doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.10.033

链喂入式菠萝采收机设计与试验

刘天湖[1]　张锦翀[1]　练卓谦[1]　李嘉豪[1]　梁兆正[1]　刘舒阳[2]　周旭辉[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:针对菠萝植株高度偏差大和倒伏导致机械化采收采净率不高的问题,本文设计了一种链喂入式菠萝采收机。根据菠萝植株物理特性确定了采收装置结构参数。建立了菠萝植株运动学模型和菠萝果实与联合采摘装置接触力学模型,求得分苗器最低倾角、菠萝果实临界碰撞损伤时拨果机构最大转速和喂入链轮最小转速分别为 20°、62 r/min、25 r/min,并确定分苗器倾角、拨果杆安装盘与喂入链轮转速比和喂入链轮转速为试验因素,以果实采净率和果实损伤率作为试验指标,依据 Box－Behnken 试验原理开展三因素三水平试验,利用 Design-Expert 13.0 软件建立试验指标与因素之间的回归模型,通过回归模型分析求得最优参数组合。田间试验结果表明,当分苗器倾角为 28°、拨果杆安装盘与喂入链轮转速比为 0.75、喂入链轮转速为 44 r/min 时性能最优,果实采净率为 92.22%,损伤率为 7.1%,满足菠萝果实采收设计要求。

关键词:菠萝采收机;链喂入式;采净率;损伤率
中图分类号:S225.99　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)10-0386-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Chain-feeding Pineapple Harvester

LIU Tianhu[1]　ZHANG Jinchong[1]　LIAN Zhuoqian[1]　LI Jiahao[1]　LIANG Zhaozheng[1]
LIU Shuyang[2]　ZHOU Xuhui[1]
(1. *College of Engineering*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*
2. *College of Agronomy*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*)

Abstract: Aiming to address the low harvest completeness rate in mechanized pineapple harvesting caused by significant plant height variations and lodging, a chain-feeding pineapple harvester was designed. The working mechanism of the harvester was elaborated, and its structural parameters, such as the installation height of the harvesting unit and the spacing of the feeding chains, were determined based on the physical characteristics of pineapple plants. By establishing a kinematic model of pineapple plants and a contact mechanics model between pineapple fruits and the integrated picking device, the critical parameters were derived as follows: the minimum lifting inclination angle of the seedling divider was 20°, the maximum allowable rotational speed of the fruit-detach device was 62 r/min, and the minimum rotational speed of the feeding chain was 25 r/min. Further analysis identified that seedling divider inclination angle, speed ratio between the mount ring of fruit push finger and the chain gear and the rotate speed of feeding chain were three key factors affecting harvesting performance. A three-factor, three-level bench test was conducted by using the Box－Behnken experimental design principle, by taking harvest completeness rate and fruit damage rate as evaluation metrics. Regression models linking test indicators and factors were developed via Design-Expert 13.0 software, and the optimal parameter combination was derived through model analysis. Test results demonstrated that with a seedling divider inclination angle of 28°, a speed ratio of 0.75 between the mount ring of fruit push finger and the chain gear, and a rotate speed of 44 r/min with feeding chain, the harvest completeness rate reached 92.22% and the fruit damage rate was 7.1%.

Key words: pineapple harvester; chain-type feeding; harvest completeness rate; damage rate

收稿日期:2025－04－03　修回日期:2025－06－19
基金项目:国家自然科学基金项目(52175229)
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

目前，我国已经成为世界主要菠萝生产大国之一[1-2]，种植面积稳定在 7×10^4 hm^2 以上，产量达 3×10^6 t[3]。菠萝收获方式以人工采摘为主，需要耗费大量人力。由于菠萝叶片繁密且韧性强，叶缘上带有大量倒刺，采摘作业相对困难，劳动强度大[4-5]。随着我国社会经济发展和人口结构变化[6]，劳动力日益短缺[7]，因此菠萝采收机械化是未来发展的必然趋势[8]。

采收机器人虽能够实现精准作业[9]，但采收速度低，对采收环境适应能力差，还难以实现大规模应用[10-11]。片区式机械化采收装备虽能够进行大规模作业，但难以自适应调节采摘装置高度和角度，且成功收获果实损伤率较高[12]。文献[13]设计了拨杆喂入式菠萝采收机构，不需要精准定位菠萝植株位置，能够高效地完成采收过程，但该采收机构会受到植株高度以及种植姿态的影响，在面对倒伏植株或植株高度偏差较大的情况时，存在采收失败的现象，采收效果较差[14]。

针对菠萝植株高度偏差大和倒伏导致菠萝机械化采收采净率不高的问题，本文设计一种链喂入式菠萝采收机，以实现通过扶起和联合采摘方式进行高效作业。分析分苗器与联合采摘装置在收获过程中与菠萝果实的接触模型，得出部分工作部件参数，并通过试验进行验证，得出采收机最优工作参数组合，以提高采收效率。

1　整体结构及工作原理

链喂入式菠萝采收机（以下简称采收机）主要由龙门式履带机、联合采摘装置、挡板输送链、液压调节机构等组成，整体技术参数如表 1 所示，总体结构如图 1 所示。

表 1　主要技术参数

Tab. 1　Key technical specifications

参数	数值
外形尺寸（长×宽×高）/（mm×mm×mm）	2 940×1 600×1 980
配套功率/kW	3.5
整机质量/kg	2 044
作业幅宽/mm	772
作业速度/（m·s^{-1}）	0.1～0.3
作业行数	3
作业效率/（hm^2·h^{-1}）	0.028～0.083

联合采摘装置、挡板输送链、液压调节机构安装在龙门式履带机上，通过履带机实现行走功能，以适应不同地形，由操作者通过驾驶杆改变其行走速度。液压调节机构可根据不同株高通过电动液压升降器调节联合采摘装置离地高度和采摘角度，提高采摘装置灵活性。由分苗器、链式喂入机构和拨果机构组成的联合采摘装置使菠萝植株进入采收机并使果实与植株分离，作业速度由电机驱动系统进行调整。

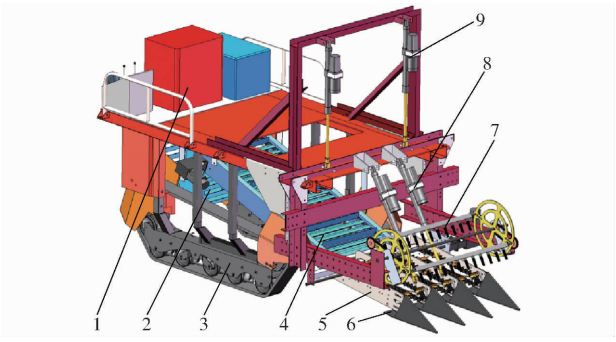


图 1　链喂入式菠萝采收机结构图

Fig. 1　Schematic of chain-feeding pineapple harvester

1. 操作台　2. 收集框　3. 履带机　4. 挡板输送链　5. 链式喂入机构　6. 分苗器　7. 拨果机构　8、9. 液压调节机构

采收机工作流程如图 2 所示。在田间作业时，液压调节机构将联合采摘装置离地高度调节至适当值，各装置转速调整至合适值，机器开始作业。主要采收过程包括导向、采摘和输送收集 3 个步骤。

