doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.04.024

单驱动无缆式气动苹果采摘手设计与试验

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

摘要: 为实现苹果自动化采摘,设计了一种结构简单、便携安装在自动化采摘设备上的单驱动无缆式气动苹果采摘手,该采摘手采用微泵直驱,3 根弧形爪指呈中心对称分布由单个线性气动柔性驱动器驱动。手爪保持常闭状态,作业时充压张开,泄压被动收拢抓取苹果。根据吉林地区苹果特征参数,确定了采摘手关键部件设计及其尺寸参数,设计集成无缆式采摘系统。基于驱动器变形和力学特性,建立了手爪运动学和抓持力模型,并进行了采摘手性能测试,获得了其充泄压下开合角度变化和力学特性,结果表明采摘手开合动作迅速,抓持力和开合角度满足目标苹果采摘需求。利用臂式移动机器人,开展了试验环境下苹果采摘试验和果园现场采摘试验,试验结果表明,在采摘全程中该采摘手能安全且稳定地抓持苹果,采摘成功率为 84.9%,可实现复杂果园环境下苹果采摘作业。

关键词: 苹果; 采摘手; 单驱动; 无缆式; 气动
中图分类号: TH138.5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)04-0264-11　　**OSID**:

Design and Testing of Cableless Pneumatic Apple Picker with Single Actuator

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

Abstract: Aiming to enable automated apple picking, a single-drive cableless pneumatic apple picker with a simple structure that can be portable and mounted on an automated picking device was proposed. The apple picker was driven directly by a micro-pump with three arc-shaped fingers symmetrically distributed in the center and driven by a single linear pneumatic flexible actuator. The picker fingers were normally closed, and opened when air pressure was applied, and passively retracted to grasp the apple after the pressure was released. Based on the characteristic parameters of apples in the Jilin region, the design and size parameters of key components of the cableless pneumatic apple picker were determined, and an integrated cable-free picking system was designed. Based on the deformations and mechanical properties of the flexible actuator, a kinematic and gripping force model of the apple picker was created to evaluate the functionality of the apple picker. The results showed that the pneumatic apple picker opened and closed quickly with gripping force and opening angle that met the target apple picking requirements. Using an arm-like mobile robot, apple-picking experiments were conducted in the laboratory and in the orchard. Experimental results demonstrated that the pneumatic apple picker was able to safely and steadily grasp apples throughout the picking process with an 84.9% success rate, which was capable of performing apple picking operations in complex orchard environments.

Key words: apple; apple picker; single-actuator; cableless; pneumatic

0　引言

苹果种植面积广,采摘季节性强,劳动力需求密集且劳动强度大[1-2]。目前苹果采收方式还主要依赖人工,机械化率不足 3%[3]。为节约人力成本并提高采摘效率,苹果自动化采摘需求迫切[4-5]。而设计结构简单、轻质灵活、便携可靠的采摘手是实现自动化采摘的关键环节之一[6]。近年来,国内外学

收稿日期: 2024-11-11　修回日期: 2024-12-02
基金项目: 吉林省科技发展计划项目(YDZJ202401396ZYTS、YDZJ202201ZYTS624)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

者相继研制出多种应用自动化采摘设备的苹果采摘手，有吸附式[7]、夹持式[8-10]、复合式[11]等。吸附式采摘执行器主要依靠负压吸取或吸盘吸附球果，其结构复杂。相较于吸附式手爪，夹持式采摘手通过多指配合抓握苹果，动力经由机械结构传递给手指，手指与苹果表面接触直接提供夹持力，其结构简单，但刚性的杆件和过大的夹持力易损伤苹果[12]。面向复杂的采摘环境，作业时外露缆线便携性差，易与苹果枝叶干涉等问题，进而需求无缆化设计[13]。同时为避免在采收过程损伤苹果，采摘手设计趋向柔性化或智能化，爪指采用软质材料[14-17]或集成触觉传感器，采摘时通过力反馈控制手爪抓持力实现苹果无损采摘[18-19]。将三指采摘手爪与气控系统集成一体，手爪与微泵直连去除多余缆线和阀组且集成触力传感器。采摘手由单个“变形和力可控”的线性气动柔性驱动器驱动，通过驱动器充泄气实现手爪快速抓握，利用手指内嵌薄膜压力传感器的力反馈信号控制微泵供压和电磁阀泄压，实现快速抓握动作和抓持力有效控制，可便携安装于移动平台或滑轨上作为采摘执行器。

针对吉林地区新平 4 号苹果采摘，本文设计一种集成传感单驱动无缆式气动苹果采摘手爪，研究单驱动采摘手结构设计、直驱式气控系统和力传感系统设计，建立驱动器变形与力学模型、手爪运动学与抓持力模型，搭建试验平台和制作样机，并进行苹果模拟采摘测试与果园实地采摘试验。

1　采摘手结构设计

1.1　总体设计

结合吉林地区苹果果实特征和自动化采摘需求，设计了一种去除缆线束缚可便携安装于移动平台或滑轨上的采摘系统。整体结构如图 1 所示，设计参数见表 1。采摘系统由单驱动采摘手和气控系统组成。采摘手夹持机构采用弧形杆式三指机械手，由单个线性气动驱动器驱动，在爪指端部和掌心处设有薄膜式压力传感器用于反馈夹持力的大小和确定苹果位置。气控系统采用气泵直驱，由力反馈信号控制气泵电机转速调控驱动器内气体压力。采摘作业时，采摘手保持常闭状态，充压张开，泄压被动收拢。

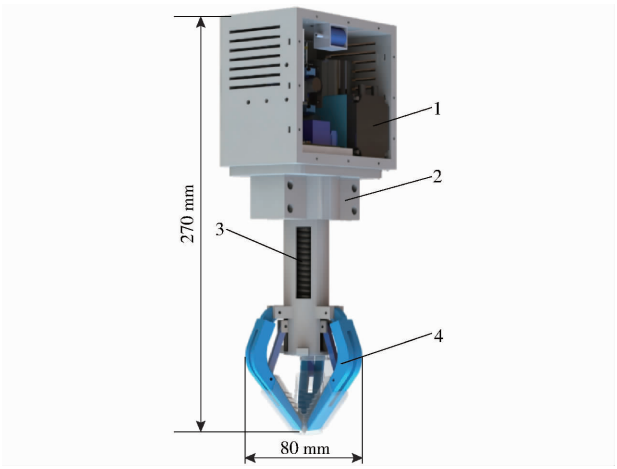

图 1　采摘系统整体结构图

Fig. 1　General structure of picking system

1. 气控系统　2. 连接座　3. 线性气动驱动器　4. 三指机械手

表 1　苹果外形参数与采摘手总体设计参数

Tab. 1　Parameters of apple and picker

类别	参数	数值
新平 4 号苹果	最大横径/mm	70 ~ 90
	果质量/g	190 ~ 260
采摘手	手爪质量/kg	≤1
	适应采摘苹果横径/mm	60 ~ 100
	最大负载/kg	0.5

