

甘薯秧蔓回收机仿垄切割粉碎抛送装置设计与试验

穆桂脂^{1,2} 辛青青^{1,2} 玄冠涛^{1,3} 吕钊钦^{1,2} 王海宁¹ 邢钦淞¹

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018;
3. 密苏里大学农业与食品工程学院, 哥伦比亚 MO 65211)

摘要: 针对甘薯秧蔓垄沟匍匐生长不易全部机械回收的难题,设计了一种甘薯秧蔓回收机,并对关键部件仿垄刀辊机构和风机抛送装置进行了设计计算,该机可一次性完成甘薯秧蔓切割、粉碎、抛送和回收作业。以刀辊转速、离地间隙、风机转速为试验因素,甘薯秧蔓粉碎合格率、含土率、回收率为试验指标,采用响应面分析方法,建立了试验因素与试验指标之间的回归模型,分析了试验因素对试验指标的影响。试验结果表明:最优工作参数组合为刀辊转速 2 070 r/min、离地间隙 16 mm、风机转速 890 r/min,秧蔓粉碎合格率均值为 93.10%、含土率均值为 8.56%、回收率均值为 91.19%,研究结果满足甘薯秧蔓回收机的使用要求。

关键词: 甘薯; 秧蔓粉碎; 抛送回收

中图分类号: S233.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)12-0053-10

Design and Experiment of Knife Roller and Throwing Device
for Sweet Potato Vine Recycling Machine

MU Guizhi^{1,2} XIN Qingqing^{1,2} XUAN Guantao^{1,3} LÜ Zhaoqin^{1,2} WANG Haining¹ XIN Qinsong¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machineries and Equipments, Tai'an 271018, China
3. College of Agriculture, Food and Natural Resources, University of Missouri, Columbia MO 65211, USA)

Abstract: Sweet potato is one of the most important food crops in China. Its total output is more than 100 million tons per year. It is a good fresh feed and silage. Sweet potato vines grow luxuriantly, crawl on the ground, crisscross and disorderly, sweet potato vines collection and treatment is a high labor cost work. In addition to the shortage of rural labor in recent years, the development of advanced technology and reliable performance of sweet potato vines recycling machine is of great significance to the development of sweet potato industry in China. It is very difficult to recover all sweet potato vines mechanically while they grow in furrows and furrows. Aiming at the problem, a kind of sweet potato vines recovery machine was designed. The machine can finish cutting, crushing, throwing and recycling of sweet potato vines at one time. The key parts of the machine were mainly designed and calculated, such as ridge copying knife roller mechanism and fan throwing device. The regression model between test factors and test indexes was established by response surface analysis. On this basis, the influence of test factors on test indexes was analyzed. The test factors were knife roller rotation speed, ground clearance and fan speed. The test indexes were crushing qualified rate, soil content and recovery of sweet potato vines. The test results showed that the optimal working parameters were as follows: knife roller rotation speed was 2 070 r/min, ground clearance was 16 mm, fan rotation speed was 890 r/min, corresponding crushing qualified rate of vines was 93.10%, soil content rate was 8.56%, and sweet potato vines recovery rate was 91.19%. The machine can cut and recycle most of the sweet potato vines in ridge and furrow, and improve the adaptability of seedling recycling operation. The research results provided a theoretical basis for structural optimization design and work performance improvement of sweet potato

收稿日期: 2019-04-30 修回日期: 2019-07-11

基金项目: 山东省农机装备研发创新计划项目(2017YF002)、山东省现代农业产业技术体系薯类创新团队农业机械岗位专家项目(SDAIT-16-10)、国家自然科学基金项目(31701325)和泰安市科技发展计划项目(2018NS0096)

作者简介: 穆桂脂(1982—),女,讲师,博士,主要从事农业机械化及自动化研究,E-mail: 153616196@qq.com

通信作者: 吕钊钦(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备研究,E-mail: lzqsdu2003@126.com

vines recovery machine, which was of great significance for realizing the mechanized recovery of sweet potato vines. Related models can refer to the research results.

Key words: sweet potato; crushed vines; throw and recycle

0 引言

甘薯是我国重要的粮食作物之一,每年的总产量在1亿t以上,藤叶匍匐蔓生或半直立,长1~7 m,是良好的鲜饲料和青贮饲料^[1]。甘薯收获前的收秧既可提高甘薯的收获效率,又能使甘薯外表皮老化^[2],防止甘薯营养成分流失,降低收获过程中的伤薯率。甘薯秧蔓生长繁茂,匍匐伏地、交错杂乱,秧蔓收集处理是一项劳动成本高的工作。因此研制技术先进、性能可靠的甘薯秧蔓回收机对我国甘薯产业的发展具有重要意义。

国外对甘薯秧蔓回收机械的研究起步较早^[3-4]。美国研究了一种机械卷蔓机,利用大型拖拉机将甘薯秧蔓卷在支架上带出田外,再对薯秧粉碎处理。这种机械配套动力大、农机农艺融合紧密,不适于中国甘薯种植生产模式。日本研制的履带式薯秧粉碎回收一体机^[5],可一次完成秧蔓收集、输送、粉碎及集箱过程,但该机器结构复杂,价格昂贵,难以在我国推广。我国甘薯秧蔓机械化处理几乎都是采用甘薯秧蔓粉碎还田机^[6-9]。如徐州甘薯研究中心研发的小四轮驱动去蔓机、阜阳市农业机械研究所研制的4UL-80型甘薯碎蔓机、农业农村部南京农业机械化研究所研发的步行式甘薯碎蔓还田机等,都是将薯秧粉碎后直接还田,不能实现薯秧回收饲用,加重了甘薯病虫害传播。国内在甘薯秧回收方面,郑文秀等^[10]设计了一种单行甘薯秧蔓回收机,主要由挑秧铲、喂入滚筒、刀辊、螺旋输送器、输送带、集秧箱、升降油缸、机架等组成,由于采用非仿形刀辊切割,垄沟及垄侧面的秧蔓全部切割、回收存在一定困难,收秧效果影响因素与参数优化等工作尚需进一步研究。因此,本文设计一种结构简单的甘薯秧蔓回收机仿垄切割粉碎抛送装置,实现垄沟及垄侧的秧蔓全部切割回收,以提高秧蔓回收作业的适应性。

1 整机结构与工作原理

甘薯秧蔓回收机主要由仿垄刀辊机构、抛送收集装置和传动系统组成,如图1所示。

根据甘薯种植的垄高调节限深轮,调节甩刀尖距垄顶的高度。采用三点悬挂方式与拖拉机挂接,拖拉机将输出的动力通过万向传动装置、变速箱、带传动传递至刀辊;刀辊轴一端的带轮将动力传递给

