

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.S1.017

# 甘薯秧蔓收获特性试验装置研究

李涛<sup>1,2</sup> 魏训成<sup>1,2</sup> 姜伟<sup>1,2</sup> 李娜<sup>1,2</sup> 张华<sup>1,2</sup> 周进<sup>1,2</sup>

(1. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250100; 2. 农业农村部黄淮海现代农业装备重点实验室, 济南 250100)

**摘要:** 针对甘薯秧蔓收获过程中输送通道堵塞、功耗大、作业参数采集难等问题, 研究设计了在不同喂入速度、夹持输送速度和切割速度下甘薯秧蔓收获特性试验装置。试验装置由喂入装置、割台装置和控制系统组成, 喂入速度、夹持输送速度和切割速度可调整。以秧蔓收净率、切割力和切割扭矩为目标值, 对喂入速度、夹持输送速比和切割速度等影响因素进行了中心组合试验和验证试验。建立了响应面数学模型, 分析了各因素对作业性能的影响, 同时, 对影响因素进行了综合优化。试验结果表明: 收净率影响显著性主次顺序为夹持输送速比、喂入速度、切割速度, 切割力和切割扭矩影响显著性主次顺序为切割速度、夹持输送速比、喂入速度; 其最优工作参数组合为喂入速度 0.55 m/s、夹持输送速比 1.48、切割速度 1.50 m/s 时, 收净率为 91.0%、切割力为 152.89 N、切割扭矩为 5.87 N·m, 验证试验表明实测值与理论优化值误差小于 5%。

**关键词:** 甘薯秧蔓; 收获特性; 试验台

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)S1-0166-10

## Test Bench Study on Harvesting Characteristics of Sweet Potato Vines

LI Tao<sup>1,2</sup> WEI Xuncheng<sup>1,2</sup> JIANG Wei<sup>1,2</sup> LI Na<sup>1,2</sup> ZHANG Hua<sup>1,2</sup> ZHOU Jin<sup>1,2</sup>

(1. Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Ji'nan 250100, China

2. Huang Huai Hai Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment,  
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Ji'nan 250100, China)

**Abstract:** Sweet potato vines grow lush, and crawl seriously, which are hard to be separated. Manual cutting of vines was characterized by high labor intensity, high cost and low efficiency, which affected the normal harvest operation. For the problems of transport device blockage, large power consumption and difficulty of collecting operating parameters in the harvest process, the sweet potato vines harvesting test bench was designed. The test bench consisted of feeding device, cutting table device and control system, and the feeding velocity, the clipping velocity and the cutting velocity can be adjusted. Sweet potato vines cleaning rate, cutting force, and cutting torque were the main indicators of evaluating the test bench. The tests were grouped the response surface tests and the verifying tests. The testing factors were the feeding velocity (ranging from 0.3 m/s to 0.8 m/s), the ratio of clipping velocity to feeding velocity (ranging from 1.03 to 1.87) and the cutting velocity (ranging from 0.96 m/s to 1.64 m/s), and five levels was set for each factor. The response surface testing scheme designed with the central composite design (CCD) method was a three-factor five-level testing scheme. The mathematical model of the response surface was established, and the influence of each factor on the bench operation performance was analyzed and optimized. The result showed that when the feeding velocity was small, the ratio of clipping velocity to feeding velocity was high and there was a moderate cutting velocity. As such, the overall impact trend of the vines cleaning rate was high. When the cutting velocity was high, the cutting force and the cutting torque was small. The feeding velocity and the ratio of clipping velocity to feeding velocity had no significant impact on the cutting force and the cutting torque. The experiment results also showed that the order of the factors affecting of the vines cleaning rate was ratio of clipping velocity, feeding velocity, and cutting velocity. The order of the main factors affecting of the cutting force and the

收稿日期: 2022-06-01 修回日期: 2022-07-02

基金项目: 山东省薯类产业技术体系农业机械试验站项目(SDAIT-16-13)

作者简介: 李涛(1972—), 男, 研究员, 主要从事农作物收获装备研究, E-mail: 228836007@qq.com

通信作者: 李娜(1983—), 女, 工程师, 主要从事农作物收获装备研究, E-mail: 107141301@qq.com

cutting torque was cutting velocity, ratio of clipping velocity, and feeding velocity. It was concluded that the optimal combination of the working parameters of the bench was as follows: 0.55 m/s for the feeding velocity, 1.48 for the ratio of clipping velocity to feeding velocity, 1.50 m/s for the cutting velocity, 91.0% for the cleaning rate, 152.89 N for the cutting force, 5.87 N·m for the cutting torque. By comparing the mathematical model and the experimental result, the error was less than 5%, which meant that the model established was reliable and could be used for optimization.

**Key words:** sweet potato vines; harvesting characteristics; test bench

## 0 引言

甘薯藤蔓生长茂盛,且匍匐缠绕严重、不宜分离,人工割除秧蔓劳动强度大、成本高、效率低,影响甘薯的正常收获<sup>[1-4]</sup>。

近些年来,随着收获技术的快速发展,国外已经将液压技术、自动控制技术等应用于甘薯秧蔓收获,秧蔓机采用液压驱动使其结构更紧凑、性能更稳定,自动控制可根据作业状况调整割刀速度和夹持链输送速度,使整机作业精度及作业效率大幅提高。甘薯秧蔓处理机械的发展已经进入联合收获阶段,日本研制的自走式甘薯去蔓机可以一次性完成甘薯秧蔓的收割、输送、粉碎和集箱等工作,集成度和效率较高<sup>[5-7]</sup>。

目前,国内甘薯去蔓机械的发展严重滞后,缺乏高效专用的机具,以粉碎型去蔓机为主,不能满足茎叶收集和回收要求,而且击碎茎叶时有可能损伤薯块。郑州山河机械制造有限公司研制的4UJH型甘薯去蔓机根据垄作甘薯种植模式,其仿形刀可一次性完成秧蔓的切割、粉碎和还田等工作。国内主要集中在小规模推广和中小型机械研制上,液压技术和自动化技术应用较少,收集型秧蔓处理机械鲜有报道,与发达国家相比存在较大的差距。

考虑到作物茎秆收获具有季节性强和种植模式差别大等特点,如果在田间直接进行作业参数获取,存在可重复性差、精度低和随机性强等问题,因此为了获得高精度的作物茎秆作业参数,研制试验装置很有必要。文献[8-9]研究的秸秆试验装置,只是模拟了作物秸秆收获时的切割过程,获取切割试验参数,没有根据田间收获实际状况,进行作物秸秆喂入、切割和夹持输送的全过程试验模拟和试验数据获取。

