

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.012

帆布带式马铃薯挖掘-残膜回收联合作业机设计与试验

戴飞¹ 郭笑欢¹ 赵武云¹ 辛尚龙¹ 刘小龙¹ 吴正文²

(1. 甘肃农业大学机电工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃武威兴旺农机制造有限公司, 武威 733018)

摘要:为解决西北旱区大面积推广马铃薯大垄双行覆膜栽培模式所造成的田间残膜污染问题,设计了帆布带式马铃薯挖掘-残膜回收联合作业机,实现了马铃薯挖掘收获与残膜回收的一体化作业。通过对样机防缠绕装置、帆布带式送膜装置及浮动卷膜装置关键工作参数进行计算分析,确定影响联合回收机残膜回收率的相关试验因素及其取值范围。依照 Box - Behnken 试验设计原理,采用四因素三水平响应面分析方法,建立了作业机前进速度、卷膜驱动辊转速、输膜轴转速和输膜板倾角与残膜回收率之间的数学模型,并对各因素及其交互作用进行分析。试验结果表明:4个因素对残膜回收率影响的主次顺序为:卷膜驱动辊转速、作业机前进速度、输膜轴转速和输膜板倾角;联合回收机最佳工作参数为:作业机前进速度 0.72 m/s、卷膜驱动辊转速 303 r/min、输膜轴转速 499 r/min、输膜板倾角 29°。验证试验表明,联合回收机残膜回收率均值为 92.1%,较优化前有明显提升;同时在此工作参数条件下,作业机明薯率为 96.6%、伤薯率为 2.2%,各项作业指标均达到国家和行业标准要求。

关键词: 马铃薯; 残膜回收; 帆布带式; 联合作业机; 试验

中图分类号: S223.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)03-0104-10

Design and Experiment of Canvas Belt Combined Operation Machine for Potato Digging and Plastic Film Collecting

DAI Fei¹ GUO Xiaohuan¹ ZHAO Wuyun¹ XIN Shanglong¹ LIU Xiaolong¹ WU Zhengwen²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2. Gansu Wuwei Business Flourishes Agricultural Machinery Manufacturing Co., Ltd., Wuwei 733018, China)

Abstract: According to the problems of field plastic film pollution with film mulching of double rows on a big ridge cultivation pattern of potato in northwest arid area of China, the canvas belt combined operation machine for potato harvesting and plastic film collecting was designed, which had synchronous implementation function of potato harvesting and plastic film collecting. Based on design and calculation analysis of key operation parts for prototype, the operation parameters of anti-twining device, canvas belt transporting film device and floating curl-up film mechanism were determined. The related experimental factors and their range of values were determined which affected the plastic film collecting ratio of the combined recovery machine. The Box - Behnken experimental design with four factors and three levels was performed, the mathematical models between the key parameters such as operation machine speed, film-curling driving roller rotating speed, transporting film axis rotating speed, transporting film sheet dip angle and plastic film collecting ratio were established, and then the effects of various parameters and their interactions were analyzed as well. The test results showed that effects order of four parameters on the plastic film collecting ratio were as follows: film-curling driving roller rotating speed, operation machine speed, transporting film axis rotating speed and transporting film sheet dip angle. The optimal working parameters were combined operation machine speed of 0.72 m/s, film-curling driving roller rotating speed of 303 r/min, transporting film axis rotating speed of 499 r/min and transporting film sheet dip angle of 29°. Confirmatory tests showed that the average value of the plastic film collecting ratio was 92.1%, compared with before the optimization it was dropped significantly. At the same time, under the operating parameters the obvious ratio of potato was 96.6% and the injury ratio of potato was 2.2%, which were up to the relevant work quality evaluation specification requirements.

Key words: potato; plastic film collecting; canvas belt type; combined operation machine; experiment

收稿日期: 2017-07-09 修回日期: 2017-10-29

基金项目: 农业部公益性行业科研专项(201503105)和甘肃省科技重大专项(143NKDF016)

作者简介: 戴飞(1987—),男,讲师,博士生,主要从事北方旱区作物生产装备工程研究, E-mail: daifei@gsau.edu.cn

通信作者: 赵武云(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事北方旱区作物生产装备工程研究, E-mail: zhaowuy@gsau.edu.cn

0 引言

近年来,甘肃省马铃薯产业化种植规模在不断扩大,主要结合马铃薯大垄双行全膜面覆土种植模式展开,取得了显著的产量效应和经济效益^[1-3]。然而,随着覆盖地膜投入量及其应用面积的不断增加,农田残留地膜污染呈现出日趋严重的态势,已成为影响马铃薯西北优势产区农田环境的重大因素之一^[4-6]。

机械化残膜回收是解决农田残膜污染的主要手段。目前,国内针对棉花、玉米等作物田间残膜回收研发了多种高性能作业机具^[7-12],但并没有适宜于马铃薯收获过程中实现残膜联合回收的成熟农机装备。针对马铃薯收获后地膜的单一捡拾作业,吕钊钦等^[13]设计出链条导轨式地膜回收机,实现马铃薯收获后的残膜捡拾回收率在92%以上,取得了良好成效。为此,课题组研制了马铃薯收获与气力辅助残膜回收联合作业机^[5],能够同步实现薯块挖掘铺条与残膜回收,但采用的被动式残膜升运、导膜机构易失效,分离后的残膜在升运导膜杆上出现拥堵或不均布喂入,引起浮动卷膜装置供膜不足及受力不平衡现象,导致卷膜辊转动收膜产生打滑或卡死现象。

为解决上述机具存在问题,本文对相关样机进行改进设计,在已有马铃薯挖掘部件及浮动卷膜装置的基础上设计帆布带式马铃薯挖掘-残膜回收联合作业机,实现将原有“被动输膜”改进为“主动送膜”方式,进一步提高样机田间综合作业效率与作业质量。

1 整机结构与工作原理

1.1 田间回收地膜状况

目前,甘肃省马铃薯种植主要采用大垄双行全膜面覆土种植模式,要求采用厚度为0.01 mm黑色地膜进行铺设,且垄体顶部覆盖35~45 mm厚度土壤,使得马铃薯收获期田间地膜整体强度高、韧性强。同时薯块机收过程中残膜基本呈长条、大片状集条分布,能够满足薯、膜机械一体化回收作业要求^[2]。因此,设计帆布带式马铃薯挖掘-残膜回收联合作业机意在针对“膜-土-薯”复合体同步挖掘,缓解对覆盖地膜的机械损伤,完成对整片地膜的回收作业。