1.2　单驱动采摘手设计

针对表 1 所示新平 4 号苹果果实特点，设计了单驱动夹持式三指采摘手，结构见图 2。采摘手由单个线性气动驱动器驱动，三指同时动作实现球果抓握。

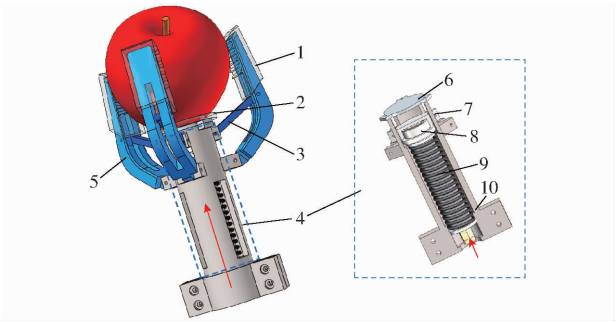

图 2　采摘手结构图

Fig. 2　Structure of apple-picker

1. 软指套　2. 软掌垫　3. 连杆　4. 驱动机构　5. 手指　6. 手掌底座　7. 滑块　8. 轴承　9. 线性气动驱动器　10. 驱动机构外壳

为实现目标球果的有效包裹，三指呈中心对称分布。抓持时苹果抵住手掌内侧，手指包裹住球果，抓持位置设计在苹果果径 1/2 ~ 2/3 处。指根末端铰接于驱动机构外壳，通过驱动器带动滑块和连杆驱使手指向内侧摆动实现闭合收拢。同时为避免损伤苹果，在手掌和指端分别设有硅胶软垫和指套，软垫和指套内留有薄膜传感器安装卡槽。

首先参照目标苹果外形参数设计手指长度和开合角度。所设计的弧形手指指端扁平修长，适合贴紧苹果表面，其宽度与人指宽度相当，其长度设计如图 3 所示。采摘手手指可简化为两段弯折连杆，图中 ABJ 线为手指简化廓形，AB 为摆动段，BJ 为夹持段，点 E 为手指与球果接触位置。

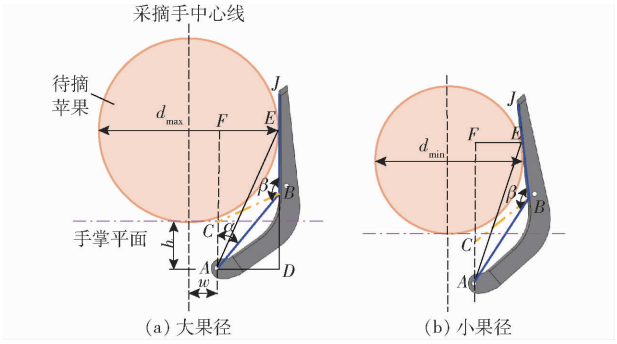

图 3 手指包裹球果几何关系

Fig. 3 Geometric relations of finger-wrapped apple

由图 3 可知,采摘手手指夹持段长度 L_{BJ} 为

$$\begin{cases} L_{BJ} = L_{BE} + L_{EJ} \\ L_{AE}^2 = L_{AF}^2 + L_{EF}^2 \\ L_{AB}^2 + L_{BE}^2 - 2L_{AB}L_{BE}\cos\beta = L_{AE}^2 \end{cases} \tag{1}$$

式中 β——杆 AB 与杆 BJ 夹角

L_{AB}——杆 AB 长度

L_{BE}——杆 BE 长度

L_{AE}——杆 AE 长度

L_{AF}——杆 AF 长度

L_{EF}——杆 EF 长度

L_{EJ}——杆 EJ 长度

极限果径苹果抓持位置点 E 分别设计在果径 1/2 处和 2/3 处(图中 d_{max}和 d_{min}分别为苹果最大和最小横径,w 和 h 分别为铰接点 A 与手掌平面和采摘手中心线距离),由图中所示几何关系可知,2 种极限果径下 L_{EF}和 L_{AF}分别为

$$\begin{cases} L_{EF\max} = d_{max} - w \\ L_{AF\max} = \dfrac{d_{max}}{2} + h \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} L_{EF\min} = \dfrac{\sqrt{2}d_{min}}{3} - w \\ L_{AF\min} = \dfrac{2d_{min}}{3} + h \end{cases} \tag{3}$$

式中 $L_{EF\max}$、$L_{EF\min}$——杆 EF 最大、最小长度

$L_{AF\max}$、$L_{AF\min}$——杆 AF 最大、最小长度

根据表 1 所示采摘地域苹果最大横径尺寸分布,采摘手抓取苹果极限横径 d_{min} 和 d_{max} 分别为 60 mm和 100 mm,杆 AB 与杆 BJ 夹角 β 为 138°,摆动段杆 AB 设计长度为 38 mm,w 和 h 分别为 22 mm 和 31 mm。将式(2)、(3)计算得 l_{EF}和 l_{AF}代入式(1)求得 BE 段杆长为 38.38 ~ 43.71 mm。若完全包裹目标苹果,BJ 杆最小长度满足

$$L_{BJ} = L_{BE\max} + L_{EJ} \tag{4}$$

式中 L_{EJ}——指尖长度

根据手指外形结构,指尖长度 L_{EJ} 为 2 mm,由式(4)计算得 L_{BJ}约为 45 mm。

定义 AB 杆与采摘手中心线夹角 α 为手指的开合角度(图 4),$\alpha = \arcsin(L_{AD}/L_{AB})$。当采摘手三指收拢闭合时,手指开合角度最小,此时手指之间位于采摘手中心线上,则 $L_{AD} = L_{BJ} - w\sin(\beta + \alpha)$;抓取最大果径苹果时,开合角度最大(图 3a),此时手指与采摘手中线平行,则 $L_{AD} = d_{max}/2 - w$。

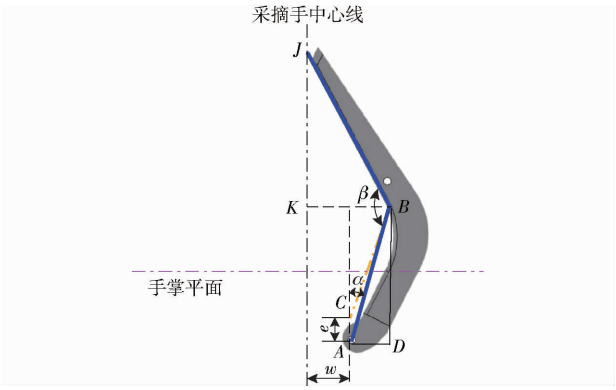

图 4 机械手闭合位姿

Fig. 4 Finger posture when apple-picker was closed

由图 3a 和图 4 几何关系可得手指极限开合角度为

$$\begin{cases} \sin\alpha_{max} = \dfrac{d_{max} - 2w}{2L_{AB}} \\ \sin\alpha_{min} = -\dfrac{L_{JB}\sin(\beta + \alpha_{min}) - w}{L_{AB}} \end{cases} \tag{5}$$

将采摘手几何参数和目标苹果外形参数代入式(5)求解得手指开合设计范围为 8.07° ~ 42.57°。假设点 C 位于点 A 正上方,然后,根据求解得的手指极限开合角度可求解滑块滑移范围即点 C 移动距离近似为 ΔL_{AC},令 $\Delta L_{AC} = \Delta L$,由图 4 几何关系可知,滑块滑移距离 ΔL 为

$$\Delta L = L_{AB}\sin\alpha - (L_{BC}^2 - L_{AB}^2\cos^2\alpha)^{1/2} - e \tag{6}$$

式中 e——机械手闭合时点 A 到点 C 距离

根据连接件结构尺寸,设计点 A 与点 C 初始距离 e 为 9 mm,将计算求得的手指极限开合角 α_{max}代入式(6)可求解得滑移所需移动距离为 10.39 mm。

1.3 线性驱动器设计与建模

采摘手驱动器设计要求其在伸长变形过程中变形量 Δl 与气压 p 关系适当,能提供足够的驱动力 F_p且变形恢复过程中产生大的牵拉力 F_l,其气压下变形量和力应满足

$$\begin{cases} \Delta l > \Delta L \\ F_p > F_z \\ F_l > F_{l\min} \end{cases} \tag{7}$$