风机轴,带动风机旋转。机具工作时,刀辊及其甩刀高速旋转将挑秧杆挑起的甘薯秧蔓切割、粉碎,并将薯秧抛入风机壳内,碎秧蔓在风机抛送作用下通过抛送筒进入收集箱。

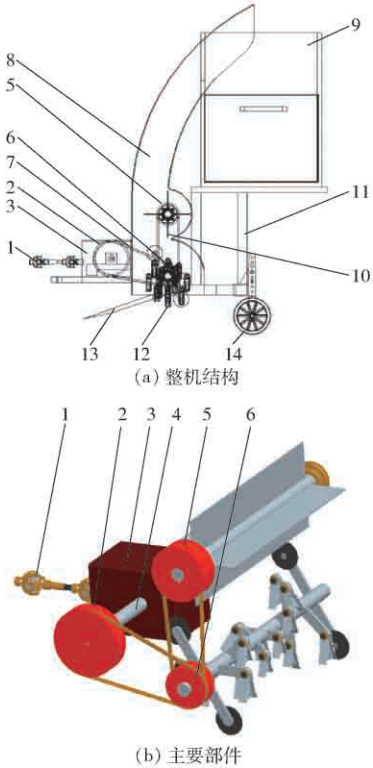


图1 甘薯秧蔓回收机结构简图

Fig.1 Structure diagrams of sweet potato vine recycling machine

1. 万向传动装置 2. 主动带轮 3. 变速箱 4. 动力输出轴 5. 风机带轮 6. 刀辊带轮 7. V型传动带 8. 输送筒 9. 收集装置 10. 风机 11. 机架 12. 刀辊机构 13. 挑秧杆 14. 限深轮

2 关键部件设计

2.1 甘薯秧蔓的物理和力学特性

甘薯单垄单行种植模式株距、垄顶宽、垄底宽、垄高、垄距均值分别为250、300、600、200、900 mm,薯垄尺寸如图2a所示。甘薯秧蔓生长繁茂,沿地表向周围蔓延生长,可将垄顶垄底全部覆盖。秧蔓直径一般为5~9 mm,其连接薯块部位的根干部分最粗而坚韧,甘薯秧蔓回收机作业时甩刀以较高的线速度将甘薯秧蔓冲击切断。秧蔓所受的机械力主要表现为拉断力和剪切力,达到良好的粉碎效果时甘薯秧蔓根干部分拉断力和切断力可达110 N和106 N^[7]。甘薯秧蔓的物理及力学特性对仿垄刀辊机构甩刀类型、数量和布置方式等参数提出了较高

的要求。

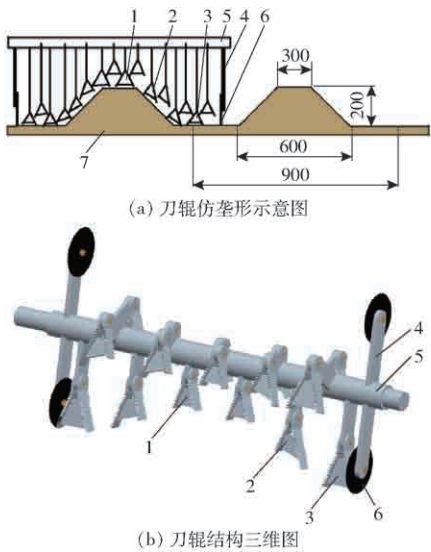


图 2 仿垄刀辊机构示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of ridging structure

1. 垄顶刀 2. 垄侧刀 3. 垄底刀 4. 刀座 5. 刀辊轴 6. 圆盘切刀 7. 薯垄

2.2 仿垄刀辊机构

仿垄刀辊机构是甘薯秧蔓回收机的关键部件，主要由刀辊轴、刀座、甩刀和圆盘刀组成，甩刀分为 3 种，垄顶刀、垄侧刀和垄底刀分别切割垄顶、垄侧及垄底秧蔓。根据相邻两垄沟间距确定刀辊割幅为 900 mm，安装垄底刀的刀座长度比垄顶刀的刀座长度高 200 mm，保证切割垄顶及垄底秧蔓。在刀辊轴两侧最外端对称布置 4 个圆盘切刀，有效切断垄底秧蔓，避免甘薯秧蔓缠绕在刀辊轴上造成壅堵。仿垄刀辊机构如图 2 所示。

2.2.1 甩刀结构设计

选用作用面积大、剪切力较大、碎捡拾效果好的 Y 型甩刀。提高仿垄效果，设计了直切面 Y 型和斜切面 Y 型两种甩刀。直切面 Y 型甩刀作为垄顶刀和垄底刀使用。斜切面 Y 型甩刀作为垄侧刀，其靠近垄侧部分刀刃短，外侧刀刃长，倾角与薯垄倾角接近，为 50°。Y 型甩刀的两个立面刃口切断横向秧蔓，甩刀中间部位焊接带有刃口的挡板，挡板刃口切断纵向秧蔓，被切割后的秧蔓在挡板的作用下抛向风机入口回收，甩刀结构如图 3 所示。

2.2.2 甩刀布置

刀片数量太多会造成能耗增加，刀片数量太少易造成薯秧漏割。刀片数量计算公式为

$$N = CP \tag{1}$$

式中 N ——刀片总数量，片

C ——刀片的排列密度，片/mm

P ——刀辊割幅，mm

刀辊割幅 P 为 900 mm，L 型和 Y 型甩刀排列密

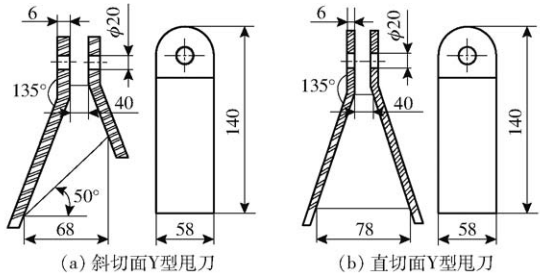


图 3 Y 型甩刀结构图

Fig. 3 Structure diagrams of Y-type knife swing

度 C 取 0.02 ~ 0.04 片/mm^[11]，确定甩刀数量为 18 ~ 36 片。甩刀在刀轴上单螺旋相隔 120° 排列，单把甩刀切割宽度 78 mm，保证不漏割的前提下确定刀片数量为 20 片。

