

自走式豌豆割晒机设计与试验

李金凤 赵继云 刘思瑶 侯秀宁 陈相安 张学敏
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对我国豌豆收获缺少适合机具的现状,为实现豌豆作物机械化收获,设计了4SZ-1.2型豌豆割晒机。首先,深入了解我国豌豆种植制度现状和豌豆收获技术要求,分析了机械收获作业过程中容易出现的切割困难、输送堵塞、铺放缠绕等问题,设计的4SZ-1.2型豌豆割晒机主要由切割装置、防缠绕拨禾装置和输送铺放装置组成,能够有效实现豌豆作物的切割、输送和铺放作业;然后,利用二次回归正交旋转试验进行分析,确定了最优的参数组合为前进速度1.03 m/s、割刀速度1.19 m/s、输送速度1.22 m/s、拨禾轮转速45.97 r/min;最后,进行了田间试验验证,结果表明,割晒机作业条铺整齐、割茬统一,漏割率为4.78%,收获损失率为4.96%,作业效率为0.185 hm²/h,能够满足豌豆收获要求。

关键词: 豌豆割晒机; 参数设计; 正交试验; 自走式

中图分类号: S225.2⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)03-0107-10 **OSID:** 

Design and Experiment of Self-propelled Pea Windrower

LI Jinfeng ZHAO Jiyun LIU Siyao HOU Xiuning CHEN Xiang'an ZHANG Xuemin
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In view of the lack of suitable machinery for pea harvesting in China, in order to realize the mechanized harvesting of pea crops, the 4SZ-1.2 pea windrower was designed. Firstly, the current situation of China's pea planting system and pea harvesting technical requirements were thoroughly understood, and the problems such as cutting difficulties, transportation blockage, lay blockage that are easy to occur in the process of mechanical harvesting were comprehensively analyzed. The designed 4SZ-1.2 pea windrower was mainly composed of the cutting device, the anti-winding reeling device and the conveying and laying device, which can effectively realize the cutting, conveying and laying operations of pea crops; then the quadratic regression orthogonal rotation test was used to analyze and determine the optimal parameter combination: the forward speed was 1.03 m/s, the cutting speed was 1.19 m/s, the conveying speed was 1.22 m/s, and the reel rotation speed was 45.97 r/min. Finally, the field tests of pea windrower were carried out in Pinggu, Beijing, and the field results showed that the pea placement after the pea windrower was laid neatly, the stubble was cut uniformly. After data sorting, the following data results can be obtained: the missed cut rate was 4.78%, the harvest loss rate was 4.96%, and the operation efficiency was 0.185 hm²/h, which met the demand for peas harvesting. The overall structure of the pea windrower was simple and the cost was low. It was hoped that the research result can provide technical support for the application of pea harvesting machinery.

Key words: pea windrower; parameter design; orthogonal test; self-propelled

0 引言

豌豆是我国重要食用豆类之一。目前,我国豌豆收获仍主要依靠人工收割,传统的人工收获方式

费时、费力,成本较高。国外豌豆生产机械化水平高,而豌豆价格远低于国内,这严重影响了国内豆农种植豌豆积极性。为突破豌豆产业发展瓶颈,亟需改变传统豌豆生产模式,采用完善的机械化方式进

收稿日期: 2020-06-27 修回日期: 2020-07-20
基金项目: 科技部创新方法工作专项(2016IM030200)
作者简介: 李金凤(1993—),女,博士生,主要从事车辆工程研究,E-mail: lijinfengvip163@163.com
通信作者: 张学敏(1975—),男,副教授,博士生导师,主要从事车辆动力与环保技术研究,E-mail: xuemin_zh@cau.edu.cn

行豌豆生产作业。

国外豌豆收获技术较为成熟,大型农机具广泛采用先进自动控制技术,但其体积庞大、价格昂贵,不适用于我国豌豆植株品种与小田块种植模式^[1-8]。国内专家学者在割晒机方面有较多的研究成果,完成了特定作物割晒机的设计与改进,收获效果较好^[9-14]。我国豌豆收获作业广泛采用分段收获模式,一般要求收割后留茬整齐,整株收割完整也便于后续晾晒捡拾等作业。由于豌豆作物伏地蔓生,且分枝相互交错缠绕,茎秆柔软易被割台推倒,故难以有效切割豌豆根部。同时,割台区豌豆易与待收割区豌豆相互缠绕,导致收割过程中割台喂入量不稳定,在豌豆植株输送、铺放过程中,极易产生堵塞、缠绕现象,连续性收割难度较大,损失较高,这些制约了豌豆割晒机的发展^[15-16]。为此,本文基于豌豆收获农艺要求,通过理论分析和试验优化,设计一种豌豆割晒机,采用二次回归正交旋转组合设计试验方法获得最佳工作参数,完成样机的试制加工,并进行田间试验验证,以期解决豌豆收割困难、输送堵塞等问题,为豌豆收获机械应用提供技术支撑。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

豌豆割晒机主要由动力底盘和割晒装置两部分组成,通过电力驱动工作部件,简化传动路线和机械结构。动力底盘包括车架、186单缸柴油机、液压转向系统、液压碟刹系统、液压升降系统、电气系统、操纵系统和“3+1”变速传动系统等;割晒装置采用电力驱动,主要包括割台电机、割台总成、立刀电机、立刀装置、拨禾轮电机及拨禾装置总成等。割晒装置通过挂接装置与动力底盘连接,挂接装置由浮动滑块、滑动导轨和升降油缸组成,割晒装置端为浮动滑块,动力底盘端为滑动导轨和升降油缸,升降油缸通过调整浮动滑块在导轨的位置实现割台高度调节。柴油机驱动整车行驶,同时通过发电机组为动力电池充电,向割台电机、立刀电机和拨禾轮电机提供电能。整机结构如图1所示。

1.2 工作原理

4SZ-1.2型豌豆割晒机在田间工作时,立式割刀由立刀电机驱动,负责割断收割区域与待收割区域缠绕的豌豆作物,避免因收获区与待收获区豌豆作物相互缠绕而影响作业效果;拨禾装置由拨禾轮电机驱动,负责将爬伏生长的豌豆作物挑起,同时将割断的禾秆推向割台后部,清除切割器上残留茎秆。拨禾装置下方设置有卧式切割器,由割台电机驱动,可对拨起植株所露出根部进行切割。输送铺放装置

