

链喂入摘辊与柔性杆联合拨断式菠萝采摘装置研究

刘天湖¹ 麦宝锋¹ 张锦翀¹ 刘舒阳² 陈嘉鹏¹ 孙伟龙¹

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 华南农业大学农学院, 广州 510642)

摘要: 针对菠萝采摘机械化程度不高的问题,设计了一种链喂入摘辊与柔性杆联合拨断式菠萝采摘装置。分析了影响该装置采摘效率的因素:摘辊长度、安装高度、间隙、半径和角速度。通过力学分析推断出该采摘装置工作时菠萝果实与茎秆分离模式为折断。为提高折断成功率,在摘辊上方安装一排旋转的柔性杆,并对柔性杆半径和角速度进行计算。该装置最佳参数组合为:摘辊高度 200 mm、机具前进速度 0.6 m/s、摘辊半径和角速度分别为 35 mm 和 12 rad/s、柔性杆半径和角速度分别为 20 mm 和 10 rad/s,在该参数组合下,试制样机并进行了田间试验,结果为菠萝采摘率为 82%,损伤率为 34.14%,综合评价指标为 77.16%。

关键词: 拨断式菠萝采摘机; 摘辊; 柔性杆

中图分类号: S225.99

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)10-0116-10

OSID:



Design and Experiment of Chain Feeding Combined with Roller and Flexible Rod Breaking Pineapple Picking Mechanism

LIU Tianhu¹ MAI Baofeng¹ ZHANG Jinchong¹ LIU Shuyang² CHEN Jiapeng¹ SUN Weilong¹

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. College of Agronomy, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to promote the mechanization level of pineapple harvesting and improve its efficiency, a pineapple picking mechanism was designed. The mechanism fed fruit by using a chain feeding, removed fruit by using a pair of rollers and a rotational cylinder which had several flexible rods mounted on the cylindrical surface. Firstly, guiding mechanism was a pair of chain mechanisms with chain claws. Several key parameters that affected the picking efficiency of this mechanism, including the radius, length, mounting height, rotational speed of that pair of horizontal rollers, rational gap value between that pair of rollers were analyzed, and their computing methods were put forward. The radius calculation method of those flexible rods which were mounted on the rotational cylinder was purposed by using a pseudo-rigid body theory, and a suitable range of the rotational speed of those flexibles rod was determined. An experimental machine was designed and manufactured to test feasibility of the harvesting mechanism. That experimental machine consisted of a tractor, a diesel engine, and a harvesting mechanism. The field experiment results showed that the optimal parameter combination for this mechanism was that the forward speed was 0.6 m/s, the radius, installation height and rotational speed of the horizontal roller was 35 mm, 200 mm and 12 rad/s, respectively, and the radius and rotational speed of the flexible rod was 20 mm and 10 rad/s, respectively. Under the optimal parameter combination, the harvesting rate, damage rate and comprehensive evaluation index was 82%, 34.14%, and 77.16%, respectively. The average harvesting time request for each pineapple was less than 1 s. In addition, those pineapple plants after harvesting could maintain good growing condition. The research results indicated that this harvesting mechanism could achieve the goal of rapid picking of pineapple fruits, which can provide a solution for the mechanization of pineapple picking.

Key words: breaking type pineapple picker; horizontal roll; flexible rod

收稿日期: 2024-05-20 修回日期: 2024-07-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(52175229)和广东省农业科技创新十大主攻方向“揭榜挂帅”项目(2022SDZG03)

作者简介: 刘天湖(1974—),男,教授,博士,主要从事水果机械化和采摘机器人研究,E-mail: liuparalake@scau.edu.cn

0 引言

菠萝是世界产量较大的热带水果^[1],我国菠萝产量排名第 7 位,年产量超过 1.8×10^6 t,在广东省菠萝栽培面积大而集中,且为大田种植模式,为机械化生产创造了条件。但国内的菠萝种植行业均以人工作业为主^[2],采收环节的劳动力成本占菠萝生产成本 35% 以上^[3]。机械化采摘是提高果农收益的重要手段^[4-5]。

国内外许多学者对菠萝采摘机械化进行了研究,包括半自动式菠萝采摘机械、采摘机器人、田间转运装备、外骨骼等。其中田间转运装备运用比较多,主要是输送装置和高床运输车^[6]。国外的研究主要包括菠萝采摘机器人和机械化采收设备。如 ANH 等^[7]设计的菠萝采摘机器人,单个菠萝采收时间约为 12 s。但现有的菠萝采摘机器人在成本、速度方面与人工相比缺乏竞争力。文献[7-9]提出的菠萝收获机械单株收获时间在 1 s 左右,采收速度比人工作业快。为了进一步提高采收速度,本文提出一种链喂入摘辊与柔性杆联合拨断式菠萝采摘装置。

1 菠萝植株物理与力学特性

采摘装置作业时,摘辊部分对菠萝茎秆施加压力和摩擦力,使花萼与茎秆连接处断裂、分离,因此需要测量菠萝花萼处拉断力、茎秆压缩力和摩擦因数,为后续采收装置设计和采摘力学分析提供依据。

1.1 菠萝花萼处拉断力

菠萝成熟度分为 5 个阶段,分别为 C0、C1、C2、C3、C4,C0 阶段表皮无黄色,C1 阶段表皮包含 0 ~ 25% 黄色,成熟度以 25% 表皮黄色依次递增,C4 阶段表皮包含 75% ~ 100% 黄色^[10]。文献[8]测量了菠萝植株的物理特性和菠萝花萼处脱落层的力学特性,结合文献中的数据与测量所得,得出菠萝植株的种植数据如表 1 所示。在 C1 期,菠萝萼片的脱落层破断所需的最大扭矩为 4.96 N·m。对菠萝花萼处的拉断力进行了测试。从广东省中山市神湾镇菠萝种植园随机挑选 50 株 C1 ~ C2 期菠萝,使用保鲜膜包裹果实,在运输过程中减少花萼处脱落层横向受力,并且所有试验均在室温 20 ~ 25℃ 下同一天进行,在试验前对所有果实进行了标记。该试验在精度为 $\pm 0.5\%$ 、分辨率为 1/500 000 的微机控制电子万能试验机(JK-100KE 型,广州市广材试验仪器有限公司)上进行。菠萝植株竖直放入试验机中,菠萝果实和茎秆末端分别固定,为使菠萝从花萼处断裂,