式中 $F_{l\min}$——抓紧苹果驱动器所需提供最小牵拉力

F_z——负载力

针对这一需求，本研究设计一种“充气主动伸长、泄气被动回缩”的外骨骼式线性气动柔性驱动器，结构见图 5。该驱动器为气动复合弹性体，内部设有硅胶气囊，两端封装堵头和端盖形成密闭腔体，外部嵌套弹簧骨架以约束气囊径向变形、支撑和连接端盖。充气后，驱动器内气囊受压膨胀沿轴向伸长驱动手爪张开；泄气后，随弹簧骨架和气囊变形恢复牵拉手爪闭合抓取苹果。

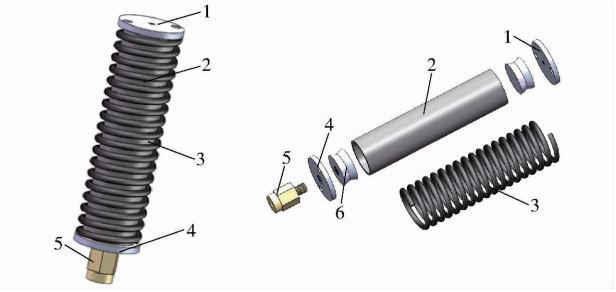

图 5　线性气动驱动器结构与组成

Fig. 5　Structure and composition of linear pneumatic actuator

1. 上端盖　2. 气囊　3. 弹簧骨架　4. 下端盖　5. 气动接头　6. 堵头

轴向变形量 Δl、驱动力 F_p 和牵拉力 F_l 是驱动器的关键设计参数，其中驱动力为气压在驱动器端部作用力，牵拉力为胶管和弹簧阻碍变形而产生的力。考虑负载 F_z 情况下，根据力平衡关系和变形协调条件，可知三者之间关系为

$$F_p = F_l + F_z \tag{8}$$

其中

$$F_p = pS$$

$$F_l = F_s + F_r = (k_s + k_r)\Delta l + F_0$$

式中　S——气囊内腔横截面积

k_r——硅胶气囊轴向刚度

k_s——弹簧骨架刚度

F_r——硅胶气囊回弹力

F_s——弹簧骨架回弹力

F_0——弹簧骨架预紧力

其中，气囊内腔横截面积和硅胶气囊轴向刚度[20]分别为

$$S = \frac{\pi(D_1^2\Delta l + D_2^2 l_0)}{4(l_0 + \Delta l)} + \Delta S \tag{9}$$

$$k_r = \frac{\pi G_r (D_1^2 - D_2^2)}{4l_0}\left[1 + \frac{3l_0^4}{(l_0 + \Delta l)^4}\right] \tag{10}$$

式中　l_0——驱动器初始长度

D_1——气囊初始外径

D_2——气囊初始内径

G_r——气囊剪切模量

ΔS——气囊内腔横截面积修正量

假设线性驱动器内气囊和弹簧骨架之间接触紧密且变形同步，变形力符合线性叠加，由式(8)可计算得驱动器轴向伸长量为

$$\Delta l = \frac{(\pi D_2^2 p - 4F_z - 4F_0)l_0}{4k_s l_0 + 4\pi G_r(D_1^2 - D_2^2) - [\pi(D_1^2 + 2D_2^2) - 3\Delta S]p + 12(F_z + F_0)} \tag{11}$$

所设计驱动器在实际的应用中，存在需要优化问题：①变形与刚度之间的矛盾，欲获得大变形，须选择弹性模量小的软质气囊和低刚度弹簧骨架(式(8))，而要获得大刚度提升驱动器高负载和弹性恢复，须选用高刚度弹簧骨架。因此针对一定变形范围的需求，驱动器弹性骨架选择存在最优值。②大牵拉力需求，除选用高刚度弹簧外，可选择增加预紧力的方式(式(8))。③消除由驱动器伸长带来的回转影响，由于弹簧螺旋结构，驱动器在伸长时会产生回转。驱动机构设计中，选择在滑块与驱动器之间采用轴承连接消除驱动器回转。

经优化后，驱动器设计首先选用弹性模量较小有益变形的硅橡胶管(弹性模量 1.367 MPa)作为气囊材料，而骨架材料选用大节距 65Mn 弹簧(弹性模量 202 GPa)。驱动器设计参数见表 2。

表 2　驱动器几何参数

Tab. 2　Geometric parameters of actuator

参数	数值
气囊有效长度 l_0/mm	60
气囊初始外径 D_1/mm	16
气囊初始内径 D_2/mm	12
弹簧丝直径 d_s/mm	1.7
弹簧中径 D/mm	18.75
弹簧有效圈数 n_0	22
弹簧长度 l_S/mm	80

将表 2 所示驱动器各参数代入式(9)、(11)，可得设计的驱动器轴向变形量、驱动力和回弹力随气压的变化情况如图 6，图中试验数据由激光测位仪和六维力传感器获得($\Delta p = 0.02$ MPa)。由图 6 可知，理论计算结果与试验数据趋势一致，吻合较好，能够真实反映驱动器气压下变形和力变化情况。随着气压增加，驱动器轴向伸长量随之增大且呈非线性(图 6a)，其驱动力和回弹力随之近似呈线性递增，驱动力比例系数 k_p 为 188.1 和回弹力比例系数 k_l 为 165.2。充压时气压每增加 Δp，驱动力提升约 4.1 N；泄压时气压每减小 Δp，回弹力增加约 3.9 N(图 6b、6c)。结果表明，柔性驱动器充气时主动伸长，泄气后被动收缩，在伸长过程中变形和力可控，弹性恢复时可产生较大拉力，适合作为采摘手驱动器。

依据设计滑块滑移最大行程量 ΔL，由图 6a 选

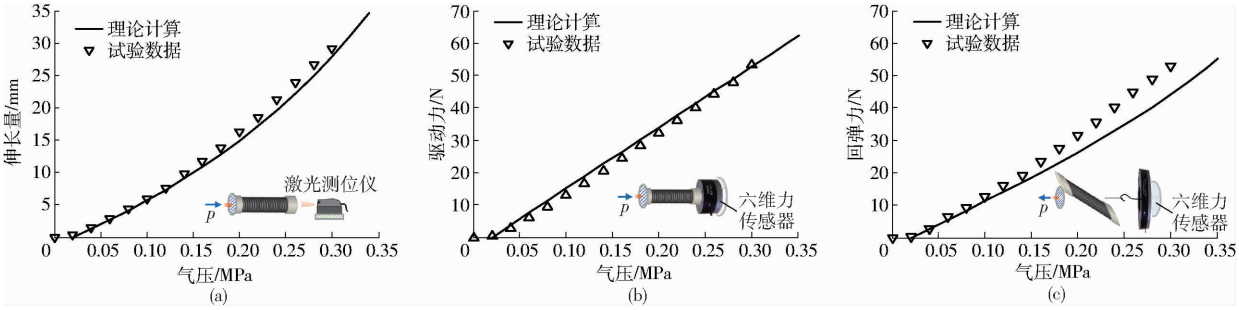

图 6 驱动器变形、力与气压关系

Fig. 6 Relationships between deformation, driving force, rebound force and air pressure