2.2.3 刀辊工作转速

刀辊转速首先要保证有效切割粉碎甘薯秧蔓；其次旋转甩刀所形成的离心惯性力能把粉碎后的甘薯秧蔓抛至风机入口。

(1) 有效切割粉碎薯秧刀辊最低转速 n_1

作业时，甩刀的绝对速度为刀轴的旋转速度和机具前进速度的合成，则甩刀刀尖任意一点 $P(x, y)$ 的运动轨迹为余摆线^[12]，如图 4 所示。

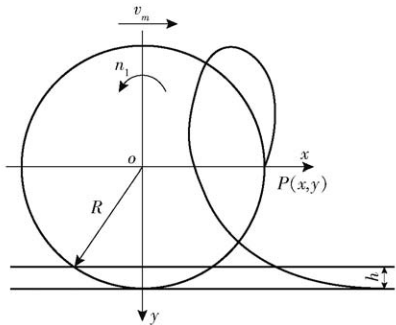


图 4 甩刀刀尖运动轨迹示意图

Fig. 4 Schematic of movement path of knife end point

切碎薯秧所需的刀辊转速 n_1 合理范围为^[8]

$$n_1 \geq 30(v_c + v_m) / [\pi(R - h)] \tag{2}$$

式中 v_m ——机具前进速度，m/s

R ——甩刀回转半径，m

h ——除秧深度，m

v_c ——所需最低杀秧速度，m/s

甘薯收获前薯秧含水率为 78.3% 时，试验测得甩刀能切碎薯秧所需最低杀秧速度为 $v_c = 25$ m/s，设机器的前进速度 $v_m = 0.6$ m/s，甩刀做圆周运动最小杀秧回转半径为 $R = 0.3$ m，除秧深度 $h = 0.15$ m，代入式(2)，得 $n_1 = 1\ 630$ r/min。

(2) 有效抛送秧蔓所需刀辊转速 n_2

在只考虑甩刀惯性力对粉碎秧蔓的抛送作用时，根据能量守恒定律

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = mgh_1(1 + \eta) + \frac{1}{2}mv_1^2 \tag{3}$$

式中 h_1 ——抛送高度,即刀辊中心到风机旋转中心的距离,为 0.9 m
 m ——碎秧蔓质量,kg
 η ——碎秧蔓抛送过程中互相碰撞、管壁摩擦、空气阻力而造成抛送高度降低的系数,取 0.3^[13]
 v_0 ——抛送秧蔓初始速度,m/s
 v_1 ——到达抛送位置的速度,为了使其具有一定的排出能力,取 10~15 m/s^[14]
 g ——重力加速度,取 9.8 m/s²

假设甩刀在水平位置时将秸秆抛起,考虑抛送瞬间碎秧蔓初速度与甩刀线速度之间的差异,则

$$v_c = (1 + \eta_1) v_0 \tag{4}$$

式中 η_1 ——甩刀线速度转化为秧蔓初速度时的损失系数,取 0.55^[10]

抛送秧蔓所需刀辊转速 n_2 为

$$n_2 = \frac{30}{\pi R} (1 + \eta_1) \sqrt{v_1^2 + 2gh_1(1 + \eta)} \tag{5}$$

计算可得 n_2 为 547~777 r/min。

(3) 刀辊工作转速 n

刀辊转速 n 必须大于 n_1 、 n_2 中的最大值,即 1 630 r/min。设计时考虑到实际工作中其他未知影响因素,试验取最低刀辊转速 1 700 r/min。

2.3 抛送装置设计

抛送装置主要由风机、风机壳体、输送筒等组成,如图 5 所示。

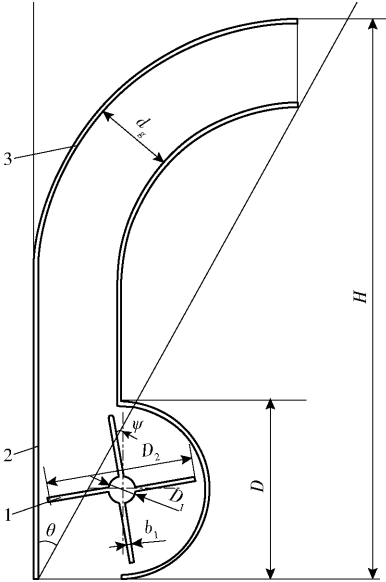


图 5 抛送装置结构简图

Fig. 5 Schematic of conveying device structure

1. 风机 2. 风机壳体 3. 输送筒

风机选用直板离心式风机,其叶片简单适用于农机。叶片后倾时抛送生产率高^[15-16],叶片安装后倾角 ψ 取 10°。在转速一定的条件下,叶片直径越

大对秧蔓的抛送能力越强,风机壳体直径 D 为 0.72 m,叶片外径 D_2 为 0.7 m,与壳体之间的间隙为 10 mm,叶片宽度 b_1 与刀辊轴长度相等,为 0.9 m,风机叶轮数为 4 片,内径 D_1 为 0.1 m,叶片厚度 b_1 为 0.02 m。

(1) 风机转速

单位时间内输送碎秧蔓的质量,即输送装置的生产率与空气流量的比值不能高于一定值^[17],计算式为

$$m_c = Q_n / Q_j \tag{6}$$

式中 m_c ——混合浓度比

Q_n ——单位时间通过输送筒截面的空气质量,kg/s

Q_j ——输送装置生产率,kg/s

由于粉碎后的甘薯碎秧蔓为长秆状且体积较大,为了防止堵塞,选择混合浓度比 $m_c = 1.5$ 。试验测得田间甘薯秧产量为 30 000 kg/hm²,当机器前进速度 0.6 m/s 时 $Q_j = 1.62$ kg/s,由式(6)可得 Q_n 为 2.43 kg/s。