1.2 结构组成

帆布带式马铃薯挖掘-残膜回收联合作业机的结构如图1所示,主要由帆布带式送膜装置、浮动卷膜装置、防缠绕装置、土薯抖动升运装置、传动机构、

限深轮、升降调节手柄、薯块集条装置、挖掘铲及分石栅等部件组成。

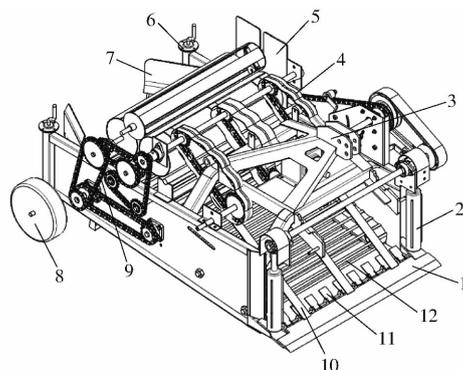


图1 帆布带式马铃薯挖掘-残膜回收联合作业机结构简图

Fig. 1 Structure diagram of canvas belt combined operation

machine for potato harvesting and plastic film collecting

1. 挖掘铲 2. 防缠绕装置 3. 悬挂架 4. 帆布送膜带 5. 浮动卷膜装置 6. 升降调节手柄 7. 薯块集条装置 8. 限深轮
9. 传动机构 10. 输膜板 11. 分石栅 12. 土薯抖动升运装置

其中,马铃薯挖掘装置由带分石栅的条形挖掘铲构成,浮动卷膜装置由卷膜驱动辊、卷膜从动辊、卷膜辊、浮动滑槽架和导膜板等组成^[5]。长片状输膜板与挖掘铲倾斜连接,与大(小)送膜链轮、链轮轴、帆布送膜带等共同构成帆布带式送膜装置。

1.3 工作过程

帆布带式马铃薯挖掘-残膜回收联合作业机的传动系统如图2所示。作业动力经样机传动轴传输至变速箱,并分别传递至两侧防缠绕装置与土薯抖动升运装置;同时,通过土薯抖动升运装置后置链传动将动力传输至卷膜驱动辊,卷膜驱动辊与卷膜从动辊通过链传动连接等速转动,且在卷膜从动辊的转动作用下进一步带动帆布带式送膜装置的输膜轴转动,从而实现对分离残膜的主动有序、均匀输送与喂入。

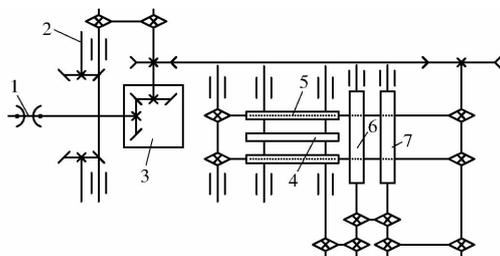


图2 联合回收机传动系统

Fig. 2 Schematic diagram of transmission system for combined operation machine

1. 传动轴 2. 防缠绕装置 3. 变速箱 4. 帆布带式送膜装置
5. 土薯抖动升运装置 6. 卷膜从动辊 7. 卷膜驱动辊

帆布带式马铃薯挖掘-残膜回收联合作业机田间作业时,条形挖掘铲将田间覆盖地膜与地下薯块同时疏松掘起,样机两侧防缠绕装置同步相向快速转

动,可防止残膜及薯秧堆积缠绕,且能够加速“膜-土-薯”掘起复合物的快速进入。当掘起物料向后输送时,铲体后置分石栅防堵部件能够保证物料无障碍运送,此时在掘起复合物料自身的重力作用下,残膜被分离至输膜板上并进入帆布带式送膜装置,而土壤、薯块则随着土豆抖动升运装置运转进一步分离。一方面土壤、薯块通过抖动分离输送至升运链末端,在薯块集条装置的作用下完成铺放;另一方面,残膜在送膜装置3条帆布带与对应输膜板的支撑、摩擦作用下完成向浮动卷膜装置无堆积、定向均匀喂入,实现马铃薯收获过程中田间覆盖地膜、薯块的同步联合回收。

1.4 样机相关技术指标

结合甘肃省马铃薯主导大垄双行覆膜种植模式与配套农艺要求,帆布带式马铃薯挖掘-残膜回收联合作业机相关技术指标如表1所示。

表1 样机技术参数

Tab.1 Technical parameters of operation machine

参数	数值/类型
整机尺寸(长×宽×高)/(m×m×m)	1.80×1.22×0.90
工作幅宽/m	0.90
配套动力/kW	23.2~29.4
挂接方式	后三点悬挂
整机质量/kg	258
作业速度/(km·h ⁻¹)	2.1~3.6
生产率/(hm ² ·h ⁻¹)	0.18~0.26
残膜回收率/%	≥90
明薯率/%	≥95
伤薯率/%	≤5

2 关键部件设计与分析

2.1 防缠绕装置

如图3所示,防残膜、茎秆缠绕装置主要由防缠绕辊、辊齿、传动装置等组成。防缠绕装置依托机架在挖掘铲两侧对称安装,作业时两组防缠绕辊同步

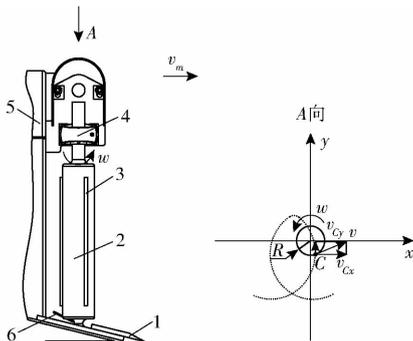


图3 防缠绕装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of anti-tangling device

1. 挖掘铲 2. 防缠绕辊 3. 辊齿 4. 传动装置 5. 机架 6. 分石栅

相向快速旋转,加速铲体掘起物的快速后输,保证地膜、茎秆不会在挖掘铲位置出现堆积与堵塞现象。

随着联合回收机前进,由图3转动的防缠绕辊上任一点C分析可知,为了使辊齿在水平旋转过程中对“膜-土-薯”有向后拨送的运动,起到推送作用,即辊齿上任一点的运动轨迹为余摆线,可建立辊齿任一点C经过时间间隔t的坐标方程为^[14]

$$\begin{cases} x = v_m t + R \cos(\omega t) \\ y = R \sin(\omega t) \end{cases} \quad (1)$$

