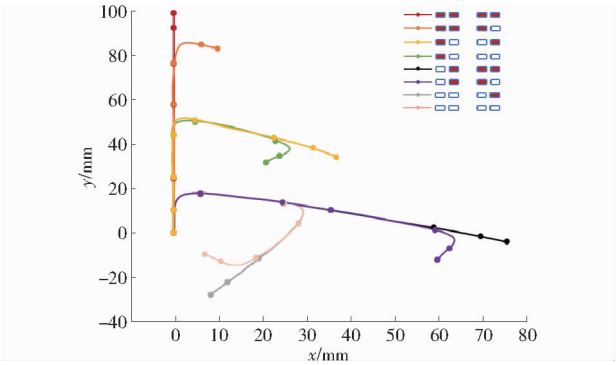


图 15 不同动作模式下柔性手指运动位姿

Fig. 15 Motion postures of the soft finger under different motion modes

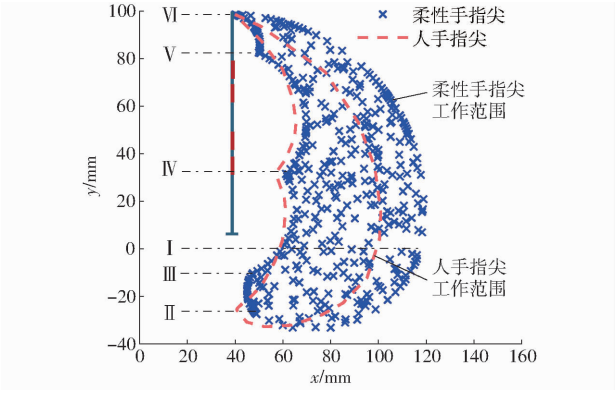


图 16 指尖工作空间

Fig. 16 Fingertip workspace

月牙形。经比较柔性手指的工作范围大于人指的工作范围,表明所设计的电流变液驱动多节分控柔性手指比人指运动范围更大,动作更为灵活。面向目标果蔬,柔性手指可选择大范围包络也可以细致精确抓取。

图 17 为柔性手指驱动器的 7 种弯曲动作与人指对比。由图可知,在柔性手指内置的 4 个微阀通断组合方式下,柔性手指可做出类人指的 7 个弯曲动作模式。与人指的弯曲形态基本一致,表明所设计的柔性手指可实现类人指的单输入多模态弯曲变形。

(2)夹持力

图 18 和图 19 分别为输入压强为 50 kPa 时采用全关节弯曲模式和三关节分控弯曲模式包络抓取直径 D = 90 mm 的圆柱台时各柔指关节产生的正压力。在圆柱面上与各柔指关节对应位置设置 3 个薄膜压力传感器,当柔性手指弯曲与圆柱台接触后,分别测得各柔指关节的正压力变化。

当采用全关节弯曲模式包络抓取时,柔性手指与圆柱台接触,其运动表现类似仅具单一弯曲自由的传统柔性手指驱动器,3 个柔指关节的正压力互相影响,使柔性手指有效输出力减小;随指尖接触圆柱台,中指段脱离接触面,包裹性减弱,其正压力迅