抛送装置的抛送能力须大于仿垄刀辊输送的薯秧量,抛送能力计算式^[18]为

$$Q_t = n_f D_2^2 b_1 z \gamma \eta_2 \frac{\tan \alpha}{480} \tag{7}$$

式中 Q_t ——抛送能力,kg/s

z ——叶片个数

n_f ——风机转速,r/min

γ ——实测输送物料容积密度,为 46.6 kg/m³

η_2 ——效率系数,取 0.3

α ——实测输送碎秧蔓自然休止角,为 22°

又由 $Q_t = Q_n + Q_j = 4.05$ kg/s,代入式(7)可得满足这个抛送能力的最低风机转速 n_f 为 788 r/min。

设计风机转速必须大于 n_f ,考虑到实际工作中的其他未知影响因素,试验及输送筒设计时选取风机转速最低为 800 r/min。

(2) 风机抛送高度 H

风机抛送高度是指抛送装置出口顶端至风机进料口之间的高度。风机理论抛送高度 H_f 计算式为

$$H_f = \eta v_f^2 / (2g) \tag{8}$$

式中 v_f ——抛送叶片的线速度,m/s

由于秧蔓在输送管道内运动的过程中同样存在相互碰撞摩擦等造成抛送高度降低的现象,则风机可抛送的最大高度 H_t 计算式为

$$H_t = \eta H_f \tag{9}$$

由 $n_f = 800$ r/min, $D_2 = 700$ mm,得 $v_f \approx 29.31$ m/s,经计算 $H_t \approx 3.9$ m,回收机设计的风机抛送高度 H

为 1.3 m,小于 H_t ,满足使用要求。

(3) 输送筒倾角 θ

经过风机抛送出的甘薯碎秧蔓应满足能量守恒定律

$$\frac{1}{2}mv_0'^2 = mgH(1 + \mu) + \frac{1}{2}mv_1'^2 \tag{10}$$

式中 v_0' ——碎秧蔓被叶轮抛出的初速度, m/s
 v_1' ——碎秧蔓在输送筒出口的速度, 取 10 ~ 15 m/s
 μ ——甘薯碎秧蔓与筒壁摩擦损失系数, 取 0.22

碎秧蔓的初速度与风机叶片的圆周速度不完全相同,有一定的速度损失,所以碎秧蔓的初速度应为

$$v_j \sin \theta = (1 + \mu_1) v_0' \tag{11}$$

式中 θ ——输送筒倾角, ($^\circ$)
 μ_1 ——碎秧蔓被叶轮抛出的初速度损失系数, 取 0.55^[14]

经整理得

$$\theta = \arcsin \frac{(1 + \mu_1) \sqrt{v_1'^2 + 2gH(1 + \mu)}}{v_j} \tag{12}$$

由式 (12) 计算输送筒倾角 $37.23^\circ \leq \theta \leq 57.78^\circ$, 根据生产实际, 选择输送筒倾角为 45° 。

(4) 输送筒内径 d_g

为了使甘薯碎秧蔓能够流畅地通过输送装置, 应使碎秧蔓的悬浮速度小于气流速度, 即

$$v_a = k_a v_p \tag{13}$$

式中 v_a ——输送气流速度, m/s
 k_a ——输送气流系数, 在 1.1 ~ 2.5 范围内变化, 取 2^[19]
 v_p ——输送物悬浮速度, 试验测得碎秧蔓平均悬浮速度为 10.2 m/s

输送筒内径公式为

$$d_g = \sqrt{\frac{Q_j}{v_a \rho_a m_c}} \tag{14}$$

式中 d_g ——输送筒内径, m
 ρ_a ——空气密度, 1.2 kg/m³

计算得 $d_g \approx 0.21$ m。为防止堵塞, 选择输送筒内径 0.25 m。

3 田间试验

3.1 试验条件

2018 年 10 月 22—25 日在山东农业大学甘薯种植基地进行了田间收秧试验, 试验甘薯品种为济徐 23 号, 试验田土壤含水率为 22.8%, 地长 100 m, 宽 50 m, 每个小区为单垄, 取样长度 10 m。甘薯种

植株距为 250 mm, 垄距为 900 mm, 垄高 200 mm, 垄顶宽 300 mm, 垄底宽 600 mm。甘薯藤蔓平均直径 6.75 mm, 平均长度 1 220 mm, 平均含水率为 78.3%。

3.2 试验设备

试验仪器设备主要有抛送式甘薯秧蔓粉碎回收机、电子天平、直尺、卷尺、剪刀、筛子、转速表、工具包等。甘薯秧蔓回收机田间试验如图 6 所示。



图 6 甘薯秧蔓回收机田间试验
Fig. 6 Field work of recovery machine

3.3 试验参数与方法

甘薯秧蔓粉碎回收机以甘薯秧蔓粉碎合格率、含土率、回收率作为评价指标, 多次试验得知影响因素主要有刀辊转速、离地间隙、风机转速等。刀辊转速太大会增大机器的动力消耗, 太小降低薯秧切割和抛送效果, 降低薯秧回收率, 在前文计算及前期试验基础上确定刀辊转速为 1 700 ~ 2 100 r/min; 离地间隙即垄顶刀刀尖与垄顶的距离, 太大易导致甘薯秧蔓切割不彻底降低回收率, 太小会造成打土及伤薯增加含土率, 根据经验调节范围为 6 ~ 80 mm; 风机转速太高会导致功耗及含土率增加, 太低会降低其抛送能力及抛送距离, 降低回收率; 在前文计算及前期试验基础上风机转速取值为 800 ~ 1 600 r/min。采用二次回归正交旋转组合试验设计方案^[20-21], 以甘薯秧蔓粉碎合格率、含土率、回收率为评价指标, 对甘薯秧蔓回收机的刀辊转速、离地间隙、风机转速开展试验研究。试验因素编码如表 1 所示。

表 1 试验因素编码
Tab. 1 Test factors and codes

编码	刀辊转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	离地间隙/ mm	风机转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)
-1.682	1 732	6.4	864
-1	1 800	20.0	1 000
0	1 900	40.0	1 200
1	2 000	60.0	1 400
1.682	2 068	73.6	1 536

受机械结构和传动系统的限制, 对样机工作参数值进行圆整, 将编码值为 -1.682 的三因素圆整为

1 740 r/min、6 mm 和 860 r/min;将编码值为 1.682 的三因素圆整为 2 070 r/min、74 mm 和 1 540 r/min。