式中 v_m ——联合回收机前进速度,m/s

R ——防缠绕辊半径,m

ω ——防缠绕辊角速度,rad/s

t ——防缠绕辊转过一定角度经过的时间,s

x ——防缠绕辊上点C的横坐标,m

y ——防缠绕辊上点C的纵坐标,m

由式(1)计算可得防缠绕辊上任一点C的水平、垂直分速度为

$$\begin{cases} v_{Cx} = v_m - R\omega \sin(\omega t) \\ v_{Cy} = R\omega \cos(\omega t) \end{cases} \quad (2)$$

式中 v_{Cx} ——防缠绕辊上点C的水平分速度,m/s

v_{Cy} ——防缠绕辊上点C的垂直分速度,m/s

则防缠绕辊上任一点C的速度为

$$v_C = \sqrt{v_{Cx}^2 + v_{Cy}^2} \quad (3)$$

$$\text{即 } v_C = \sqrt{v_m^2 - 2v_m R\omega \sin(\omega t) + R^2 \omega^2} \quad (4)$$

$$\text{其中 } \omega = \frac{n\pi}{30} \quad (5)$$

式中 n ——防缠绕辊转速,r/min

由式(4)、(5)联立分析可知,防残膜、茎秆缠绕装置的作业性能主要与防缠绕辊半径、转速及联合回收机的前进速度有关,是该装置相关工作参数选取中需要确定的试验因素。

为保证防缠绕装置有效作业,在参考相关装置结构的基础上,设计防缠绕辊半径 $R = 0.055$ m;结合田间试验,通过控制油门大小、调整传动比对联合回收机前进速度 v_m 、防缠绕辊转速 n 进行变换测试;试验结果表明:当联合回收机前进速度 v_m 控制在 $0.6 \sim 1.0$ m/s、防缠绕辊转速 n 为 228 r/min 时,防残膜、茎秆缠绕装置的作业质量相对稳定^[15-16]。

2.2 帆布带式送膜装置

帆布带式送膜装置基本结构如图4所示,主要由帆布输送带、输膜轴、输膜小链轮、输膜大链轮、张紧轮、输膜板和支撑轴等组成,共设置3组残膜输送单体。结合薯块机收过程中残膜基本分布状况与田间残膜破碎程度(宽度为180 mm及以上的条带状残膜为主),在充分兼顾均匀送膜、防漏残膜、便排

土秧的前提下,设计中置残膜输送单体带宽为80 mm,两侧残膜输送单体带宽为60 mm,帆布带之间的间距为180 mm。帆布输送带安装在输膜板倾斜表面并与其有充分接触滑动,能够实现有条带状地膜的夹持输送。其中,中间输膜板布置在作业机正中位置,两侧输膜板与机架距离均为170 mm,输送带链条内侧均布置张紧轮,其下方设有支撑轴,为输膜板提供支撑的同时增加其强度防止变形。

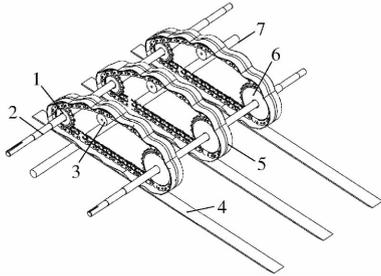


图4 帆布带式送膜装置结构图

Fig.4 Structure diagram of canvas belt transporting film device

- 1. 输膜小链轮 2. 输膜轴 3. 张紧轮 4. 输膜板 5. 帆布输送带
- 6. 输膜大链轮 7. 支撑轴

当联合回收机田间作业时,分离残膜在后续掘起物料的挤推作用下夹杂少许土壤由输膜板倾斜向上运,帆布输送带在输膜轴与输膜小链轮的配合作用下快速运转,在帆布输送带与输膜板的相互摩擦作用下将残膜呈片状展开并有序提升;其中,部分宽度较小、不连续的残膜块直接由其中单一残膜输送单体夹持运移,避免从帆布带之间漏下。当残膜输送至输膜板端部时,在浮动卷膜装置卷膜驱动辊和从动辊的共同作用下完成均匀喂入。

帆布带式送膜装置作业过程中,可将输膜小链轮及其表面包裹输送带视为一体,其受力简化模型如图5所示。

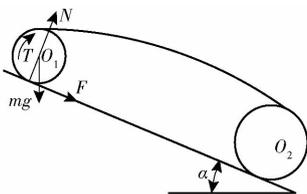


图5 输膜小链轮及其输送带的受力分析图

Fig.5 Force analysis diagram of transporting film sprocket and its transporting film belt

当送膜装置输膜轴驱动输膜小链轮转动输膜作业时,则有

$$\begin{cases} T - FR_1 \geq 0 \\ F = \mu N \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} T = 9\,550 \frac{P}{n_1} \\ N = mg \cos \alpha \end{cases} \quad (7)$$

- 式中
- T ——输膜轴转矩, $N \cdot m$
 - F ——分离残膜对输送带的摩擦力, N
 - R_1 ——输膜小链轮半径, mm
 - μ ——分离残膜与帆布输送带间的摩擦因数
 - P ——输膜轴功率, kW
 - n_1 ——输膜轴转速, r/min
 - N ——输膜板对输膜小链轮及其表面输送带支撑力, N
 - m ——输膜小链轮及其表面输送带质量, kg
 - α ——输膜板倾角, $(^\circ)$
 - g ——重力加速度, $9.8\, m/s^2$

联立式(6)、(7)解得

$$n_1 \leq \frac{9\,550P}{\mu mg \cos \alpha R_1} \quad (8)$$

由式(8)分析得出,帆布带式送膜装置有效作业时,装置输膜板倾角及其半径、输膜小链轮转速均是影响其作业性能的重要因素,是后续单因素试验中主要观察和调整的工作参数。

其中,在样机设计过程中选取输膜小链轮半径 $R_1 = 42\, mm$ 。前期单因素试验设计过程中,对式(8)分析所得的重要参数进行取值变换并试验测定,发现当输膜轴转速 n_1 在 $480 \sim 520\, r/min$ 之间,输膜板倾角 α 在 $25^\circ \sim 35^\circ$ 之间时,分离残膜能够保证有序输送进入浮动卷膜装置,基本无堆积滞留和惯性甩出现象^[16]。