两端固定点之间距离大于 200 mm。试验过程采用量程 500 N 的力传感器,加载速率为 20 mm/min。

表 1 菠萝尺寸数据

Tab.1 Size data of pineapple mm					
参数	株距	果实直径	果实高度	茎秆直径	茎秆长度
数值	294 ~ 376	80 ~ 121	124 ~ 162	15 ~ 26	195 ~ 332
平均值	350	105	136	22	254

通过测量可知,当加载在菠萝上的垂直力达到 320 ~ 360 N 时,菠萝花萼处发生断裂,而最大拉断力为 366 N,平均拉断力为 334 N,图 1 为典型力-变形量曲线。

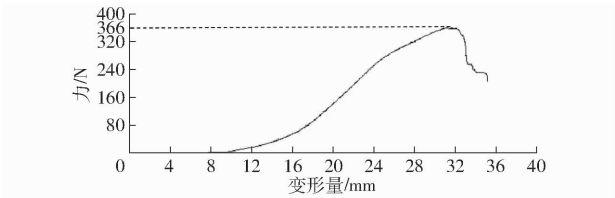


图 1 菠萝拉断力典型力-变形量曲线
Fig.1 Typical force - deformation curve of pineapple breaking force

1.2 茎秆压缩力测试

由于本文的采收装置采用卧辊式进行采收,在采收过程中摘辊会对茎秆进行挤压拉扯,故需要对菠萝茎秆进行压缩力测试。采用同一批的菠萝植株,随机挑选 40 根茎秆,每根茎秆选取其中一段将其切下来,为确保压头能够覆盖茎秆,每一段长度在 20 ~ 30 mm 之间,并进行随机分组,每一组 10 根,图 2 为压缩试验方法示意图和其中一组样品试验前后的图例。试验后茎秆中央均出现裂缝,表面渗出汁液。

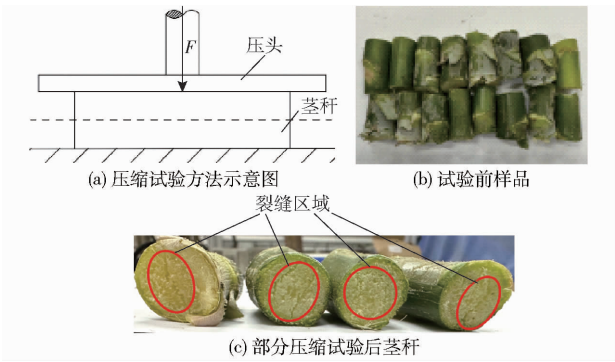


图 2 茎秆处理效果图与压缩试验模型
Fig.2 Stem treatment effect diagram and pressure test model

通过观察力-变形量曲线(图 3)来获得菠萝植株茎秆力学特性。当压力加载至 210 ~ 260 N,压缩进给量为茎秆直径的 1/3 时,菠萝茎秆发生明显的轴向脆性断裂,40 组样品测试所得最大压力为 260 N,平均压力为 225 N。

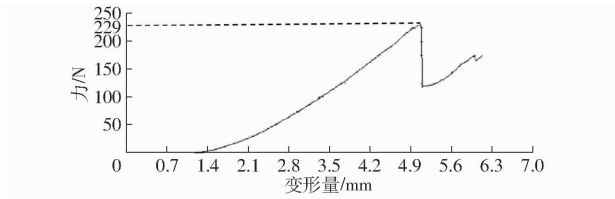


图 3 茎秆压缩典型力-变形量曲线

Fig.3 Stem compression – deformation curve stem processing effect

1.3 摩擦因数测试

在采摘过程中,菠萝果实、菠萝茎秆与摘辊持续接触、摩擦,因此需要测量果实-摘辊表面和茎秆-摘辊表面的滑动摩擦因数。

本文采用斜面法测量摩擦因数,如图 4 所示。斜面倾斜角度采用数显角度仪(上海凡苡工具有限公司)进行测量。为准确测出果实与铸铁的滑动摩擦因数,试验时将两个果实捆绑在一起以阻止其滚动。测量试验结果为茎秆与铸铁的摩擦因数为 0.39,果实与铸铁的摩擦因数为 0.43。

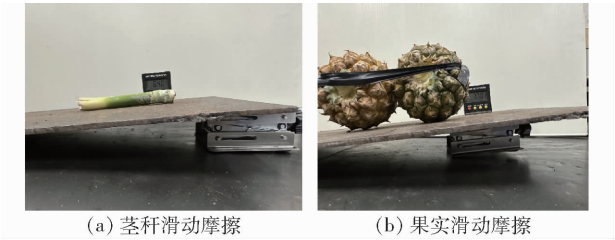


图 4 滑动摩擦测量

Fig.4 Sliding friction measurement

2 采摘装置设计

2.1 采摘装置与工作原理

采摘装置总体结构如图 5 所示。

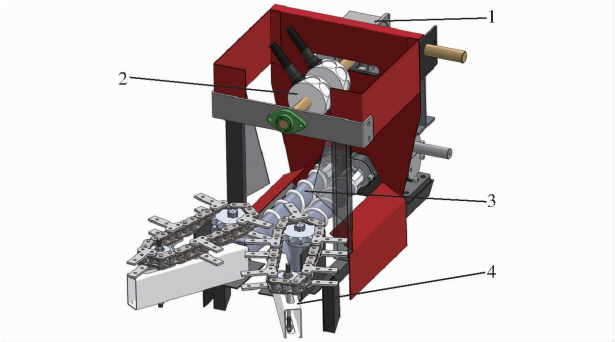


图 5 采摘装置结构示意图

Fig.5 Schematic of structure of harvesting device

1. 减速箱 2. 柔性杆 3. 摘辊 4. 导向机构

工作流程包括导向过程、采摘过程和收集过程,具体如下:

(1)导向过程:当导向机构的链爪接触菠萝植株时,随着链条的运动,将菠萝植株聚拢至摘辊入口处。

(2)收获过程:菠萝植株进入植株后,摘辊将植株拉拽向下。若植株与地面未分离,在果实与摘辊接触时,花萼处将产生较大的力矩,从而将果实采摘下来;若植株与地面分离,摘辊将起到顶住果实的作用,通过柔性杆将果实从茎秆处拨断。