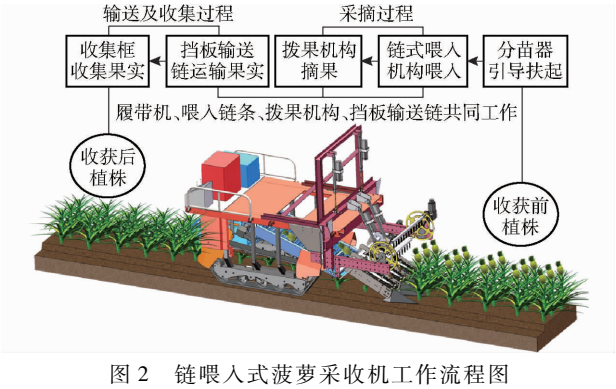


图 2　链喂入式菠萝采收机工作流程图

Fig. 2　Schematic of working process of chain-feeding pineapple harvester

联合采摘装置安装在机架前端，主要工作部件有液压调节机构、分苗器、链式喂入机构和拨果机构，如图 3 所示。

图 4 为联合采摘装置采摘菠萝果实的工作原理。分苗器将菠萝植株引导至入口，并通过链式喂入机构中的抬升推板将其进一步扶起，使果实高度满足拨果机构采摘要求。当果实被扶起至最大高度时（茎秆完全伸直），拨果机构和抬升推板共同施加采摘力矩使果实与植株分离。

2　联合采摘装置设计

2.1　菠萝物理参数

不同的菠萝田种植要求及植株高度有差异[15]，在采收过程中，需调整机构中各装置工作参数以满

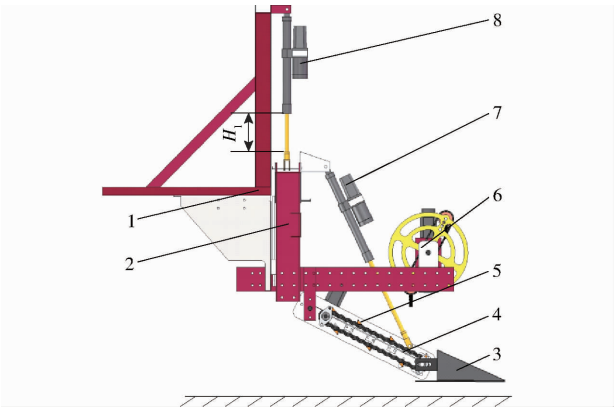


图 3 联合采摘装置结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of integrated harvesting device

1. 底座 2. 机架 3. 分苗器 4. 链式喂入机构 5. 抬升推板 6. 拨果机构 7、8. 液压调节机构

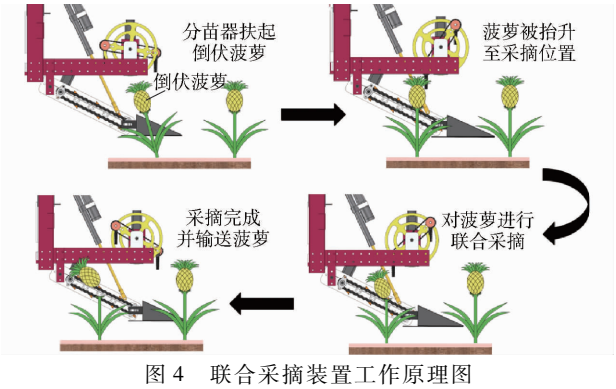


图 4 联合采摘装置工作原理图

Fig. 4 Working principle of integrated harvesting device

足采摘要求,因此在前期测量菠萝植株物理特性,为后续关键部件设计提供依据。

2024 年 10 月,于广东省中山市神湾镇采用五点取样法随机选取 100 株菠萝植株作为测量样本,所选样本均无虫害且种植间隙合理,所有测量均在室温 20 ~ 25℃ 的同一天内进行,测量前所有果实均打好标签。测量工具为游标卡尺(精度:0.02 mm),结果取整后如表 2 所示,各参数示意图如图 5 所示。

表 2 菠萝尺寸

Tab. 2 Size data of pineapple mm

项目	株距	果实		茎秆	
		直径 $2b$	高度 $2a$	直径 d	长度 h
最大值	371	117	153	23	323
最小值	296	84	114	16	264
平均值	334	107	132	20	306

2.2 液压调节机构设计

液压调节机构是使采收机具备更强适应性的关键部件,由直线导轨、滑块和电动液压升降器等组成。直线导轨和滑块限制水平方向移动自由度,电动液压升降器驱动采收装置整体升降,并调节链式喂入机构工作角度,以适应采收不同株高菠萝。

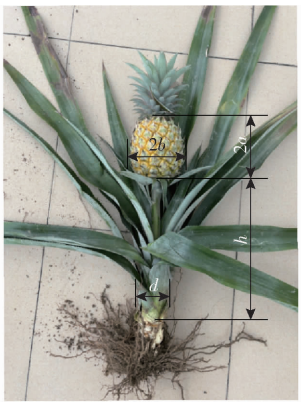


图 5 菠萝几何尺寸示意图

Fig. 5 Schematic of geometric dimensions of pineapple

为保证调节后工作高度符合采摘要求,液压调节机构最大可调节高度 H_1 需满足

$$H_1 > h_{max} - h_{min} \tag{1}$$

式中 h_{max}——菠萝植株最大高度,mm

h_{min}——菠萝植株最小高度,mm

由表 2 可知,菠萝植株最大高度差为 98 mm,考虑植株间个体差异性,同时充分利用液压缸有效行程,取最大可调节高度 H_1 为 130 mm。

2.3 分苗器设计

在收获期部分菠萝植株出现倒伏现象,影响采收机采收效率。分苗器作为联合采摘装置导向器,其主要作用是分苗和扶正,即引导菠萝植株进入联合采摘装置中,同时扶起倒伏菠萝植株。设计的分苗器为三角锥形,棱边设置有圆角,底面与地面平行,安装在链式喂入机构前端,其底部有限低结构,使底板与地面保持一定间距,阻止植株底部叶片进入采摘装置,减少堵塞。

由于菠萝植株根系较发达且深入土壤,倒伏菠萝植株茎秆与地面形成一种类似铰链结合,茎秆只能围绕根部做圆周运动[16]。随着机器向前运动,茎秆与分苗器接触并产生相对运动,使菠萝植株沿分苗器向上运动,最终实现导向和扶正。倒伏菠萝植株与分苗器接触位置包括倾斜面和棱边。

分苗时,倾斜面起主要作用[17]。当分苗器向前运动时,菠萝植株相对于分苗器倾斜面向反方向滑动。当分苗器两倾斜面夹角 θ 为 0°时,无论采收机前进速度 v_m 如何变化,植株都不会被推倒;反之,当 θ 为 180°时,菠萝植株一定会被推倒,因此存在某一临界角 θ_1,当 $\theta \leqslant \theta_1$ 时,植株不会被分苗器推倒。当 $\theta = \theta_1$ 时,在分苗器与菠萝茎秆接触瞬间发生相对运动,因此可将菠萝茎秆与分苗器相互作用关系转换成静力学模型进行研究,其静力学模型如图 6 所示。

