

折断分离式菠萝采摘末端执行器设计与试验

俞亚新 王 强 潘一隆 周俊伟

(浙江理工大学机械工程学院, 杭州 310018)

摘要: 根据菠萝果实和茎秆结合处存在截面突变的生物学特征,设计了一种仿人工掰折采摘方式的折断分离式末端执行器,关键部件包括直线导向套和曲线导向套2部分。基于菠萝果-茎断裂原理进行力学特性试验,结果表明,最大折断转矩、最大折断角度和临界损伤力分别为 $3.64 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、 67.4° 和 178.72 N 。建立菠萝夹持机构运动学模型,以传力比大于等于 1.25 和尺寸紧凑为约束目标,得到直线导向套中直线导轨长度为 60 mm 和各连杆尺寸;基于静力学分析得到曲线导向套中曲线导轨螺旋角为 45° ,驱动力为 90 N。建立仿真模型,分析菠萝采摘过程植株力学特征,求解夹爪与果实的接触力峰值。试制样机并进行采摘试验,试验结果表明,抓取成功率 100%,采摘成功率 86.7%,验证了末端执行器的可靠性,研究结果可为菠萝机械化采摘提供参考。

关键词: 菠萝采摘; 折断; 直线导轨; 曲线导轨; 末端执行器

中图分类号: S225.99 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)08-0153-08

OSID:



Design and Experiment of Breakaway Separation Type Pineapple Harvesting End-effector

YU Yaxin WANG Qiang PAN Yilong ZHOU Junwei

(School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Based on the geometric features of the pineapple's outer shape, the easy breakage at the calyx joint and the brittleness of the stem biological characteristics, a breakaway separation type end-effector that mimics the manual breaking method of harvesting was designed. The key components of this harvesting device included a linear guide sleeve and a curved guide sleeve. Mechanical property tests based on the principle of pineapple fruit-stem fracture showed that the maximum breaking torque, maximum breaking angle, and critical damage force were $3.64 \text{ N}\cdot\text{m}$, 67.4° and 178.72 N , respectively. A kinematic model of the pineapple clamping mechanism was established, with the goal of achieving a force transmission ratio at least 1.25 and a compact size. Optimizing with Matlab, the length of the linear guide rail in the linear guide sleeve was determined to be 60 mm and the dimensions of each link were obtained. Based on static force analysis, it was found that the driving force magnitude was related to the helix angle of the curved guide rail in the curved guide sleeve. A smaller helix angle resulted in increased overall size and weight, while a larger helix angle caused the thickness of the curved guide sleeve to be less than the diameter of the guide column, making it impossible to break the pineapple. Therefore, the middle value of 45° was chosen as the helix angle, and the driving force was obtained as 90 N. A simulation model was established to analyze the mechanical properties of the pineapple plant during the harvesting process, comparing the peak contact force between the gripper and the fruit with the critical damage force. A prototype was trial-produced and harvesting tests were conducted. The test results showed that the grasping success rate was 100% and the harvesting success rate was 86.7%, which verified the reliability of the end-effector. The research results can provide a reference for the mechanized harvesting of pineapples.

Key words: pineapple harvesting; breakaway; linear guide; curved guide; end-effector

收稿日期: 2024-12-31 修回日期: 2025-01-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51975538)

作者简介: 俞亚新(1974—),女,教授,博士,主要从事农业机械设计与分析研究,E-mail: yyxin@zstu.edu.cn

0 引言

菠萝因其营养丰富特点广受人们喜爱,我国种植面积和产量逐年增加,目前菠萝产量排世界第7位^[1-2]。菠萝收获季节性强,主要依靠人工采摘,由于菠萝果皮坚硬有芒刺,叶片密布锋利锐齿^[3],人工采摘容易伤手,采摘劳动力成本占菠萝整个生产成本的40%^[4]。在劳动力成本逐渐升高的情况下,研制机械化采摘设备对减轻作业强度、降低劳动力成本具有重要意义^[5]。

研究者对菠萝机械化采摘进行了研究,主要包括菠萝的识别^[6-10]、定位^[11-15]和采摘设备的研发^[16-20],目前处于初期阶段^[21]。文献[15]通过全向定位机构获取菠萝图像数据,移动双臂采摘机构至最佳采摘点,末端执行器夹取菠萝并切断果梗,完成菠萝的采摘。文献[16-17]控制夹爪固定菠萝,采用切割装置切断果实与茎秆连接处然后送至收集箱,成功收获菠萝。但菠萝果实底部常伴有托芽,可用于下一轮种植,采用切割方式需要精确定位菠萝果实和茎秆结合位置,否则极易破坏托芽和果实,降低经济性。文献[22]根据果茎断裂机理,设计了试验台,通过调整果实和茎秆夹持点距离,获得不同的果-茎断裂转矩和断裂初始角度,为菠萝果实采摘提供重要的设计依据。

基于菠萝外形特征和果-茎结合处易折断的生物学特性,本文设计一种模拟人工收获方式的折断分离式采摘末端执行器,并对其进行理论分析和试验研究。

1 菠萝力学试验与末端执行器结构

1.1 菠萝力学试验

菠萝力学特性试验包括折断试验和压缩试验。

1.1.1 折断试验

试验选用20棵湛江市徐闻县“巴厘”菠萝植株,菠萝果实外形呈长椭圆形,如图1所示,菠萝果实高 h 为150~170 mm,最大直径 d 为100~120 mm,质量 m 为1.0~1.5 kg。