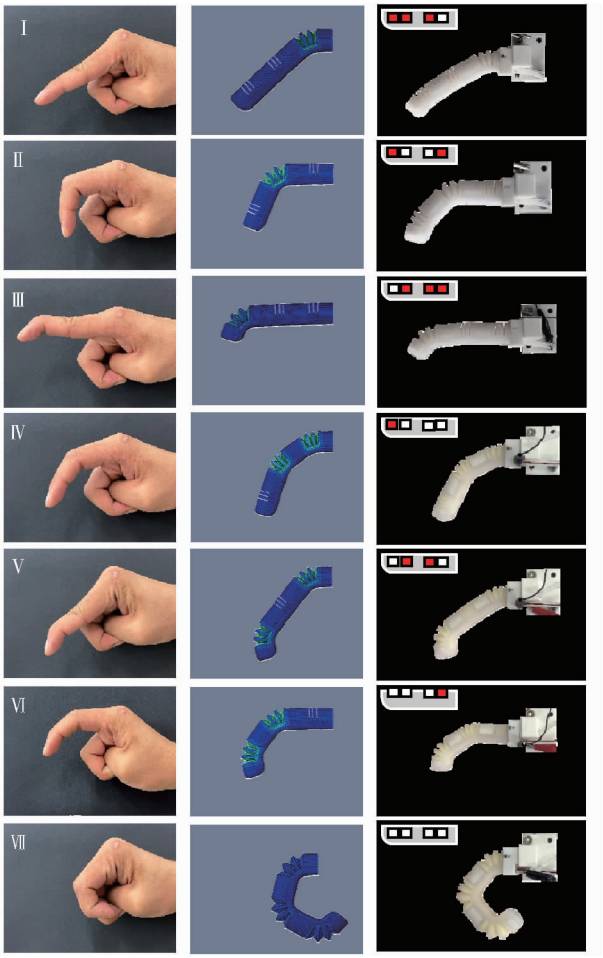


图 17　弯曲动作模式对比

Fig. 17　Comparison of bending motion modes

速下降并接近于零(图 18)。

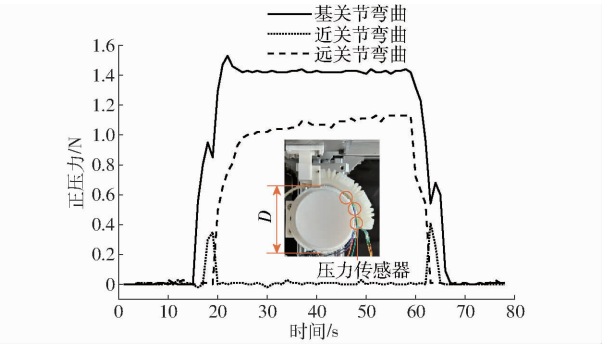


图 18　全关节弯曲模式下各关节正压力变化曲线

Fig. 18　Joint forces under full-joint bending mode

而采用三关节分控弯曲模式包络抓取时,控制基关节、近关节和远关节分别依次接触圆柱台,待远关节完全贴紧圆柱台后,近关节仍有效贴紧接触面,其正压力为 1 N。基、远关节正压力分别为 2.5、1.25 N(图 19)。此动作模式包裹性优于全关节弯曲动作模式,表明多节分控柔性手指物形适应性优于单自由度弯曲的柔性手指,更适用于包夹多类型果蔬。

图 20 为柔性手指采用全关节弯曲模式,包夹不

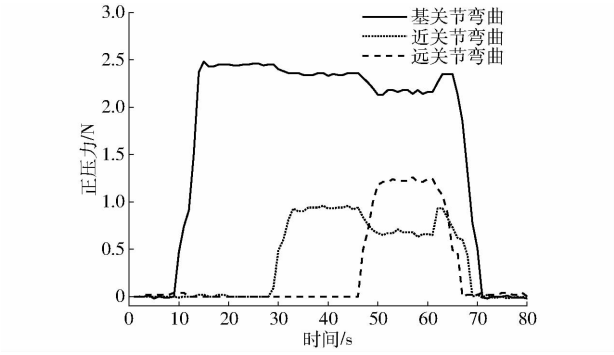


图 19　多关节分控弯曲模式下各关节正压力变化曲线

Fig. 19　Joint force change curves under three-joint independently controlled bending mode

同直径圆台时指尖正压力变化曲线。由图可知,随着圆台直径的减小,手指弯曲变形程度增加,指尖正压力随之减小。在输入压强为 50 kPa 时,柔性手指对 3 种直径圆柱台的指尖力分别为 1.00、0.75、0.55 N。表明,采摘手可利用指尖捏取不同尺寸的果蔬。相较关节正压力,指尖处的正压力相对较小,指尖捏取方式适用于细小而轻质的果蔬。