忽略采收机前进速度对植株的影响,对菠萝茎

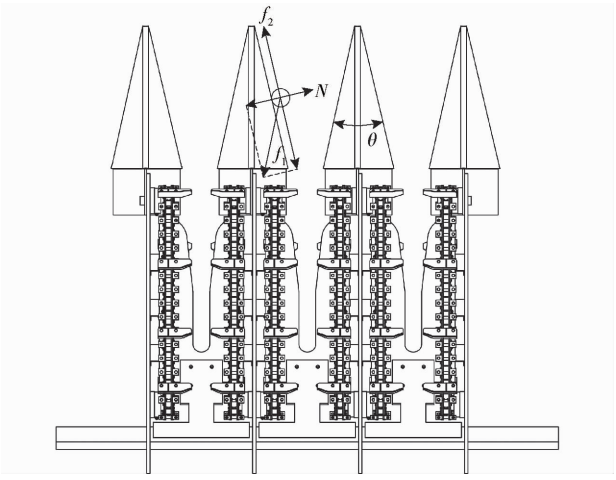


图 6　倾斜面受力示意图

Fig. 6　Schematic of force on inclined surface

秆进行受力分析可知倾斜面法向合力为 0，且分苗器对菠萝茎秆静摩擦力在菠萝植株运动方向分力等于菠萝茎秆与分苗器内壁摩擦力，可得

$$\begin{cases} f_1 \sin\dfrac{\theta_1}{2} = N \\ f_2 = f_s N \\ f_1 \cos\dfrac{\theta_1}{2} = f_2 \end{cases} \tag{2}$$

式中　f_1——分苗器对菠萝茎秆静摩擦力，N

f_2——菠萝茎秆与分苗器内壁摩擦力，N

N——分苗器对菠萝茎秆的作用力，N

f_s——菠萝茎秆与分苗器间的摩擦因数

整理得

$$\tan\frac{\theta_1}{2} = \frac{1}{f_s} \tag{3}$$

铸铁材料成本低，硬度高且耐磨性强，分苗器采用铸铁材料制成，通过文献[16]的测量结果可知铸铁与菠萝茎秆摩擦因数 f_s 为 0.39，考虑分苗器布置间距，取 θ 为 32°。

扶起时，分苗器棱边接触起主要作用。为确保在收获过程中分苗器顺利扶起倒伏的菠萝植株，需要分析倒伏植株与分苗器接触过程中的相对运动情况。扶起过程受力和运动示意图如图 7 所示。

当分苗器前端运动至菠萝茎秆根部时开始计时，在某一时刻 t，采收机行走路程 S_1 为

$$S_1 = v_m t \tag{4}$$

式中　v_m——采收机前进速度，m/s

t——采收机的运动时间，s

菠萝植株所在直线方程为

$$y = x\tan\varphi \tag{5}$$

式中　φ——菠萝植株倾斜角，(°)

分苗器棱边所在直线方程为

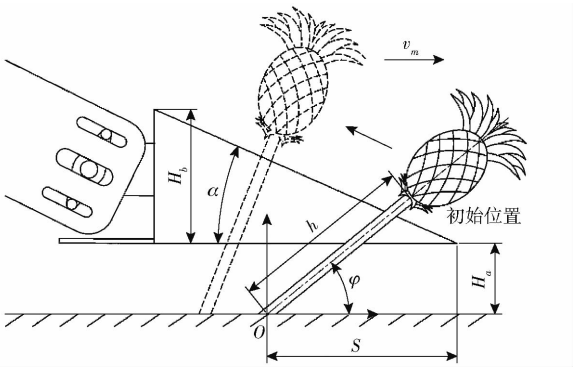


图 7　扶起过程受力和运动示意图

Fig. 7　Force analysis and kinematic diagram of righting process

$$y = -(x + S_1)\tan\alpha + H_a \tag{6}$$

式中　α——分苗器棱边倾角，(°)

H_a——分苗器底部离地高度，mm

扶起过程中菠萝植株与分苗器的接触点同时满足式(5)、(6)，为满足扶起要求，分苗器末端高度应低于菠萝植株茎秆长度 h，即

$$h > H_a + H_b \tag{7}$$

式中　H_b——分苗器高度，mm

棱边倾角过大时，易推倒菠萝植株，无法达到扶起效果，其坡度应小于菠萝茎秆与分苗器摩擦因数 f_s，即

$$\tan\alpha < f_s \tag{8}$$

由于采收机存在前进速度，菠萝茎秆受到的摩擦力大于理论值。结合菠萝植株种植情况，综合考虑机器前进速度和菠萝果实运动情况，确定分苗器棱边倾角 α 为 20°～28°。

2.4　链式喂入机构设计

链式喂入机构由链轮、带耳链条(喂入链)、导向板等组成。喂入链上方安装有抬升推板，为防止叶片与喂入链缠绕，抬升推板内侧折弯且上方开圆角。链轮型号为 16A 10 齿，分度圆半径 R_L 为 28 mm。链条采用 16A 工业滚子输送带耳链条，节距 P 为 25.4 mm。其结构示意图如图 8 所示。

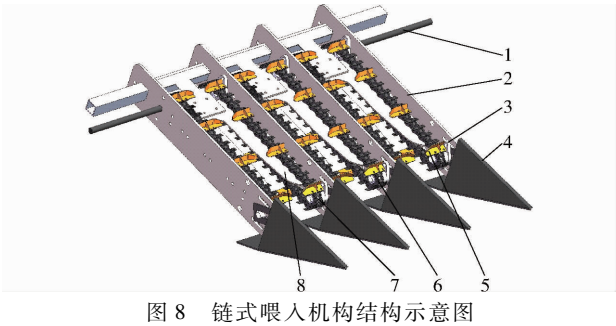


图 8　链式喂入机构结构示意图

Fig. 8　Structural schematic of chain-feeding mechanism

1. 转轴　2. 支撑板　3. 轴承　4. 分苗器　5. 抬升推板　6. 链轮　7. 带耳链条　8. 导向板

在喂入过程中,抬升推板运动轨迹为半圆,以装置前端链轮圆心为坐标原点建立直角坐标系,如图 9 所示。

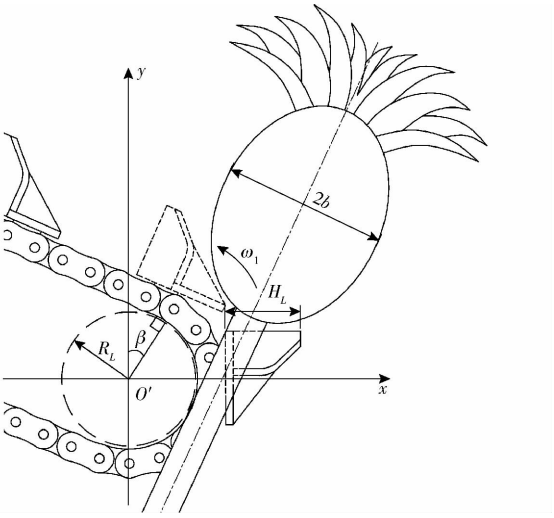


图 9 喂入过程分析图

Fig. 9 Feeding process analysis diagram

抬升推板高度影响菠萝抬升与采摘效果,高度过小将导致抬升推板无法将菠萝果实喂入和抬升;过大则在采摘过程中与拨果指发生碰撞。根据初步试验情况,取其高度 H_L 为 50 mm。

果实花萼处在水平方向上位移 X 满足

$$X = v_m t - (R_L + H_L)(1 - \cos(\omega_1 t)) \tag{9}$$

其中 $$\omega_1 = 2\pi n_1$$

式中 ω_1——链轮角速度,rad/min

n_1——主动链轮转速,r/min

为确保菠萝果实被喂入,果实花萼处相对地面往机器前进方向的反方向运动,即满足

$$\begin{cases} \omega_1 t = \dfrac{\pi}{2} - \beta \\ X < 0 \end{cases} \tag{10}$$