粉碎合格率测定:目前中国还没制订甘薯秧蔓回收装备的技术标准,依据 JB/T 6678—2001《秸秆粉碎还田机》和四川省地方标准 DB51/T 1085—2010《甘薯青贮饲料制作规程》,确定打碎的秧蔓长度低于 100 mm 为粉碎合格。用清水清洗粉碎秧蔓,把秧蔓捞出后晾干,将水快速蒸发,测量蒸发后残留土壤的质量。从中挑出粉碎长度大于 100 mm 的不合格秧蔓后测取碎秧蔓质量的平均值 M_1 (kg);收集箱内碎秧蔓总质量 M_2 (kg)。甘薯秧蔓粉碎合格率 Y_1 计算公式为

$$Y_1 = M_1 / M_2 \times 100\% \tag{15}$$

含土率测定:测取回收箱内所有土和秧蔓的总质量的平均值 M_4 (kg);测量蒸发后土壤残留物的质量,测量土壤质量的平均值 M_3 (kg)。含土率 Y_2 的计算公式为

$$Y_2 = M_3 / M_4 \times 100\% \tag{16}$$

回收率测定:捡拾留在试验区域内地表剩余的秧蔓,测量未回收秧蔓总质量的平均值 M_5 (kg)。回收率 Y_3 的计算公式为

$$Y_3 = (M_4 - M_3) / (M_4 - M_3 + M_5) \times 100\% \tag{17}$$

3.4 试验设计与回归模型建立

3.4.1 试验设计

根据试验 Central Composite 原理设计正交旋转组合试验,试验方案包括 23 个试验点,其中包括 14 个分析因子,9 个零点估计误差,试验设计方案及响应值如表 2 所示。 X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

3.4.2 回归模型建立

利用 Design-Expert 8.0.6.1 软件,根据表 2 试验设计方案及响应值,通过 Central Composite 试验原理进行二次回归正交旋转组合试验,建立以粉碎合格率 Y_1 、含土率 Y_2 、回收率 Y_3 为因变量,刀辊转速 X_1 、离地间隙 X_2 、风机转速 X_3 为自变量的二次多项式响应面回归模型

$$Y_1 = 90.00 + 6.59X_1 + 1.29X_2 + 0.037X_3 - 0.57X_1X_2 + 0.82X_1X_3 - 0.93X_2X_3 - 0.56X_1^2 - 1.08X_2^2 - 0.44X_3^2 \tag{18}$$

$$Y_2 = 13.08 + 0.35X_1 - 2.73X_2 + 1.01X_3 + 0.29X_1X_2 + 0.21X_1X_3 - 0.43X_2X_3 - 0.72X_1^2 - 0.76X_2^2 - 0.29X_3^2 \tag{19}$$

$$Y_3 = 90.07 + 1.12X_1 - 10.17X_2 + 1.13X_3 + 0.10X_1X_2 + 0.26X_1X_3 + 1.32X_2X_3 - 0.85X_1^2 - 2.69X_2^2 - 1.61X_3^2 \tag{20}$$

表 2 试验设计方案及响应值						
Tab.2 Test design scheme and response value						
序号	因素			指标		
	X_1	X_2	X_3	粉碎合格 率 Y_1 /%	含土率 Y_2 /%	回收率 Y_3 /%
1	1.682	0	0	97.51	11.84	89.87
2	-1	-1	1	79.10	14.97	92.82
3	1	1	1	96.24	9.75	76.76
4	0	0	0	91.64	13.63	89.86
5	0	-1.682	0	84.67	15.68	98.56
6	0	0	0	87.56	13.41	89.55
7	0	0	0	90.18	14.24	90.90
8	-1	1	1	79.53	8.54	74.72
9	0	0	0	90.56	13.25	88.33
10	0	0	0	86.53	13.17	91.15
11	0	0	0	92.63	11.55	88.98
12	0	0	-1.682	86.74	9.26	83.32
13	1	-1	-1	94.35	11.78	96.23
14	-1.682	0	0	78.75	9.76	86.66
15	0	0	0	90.52	11.66	89.67
16	-1	-1	-1	78.63	12.58	95.64
17	0	0	0	89.94	12.81	90.27
18	1	1	-1	96.22	8.22	73.24
19	0	0	0	90.56	14.10	91.76
20	0	1.682	0	88.65	5.67	67.56
21	0	0	1.682	90.25	12.52	88.90
22	-1	1	-1	85.96	7.64	69.95
23	1	-1	1	94.89	15.23	96.76

3.5 结果分析

3.5.1 试验结果与显著性分析

对回归方程进行方差分析,结果如表 3 所示,回归模型可信度分析结果如表 4 所示。

分析表 3 中数据得知, Y_1 、 Y_2 、 Y_3 响应面模型的显著水平均小于 0.01,表明回归模型高度显著,具有统计学意义;失拟项均大于 0.05,表明 3 个回归方程的拟合度高。

表 4 中的变异系数均小于 15%,说明本次试验结果数据均正常;校正决定系数大于 0.8,说明回归模型的拟合度比较好,在本次试验中有 92.38%、93.99%、98.35% 的数据能够分别用在 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 回归模型中。精密度是有效信号与噪声的比值,该值越大越好,一般要求大于 4,本次试验的精密度均大于 4。因此拟合的 3 个模型均有较好的可靠性,可以优化分析抛送式甘薯秧蔓粉碎回收机的工作参数。

粉碎合格率 Y_1 模型中, X_1 对模型影响极显著 ($P < 0.01$), X_2 对模型影响显著 ($P < 0.05$),其他各因素模型影响不显著。含土率 Y_2 模型中, X_2 、 X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 对模型影响极显著 ($P < 0.01$),其他因素对

表 3 回归方程方差分析

Tab.3 Variance analysis of regression equation

方差来源	粉碎合格率 Y_1				含土率 Y_2				回收率 Y_3			
	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	657.62	9	17.51	<0.000 1 **	144.18	9	22.58	<0.000 1 **	1 627.65	9	85.97	<0.000 1 **
X_1	593.51	1	142.2	<0.000 1 **	1.65	1	2.33	0.151 2	17.05	1	8.10	0.013 7 *
X_2	22.87	1	5.48	0.035 8 *	101.57	1	143.14	<0.000 1 **	1 413.03	1	671.7	<0.000 1 **
X_3	0.02	1	0.004	0.947 9	13.85	1	19.52	0.000 7 **	17.33	1	8.24	0.013 1 *
X_1X_2	2.58	1	0.62	0.446 1	0.68	1	0.96	0.346 0	0.08	1	0.04	0.848 4
X_1X_3	5.31	1	1.27	0.279 5	0.36	1	0.50	0.490 7	0.55	1	0.26	0.617 3
X_2X_3	6.89	1	1.65	0.221 5	1.45	1	2.05	0.176 0	13.99	1	6.65	0.022 9 *
X_1^2	5.06	1	1.21	0.290 8	8.21	1	11.57	0.004 7 **	11.41	1	5.42	0.036 6 *
X_2^2	18.67	1	4.47	0.054 3	9.25	1	13.03	0.003 2 **	114.78	1	54.56	<0.000 1 **
X_3^2	3.01	1	0.72	0.411 1	7.50	1	10.57	0.006 3 **	41.15	1	19.56	0.000 7 **
残差	54.24	13			9.22	13			27.35	13		
失拟项	25.71	5	1.44	0.307 0	1.96	5	0.43	0.814 8	17.91	5	3.04	0.079 0
误差	28.53	8			7.26	8			9.44	8		
总和	711.87	22			153.40	22			1 654.99	22		