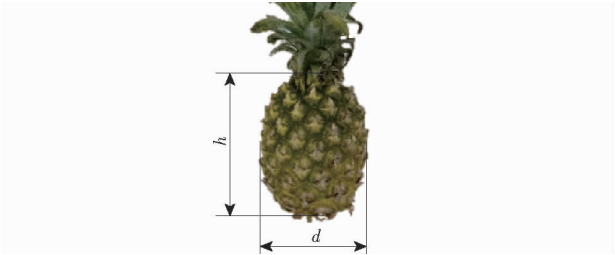


图1 菠萝外形特征
Fig.1 Pineapple external characteristics

人工采摘作业时,先握紧菠萝果实再弯曲折断,使果实与茎秆在连接位置分离^[23]。利用果实与茎秆结合处存在截面突变,在弯曲转矩作用下脆断,实现果茎分离。依据此原理,设计的试验台如图2所示,主要包括推杆、上下夹爪、薄膜式压力传感器,其中上下夹爪具有一定高度差,在推杆运动过程形成转矩折断菠萝,茎秆地面高度为35 cm。试验台用于测试菠萝果-茎分离所需的转矩和角度,为后续结构设计提供数据基础。

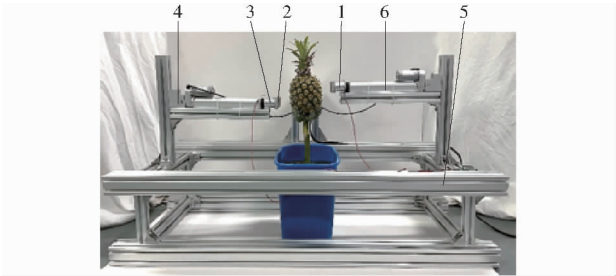


图2 果-茎折断试验台
Fig.2 Fruit - stem break test stand

1. 上夹爪 2. 薄膜式压力传感器 3. 下夹爪 4. 推杆固定座
5. 机架 6. 推杆

试验平台中菠萝受力模型如图3所示, F_I 和 F_{II} 是作用于菠萝果实两侧的压力,具体数值由薄膜式压力传感器测得, F_v 和 M 分别为断裂面上形成的剪力和转矩。

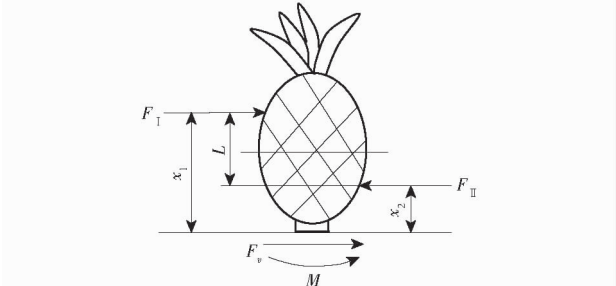


图3 力学模型
Fig.3 Mechanical model

根据图3,以果-茎分离截面建立转矩平衡方程,折断转矩 M 计算式为

$$M = F_I x_1 - F_{II} x_2 \tag{1}$$

式中 x_1, x_2 ——压力作用点与果-茎断裂面距离, mm

图4为菠萝受到转矩前后的状态,根据图4,折断角度 φ 计算式为

$$\varphi = \arctan \frac{H}{L/2} \tag{2}$$

式中 L ——两侧压力作用点之间距离,取70 mm
 H ——推杆伸长量, mm

试验结果如图5所示,折断转矩为2.83~3.64 N·m,折断角度为61.2°~67.4°。

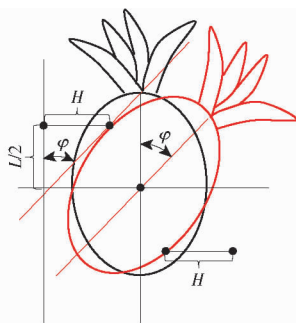


图 4 折断角度 φ
Fig. 4 Breaking angle φ

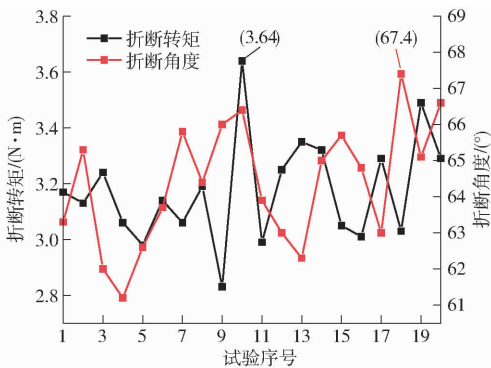


图 5 试验结果统计
Fig. 5 Test results statistics

1.1.2 压力试验

机械化作业下,末端执行器在采摘过程接触力如过大,菠萝果实可能会遭到损伤。因此,为避免果实出现损伤,设计压缩试验,以得到临界损伤压力。

使用 WDW-1000 型万能材料试验机,压缩菠萝果实至溃烂得到压力-位移曲线,如图 6 所示,图中压力突降点为果实溃烂值,该数值下菠萝已不再具有商用价值。为得到临界损伤压力,将溃烂值对应位移均分 5 份,压缩菠萝果实至各等分点位移停止,切开果实观察损坏程度。在切开压缩至第 3 等分点位移的果实时,出现轻微损伤,如图 7 所示,此时临界损伤压力为 178.72 N。