式中 β——链式喂入机构倾角,(°)

求解得 $n_1 > 25$ r/min。

图 10 为链式喂入机构主视图。为防止菠萝果实受到链条挤压造成损伤,两侧喂入链间距 D_w 应大于果实直径 $2b$,即

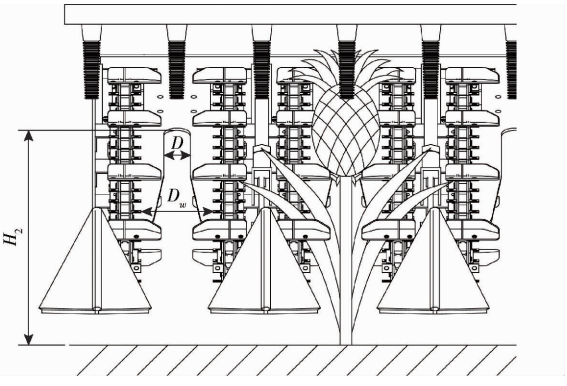


图 10 链式喂入机构主视图

Fig. 10 Front view of chain-type feeding mechanism

$$D_w > 2b \tag{11}$$

由表 2 可知,菠萝果实最大直径为 117 mm,为避免极端情况发生,设置每对链条间距离 D_w 为 130 mm。

导向板安装在喂入链下方,前端开有宽度逐渐变窄的 U 形槽口,其作用是在抬升过程中使菠萝茎秆保持竖直姿态,且位于槽口中央,以保证菠萝果实正对拨果指。采收机前进时,茎秆携带叶片沿槽口向内运动,叶片受槽口壁面作用力向中间聚拢,茎秆被固定,采摘果实后,导向板起到承接作用,防止菠萝果实掉落。

导向板槽口宽度过小,繁密的叶片会阻碍茎秆向内运动,造成堵塞;反之,两侧槽口壁面无法聚拢叶片,在采摘时菠萝植株茎秆容易发生侧弯,影响采摘效果。茎秆直径 d 为 16 ~ 23 mm,考虑叶片厚度对堵塞的影响,通过试验得槽口最小宽度 D 为 40 mm。

菠萝茎秆韧性强且硬,难以通过导向板槽口末端,且收获后的菠萝植株可用于培养侧芽,采收时需避免植株严重损伤[18],因此摘果后应确保植株完整性,为使收获后的残株从槽口末端正下方顺利通过,工作时槽口末端离地高度 H_2 应满足

$$H_2 > h \tag{12}$$

参考菠萝植株平均尺寸,H_2 取 270 mm。

2.5 拨果机构设计

拨果机构主要由拨果杆安装盘、链轮、链条、拨果指和伺服电机(中大力德 YBLD500 型)等组成,拨果杆活动连接于两侧拨果杆安装盘,在拨果杆上设置拨果指,通过链条与链轮啮合,使拨果指末端始终竖直向下,其作用是对抬升至合适位置的菠萝果实施加倾覆力矩,配合抬升推板提供的力矩收获果实,其转速可由伺服电机独立控制,如图 11 所示。

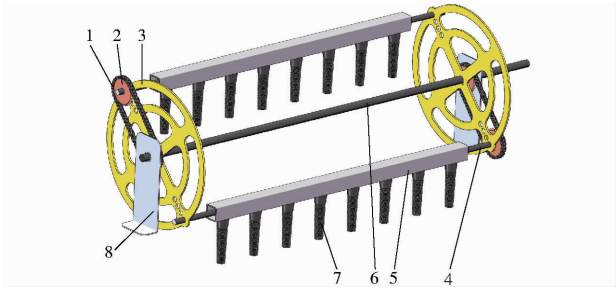


图 11 拨果机构结构示意图

Fig. 11 Schematic of fruit-sorting mechanism

1. 链条 2. 链轮 3. 拨果杆安装盘 4. 拨果杆 5. 方形轴套 6. 转轴 7. 拨果指 8. 底座

3　采摘临界受力与碰撞力学分析

3.1　采摘临界受力分析

链式喂入机构将菠萝果实抬升至最大高度时，拨果指与抬升推板共同作用并施加足够大的压力于菠萝果实表面，使果实与茎秆分离，为防止果实表面损伤，需要将两者速度调整至合适值。

当菠萝果实被抬升至合适范围时，拨果指应恰好与果实接触，因此抬升推板将果实抬升至最大高度所需时间 t_1 和拨果指旋转至与菠萝果实接触点所需时间 t_2 应满足

$$t_1 = t_2 \tag{13}$$

其中

$$\begin{cases} t_1 = \dfrac{K_1 d_z}{\omega_1 R_L} \\ t_2 = \dfrac{(K_2 + 1)\pi R_p}{\omega_2 R_p} \end{cases} \tag{14}$$

式中　K_1——抬升推板运动时间系数

K_2——拨果杆安装盘旋转时间系数

ω_2——拨果杆安装盘角速度，rad/min

R_p——拨果杆安装盘半径，mm

d_z——抬升推板间距，mm

此时菠萝植株茎秆及叶片固定在导向板槽口中央，当施加在果实表面的压力在花萼处产生的力矩大于断裂力矩，果实将与茎秆分离，将分离前这一时刻视为成功采摘临界状态。

假设在临界状态下，接触点与菠萝果实质心连线夹角成 θ，受力图如图 12 所示。图中点 O_1 为花萼中心；点 O_2 为拨果指的旋转中心；点 O_3 为拨果机构的旋转中心；点 O_4 为菠萝果实横截面的椭圆中心点；点 A 为拨果指与菠萝果实接触点；F_1 为拨果指与菠萝果实接触力；F_p 为拨果杆安装盘外圈切向力；F_2 为抬升推板与菠萝果实接触力；n_2 为拨果杆安装盘转速；d_1 为果实所受作用力 F_1 的力臂；d_2 为果实所受推板作用力 F_2 的力臂；H_r 为拨果机构的旋转中心与花萼中心的高度差；L 为拨果指旋转中心与接触点高度；γ 为力 F_1 与 X 轴的夹角；ε 为力 F_p 与 X 轴负方向夹角。