针对以上秸秆去蔓机械和试验装置存在的问题,根据甘薯秧蔓生理性状和收获特点,设计甘薯秧蔓收获试验台,一次性完成甘薯秧蔓的喂入、夹持、切割、输送和平铺等作业,进行不同喂入速度、夹持输送速度和切割速度等收获作业参数的相关试验,以深入研究甘薯秧蔓收获性能指标。

## 1 结构与工作原理

### 1.1 整体结构

甘薯秧蔓收获试验台由喂入装置、割台装置和控制系统组成。喂入装置包括喂入机架和喂入传动装置;割台装置包括夹持输送装置、切割装置、割台动力装置和割台机架;夹持输送装置包括夹持链总成、传动机构、链罩总成和输送带总成;切割装置包括切割机构和摆环机构;割台动力装置包括主传动箱总成和中间轴总成。控制系统由喂入测控系统、输送测控系统和切割测控系统组成,包括控制器、触摸屏、变频电机、扭矩传感器和拉压传感器等。试验台结构如图1所示<sup>[10-14]</sup>。

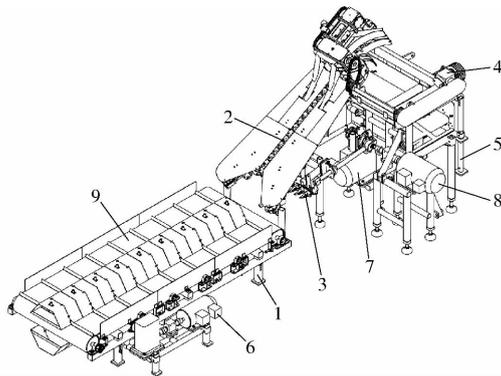


图1 甘薯秧蔓收获试验台结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of sweet potato vine harvest test bench

1. 喂入机架 2. 夹持输送装置 3. 切割装置 4. 割台动力装置
5. 割台机架 6. 喂入测控系统 7. 输送测控系统 8. 切割测控系统 9. 喂入传动装置

### 1.2 主要工作原理

试验台工作原理框图如图2所示,启动试验台开始工作时,设定甘薯秧蔓喂入速度、切割速度和夹持输送速度,控制器根据系统设定速度,启动变频电机,驱动喂入装置、切割装置和输送装置工作,喂入装置将平铺固定在其垄行座上的秧蔓运输到割台,夹持输送装置扶正倒伏秧蔓并将其引向切割装置,夹持装置的夹持链在抓取秧蔓的同时,切割器开始切割秧蔓根部,切割后秧蔓经输送装置平铺到地面容器中。同时实时采集试验数据,通过接收的数据可得到各系统装置功率、扭矩和秧蔓切割力。

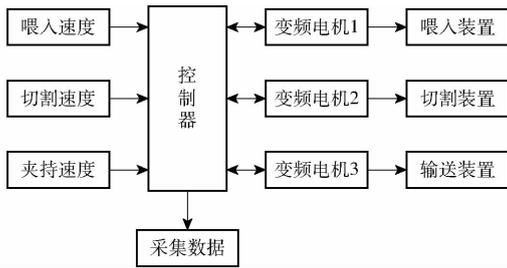


图2 甘薯秧蔓收获试验台工作原理图

Fig.2 Schematic of sweet potato vine harvest test bench

## 2 喂入装置设计

喂入装置主要功能是模拟甘薯秧蔓生长环境,同时以设定速度运输秧蔓到割台装置。喂入装置结构如图3所示。

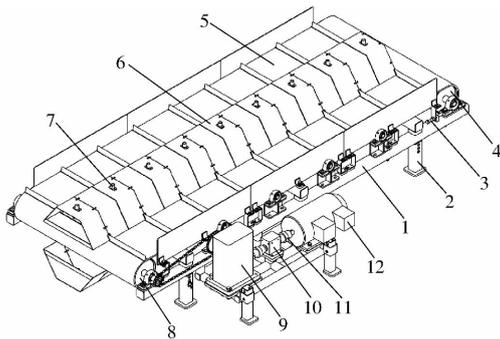


图3 喂入装置结构示意图

Fig.3 Structure diagram of feeding device

1. 底架 2. 高度调节座 3. 调节螺栓 4. 从动轴系总成 5. 喂入输送带 6. 垄行座 7. 秧蔓支架 8. 主动轴系总成 9. 减速机 10. 扭矩传感器 11. 联轴器 12. 喂入变频电机

喂入传动装置包括主动轴系总成、从动轴系总成、喂入输送带和垄行座,主动轴系总成设置在底架前侧,从动轴系总成设置在底架后侧,喂入输送带连接主动轴系总成与从动轴系总成,垄行座固定在喂入输送带上。喂入变频电机通过联轴器、扭矩传感器和减速机把动力传递给喂入传动装置,驱动安装在主动轴系装配和从动轴系装配之间的喂入输送带工作,运输放置在上方的甘薯秧蔓到切割装置。高度调节座设置在底架下面以根据试验要求调节甘薯秧蔓喂入高度,调节螺栓设置在底架上,且与从动轴系总成连接,可以调整输送带松紧度。根据甘薯种植模式,垄行座模拟田间单行地垄形状尺寸,试验时可以将甘薯秧蔓主根和须根依次固定在秧蔓支架、垄行座和喂入传动带上,模拟田间收获时甘薯秧蔓生长和分布状况<sup>[15]</sup>。

## 3 割台装置设计

### 3.1 夹持输送装置

夹持输送装置主要功能是将待割秧蔓引向切割

装置,在引导过程中扶正倒伏秧蔓,在切割时扶持秧蔓保证顺利切割,同时把割断的秧蔓夹持输送到试验台侧面。夹持输送装置结构如图4所示<sup>[16]</sup>。

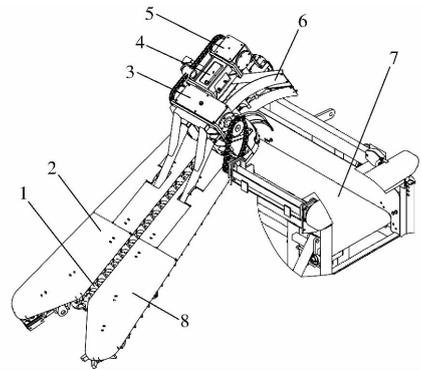


图4 夹持输送装置结构示意图

Fig.4 Structure diagram of clipping and conveying device

1. 夹持链总成 2. 右链罩总成 3. 前传动箱总成 4. 中连接架 5. 后传动箱总成 6. 茎秧导向机构 7. 输送带总成 8. 左链罩总成

夹持输送装置包括夹持链总成、传动机构、链罩总成和输送带总成。夹持链总成包括左夹持链、右夹持链、夹持链轮总成,左夹持链和右夹持链内部均设有夹持链轮总成,夹持链轮总成用于张紧左夹持链和右夹持链,在夹持链轮总成的张紧作用下,左夹持链和右夹持链分别形成三角形结构。左夹持链和右夹持链的前端组成V型结构,夹角 $78^\circ$ ,可将秧蔓顺利拨入茎秧运输通道。夹持链总成结构如图5所示。