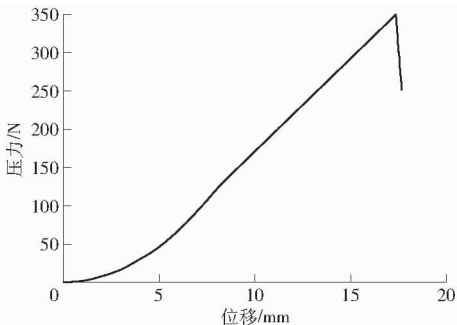


图 6 压力-位移曲线
Fig. 6 Pressure - displacement curve

1.2 末端执行器结构与工作原理

菠萝采摘末端执行器整体结构如图 8 所示,拉伸弹簧设置是为了适应所有直径菠萝。

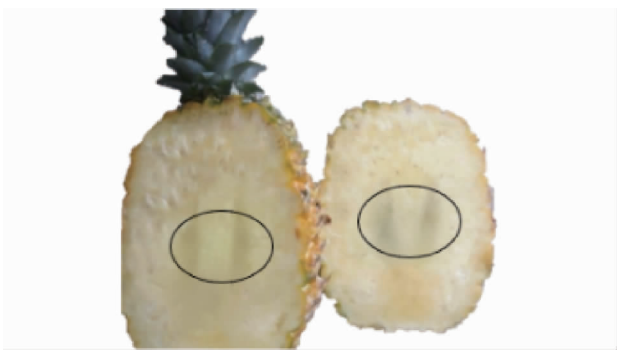


图 7 果肉损伤情况
Fig. 7 Fruit pulp damage

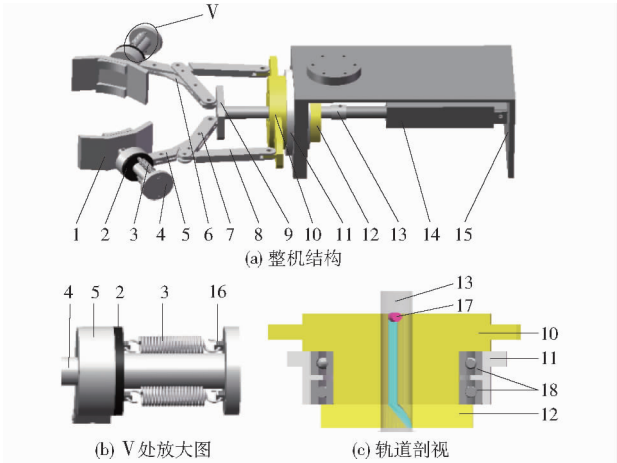


图 8 末端执行器结构

Fig. 8 End-effector structure diagrams

1. 夹爪 2. 法兰 3. 拉伸弹簧 4. 滑杆 5. 连杆Ⅳ 6. 连杆Ⅲ 7. 连杆Ⅱ 8. 连杆Ⅰ 9. 滑块 10. 直线导向套 11. 轴承端盖 12. 曲线导向套 13. 连接轴 14. 推杆 15. 机箱 16. 拉伸弹簧支柱 17. 导向柱 18. 轴承

采摘开始时,末端执行器在果实侧面,初始为张开状态,推杆运动,带动导向柱沿直线导向套(图 9)中的直线导轨运动,与滑块铰接的连杆Ⅱ转动带动连杆Ⅰ、Ⅲ、Ⅳ转动,夹爪闭合进行夹持;推杆继续运动,导向柱沿曲线导向套(图 10)中的曲线导轨运动,曲线导向套带动直线导向套旋转,与直线导向套铰接的连杆Ⅰ旋转,带动连杆Ⅱ、滑块、连杆Ⅲ、Ⅳ旋转,夹爪旋转进行折断。

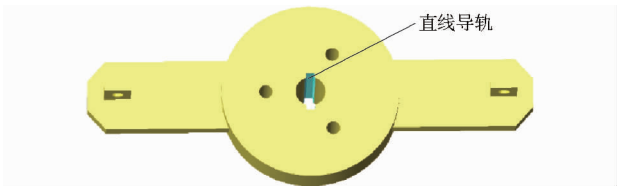


图 9 直线导向套结构
Fig. 9 Structural diagram of linear guide sleeve

由图 9 可知,直线导向套中含有 2 条对称分布的直线导轨。导向柱沿直线导轨运动时,称为夹持阶段,可实现末端执行器对菠萝的夹持。

由图 10 可知,曲线导向套中含有 2 条对称分布

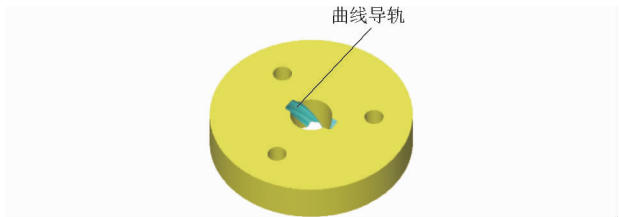


图 10 曲线导向套结构

Fig. 10 Structural diagram of curve guide sleeve

的曲线导轨。导向柱沿曲线导轨运动时,称为折断阶段,可实现末端执行器对菠萝的折断。根据折断角度 φ 设计曲线导轨角度,取整为 70° 。

2 关键部件参数设计

2.1 连杆及直线导轨长度

为得到各连杆尺寸和直线导轨长度,对夹持阶段进行运动学和静力学分析。运动模型如图 11 所示,受力分析如图 12 所示,传力比为夹持力 F_2 与驱动力 F_1 之比。