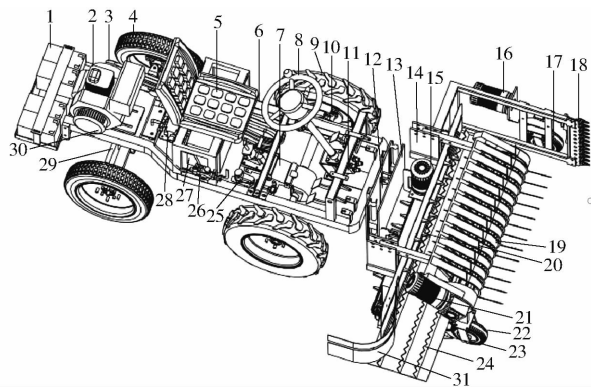


图1 整机结构示意图

Fig. 1 Diagram of complete machine structure

1. 蓄电池组 2. 发电装置 3. V型传动带 4. 转向轮总成
5. 座椅 6. 车架 7. “3+1”变速箱 8. 方向盘 9. 前驱动轮
10. 碟刹装置 11. 转向器 12. 割台升降油缸 13. 挂接装置
14. 割台架 15. 割台电机 16. 立刀电机 17. 左仿形支撑轮
18. 立式割刀 19. 拨禾装置总成 20. 输送链 21. 拨禾装置电机
22. 右仿形支撑轮 23. 水平割刀总成 24. 抖动导流板
25. 制动分泵 26. 升降控阀 27. 液压油箱 28. 齿轮泵 29. 转向油缸
30. 柴油机 31. 铺放挡板

主要由输送拨指、输送链条和抖动导流板组成,输送拨指在输送链条带动下拨动豌豆作物向机器侧面移动;抖动导流板可进行往复摆动,推动豌豆作物朝着排禾口处移动,同时使输送的豌豆作物处于抖动状态,有效辅助排禾。当豌豆作物输送至排禾口处时,铺放挡板将其剥落并沿着铺放挡板曲面落至地面,完成割晒作业。

豌豆割晒机动力系统功率设计主要根据整机参数和实际工作要求,动力系统总功率应满足豌豆割晒机作业功率的需求。整机行驶受力方程式为

$$F_t = F_f + F_w + F_i + F_j \quad (1)$$

式中 F_t ——车辆驱动力, N

F_f ——滚动阻力, N

F_w ——空气阻力, N

F_i ——坡度阻力, N

F_j ——加速阻力, N

由于作业过程行驶缓慢,忽略空气阻力,将式(1)进一步整理,可得

$$\frac{T_{iq} i_0 i_g \eta_r}{r} = Gf + G \tan \alpha + \delta m \frac{du}{dt} \quad (2)$$

式中 T_{iq} ——发动机转矩, N·m

i_0 ——主减速器传动比

i_g ——变速器传动比

η_r ——传动系机械效率, %

r ——车轮半径, m

G ——车辆重力, N

f ——滚动阻力系数

α ——道路坡度, (°)

m ——整机质量,kg
 δ ——车辆旋转质量换算系数
 u ——行驶速度,m/s

整机质量为 886 kg,取 $i_0=2.25$, $i_g=8.91$, $\eta_r=95\%$, $r=0.32$ m, $f=0.1$, $\alpha=7^\circ$,忽略加速阻力,计算得发动机所需转矩约为 32 N·m,结合拨禾轮电机额定功率为 0.55 kW,割台电机额定功率为 0.90 kW,立刀电机额定功率为 0.55 kW,选择转矩为 32 N·m、功率为 6 kW 的 186 单缸柴油机。传动系统如图 2 所示。

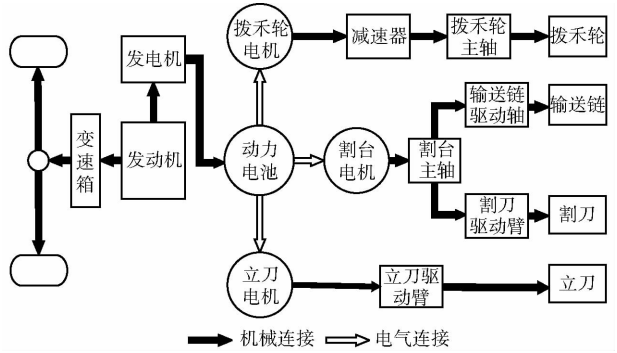


图 2 传动系统示意图
Fig.2 Schematic of transmission system

1.3 主要技术参数

根据北京市平谷豌豆大田种植区实地调研可知,豌豆大田种植通常选取蔓生型品种,播种深度为 30~50 mm,行距为 300 mm 及以上,每公顷播种量为 180~300 kg,种肥同施;收获时,豌豆自下而上逐渐成熟,机收时应保证豌豆成熟度处于 80%~90% 范围内,表现为田中植株自然黄叶比例高于 80% 且上部荚果(60%~70%)变黄,此时豌豆茎叶交错缠绕严重,如毯状覆盖于地面,自然状态下豌豆作物覆盖层厚度为 5~15 cm,平均每公顷植株总质量为 7 500~9 750 kg,产量为 0.75~0.98 kg/m²。结合豌豆作物特性和作业动力计算,豌豆割晒机最大喂入量约为 3.78 kg/s,可依据田间豌豆收获期生长状况,合理调节割晒机前进速度、拨禾轮转速及割刀速度等,4SZ-1.2 型豌豆割晒机基本参数如表 1 所示。

表 1 主要技术参数
Tab.1 Main technical parameters

参数	数值/型式
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	3 300×1 285×1 665
配套动力/kW	6
有效工作幅宽/mm	1 200
整机质量/kg	886
作业速度/(km·h ⁻¹)	≥3
行走系结构	轮式
挂接方式	前置悬挂

2 关键部件设计

2.1 切割装置

4SZ-1.2 型豌豆割晒机卧式切割器为往复式切割器,为降低收获过程中待割区与收割区豌豆缠绕导致豌豆拉扯断裂损伤现象,在割台左侧设置立式割刀。

考虑到当豌豆作物成熟度较低时,豌豆作物柔嫩易破损;当成熟度过高时,豌豆作物极易炸荚,造成产量流失,选择成熟度处于 80%~90% 范围内的豌豆进行机械收获作业。此时,豌豆茎秆含水率较高,且具有较高韧性,切割速度为 3 km/h 时满足切割需求。切割器工作时的功率消耗主要分为切割功率消耗 N_g 和空转功率消耗 N_k 两部分,切割器切割功率 N 为

$$N=N_g+N_k \tag{3}$$

其中
$$N_g=\frac{v_mBJ_0}{1\,000} \tag{4}$$

$$N_k=(0.6\sim1.1)B \tag{5}$$

式中 v_m ——机组前进速度,m/s

B ——作业幅宽,m

J_0 ——切割比功,J/m²

v_m 取 3 km/h, B 为 1.2 m, J_0 取 120 J/m², N_k 为 0.6 B ,可得卧式切割器的切割功率为 0.84 kW,故选用额定功率 0.90 kW、额定电压 48 V、最高转速为 500 r/min 的直流无刷电机驱动;同理立式割刀选取切割功率为 0.55 kW、额定电压 48 V、最高转速为 500 r/min 的直流无刷电机驱动。