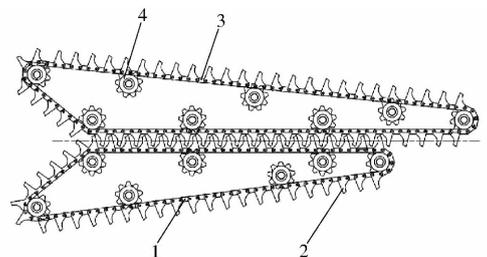


图5 夹持链总成结构示意图

Fig.5 Structure diagram of clipping chain assembly

1. 左夹持链 2. 拨指 3. 右夹持链 4. 夹持链轮总成

左夹持链和右夹持链的外侧具有拨指,拨指间距 $76\text{ mm}$ ,在其啮合段呈交错设置,可形成茎秧运输通道,对于缠绕严重的茎秧,可将其分割在通道中保证茎秧输送平稳有序,不产生拥堵现象。左夹持链和右夹持链的啮合段具有的拨指数量不同,右夹持链的啮合段拨指数量比左夹持链的啮合段拨指数量多5个,即长度增加 $380\text{ mm}$ 。当夹持装置夹持茎秧运输到夹持链末端时,右夹持链多出的拨指可将即将旋入缠绕左夹持链轮的茎秧快速拨出,并在茎秧导向机构的引导下平铺放置在输送带总成上,从而保证夹持链轮及输送通道不堵塞。

传动机构包括前传动箱总成、中连接架和后传动箱总成,中连接架前端连接前传动箱总成,后端连接后传动箱总成。动力由前传动箱总成输入传递至由左夹持链,同时经后传动箱总成传递至右夹持链,驱动左、右夹持链轮做相对旋转。链罩总成包括左链罩总成、右链罩总成和导向机构。左链罩总成和右链罩总成采用拼接结构,拆装方便,其安装位置可以有效防止茎秧卷入夹持链及夹持链轮,保证传动部件顺畅运动不搭缠茎秧,导向机构设置在夹持链末端,形成茎秧扶持导引通道,保证茎秧的顺利输送。

### 3.2 切割装置

切割装置包括 I 型切割器、挂接机构和摆环机构;挂接机构用于将切割装置与试验台机架连接;摆环机构包括摆环轴、摆环和摆叉轴总成;摆环轴与测控系统连接作为摆环机构输入端,摆叉轴总成同时连接摆环以及摇臂作为摆环机构输出端,拉压传感器连接在传感器支座上。切割装置结构如图 6 所示<sup>[17-19]</sup>。

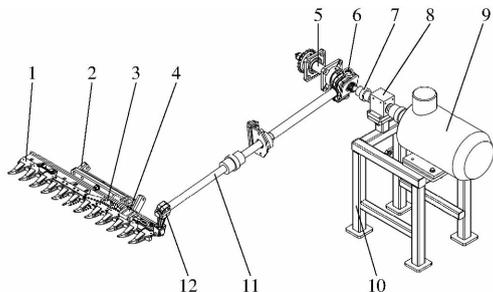


图 6 切割装置结构示意图

Fig. 6 Structure diagram of cutting device

1. I 型切割器 2. 挂接机构 3. 传感器支座 4. 拉压传感器
5. 摆环轴 6. 摆环 7. 联轴器 8. 扭矩传感器 9. 变频调速电机
10. 电机底座 11. 摆叉轴 12. 摇臂

切割装置采用往复式切割器,其传动机构采用摆环机构。考虑到甘薯秧蔓的生理性状,其收获时茎叶大都是青湿状态,所以选用 I 型切割器,适合牧草类植物的切割。其动、定刀片皆为齿刃,有自锐功能,使用寿命长。其护刃器头部向上翘,可充分适应低位切割和增强机器通过性,提高切割效果。

摆环机构可以把回转运动转变为往复运动,其结构较紧凑,应用广泛。摆环机构的主要参数是摆环偏角  $\alpha$  和摆杆长度  $L$ 。当摆环偏角  $\alpha \leq 15^\circ$  时,摆环机构的割刀运动规律与曲柄连杆机构的运动规律类似。I 型切割器的动刀片行程  $S_1 = 76.2 \text{ mm}$ ,则摆环机构摆臂的行程  $S$  也应满足这一要求,即

$$S = 2K_1 L \sin \alpha \geq S_1 \quad (1)$$

式中  $K_1$ ——考虑尺寸误差和间隙对行程影响的修正系数,取 1.02 ~ 1.1

考虑到切割装置零部件有配合间隙,设计动刀片行程小于实际行程,取  $\alpha = 14.7^\circ$ ,  $L = 200 \text{ mm}$ ,  $K_1 = 1.02$ ,则  $S = 103.53 \text{ mm}$ ,满足式(1)要求。

## 4 控制系统设计

### 4.1 硬件结构

甘薯秧蔓收获试验台控制系统结构框图如图 7 所示,主要由电机控制系统、信息采集系统和触摸屏等组成。

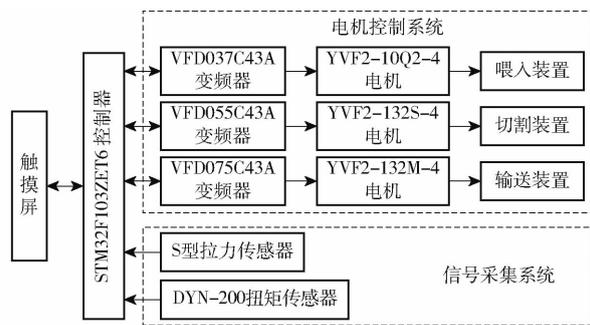


图 7 控制系统结构框图

Fig. 7 Block diagram of electronic control system

操作人员通过触摸屏输入秧蔓喂入速度、切割速度和夹持速度等试验台参数,控制器通过变频器控制各电机的转速,按照设定速度实现电机工作。S 型拉力传感器实时测量秧蔓切割力,同时设置在喂入装置、切割装置和夹持输送装置的扭矩传感器实时测量系统主轴转速、功率和扭矩,切割力和各系统扭矩上传至控制器,同时触摸屏实时显示并可导出数据。各系统可分别控制启动和停止,系统异常时(如输送通道出现严重堵塞),可迅速按下急停按钮,断电后进行故障维修<sup>[20-22]</sup>。