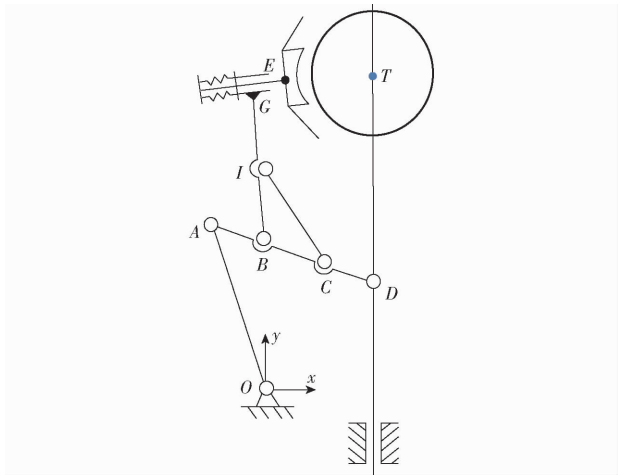


图 11 运动学模型

Fig. 11 Kinematics model

运动学分析是在满足传力比大于等于 1.25 和工作空间小尺寸紧凑的前提下,以夹持阶段结束时杆 BG 与推杆轴线平行为目标,利用刚体导引法和解析法得到各结构尺寸。

由于机构沿推杆对称,取一侧建立其运动学模型进行分析,如图 11 所示。

导向柱沿直线导轨运动结束,此时各杆件受力分析如图 12 所示。由图 12a 可得,在点 O 取矩,可得平衡方程为

$$F_{Dx}l_{PD} + F_2l_{PT} = F_1l_{OP} \tag{3}$$

式中 F_1 ——夹持力,N

F_2 ——驱动力,N

由图 12b 可得,在点 A 取矩,可得平衡方程为

$$F_2l_{QT} = F_1l_{AQ} + F_{Dx}l_{DQ} \tag{4}$$

其中

$$l_{AQ} = l_{AD}\sin\alpha \quad l_{DQ} = l_{AD}\cos\alpha$$

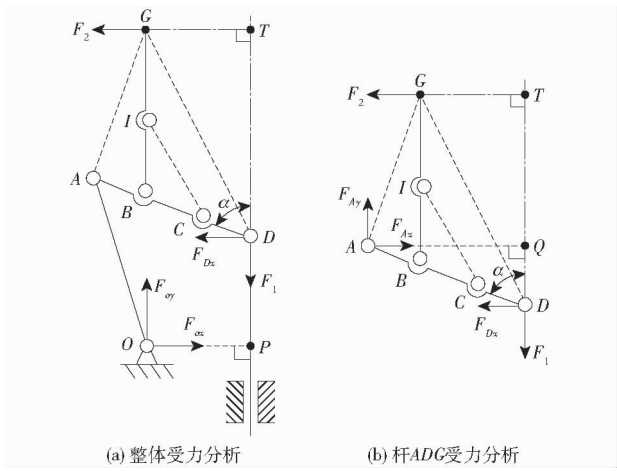


图 12 各杆件受力分析

Fig. 12 Analysis of each bar member

联立式(3)、(4),可得传力比 i 为

$$i = \frac{F_2}{F_1} = \frac{l_{AD}(e\cos\alpha + \lambda\sin\alpha)}{(S + S_0)(l_{AD}\cos\alpha + \lambda)} \tag{5}$$

式中 S ——直线导轨长度

S_0 ——夹持阶段初始张开状态时点 D 与菠萝中心 T 的距离,取 100 mm

e —— PD 长度,mm

λ —— OP 长度,mm

为达到设计目标,首先利用刚体导引算法约束点 A 始末位置,再用解析法分析点 A 各时刻位置,最后使用解析法结合点 D 位置参数得到点 G 位置参数。

刚体导引法分析点 A 位置参数为

$$[A_2 - D_2] = R_{\theta_{12}}[A_1 - D_1] \tag{6}$$

$$\theta_{12} = \alpha_2 - \alpha_1 \tag{7}$$

$$R_{\theta_{12}} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{12} & -\sin\theta_{12} \\ \sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\begin{bmatrix} A_2 \\ 1 \end{bmatrix} = D_{12} \begin{bmatrix} A_1 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$Q_{12} = \begin{bmatrix} R_{\theta_{12}} & D_2 - R_{\theta_{12}}D_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_{12} & -\sin\theta_{12} & D_{2x} - D_{1x}\cos\theta_{12} + D_{1y}\sin\theta_{12} \\ \sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & D_{2y} - D_{1y}\cos\theta_{12} - D_{1x}\sin\theta_{12} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$[A_2 - O]^T[A_2 - O] = [A_1 - O]^T[A_1 - O] \tag{11}$$