菠萝几何形状呈椭球体特征[19]，为分析拨果指和抬升推板的接触力对菠萝果实产生的力矩，将菠萝中心截面近似为椭圆形，并以花萼连接点为原点构建直角坐标系，可求得菠萝中心截面外轮廓方程为

$$\frac{(y-a)^2}{a^2} + \frac{x^2}{b^2} = 1 \tag{15}$$

式中　a——菠萝中心截面外轮廓长轴长度，mm

b——菠萝中心截面外轮廓短轴长度，mm

临界状态下接触点 A 与菠萝几何中心 O_4 之间的连线 AO_4 与点 A 坐标 (x_A, y_A) 位置关系满足

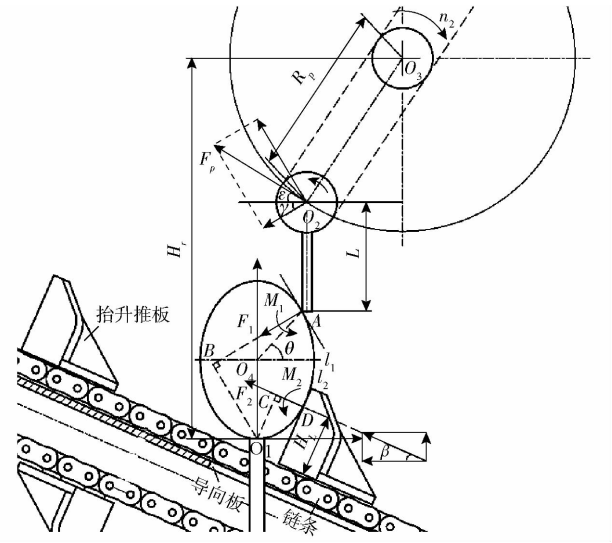


图 12　联合采摘装置瞬时受力图

Fig. 12　Instantaneous force distribution diagram of integrated harvesting mechanism

$$\begin{cases} y_A = kx_A + a \\ \dfrac{(y_A - a)^2}{a^2} + \dfrac{x_A^2}{b^2} = 1 \\ k = \tan\theta \end{cases} \tag{16}$$

式中　k——直线 AO_4 斜率

对式(15)求导得菠萝中心截面外轮廓上任意一点斜率为

$$y' = -\frac{2ax}{2b^2(y-a)} \tag{17}$$

拨果指和菠萝果实接触面与菠萝果实上表面相切，即点 $A(x_A, y_A)$ 在椭圆切线 l_1 上。同样，抬升推板与菠萝果实下表面相切，即点 $D(x_D, y_D)$ 在椭圆切线 l_2 上。则直线 l_1、l_2 斜率满足

$$k_1 = -\frac{ax_A}{b^2(y_A - a)} \tag{18}$$

$$k_2 = -\frac{1}{\tan(\pi - \beta)} \tag{19}$$

过力臂 d_1、d_2 直线方程满足

$$y = -\frac{ax_A}{b^2(y_A - a)}x \tag{20}$$

$$y = -\frac{1}{\tan(\pi - \beta)}x \tag{21}$$

力 F_1 的延长线与力臂 BO_1 垂直，力 F_2 的延长线与力臂 EO_1 垂直，得力 F_1、F_2 所在直线方程分别为

$$y = \frac{b^2(y_A - a)(1 - x_A)}{ax_A}x + y_A \tag{22}$$

$$y = -x\tan\beta + a \tag{23}$$

联立式(20)～(23)可得点 B 和点 D 坐标分别为 (x_B, y_B)、(x_D, y_D)。拨果指施加于菠萝果实力矩

力臂长度 d_1 和抬升推板施加于菠萝果实力矩力臂长度 d_2 分别为

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{x_B^2 + y_B^2} \\ d_2 = \sqrt{x_D^2 + y_D^2} \end{cases} \tag{24}$$

根据几何关系可得，力 F_1 与 X 轴的夹角 γ、力 F_p 与 X 轴负方向夹角 ε 计算式为

$$\begin{cases} \gamma = \arctan \dfrac{b_2(y_A - a)}{a x_A} \\ \varepsilon = \arccos \dfrac{H_r - L - y_A}{R_P} \end{cases} \tag{25}$$

力 F_1 与 F_p 几何关系为

$$F_1 = F_p \cos(\gamma + \varepsilon) \tag{26}$$

其中

$$F_p = \frac{M_p}{R_p}$$

$$M_p = \frac{60 P_w \eta}{\omega_2}$$

$$\omega_2 = 2\pi n_2 \tag{27}$$

式中 M_p——伺服电机扭矩，取 58 N·m

η——伺服电机功率损失系数，取 0.75

P_w——伺服电机额定功率，W

抬升推板与果实接触力 F_2 满足

$$F_2 = \frac{M_p}{R_L + H_L} \tag{28}$$

其中

$$M_p = \frac{60 P_w \eta}{\omega_1}$$

菠萝果实被抬升至茎秆完全伸直时，抬升推板对菠萝果实作用力 F_2 应满足

$$F_2 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \geqslant G - F_N \tag{29}$$

式中 G——菠萝果实平均重力，N

F_N——茎秆对菠萝果实的支持力，N

菠萝果实质量计算公式为

$$m_1 = \rho V \tag{30}$$

其中

$$V = \frac{2\pi a b^2}{3}$$

式中 ρ——菠萝果实平均密度，kg/m^3

m_1——菠萝果实质量，kg

菠萝果实受拨果指和抬升推板作用力力矩 M_1 和 M_2 分别为

$$\begin{cases} M_1 = F_1 d_1 \\ M_2 = F_2 d_2 \end{cases} \tag{31}$$

为达到果实断裂临界点，合力矩 M 应满足

$$M = M_1 + M_2 \geqslant M_t \tag{32}$$

合力矩 M 为 θ、β、n_1 和 n_2 的函数，可表示为 $M = f(\theta, \beta, n_1, n_2)$，其中当 $\theta = 45°$、$\beta = 23°$ 时，合力矩应大于菠萝采摘断裂扭矩 M_t，由文献[20]可知 $M_t = 3.67$ N·m。

$$M = f(45°, 23°, n_1, n_2) \geqslant M_t \tag{33}$$

即 $M \geqslant 3.67$ N·m。

3.2 碰撞力学分析

采收时碰撞是水果表面损伤的主要原因[21-22]。采摘力矩偏大，将导致采摘后果实与链条或导向板发生严重挤压，造成果实表面损伤。经试验观察，采摘后大部分果实与导向板碰撞，且接触位置为短轴端点，随后经链式喂入机构输送至挡板输送链。

建立菠萝果实与导向板的碰撞模型，分析菠萝果实与导向板接触过程中发生碰撞损伤临界工作参数。菠萝果实花冠质量小，所受摩擦力较小，且菠萝果实近似椭球体，分析中将菠萝果实与导向板碰撞时的碰撞截面视为一个椭圆与平面接触碰撞。

假设菠萝果实被联合采摘装置拨断后，与导向板接触位置为外轮廓椭圆短轴恰好与导向板垂直处，如图 13 所示。图中点 O_4' 为菠萝果实处于碰撞临界时质心位置；v_1 为抬升推板速度；v_2 为拨果指速度；v_n 为质心与导向板垂直法向分速度。

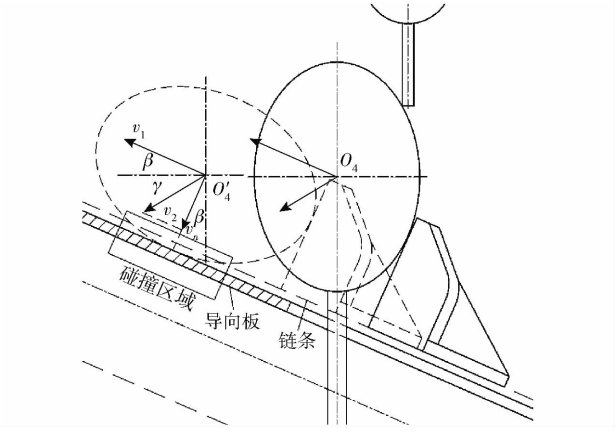


图 13 碰撞分析

Fig. 13 Impact dynamics diagram

菠萝果实在与抬升推板和拨果指接触后，可分别将二者视为共速整体，果实质心速度为抬升推板速度 v_1 与拨果指速度 v_2 矢量和。果实处于碰撞临界时，由于受联合采摘装置力矩翻转后质心位置高度变化较小，为方便计算，可忽略不计。而 v_1 与导向板平行，在导向板法向投影为 0。根据能量守恒，菠萝果实处于碰撞临界时相对导向板质心速度 v_2 为