#### 4.1.1 触摸屏

触摸屏是人机交互的核心,实现人与机器的交互及命令的下达。选用工业级触摸屏,7 英寸 TFT LCD 显示器,800 像素  $\times$  480 像素,128 MB 内存,0 ~ 50℃ 操作环境温度,可以设置喂入速度、切割速度和输送速度等工作参数,控制系统各电机的启动和停止,同时可实时监测系统扭矩和切割力等参数,存储采集数据。

#### 4.1.2 控制器

本系统采用 STM32F103ZET6 单片机,拥有 512 KB FLASH 闪存容量,64 KB SRAM,拥有 112 个 IO 接口,最高 72 MHz 时钟频率,3 个 12 位 ADC、1 个 12 位 DAC,11 组计时器,13 个通信接口,工作电压 2.0 ~ 3.6 V,采用 144 针脚数 LQFP 封装,可在温度 -40 ~ 85℃ 范围工作。

#### 4.1.3 变频器

变频器驱动模组主要包括驱动器,在该系统中

控制电机,接受控制系统发来的控制指令驱动电机运转;同时将编码器的信号反馈回控制单元。变频器根据负载状况选用 VFD037C43A、VFD055C43A、VFD075C43A 型号变频器。

#### 4.1.4 电机

电机主要是接受变频器发来的信号,按照指令运转,同时将反馈信号回传至变频器。电机选用安徽新北电机有限公司生产的 YVF2 系列变频调速专用三相异步电动机。该系列电机可与变频器联合使用,调速范围广,可实现转速 150~2750 r/min 范围内的无级调速。其电气性能和安装尺寸符合国家标准 JB/T7118,各系统电机参数见表 1。

表 1 试验台电机主要性能参数

Tab.1 Main performance parameters of test bench motor

类别	型号	额定功率/ kW	额定 电流/A	额定转矩/ (N·m)
喂入电机	YVF2-10Q2-4	3.0	6.8	19
切割电机	YVF2-132S-4	5.5	11.4	35
输送电机	YVF2-132M-4	7.5	15.3	47.7

#### 4.1.5 拉力传感器

拉力传感器采用蚌埠大洋公司的 DYLY-103 拉压力传感器,S 型梁结构,拉、压力均可使用,量程为 4900 N,测量电压 5~15 V,灵敏度 2.0 mV/V,工作温度 -20~80℃,极限过载 200%,输出信号为 0~5 V 模拟电压,输出信号经接口电路连接到控制器,由控制器内部高性能 A/D 转换模块进行模数转换,以便控制器进行处理分析。

#### 4.1.6 扭矩传感器

扭矩传感器采用蚌埠大洋公司的 DYN-200 型扭矩传感器,可将当前测量的扭矩值与转速值实时显示;采用 24 位芯片,采集速度 40 次/s;支持 RS485 通信,支持主动上传通讯协议;支持电流与电压变送输出;电源采用直流 24 V。喂入装置采用量程 100 N·m 的传感器,切割装置和输送装置采用量程 200 N·m 的传感器。

#### 4.1.7 数据采集卡

数据采集采用总分模式,即传感器和预处理器在远端的模式,然后每隔一段时间预处理器通过 RS485 通讯的方式将数据集中上传控制器。RS485 通讯电路如图 8 所示。

#### 4.2 软件设计

系统软件采用 C 语言编写,具有良好的人机操作界面,主要包括初始化程序、电机转速控制程序、电机启停程序、数据采集程序和触摸屏控制程序等。系统控制程序流程图如图 9 所示。

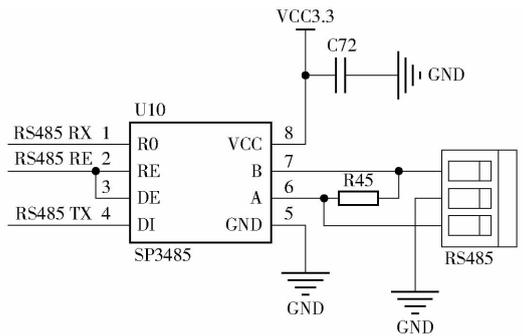


图 8 RS485 通讯电路

Fig. 8 RS485 communication circuit

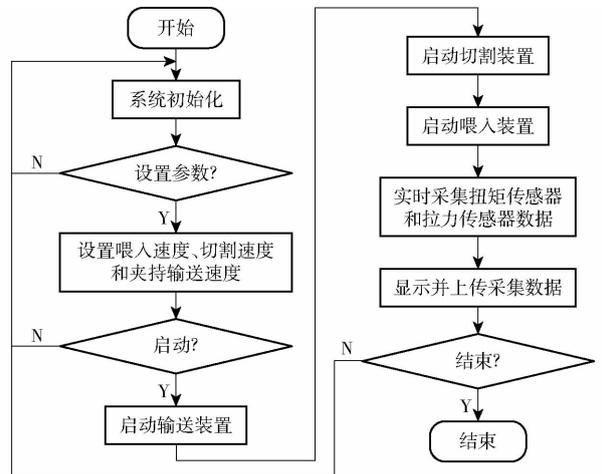


图 9 软件流程图

Fig. 9 Software flow chart

首先,系统上电后进行初始化操作,然后在触摸屏上分别设定喂入速度、夹持输送速度和切割速度,按先后顺序分别启动夹持输送装置、切割装置和喂入装置。系统进入运行状态时,喂入装置输送秧蔓到割台,夹持输送装置扶持秧蔓的同时切割装置切割秧蔓,被切断根部的秧蔓迅速被输送装置运输到割台侧面。如果选择数据采集按钮,则实时采集各扭矩传感器和拉力传感器数据并上传数据至触摸屏进行显示和存储。

## 5 试验应用

### 5.1 试验条件

为了验证甘薯秧蔓试验台收获性能指标和研究切割力学参数,于 2021 年 9 月在山东省农业机械科学研究院章丘市枣园镇甘薯试验基地进行了样机收获试验。模拟甘薯单垄单行的种植模式,在喂入装置上设置垄高为 250 mm、垄上宽为 220 mm 和垄下宽为 500 mm 的垄行座,在垄上平面设置间距为 300 mm 的支架。在田间靠近秧蔓根部采集平均长度为 1600 mm、平均含水率为 79.6% 的秧蔓,将其根部固定在秧蔓支架上,须根也相应固定在垄行座和喂入输送带上。