注：* 表示差异显著 ($P < 0.05$)；**表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

表 4 回归模型可信度分析

Tab.4 Reliability analysis of regression model

响应	变异系数/%	拟合度	校正决定系数	精密度
Y_1	2.30	0.923 8	0.871 1	16.463
Y_2	7.14	0.939 9	0.898 2	16.515
Y_3	1.67	0.983 5	0.972 0	35.775

模型影响不显著。回收率 Y_3 模型中, X_2 、 X_2^2 、 X_3^2 对模型具有极显著影响 ($P < 0.01$), X_1 、 X_1^2 、 X_3 、 X_2X_3 对模型影响显著 ($P < 0.05$), 其他因素对模型影响不显著。甘薯秧蔓粉碎合格率影响由大到小顺序为: 刀辊转速、离地间隙、风机转速; 含土率影响由大到小顺序为: 离地间隙、风机转速、刀辊转速; 回收率影响由大到小顺序为: 离地间隙、风机转速、刀辊转速。

在保证模型显著的基础上剔除不显著回归项, 对 3 个模型进行优化, 其结果为

$$Y_1 = 90.00 + 6.59X_1 + 1.29X_2 \tag{21}$$

$$Y_2 = 13.08 - 2.73X_2 + 1.01X_3 - 0.72X_1^2 - 0.76X_2^2 - 0.29X_3^2 \tag{22}$$

$$Y_3 = 90.07 + 1.12X_1 - 10.17X_2 + 1.13X_3 + 1.32X_2X_3 - 0.85X_1^2 - 2.69X_2^2 - 1.61X_3^2 \tag{23}$$

3.5.2 交互因素对性能影响效应分析

利用 Design-Expert 8.0.6.1 软件, 基于 Central Composite 试验原理绘制响应面图, 分析 X_1 、 X_2 、 X_3 因素之间的两两交互作用对响应值 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 的影响。

图 7a、7b、7c 依次为 X_3 位于中心水平、 X_2 位于中心水平、 X_1 位于中心水平, 其他两个因素对 Y_1 的响应面图。从总体来看, 刀辊转速 X_1 越高, X_2 与 X_3 适中, 则甘薯秧蔓粉碎合格率 Y_1 越高。刀辊转速 X_1

越高, 甘薯秧蔓在单位时间内被刀片击打的次数也会越多, 粉碎合格率越高。离地间隙越小, 有更多秧蔓进入被甩刀打击的范围, 秧蔓被打击面积增大, 粉碎合格率提高。风机转速 X_3 对粉碎合格率影响并不明显。

图 7d ~ 7f 依次为 X_3 位于中心水平、 X_2 位于中心水平、 X_1 位于中心水平, 其他两个因素对 Y_2 的响应面图。从总体来看, 离地间隙 X_2 提高, 风机转速 X_3 适当降低, 刀辊转速 X_1 适中则含土率 Y_2 越低。离地间隙 X_2 越大, 刀辊对土壤的接触次数越小, 高速旋转的刀片对土壤的冲击减小, 带起来的土就变少。风机转速 X_3 越大, 其高速旋转产生的离心力也越大, 容易将质量较大的土壤颗粒甩进收集箱, 从而导致含土率 Y_2 的增大。刀辊转速 X_1 对回收率影响不明显。

图 7g ~ 7i 依次为 X_3 位于中心水平、 X_2 位于中心水平、 X_1 位于中心水平, 其他两个因素对 Y_3 的响应面图。从总体来看, 离地间隙 X_2 越小, 风机转速 X_3 越大, 回收率 Y_3 越高。离地间隙 X_2 越小, 留茬高度越低, 留在甘薯田里的秧蔓越少, 回收率 Y_3 高。风机转速 X_3 越大, 甘薯碎秧蔓所受离心力越大, 因此越容易被抛送入箱, 回收率 Y_3 提高。

4 参数优化与试验

4.1 参数优化

为寻求甘薯秧蔓粉碎回收机最优工作参数, 需对各参数进行粉碎合格率、含土率、回收率多目标优化。利用 Numerical 模块对 3 个回归模型进行求解。根据实际工作条件及模型分析结果, 设定优化约束