用压力 0.2 MPa 作为采摘手工作气压,此气压下驱动器伸长量 Δl 为 16 mm,大于滑块设计滑移量 ΔL。经验证驱动器产生的驱动力 F_p 可以克服负载 F_z 和预紧力 F_0(手爪和连杆重量和摩擦阻力约 1.15 N,设定预紧力为 4.75 N)驱动手爪张开(图 6b),完全泄压后驱动器最大回弹力 F_l 为 31.5 N(图 6c),大于最小回弹力(7.2 N,由采摘试验获得,对应最小夹持力泄气增量 Δp)。依据式(6)所示条件,所设计的驱动器性能满足采摘手设计要求。

1.4 力反馈控制系统设计

采摘手抓紧苹果的方式为被动抓取,夹持力通过驱动器的变形恢复牵拉手指被动地施加给苹果,因此欲实现夹持力有效控制,需控制驱动器的泄压过程的压力。设计的采摘手力反馈控制系统见图 7,采摘手气控方式采用直驱式,通过微型气泵(HX07 - DCB 型)供气和电磁换向阀泄气,由薄膜压力传感器(RP - C10 - ST 型)反馈的接触力信号进行控制。蓝牙模块将接收遥控器传输的信号传递给控制器(Arduino Nano),控制器发出控制指令,经由电机驱动模块调控电机转速为驱动器供压展开手爪,识别苹果后由继电器模块控制电磁阀泄压完成抓握;抓持过程中产生的接触力信号经压力转换模块反馈给控制器,经控制器判断后向微泵和电磁换向阀发出指令,调控驱动器内压力进而调整手爪夹持力完成苹果无损采摘。

采摘模式包括 2 种模式,一种为基础模式即快速采摘模式,通过掌心传感器判定苹果位置后,直接泄气快速完成抓取;另一种为智能采摘模式,需要通过手爪安装的薄膜压力传感器进行接触力反馈后,判别手指夹持力是否过大或过小,以及夹持力不足产生滑移后的抓取策略等。

在苹果采收过程中,能否快速且稳定地摘取果实,防止其在运送过程中滑移脱落损伤,是采摘手设计的重要考量因素。为实现苹果可靠和无损抓取,设计手爪抓持力 F 范围为 $F_{min} \leqslant F \leqslant F_{max}$,式中 F_{min} 和 F_{max} 分别为抓取目标苹果所需最小抓持力和损伤

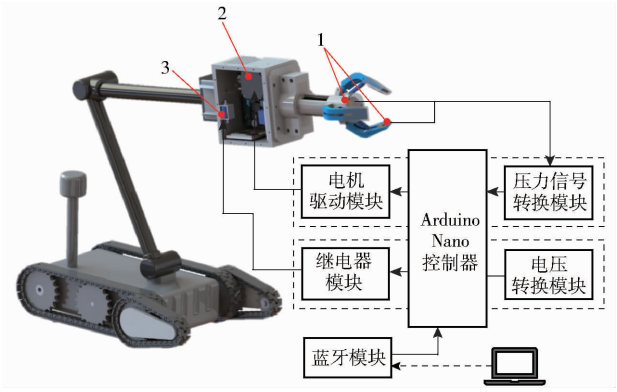

图 7 采摘手力反馈控制系统

Fig. 7 Force feedback control system of apple-picker

1. 薄膜压力传感器 2. 微型气泵 3. 常闭电磁阀

苹果面的最大抓持力。基于抓持力 F 合理范围设定,建立力反馈的抓取机制。首先调节电机转速令微泵输出设定气压(0.2 MPa)使手爪张开,然后依据掌心薄膜压力传感器反馈的接触力信号判断苹果是否位于采摘位置(抓取球果时无论侧向抓握或底部抓握,认定苹果位于采摘手抓取范围且与手掌贴合),判定苹果位于采摘位置后,泄压抓取苹果。抓持过程中,若抓持力在合理范围($F_{min} \leqslant F \leqslant F_{max}$)内,持续泄压至最小抓持力 F_{min} 后,关闭电磁阀停止泄压;若夹持力过小出现打滑,则开启电磁阀持续泄压直至抓紧球果;若抓持力过大($F > F_{max}$),超过球果破坏力,则关闭电磁换向阀停止泄压,随即调控电机转速增加驱动器内气压减小抓持力,避免损伤苹果。

2 采摘手运动学和抓持力分析

苹果采摘大致分为“采、运、放”3 个过程,执行苹果采摘作业时,采摘手通过驱动器充泄气快速完成手爪释放和苹果抓握,抓持时手爪与苹果表面接触直接提供抓持力,在机械臂和移动机器人的配合下完成采摘。这一过程中采摘手能否快速且稳定地摘取球果,防止其在运送过程中滑移脱落损伤,末端夹持器开合速度以及力学特性是关键影响因素,为此进行了采摘手运动学和抓持力分析。

2.1　运动学分析

采摘手机械系统可简化为曲柄滑块机构，见图 8，其运动部件为手指和滑块，分别做摆动和往复直线运动。

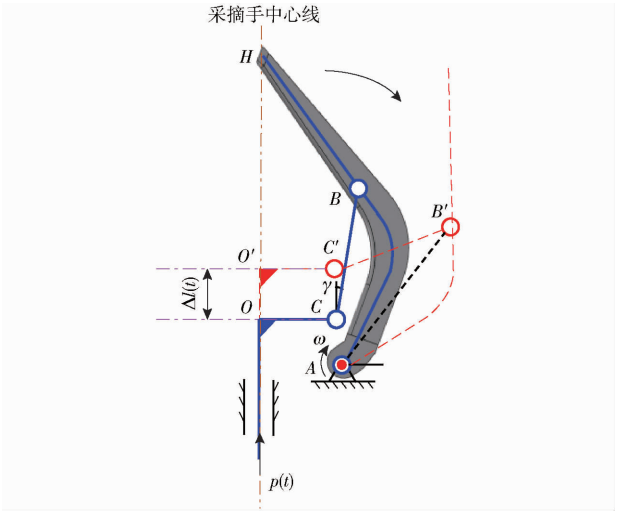

图 8　采摘手运动模型

Fig. 8　Kinematic analysis model of apple-picker

机械手初始状态保持闭合，点 O 设定为驱动器作用点，手指指尖 H 恰好位于采摘手中心线。当驱动器驱动手爪运动时，充入气压 $p(t)$ 后，线性驱动器快速伸长推动滑块，设定点 O 以速度 v 和加速度 a 向上运动，同时带动连杆 BC 驱动手指 AH 以角速度 ω 绕点 A 向外回转运动，达到设定压力值 0.2 MPa 后，点 O 停止运动，手指点 B 达到最远点；泄压后，线性驱动器快速回缩带动滑块，点 O 以速度 v' 和加速度 a' 向下运动，牵拉手指 AH 以角速度 ω' 向内回转，回到初始位置。以点 O 和点 B 为分析对象，由图 8 可知采摘手手指绕点 A 回转角速度为

$$\begin{cases}\omega = \dot{\alpha}(t)\\ \alpha(t) = \arccos\dfrac{L_{AB}^2 + (\Delta l(t) + e)^2 - L_{BC}^2}{2L_{AB}(\Delta l(t) + e)}\end{cases} \tag{12}$$