## 5.2 试验仪器设备

试验仪器设备主要有甘薯秧蔓试验台、水分测定仪、转速表、扭矩传感器、拉力传感器、电子天平、转速表、游标卡尺、卷尺等。样机试验场景如图 10 所示。



图 10 样机试验

Fig. 10 Prototype experiment

## 5.3 试验方法

试验分别测定甘薯秧蔓试验台在不同工作参数下秧蔓收净率  $Y_1$ 、切割力  $Y_2$ 、切割扭矩  $Y_3$  等参数并作为试验台的评价指标。根据甘薯秧蔓收获作业特点确定喂入速度  $X_1$ 、夹持输送速比(夹持速度与喂入速度的比值)  $X_2$  和切割速度  $X_3$  作为其影响因素。喂入速度过高容易造成夹持装置通道堵塞,过低不利于夹持装置拾取秧蔓同时影响生产率,设计其取值范围  $0.3 \sim 0.8 \text{ m/s}$ 。当夹持输送的水平速度大于喂入速度时,夹持机构可以较好的扶起秧蔓,平稳地将秧蔓输送到夹持机构,减少茎秆的堆积和堵塞。但夹持输送速比应该在一个合理的范围内,如果其值过大,不仅增加功率消耗,同时由于单位时间内输送的秧蔓量增加,反而容易造成秧蔓的堵塞,设计其取值范围  $1.03 \sim 1.87$ 。切割力和切割扭矩一般随切割速度的增大而减小。但切割速度的增大不仅造成功耗增加,还容易引起机器共振问题,同时,由于甘薯秧蔓为青湿类作物,负荷较重,其切割速度一般大于  $1 \text{ m/s}$ ,设计取值范围  $0.96 \sim 1.64 \text{ m/s}^{[23]}$ 。

本试验采用中心组合试验设计(Central composite design, CCD)方法<sup>[24-25]</sup>,通过响应面法分析试验结果,研究喂入速度、夹持输送速比和切割速度等工作参数对试验台收获性能指标的影响,试验因素编码如表 2 所示。

甘薯秧蔓堵塞夹持运输通道的故障是田间收获的共性问题和难点,也是秧蔓试验台重点研究点。输送通道堵塞状况分为严重、较严重、少量拥堵和不拥堵等几种。当堵塞状况严重时,秧蔓收净率低;当堵塞状况改善时,秧蔓收净率相应提高。因此采用

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Factors codes of test

编码	喂入速度 $X_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	夹持输送速比 $X_2$	切割速度 $X_3/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
-1.68	0.30	1.03	0.96
-1	0.40	1.20	1.10
0	0.55	1.45	1.30
1	0.70	1.70	1.50
1.68	0.80	1.87	1.64

收净率作为衡量秧蔓输送的重要指标。收净率  $Y_1$  是指输送到地面容器的秧蔓质量  $W_1$  与喂入装置上的秧蔓质量  $W_0$  百分比。

## 5.4 试验结果与分析

### 5.4.1 试验结果

根据 CCD 试验原理设计三因素分析试验,试验方案与结果见表 3。

表 3 试验方案与结果

Tab. 3 Experiment design and results

序号	喂入速度 $X_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	夹持输送速比 $X_2$	切割速度 $X_3/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	收净率 $Y_1/\%$	切割力 $Y_2/\text{N}$	切割扭矩 $Y_3/(\text{N}\cdot\text{m})$
1	0.70	1.70	1.50	71.5	155.1	6.01
2	0.55	1.45	0.96	90.6	183.5	8.75
3	0.55	1.45	1.30	93.4	161.3	6.74
4	0.40	1.20	1.10	71.4	175.7	7.81
5	0.40	1.20	1.50	70.5	157.3	6.15
6	0.40	1.20	1.50	75.6	154.7	6.21
7	0.55	1.87	1.30	80.1	162.8	6.86
8	0.70	1.20	1.10	60.8	174.5	7.65
9	0.55	1.45	1.64	91.5	150.8	5.55
10	0.40	1.70	1.10	80.7	173.6	8.06
11	0.30	1.45	1.30	51.8	157.6	6.57
12	0.55	1.45	1.30	89.5	156.7	6.45
13	0.55	1.45	1.30	93.8	158.8	6.39
14	0.70	1.20	1.30	63.7	155.4	5.89
15	0.55	1.45	1.50	94.6	160.6	6.68
16	0.55	1.03	1.30	76.5	162.4	6.47
17	0.80	1.45	1.30	52.3	159.3	6.34
18	0.55	1.45	1.30	88.2	157.1	6.61
19	0.70	1.70	1.10	70.6	172.8	7.98
20	0.55	1.45	1.30	89.1	160.7	6.38

### 5.4.2 回归模型建立与显著性检验

根据表 3 中的试验数据,应用响应面法进行分析,建立收净率  $Y_1$ 、切割力  $Y_2$ 、切割扭矩  $Y_3$  对喂入速度  $X_1$ 、夹持输送速比  $X_2$ 、切割速度  $X_3$  等因素的二次多项式回归模型

$$Y_1 = 0.92 - 0.023X_1 + 0.028X_2 - 0.0005X_3 + 0.004X_1X_2 + 0.012X_1X_3 - 0.008X_2X_3 - 0.14X_1^2 - 0.051X_2^2 - 0.006X_3^2 \quad (2)$$

$$Y_2 = 159.14 - 0.047X_1 - 0.44X_2 - 9.45X_3 + 0.34X_1X_2 + 0.063X_1X_3 + 0.11X_2X_3 + 0.14X_1^2 + 1.61X_2^2 + 3.22X_3^2 \quad (3)$$

$$Y_3 = 6.54 - 0.08X_1 + 0.1X_2 - 0.92X_3 + 0.018X_1X_2 - 0.027X_1X_3 - 0.05X_2X_3 + 0.01X_1^2 + 0.086X_2^2 + 0.26X_3^2 \quad (4)$$

对回归方程进行方差分析,结果如表4所示。从表4可见,对于收净率而言,喂入速度 $X_1$ 的一次项对收净率影响显著( $P < 0.05$ ),其二次项对目标

值影响极显著( $P < 0.01$ );夹持输送速比 $X_2$ 的一次项对收净率影响显著( $P < 0.05$ ),其二次项对目标值影响极显著( $P < 0.01$ )。切割速度 $X_3$ 的一次项和二次项都对切割力和切割扭矩影响极显著( $P < 0.01$ )。同时由表4所知,响应面模型的 $P$ 值均小于0.01,表明回归模型是极显著的;失拟项 $P$ 值分别为0.1627、0.5065、0.4434,均大于0.05,表明失拟度不显著,回归方程拟合度高,模型可以用来进行优化预测,指导试验设计。