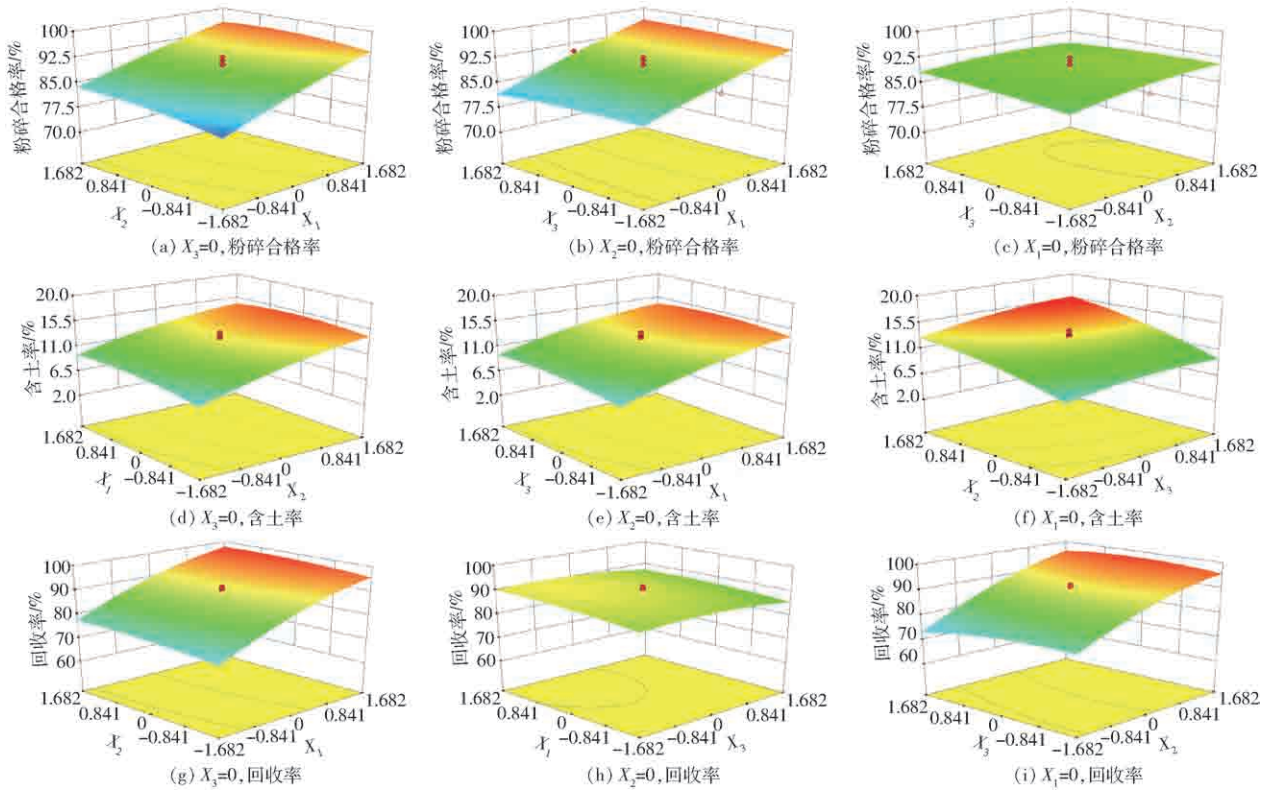


图7 交互因素对粉碎合格率、含土率和回收率的影响

Fig.7 Influence of interaction factors on crushing qualification rate, soil-bearing rate and recovery rate

条件^[22]为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \max Y_3(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 90\% \leq Y_1 \leq 100\% \\ 0 \leq Y_2 \leq 10\% \\ 90\% \leq Y_3 \leq 100\% \\ -1.682 \leq X_1 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_2 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_3 \leq 1.682 \end{cases} \end{cases}$$

(24)

得到优化后响应面如图8所示。

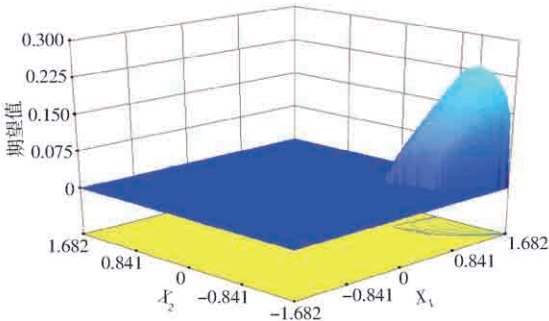


图8 优化结果响应面

Fig.8 Response surface of optimization results

在响应面中,风机转速水平在-1.57,离地间隙水平在-1.19,刀辊转速水平在1.682时,出现最优期望值0.236,对应工作参数优化组合为:刀辊转速

2 068 r/min、离地间隙 16.2 mm、风机转速 886 r/min 时,粉碎合格率 92.55%,含土率 8.60%,回收率 93.7%。

4.2 试验验证

2018 年 10 月 30—31 日在山东农业大学甘薯种植基地进行验证试验。便于实际应用,对工作参数优化理论值进行圆整,工作参数设置为刀辊转速 2 070 r/min,离地间隙 16 mm,风机转速 890 r/min。进行 5 次重复试验,求平均值,试验结果如表 5 所示。

表5 试验验证结果

Tab.5 Measured results for verification %			
序号	粉碎合格率 Y_1	含土率 Y_2	回收率 Y_3
1	95.45	8.45	92.32
2	91.17	9.15	89.86
3	90.92	7.56	89.27
4	94.83	9.45	91.11
5	93.14	8.20	93.41
试验平均值	93.10	8.56	91.19
预测值	92.55	8.60	93.70
相对误差	0.59	0.48	2.75

由表5可知,实际试验值与预测值较为吻合,相对误差均小于5%。因此在甘薯秧蔓回收机作业时选用刀辊转速2 070 r/min、离地间隙16 mm、风机转速为890 r/min的工作参数优化组合,秧蔓的粉碎合格率为93.10%、含土率为8.56%、回收率为

91.19%。田间作业效果如图 9 所示。



(a) 作业前后田间状态 (b) 回收的薯秧

图 9 田间作业效果

Fig. 9 Field working effects

5 结论

(1) 对甘薯秧蔓回收机关键部件仿垄刀辊和风机抛送装置进行了设计计算, 该机可一次性完成甘

薯秧蔓切割、抛送、输送和回收作业。

(2) 采用二次回归正交旋转组合试验方法, 建立了以刀辊转速、离地间隙、风机转速为试验因素, 以粉碎合格率、含土率、回收率为试验指标的二次回归模型, 得到各因素对试验指标的影响作用。甘薯秧蔓粉碎合格率影响由大到小依次为: 刀辊转速、离地间隙、风机转速; 含土率影响由大到小依次为: 离地间隙、风机转速、刀辊转速; 回收率影响由大到小依次为: 离地间隙、风机转速、刀辊转速。

(3) 最优工作参数组合: 刀辊转速 2 070 r/min、离地间隙为 16 mm、风机转速为 890 r/min, 试验验证结果为: 粉碎合格率均值为 93.10%、含土率均值为 8.56%、回收率均值为 91.19%。