2.2 防缠绕拨禾轮

2.2.1 拨禾轮运动分析

拨禾轮为伸缩齿式拨禾轮,进行挑拨作业时拨齿伸出,挑拨作业结束后快速回缩,避免挂缠作物。拨齿结构如图 3a 所示,对拨齿末端进行曲线拟合得到齿端曲线拟合曲线如图 3b 所示。

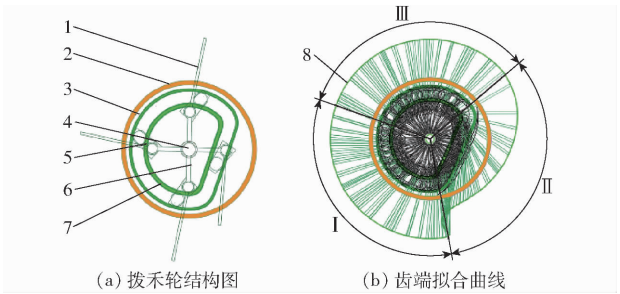


图 3 拨禾轮示意图

Fig.3 Schematics of reel

1.拨齿 2.滚筒护板 3.滑道外壁 4.中间轴 5.曲柄 6.支架 7.滑道内壁 8.拨齿末端拟合曲线

在拨禾轮作业过程中,每个工作循环由 3 个互

相衔接的阶段组成：

拨禾阶段Ⅰ：拨齿尖端有一定线速度，且速度变化不大，拨齿伸出滚筒护板较长，将豌豆作物迅速而平稳挑起，使豌豆作物沿滚筒护板表面向后推送。

回缩阶段Ⅱ：当豌豆作物被运送到接近喂入口时，拨齿应及时收缩到滚筒护板内，与滚筒护板配合剥离拨齿上豌豆作物，拨齿收缩进滚筒护板方向与地面基本保持垂直，豌豆受重力下落。

过渡阶段Ⅲ：挑起豌豆之前的准备阶段，此时拨齿放齿迅速，保证拨齿挑拨作物时具有较大的线速度。

豌豆收获时拨禾轮主要起扶持、推送的作用，拨禾轮功率消耗 N_b 近似计算式为

$$N_b = \frac{P_b B v_b}{1\,000}$$

(6)

式中 P_b ——拨禾轮单位宽度的阻力，一般为 25 ~ 40 N/m

v_b ——拨齿末端线速度，m/s

选取拨禾轮单位宽度的阻力 P_b 为 40 N/m，取 v_b 为 2 m/s，可得 N_b 约为 0.1 kW，考虑到传动功率损耗，选用功率为 0.55 kW、额定电压 48 V、最高转速为 500 r/min 的直流无刷电机驱动。

2.2.2 拨禾轮结构设计

拨禾轮工作时，中间轴做匀速运动，中间轴通过支架与 4 个管轴固定连接，管轴通过曲柄使滚轮沿定向轨道运动，拨齿从滚筒护板内伸出，完成拨禾推送作业后，拨齿从豌豆作物中抽出回缩进滚筒护板内。拨禾轮结构如图 4 所示。

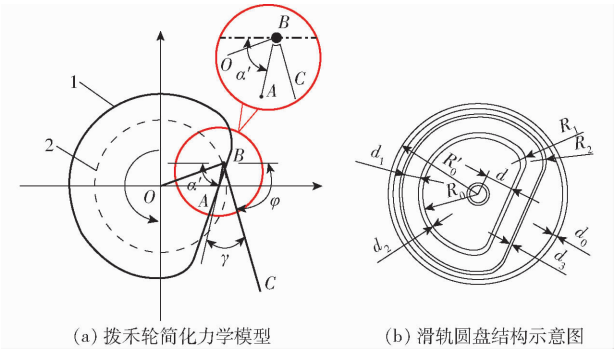


图 4 拨禾轮结构示意图
Fig.4 Diagrams of reel schematic

1. 曲柄滚轮轴心轨迹线 2. 拨齿轴圆周曲线

图 4a 中拨齿 BC 与曲柄 AB 固定连接，并与 OB 杆铰接， A 为曲柄滚轮轴心所在点， B 为拨齿轴所在点， C 为拨齿末端点。其中 B 为主动点，沿着曲线 2 做圆周运动； A 、 C 为从动点， A 沿着曲柄滚轮轴心轨迹线 1 运动， C 做复杂的平面曲线运动，并保证 B 点位置相对于 A 点位置始终超前。曲柄滚轮轴心轨

迹线 1 的曲线方程为

$$y = f_n(x)$$

(7)

考虑到曲柄长度不变，即 AB 距离为恒定值，主动点 B 在拨齿轴圆周曲线 2 上任意一个位置处都对应从动点 A 在曲柄滚轮轴心轨迹线 1 上某个特定位置。在不考虑机具前进速度情况下，设曲柄 AB 长度为 l ， OB 杆长度为 R ， OB 杆绕中心轴旋转的圆周角速度为 ω ，点 A 坐标为 $A(x_A, y_A)$ ，点 B 坐标为 $B(x_B, y_B)$ ，根据两点间距离公式可得

$$\begin{cases} x_B = R \cos(\omega t) \\ y_B = R \sin(\omega t) \\ (x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 = l^2 \\ y_A = f_n(x_A) \end{cases}$$

(8)

式中 t ——作业时间，s

根据式 (8) 可得出 A 、 B 两点坐标。同时可获得 AB 两点间斜率方程

$$\tan \alpha' = \frac{y_A - y_B}{x_A - x_B}$$

(9)

式中 α' ——曲柄 AB 与水平面夹角，($^\circ$)

图 4a 中 γ 为拨齿与曲柄夹角，本次设计为 30° ，可求得 $\varphi = \pi - \alpha' - \gamma$ ，设拨齿长度为 l' ，则点 C 位移方程为

$$\begin{cases} x_C = x_B + l' \cos \varphi \\ y_C = y_B + l' \sin \varphi \end{cases}$$

(10)

式中 φ ——拨齿 BC 与水平面夹角，($^\circ$)

l' ——拨齿长度，mm

考虑机具前进速度，则点 C 位移方程为

$$\begin{cases} x_C = v_m t + R \cos(\omega t) + l' \cos \varphi \\ y_C = R \sin(\omega t) + l' \sin \varphi \end{cases}$$

(11)

伸缩齿式拨禾轮轨道受机构部件与拨齿尺寸约束，拨禾轮滑轨圆盘结构如图 4b 所示，拨齿长度取 190 mm，滑轨圆盘半径 $R'_0 = 180$ mm，滑轨内侧壁圆弧半径 $R_0 = 110$ mm，滑轨内侧壁圆角 $R_1 = 30^\circ$ ，滑轨外侧壁圆角 $R_2 = 45^\circ$ ，圆盘轴心到直边滑轨内侧壁距离 $d = 56$ mm，圆盘外壁厚度 $d_0 = 10$ mm，滑轨宽度 $d_1 = 35$ mm，滑轨内侧壁厚度 $d_2 = 8$ mm，滑轨外侧壁壁厚 $d_3 = 4$ mm。