式中 $A、D、O$ ——点 $A、D、O$ 坐标矩阵

$R_{\theta_{12}}$ ——旋转矩阵

Q_{12} ——刚体位移矩阵

下角标 1、2 表示夹持阶段导向柱沿直线导轨运动始末的位置,下角标 $x、y$ 表示在坐标 $x、y$ 方向的矩阵。

使用解析法进一步分析点 A 各时刻位置参数，杆 OAD 可看成 II 级杆组如图 13 所示。

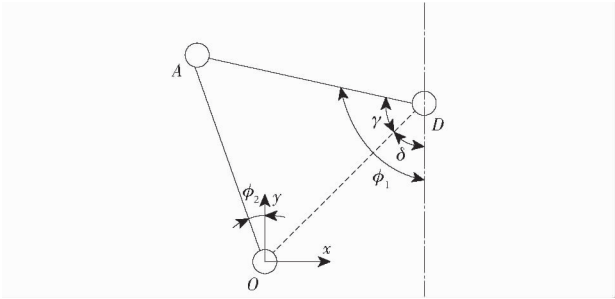


图 13 解析法分析点 A

Fig. 13 Analysis of point A by analytical method

对点 A 进行位移分析,可得

$$\begin{cases} x_A = x_D + l_{AD} \cos \phi_1 \\ y_A = y_D + l_{AD} \sin \phi_1 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \phi_1 = \delta + \gamma \\ \phi_2 = \arctan \frac{x_O - x_A}{y_A - y_O} \end{cases} \quad (13)$$

$$l_{OD} = \sqrt{(x_D - x_O)^2 + (y_D - y_O)^2} \quad (14)$$

$$\delta = \arctan \frac{x_D - x_O}{y_D - y_O} \quad (15)$$

$$\gamma = \arccos \frac{l_{OD}^2 + l_{AD}^2 - l_{OA}^2}{2l_{OD}l_{AD}} \quad (16)$$

点 G 位置参数通过对杆 ADG 分析可得,如图 14 所示。

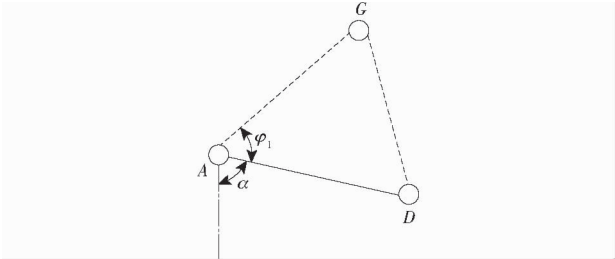


图 14 解析法分析点 G

Fig. 14 Analysis of point G by analytical method

点 G 位移计算式为

$$\begin{cases} x_G = x_D + l_{AG} \cos(\alpha + \varphi_1) \\ y_G = y_D + l_{AG} \sin(\alpha + \varphi_1) \end{cases} \quad (17)$$

由式(5)可知,影响传力比的关键参数有 4 个(e 、 l 、 α 、 S),其中 S 越小,传力比 i 越大,在式(10)刚体位移矩阵有解的前提下对 S 取最小再取整,得到 S 为 60 mm,即直线导轨长度为 60 mm。结合 Matlab 分析其他 3 个参数对传力比的影响,得到参数相互关系曲线如图 15 所示。

由图 15 可知, e 与 i 之间呈线性关系,即 e 越大,传力比 i 越大。由于后续进行转动折断动作的同时推杆还会继续收缩,所以 λ 取最大值 40 mm,此时传力比均大于 1.25,为满足尺寸紧凑要求,选取 e

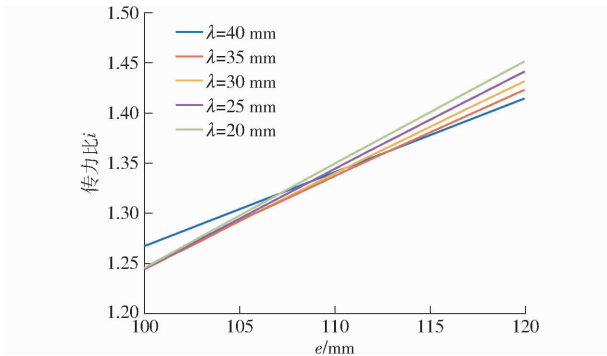


图 15 参数关系曲线

Fig. 15 Parameter relationship curves

最小值为 100 mm。

为使工作空间小,夹持目标时杆 AD 与推杆轴线夹角不宜过大,取行程 S 运动结束时 α_2 为 45° ,以 l_{OA} 小于等于 130 mm 为约束条件对 α_1 进行优化取最小,得到各连杆长取整后如表 1 所示。

表 1 各连杆长度

Tab. 1 Length of each connecting rod mm

连杆	数值	连杆	数值
l_{OA}	127	l_{CD}	51
l_{AD}	122	l_{CI}	86
l_{AB}	23	l_{BG}	90
l_{BC}	48	l_{BI}	45

2.2 驱动力设置

折断阶段所需驱动力大于夹持阶段,为成功使菠萝果实与茎秆分离,对折断阶段进行受力分析,如图 16 所示,计算选取合适的驱动力。

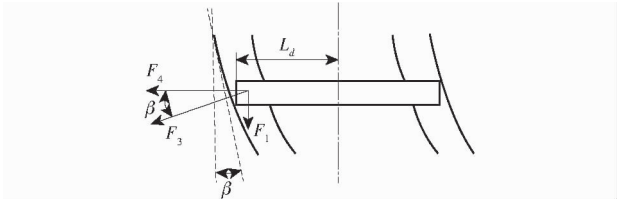


图 16 导向柱沿曲线导轨运动受力分析

Fig. 16 Force analysis of guide column moving along curved guide rail

由图 16 可知, F_4 和 F_1 计算式为

$$F_4 = \frac{M}{2L_d} \quad (18)$$

$$F_1 = F_4 \tan \beta \quad (19)$$

式中 L_d ——旋转半径,mm

F_4 ——曲线导轨对导向柱的支持力 F_3 水平分力,提供折断力,N

β ——曲线导轨螺旋角, ($^\circ$)