(3)收集过程:采摘下来的果实被柔性装置从一侧推出送至收集处,完成采摘全过程。

该采摘装置可安装在高床作业机上,辅以输送装置可实现采摘、收集和运输一体化,如图 6 所示。

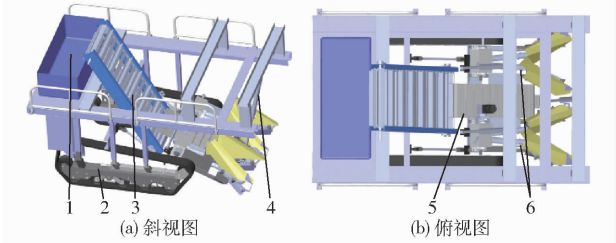


图 6 链喂入摘辊与柔性杆联合拨断式菠萝采摘机结构简图

Fig.6 Structure diagrams of pineapple picker with chain feed and flexible rod

1. 菠萝收集框 2. 履带行走机构 3. 二级运输带 4. 液压升降装置 5. 一级运输带 6. 收集装置

2.2 导向机构设计

导向机构的主要作用是使菠萝顺利进入采收装置中,本文设计的导向结构为一对呈八字形的带链爪的链条机构^[11],安装在摘辊的前方。由于一对摘辊在机具不转向的情况下采摘的范围为一排菠萝,故导向链条主要是将一排的菠萝聚拢并导入摘辊中,其结构如图 7 所示。

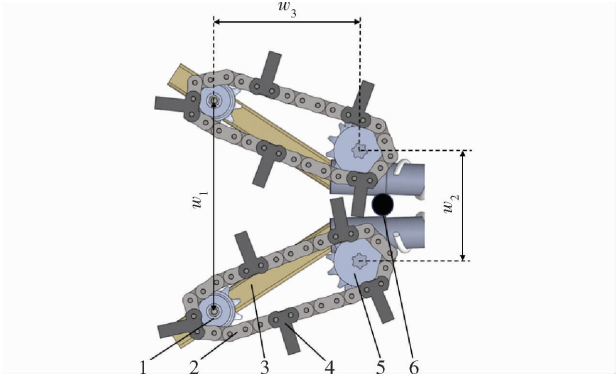


图 7 导向机构结构示意图

Fig.7 Guide mechanism structure diagram

1. 导向链轮(被动) 2. 导向链条 3. 支架 4. 链爪 5. 导向链轮(主动) 6. 菠萝植株

菠萝平均种植间距为 300 mm,为确保导向机构能够与植株接触,设计导向链条外宽 $w_1 = 340\text{ mm}$,内宽 $w_2 = 175\text{ mm}$,同时为确保导向机构将前一株导入摘辊内部后才引导下一株,设计两链轮水平距离 $w_3 = 232\text{ mm}$ 。型号为 16B-1 的链条常用于农业机

械领域,该型号链条节距 $p = 25.4\text{ mm}$;设计主动链轮和从动链轮分度圆半径分别为 98 mm 和 82 mm ,齿数分别为 12 和 10,通过计算得单条链节数 $L_p = 30$ 。另外为保证链条有效地将菠萝植株导入采摘装置,链节上设置长度大于菠萝茎秆直径的链爪。单条链条设置 5 对长度为 87 mm 的链爪。

2.3 摘辊设计

摘辊是采摘装置的重要部件之一,主要作用是对菠萝茎秆施加向下和向后的摩擦力,使菠萝茎秆被拉拽向下,并强制其往后运动。其结构为一对平行于地面或略微倾斜放置的辊轴,如图 8 所示,其结构包括传动销、压块、螺旋凸棱、辊筒、减速器和导向机构链轮。传动销将运动和动力传递至摘辊,并通过减速器带动导向机构的链轮转动。摘辊的各项参数会影响菠萝采收成功率,包括:摘辊长度、安装高度、间隙、直径和转速,因此需要对摘辊进行详细设计。

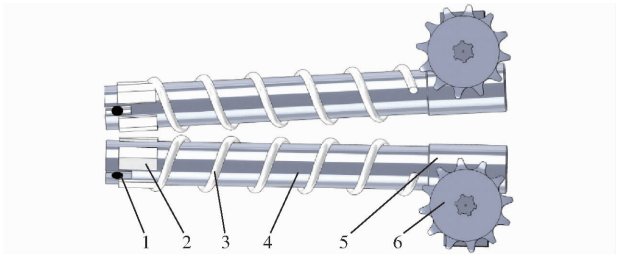


图 8 摘辊总体结构图

Fig. 8 Overall structure diagram of pick-up roller

1. 传动销 2. 压块 3. 螺旋凸棱 4. 辊筒 5. 减速器 6. 导向链轮(主动)

2.3.1 摘辊长度和安装高度

在不考虑摘辊旋转拉扯菠萝植株的情况下,为防止菠萝植株在摘辊内发生堵塞,作业时单对摘辊内最多允许同时有两株菠萝,本文通过控制摘辊的长度来控制工作时同时采摘的植株数量。菠萝种植间距为 $294 \sim 376\text{ mm}$,平均值为 $350\text{ mm}^{[9]}$,故取摘辊长度 $l_1 = 370\text{ mm}$ 。

为保证菠萝果实能够被摘辊采摘,采摘装置的高度,即摘辊中心线离地面高度应低于平均茎秆长度,并保证与地面有一定距离。菠萝茎秆长度为 $192 \sim 332\text{ mm}$,平均值为 $254\text{ mm}^{[9]}$,故取摘辊安装高度 h_m 为 $200 \sim 220\text{ mm}$ 。

2.3.2 摘辊间隙和直径

菠萝进入摘辊过程中,摘辊与菠萝茎秆先接触然后挤压往下拉拽茎秆,其模型如图 9 所示,图中 N 为摘辊对茎秆的压力, N ; P_{fj} 为摘辊对茎秆的摩擦力, N 。摘辊要实现抓住菠萝茎秆不抓果实的功能。假设摘辊直径为 D ,摘辊之间的间隙为 h ,摘辊对茎秆的抓取角为 ε ,菠萝茎秆直径为 d_j 。菠萝茎秆与

摘辊满足公式

$$\cos \varepsilon = 1 - \frac{d_j - h}{D} \tag{1}$$

其中

$$D = \frac{d_j - h}{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \varepsilon}}} \tag{2}$$

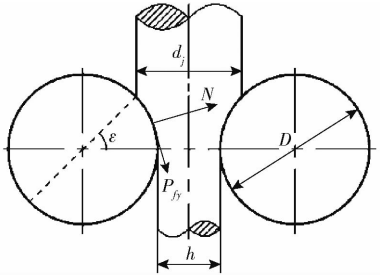


图 9 摘辊拉扯茎秆模型

Fig. 9 Roll pulling stem model

依据文献[12]中的摘辊直径设计分析可知,摘辊直径应满足

$$\frac{d_g - h}{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \mu_g^2}}} \geq D \geq \frac{d_j - h}{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \mu_j^2}}} \tag{3}$$