由于拨齿是拨禾装置主要工作部件，豌豆作物自然株高为 384 mm 且伏地严重，为实现拨禾轮拨齿扶持切割，拨齿作用点应尽量贴近地面，本次设计拨齿作用点为豌豆自然株高 1/4 位置处，要使拨禾轮对割下豌豆作物有稳定推送作用，拨禾轮的安装高度 H 应满足条件

$$H > R' + \frac{3}{4}(L - h)$$

(12)

式中 R' ——拨禾轮半径，mm

h ——割茬高度,mm
 L ——茎秆高度,mm
考虑到挑拨位置非固定性,垂直高度取平均值 $L=192\text{ mm}$,本次拨禾轮半径 $R'=180\text{ mm}$,割茬高度 $h=40\text{ mm}$,计算可得 $H>409\text{ mm}$,故取 $H=410\text{ mm}$ 。

一般拨禾轮在豌豆收获过程中会因拥堵致拨禾轮停转,由于拨禾轮结构特殊性,拟在拨禾轮外侧加装滚筒护板,将豌豆作物从拨禾轮上剥落,达到防缠绕效果。防缠绕滚筒护板结构为圆环状,与机架通过铆钉连接均匀地嵌套在拨禾轮上,相邻防缠绕滚筒护板留有间隙,满足拨齿在间隙内转动。割台长度为 $1\,200\text{ mm}$,拨齿共 13 排,各拨齿相距 120 mm ,防缠绕滚筒护板宽度设置为 100 mm 。伸缩齿拨禾轮配合外置滚筒护板,实现防缠绕拨禾作业。

2.3 输送铺放装置

2.3.1 抖动导流板设计

输送部分的前挡板上设有两条有输送拨指的输送链条协同作业,为提高输送效率,增设抖动导流板,板面固定导料锯齿,抖动导流板与卧式切割器固定连接,由割台电机提供动力。抖动导流板的抖动形式为横向往复直线运动,其平均速度 v_p 与卧式切割器刀片相同。计算公式为

$$v_p = \frac{S}{t_0} = \frac{n_0 S}{30} = \frac{n_0 r'}{15} \tag{13}$$

式中 S ——导向角, ($^\circ$)

t_0 ——一个行程所需时间,s

n_0 ——曲柄转速,r/min

r' ——曲柄长度,m

抖动导流板的导料锯齿与导流板角度 θ 直接影响导流作用,在 $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 范围中,当 $\theta=0^\circ$ 时,导料锯齿与导流板贴合,无法实现导流作用;当选择 90° 时,导料锯齿与导流底板形成的有用导流面仅为导料锯齿端面面积;仅有 $\theta=45^\circ$ 时,导料锯齿与导流底板形成的有用导流面为对角线长度为导料锯齿端面长度的正方形面积,此时有用导流面面积最大,导流效果最好,共设置 3 排间隔为 100 mm 的导料锯齿,其结构如图 5 所示。

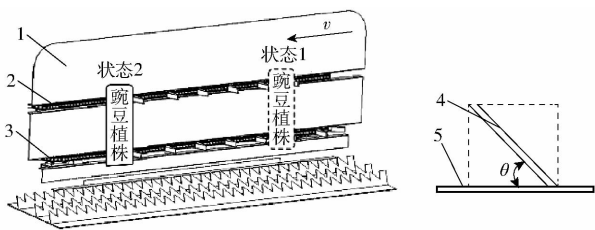


图5 抖动导流板结构示意图

Fig.5 Schematic of dither guide plate

1. 前挡板 2. 上输送链 3. 下输送链 4. 导料锯齿 5. 导流板

2.3.2 铺放挡板设计

排禾口处设置曲面铺放挡板,于前挡板一侧过渡形成曲面结构,当输送拨指及阶梯抖动板输送豌豆作物至铺放挡板处,铺放挡板将输送拨指上的豌豆作物剥离,剥落后的豌豆作物紧贴弯曲的铺放挡板落至地面,完成铺放作业。铺放挡板包括 3 部分(图 6): I 为过渡斜面,豌豆作物逐渐脱离输送链条所在平面,与输送链条所在平面夹角为 β ; II 为半径为 170 mm 的四分之一圆弧,豌豆作物方向发生变化; III 为长度 140 mm 的挡板,其垂直于输送链条所在平面,使豌豆作物在机具一侧完成铺放。

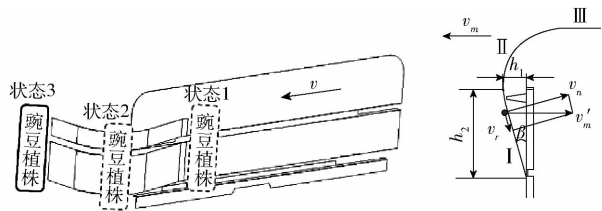


图6 铺放挡板结构示意图

Fig.6 Schematic of baffle laying

由图 6 可知,机组前进速度为 v_m ,豌豆作物相对于割晒机前进方向相反的速度为 v'_m ,切向分速度为 v_r ,法向分速度为 v_n 。在不考虑输送作用的前提下,豌豆作物会在倾斜挡板分力作用下产生“回流”现象,考虑导向板摩擦力作用,豌豆作物接触点相对运动速度越大,豌豆作物的流动性越差。挡板末端与前挡板距离应超出一个输送拨指长度,根据豌豆作物的物料特性及导向板材质特点,设定 $v_r \geq 1.05\text{ km/h}$,由于

$$\sin\beta = \frac{v_r}{v_m} \tag{14}$$

得
$$\beta = \arcsin \frac{v_r}{v_m} \tag{15}$$

式中 β ——倾角, ($^\circ$)

取 $v_m=3\text{ km/h}$, $v_r=1.05\text{ km/h}$, $\sin\beta=0.35$, $\beta=20.5^\circ$,故将铺放挡板导向角 β 设置为 20° ,则有

$$h_2 = \frac{h_1}{\tan\beta} \tag{16}$$

式中 h_1 ——拨指长度,mm

h_2 ——挡板斜面垂向距离,mm

拨指长度 $h_1=100\text{ mm}$,所以 $h_2=274.75\text{ mm}$,故设计挡板斜面垂向距离为 275 mm 。

3 试验与结果分析

3.1 试验条件

对豌豆割晒机进行田间试验验证,试验地为北京市平谷区 ($117^\circ2'17.64''\text{E}$, $40^\circ20'41.34''\text{N}$),试验点豌豆成熟度为 85% ,田间管理合理,地表平坦无