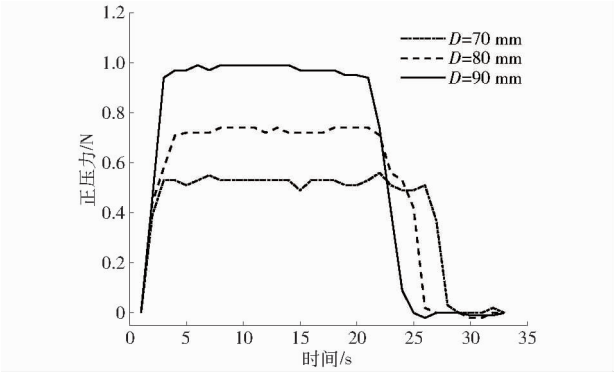


图 20　指尖正压力随圆柱台直径变化曲线

Fig. 20　Fingertip force change curves under different diameters

图 21 为不同弯曲动作模式下,手指指尖正压力随压强的变化曲线。试验中柔性手指放置在限位槽内,测力计固定在柔性手指端部指尖位置,并与指尖贴合。

由图 21 可见,随着压强增加,各弯曲动作模式下指尖正压力皆近似呈线性增加,可见用该柔性手指的手爪捏、夹物品时,其夹持模式可调,夹持力可控。其中仅基关节作动时,指尖正压力最小,此方式捏夹能力最低,该模式后续不作为取物方式;随着其他关节参与捏、夹动作,其输出的指尖力随之增加;全关节弯曲时,即 3 个柔指关节同时受压下,指尖正压力最大,在 45 kPa 时正压力为 2.3 N。

综上,所设计的柔性手指可实现类人指的单输入多模态变形,运动范围更大,动作更为灵活,指尖

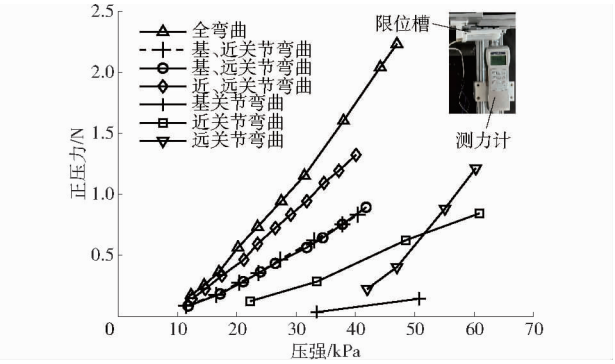


图 21 不同弯曲模式下指尖正压力随压强变化曲线

Fig. 21 Curves of finger tip normal force with pressure fingertip force under different bending modes

最大正压力可达 2.3 N。

4.3 抓取与采摘试验

(1)抓取试验

图 22 为两指采摘手控制系统结构图。采摘手的驱动方式采用直驱式,由电机驱动模块调控电机推动活塞,将电流变液体压入手指腔室内。作业时,高压模块供电,控制器发出控制指令由继电器模块调控采摘手动作模式。待液压泵供压后,柔性手指将发生相应弯曲变形,通过两指相互配合实现物品抓持。

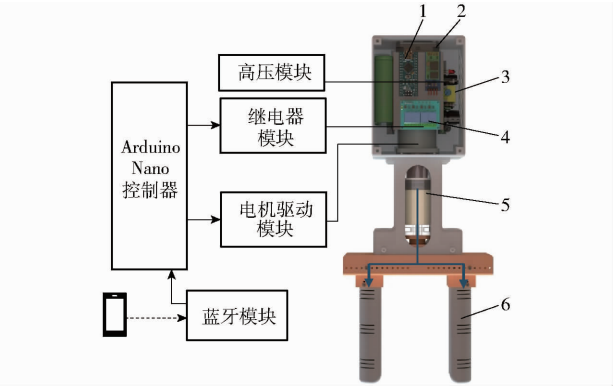


图 22 采摘手爪控制系统结构图

Fig. 22 Control system diagram of picking gripper

1. 控制器 2. 蓝牙模块 3. 高压电源模块 4. 四路继电器 5. 液压泵 6. 柔性手指

手指弯曲变形后,指内会形成包络空间,3 个柔指关节可同时与物体接触,形成包络抓取,或指尖单独接触,形成捏、夹抓取。根据柔性手指的 7 种动作模式(图 17)和指尖力分析,采摘手爪由两指相互配合可做出包夹和捏取等 6 种抓持动作,见图 23。

图 24 中所示多种果蔬的抓取,具体试验参数见表 4。其中依靠手指内侧包夹抓取,有全关节弯曲包裹(图 24a、24b)、近远关节弯曲包裹(图 24c)和基、近关节弯曲夹取(图 24d)。经测试,采摘手包夹持物过程中手指能够很好地贴合目标果蔬表面,但