式中 d_g ——果实直径, mm

μ_g ——摘辊对果实的抓取系数

μ_j ——摘辊对茎秆的抓取系数

为了使摘辊只抓茎秆不抓果实,则应使抓取系数小于对果实起始抓取角的正切值^[13],即满足

$$\mu_g \approx \mu_j = (1.6 \sim 2.3)f \tag{4}$$

测试结果表明铸铁对菠萝的摩擦因数 $f \approx 0.43$,故 $\mu_g \approx \mu_j = 0.688 \sim 0.989$ 。

菠萝茎秆直径为 $15 \sim 26\text{ mm}$,而茎秆压缩试验表明,当压缩量达到直径的 $1/3$ 时,茎秆开始出现断裂现象。为确保摘辊能拉动茎秆,且不使茎秆碾压过大,取摘辊的间隙为菠萝植株茎秆直径平均值的 $2/3$,即 $h \approx 15\text{ mm}$ 。

根据公式(3), d_g 与 d_j 取其平均值,根据经验 $\mu_g \approx \mu_j \approx 0.75$,代入式(3)可得 $450\text{ mm} \geq D \geq 35\text{ mm}$ 。

为防止采摘过程中由于摘辊刚度不足而导致损坏,以及减少制造成本,取摘辊直径 $D = 70\text{ mm}$ 。

2.3.3 摘辊角速度

摘辊角速度将影响采摘效率,且需要与机具前进速度匹配。菠萝果实与摘辊之间的最高高度差为 $h_{\max}$,摘辊线速度为 v_r ,摘辊采摘一个菠萝所需要的最大时间 t_1 为^[13]

$$t_1 = \frac{h_{\max}}{v_r} \tag{5}$$

机具前进到下一个植株的时间 t_2 为

$$t_2 = \frac{d}{v_m} \tag{6}$$

式中 d ——菠萝平均种植间距,mm

v_m ——机具前进速度,m/s

作业时需确保下一株菠萝进入摘辊时,摘辊已经完成当前植株采摘,即满足

$$t_1 \leq t_2 \tag{7}$$

进一步推导得

$$v_r \geq \frac{h_{\max}}{d} v_m \tag{8}$$

设定机具前进速度为 0.6 ~ 1.0 m/s,代入数据得摘辊线速度 v_r 为 0.42 ~ 0.77 m/s,对应角速度为 12 ~ 22 rad/s。

2.3.4 摘辊采摘菠萝力学分析

由于菠萝植株根系较发达且深入土地,菠萝植株进入摘辊时,茎秆与地面形成一种类似铰链的结合。机具前进时,茎秆与摘辊将形成拉扯。在果实即将与茎秆分离时,菠萝植株与摘辊将形成如图 10 所示的几何和受力关系。图中 F_N 为菠萝果实与摘辊接触时摘辊施加给菠萝果实的接触力,N; F_f 为茎秆所受摩擦力,N; L_3 为摩擦力力臂,mm; α 为植株倾斜角,(°)。

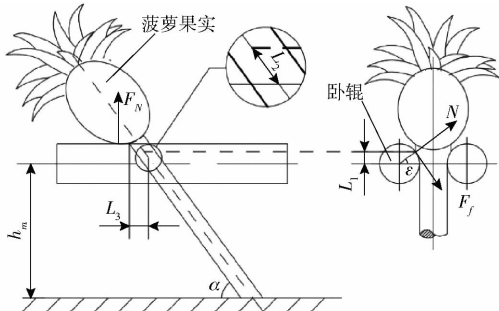


图 10 摘辊采摘力学模型

Fig. 10 Mechanical model of picking roller

摘辊与菠萝茎秆接触的高度 L_1 为

$$L_1 = \frac{D}{2} \sin \varepsilon \tag{9}$$

茎秆与摘辊接触段的长度 L_2 为

$$L_2 = \frac{L_1}{\sin \alpha} \tag{10}$$

菠萝植株的倾斜角 α 与植株原高度、摘辊安装高度、半径相关联,其表达式为

$$\sin \alpha \approx \frac{h_m + L_1}{L_j} \tag{11}$$

式中 L_j ——茎秆长度,mm

利用微积分求出菠萝茎秆与摘辊的接触面积 S 为

$$S = \frac{\int_0^\varepsilon \frac{\theta \pi r}{180} d_j d\theta}{\sin \alpha} = \frac{\frac{D}{2} \pi \varepsilon d_j L_j}{h_m + L_1} \tag{12}$$

由此得出摘辊对茎秆的压力 N 与拉扯茎秆向

下运动的摩擦力 F_f 为

$$\begin{cases} N = qS = \frac{\frac{D}{2} \pi \varepsilon d_j L_j q}{h_m + L_1} \\ F_f = Nf = \frac{\frac{D}{2} \pi \varepsilon d_j L_j qf}{h_m + L_1} \end{cases} \tag{13}$$

式中 q ——摘辊对茎秆单位面积压力

F_f 在菠萝花萼处施加的弯矩 M 力臂 L_3 为

$$L_3 \approx \left(L_j - \frac{L_2}{2} - \frac{h_m}{\tan \alpha} \right) \cos \alpha \tag{14}$$

得弯矩 M 为

$$M = 2F_f L_3 = \left(L_j - \frac{L_2}{2} - \frac{h_m}{\tan \alpha} \right) \frac{D \pi \varepsilon d_j L_j qf}{h_m + L_1} \cos \alpha \tag{15}$$

F_N 与菠萝茎秆所受到的摩擦力大小相同。但由于受力点与菠萝花萼处过于接近,故 F_N 只起固定菠萝的作用,产生的力矩可忽略不计。

由式(15)可知,在摘辊间隙、高度与半径都确定的情况下,菠萝植株越高,菠萝植株的茎秆半径越大,倾斜角 α 越小,接触面积越大,则力矩 M 越大。试验测得 $N \approx 225$ N,得 $M \approx 10.74$ N·m。而 C1 成熟度的菠萝掰断所需最大力矩为 4.96 N·m,故摘辊可以完成菠萝采摘。