2.3 浮动卷膜装置

浮动卷膜装置由卷膜驱动辊、驱动辊轴、变径卷膜辊、卷膜从动辊、浮动滑槽架、防滑辊齿等组成,结构如图6所示^[15]。当浮动卷膜装置工作时,卷膜驱动辊通过链传动带动卷膜从动辊等速转动,变径卷膜辊由卷膜驱动辊和卷膜从动辊通过相互接触的外圆摩擦共同驱动反向转动。当变径卷膜辊转动缠绕卷膜时,残膜包裹的粘附土壤和薯秧茎叶可通过自重从卷膜辊缝隙排出,有利于降低回收残膜的含杂率,卷膜驱动辊与卷膜从动辊上均设置有防滑辊齿,有助于增加与变径卷膜辊之间的滚动摩擦力。

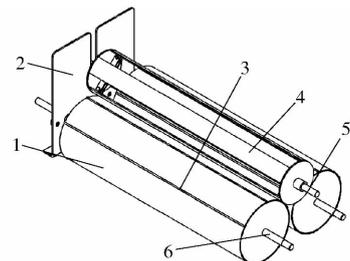


图6 浮动卷膜装置结构图

Fig.6 Structure diagram of floating curl-up film mechanism

- 1. 卷膜驱动辊 2. 浮动滑槽架 3. 防滑辊齿 4. 变径卷膜辊
- 5. 卷膜从动辊 6. 驱动辊轴

为保证分离残膜能够由帆布带式送膜装置顺利进入浮动卷膜装置而不会随着帆布带惯性甩出,当分离残膜从输膜小链轮帆布带水平切线处临界输出时(图7),需要满足

$$v_2 \geq v_1 \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} v_1 = \frac{n_1 \pi R_1}{360} \\ v_2 = \frac{n_2 \pi R_2}{360} \end{cases} \quad (10)$$

式中 v_1 ——输膜小链轮外带线速度, m/s

v_2 ——卷膜从动辊线速度, m/s

n_2 ——卷膜从动辊转速, r/min

R_2 ——卷膜从动辊半径, 取 0.075 m

由式(8)已知参数及式(10)联立可得 $v_2 \geq 0.19$ m/s, 即 $n_2 \geq 290.5$ r/min。

当输膜轴转速 n_1 取 500 r/min, 输膜板倾角 α 为 30° , 卷膜从动辊转速分别为 290、330、370 r/min 时, 残膜回收率随作业机前进速度变化如图 8 所示。

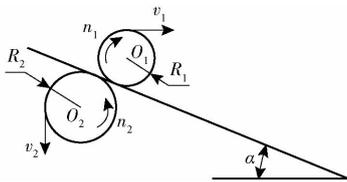


图7 输膜临界条件分析

Fig.7 Critical condition analysis of transporting film

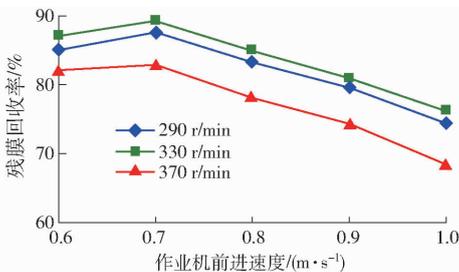


图8 不同卷膜从动辊转速下作业机前进速度对残膜回收率的影响

Fig.8 Effects of operation machine speed on plastic film collecting ratio at different film-curling driven roller rotating speeds

由图8可以看出,随着作业机前进速度不断增加,残膜回收率呈现出先增大后减小的总体变化趋势。当作业机前进速度大于 0.7 m/s 时,卷膜从动辊转速在各水平时残膜回收率均变化显著。试验过程中发现,当卷膜从动辊转速为 370 r/min 时,作业机残膜回收率比其转速为 290、330 r/min 时明显降低。出现这种情况主要是由于卷膜从动辊转速过高时带动变径卷膜辊快速转动,使得对输送的残膜卷绕过快而产生撕扯、断裂现象,严重制约了帆布带式送膜装置作业性能。由于卷膜驱动辊与卷膜从动辊

通过链传动等速传动,因此,联合回收机后续作业性能优化试验时,其卷膜驱动辊转速宜控制在 290 ~ 330 r/min 之间。

3 试验材料与方法

3.1 试验材料

2016年10月,在甘肃省定西市安定区香泉镇进行帆布带式马铃薯挖掘-残膜回收联合作业机田间作业性能试验,选取试验用地面积 0.8 hm²,地势平坦,土壤为黄绵土,其含水率为 19.2% ~ 21.7%,采用大垄双行马铃薯覆膜种植模式,试验地覆盖地膜为甘肃省政府规定的标准黑色地膜(地膜厚度为 0.01 mm、宽度为 1 100 mm)。

3.2 试验方法

按照国家标准 GB/T 25412—2010《残地膜回收机》规定的试验方法进行帆布带式马铃薯挖掘-残膜回收联合作业机田间作业性能试验(图9),试验开始前预先对马铃薯茎叶进行杀秧处理。联合回收机工作动力选取东方红-300型拖拉机,作业机前进速度控制在 0.6 ~ 1.0 m/s。由于本联合回收机依托成熟马铃薯挖掘机集成设计,马铃薯收获过程中的明薯率、伤薯率皆符合相关作业标准要求。因此,选取残膜回收率作为体现联合回收机工作性能的主要测试指标。