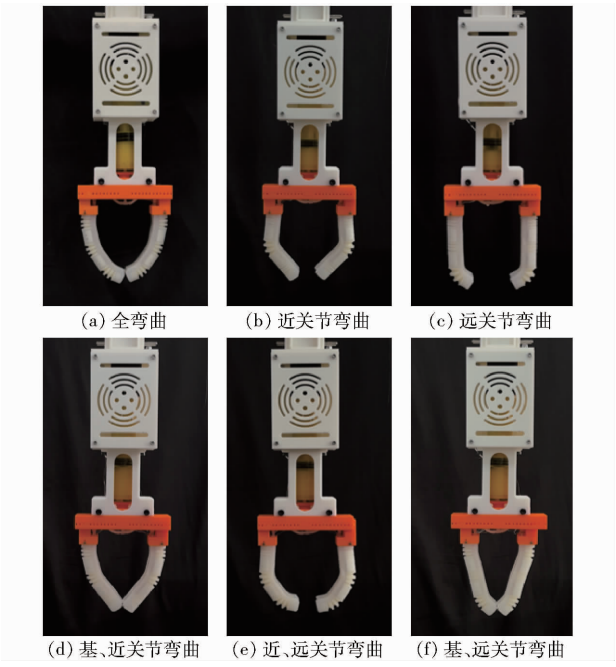


图 23 两指手爪抓持动作

Fig. 23 Grasping motion of two-finger gripper

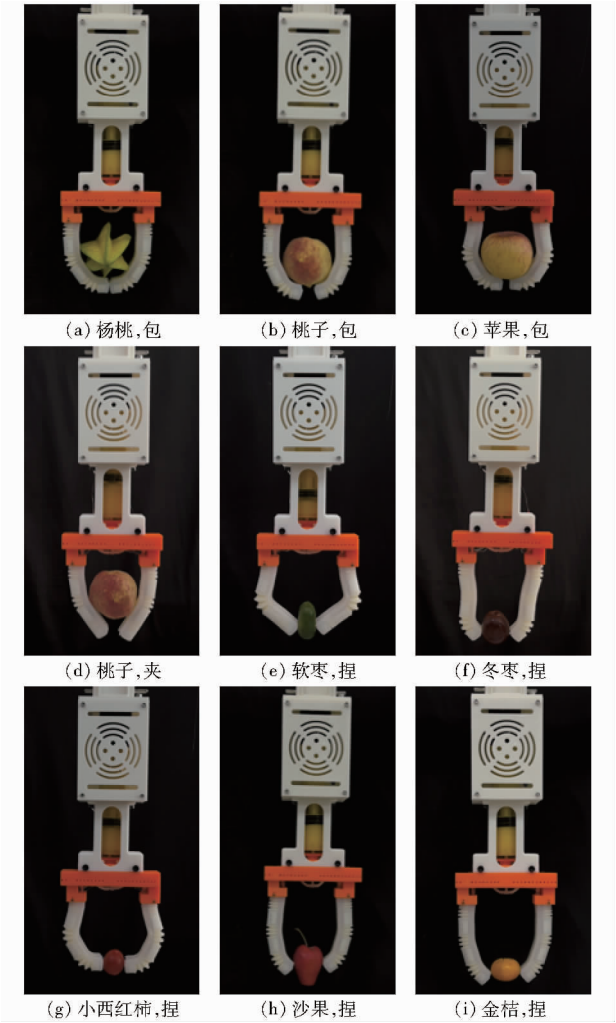


图 24 多种果蔬抓取

Fig. 24 Grasping of various fruits and vegetables

抓持不稳定易掉落,最大包裹物质量为 155 g。利用

两指指尖捏取，有近关节弯曲（图 24e），基、远关节弯曲（图 24f），近、远关节弯曲（图 24g），全关节弯曲捏（图 24h、图 24i），抓持稳定且不易掉落。

由结果可知，多节分控式柔性手指抓取模式多样，面向不同形状和尺寸的果蔬具有良好的物形适应性。

（2）模拟采摘试验

试验室环境下搭建的模拟采摘系统见图 25，从表 4 中选取金桔为采摘目标。试验中，采摘手爪安装于地面移动机器人平台上，利用视觉传感系统捕捉金桔位置，通过六自由度机械臂伸展达到目标位置，由六自由度机械臂驱动配合手爪抓取模式完成采摘。