2.4 柔性杆设计

根据上文分析可知,摘辊采摘菠萝的前提条件是植株扎根于土地形成一个类似铰链的结构,从而使摘辊与菠萝茎秆之间产生的摩擦力能形成弯矩。但菠萝植株如果被拔起则将会与摘辊一起移动。此时菠萝茎秆受力与传统摘辊摘穗相似,若摩擦力 F_f 大于菠萝果实与茎秆的连接力 F_j ,则能够将菠萝摘下来。由菠萝果实与茎秆拉力试验可知,在只施加垂直拉力的情况下,将菠萝从花萼处拉断所需的拉力最大值约为 366 N。摘辊施加的拉力为由摘辊挤压茎秆时产生的摩擦力,根据公式(13)计算得出摩擦因数 $f=0.39$,进一步推导得出单侧摘辊施加在茎秆上的压力 N 应满足

$$N \geq \frac{F_j}{2f} \tag{16}$$

代入数据计算得知,单侧摘辊施加给茎秆的压力 N 应大于等于 610 N。

但试验表明,当压力大于 225 N 时,茎秆会发生明显的轴向脆性断裂,导致无法提供足够的压力。可见,菠萝植株被拔起后,仅依靠摘辊的挤压摩擦力无法使果实摘下来。菠萝将卡在摘辊上,茎秆与摘辊不断打滑。为解决菠萝植株被拔起后采摘失效问题,且不会损伤菠萝果实^[14],本文在摘辊上方设置

一排旋转的柔性杆,以将果实拨断。

2.4.1 柔性杆尺寸设计

菠萝植株与地面分离后,在旋转的摘辊作用下,菠萝果实与摘辊接触,此时需要柔性杆将菠萝采摘,为增加橡胶杆与菠萝果实表面的摩擦力,柔性杆设计为端部带凹槽橡胶棒,如图 11 所示。

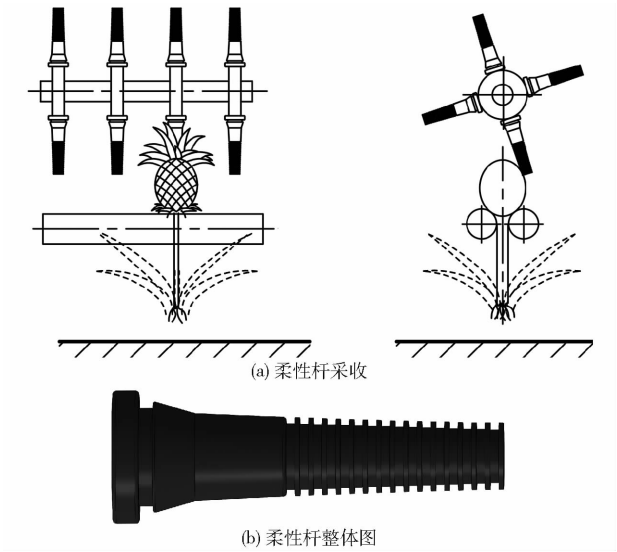


图 11 柔性杆采收与柔性杆整体示意图
Fig. 11 Flexible rod recovery diagram and overall schematic of flexible rod

为使菠萝果实能与柔性杆接触,并使柔性杆刚度较大,取回转轴与摘辊之间的高度差 $h_r = 275\text{ mm}$ 。柔性杆回转轴采用直径为 20 mm 的光轴,柔性杆的固定筒半径为 50 mm 。

柔性杆的制作材料为天然橡胶,其泊松比为 0.47 、杨氏模量为 7.84 MPa 、密度为 $1\,500\text{ kg/m}^3$ 。

为确保柔性杆能施加足够大的压力于菠萝果实表面,以将其掰断,需要合理设计柔性杆的几何参数。菠萝果实此时被摘辊夹紧无法左右移动,一旦柔性杆施加在果实表面的压力在花萼与茎秆连接处产生的力矩大于折断力矩,该果实将与茎秆分离。分离前的一瞬间为成功采摘的临界状态。假设在菠萝果实接触摘辊后,柔性杆旋转至 y 轴时为采摘临界状态,其力学模型如图 12 所示^[15]。图中 O_1 为柔性杆转轴中心; O_2 为花萼位置; A 为菠萝果实中心; B 为柔性杆与菠萝的接触点; D 为力延长线与力臂线的交点; l 为柔性杆的底部与接触点到达高度,mm; θ 为 AB 连线与 x 轴夹角, $(^\circ)$; d_1 为力臂长度,mm; F_1 为柔性杆掰断果实时受到的反作用力,N; P_y 为力 F_1 的 y 轴分力,N; ϕ 为力 F_1 与 y 轴的夹角, $(^\circ)$; β 为力 F_1 与 x 轴的夹角, $(^\circ)$; δ 为伪刚体角, $(^\circ)$ 。

采用自由端受力的悬臂梁伪刚体模型^[14]计算柔性杆半径 r 。

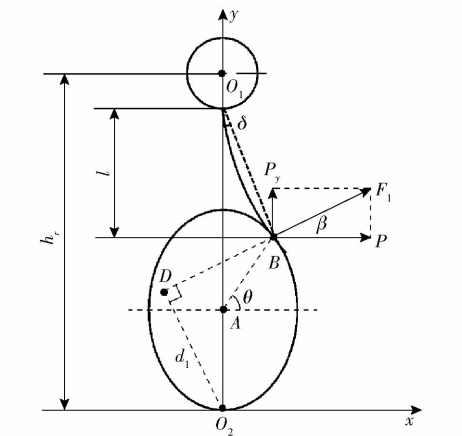


图 12 柔性杆采摘力学模型
Fig. 12 Flexible rod picking mechanical model

$$\begin{cases} K = \frac{\gamma K_\theta EI}{L} \\ P = \frac{K\delta}{\eta\gamma L \sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)} \\ \eta = \sqrt{1+n} \\ P_y = n\eta P \end{cases} \quad (17)$$

- 式中 K ——扭簧常数
 γ ——长度系数
 K_θ ——扭簧系数
 L ——柔性悬臂梁原始长度,mm
 P ——力 F 的 x 轴分力,N
 E ——杨氏模量,MPa
 I ——转动惯量, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$
 η ——力系数
 n ——分力系数