设定驱动器工作压力为 0.2 MPa，由压力传感器测得充气气压 $p(t)$ 和泄气气压 $p'(t)$ 随时间变化量分别为

$$\begin{cases}p(t) = 0.42t - 0.08\\ p'(t) = -1.28t + 0.93\end{cases} \tag{13}$$

将式(11)、(13)代入式(12)可得手爪开合速度与充压和泄压时间的关系为

$$\omega = \omega(p(t)) \tag{14}$$

将气压 0.2 MPa 下变化量代入式(12)，可得手爪张合平均角速度 ω 和 ω' 分别为 13.5、41.31(°)/s。

2.2　抓持力分析

图 9 为“采、运、放”3 个采摘过程中的抓持力分析，驱动器在泄压以后，依靠自身的弹性恢复力 F_l 牵拉手爪抓取苹果，手爪爪指与苹果接触过程中产生的夹持力 F 包括正压力 F_n 和摩擦力 F_f。在摘取苹果过程中，通常采用侧向抓握姿势(图 9a)，此时手指与手掌配合形成力封闭抓取，这一过程要求手爪抓紧苹果的同时，提供足够的摩擦力扭断果梗；运送过程中需要手爪持续抓紧苹果克服重力 G 防止滑落(图 9b)；放置苹果时，手爪竖直向下，此时手指作用在苹果表面的正压力和摩擦力的合力大小与苹果重力一致(图 9c)。

综上，为保证采摘全流程中手指抓握的稳定性，对采摘手抓持力进行分析计算，满足关系式

$$\begin{cases}F = \sum_{i=1}^{3} F_{ni} \leqslant F_{\max}\\ F_d \leqslant \sum_{i=1}^{3} F_{fi} = \mu \sum_{i=1}^{3} F_{ni}\\ G = \sum_{i=1}^{3} F_{ni}(\sin\theta + \mu\cos\theta)\end{cases} \tag{15}$$

式中　F_d——果梗扭断力

θ——正压力与重力方向的夹角

μ——摩擦因数

采摘手手指夹持力即正压力由驱动器回缩牵拉提供

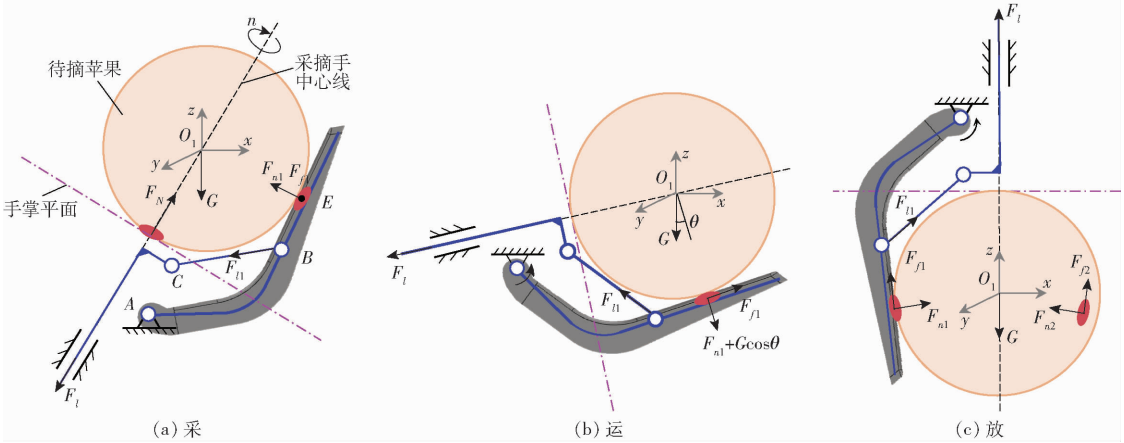

图 9　采摘过程手指夹持力分析

Fig. 9　Analysis of finger gripping force during picking process

动力 F_l通过连杆机构进行传递(图 9),对手指进行受力分析,根据力与力矩平衡可知 F_n为

$$F_n = \frac{F_l L_{AB} \sin(\gamma - \alpha)}{3(L_{BE} - L_{AB}\cos\beta)\cos\gamma} \tag{16}$$

式中 γ——连杆 CB 与采摘中心线夹角

由图 9 所示几何关系,得 γ 为

$$\gamma = \arccos \frac{L_{AB}^2 - L_{BC}^2 - (\Delta l(t) + e)^2}{2L_{BC}(\Delta l(t) + e)} \tag{17}$$

将驱动器牵拉力式(8)、(11)、(17)代入式(16),可得手指正压力与泄压气压关系为

$$F_n = F_n(p'(t)) \tag{18}$$

式(18)表明,通过调控泄气压力可控制夹持力。从手指夹持力公式推导过程中可以看到苹果尺寸和手指抓取位置是影响手指夹持力的关键因素,如式中采摘手设计关键参数 α、Δl、F_l、γ、L_{BE},其中 F_l、γ、Δl 与手指开合角 α 有关,即与苹果尺寸有关,而 L_{BE}则与手指接触点位置有关。假设驱动器完全泄气,随苹果尺寸增加,因手指开合角度 α 增大,驱动器可回缩位移 Δl 增大,此时手指可提供较大的夹持力,反之夹持力减小。手指接触点位置设定在果径 1/2 ~ 2/3 处,随着手指抓取位置超过果径 1/2 处,手指夹持力逐渐减小。

3 试验

结合上述设计参数,设计集成采摘手系统,总体质量为 861 g,围绕手爪的采摘范围、抓取速度和夹持力等进行了采摘手性能测试,利用机械臂和移动平台进行试验环境下的模拟采摘试验和果园现场测试。

3.1 采摘手性能测试

3.1.1 采摘范围与抓取速度

采摘手系统适合采摘苹果横径范围和抓取速度取决于手爪开合角度和速度。图 10 为采摘手开合角度随气压变化,由图 10 可见,当压力小于 0.05 MPa 时,由于需预充气胀满气囊和克服负载、摩擦阻力和弹簧预紧力,手爪保持收拢闭合状态;当气压超过 0.05 MPa 后,手爪开合角度随气压增加呈非线性递增,直至 0.2 MPa 后手爪完全张开。开合角度为 12.5° ~ 39.7°,可最大抓取横径为 60 ~ 97 mm,满足采摘最大横径尺寸分布为 70 ~ 90 mm 苹果的设计要求。

在直驱式气控系统驱动下,采摘手开合角度测试结果见图 11,手爪固定在水平面上,每个软体手指端部上装有 2 个标记点,通过 NDI 三维运动捕捉系统获取手指端部的空间位置,由标记点相对位置变化测量指端面转角。

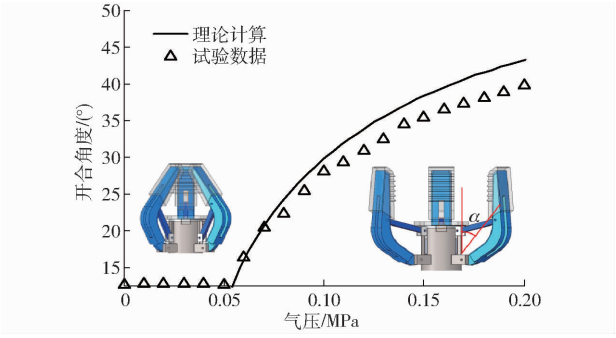

图 10 手爪开合角度与气压关系

Fig. 10 Relationship between opening angle of picker and air pressure

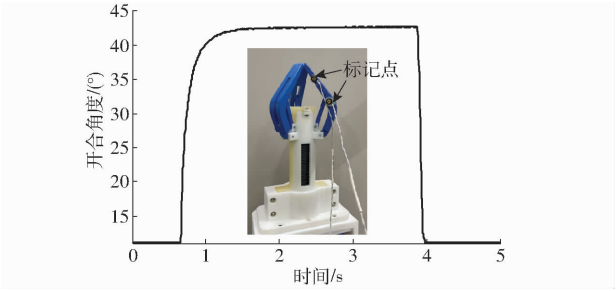

图 11 手爪开合角度随时间变化曲线

Fig. 11 Relationship between opening angle of picker and time

图 11 为工作压力为 0.2 MPa 下开合过程中手爪开合角度随充泄气时间的变化。由图 11 可见,手爪开合平均用时 1.6 s,动作频率为 6.25 Hz。结果表明,被动式的抓握设计,手爪开合动作迅速,其抓取速度取决于充气和泄气速度。通过改变气泵和微阀参数可以调节手爪抓取速度,提升所设计采摘系统在实际苹果采摘作业中的效率。