由式(19)可知,螺旋角是影响驱动力的关键因素。曲线导向套中曲线导轨的角度为 70° ,螺旋角小,曲线导向套厚度大,导致整体尺寸和重量增大;

螺旋角大,曲线导向套厚度小于导向柱直径,无法折断。所以,螺旋角选取中间值 45°,代入式(19)得到驱动力为 86.67 N,取整为 90 N。

2.3 弹簧刚度

为完善后续仿真参数,需要对拉伸弹簧刚度进行计算。根据《机械设计手册》^[24],通过弹簧刚度可以计算夹持力,分析弹簧弹力与夹持力关系如图 17 所示。

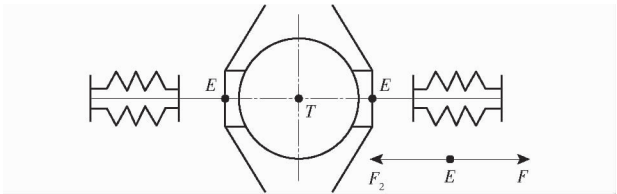


图 17 弹力与夹持力关系

Fig. 17 Relationship between elastic force and clamping force

夹持力 F_2 和弹力 F 计算式为

$$F = F_2 = 2kx \tag{20}$$
$$F_2 = iF_1 \tag{21}$$

式中 x ——工作载荷下弹簧变形量,取 20 mm
当传力比为 1.27 时,经计算得到弹簧刚度为 2.86 N/mm。

3 运动学仿真

采用 Solidworks 进行末端执行器建模,对菠萝植株模型进行柔性化处理,在 ADAMS 中进行仿真分析。根据文献[25]设置菠萝植株的物理及力学特性,菠萝果实与茎秆之间为 Bushing 柔性联结,茎秆与地面之间为固定联结,仿真模型如图 18 所示。

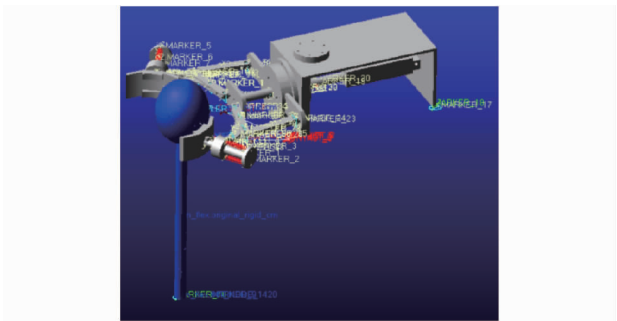


图 18 末端执行器与菠萝植株的仿真模型

Fig. 18 End-effector and pineapple plant simulation model

通过对比菠萝果实与夹爪之间的仿真接触力峰值和压缩试验测得临界损伤压力,验证末端执行器结构设计和理论分析的合理性。菠萝最大直径 d 越大,采摘过程果实接触力越大,所以,选取菠萝最大直径为 120 mm 进行仿真。仿真过程如图 19 所示,图 19a 为末端执行器夹持菠萝,图 19b 为末端执行

器折断菠萝。由图 20 可知,仿真过程接触力峰值为 143 N,小于临界损伤压力。

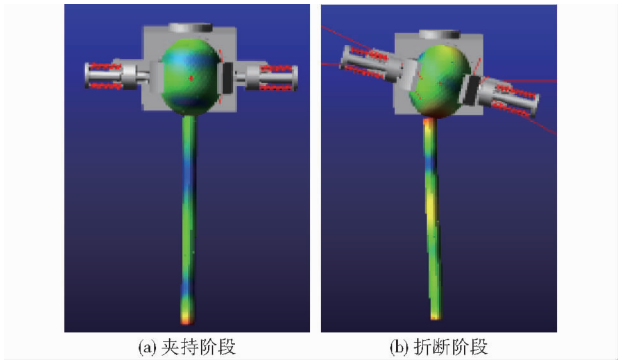


图 19 仿真过程

Fig. 19 Simulation process

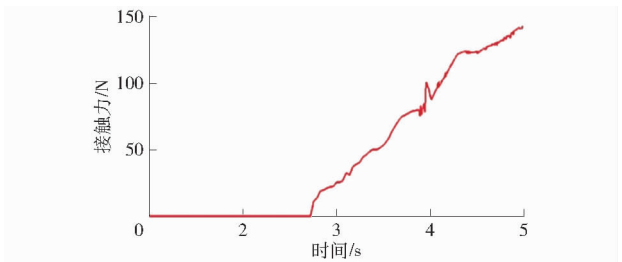


图 20 仿真结果

Fig. 20 Simulation result

4 台架试验

4.1 末端执行器装配与试验

根据理论设计结果,对采摘末端执行器进行加工与装配,并将末端执行器安装于 Delta 机械臂动平台上,如图 21 所示。末端执行器中夹爪粘贴薄膜式压力传感器,测量实际采摘过程果实所受接触力以验证仿真结果。