根据几何关系可得,菠萝果实截面外轮廓椭圆方程为

$$\frac{(y-a)^2}{a^2} + \frac{x^2}{b^2} = 1 \quad (18)$$

- 式中 a ——菠萝果实截面外轮廓椭圆长轴长度,mm
 b ——菠萝果实截面外轮廓椭圆短轴长度,mm

临界状态下接触点 B 与菠萝几何中心 A 之间的连线 AB 与点 B 的坐标 (x_B, y_B) 满足

$$\begin{cases} y_B = kx_B + a \\ \frac{(y_B - a)^2}{a^2} + \frac{x_B^2}{b^2} = 1 \\ k = \tan\theta \end{cases} \quad (19)$$

- 式中 k ——线 AB 的斜率

柔性杆和菠萝的接触面与菠萝果实表面相切,即点 B 在椭圆的切线上,有

$$\frac{(y_B - a)(y - a)}{a^2} + \frac{x_B x}{b^2} = 1 \quad (20)$$

力臂线 O_2D 与过点 B 的切线平行,其方程为

$$y = -\frac{a^2 x_B}{(y_B - a) b^2} x \tag{21}$$

力 F 的延长线 DB 与 O_2D 垂直,其方程为

$$y = \frac{(y_B - a) b^2}{a^2 x_B} x + y_B - \frac{(y_B - a) b^2}{a^2} \tag{22}$$

联立公式(21)、(22)可求得点 D 坐标 (x_D, y_D) 。柔性杆施加于菠萝的力矩力臂长度为

$$d_1 = \sqrt{y_D^2 + x_D^2} \tag{23}$$

力 F_1 和方向角 β 计算公式为

$$\begin{cases} F_1 = \frac{M}{d_1} \\ \beta = \arctan \frac{(y_B - a) b^2}{a^2 x_B} \end{cases} \tag{24}$$

进一步可得 P 表达式为

$$\begin{cases} P = F_1 \cos \beta \\ F_1 = \eta P \end{cases} \tag{25}$$

图 12 中参数的表达式为

$$l = h_r - y_B - 50 \tag{26}$$

由式(17)可算出分力系数 n ,查阅文献[14]中特征半径系数经验算法表可得 γ 、 K_θ 。

根据以上内容可进一步求得伪刚体角 δ 与柔性悬臂梁原始长度 L 为

$$\begin{cases} \delta = \arctan \frac{x_B}{l} \\ L = \frac{x_B}{\gamma \sin \delta} \end{cases} \tag{27}$$

将所得数值代入式(17)中,并根据惯性矩公式

$$I = \frac{\pi r^4}{4} \tag{28}$$

得出柔性杆所需的最小半径 r 。可见,只需要确认 AB 倾斜角 θ 的范围即可求出柔性杆所需的半径。已知柔性杆回转轴高度、摘辊半径与间隙和菠萝尺寸,可以得出摘辊施加给菠萝果实的支撑力 F_c 的角度约为 58° 。可得, F_1 与 F_c 平行,即 $\theta \approx 67.3^\circ$ 时,采摘将失败;柔性杆与菠萝无压力接触时, $\theta \in [21.69^\circ, 32.6^\circ]$ 。当 $\theta \in [32.6^\circ, 67.3^\circ]$ 时将在菠萝上面施加压力,假设 $\theta = 45^\circ$ 时达到菠萝果实断裂的临界状态,菠萝尺寸采用平均值,可以算出柔性杆半径 $r \approx 18.54 \text{ mm}$, $L \approx 145.8 \text{ mm}$,为方便制造,取 $r = 19 \text{ mm}$, $L = 150 \text{ mm}$ 。

2.4.2 柔性杆角速度

柔性杆转速将影响采收装置工作效率,转速过慢将导致菠萝植株堆积在摘辊上,反之则导致对菠萝果实表面的打击力上升,并可能使果实表面淤伤。

能有效拨断果实转速条件为

$$\omega_r \geq \frac{v_m}{d_z n_r} 2\pi \tag{29}$$

式中 ω_r ——柔性杆角速度,rad/s

n_r ——柔性杆圆周方向排列数

d_z ——菠萝平均种植间距,mm

n_r 为 1~4。取 $n_r = 1$,柔性杆角速度为 10~20 rad/s。

3 试验

3.1 试验样机基本结构

链喂入摘辊与柔性杆联合拨断式菠萝采收机由拖拉机和采摘装置组成,如图 13 所示。通过改变连接螺母的安装位置可调整采摘装置的高度;通过调整摘辊前端减速器的安装位置改变摘辊之间的间隙;通过更换不同减速比的减速器改变柔性杆的角速度;配套动力为 CM-101 型拖拉机和 196 型柴油机,柴油机的动力通过皮带传送至采摘装置,驱动摘辊与柔性杆转动。

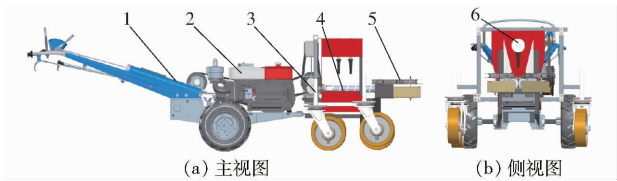


图 13 采收试验样机整体结构图

Fig. 13 Overall sketches of harvest testing machine

1. 拖拉机机架 2. 柴油机 3. 采摘装置机架 4. 摘辊 5. 导向机构 6. 柔性杆

试验样机整机与采摘装置如图 14 所示。



图 14 试验样机整机与采摘装置实物图

Fig. 14 Physical diagrams of whole testing machine and recovery device

3.2 试验结果

试验使用“金山种”神湾菠萝,试验时间为 2023 年 11 月 16—17 日。选取 600 株菠萝植株,成熟度为 C0~C1 之间,并随机均分为 12 组,每次试验移植 5 株,植株种成一行且植株之间的距离为上文所测出的菠萝间距。

采用采摘率 R 和损伤率 Y 对采收样机进行性能评价;菠萝内部损伤评价参考文献[7,18]。采摘装置综合评价指数 Q 计算公式为^[9]

$$\begin{cases} Q=0.7R+0.3(1-Y) \\ R=\frac{R_y}{R_n+R_y}\times100\% \\ Y=\frac{Y_n}{Y_n+Y_y}\times100\% \end{cases} \quad (30)$$