图9 联合回收机田间作业性能试验

Fig.9 Field performance test of combined operation machine

规定试验小区以单一垄体宽度(800 ~ 850 mm)为基准,测定区长度为 20 m,试验小区在试验地中随机选取。其中,试验小区覆盖地膜总质量依照大垄双行覆盖地膜的农艺要求计算(约为 178.8 g),联合机回收残膜的质量通过将其变径卷膜辊上的残膜卸下,待洗净晾干后采用电子精密天平进行称量,试验结束后计算残膜回收率^[17],计算式为

$$Y = \frac{m_1}{m_0} \times 100\% \quad (11)$$

式中 Y ——残膜回收率, %

m_1 ——联合机回收残膜的质量(变径卷膜辊上残膜质量), g

m_0 ——试验小区覆盖地膜总质量, g

3.3 试验设计

依据式(4)、(8)、(12)确定的相关试验因素及各单因素试验确定的参数取值区间,综合权衡分别选取作业机前进速度 x_1 (0.6 ~ 1.0 m/s)、卷膜驱动辊转速 x_2 (290 ~ 330 r/min)、输膜轴转速 x_3 (480 ~ 520 r/min) 和输膜板倾角 x_4 (25° ~ 35°) 作为试验因素,以残膜回收率 Y 作为样机作业性能评价指标。其中,作业机前进速度改变由拖拉机换挡和控制油门实现,不同卷膜驱动辊转速和输膜轴转速皆通过更换传动链轮进行匹配,输膜板倾角通过调节装置支撑轴的高度位置改变。采用 Box - Behnken 试验设计原理,各试验因素编码如表 2 所示,共实施 29 组响应面分析试验(如表 3 所示,表中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 为因素编码值),每组试验重复进行 3 次,取 3 次测试结果的平均值作为试验结果,通过 Design-Expert 8.06 软件进行数据处理分析^[18-19]。

表 2 试验因素编码

Tab.2 Coding of factors and levels

编码	因素			
	作业机前进	卷膜驱动	输膜轴	输膜板
	速度 x_1 / (m·s ⁻¹)	辊转速 x_2 / (r·min ⁻¹)	转速 x_3 / (r·min ⁻¹)	倾角 x_4 / (°)
-1	0.6	290	480	25
0	0.8	310	500	30
1	1.0	330	520	35

4 试验结果与分析

4.1 回归模型的建立及检验

试验结果如表 3 所示,帆布带式马铃薯挖掘-残膜回收联合作业机作业后残膜回收率为 79.2% ~ 90.4%,基本符合 GB/T 25412—2010《残地膜回收机》的作业标准要求。

借助 Design-Expert 8.06 软件对试验结果进行分析,获得编码值表示的残膜回收率 Y 的二次回归模型为

$$Y = 89.58 - 2.51X_1 - 1.90X_2 + 0.21X_3 - 0.17X_4 - 3.59X_1^2 - 3.75X_2^2 - 2.52X_3^2 - 1.98X_4^2 + 1.48X_1X_2 - 0.55X_1X_3 + 0.25X_1X_4 + 1.90X_2X_3 + 0.73X_2X_4 + 0.32X_3X_4 \quad (12)$$

对上述二次回归模型进行方差分析和回归系数显著性检验,结果如表 4 所示。

由表 4 分析可知,建立二次回归模型的 P 值小于 0.000 1,表明回归模型极其显著;失拟项 $P > 0.05$,即失拟不显著,说明模型所拟合的二次回归方程与实际相符合,能正确反映残膜回收率 Y 与 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 之间的关系,回归模型可以较好地地对性能

表 3 响应面分析结果

Tab.3 Results of response surface analysis

试验号	X_1	X_2	X_3	X_4	$Y/\%$
1	1	0	-1	0	81.1
2	-1	0	1	0	86.8
3	1	-1	0	0	81.1
4	0	-1	1	0	82.1
5	0	0	0	0	90.4
6	-1	-1	0	0	88.9
7	0	0	0	0	89.9
8	0	-1	0	-1	86.7
9	0	-1	0	1	85.6
10	-1	0	0	-1	86.9
11	1	0	0	1	81.1
12	0	0	1	-1	85.7
13	0	-1	-1	0	85.8
14	1	1	0	0	79.2
15	0	1	1	0	84.1
16	0	1	-1	0	80.2
17	0	0	1	1	85.8
18	0	0	0	0	89.5
19	0	0	0	0	87.9
20	0	0	-1	1	84.5
21	1	0	0	-1	81.4
22	-1	0	0	1	85.6
23	-1	0	-1	0	85.2
24	0	0	-1	-1	85.7
25	0	1	0	1	82.3
26	0	0	0	0	90.2
27	1	0	1	0	80.5
28	-1	1	0	0	81.1
29	0	1	0	-1	80.5

表 4 回归方程方差分析

Tab.4 Variance analysis of regression equation

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
回归	309.21	14	22.09	24.82	<0.000 1 **
X_1	75.50	1	75.50	84.86	<0.000 1 **
X_2	43.32	1	43.32	48.69	<0.000 1 **
X_3	0.52	1	0.52	0.59	0.456 9
X_4	0.33	1	0.33	0.37	0.550 3
X_1X_2	8.70	1	8.70	9.78	0.007 4 **
X_1X_3	1.21	1	1.21	1.36	0.263 0
X_1X_4	0.25	1	0.25	0.28	0.604 4
X_2X_3	14.44	1	14.44	16.23	0.001 2 **
X_2X_4	2.10	1	2.10	2.36	0.146 5
X_3X_4	0.42	1	0.42	0.47	0.502 0
X_1^2	83.60	1	83.60	93.69	<0.000 1 **
X_2^2	91.34	1	91.34	102.66	<0.000 1 **
X_3^2	41.03	1	41.03	46.12	<0.000 1 **
X_4^2	25.37	1	25.37	28.51	0.000 1 **
残差	12.46	14	0.89		
失拟	8.47	10	0.85	0.85	0.622 3
误差	3.99	4	1.00		
总和	321.66	28			

注: **表示极显著($P < 0.01$)。

试验中各种试验结果进行预测。其中模型的一次项 X_1 (作业机前进速度) 和 X_2 (卷膜驱动辊转速) 对残膜回收率的影响极显著;二次项 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 、 X_4^2 影响极显著;交互项 X_1X_2 、 X_2X_3 影响极显著,其余各项均不显著。根据模型各因素回归系数的大小及交互作用,可得到各因素对残膜回收率影响主次顺序为: X_2 、 X_1 、 X_3 、 X_4 , 即卷膜驱动辊转速、作业机前进速度、输膜轴转速和输膜板倾角。