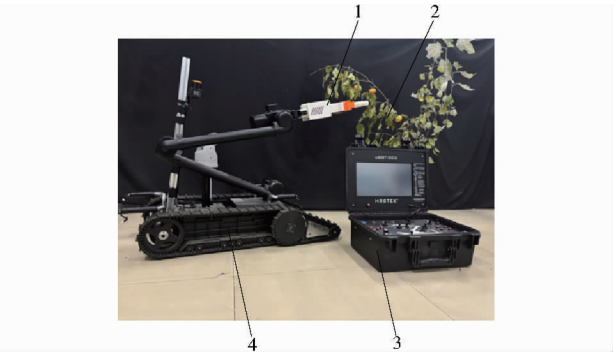


图 25　模拟采摘试验系统

Fig. 25　Experimental system for simulated fruit picking

1. 采摘手爪　2. 目标果蔬　3. 移动平台控制器　4. 六自由度机械臂移动平台

表 4　试验条件与物品参数

Tab. 4　Experimental conditions and object parameters

抓取模式	种类	质量/g	尺寸/mm	工作压强/kPa
包	杨桃	145	ϕ73 × 115	50
	桃子	86	ϕ62	40
	苹果	155	ϕ76	50
捏	软枣	31	ϕ32 × 55	38
	冬枣	33	ϕ44 × 51	38
	小西红柿	18	ϕ31 × 35	42
	沙果	48	ϕ45 × 56	45
	金桔	26	ϕ35 × 32	40
夹	桃子	92	ϕ55	47

以采摘金桔为例（图 26），采摘过程分为 4 步，平均用时 16 s。首先通过视觉传感单元捕捉金桔位置，操控地面移动机器人接近目标球果（图 26a）；展开机械臂使球果位于采摘范围（图 26b）；然后选择相应抓取模式（图 24i），调控活塞式液压泵驱动手爪弯曲捏取金桔（图 26c）；最后通过机械臂拉断果梗完成采摘（图 26d）。采摘试验表明，该电流变驱动多节分控式采摘手爪便携、灵活和易于控制，可实现小尺寸、轻质果蔬采摘。

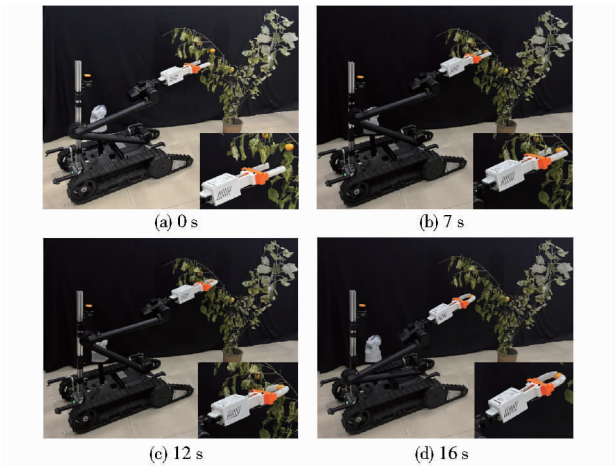


图 26　果蔬采摘过程

Fig. 26　Process of fruit and vegetable picking

5　结论

（1）设计了一种无系留电流变驱动手爪，爪指采用电流变液驱动多节分控式柔性手指，包含 3 个柔指关节腔室和 4 个电流变微阀，长为 110 mm，质量为 51 g，工作压强为 50 kPa，可实现类人指单输入多模态弯曲变形，具有 7 个动作模式。

（2）设计了一种“同心环式电极”半圆柱形电流变微阀，并建立了微阀理论模型，获得了供给电压与微阀阈值的关系，并进行试验验证。结果表明，在设定工作压力下，微阀阈值可调可控，满足截止不同压力流体的需求。

（3）根据建立的柔指关节弯曲变形模型，建立了手指运动学模型，研究了不同压强下柔指关节的变形、手指运动位姿和工作空间。由试验和仿真结果可知，50 kPa 下指关节可弯曲角度 121°，接近人指弯曲角度；相较人指，所设计手指的工作空间更大，动作更为灵活。

（4）分别测试了全关节弯曲模式和多节分控模式下手指各关节正压力变化，测试结果验证了多节分控柔性手指物形适应性优于单一弯曲自由度的柔性手指，更适作为抓持器手爪。

（5）进行了不同动作模式下指尖力测试，获得了指尖正压力与压强的变化规律，随着压强的增加，指尖正压力随之呈线性递增，全关节弯曲模式下手指最大正压力为 2. 3 N。

（6）制作采摘手爪样机并进行了抓取和采摘试验，采用包、捏和夹等 6 种抓持模式进行了多种不同尺寸、不同类型果蔬的抓持试验和金桔模拟采摘试验。结果表明，多节分控式手爪动作灵活、模式多样，具有良好的物形适应性，两指捏取模式持物平稳，适合采摘小而轻质的果蔬。

参 考 文 献

[1] NAKAMURA T. Fluid-driven soft actuators for soft robots[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2024, 36(2): 251 – 259.