式中 R_y ——成功采摘菠萝数量
 R_n ——采摘失败菠萝数量
 Y_n ——采收成功菠萝中受损数量
 Y_y ——采收成功菠萝中未受损数量

图 15 为机具前进速度为 0.6 m/s、摘辊角速度为 12 rad/s、柔性杆角速度为 10 rad/s 下的试验过程和试验结果。

大部分菠萝通过摘辊摘除,占比接近 3/4,其余为柔性杆摘除。试验结果如表 2 所示。在摘辊离地高度为 0.2 m 的工况下,单个菠萝采摘所需平均时间为 0.43 s、平均收获成功率为 79.33%、平均损伤率为 41.62%、平均综合评价指标为 73.04%;摘辊离地高度为 0.22 m 的工况下,单个菠萝采摘所需平均时间为 0.47 s、平均收获成功率为 66%,平均损伤率为 55.31%,平均综合评价指标为 59.6%;其中摘

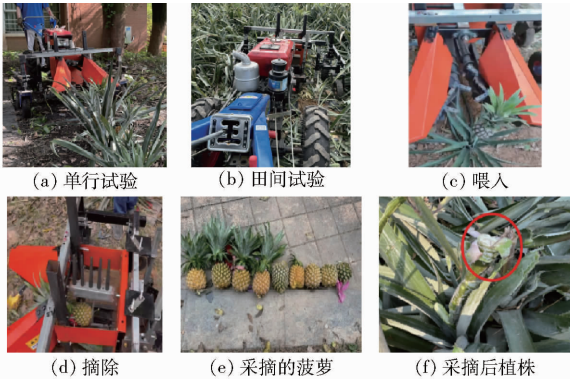


图 15 菠萝采摘试验场景

Fig. 15 Pineapple picker test scenes

辊离地高度为 0.2 m、机具前进速度为 0.6 m/s、摘辊角速度为 12 rad/s、柔性杆角速度为 10 rad/s 的参数组合评价指标最高。通过对比得知,机器前进速度越快、摘辊和柔性杆角速度越高,则损伤率越高。致使菠萝果实受损主要原因是链条拨爪与菠萝果实接触、碰撞,如图 16 所示。另外在摘辊角速度变大时,菠萝果实花萼附近区域与摘辊接触时相对速度增大,并可能压溃皮下果肉,使菠萝果实受损。

表 2 试验结果
Tab.2 Test results

序号	摘辊安装 高度/m	前进速度/ (m·s ⁻¹)	摘辊角速度/ (rad·s ⁻¹)	柔性杆角速度/ (rad·s ⁻¹)	单个果实采 收时间/s	采摘率 R/%	损伤率 Y/%	综合评价指标 Q/%
1	0.20	0.6	12	10	0.73	82	34.14	77.16
2	0.20	0.6	14	12	0.66	80	37.50	74.75
3	0.20	0.8	16	14	0.45	76	42.10	70.57
4	0.20	0.8	18	16	0.47	78	41.02	72.29
5	0.20	1.0	20	18	0.38	84	47.62	74.51
6	0.20	1.0	22	20	0.32	76	47.36	69.00
7	0.22	0.6	12	10	0.64	70	45.71	65.28
8	0.22	0.6	14	12	0.57	68	52.94	61.71
9	0.22	0.8	16	14	0.49	72	55.55	63.73
10	0.22	0.8	18	16	0.39	62	51.61	57.91
11	0.22	1.0	20	18	0.42	64	59.37	56.98
12	0.22	1.0	22	20	0.32	60	66.66	52.00

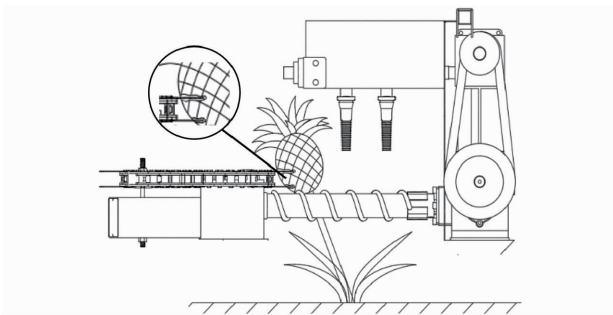


图 16 菠萝损伤过程示意图

Fig. 16 Schematic of pineapple damage process

菠萝采摘失败的主要原因包括:菠萝植株低于

摘辊与地面的高度,导致菠萝无法进入摘辊处进行采摘;倒伏。

4 讨论

本研究采摘装置能够在 1 s 内完成对单个菠萝的采摘。而王月等^[19]提出的手持式菠萝采摘机构单个菠萝采收所需时间为 7 s 左右;傅旻等^[20]提出的拧取式菠萝采摘机械每株采摘时间为 17.99 s;李明等^[21]提出的双臂菠萝采摘机器人单个菠萝采收时间约为 22 s;马兴灶等^[22]设计的采摘末端执行器平均每个菠萝采摘时间为 13.5 s;ANH 等^[7]设计的

菠萝采摘机器人单个菠萝采摘时间约为 12 s。可见本文提出的方案在速度方面相比菠萝采摘机器人和手持采摘器有明显提升,并且制作难度低。

文献[8]提出的多柔性指滚筒采收装置采收率达到 85%,损伤率为 5%,单个菠萝采摘时间为 1 s,但该方案需要菠萝植株菠萝高度较为一致;文献[9]提出的拨杆喂入式采摘装置成功率为 84%,损伤率为 9.53%,单菠萝收获时间为 1.3 s。如果本采摘装置双排或多排安装,单个菠萝采摘时间将小于 0.5 s。相比而言,采摘速度比文献[8-9]的方案速度更快,对倒伏不严重的菠萝有采收效果,但损伤率偏高。另外采摘装置动力源通过皮带输入,由齿轮组减速后驱动一对摘辊反向旋转,然后通过涡轮蜗杆机构进一步减速并改变运动方向后驱动喂入链条运动,传动链简单;采摘机构长×宽×高为 900 mm×1 200 mm×800 mm,结构紧凑。

5 结 论

(1)提出一种链喂入摘辊与柔性杆联合拨断式菠萝采摘装置,主要由导向链、摘辊和柔性拨杆构成。

(2)对采摘力学分析所需关键物理参数进行了测试,测试结果表明,菠萝花萼处拉断力平均值为 366 N,最大拉力为 360 N;茎秆发生脆性断裂平均压力为 225 N,最大为 260 N;菠萝果实和茎秆与摘辊表面滑动摩擦因数分别为 0.43、0.39。

(3)根据菠萝植株生长参数设计了导向链和摘辊;在采摘力学分析的基础上设计了柔性杆几何参数和运动参数。

(4)开发了一台由拖拉机驱动的试验样机进行试验,试验结果表明:采摘装置工作顺畅,在高度合适情况下采摘装置采摘率超过 70%,单个菠萝采收时间小于 1 s。

参 考 文 献

[1] HOSSAIN M F, AKHTAR S, ANWAR M. Nutritional value and medicinal benefits of pineapple[J]. International Journal of Nutrition and Food Sciences, 2015,4(1): 84-88.