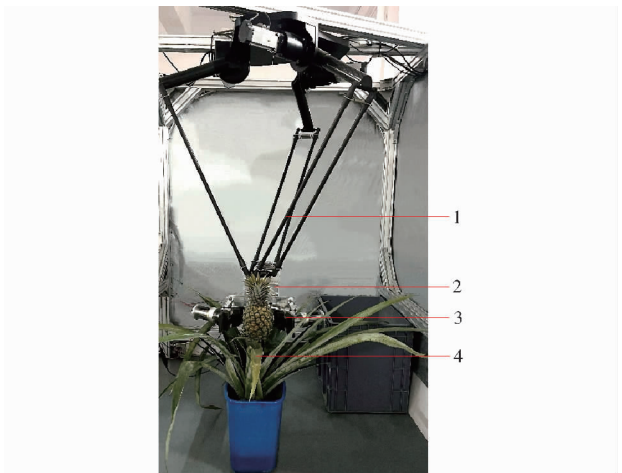


图 21 采摘试验平台

Fig. 21 Harvesting test platform

1. Delta 机械臂 2. 末端执行器 3. 薄膜式压力传感器 4. 菠萝植株

试验共对 30 棵“巴厘”菠萝进行采摘试验,

受条件限制,将菠萝植株移植在花盆中,茎秆地面高度为 35 cm。试验过程如图 22 所示,Delta 机械臂带动末端执行器运动到果实侧方,末端执行器推杆运动,夹爪先夹持菠萝(图 22a),后转动折断菠萝(图 22b),使菠萝果-茎连接处断裂(图 22c)。



图 22 采摘过程
Fig. 22 Harvesting process

4.2 试验结果

菠萝采摘试验成功的标准是果实与茎秆完全分离,且果实无损伤。30 组试验菠萝果实均未见损伤,果实接触力变化曲线如图 23 所示。抓取成功率为 100%,采摘成功率为 86.7%,平均采摘时间为 6 s。由图 23 可知,采摘试验折断时最大接触力为 134.12 N,最小接触力为 106.28 N,折断时平均果实接触力为 116.53 N。试验结果与仿真数据较一致,仿真模型结果可以作为果实实际采摘过程中所受接触力的参考数据。

菠萝折断失败原因是部分菠萝植株茎秆由于脱离土壤时间长而软化,果-茎结合处无法脆断。

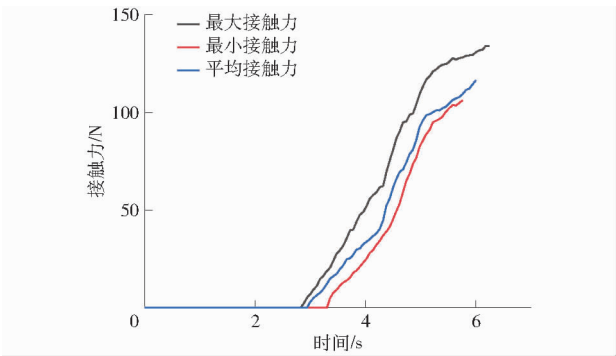


图 23 实际采摘过程接触力曲线
Fig. 23 Actual harvesting process contact force curves

5 结论

(1)根据菠萝植株果-茎结合处易折断、茎秆较脆等生物学特性,提出一种折断分离式菠萝采摘末端执行器。

(2)对结构设计所需重要参数进行试验分析,试验结果表明,菠萝折断转矩最大值为 3.64 N·m;折断角度最大值为 67.4°;临界损伤压力为 178.72 N。

(3)对末端执行器的关键部件及参数进行设置,通过运动学分析得到直线导轨长度为 60 mm 和各连杆长度;通过静力学分析得到驱动力和弹簧刚度分别为 90 N 和 2.86 N/mm。

(4)采摘试验台试验结果表明,末端执行器可以完成采摘作业,采摘装置折断成功率为 86.7%。研究结果可用于指导折断式菠萝采摘机构的开发,为菠萝机械化采摘提供理论基础。

参 考 文 献

[1] 李海亮,孙海天,王宏轩,等. 我国菠萝采收装备研究现状及发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(12): 66-72.
LI Hailiang, SUN Haitian, WANG Hongxuan, et al. Research status and development trend of pineapple harvesting equipment in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(12): 66-72. (in Chinese)

[2] 刘天湖,麦宝锋,张锦舫,等. 链喂入摘辊与柔性杆联合拨断式菠萝采摘装置研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 116-125.
LIU Tianhu, MAI Baofeng, ZHANG Jinchong, et al. Design and experiment of chain feeding combined with roller and flexible rod breaking pineapple picking mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 116-125. (in Chinese)

[3] 刘晓飞,高兴华,魏亚博. 复合连杆式菠萝采摘装置设计及传动分析[J]. 机械传动, 2021, 45(8): 165-169.
LIU Xiaofei, GAO Xinghua, WEI Yabo. Design and transmission analysis of composite linkage pineapple picking device[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2021, 45(8): 165-169. (in Chinese)

[4] 邓祥丰,鄢强,陈代玉,等. 菠萝采摘机械的研究现状与发展趋势[J]. 林业机械与木工设备, 2019, 47(9): 4-8.
DENG Xiangfeng, YAN Qiang, CHEN Daiyu, et al. Research status and development trend of pineapple picking machinery[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2019, 47(9): 4-8. (in Chinese)

[5] LIU T, LIU W, ZENG T, et al. A multi-flexible-fingered rolle pineapple harvesting mechanism[J]. Agriculture, 2022, 12(8): 1175-1194.

[6] 李斌,王海峰,黄文倩,等. 菠萝采收机械低成本双目视觉平台搭建与田间试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊 2): 188-192.
LI Bin, WANG Haifeng, HUANG Wenqian, et al. Construction and in-field experiment of low-cost binocular vision platform for pineapple harvesting robot[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(Supp. 2): 188-192. (in Chinese)

[7] 卫泓宇,李日辉,刘冠灵,等. 一种自动菠萝采收机的设计[J]. 机械制造, 2018, 56(12): 60-64.