[2] 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)

[3] 李海利,姚建涛,周盼,等. 无系留大负载软体抓持机器人研究发展综述[J]. 机械工程学报,2020,56(19):28 – 42.
LI Haili, YAO Jiantao, ZHOU Pan, et al. Untethered, high-load soft grippingrobots: a review[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(19): 28 – 42. (in Chinese)

[4] WANG Y, HAO T, LIU Y, et al. Anthropomorphic soft hand: dexterity, sensing, and machine learning[J]. Actuators, 2024, 13(3):84.

[5] 赵云伟,黄浩然,刘晓敏,等. 无系留气动自适应球果采摘软体手爪设计与实验[J]. 农业机械学报,2023,54(9):74 – 84.
ZHAO Yunwei, HUANG Haoran, LIU Xiaomin, et al. Design and grasping experiments on untethered adaptive pneumatic soft gripper for globose fruit picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9):74 – 84. (in Chinese)

[6] ZHAO Y, ZHAO W, SONG M, et al. Self-adaptive, untethered soft gripper system for efficient agricultural harvesting[J]. Journal of Field Robotics, 2025, 42:4353 – 4367.

[7] 赵云伟,赵文伟,刘政,等. 单驱动无缆式气动苹果采摘手设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(4):264 – 274.
ZHAO Yunwei, ZHAO Wenwei, LIU Zheng, et al. Design and testing of cableless pneumatic apple picker with single actuator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4):264 – 274. (in Chinese)

[8] DEVI M A, UDUPA G, SREEDHARAN P. A novel underactuated multi-fingered soft robotic hand for prosthetic application [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 100:267 – 277.

[9] 韩非,张道辉,赵新刚,等. 面向水下抓取作业的复合腔体仿生软体手设计[J]. 机器人,2023,45(2):207 – 217.
HAN Fei, ZHANG Daohui, ZHAO Xingang, et al. Design of a bionic soft hand with compound cavity for underwater grasping [J]. Robot, 2023, 45(2): 207 – 217. (in Chinese)

[10] YUAN Z, WU L, XU X, et al. Soft pneumatic gripper integrated with multi-configuration and variable-stiffness functionality [J]. Cognitive Computation and Systems, 2021, 3(1): 70 – 77.

[11] PONTIN M, DAMIAN D D. Multimodal soft valve enables physical responsiveness for preemptive resilience of soft robots[J]. Science Robotics, 2024, 9(92): 9978.

[12] ZHAI Y, DE BOER A, YAN J, et al. Desktop fabrication of monolithic soft robotic devices with embedded fluidic control circuits[J]. Science Robotics, 2023, 8(79): 3792.

[13] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8):31 – 42. (in Chinese)

[14] HUANG H, WANG H, FANG C, et al. Gras by spiraling: reproducing elephant movements with rigid-soft robot synergy[J]. NPJ Robotics, 2025, 3(1): 18.

[15] GUAN Q, SUN J, LIU Y, et al. Novel bending and helical extensile/contractile pneumatic artificial muscles inspired by elephant trunk[J]. Soft Robotics, 2020, 7(5): 597 – 614.

[16] WANG Z, FRERIS N M, WEI X. SpiRobs: logarithmic spiral-shaped robots for versatile gras across scales[J]. Device, 2025, 3(4):100646.

[17] MAZZOLAI B, MONDINI A, TRAMACERE F, et al. Octopus-inspired soft arm with suction cups for enhanced gras tasks in confined environments[J]. Advanced Intelligent Systems, 2019, 1(6): 1900041.

[18] WU M, AFRIDI W H, WU J, et al. Octopus-inspired underwater soft robotic gripper with crawling and swimming capabilities [J]. Research, 2024, 7: 0456.

[19] ZHOU J, YI J, CHEN X, et al. BCL – 13: a 13 – DOF soft robotic hand for dexterous grasping and in-hand manipulation[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(4): 3379 – 3386.

[20] HAO T, AO H, LIU S, et al. Multijointed pneumatic soft hand with flexible thenar[J]. Soft Robotics, 2022, 9(4): 745 – 753.

[21] SANKAR S, CHENG W Y, ZHANG J, et al. A natural biomimetic prosthetic hand with neuromorphic tactile sensing for precise and compliant grasping[J]. Science Advances, 2025, 11(10): 9300.