4.2 模型交互项的解析

根据二次回归模型(式(12))作出残膜回收率与各因素之间关系的响应面图,响应曲面的形状能够反映出交互因素作用的强弱关系^[20-21]。

由图 10 可看出,当作业机前进速度固定在某一水平,卷膜驱动辊转速由 290 r/min 递增至 330 r/min 时,残膜回收率呈现出先增大、后减小的变化趋势。这主要是因为当帆布带式送膜装置作业速度一定时,其向浮动卷膜装置的输膜量基本稳定,卷膜驱动辊带动卷膜从动辊转动,实现对分离残膜的有序、适时回收;当卷膜驱动辊转速进一步增大时,卷膜从动辊转速增加,使得变径卷膜辊线速度增大,对分离残膜的抓取、卷收能力不断提升,以致于出现撕扯、断裂现象,导致作业机残膜回收率有所下降。由响应曲面变化趋势看出卷膜驱动辊转速对残膜回收率影响略微大于作业机前进速度的影响。

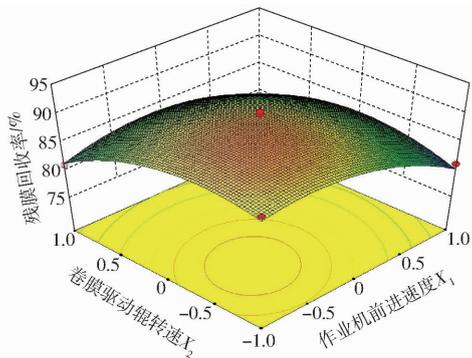


图 10 作业机前进速度与卷膜驱动辊转速对残膜回收率的影响

Fig. 10 Impact of operation machine speed and film-curling driving roller rotating speed on plastic film collecting ratio

由图 11 可以看出,当作业机前进速度控制在 0.50 ~ 0.70 m/s、输膜轴转速为 500 ~ 510 r/min 时,样机残膜回收率较高。由响应曲面形状及其等高线密度可以看出,作业机前进速度和输膜轴转速的交互作用对残膜回收率影响并不显著,与方差分析结果相同。

由图 12 可知,当作业机前进速度固定在某一水平,输膜板倾角由 25° 向 35° 不断递增变化时,残膜

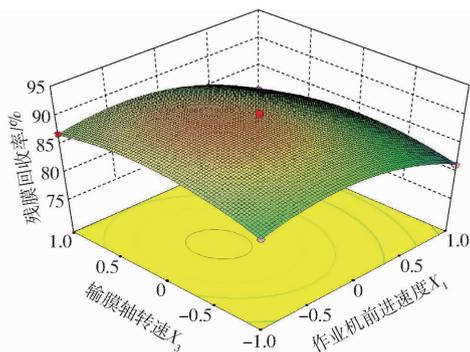


图 11 作业机前进速度与输膜轴转速对残膜回收率的影响

Fig. 11 Impact of operation machine speed and transporting film axis rotating speed on plastic film collecting ratio

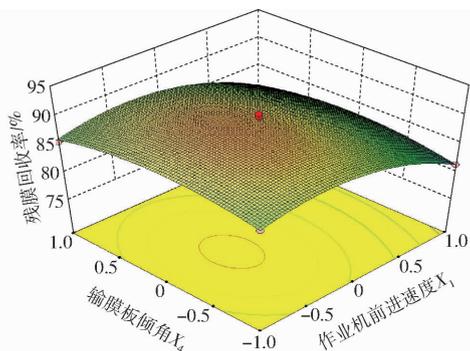


图 12 作业机前进速度与输膜板倾角对残膜回收率的影响

Fig. 12 Impact of operation machine speed and transporting film sheet dip angle on plastic film collecting ratio

回收率总体趋势基本无明显波动,表明输膜板倾角对残膜回收率的影响不显著,与方差分析结果相同。

由图 13 响应曲面形状可以看出,卷膜驱动辊转速与输膜轴转速对残膜回收率的影响极其显著。当作业机卷膜驱动辊转速固定在某一水平,输膜轴转速由 480 r/min 向 520 r/min 不断递增时,残膜回收率呈现先增大、后减小的总体变化趋势。产生该现

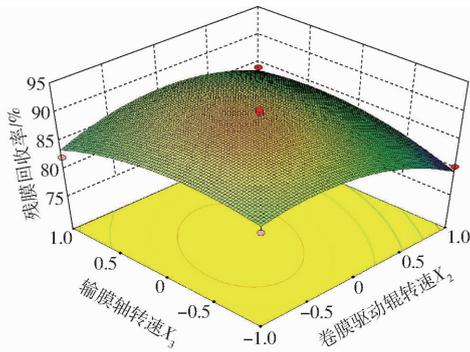


图 13 卷膜驱动辊转速与输膜轴转速对残膜回收率的影响

Fig. 13 Impact of film-curling driving roller rotating speed and transporting film axis rotating speed on plastic film collecting ratio

象的主要原因是当输膜轴转速逐渐增大时,帆布输送带在输膜轴驱动作用下快速运转,在帆布输送带与输膜板的相互摩擦作用下将残膜呈片状展开,实现残膜有序回收;当输膜轴转速由 500 r/min 进一步增大时,由于卷膜驱动辊、从动辊转速基本恒定,部分输送残膜不能及时卷收,导致浮动卷膜装置入口处有大量残膜滞留,随机产生对变径卷膜辊的缠绕、卡死与堵塞现象,同时有少量残膜会在帆布输送带的回转带动下惯性甩出,这是造成作业机残膜回收率下降的主要原因之一。

由图 14 可以看出,两因素对残膜回收率影响权重有所差异,卷膜驱动辊转速对残膜回收率影响大于输膜板倾角,这与方差分析结果相一致。当卷膜驱动辊转速恒定在某一水平,输膜板倾角由 25° 递增至 35° 时,残膜回收率有所动态变化,但变化趋势不很明显。

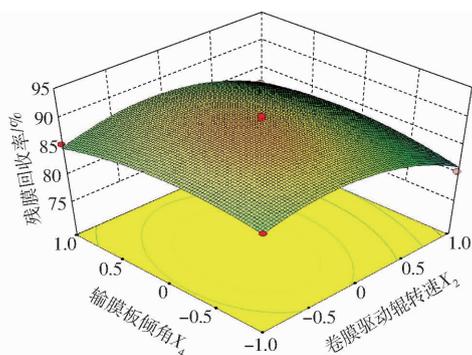


图 14 卷膜驱动辊转速与输膜板倾角对残膜回收率的影响

Fig. 14 Impact of film-curling driving roller rotating speed and transporting film sheet dip angle on plastic film collecting ratio