$$v_2 = \omega_2 R_L \tag{34}$$

与导向板垂直法向分速度为

$$v_n = v_2 \cos\left(\frac{\pi}{2} - (\gamma + \beta)\right) \tag{35}$$

菠萝果实表面光滑无黏着，根据弹性力学中的赫兹理论[23-24]可知，接触压力与变形量之间关系为

$$F = \frac{4}{3} E^* R^{\frac{1}{2}} \Delta\delta^{\frac{3}{2}} \tag{36}$$

式中　E^*——等效弹性模量，MPa

R——等效半径，mm

$\Delta\delta$——压缩变形量，mm

菠萝与导向板的接触可近似为椭圆球与平面的外接触，即菠萝果实碰撞接触半径为短轴端点处曲率。导向板为平面，且碰撞时无位移发生，其半径和质量均可视为无限大。则等效半径、等效质量和等效弹性模量分别满足

$$\begin{cases}\dfrac{1}{R}=\dfrac{1}{R_1}+\dfrac{1}{R_2}\\ \dfrac{1}{m}=\dfrac{1}{m_1}+\dfrac{1}{m_2}\\ \dfrac{1}{E^*}=\dfrac{1-\mu_1^2}{E_1}+\dfrac{1-\mu_2^2}{E_2}\end{cases}\tag{37}$$

式中　E_1——菠萝果实弹性模量，取 0.48 MPa[13]

E_2——导向板弹性模量，取 124 000 MPa

R_1——菠萝果实短轴端点曲率，mm

R_2——导向板曲率，mm

m_2——导向板质量，kg

μ_1——菠萝果实泊松比，取 0.46

μ_2——导向板泊松比，取 0.25

当菠萝果实与导向板发生碰撞时，根据牛顿第二定律可得

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}(v_n-v_1)}{\mathrm{d}t}=\dfrac{\mathrm{d}^3\Delta\delta}{\mathrm{d}t^2}\\ v_t=0\end{cases}\tag{38}$$

式中　v_t——果实碰撞后相对导向板速度，m/s

联立式(35)～(38)得

$$m\frac{\mathrm{d}^2\delta}{\mathrm{d}t^2}=\frac{4}{3}E^*R^{\frac{1}{2}}\Delta\delta^{\frac{3}{2}}\tag{39}$$

对式(39)两边同时对 δ 积分得

$$\frac{1}{2}m\left[v_n^2-\left(\frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}t}\right)^2\right]=\frac{8E^*R^{\frac{1}{2}}}{15}\Delta\delta^{\frac{5}{2}}\tag{40}$$

最大变形量 $\Delta\delta_{\max}$ 为

$$\Delta\delta_{\max}=\left(\frac{15mv_n^2}{16R^{\frac{1}{2}}E^*}\right)^{\frac{2}{5}}\tag{41}$$

联立式(36)、(37)、(41)得菠萝果实与导向板碰撞时的最大撞击力 $F_{\max}$ 为

$$F_{\max}=\frac{4}{3}E^*R^{\frac{1}{2}}\left(\frac{15mv_n^2}{16R^{\frac{1}{2}}E^*}\right)^{\frac{3}{5}}\tag{42}$$

通过文献[25]可知菠萝果实临界损伤力 F_{cr} 为 50 N，为避免菠萝果实碰撞损伤，应满足

$$F_{\max}\leqslant F_{cr}\tag{43}$$

联立式(27)、(34)、(35)、(42)、(43)可得拨果杆安装盘转速 n_2 应满足

$$n_2\leqslant\frac{\sqrt{\left(\dfrac{3F_{cr}}{4E^*R^{\frac{1}{2}}}\right)^{\frac{5}{3}}\dfrac{16R^{\frac{1}{2}}E^*}{15m}}}{2\pi R_p\cos\left(\dfrac{\pi}{2}-(\gamma+\beta)\right)}\tag{44}$$

可解得 $n_2\leqslant 62$ r/min。

4　试验与结果分析

4.1　试验材料与设备

为确定链喂入式菠萝采收机构各部件最佳组合参数，于 2024 年 12 月在华南农业大学进行性能试验。选用神湾菠萝果实作为试验材料，选择合适的田块等间距种植带果植株后进行试验。

4.2　试验方法

选取分苗器倾角、转速比、喂入链轮转速作为试验因素。拨果机构转速过大，将导致菠萝果实受损，反之，菠萝果实无法进入联合采摘装置中。综上所述，选取分苗器倾角为 20°～28°、转速比为 0.5～1.0、喂入链轮转速为 30～60 r/min 探究最佳工作参数组合，并选取不同工作参数下果实采净率、损伤率作为试验指标，判断链喂入式菠萝采收机采摘效果。

由于菠萝果实损伤主要为果肉，采收后无法立即判断损伤情况，因此将采收后菠萝果实在恒温 20℃条件下储藏 3 d，切开果实可能损伤的位置，观察果肉是否变色。未损伤果肉颜色与采收时基本一致，而损伤果肉呈黄褐色。定义：若菠萝果肉变色直径为 0～20 mm，则算作 50% 的损伤，变色直径大于 20 mm 算作 100% 的损伤[20]。

采净率 Y_1 和损伤率 Y_2 计算式为

$$\begin{cases}Y_1=\dfrac{N_1}{N_1+N_2}\times 100\%\\ Y_2=\dfrac{S_2}{S_1+S_2}\times 100\%\end{cases}\tag{45}$$

式中　N_1——成功收获菠萝植株数量

N_2——未成功收获菠萝植株数量

S_1——成功收获未损伤菠萝数量

S_2——成功收获菠萝损伤数量

采用 Box－Behnken 试验设计方法进行三因素三水平响应面试验，分析采摘效果，试验因素编码如表 3 所示。

表 3　试验因素编码

Tab. 3　Test factors code

编码	因素		
	分苗器倾角/(°)	转速比	喂入链轮转速/(r·min^{-1})
－1	20	0.50	30
0	24	0.75	45
1	28	1.00	60

每组试验种植 30 株菠萝植株,并在每组试验完成后记录该组试验数据。

4.3 多因素试验结果分析

正交试验结果如表 4 所示。x_1、x_2、x_3为分苗器倾角、转速比、喂入链轮转速编码值。

表 4 试验方案与结果

Tab. 4 Program and results of experiment

试验序号	因素			Y_1/%	Y_2/%
	x_1	x_2	x_3		
1	-1	0	-1	70.0	5.0
2	0	1	1	66.6	15.0
3	0	0	0	90.0	9.3
4	1	0	1	83.3	12.5
5	0	1	-1	63.3	5.3
6	1	-1	0	80.0	8.3
7	-1	-1	0	76.6	8.7
8	0	-1	-1	56.6	4.4
9	0	0	0	90.0	7.7
10	1	0	-1	70.0	4.8
11	0	-1	1	66.6	11.1
12	-1	1	0	83.3	9.6
13	-1	0	1	73.3	13.0
14	1	1	0	86.6	9.6
15	0	0	0	90.0	9.3
16	0	0	0	93.3	8.7
17	0	0	0	90.0	8.7