[2] 周巧鸥,唐华,龙天畅,等.双排并联式菠萝收割机的设计[J].机械工程师,2019(5):49-50,53.
ZHOU Qiaou, TANG Hua, LONG Tianchang, et al. Design of double row parallel pineapple harvester[J]. Mechanical Engineer, 2019(5): 49-50, 53. (in Chinese)

[3] HASAN S, PENG Chen, JANG W, et al. Collaboration of human pickers and crop-transporting robots during harvesting—part I: model and simulator development[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 172: 105324.

[4] LIU W, LIU T, ZENG T, et al. Prediction of internal mechanical damage in pineapple compression using finite element method based on Hooke's and Hertz's laws[J]. Scientia Horticulturae, 2023, 308: 111592-111603.

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

[6] 薛忠,陈如约,张秀梅.菠萝机械化种植与收获研究现状[J].山西农业大学学报(自然科学版),2021,41(3):110-120.
XUE Zhong, CHEN Ruyue, ZHANG Xiumei. Research status of mechanized planting and harvesting of pineapples[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 41(3): 110-120. (in Chinese)

[7] ANH N P T, HOANG S, VAN T D, et al. Developing robotic system for harvesting pineapples[C]//2020 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMEchS). IEEE, 2020: 39-44.

[8] 刘天湖,刘伟,曾霆俊,等.多柔性指滚筒菠萝采收机构工作原理及设计[J].农业工程学报,2022,38(8):21-26.
LIU Tianhu, LIU Wei, ZENG Tingjun, et al. Multi-flexible refers to the working principle and design of roller pineapple harvesting mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2022,38(8): 21-26. (in Chinese)

[9] 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. Feeding-type harvesting mechanism with the rotational lever for pineapple fruit[J]. Transactions of the CSAE, 2023,39(19):27-38. (in Chinese)

[10] GOREN R. Anatomical, physiological, and hormonal aspects of abscission in citrus[J]. Horticultural Reviews, 1993, 15: 145-182.

[11] 赵一鸣,戴飞,史瑞杰,等.自走式制种玉米联合收获机设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(5):121-134.
ZHAO Yiming, DAI Fei, SHI Ruijie, et al. Design and experiment of self-propelled seed corn combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(5):121-134. (in Chinese)

[12] 李宝筏.农业机械学[M].北京:中国农业出版社,2003:458-460.

[13] 耿端阳,明家锐,王伯龙,等.新型横辊式玉米摘穗装置设计与试验[J/OL].吉林大学学报(工学版):1-10. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20221590>.
GENG Duanyang, MING Jiarui, WANG Bolong, et al. Design and experiment of a new type of cross roll corn ear picking device[J/OL]. Journal of Jilin University (Engineering Edition): 1-10. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20221590>. (in Chinese)

[14] NAVS E, FERNANDEZ R, SEPULVEDA D, et al. Soft grippers for automatic crop harvesting: a review [J]. Sensors, 2021,

21(8) : 2689.

[15] 赵磊,赵新华,李彬,等. 大范围转动弹性梁柔性动力学建模与摄动解耦[J]. 农业机械学报,2020,51(1) :391 – 397.
ZHAO Lei, ZHAO Xinhua, LI Bin, et al. Flexible dynamics modeling and perturbation decoupling of elastic beam in large overall rotation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(1) :391 – 397. (in Chinese)

[16] HOWELL L L, MIDHA A. A method for the design of compliant mechanisms with small-length flexural pivots[J]. Journal of Mechanical Design, 1994, 116(1) : 280 – 290.

[17] LARRY L H. 柔顺机构学[M]. 北京:高等教育出版社,2007:108 – 109.

[18] 张俊昌. 菠萝自动采摘机的优化设计与分析[D]. 广州:仲恺农业工程学院,2014.
ZHANG Junchang. Optimal design and analysis of pineapple automatic picker [D]. Guangzhou: Zhongkai College of Agricultural Engineering, 2014. (in Chinese)

[19] 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 on the hand-held shearing force mechanism of the pineapple-picking device[J]. Journal of Machine design, 2020, 37(1) :72 – 76. (in Chinese)

[20] 傅旻,李晨曦,郑兆启. 半自动拧取式菠萝采摘收集机的设计与分析[J]. 工程设计学报,2020, 27(4) : 487 – 497.
FU Min, LI Chenxi, ZHENG Zhaoqi. Design and analysis of semi-automatic screw type pineapple picking-collecting machine [J]. Chinese Journal of Engineering Design,2020, 27(4) : 487 – 497. (in Chinese)

[21] 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.

[22] 马兴灶,连海山,弓满锋,等. 菠萝采摘机械手结构设计与试验[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 experiment of pineapple picking manipulator[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2020,51(4) :727 – 732. (in Chinese)

(上接第 115 页)

[23] YIN Hesheng, SUN Qixin, REN Xu, et al. Development, integration, and field evaluation of an autonomous citrus-harvesting robot[J]. Journal of Field Robotics, 2023, 40(6) : 1363 – 1387.

[24] WANG Yi, YANG Yan, ZHAO Hongmei, et al. Effects of cutting parameters on cutting of citrus fruit stems[J]. Biosystems Engineering, 2020, 193: 1 – 11.

[25] WANG Yi, LIU Dun, LI Yali, et al. Effects of maturity of citrus fruits on their stalks cutting force[J]. Int. J. Agric. & Bio. l Eng. , 2022,15(6) :23 – 30.

[26] ZOU Xiangjun, YE Min, LUO Chengyu, et al. Fault-tolerant design of a limited universal fruit-picking end-effector based on vision-positioning error[C] // *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2016.

[27] 王粮局,张铁中,褚佳,等. 大容差高效草莓采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(增刊) :252 – 258.
WANG Liangju, ZHANG Tiezhong, CHU Jia, et al. An efficient strawberry harvesting end-effector with large misalignment tolerance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.) : 252 – 258. (in Chinese)

[28] 李小平. 圣女果采摘机器人末端执行器的结构设计与仿真分析[D]. 重庆:重庆三峡学院,2023.
LI Xiaoping. Structure design and simulation analysis of end effector of cherry picking robot[D]. Chongqing: Chongqing Three Gorges University, 2023. (in Chinese)