由图 15 可知,当输膜板倾角固定在某一水平,输膜轴转速由 480 r/min 向 520 r/min 不断变化时,残膜回收率呈现出先增后减的略微变化趋势。由等高线密度可以看出,输膜轴转速和输膜板倾角的交互作用对残膜回收率影响不显著,与方差分析结果

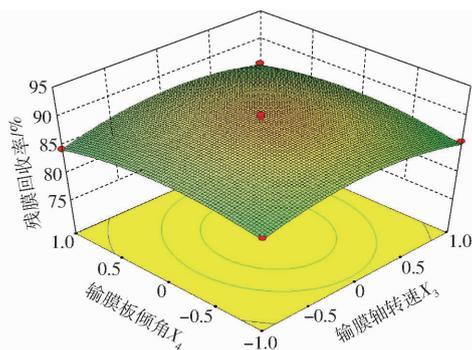


图 15 输膜轴转速与输膜板倾角对残膜回收率的影响
Fig. 15 Impact of transporting film axis rotating speed and transporting film sheet dip angle on plastic film collecting ratio

相同。

4.3 作业参数优化与试验验证

为保证帆布带式马铃薯挖掘-残膜回收联合作业机作业时残膜回收率为 100%,应用 Design-Expert 8.06 软件中 Optimization - Numerical 模块对回归方程模型进行该目标下优化求解,得到联合回收机最优作业参数为:作业机前进速度 0.72 m/s、卷膜驱动辊转速 303 r/min、输膜轴转速 499 r/min 和输膜板倾角 29°。

为验证所建模型(式(12))的可靠性,采用帆布带式马铃薯挖掘-残膜回收联合作业机的最优作业参数进行 6 次马铃薯收获、残膜回收性能试验。试验结果表明,验证试验的残膜回收率平均值为 92.1%,较优化前的残膜回收率(79.2% ~ 90.4%)有明显提升;同时,根据文献[22]的试验方法测得作业机的明薯率为 96.6%、伤薯率为 2.2%,表明在优化作业参数条件下其各项作业指标均达到国家和行业标准要求,能够实现马铃薯挖掘集条铺放与残膜回收的联合作业过程,因此该回归模型是可靠的。

5 结论

(1) 针对马铃薯收获与残膜回收一体化作业要求,设计了帆布带式马铃薯挖掘-残膜回收联合作业机,通过对防缠绕装置、帆布带式送膜装置、浮动卷膜装置关键工作参数进行分析计算,确定出影响联合回收机残膜回收率的相关试验因素及其取值范围。

(2) 结合 Box - Behnken 试验设计原理,采用四因素三水平响应面分析方法,进行帆布带式马铃薯挖掘-残膜回收联合作业机作业性能试验,通过响应曲面分析得到影响残膜回收率的因素由大到小依次为:卷膜驱动辊转速、作业机前进速度、输膜轴转速和输膜板倾角。

(3) 建立残膜回收率与作业机前进速度、卷膜驱动辊转速、输膜轴转速、输膜板倾角的二次多项式回归模型。以田间覆盖残膜能够全部被回收($Y = 100%$)为目标,获得帆布带式马铃薯挖掘-残膜回收联合作业机最佳工作参数:作业机前进速度为 0.72 m/s、卷膜驱动辊转速为 303 r/min、输膜轴转速为 499 r/min、输膜板倾角为 29°。田间验证试验表明,帆布带式马铃薯挖掘-残膜回收联合作业机残膜回收率均值可达 92.1%,较优化前有明显提升;同时在此工作参数条件下,作业机明薯率为 96.6%、伤薯率为 2.2%,各项作业指标均达到国家和行业标准要求。

参 考 文 献

- 1 QIN Shuhao, ZHANG Junlian, DAI Hailin, et al. Effect of ridge-furrow and plastic-mulching planting patterns on yield formation and water movement of potato in a semi-arid area[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 131: 87 – 94.
- 2 戴飞,辛尚龙,赵武云,等. 全膜面覆土式马铃薯播种联合作业机设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(3): 76 – 83, 56. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170309&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.009.
DAI Fei, XIN Shanglong, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of potato planter combined machine for covering soil on the top of full film surface[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(3): 76 – 83, 56. (in Chinese)
- 3 孙伟,刘小龙,石林榕,等. 刮板升运带式膜上覆土装置覆土特性[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(7): 38 – 45.
SUN Wei, LIU Xiaolong, SHI Linrong, et al. Covering soil on plastic-film characteristics of scraper lifting belt mechanism[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(7): 38 – 45. (in Chinese)
- 4 王志超,李仙岳,史海滨,等. 农膜残留对土壤水动力参数及土壤结构的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(5): 101 – 106, 140. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150515&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.015.
WANG Zhichao, LI Xianyue, SHI Haibin, et al. Effects of residual plastic film on soil hydrodynamic parameters and soil structure [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(5): 101 – 106, 140. (in Chinese)
- 5 戴飞,赵武云,孙伟,等. 马铃薯收获与气力辅助残膜回收联合作业机设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(1): 64 – 72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170109&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.009.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, SUN Wei, et al. Design and experiment of combined operation machine for potato harvesting and plastic film pneumatic auxiliary collecting[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(1): 64 – 72. (in Chinese)
- 6 赵岩,陈学庚,温浩军,等. 农田残膜污染治理技术研究现状与展望[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(6): 1 – 14. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170601&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.001.
ZHAO Yan, CHEN Xuegeng, WEN Haojun, et al. Research status and prospect of control technology for residual plastic film pollution in farmland[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(6): 1 – 14. (in Chinese)
- 7 王吉奎,付威,王卫兵,等. SMS-1500型秸秆粉碎与残膜回收机的设计[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 168 – 172.
WANG Jikui, FU Wei, WANG Weibing, et al. Design of SMS-1500 type straw chopping and plastic film residue collecting machine[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(7): 168 – 172. (in Chinese)
- 8 谢建华,侯书林,付宇,等. 残膜回收机弹齿式拾膜机构运动分析与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(增刊1): 94 – 99. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2013s118&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.018.
XIE Jianhua, HOU Shulin, FU Yu, et al. Motion analysis and experiment on spring-tooth mulching plastic film collector[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(Supp. 1): 94 – 99. (in Chinese)
- 9 杨丽,张东兴,侯书林,等. 玉米苗期地膜回收机结构参数分析与试验[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(12): 29 – 34.
YANG Li, ZHANG Dongxing, HOU Shulin, et al. Analysis of structural parameters and experiment of plastic film collector for corn fields during seedling period[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(12): 29 – 34. (in Chinese)
- 10 李斌,王吉奎,胡凯,等. 残膜回收机顺向脱膜机理分析与试验[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(21): 23 – 28.
LI Bin, WANG Jikui, HU Kai, et al. Analysis and test of forward film removing mechanism for polythene film collector[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(21): 23 – 28. (in Chinese)
- 11 游兆延,胡志超,吴惠昌,等. 1MCDS-100A型铲筛式残膜回收机的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(9): 10 – 18.
YOU Zhaoyan, HU Zhichao, WU Huichang, et al. Design and experiment of 1MCDS-100A typed shovel-sieve residual film recovery machine[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(9): 10 – 18. (in Chinese)
- 12 牛琪,纪超,赵岩,等. 集条残膜打包机捡拾清理装置设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(5): 101 – 107. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170512&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.012.
NIU Qi, JI Chao, ZHAO Yan, et al. Design and experiment on collecting and separating device for strip plastic film baler [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(5): 101 – 107. (in Chinese)
- 13 吕钊钦,张磊,张广珍,等. 链条导轨式地膜回收机的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(18): 48 – 54.
Lǚ Zhaoqin, ZHANG Lei, ZHANG Guangling, et al. Design and test of chain guide rail-type plastic film collector[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(18): 48 – 54. (in Chinese)
- 14 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下册)[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- 15 戴飞,赵武云,张锋伟,等. 玉米全膜双垄沟残膜回收机作业性能优化与试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(18): 50 – 60.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, ZHANG Fengwei, et al. Optimization and experiment of operating performance of collector for corn whole plastic film mulching on double ridges[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(18): 50 – 60. (in Chinese)
- 16 郭笑欢. 马铃薯挖掘与残膜回收一体机设计研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2017.