通过 Design-Expert 13.0 软件对试验数据进行二次回归分析和方差分析,得果实采净率 Y_1和损伤率 Y_2回归方程为

$$Y_1 = 90.66 + 2.09x_1 + 2.50x_2 + 3.74x_3 - 0.025x_1x_2 + 2.5x_1x_3 - 1.67x_2x_3 + 0.92x_1^2 - 9.96x_2^2 - 17.43x_3^2 \quad (46)$$

$$Y_2 = 8.74 - 0.137\,5x_1 + 0.875x_2 + 4.01x_3 + 0.10x_1x_2 - 0.075x_1x_3 + 0.75x_2x_3 + 0.092\,5x_1^2 + 0.217\,5x_2^2 - 0.007\,5x_3^2 \quad (47)$$

采净率 Y_1和损伤率 Y_2方差分析结果如表 5、6 所示。两回归模型 P 均小于 0.000 1,影响极显著,表明回归模型方程拟合较好,可信度高;失拟项 P 均不显著,说明试验无失拟因素存在,回归模型能充分反映实际情况。由表 5、6 及式(46)、(47)可得,各因素对果实采净率和损伤率的影响由大到小为喂入链轮转速、转速比、分苗器倾角。为了更直观地观察到各因素交互作用对试验指标的影响,运用 Design-Expert 13.0 软件绘制各因素对果实采净率和损伤率的 3D 响应曲面,如图 14 所示。

由图 14a 可知,采净率随着喂入链轮转速增大先增大后减小,分析其原因是,当转速增大时,相同时间内果实相对地面位移增大,被喂入所需时间缩短,采摘成功率提高,当转速大于一定值时,菠萝还未进入喂入区域时抬升推板已转动一周,无法将菠萝果实喂入,采净率下降。

表 5 果实采净率回归模型方差分析

Tab. 5 Analysis of variance in regression models for fruit harvest completeness rate

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	2 012.65	9	223.63	92.74	<0.000 1 **
x_1	34.86	1	34.86	14.46	0.006 7 **
x_2	50.00	1	50.00	20.74	0.002 6 **
x_3	111.75	1	111.75	46.34	0.000 3 **
x_1x_2	0.002 5	1	0.002 5	0.001 0	0.975 2
x_1x_3	25.00	1	25.00	10.37	0.014 7 *
x_2x_3	11.22	1	11.22	4.65	0.067 9
x_1^2	3.56	1	3.56	1.48	0.263 5
x_2^2	417.27	1	417.27	173.04	<0.000 1 **
x_3^2	1 279.18	1	1 279.18	530.48	<0.000 1 **
残差	16.88	7	2.41		
失拟差	8.17	3	2.72	1.25	0.402 8
纯误差	8.71	4	2.18		
总和	2 029.53	16			

注:* 表示差异显著($0.01 \leqslant P < 0.05$),** 表示差异极显著($P < 0.01$)。下同。

表 6 果实损伤率回归模型方差分析

Tab. 6 Analysis of variance in regression models for fruit damage rate

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	137.64	9	15.29	40.71	<0.000 1 **
x_1	0.151 3	1	0.151 3	0.402 6	0.545 9
x_2	6.13	1	6.13	16.31	0.004 9 **
x_3	128.80	1	128.80	342.88	<0.000 1 **
x_1x_2	0.040 0	1	0.040 0	0.106 5	0.753 7
x_1x_3	0.022 5	1	0.022 5	0.059 9	0.813 7
x_2x_3	2.25	1	2.25	5.99	0.044 3 *
x_1^2	0.036 0	1	0.036 0	0.095 9	0.765 8
x_2^2	0.199 2	1	0.199 2	0.530 2	0.490 1
x_3^2	0.000 2	1	0.000 2	0.000 6	0.980 7
残差	2.63	7	0.375 6		
失拟差	0.917 5	3	0.305 8	0.714 6	0.592 6
纯误差	1.71	4	0.428 0		
总和	140.26	16			

由图 14b 可知,损伤率与转速比和喂入链轮转速呈正相关,因为当转速比和喂入链轮转速增大时,拨果指与果实表面接触力增大,拨果后果实与导向板和喂入链的撞击力也增大,损伤率提高。

为获得链喂入式菠萝采收机最佳工作参数组合,对试验因素进行优化设计,将采净率比重设置为 3 个“+”、损失率设置为 1 个“+”,遵循提高采净率、降低果实损伤率设计原则,以采净率最大,损伤率最小为目标函数,结合试验因素边界条件,建立参

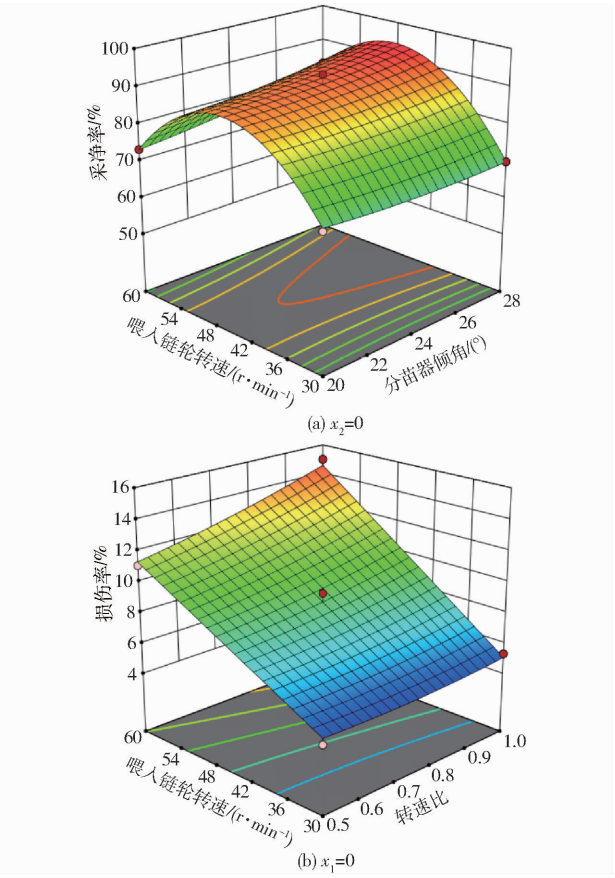


图 14　试验因素对果实采净率和损伤率影响的响应曲面

Fig. 14　Response surfaces of influence of test factors on fruit harvest completeness rate and fruit damage rate

数约束目标函数为

$$\begin{cases} \max Y_1(x_1,x_2,x_3) \\ \min Y_2(x_1,x_2,x_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant x_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant x_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant x_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{48}$$

基于 Design-Expert 软件中的多目标参数优化模块对数学模型进行分析求解，可得优化结果为：分苗器倾角 28°、转速比 0.76、喂入链轮转速 44.1 r/min，此时，采净率为 93.3%，损伤率为 8.49%。对回归模型最优工作参数组合取整，得到最优参数组合为：分苗器倾角 28°、转速比 0.75、喂入链轮转速 44 r/min。根据优化结果进行试验验证，工作过程如图 15 所示。



图 15　菠萝采收试验场景

Fig. 15　Pineapple picker test scene

完成 6 组验证试验得出：果实采净率为 92.22%，损伤率为 7.1%，与优化结果基本一致。

5　结论

（1）针对现有菠萝采收装置存在采净率低、损伤率高等问题，设计了一种链喂入式菠萝采收机。对关键部件完成了结构设计和参数分析。

（2）采用 Box－Behnken 试验设计方法，以分苗器倾角、转速比、喂入链轮转速为试验因素，以采净率和损伤率为试验指标进行三因素三水平试验，运用 Design-Expert 软件分析二次回归正交组合试验结果，采用多目标优化方法得出最优参数组合为：分苗器倾角 28°、转速比 0.76、喂入链轮转速 44.1 r/min，此时，采净率为 93.3%，损伤率为 8.49%。

（3）试验结果表明，采用分苗器倾角为 28°、转速比为 0.75、喂入链轮转速为 44 r/min 作为工作参数组合，菠萝果实采净率为 92.22%，损伤率为 7.1%，整体作业效果良好，满足作业要求。

参　考　文　献

[1]　方伟. 广东省菠萝产业现状及发展建议[J]. 中国果树，2023(6)：123－126.