参 考 文 献

- [1] 游小燕, 肖融, 黄健, 等. 青贮甘薯藤发酵进程及品质研究[J]. 饲料工业, 2011, 32(11): 56-57.
- [2] 夏阳, 何玉静, 王万章, 等. 分段红薯机械化收获模式实验研究[J]. 中国农机化, 2011, 32(6): 70-72.
XIA Yang, HE Yujing, WANG Wanzhang, et al. Experiment on the multiple steps mechanized sweet potato harvest[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2011, 32(6): 70-72. (in Chinese)
- [3] AMER N N K, AHMAD D, AKHIR M D, et al. Effects of rotary mower blade cutting angles on the pulverization of sweet potato vine[J]. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2014, 30(2): 95-101.
- [4] 王冰, 胡良龙, 胡志超, 等. 我国甘薯切蔓机发展概况与趋势分析[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(4): 377-379.
- [5] 赵大为, 高占文. 国内外甘薯茎叶处理收获机的发展研究[J]. 农业科技与装备, 2012(6): 19-20.
ZHAO Dawei, GAO Zhanwen. Research on the development in the sweet potato stem leaves treatment and harvesting machines at home and abroad[J]. Agricultural Science Technology and Equipment, 2012(6): 19-20. (in Chinese)
- [6] 穆桂脂, 张现广, 吕钊钦, 等. 仿形甘薯杀秧机刀辊的设计与仿真分析[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(5): 21-26.
MU Guizhi, ZHANG Xianguang, LÜ Zhaoqin, et al. Design and simulation analysis of the knife roller of the profiling sweet potato seedling killing machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(5): 21-26. (in Chinese)
- [7] 马标. 甘薯高清除性切蔓技术及其装置研究与优化设计[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2014.
MA Biao. The research and optimized design on the high performance of cutting vine technology and mechanism of sweet potato [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [8] 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 experiment of walking sweet potato vines crushing machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 8-17. (in Chinese)
- [9] SHI Chengzhao, KE Jiangli, WEI Zhou, et al. Changes in soil microbial community, enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north-central China agriculture[J]. Ecosystems & Environment, 2016, 216: 82-88.
- [10] 郑文秀, 吕钊钦, 张万枝, 等. 单行甘薯秧蔓回收机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 1-9.
ZHENG Wenxiu, LÜ Zhaoqin, ZHANG Wanzhi, et al. Design and test of single row sweet potato vine recycling machine[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(6): 1-9. (in Chinese)
- [11] 潘佛维, 康建明, 颜利民. Y 型甩刀式秸秆粉碎还田机关键部件的设计与性能试验[J]. 农业现代化研究, 2015, 36(5): 912-915.
PAN F C, KANG J M, YAN L M. Design and experiment to key components of Y type cutting device of smashed straw machine [J]. Research of Agricultural Modernization, 2015, 36(5): 912-915. (in Chinese)
- [12] 吕金庆, 尚琴琴, 杨颖, 等. 马铃薯杀秧机设计与优化[J/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 106-114. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160515&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.015. (in Chinese)
- [13] 张武军, 李凡, 艾合买提江·司马义, 等. 9QS-2.7 型自走式青贮机抛送装置的设计[J]. 新疆农机化, 2014(4): 20-22.
- [14] 史建新, 陈发, 郭俊先, 等. 抛送式棉秆粉碎还田机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 68-72.
SHI Jianxin, CHEN Fa, GUO Junxian, et al. Design and experimental research of the field straw chopper with throwing cotton-stalk[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(3): 68-72. (in Chinese)
- [15] 胡瑞谦. 质点在绕水平轴等速旋转平面型叶片上运动的分析[J]. 农业机械学报, 1980, 11(4): 62-72.
HU Ruiqian. The motive analysis of particle which is on the blade of plane type, the blade rotate round a horizontal axle with constant angular velocity[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1980, 11(4): 62-72. (in Chinese)

Chinese)

- [16] 王立军,李义博,郑招辉,等.玉米收获机清选装置内杂余抛送器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(4):124-136.
WANG Lijun, LI Yibo, ZHENG Zhaohui, et al. Design and experiment of mechanism of throwing impurity in cleaning device of maize grain harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4):124-136. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190414&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.014. (in Chinese)
- [17] 田阳,林静,李宝筏,等.气力式秸秆深埋还田机输送装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(12):36-44.
TIAN Yang, LIN Jing, LI Baofa, et al. Design and test of conveying device of pneumatic straw deep burying and returning machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12):36-44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181205&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.005. (in Chinese)
- [18] 顾峰玮,胡志超,陈有庆,等.“洁区播种”思路下麦茬全秸秆覆盖地花生免耕播种机研制[J].农业工程学报,2016,32(20):15-23.
GU Fengwei, HU Zhichao, CHEN Youqing, et al. Development and experiment of peanut no-till planter under full wheat straw mulching based on “clean area planting”[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20):15-23. (in Chinese)
- [19] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册:上册[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [20] 徐向宏,何明珠.试验设计与 Design-Expert、SPSS 应用[M].北京:科学出版社,2010.
- [21] 刘理民,王金玉,毛文华,等.基于传感器融合阵列的果树冠层信息采集方法[J/OL].农业机械学报,2018,49(增刊):347-353,359.
LIU Limin, WANG Jinyu, MAO Wenhua, et al. Canopy information acquisition method of fruit trees based on fused sensor array[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.):347-353,359. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s046&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.046. (in Chinese)
- [22] 杨然兵,杨红光,尚书旗,等.拨辊推送式马铃薯收获机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(7):119-126.
YANG Ranbing, YANG Hongguang, SHANG Shuqi, et al. Design and test of poking roller shoving type potato harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7):119-126. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160717&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.017. (in Chinese)

(上接第 41 页)

- [21] 刘火良. STM32 库开发实战指南[M].北京:机械工业出版社,2013:212-213.
- [22] 孔元. Android 设备与 STM32 单片机通信方式探讨[J]. 数字技术与应用, 2016(1):31.
- [23] 姚晓通,高宇,蒋占军.基于 Andriod 系统的 USB 数据采集系统设计与研究[J]. 计算机应用与软件, 2016,33(12):198-201.
YAO Xiaotong, GAO Yu, JIANG Zhanjun. Research and design of USB data acquisition system based on Andriod system[J]. Computer Applications and Software, 2016, 33(12):198-201. (in Chinese)
- [24] 温礼,茅旭初.基于非线性卡尔曼平滑的 GPS 定位估计方法[J]. 计算机仿真, 2007,24(12):66-69.
WEN Li, MAO Xuchu. A nonlinear Karman smoothing algorithm for improving GPS positioning precision[J]. Computer Simulation, 2007, 24(12):66-69. (in Chinese)
- [25] 王甫红,张小红,黄劲松. GPS 单点测速的误差分析及精度评价[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007,32(6):515-519.
WANG Fuhong, ZHANG Xiaohong, HUANG Jinsong. Error analysis and accuracy assessment of GPS absolute velocity determination with SA off[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(6):515-519. (in Chinese)
- [26] 郭爱智,王勇,刘根友,等.高频 GPS 实时单点测速误差分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2013,33(5):34-38.
GUO Aizhi, WANG Yong, LIU Genyou, et al. Error analysis of high-rate GPS data real-time single-point velocity-determination[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2013, 33(5):34-38. (in Chinese)
- [27] 王陈陈,马明建,马娜,等.基于 GPS 的土地面积测量算法[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2013,27(4):64-68.
WANG Chenchen, MA Mingjian, MA Na, et al. Research of area measurement algorithm based on GPS[J]. Journal of Shandong University of Technology(Natural Science Edition), 2013, 27(4):64-68. (in Chinese)
- [28] 史嵩. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2015.
SHI Song. Design and experimental research of the pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [29] 史嵩,张东兴,杨丽,等. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014,30(5):10-18.
SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Design and experiment of pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5):10-18. (in Chinese)