石块,豌豆生长状况较好,田中豌豆植株自然黄叶比例不低于 80%,且植株上部荚果(60%~70%)变黄,豌豆成熟度处于 80%~90% 范围内,豌豆成熟度利于机械收获。

3.2 试验设计与结果分析

3.2.1 试验设计

为获得最低收获损失率、漏割率时的割晒机最佳工作参数组合,进行二次正交旋转组合回归设计试验。割晒机收获损失率与前进速度、割刀速度、输送速度、拨禾轮转速 4 个因素有关,而割晒机漏割率与前进速度、割刀速度、拨禾轮转速 3 个因素有关,故针对收获损失率、漏割率指标分别进行正交旋转组合回归设计试验。

考虑到各因素对收获过程有较大影响,进行了单因素预试验。拨禾轮单因素试验中,从较低转速 10 r/min 开始,每次增加 1 r/min,逐步递增后观察拨禾轮对豌豆作物的挑拨情况,经预试验发现,当拨禾轮转速低于 30 r/min 时,由于转速过慢,豌豆作物极易脱落,随着转速逐渐升高,拨禾轮挑拨作业效果较好,而当转速高于 60 r/min 时,豌豆损伤较大。割刀速度单因素试验中,从较低速度 0.30 m/s 开始,每次增加 0.10 m/s,逐步递增后观察割刀对豌豆作物的切割情况,经预试验发现,当割刀速度低于 0.80 m/s 时,豌豆作物不易被切断,漏割现象明显,而当割刀速度高于 1.60 m/s 时,切割速度太高造成残茬重割,功率浪费大。输送速度单因素试验中,从较低速度 0.30 m/s 开始,每次增加 0.10 m/s,逐步递增后观察输送作业情况,经预试验发现,当输送速度低于 0.80 m/s 时,豌豆作物排净困难,输送效果较差,当输送速度高于 1.60 m/s 时,豌豆作物拉扯现象严重,损失增加。前进速度单因素试验中,从较低速度 0.30 m/s 开始,每次增加 0.10 m/s,结合上述各部件速度,前进速度过低或过高会降低收获效率和质量,选择下限为 0.60 m/s,上限为 1.50 m/s。

根据实际作业要求,结合前期试验效果,并参考一般割晒机收获作业速度,收获损失率试验因素编码如表 2 所示,漏割率试验因素编码如表 3 所示。

表 2 收获损失率试验因素编码

Tab.2 Coding of test factors for harvest loss rate

编码	因素			
	前进速度	割刀速度	输送速度	拨禾轮转速
	$X_1/(m \cdot s^{-1})$	$X_2/(m \cdot s^{-1})$	$X_3/(m \cdot s^{-1})$	$X_4/(r \cdot min^{-1})$
1	1.50	1.60	1.60	60
0	1.05	1.20	1.20	45
-1	0.60	0.80	0.80	30

3.2.2 试验结果分析

以收获损失率 Y_1 、漏割率 Y_2 作为主要评价指

表 3 漏割率试验因素编码

Tab.3 Coding of test factors for missed cut rate

编码	因素		
	前进速度 $X_1/$	割刀速度 $X_2/$	拨禾轮转速 $X_4/$
	$(m \cdot s^{-1})$	$(m \cdot s^{-1})$	$(r \cdot min^{-1})$
1	1.50	1.60	60
0	1.05	1.20	45
-1	0.60	0.80	30

标,每组试验重复 3 次取平均值作为试验结果,收获损失率试验方案和结果如表 4 所示,漏割率试验方案和结果如表 5 所示,表中 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 为因素编码值。

表 4 收获损失率试验方案与结果

Tab.4 Test plan and results of harvest loss rate

编号	因素				$Y_1/$
	x_1	x_2	x_3	x_4	%
1	-1	-1	0	0	6.33
2	1	-1	0	0	6.77
3	-1	1	0	0	5.95
4	1	1	0	0	7.51
5	0	0	-1	-1	6.51
6	0	0	1	-1	5.36
7	0	0	-1	1	5.12
8	0	0	1	1	7.21
9	-1	0	0	-1	6.29
10	1	0	0	-1	5.86
11	-1	0	0	1	5.57
12	1	0	0	1	7.52
13	0	-1	-1	0	6.63
14	0	1	-1	0	5.57
15	0	-1	1	0	5.51
16	0	1	1	0	7.39
17	-1	0	-1	0	6.53
18	1	0	-1	0	5.41
19	-1	0	1	0	5.31
20	1	0	1	0	7.05
21	0	-1	0	-1	6.62
22	0	1	0	-1	5.39
23	0	-1	0	1	5.43
24	0	1	0	1	7.28
25	0	0	0	0	4.81
26	0	0	0	0	5.12
27	0	0	0	0	4.93
28	0	0	0	0	4.78
29	0	0	0	0	4.61

根据二次回归正交旋转试验设计方法进行数据分析,获得收获损失率、漏割率试验结果的回归模型方差分析如表 6 所示。根据表 6 可知,收获损失率回归模型、漏割率回归模型中各项 P 值均小于 0.05,影响显著,说明试验响应值的变化非常复杂,各个试验因素对响应值的影响不是简单的线性关

表 5 漏割率试验方案与结果

Tab.5 Test plan and results of missed cut rate

编号	因素			$Y_2/$
	x_1	x_2	x_4	%
1	-1	-1	0	6.44
2	1	-1	0	5.07
3	-1	1	0	5.19
4	1	1	0	5.45
5	0	0	-1	6.49
6	0	0	-1	5.23
7	0	0	1	4.81
8	0	0	1	5.77
9	-1	0	-1	6.48
10	1	0	-1	5.01
11	-1	0	1	4.99
12	1	0	1	5.91
13	0	-1	0	4.81
14	0	1	0	5.12
15	0	-1	0	4.93
16	0	1	0	4.78
17	-1	0	0	4.61

表 6 收获损失率、漏割率回归模型方差分析

Tab.6 Analysis of variance in regression model of harvest loss rate and missed cut rate