[2]　廖劲威，朱余，罗阔，等. 菠萝采摘机械化的发展探索[J]. 现代农业装备，2014，35(5)：56－59.
LIAO Jingwei，ZHU Yu，LUO Kuo，et al. Exploring the development of pineapple harvesting mechanization[J]. Modern Agricultural Equipment，2014，35(5)：56－59.(in Chinese)

[3]　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. Frontier of pineapple planting and harvesting mechanization in the world[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition)，2021，41(3)：110－120.(in Chinese)

[4]　杨晓宏，严程明，张江周，等. 中国滴灌施肥技术优缺点分析与发展对策[J]. 农学学报，2014，4(1)：76－80.
YANG Xiaohong，YAN Chengming，ZHANG Jiangzhou，et al. The analysis of advantages and disadvantages of fertigation technology and development strategies in China[J]. Journal of Agriculture，2014，4(1)：76－80.(in Chinese)

[5]　陈敏忠，郑爽，邓干然，等. 湛江市菠萝田间生产机械化需求分析与展望[J]. 现代农业装备，2021，42(2)：18－21.
CHEN Minzhong，ZHENG Shuang，DENG Ganran，et al. Analysis and prospect of pineapple mechanized production in Zhanjiang

[J]. Modern Agricultural Equipment,2021,42(2):18 – 21. (in Chinese)
[6] 崔振德, 李玲, 邓干然, 等. 我国菠萝机械化栽植装备研发应用现状及展望[J]. 现代农业装备, 2024, 45(5):2 – 7.
CUI Zhende,LI Ling,DENG Ganran,et al. Application status and future trend of mechanized planting technology and equipment for pineapple in China[J]. Modern Agricultural Equipment,2024,45(5):2 – 7. (in Chinese)
[7] HE F, ZHANG Q, DENG G, et al. Research status and development trend of key technologies for pineapple harvesting equipment: a review[J]. Agriculture,2024,14(7):975.
[8] 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 machinery in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2024,45(12):66 – 72. (in Chinese)
[9] LI B,WANG M. In-field recognition and navigation path extraction for pineapple harvesting robots[J]. Intelligent Automation & Soft Computing,2013,19(1):99 – 107.
[10] 林桂潮, 吴志铭, 严茂森, 等. 基于机器视觉的多机械臂菠萝采摘机器人设计与试验[J]. 机电工程技术, 2023, 52(10):141 – 144,154.
LIN Guichao,WU Zhiming,YAN Maosen,et al. Design and testing of a multi-arm pineapple picking robot based on machine vision[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology,2023,52(10):141 – 144,154. (in Chinese)
[11] 杨娜, 李秀平, 张艳来, 等. 基于视觉技术的菠萝采摘机器人设计[J]. 广东水利电力职业技术学院学报, 2023, 21(4):9 – 12,39.
YANG Na,LI Xiuping,ZHANG Yanlai,et al. The design of pineapple picking robot: based on vision technology[J]. Journal of Guangdong Polytechnic of Water Resources and Electric Engineering,2023, 21(4):9 – 12,39. (in Chinese)
[12] 王宏轩, 陈志轩, 张秀梅, 等. 差速梳齿式菠萝采收机的设计及试验研究[J]. 农机化研究, 2024, 46(9):115 – 120,127.
WANG Hongxuan,CHEN Zhixuan,ZHANG Xiumei,et al. Design and experimental study of differential speed comb type pineapple harvesting machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2024, 46(9):115 – 120,127. (in Chinese)
[13] 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)
[14] 高勇, 苟利军, 李沐桐, 等. 菠萝自动化采收技术与装备研究现状与展望[J]. 现代农业装备,2025,46(1):1 – 9.
GAO Yong,GOU Lijun,LI Mutong,et al. Research status and prospects of automated pineapple harvesting technology and equipment[J]. Modern Agricultural Equipment,2025,46(1):1 – 9. (in Chinese)
[15] 王宏轩, 李海亮, 张秀梅, 等. 菠萝生产全程机械化技术与装备研究进展[J]. 农机化研究,2025,47(9):283 – 292.
WANG Hongxuan,LI Hailiang,ZHANG Xiumei,et al. Research progress of the whole process of pineapple production mechanization technology and equipment[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2025,47(9):283 – 292. (in Chinese)
[16] 刘天湖, 麦宝锋, 张锦翀, 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)
[17] 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)
[18] 郑爽, 邓干然, 崔振德, 等. 高地隙履带自走式菠萝采收车的设计[J]. 现代农业装备, 2020, 41(6):29 – 32.
ZHENG Shuang,DENG Ganran,CUI Zhende,et al. Design of self-propelled pineapple harvest truck with high gap crawler[J]. Modern Agricultural Equipment,2020, 41(6):29 – 32. (in Chinese)
[19] BHAT K, CHAYALAKSHMI C L. Microcontroller-based semiautomated pineapple harvesting system[C]// International Conference on Mobile Computing and Sustainable Informatics: ICMCSI 2020,2021: 383 – 392.
[20] 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. Working principle and design of the multi-flexible fingered roller pineapple harvesting mechanism[J]. Transactions of the CSAE,2022,38(8):21 – 26. (in Chinese)
[21] 杨德秋, 汪昕, 刘萌萌, 等. 自走式马铃薯捡拾装袋机设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(1):85 – 95.
YANG Deqiu, WANG Xin, LIU Mengmeng, et al. Design and experiment of self-propelled potato collecting and bagging machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(1):85 – 95. (in Chinese)
[22] 陈天赐, 张世昂, 付根平, 等. 热带水果采摘机器人研究进展综述[J]. 农业机械学报,2025,56(5):184 – 201.
CHEN Tianci, ZHANG Shiang, FU Genping, et al. Review of research progress on tropical fruit harvesting robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(5):184 – 201. (in Chinese)
[23] 彭才望, 周婷, 宋世圣, 等. 基于 Hertz 接触理论的黑水虻幼虫碰撞恢复系数测定[J]. 农业机械学报,2021,52(11):125 – 134.
PENG Caiwang, ZHOU Ting, SONG Shisheng, et al. Measurement and analysis of restitution coefficient of black soldier fly larvae in collision models based on Hertz contact theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 125 – 134. (in Chinese)
[24] 梅雪峰, 胡卸文, 罗刚, 等. 基于弹塑性理论的落石碰撞恢复系数和峰值冲击力研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(8):14 – 20.
[25] DU X,YANG X,JI J,et al. Design and test of a pineapple picking end-effector[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2019, 35(6): 1045 – 1055.