3.1.2 力测试

(1)夹持力

驱动器泄压后牵拉手爪与苹果模型接触,接触点处的正压力可通过安装在手指内侧的薄膜压力传感器测得(图 12)。测试时,先充压至工作压力(0.2 MPa)张开手爪,调节滑台令手掌与模型苹果接触,再泄压至手指与模型苹果接触(0.18 MPa)后持续泄压。由图 12 可见,手爪与接触点正压力随泄压增量 Δp 的增加而增加,完全泄压后测得手爪的最大正压力为 12 N,远小于苹果破坏力 F_P(F_P = 20 N)[21]。结果表明,通过调节 Δp 可有效控制手爪抓持力从而实现苹果无损采摘。

多种苹果抓持试验参数见表 3,表中 p_0为爪指与苹果接触时泄气压力。随机选取 10 个苹果,在抓取过程中,先泄压令手指与苹果接触,然后继续泄压 Δp 直至采摘手抓紧球果,并保证抓取球果在一定空间范围内移动且受外力干扰时,不产生滑移掉落。由表 3 可见,受尺寸和几何外形不规则性影响,苹果

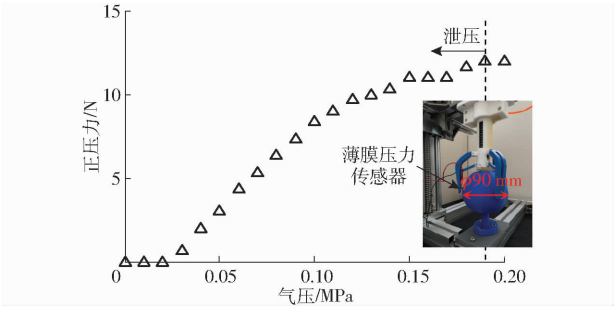

图 12　正压力与气压关系

Fig. 12　Relationship between finger positive pressure and air pressure

抓持力随之不同。经测试，当 Δp 取 0.04 MPa 时，手爪能稳定地抓持横径为 70 ~ 85 mm、质量为 155 ~ 250 g 的苹果，此时测得爪指正压力为最小夹持力，约为 4 N。

表 3　苹果抓取试验参数

Tab. 3　Experiment parameters for apple grasping

序号	横径 d_{max}/mm	质量 m/g	接触压力 p_0/MPa	泄压增量 Δp/MPa	夹持力 F_n/N
1	69.94	154.9	0.120	0.020	2.00
2	74.68	186.2	0.130	0.030	3.00
3	75.08	194.6	0.132	0.037	3.67
4	75.73	179.6	0.132	0.038	3.67
5	77.57	202.8	0.132	0.040	3.67
6	79.30	208.0	0.135	0.035	2.50
7	79.85	202.3	0.140	0.040	4.00
8	80.28	216.8	0.136	0.036	4.00
9	82.77	242.8	0.133	0.040	3.87
10	85.30	249.2	0.175	0.033	3.66

(2)扭矩与拉力

在苹果采收过程中，手爪抓紧苹果后通过机械臂旋转带动手爪扭断果梗分离苹果，此过程要求手爪与苹果表面接触产生的扭矩 M 和拉力 F_L 满足：$f = M_{max}/r > F_d$，且 $F_L > G$，式中 f 为最大静摩擦力，r 为苹果模型半径。

将打印苹果模型固定在六维力传感器上，通过扭转和拉动手爪(图 13)，获得手爪当前气压(0.02 MPa)下最大扭矩和拉力分别为 0.55 N·m 和 6 N。经计算得最大静摩擦力 f 为 12.2 N，大于果梗扭断力 F_d，F_d 为 2 ~ 5 N[22]，同时可抓持约 600 g 苹果，满足目标苹果采摘需求。

3.2　采摘测试试验

图 14 为苹果采摘测试平台，由六自由度机械臂的地面移动平台、力测量系统和运动捕捉系统组成。力测试系统包括薄膜压力传感器和六维力传感器，苹果固定在六维力传感器(SRI－M3703B 型)下方，苹果和手爪上分别装有标记点。采摘手安装于机械臂上，待抓紧球果后通过机械臂带动手爪旋扭推拉完成采摘测试。通过安装在手指内侧的薄膜压力传感器、六维力传感器和三维运动捕捉系统(NDI Optotrak Certus)，同步测试试验条件下苹果采摘过程力、力矩与位移全程变化。

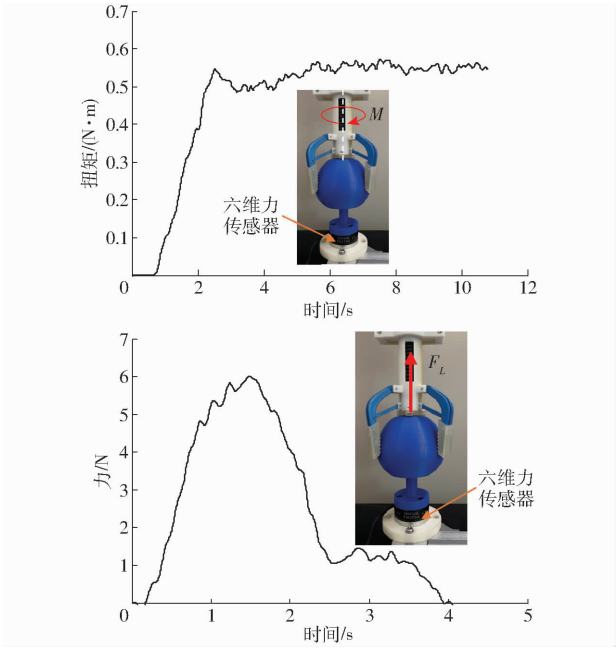

图 13　扭矩与拉力测试

Fig. 13　Torque and tensile test of apple-picker

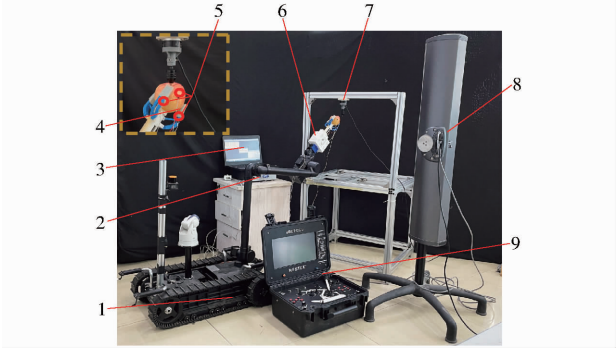

图 14　采摘测试平台

Fig. 14　Picking test platform for apple-picker

1. 六自由度机械臂移动平台　2. 中央控制单元　3. 计算机　4. 薄膜压力传感器　5. 标记点　6. 采摘手系统　7. 六维力传感器　8. 3D 运动捕捉系统　9. 移动平台控制器