表4 回归方程方差分析

Tab.4 Variance analysis of regression equation

来源	收净率				切割力				切割扭矩			
	平方和	自由度	$F$	$P$	平方和	自由度	$F$	$P$	平方和	自由度	$F$	$P$
模型	0.34	9	27.01	<0.0001**	1399	1	40.29	<0.0001**	12.94	9	55.59	<0.0001**
$X_1$	$6.93 \times 10^{-3}$	1	4.97	0.0498*	0.03	1	$7.80 \times 10^{-3}$	0.9314	0.086	1	3.34	0.0974
$X_2$	0.011	1	7.61	0.0202*	2.66	1	0.69	0.4257	0.15	1	5.68	0.0385*
$X_3$	$3.45 \times 10^{-6}$	1	$2.48 \times 10^{-3}$	0.9613	1220.30	1	316.26	<0.0001**	11.67	1	451.01	<0.0001**
$X_1X_2$	$1.28 \times 10^{-4}$	1	0.092	0.7680	0.91	1	0.24	0.6375	$2.45 \times 10^{-3}$	1	0.095	0.7646
$X_1X_3$	$1.20 \times 10^{-3}$	1	0.86	0.3751	0.031	1	$8.10 \times 10^{-3}$	0.9301	$6.05 \times 10^{-3}$	1	0.23	0.6391
$X_2X_3$	$4.81 \times 10^{-4}$	1	0.34	0.5700	0.10	1	0.026	0.8745	0.02	1	0.77	0.3998
$X_1^2$	0.3	1	213.71	<0.0001**	0.3	1	0.078	0.7862	$1.95 \times 10^{-3}$	1	0.075	0.7894
$X_2^2$	0.037	1	26.83	0.0004**	37.42	1	9.70	0.011*	0.11	1	4.11	0.0702
$X_3^2$	$4.93 \times 10^{-4}$	1	0.35	0.5650	149.43	1	38.73	<0.0001**	0.95	1	36.90	<0.0001**
残差	0.014	10			38.59	10			0.26	10		
失拟	0.01	5	2.56	0.1627	19.15	5	0.98	0.5065	0.14	5	1.14	0.4434
误差	$3.91 \times 10^{-3}$	5			19.44	5			0.12	5		
总和	0.35	19			1437.59	19			13.20	19		

注: \*表示影响显著( $0.01 \leq P < 0.05$ ), \*\*表示影响极显著( $P < 0.01$ )。

#### 5.4.3 各因素对目标值影响显著性分析

各因素对目标值影响可通过贡献率 $K_2$ 来体现<sup>[26]</sup>。计算分析结果如表5所示,各因素对收净率贡献率从大到小为: $X_2$ 、 $X_1$ 、 $X_3$ ;各因素对切割力贡献率从大到小为: $X_3$ 、 $X_2$ 、 $X_1$ ;各因素对切割扭矩贡献率从大到小为: $X_3$ 、 $X_2$ 、 $X_1$ 。

表5 各因素贡献率分析

Tab.5 Analysis on contribution rate of each factor

目标值	贡献率 $K_2$		
	喂入速度 $X_1$	夹持输送速比 $X_2$	切割速度 $X_3$
收净率 $Y_1$	1.79	1.83	0
切割力 $Y_2$	0	0.90	1.97
切割扭矩 $Y_3$	0.70	1.58	1.97

#### 5.4.4 交互因素对目标值影响规律分析

根据试验分析结果绘制响应面图,分析喂入速度、夹持输送速比、切割速度交互作用对秧蔓收获性能目标值的影响。

喂入速度、夹持输送速比、切割速度交互作用对

收净率影响的响应面见图11a~11c。由图11a可知,在同一夹持输送速比下收净率随着喂入速度的增大先增大后快速减小,同一喂入速度下收净率随着夹持输送速比的增大而增大最后缓慢减小。由图11b可知,在同一切割速度下,收净率随着喂入速度的增大先增大后快速减小;由图11c可知,在同一切割速度下,收净率随着夹持输送速比的增大而增大;由图11b、11c可知,在同一喂入速度和夹持输送速比下,随着切割速度的变化,收净率变化不明显,表明切割速度对收净率的影响不显著。

对比式(2)和回归模型方差分析结果(表4),与响应图中各因素对收净率影响的变化规律一致,总体影响趋势为在较小的喂入速度、较高的夹持输送速比和适中的切割速度下,收净率越高。其主要原因为:当喂入速度较小时,单位时间内进入夹持输送通道的秧蔓量较少,降低输送通道的拥堵状况,则到达终端容器的秧蔓量多,收净率高;但喂入速度过低时会影响夹持机构的拨入,造成秧蔓无法拾取,从