- WEI Hongyu, LI Rihui, LIU Guanling, et al. Design of an automatic pineapple harvester[J]. Machinery Manufacturing, 2018, 56(12): 60–64. (in Chinese)
- [8] WANG C, ZHOU J, XU C, et al. A deep object detection method for pineapple fruit and flower recognition in cluttered background[J]. Springer Nature, 2020, 12068: 218–227.
- [9] 张星,高巧明,潘栋,等. 基于改进 YOLO v3 的田间复杂环境下菠萝拾捡识别研究[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(1): 201–206.
- ZHANG Xing, GAO Qiaoming, PAN Dong, et al. Research on pineapple picking and recognition in complex field environment based on improved YOLO v3[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(1): 201–206. (in Chinese)
- [10] LIU T, NIE X, WU J, et al. Pineapple (*Ananas comosus*) fruit detection and localization in natural environment based on binocular stereo vision and improved YOLO v3 model[J]. Precision Agriculture, 2022, 24(1): 139–160.
- [11] 吴沛晟,华京. 菠萝采摘机器人的实用化设计[J]. 兰州工业学院学报, 2016, 23(3): 58–61.
- WU Peisheng, HUA Jing. Practical design of pineapple picking robot[J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2016, 23(3): 58–61. (in Chinese)
- [12] 秦雁飞. 基于双目视觉及深度学习的采摘机器人目标检测及定位技术研究[D]. 北京:北京交通大学, 2019.
- QIN Yanfei. Research on target detection and localization technology of picking robot based on binocular vision and deep learning[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [13] 何东健,张连兆,李响,等. 基于双目机器视觉的菠萝自动采收机设计[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(13): 207–210.
- HE Dongjian, ZHANG Lianzhao, LI Xiang, et al. Design of pineapple automatic harvester based on binocular machine vision [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(13): 207–210. (in Chinese)
- [14] 刘天湖,张迪,郑琰,等. 基于改进 RRT* 算法的菠萝采收机导航路径规划[J]. 农业工程学报, 2022, 38(23): 20–28.
- LIU Tianhu, ZHANG Di, ZHENG Yan, et al. Navigation path planning of pineapple harvester based on improved RRT* algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(23): 20–28. (in Chinese)
- [15] 李明,黎泽龙,王润涛,等. 菠萝全向定位自动化采摘系统设计[J]. 南方农机, 2023, 54(19): 45–48.
- LI Ming, LI Zelong, WANG Runtao, et al. Design of pineapple omnidirectional positioning automatic picking system[J]. South China Agricultural Machinery, 2023, 54(19): 45–48. (in Chinese)
- [16] 李道义,陈雷,尚小龙,等. 菠萝采摘机械手结构设计[J]. 农业工程, 2019, 9(2): 1–5.
- LI Daoyi, CHEN Lei, SHANG Xiaolong, et al. Structural design of pineapple picking manipulator [J]. Agricultural Engineering, 2019, 9(2): 1–5. (in Chinese)
- [17] 姜涛,郭安福,程学斌,等. 菠萝自动采摘收集机结构设计与分析[J]. 工程设计学报, 2019, 26(5): 577–586.
- JIANG Tao, GUO Anfu, CHENG Xuebin, et al. Structural design and analysis of automatic pineapple picking and collecting machine[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2019, 26(5): 577–586. (in Chinese)
- [18] 王月,王建港,齐绪平,等. 菠萝采摘装置手持切力机构动力学分析[J]. 机械设计, 2020, 37(1): 72–76.
- WANG Yue, WANG Jian'gang, QI Xuping, et al. Dynamic analysis of hand-held shear mechanism of pineapple picking device [J]. Mechanical Design, 2020, 37(1): 72–76. (in Chinese)
- [19] 马兴灶,连海山,弓满锋,等. 菠萝采摘机械手结构与试验[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2020, 51(4): 727–732.
- MA Xingzao, LIAN Haishan, GONG Manfeng, et al. Structural design and test of pineapple picking manipulator[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2020, 51(4): 727–732. (in Chinese)
- [20] KURBAH F, MARWEIN S, MARNGAR T, et al. Design and development of the pineapple harvesting robotic gripper[J]. Communication and Control for Robotic Systems, Smart Innovation, Systems and Technologies, 2022, 229:437–454.
- [21] BHAT K, CHAYALAKSHMI C L. Microcontroller-based semiautomated pineapple harvesting system [C] // International Conference on Mobile Computing and Sustainable Informatics, 2020: 383–392.
- [22] LI M, HE L, YUE D, et al. Fracture mechanism and separation conditions of pineapple fruit-stem and calibration of physical characteristic parameters[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2023, 16(5): 248–259.
- [23] 小江荒野世界. 第 16 集:梦玲挑着箩筐上了山,来到种植菠萝的田地里采摘菠萝[EB/OL]. 2024–11–17. <https://haokan.baidu.com/v?pd=wisenatural&vid=5122190079843499358>.
- [24] 闻邦椿. 机械设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,2017.
- [25] 刘天湖,程一丰,李加仪,等. 拨杆喂入式菠萝采收机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(19): 27–38.
- LIU Tianhu, CHENG Yifeng, LI Jiayi, et al. Design and test of lever-fed pineapple harvesting mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(19): 27–38. (in Chinese)