苹果果梗通过连接件连接于六维力传感器上，其果梗扭断力远大于实际采摘中传输苹果与树枝分离时的力，为此测试中采用先扭后推拉方式分离苹果(图 15a)，从手爪抓紧球果至分离球果，曲线分为 AB、BC、CD 3 段，分别对应抓握球果时间段、分离果梗时间段、保持抓握时间段(图 15b)。

在试验过程中，手指正压力、苹果所受合力及扭矩都出现突变点(图 15a)，分别在点 a、点 b 和点 c，由苹果受合力和力矩变化可见，苹果脱离传感器瞬间产生较大冲击(约 23 N)，由薄膜压力传感器测得

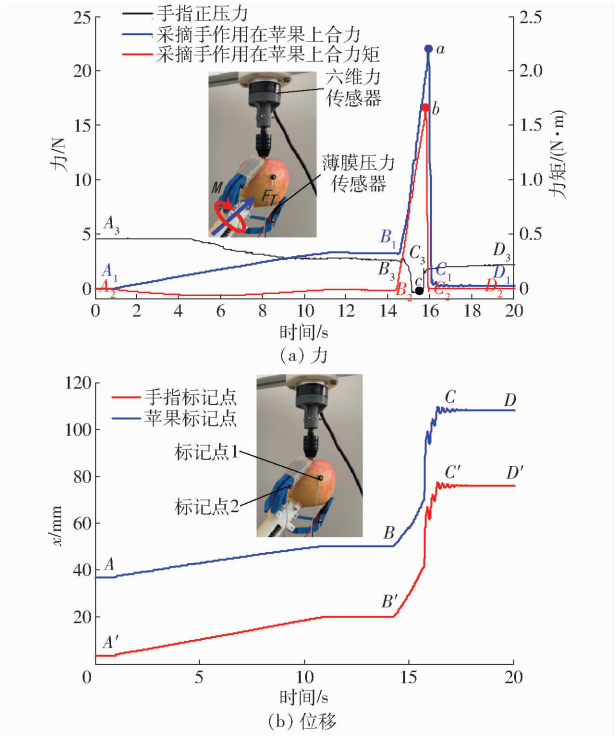

图 15 模拟采摘力测试与位移响应

Fig. 15 Force testing and displacement response during simulated picking

外侧手指正压力受冲击下降后迅速恢复。在该冲击下，*BC* 时间段内苹果和手爪皆产生剧烈晃动(图 15b)，经对比苹果分离前后手爪与苹果的相对位置没有明显变化，即手爪与苹果间未发生明显相对滑移，表明即使受到大冲击(苹果从树枝分离瞬间)整个采摘过程中手爪仍可以稳定抓持苹果，验证了该采摘系统的可行性，但实验室条件与实际采摘环境存在一定差异，尤其是采摘系统实地采摘性能、复杂采摘环境适应性及采摘流程的合理性等，还需要在苹果果园中进行实地采摘试验验证。

3.3 果园采摘试验

图 16 为采摘试验现场，果园实地采摘试验地点位于吉林市东北部山区的“秀色苹果采摘园”，现场采摘条件为新平 4 号苹果，果径为 70 ~ 90 mm、果质量为 190 ~ 260 g、果树高为 2 ~ 3 m、冠径为 1.5 ~ 2 m、果树间距为 2 ~ 4 m、枝组间距为 30 ~ 40 cm、果实数 7 ~ 12 个/枝。试验中使用一台履带式地面移动机器人(HRSTEK - SARM 型)，单驱动采摘手安装在六自由度机械臂前端。操作人员通过控制器操作履带式地面移动机器人和采摘手，由机械臂上安装的摄像头捕捉苹果并实现采摘。

在试验过程中，直接牵拉拉断果梗过程实施困难，尤其面向未成熟球果时，手爪未能提供足够大的牵拉力，拉扯过程中造成球果滑落，此类方式采摘成

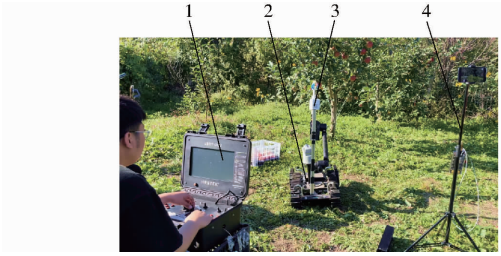

图 16 采摘作业场景

Fig. 16 Picking operation scenario

1. 移动平台控制器 2. 六自由度机械臂移动平台 3. 采摘手 4. 摄像机

功率低；借助手掌向前推拉拉断果梗，虽弥补手爪牵拉力不足较易实现果梗分离，但大的拉扯力损坏了树枝，此类方式球果损伤程度高。旋扭分离果梗方式较牵拉分离方式更为有效，但从苹果底部抓取扭断分离球果，需要连续旋扭(3 ~ 5 圈)且要求手爪握姿准确。试验中受所采用的机器臂腕部转动限制(±360°)，采摘过程中果梗未完全分离，牵拉时球果易脱出手爪，或致使抓持不充分，在移动过程中导致球果滑落(图 17)，该采摘方式虽易于采摘但效率和成功率低，且果梗从苹果根部分离，破伤苹果表层后不易保存。



(a) 抓持不充分 (b) 苹果滑落

图 17 球果抓取失败

Fig. 17 Scenario of failed grabbing

从侧向抓取球果，旋扭同时向前轻轻推拉，此方式无需准确抓握球果，且腕部仅需要较小的旋转角度即可分离果梗，采摘效率和成功率较高，试验中苹果摘取主要采用该方式，采摘手侧向抓握球果成功分离果梗实例见图 18。



(a) ϕ77 mm (b) ϕ79 mm (c) ϕ83 mm

图 18 采摘手侧向抓握不同直径的苹果

Fig. 18 Picker grasps apples sideways

采摘试验过程见图 19，由识别到完成放置共分为 8 步，首先通过机械臂上视觉传感单元识别捕捉球果位置(图 19a)，操控地面移动机器人接近目标球果(图 19b)；展开机械臂使球果位于采摘范围(图 19c)，调控气泵施加气压驱动手爪张开并包裹

球果(图 19d 和图 19e)，当掌垫传感器辨别与球果接触后，手爪闭合抓住球果；通过机械臂回转扭断果梗(图 19f)，手爪继续保持抓握姿态直至放置球果(图 19g 和图 19h)。



图 19　苹果采摘过程

Fig. 19　Picking process

试验采用侧向抓握球果快速抓取模式，在可到达工作空间内共摘取 53 个苹果样本，横径分布为 77 ~ 87 mm，质量为 195 ~ 260 g，其中成功 45 次，失败 8 次，成功率为 84.9%。

由采摘试验结果可知，球果采摘失败的原因主要有：苹果过于密集，紧密相邻的球果，手指无法穿过两者的缝隙，对于苹果手爪无法形成有效包裹；枝干遮挡，采摘过程中果树枝条细小的分支常卡在手爪与苹果之间，甚至手指卡在枝杈上阻碍抓取；未能完全分离果梗，果实不成熟，手爪未提供足够扭矩扭断果梗，无法牵拉分离，导致水果从手爪中滑落；特殊苹果外形影响，某些苹果扁平或带有棱状凸起，至使手爪夹持力分布不均。

采摘完的球果，经 7 d 的放置和观察，仅少数苹果表面和内部发现褐变现象。该系统抓住球果时间为 2 s，配合移动平台完成球果采摘平均用时 24 s，采收全过程用时约 90 s，不包括接近球果和放置球果过程。现场采摘试验表明，设计的采摘系统，满足苹果摘取需求，手爪采用侧向抓取旋钮向前方式在摘取过程中能提供足够的力和扭矩将苹果从树枝上分离，且抓持平稳不损伤苹果，满足复杂果园环境下采摘需求。