方差来源	收获损失率 Y_1				漏割率 Y_2			
	平方和	均方	F	P	平方和	均方	F	P
模型	22.24	1.59	32.51	<0.000 1	6.04	0.67	17.01	0.000 6
X_1	1.43	1.43	29.23	<0.000 1	0.25	0.25	6.30	0.040 4
X_2	0.27	0.27	5.52	0.033 9	0.25	0.25	6.39	0.039 3
X_3	0.35	0.35	7.24	0.017 6				
X_4	0.37	0.37	7.52	0.015 9	0.37	0.37	9.49	0.017 8
X_1X_2	0.31	0.31	6.42	0.023 9	0.66	0.66	16.84	0.004 5
X_1X_3	2.04	2.04	41.84	<0.000 1				
X_1X_4	1.42	1.42	28.98	<0.000 1	1.23	1.23	31.25	0.000 8
X_2X_3	2.16	2.16	44.22	<0.000 1				
X_2X_4	2.37	2.37	48.53	<0.000 1	1.43	1.43	36.21	0.000 5
X_3X_4	2.62	2.62	53.70	<0.000 1				
X_1^2	4.50	4.50	91.99	<0.000 1	0.47	0.47	11.81	0.010 9
X_2^2	4.88	4.88	99.89	<0.000 1	0.53	0.53	13.46	0.008 0
X_3^2	1.75	1.75	35.89	<0.000 1				
X_4^2	2.26	2.26	46.20	<0.000 1	0.65	0.65	16.45	0.004 8
残差	0.68	0.049			0.28	0.039		
失拟	0.54	0.054	1.51	0.368 2	0.13	0.044	1.23	0.407 4
误差	0.14	0.036			0.14	0.036		
总和	22.92				6.31			

系,而存在二次关系,因素间存在明显的交互作用。收获损失率回归模型中失拟项 $P>0.05$,影响不显著,表明在一定的参数范围内,无失拟因素存在,收获损失率回归模型中校正决定系数 R^2 为 0.970 2,说明模型仅有 2.98% 的变异,进一步说明收获损失率回归模型拟合优度较好;漏割率回归模型中失拟

项 $P>0.05$,影响不显著,表明在一定的参数范围内,无失拟因素存在,同时漏割率回归模型中校正决定系数 R^2 为 0.956 3,说明模型仅有 4.37% 的变异,进一步说明漏割率回归模型拟合优度较好,因此可用该回归方程代替试验真实点对试验结果进行分析^[17-25]。

4SZ-1.2 型豌豆割晒机的收获损失率、漏割率的响应函数分别为 Y_1 、 Y_2 ,以各影响因素实际值为自变量建立回归数学模型,进行二次响应面回归分析,通过对试验数据进行回归拟合获得多元二次响应面回归模型

$$\left\{ \begin{aligned} Y_1 &= 56.850\,00 - 18.466\,67X_1 - 25.558\,33X_2 - \\ &\quad 23.129\,17X_3 - 0.632\,89X_4 + 1.555\,56X_1X_2 + \\ &\quad 3.972\,22X_1X_3 + 0.088\,148X_1X_4 + 4.593\,75X_2X_3 + \\ &\quad 0.128\,33X_2X_4 + 0.135\,00X_3X_4 + 4.111\,11X_1^2 + \\ &\quad 5.421\,87X_2^2 + 3.250\,00X_3^2 + 2.622\,22 \times 10^{-3}X_4^2 \\ Y_2 &= 27.095\,28 - 10.256\,48X_1 - 12.627\,08X_2 - \\ &\quad 0.377\,25X_4 + 2.263\,89X_1X_2 + 0.082\,222X_1X_4 + \\ &\quad 0.099\,583X_2X_4 + 1.641\,98X_1^2 + \\ &\quad 2.218\,75X_2^2 + 1.744\,44 \times 10^{-3}X_4^2 \end{aligned} \right.$$

(17)

3.2.3 双因素交互效应分析

为进一步研究各因素对收获损失率和漏割率的影响,对试验数据进一步处理,得到交互因素的响应曲面图。漏割率交互因素响应曲面如图 7 所示。

响应曲面图整体基本呈开口向上趋势,即随着因素水平的增加,漏割率呈现先降低后增高的趋势,同时等高线呈椭圆形,说明各因素之间存在明显的交互作用。图 7a 中,当前进速度为 0.80~1.45 m/s,割刀速度为 0.98~1.42 m/s 时,收获损失率较低;图 7b 中,当前进速度为 0.70~1.40 m/s,拨禾轮转速为 36.67~56.67 r/min,收获损失率较低;图 7c 中,当割刀速度为 0.89~1.51 m/s,拨禾轮转速为 36.67~56.67 r/min 时,漏割率较低。

分析前进速度、割刀速度、拨禾轮转速、输送速度 4 个因素中任意两因素分别对收获损失率的交互影响,响应曲面如图 8 所示。

响应曲面图整体基本呈开口向上趋势,即随着因素水平的增加,漏割率呈现先降低后增高的趋势,同时等高线呈椭圆形,说明各因素之间存在明显的交互作用。图 8a 中,当前进速度为 0.75~1.20 m/s,割刀速度为 0.98~1.33 m/s 时,收获损失率较低;图 8b 中,当前进速度为 0.75~1.20 m/s,输送速度为 0.89~1.42 m/s 时,收获损失率较低;图 8c 中,当前进速度为 0.75~1.20 m/s,拨禾轮转速为