- GUO Xiaohuan. Design of the integrated machine for digging potato and recycling residual film[D]. Lanzhou:Gansu Agricultural University,2017. (in Chinese)
- 17 由佳翰,陈学庚,张本华,等. 4JSM-2000型棉秆粉碎与残膜回收联合作业机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(10):10-16.
YOU Jiahuan, CHEN Xuegeng, ZHANG Benhua, et al. Design and experiment of 4JSM-2000 type combined operation machine for cotton stalk chopping and residual plastic film collecting[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(10):10-16. (in Chinese)
- 18 袁雪,祁力钧,王虎,等. 温室摇摆式变量弥雾机喷雾参数响应面法优化[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(4):45-50. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120410&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.010.
YUAN Xue, QI Lijun, WANG Hu, et al. Spraying parameters optimization of swing, automatic variables and greenhouse mist sprayer with response surface method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4):45-50. (in Chinese)
- 19 彭飞,李腾飞,康宏彬,等. 小型制粒机喂料器参数优化与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(2):51-58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160207&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.007.
PENG Fei, LI Tengfei, KANG Hongbin, et al. Optimization and experiment on feeder for small-scale pellet mill[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2):51-58. (in Chinese)
- 20 葛云,张立新,谷家伟,等. 对辊式红花采收装置参数优化及试验[J]. 农业工程学报,2015,31(21):35-42.
GE Yun, ZHANG Lixin, GU Jiawei, et al. Parameter optimization and experiment of dual roller harvesting device for safflower[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21):35-42. (in Chinese)
- 21 高筱钧,周金华,赖庆辉. 中草药三七气吸滚筒式精密排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(2):20-28.
GAO Xiaojun, ZHOU Jinhua, LAI Qinghui. Design and experiment of pneumatic cylinder precision seed-metering device for panax notoginseng[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2):20-28. (in Chinese)
- 22 吕金庆,田忠恩,杨颖,等. 4U2A型双行马铃薯挖掘机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(6):17-24.
LÜ Jinqing, TIAN Zhongen, YANG Ying, et al. Design and experimental analysis of 4U2A type double-row potato digger[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6):17-24. (in Chinese)

(上接第93页)

- 17 陈书法,张石平,孙星钊,等. 水田高地隙自走式变量撒肥机设计与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(11):16-21.
CHEN Shufa, ZHANG Shiping, SUN Xingzhao, et al. Design and experiment of self-propelled high-ground-clearance spreader for paddy variable-rate fertilization[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(11):16-21. (in Chinese)
- 18 吕金庆,尚琴琴,杨颖,等. 锥盘式撒肥装置的性能分析与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(11):16-24.
LÜ Jinqing, SHANG Qinqin, YANG Ying, et al. Performance analysis and experiment on granular fertilizer spreader with cone disc[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11):16-24. (in Chinese)
- 19 胡永光,杨叶成,肖宏儒,等. 茶园施肥机离心撒肥过程仿真与参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(5):77-82. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160511&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.011.
HU Yongguang, YANG Yecheng, XIAO Hongru, et al. Simulation and parameter optimization of centrifugal fertilizer spreader for tea plants[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(5):77-82. (in Chinese)
- 20 施印炎,陈满,汪小岳,等. 稻麦精准变量施肥机排肥性能分析与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(7):97-103. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170712&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.012.
SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Analysis and experiment of fertilizing performance for precision fertilizer applicator in rice and wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(7):97-103. (in Chinese)
- 21 陈满,施印炎,汪小岳,等. 冬小麦精准追肥机专家决策系统[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(7):17-22. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150703&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.003.
CHEN Man, SHI Yinyan, WANG Xiaochan, et al. Expert decision system of variable nitrogen application in winter wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(7):17-22. (in Chinese)
- 22 耿其东,方志国. 偏置式曲柄滑块机构仿真与运动分析[J]. 机械工程与自动化,2011,166(3):49-51.
GENG Qidong, FANG Zhiguo. Simulation and kinetic characteristic analysis of deflection slider-crank mechanism[J]. Mechanical Engineering and Automation,2011,166(3):49-51. (in Chinese)
- 23 付乾坤,荐世春,贾洪雷,等. 玉米灭茬起垄施肥播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(4):9-16.
FU Qiankun, JIAN Shichun, JIA Honglei, et al. Design and experiment on maize stubble cleaning fertilization ridging seeder[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(4):9-16. (in Chinese)
- 24 NY/T1003—2006 施肥机械质量评价技术规范[S]. 2006.