4　结论

(1)基于外骨骼式线性气动驱动器，设计了一种集成传感的单驱动无缆式气动三指苹果采摘手，长为 270 mm，质量为 861 g，工作压力为 0.2 MPa，负载能力为 600 g，可采摘最大横径为 60 ~ 97 mm 的苹果。

(2)设计了线性柔性驱动器并建立了其伸长变形、驱动力与牵拉力模型，获得了气压下驱动器的变形和力学特性，并进行试验验证。结果表明，在设定工作气压下，驱动器变形和力可控，满足采摘手设计要求。

(3)建立了采摘手运动学模型和抓持力模型并进行了采摘手性能试验，获得了手爪采摘范围、开合速度和抓持力特性。结果表明，通过驱动器充泄气可快速完成手爪释放和抓握，通过调节泄压增量可有效控制手爪抓持力实现苹果无损采摘。

(4)搭建了苹果采摘试验平台，并在试验环境下测试了果梗分离瞬间的手爪与苹果间的力与位移响应，测试结果验证了该采摘系统在采摘过程中的稳定性。

(5)基于履带式地面移动机器人，开展了现场采摘试验。抓取了横径分布为 77 ~ 87 mm 的苹果，最大抓取球果质量为 260 g，成功率为 84.9%。结果表明，所设计的采摘手系统可完成复杂果园环境下苹果采摘。

(6)设计的采摘手虽然抓握速度快，但配合地面移动平台和机械臂采摘效率低，摘取平均采摘用时为 24 s，采收全过程用时约 90 s。现场试验场景中通过机械臂上摄像头定位球果，由操作员人为操控机械臂捕捉和摘取球果方式效率和准确率低，需要提升该系统的采摘效率。

参　考　文　献

[1]　陈青，殷程凯，郭自良，等. 苹果采摘机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. 农业工程学报，2023，39(4)：1 - 15.
CHEN Qing, YIN Chengkai, GUO Ziliang, et al. Current status and future development of the key technologies for apple

picking robots[J]. Transactions of the CSAE,2023,39(4):1 – 15. (in Chinese)
[2] ZHANG Xin, KARKEE M, ZHANG Qin,et al. Computer vision-based tree trunk and branch identification and shaking points detection in dense-foliage canopy for automated harvesting of apples[J]. Journal of Field Robotics, 2021,38(3):476 – 493.
[3] 冯青春, 赵春江, 李涛, 等. 苹果四臂采摘机器人系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(13):25 – 33.
FENG Qingchun, ZHAO Chunjiang, LI Tao, et al. Design and test of a four-arm apple harvesting robot[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(13):25 – 33. (in Chinese)
[4] 尚书旗, 李成鹏, 何晓宁, 等.高酸苹果振动式采摘机设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(3):115 – 125,168.
SHANG Shuqi, LI Chengpeng, HE Xiaoning, et al. Design and experiment of high-acid apple vibrating picker[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(3):115 – 125,168. (in Chinese)
[5] 刘继展, 江应星. 农业采摘机器人产业化进程分析与多臂高速化技术走向[J].农业机械学报,2024,55(10):1 – 17.
LIU Jizhan, JIANG Yingxing. Industrialization trends and multi-arm technology direction of harvesting robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(10):1 – 17. (in Chinese)
[6] 庄煜,王海涛,王金峰,等.光固化果蔬采摘气动软体抓手设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(9):65 – 73.
ZHUANG Yu, WANG Haitao, WANG Jinfeng, et al. Design and experiment of pneumatic soft claw for SLA fruit and vegetable picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(9):65 – 73. (in Chinese)
[7] ERIC B,NICHOLAS R,JOHN A,et al. Universal robotic gripper based on the jamming of granular material[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of American, 2010, 107(44): 18809 – 18814.
[8] 郑晓峰, 俞甬波, 陈金龙, 等. 可适应性苹果辅助采摘装置研制[J]. 农业工程, 2020, 10(3): 96 – 100.
ZHENG Xiaofeng,YU Yongbo,CHEN Jinlong,et al. Development of adaptive apple assisted picking device[J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(3): 96 – 100. (in Chinese)
[9] 秦欢欢,赖虹妃, 刘坤, 等.面向球果抓取的主动式手爪设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(7):67 – 74.
QIN Huanhuan, LAI Hongfei, LIU Kun, et al. Design and experiment of active gripper for spherical fruit grasping[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(7):67 – 74. (in Chinese)
[10] 刘晓敏,田德宝,宋懋征, 等.气动球果采摘柔性手爪设计与实验[J].农业机械学报,2021,52(2):30 – 43.
LIU Xiaomin, TIAN Debao, SONG Maozheng, et al. Design and experiment on pneumatic flexible gripper for picking globose fruit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(2):30 – 43. (in Chinese)
[11] 史帅旗,杨福增,刘志杰, 等. 复合气动式苹果采摘手设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(10):93 – 105.
SHI Shuaiqi, YANG Fuzeng, LIU Zhijie, et al. Design and experiment of composite pneumatic apple picking manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(10):93 – 105. (in Chinese)
[12] 刘继展, 白欣欣, 李萍萍, 等.果实快速夹持复合碰撞模型研究[J]. 农业机械学报,2014,45(4):49 – 54.
LIU Jizhan,BAI Xinxin,LI Pingping,et al. Complex collision model in high-speed gripping of fruit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(4):49 – 54. (in Chinese)
[13] 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 gripping robots: a review[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(19): 28 – 42. (in Chinese)
[14] PI J, LIU J, ZHOU K, et al. An octopus-inspired bionic flexible gripper for apple grasping[J]. Agriculture, 2021, 11(10): 1014.
[15] 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)
[16] 于丰华,周传琦,杨鑫, 等.日光温室番茄采摘机器人设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(1):41 – 49.
YU Fenghua, ZHOU Chuanqi, YANG Xin, et al. Design and experiment of tomato picking robot in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(1):41 – 49. (in Chinese)
[17] 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)
[18] 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)
[19] 朱银龙,赵虎,苏海军,等.四指软体机械手机械特性分析与抓取试验[J].农业机械学报,2022,53(9):434 – 442.
ZHU Yinlong, ZHAO Hu, SU Haijun, et al. Mechanical performance analysis and grasping experiment for four-finger soft manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(9):434 – 442. (in Chinese)
[20] 赵云伟,耿德旭,刘晓敏,等.三自由度气动柔性驱动器结构功能与形变特性研究[J].农业机械学报,2017,48(9):392 – 401.
ZHAO Yunwei, GENG Dexu, LIU Xiaomin, et al. Structure and deformation characteristics of 3-DOF pneumatic flexible actuator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(9):392 – 401. (in Chinese)
[21] 杨庆华,金寅德,钱少明,等. 基于气动柔性驱动器的苹果采摘末端执行器研究[J]. 农业机械学报,2010,41(9):154 – 158.
YANG Qinghua, JIN Yinde, QIAN Shaoming,et al. Research on end-effector of apple picking based on new flexible pneumatic actuator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(9):154 – 158. (in Chinese)
[22] 邓小雷,罗忠祎,庞景权,等. 仿生无损吸取式苹果采摘装置的设计与试验[J]. 中国农业大学学报,2019,24(10):100 – 108.
DENG Xiaolei, LUO Zhongyi, PANG Jingquan,et al. Design and experiment of bionic nondestructive handheld suction apple picker[J]. Journal of China Agricultural University,2019,24(10):100 – 108. (in Chinese)