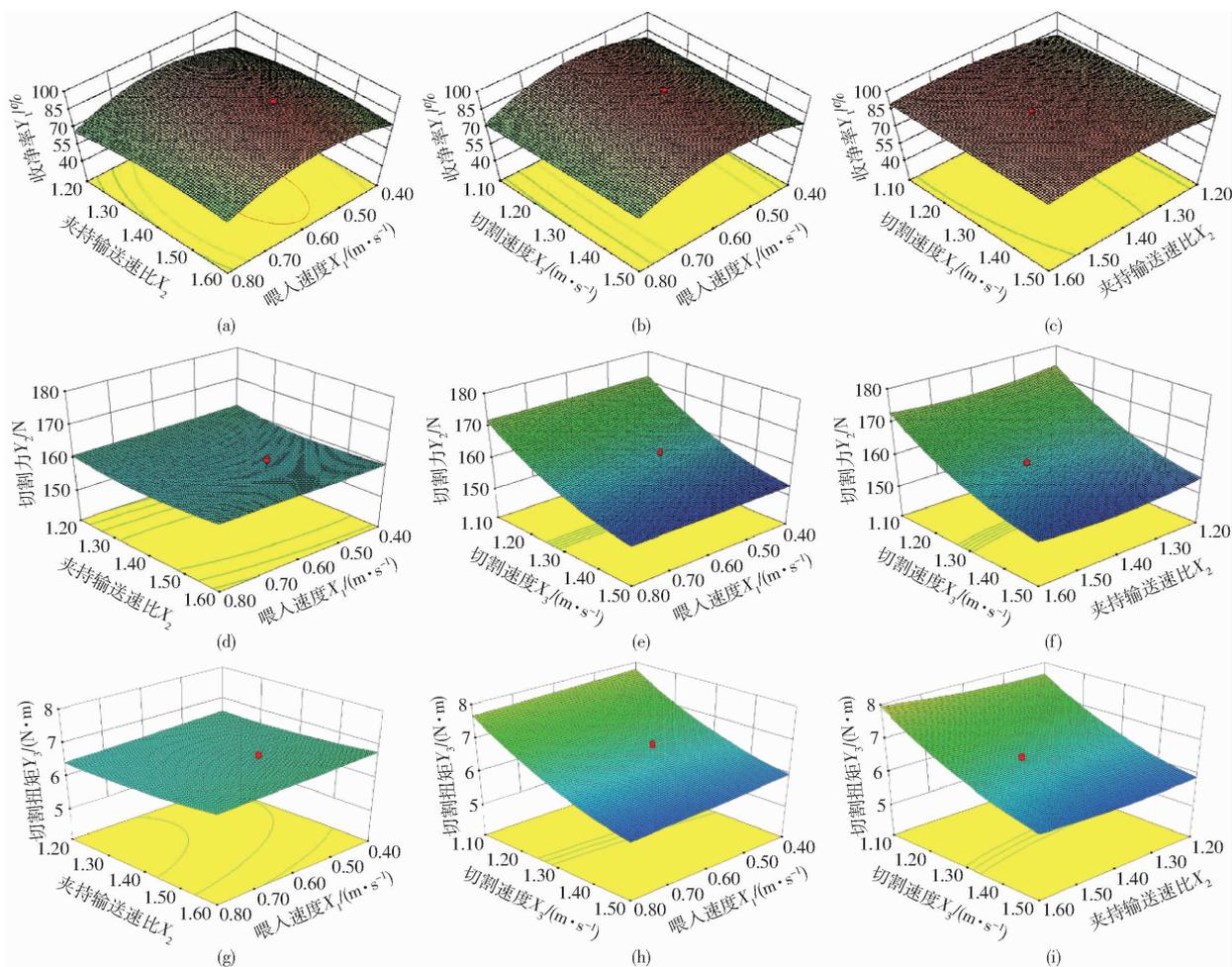


图 11 试验因素对性能指标影响的响应曲面

Fig. 11 Response surface plots of performance index with respect to experiment factors

而造成收净率降低。如果夹持输送速比取较小值, 容易造成喂入装置和割台装置结合处的秧蔓没有被及时运走造成堆积; 当夹持输送速比增加时, 即随着夹持输送速度的增加, 在结合处的秧蔓会被迅速拨入到夹持输送装置, 不会造成拥堵。同时, 随着喂入速度和夹持输送速比的不断提高, 秧蔓输送量增加, 也有可能造成输送通道堵塞, 影响收净率指标。由于切割速度一般都是大于 1 m/s, 这个速度足以保证夹持机构抓取秧蔓的同时, 迅速切断其根部, 不会影响秧蔓的正常输送, 因此其对收净率影响很小。

喂入速度、夹持输送速比、切割速度交互作用对切割力和切割扭矩影响的响应面见图 11d ~ 11i。由图 11e、11f、11h、11i 可知, 在同一喂入速度和夹持输送速比下, 切割力和切割扭矩随着切割速度的增加而减小; 当切割速度不变时, 随着喂入速度和夹持输送速比的变化, 切割力和切割扭矩变化不明显。由图 11d、11g 可知, 喂入速度和夹持输送速比对切割力和切割扭矩的影响不显著。

对比式 (3)、(4) 和回归模型方差分析结果 (表 4), 与响应图中各因素对切割力和切割扭矩影

响的变化规律一致, 总体影响趋势是切割速度增加, 切割力和切割扭矩减小; 喂入速度和夹持输送速比对切割力和切割扭矩影响较小。其主要原因是随着切割速度的增加, 秧蔓开始切割前的挤压变形阶段时间缩短, 导致其切割力和切割扭矩减少。同时, 由于切割速度比喂入速度和夹持速度大很多, 切割过程不会造成秧蔓拥堵影响切割性能, 因此喂入速度和夹持输送速比对切割性能影响很小。

#### 5.4.5 参数优化与验证试验

为了提高试验台的收获性能指标, 即提高秧蔓收净率、减小切割力和减小切割扭矩, 根据试验台的实际工作条件及相关模型分析结果<sup>[27]</sup>, 选择优化约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1 (X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_2 (X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_3 (X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t. } \begin{cases} 0.3 \text{ m/s} \leq X_1 \leq 0.8 \text{ m/s} \\ 1.03 \leq X_2 \leq 1.87 \\ 0.96 \text{ m/s} \leq X_3 \leq 1.64 \text{ m/s} \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

采用 Design-Expert 软件对喂入速度、夹持输送

速比和切割速度等参数进行优化求解。当喂入速度为 0.55 m/s、夹持输送速比 1.48、切割速度为 1.50 m/s 时,收净率为 91.0%、切割力为 152.89 N、切割扭矩为 5.87 N·m。

为了验证利用软件得到的工作参数的最优组合的准确性,采用上述参数进行验证试验。试验重复进行 3 次,结果见表 6。从表 6 结果可知,收净率为 92.3%、切割力为 148.50 N、切割扭矩为 5.65 N·m,平均实测值与优化值的误差均小于 5%,表明实测值与优化值之间有良好的拟合性,参数优化模型可靠。

表 6 验证结果分析

Tab.6 Analysis on verifying tests

项目	收净率/%	切割力/N	切割扭矩/(N·m)
平均实测值	92.3	148.50	5.65
优化值	91.0	152.89	5.87
相对误差/%	1.43	2.87	3.75