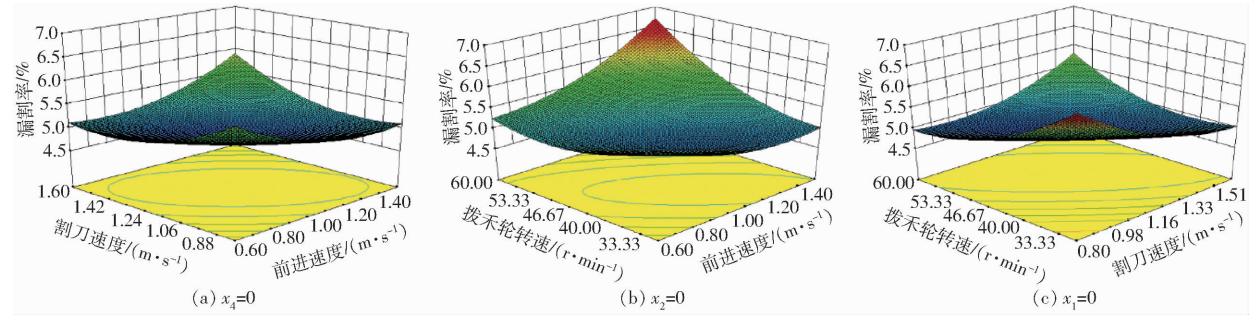


图7 因素交互作用对漏割率影响的响应曲面

Fig. 7 Interaction response surface of missed cut rate factors

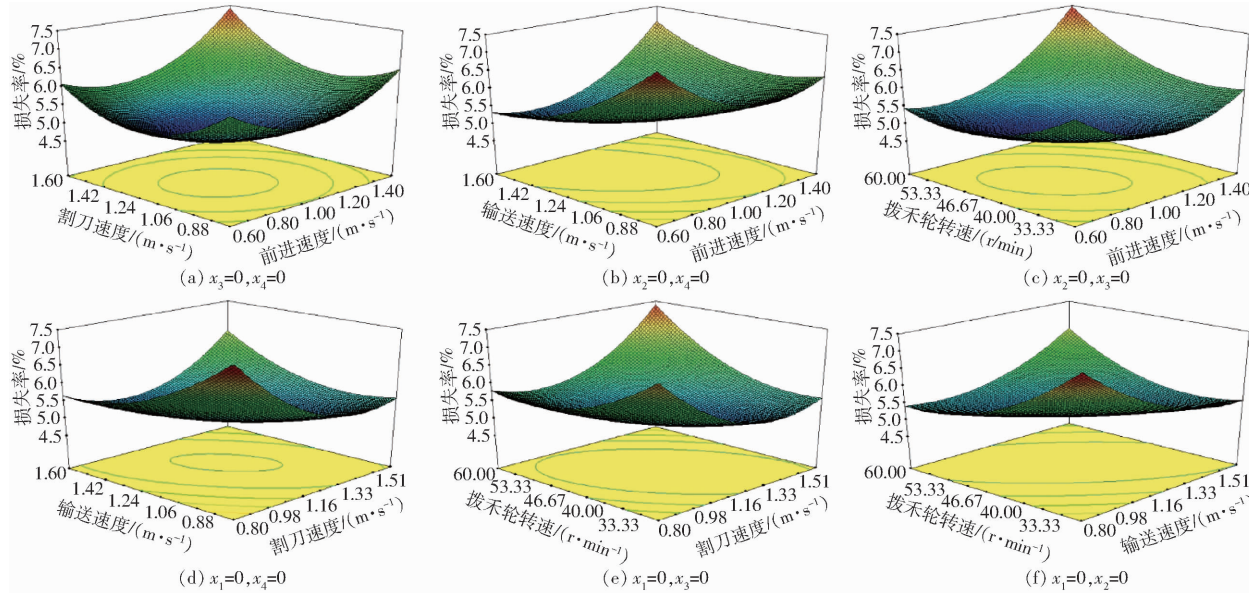


图8 因素交互作用对收获损失率影响的响应曲面

Fig. 8 Response surfaces of factor interaction harvest loss rate

33.33 ~ 53.33 r/min 时,收获损失率较低;图 8d 中,当割刀速度为 0.98 ~ 1.42 m/s,输送速度为 0.80 ~ 1.40 m/s 时,收获损失率较低;图 8e 中,割刀速度为 0.98 ~ 1.42 m/s,拨禾轮转速为 33.33 ~ 52.00 r/min 时,收获损失率较低;图 8f 中,当输送速度为 0.89 ~ 1.50 m/s,拨禾轮转速为 33.33 ~ 54.00 r/min 时,损失率较低。

为获得 4SZ-1.2 型豌豆割晒机漏割率、收获损失率的最佳参数,结合各因素边界条件,对上述 2 个回归模型进行约束目标求解,根据实际作业及相关理论依据选择优化约束条件,其目标函数与约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1 = f_1(X_1, X_2, X_3, X_4) \\ \min Y_2 = f_2(X_1, X_2, X_4) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 0.65 \text{ m/s} \leq X_1 \leq 1.35 \text{ m/s} \\ 0.95 \text{ m/s} \leq X_2 \leq 1.60 \text{ m/s} \\ 0.95 \text{ m/s} \leq X_3 \leq 1.60 \text{ m/s} \\ 35 \text{ r/min} \leq X_4 \leq 55 \text{ r/min} \end{cases} \end{cases} \quad (18)$$

对目标函数进行优化求解,得到结果分别为:当

前进速度为 0.96 m/s,割刀速度为 1.18 m/s,输送速度为 1.22 m/s,拨禾轮转速为 44.39 r/min,豌豆割晒机收获损失率为 4.811 21%;当前进速度为 1.09 m/s,割刀速度为 1.20 m/s,拨禾轮转速为 47.55 r/min,此时豌豆割晒机漏割率为 4.818 82%。取两组最佳变量值的平均值,得到最优参数组合为前进速度为 1.03 m/s,割刀速度为 1.19 m/s,输送速度为 1.22 m/s,拨禾轮转速为 45.97 r/min,此时豌豆割晒机漏割率、收获损失率都低于 5%,满足收获要求。

3.3 田间验证试验

在北京市平谷区豌豆田进行田间试验,验证 4SZ-1.2 型豌豆割晒机作业效果。试验现场如图 9a 所示,试验效果如图 9b 所示。

通过田间试验获得试验结果如下:4SZ-1.2 型豌豆割晒机收割效率达到 0.185 hm²/h、漏割率为 4.78%、收获损失率为 4.96%,与回归方程设计参数最优组合数值基本一致,豌豆割茬高度一致性较好,平均高度为 39.4 mm,条铺整齐。综上所述,4SZ-1.2 型豌豆割晒机性能稳定,具有结构精巧、

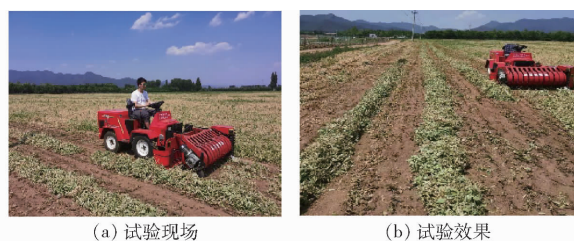


图9 田间试验

Fig.9 Field experiments

操作简便、高效实用的特点,有利于实现我国豌豆收获集成配套作业,减轻劳动力投入。

4 结论

(1)通过深入分析我国豌豆种植制度现状和豌

豆收获技术要求,设计了4SZ-1.2型豌豆割晒机,割晒机主要包括切割装置、防缠绕拨禾装置和输送铺放装置等。

(2)对4SZ-1.2型豌豆割晒机的关键部件进行设计,设计了防缠绕拨禾轮、抖动导流板等装置,能够有效实现豌豆作物的切割、输送和铺放作业,无拥堵现象。

(3)利用二次回归正交旋转试验进行分析,并对回归方程设计参数进行优化,确定了最优的参数组合为前进速度1.03 m/s、割刀速度1.19 m/s、输送速度1.22 m/s、拨禾轮转速45.97 r/min。田间试验验证表明,割晒机作业条铺整齐、割茬统一,输送堵塞现象少,漏割率、收获损失率均低于5%。