[22] HAO T, AO H, LIU S, et al. Flexible and stable gras by multi-jointed pneumatic actuator mimicking the human finger-impacts of structural parameters on performance[J]. Smart Materials and Structures, 2021, 30(12): 125019.

[23] CHEN C, SUN J, WANG L, et al. Pneumatic bionic hand with rigid-flexible coupling structure[J]. Materials, 2022, 15(4): 1358.

[24] WANG J, FEI Y, PANG W. Design, modeling, and testing of a soft pneumatic glove with segmented pneunets bending actuators[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(3): 990 – 1001.

[25] FENG N, SHI Q, WANG H, et al. A soft robotic hand: design, analysis, sEMG control, and experiment[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(1): 319 – 333.

[26] 朱姿娜,张宇鹏,曾阳浩,等. 一种基于蜂巢结构的颗粒阻塞变刚度软体手指[J]. 机器人,2024,46(6):652 – 662.
ZHU Zina, ZHANG Yupeng, ZENG Yanghao, et al. A variable-stiffness soft finger based on particle jamming with honeycomb structure[J]. Robot, 2024, 46(6): 652 – 662. (in Chinese)

[27] YANG X, ZHANG N, HUANG X, et al. Multidirectional bending soft pneumatic actuator with fishbone-like strain-limiting layer for dexterous manipulation[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2024, 9(4): 3815 – 3822.

[28] LI L, XIE F, WANG T, et al. Stiffness-tunable soft gripper with soft-rigid hybrid actuation for versatile manipulations[J]. Soft Robotics, 2022, 9(6): 1108 – 1119.

[29] YOSHIDA K, TSUKAMOTO N, KIM J, et al. A study on a soft microgripper using MEMS-based divided electrode type flexible electro-rheological valves[J]. Mechatronics, 2015, 29: 103 – 109.

[30] TONAZZINI A, SADEGHI A, MAZZOLAI B. Electrorheological valves for flexible fluidic actuators[J]. Soft Robotics, 2016, 3(1): 34 – 41.

[31] HUANG T, XU D, ZHANG H, et al. A lightweight flexible semi-cylindrical valve for seamless integration in soft robots based on the giant electrorheological fluid[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2022, 347: 113905.

[32] 魏宸官. 电流变技术—机理·材料·工程应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2000.

[33] ZATOPA A, WALKER S, MENGUE Y. Fully soft 3D-printed electroactive fluidic valve for soft hydraulic robots[J]. Soft Robotics, 2018, 5(3): 258 – 271.

[34] 董虎,王保兴,李巍,等. 基于单向气动驱动器的软体手变形机理[J]. 东华大学学报(自然科学版),2020,46(2):288 – 296.
DONG Hu, WANG Baoxing, LI Wei, et al. The deformation mechanism of soft hand based on one-way pneumatic actuator[J]. Journal of Donghua University (Natural Sciece), 2020, 46(2): 288 – 296. (in Chinese)

(上接第 238 页)

[25] 陈霓,黄东明,陈德俊,等. 风筛式清选装置非均布气流清选原理与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(4):73 – 77.
CHEN Ni, HUANG Dongming, CHEN Dejun, et al. Theory and experiment on non-uniform air-flow cleaning of air-screen cleaning unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 73 – 77. (in Chinese)

[26] 兰纪正,朱恩宽. 欧几里得几何原本第 2 版[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2003.

[27] 唐忠,李耀明,李洪昌,等. 联合收获机风筛式清选装置清选室内涡流试验[J]. 农业机械学报,2010,41(12):62 – 66.
TANG Zhong, LI Yaoming, LI Hongchang, et al. Analysis on the eddy current of the air-and-screen cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 62 – 66. (in Chinese)

[28] 康家鑫,王修善,谢方平,等. 多作物联合收获机独立调节式凹板筛设计与试验[J]. 农业工程学报,2025,41(3):11 – 21.
KANG Jiaxin, WANG Xiushan, XIE Fangping, et al. Design and test of the independently-adjustable concave plate screen for a multi-crop combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(3): 11 – 21. (in Chinese)

[29] 周璇,王志明,陈霓,等. 圆锥形风机清选室气流场数值模拟与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(3):91 – 100.
ZHOU Xuan, WANG Zhiming, CHEN Ni, et al. Numerical simulation and experiment of airflow field of cleaning room under action of conical fan[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 91 – 100. (in Chinese)