## 参 考 文 献

- [1] 蒋玉峰,马代夫. 国家甘薯产业技术体系建设推动甘薯产业和学科发展[J]. 江苏师范大学学报,2016,34(3):23-27. JIANG Yufeng, MA Daifu. The sweetpotato of China agricultural research system promotes the industrilization and disciplinary development of sweetpotato[J]. Journal of Jiangsu Normal University, 2016, 34(3): 23-27. (in Chinese)
- [2] 王欣,李强,曹清河,等. 中国甘薯产业和种业发展现状与未来展望[J]. 中国农业科学,2021,54(3):483-492. WANG Xin, LI Qiang, CAO Qinghe, et al. Current status and future prospective of sweetpotato production and seed industry in China[J]. Scientia Agricultura Sinica,2021,54(3):483-492. (in Chinese)
- [3] 沈公威,王公仆,胡良龙,等. 甘薯茎尖收获机研制[J]. 农业工程学报,2019,35(19):46-55. SHEN Gongwei, WANG Gongpu, HU Lianglong, et al. Development of harvesting mechanism for stem tips of sweet potatoes [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(19): 46-55. (in Chinese)
- [4] 李涛,周进,徐文艺,等. 4UGS2 型双行甘薯收获机的研制[J]. 农业工程学报,2018,34(11):26-33. LI Tao, ZHOU Jin, XU Wenyi, et al. Development of 4UGS2 type double-row sweet potato harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(11):26-33. (in Chinese)
- [5] 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.
- [6] ROBERT B. Sensors key to advances in precision agriculture[J]. Sensor Review, 2016, 37(1): 1-6.
- [7] 吴昆,宋月鹏. 农作物茎秆切割理论与方法研究进展分析[J]. 农业机械学报,2022,53(6):1-20. WU Kun, SONG Yuepeng. Research progress analysis of crop stalk cutting theory and method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 1-20. (in Chinese)
- [8] 侯加林,蒋韬,吴彦强,等. 小麦秸秆往复切割试验台设计与应用[J]. 农业机械学报,2014,45(增刊1):101-106. HOU Jialin, JIANG Tao, WU Yanqiang, et al. Design and experiment of wheat straw cutting reciprocating test bench [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp. 1): 101-106. (in Chinese)
- [9] 郭茜,张西良,徐云峰,等. 藤茎类秸秆专用切割刀片的设计与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(24):47-53. GUO Qian, ZHANG Xiliang, XU Yunfeng, et al. Design and experiment of cutting blade for cane straw [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(24): 47-53. (in Chinese)
- [10] 吕金庆,尚琴琴,杨颖,等. 马铃薯杀秧机设计与优化[J]. 农业机械学报,2016,47(5):106-114. LÜ Jinqing, SHANG Qinqin, YANG Ying, et al. Design and experimental on potato haulm cutter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 106-114. (in Chinese)
- [11] KENTARO A, HIROYUKI Y. Comparison of the characteristics of cellulose microfibril aggregates of wood, rice straw and potato tuber [J]. Cellulose, 2009, 23(16): 1017-1023.
- [12] HUANG J, LIU W, ZHOU F, et al. Effect of multiscale structural parameters on the mechanical properties of rice stems [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2018, 82: 239-247.
- [13] 申海洋,王冰,胡良龙,等. 4UZL-1 型甘薯联合收获机薯块交接输送机构设计[J]. 农业工程学报,2020,36(17):9-17. SHEN Haiyang, WANG Bing, HU Lianglong, et al. Design of potato connecting and conveying mechanism for 4UZL-1 type

## 6 结论

(1) 采用收净率、切割力和切割扭矩作为目标值,通过 Central-Composite 中心组合试验方法研究喂入速度、夹持输送速比和切割速度对甘薯秧蔓收获性能的影响。建立优化模型,通过验证试验得到最优工作参数组合:喂入速度为 0.55 m/s、夹持输送速比为 1.48、切割速度为 1.50 m/s 时,收净率为 91.0%、切割力为 152.89 N、切割扭矩为 5.87 N·m。

(2) 各因素对收净率影响显著性主次顺序为:夹持输送速比、喂入速度、切割速度;各因素对切割力影响显著性主次顺序为:切割速度、夹持输送速比、喂入速度;各因素对切割扭矩影响显著性主次顺序为:切割速度、夹持输送速比、喂入速度。

(3) 甘薯秧蔓收获试验台参数优化验证试验结果显示,秧蔓收获性能目标值的平均实测值与优化值的误差均小于 5%,表明参数优化模型可靠性较高。

- sweet potato combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(17): 9-17. (in Chinese)
- [14] 刘成良, 林洪振, 李彦明, 等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 1-18.  
LIU Chengliang, LIN Hongzhen, LI Yanming, et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 1-18. (in Chinese)
- [15] 宋占华, 宋华鲁, 耿爱军, 等. 棉花秸秆双支撑切割性能试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 37-45.  
SONG Zhanhua, SONG Hualu, GENG Aijun, et al. Experiment on cutting characteristics of cotton stalk with double supports[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 37-45. (in Chinese)
- [16] 张燕青, 崔清亮, 郭玉明, 等. 谷子茎秆切割力学特性试验与分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 146-155, 162.  
ZHANG Yanqing, CUI Qingliang, GUO Yuming, et al. Experiment and analysis of cutting mechanical properties of millet stem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 146-155, 162. (in Chinese)
- [17] 郇晓龙, 尤泳, 王德成, 等. 王草收获机旋转刀盘式平茬切割装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 112-124.  
HUAN Xiaolong, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Design and experiment of rotary cutter disc type flat stubble cutting device for king grass harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 112-124. (in Chinese)
- [18] 王将, 王晓燕, 李洪文, 等. 水稻秸秆激荡滑切与撕裂两级切割粉碎装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 28-40.  
WANG Jiang, WANG Xiaoyan, LI Hongwen, et al. Design and experiment of rice straw chopping device for agitation sliding cutting and tearing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 28-40. (in Chinese)
- [19] 孔凡婷, 王德福, 石磊, 等. 圆盘切割式蓖麻采摘装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(23): 1-9.  
KONG Fanting, WANG Defu, SHI Lei, et al. Design and experiment of disc-cutting picking device of castor[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(23): 1-9. (in Chinese)
- [20] MANHÃES C M C, GARCIA R F, JUNIOR D C, et al. Evaluation of visible losses and damage to the ratoon cane in the mechanized harvesting of sugarcane for different displacement speeds[J]. American Journal of Plant Sciences, 2014, 5(1): 2956-2964.
- [21] 李涛, 周进, 徐文艺, 等. 根茎类作物收获机自动对行系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 102-110.  
LI Tao, ZHOU Jin, XU Wenyi, et al. Design and test of auto-follow row system employed in root and stem crops harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 102-110. (in Chinese)
- [22] XIE L, WANG J, CHENG S, et al. Cutting characteristic of sugarcane in terms of physical and chemical properties[J]. Transactions of the ASABE, 2020, 63(4): 1007-1017.
- [23] 全国农业机械标准化技术委员会. NY/T 1130—2006 马铃薯收获机械[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [24] 于昭洋, 胡志超, 王海鸥, 等. 大蒜果秧分离机构参数优化及试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 40-46.  
YU Zhaoyang, HU Zhichao, WANG Haiou, et al. Parameters optimization and experiment of garlic picking mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 40-46. (in Chinese)
- [25] 黄铭森, 石磊, 张玉同, 等. 统收式采棉机载籽棉预处理装置的优化试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(21): 21-29.  
HUANG Mingsen, SHI Lei, ZHANG Yutong, et al. Optimization experiments of machine-mounted seed cotton pre-treatment apparatus for cotton stripper harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(21): 21-29. (in Chinese)
- [26] 严伟, 胡志超, 吴努, 等. 铲筛式残膜回收机输膜机构参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 17-24.  
YAN Wei, HU Zhichao, WU Nu, et al. Parameter optimization and experiment for plastic film transport mechanism of shovel screen type plastic film residue collector[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 17-24. (in Chinese)
- [27] 吴腾, 胡良龙, 王公仆, 等. 步行式甘薯碎蔓还田机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 8-17.  
WU Teng, HU Lianglong, WANG Gongpu, et al. Design and test of walking sweet potato (*Ipomoea batatas*) vines crushing and returning machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 8-17. (in Chinese)