参 考 文 献

- [1] 王修善. 4SY-2.0型自走式油菜割晒机设计与试验研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2016.
WANG Xiushan. Design and experiment of 4SY-2.0 self-propelled rape windrower[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [2] VLADO K, NOVOTNI D, MIOMIR S, et al. The impact of structural characteristics and working speed of pea harvester on the quality of work[J]. Agronomski Glasnik, 2012, 74(5-6):253-263.
- [3] REDDY P N, ANGADI J G. Mechanization gap and assessment of farm mechanization requirement for each operation in different crops[J]. International Journal of Current Microbiology & Applied Sciences, 2018, 7(12):1213-1216.
- [4] SHAHAL A, INBAR Z, EFRAT S, et al. Experimental harvesting of wild peas in Israel: implications for the origins of Near East farming[J]. Journal of Archaeological Science, 2008, 35(4):922-929.
- [5] 楚智伟. 水稻割晒机割台设计与试验研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2016.
CHU Zhiwei. The design and experimental research of the rice windrower[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [6] 石增祥. 4SY-2.2型油菜割晒机的设计与试验研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2017.
SHI Zengxiang. Design and experiment of 4SY-2.2 rapeseed windrower[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [7] 丁海泉,郁志宏,刘伟峰,等. 弹齿滚筒式捡拾装置运动学特性的理论分析[J]. 农机化研究,2015,37(10):76-78,82.
DING Haiquan, YU Zhihong, LIU Weifeng, et al. Theory analysis on kinematics characteristics of spring-finger cylinder pickup device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(10):76-78,82. (in Chinese)
- [8] 李泓熠. 油菜捡拾试验台的设计与捡拾试验研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2016.
LI Hongyi. Design and picking test research for rape picking test-bed[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [9] 代其春,裴新民,宋从文,等. 苜蓿压扁收割机拨禾轮设计[J]. 农业工程,2014,4(3):113-117.
DAI Qichun, PEI Xinmin, SONG Congwen, et al. Design on dial reel of alfalfa flattening harvester[J]. Agricultural Engineering, 2014, 4(3):113-117. (in Chinese)
- [10] 马世伦,赵春花,陈凯. 小型牧草割压机拨禾轮的设计与试验研究[J]. 农业装备与车辆工程,2015,53(7):26-29.
MA Shilun, ZHAO Chunhua, CHEN Kai. Design and experimental research on the reel of small forage cutting flattening machine[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2015, 53(7):26-29. (in Chinese)
- [11] 郁志宏,王文明,莫日根毕力格,等. 弹齿滚筒式捡拾器捡拾性能试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(3):106-112.
YU Zhihong, WANG Wenming, Morigenbilige, et al. Experiment on performance of spring-finger cylinder pickup collector[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3):106-112. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170313&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.013. (in Chinese)
- [12] 郁志宏,淮守成,王文明. 基于弹齿轨迹的滚筒式牧草捡拾器遗漏率及工作参数优化[J]. 农业工程学报,2018,34(4):37-43.
YU Zhihong, HUAI Shoucheng, WANG Wenming. Leakage rate and optimization of working parameters for cylinder pickup collector based on spring-finger trajectory[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(4):37-43. (in Chinese)
- [13] 尹建军,刘丹萍,李耀明. 方捆机捡拾器高度自动仿形装置参数分析与试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(8):86-92.
YIN Jianjun, LIU Danping, LI Yaoming. Design and parameters analyses of automatic height profiling device of quadrangle-bale

- baler pickup[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 86–92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140814&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.014. (in Chinese)
- [14] 王文明, 王春光. 弹齿滚筒式捡拾装置参数分析与仿真[J]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 82–89.
WANG Wenming, WANG Chunguang. Parameter analysis and simulation of spring-finger cylinder pickup collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 82–89. (in Chinese)
- [15] 赵继云, 王晓燕, 王杰, 等. 豌豆机械化收获技术研究现状与研究趋势[J]. 农机化研究, 2020, 42(5): 1–6.
ZHAO Jiyun, WANG Xiaoyan, WANG Jie, et al. Research status and prospect of pea mechanized harvesting technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(5): 1–6. (in Chinese)
- [16] 李金凤, 赵继云, 侯秀宁, 等. 采用 TRIZ 理论的豌豆割晒机械装备设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 11–20.
LI Jinfeng, ZHAO Jiyun, HOU Xiuning, et al. Design and experiment of pea windrower equipment with TRIZ theory[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(8): 11–20. (in Chinese)
- [17] 张开兴, 李金凤, 宋正河, 等. 变粒径双圆盘气吸式精量排种器优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 52–63.
ZHANG Kaixing, LI Jinfeng, SONG Zhenghe, et al. Optimum design and test of variable diameter double disc air suction precision seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 52–63. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190606&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.006. (in Chinese)
- [18] 吕金庆, 王鹏榕, 刘志峰, 等. 马铃薯收获机薯秧分离装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 100–109.
LÜ Jinqing, WANG Pengrong, LIU Zhifeng, et al. Design and experiment of potato harvester potato stem separation equipment[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 100–109. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190611&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.011. (in Chinese)
- [19] 李耀明, 陈洋, 徐立章, 等. 斜置切纵流联合收获机脱粒分离装置结构参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 56–61.
LI Yaoming, CHEN Yang, XU Lizhang, et al. Optimization of structural parameters for threshing and separating device in oblique tangential-longitudinal combine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 56–61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160909&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.009. (in Chinese)
- [20] 张文强, 张明明, 张俊雄, 等. 振摇枸杞采收机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 97–102.
ZHANG Wenqiang, ZHANG Mingming, ZHANG Junxiong, et al. Design and experiment of vibrating wolfberry harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 97–102. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180712&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.012. (in Chinese)
- [21] 马义东, 徐灿, 崔永杰, 等. 水培生菜整株低损收获装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 162–169.
MA Yidong, XU Can, CUI Yongjie, et al. Design and test of harvester for whole hydroponic lettuce with low damage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 162–169. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190117&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.017. (in Chinese)
- [22] 蔡佳麟, 张佳喜, 叶尔波拉提·铁木尔, 等. 夹持带式棉秆收获机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 152–160.
CAI Jialin, ZHANG Jiayi, YEERBOLATI·TIEMUER, et al. Design and test of clamping belt cotton straw harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 152–160. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20201017&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.017. (in Chinese)
- [23] 伍德林, 傅立强, 曹成茂, 等. 摇枝式油茶果采摘机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 176–182, 195.
WU Delin, FU Liqiang, CAO Chengmao, et al. Design and experiment of shaking-branch fruit picking machine for camellia fruit[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 176–182, 195. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20201119&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.11.019. (in Chinese)
- [24] 廖庆喜, 王迪, 姚露, 等. 油菜覆膜打孔穴播机打孔装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 62–72.
LIAO Qingxi, WANG Di, YAO Lu, et al. Design and experiment of membrane punch device for rapeseed film perforating and precision dibbling-planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 62–72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200807&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.007. (in Chinese)
- [25] 林静, 张桐嘉, 陈彬, 等. 深松灭茬旋耕起垄联合作业机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 28–39.
LIN Jing, ZHANG Tongjia, CHEN Bin, et al. Design and test of subsoiling rotary rilling and rilling combined operating machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 28–39. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190204&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.004. (in Chinese)