

油麦玉兼用精量联合直播机旋压灭茬整理装置设计与试验

李运通¹ 蔡 朗¹ 李 甜¹ 张青松^{1,2} 廖庆喜^{1,2} 廖宜涛^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对我国南方地区土壤黏重且留茬量大, 机械化播种作业触土部件粘土缠茬降低开沟稳定性、种沟残留秸秆影响作物出苗一致性问题, 设计一种具有厢面旋压整型、旋转切茬开种沟、覆土镇压功能的多作物兼用种床整理装置并研发配套播种机, 实现一机兼用油麦玉播种。阐述兼用播种机设计方案, 开展切茬开沟刀与秸秆互作过程力学分析, 确定种床整理装置和4种圆盘切茬刀的结构尺寸和运动参数; 进行主动圆盘切茬刀和滑刀式开沟器切茬过程离散元仿真, 得到阿基米德螺旋线圆盘切茬刀转速为301.18 r/min、滑刀式开沟器宽度为31.49 mm时切茬效果较优; 开展台架验证试验, 结果表明台架试验与仿真试验秸秆切断率和土壤扰动面积相对误差小于10%, 仿真试验可靠; 田间试验表明在黏重土壤稻茬地工况下油麦玉兼用播种机作业后厢面平整度为15.68 mm, 种沟秸秆切断率为93.7%, 油菜、小麦、玉米平均沟深分别为13.2、30.4、52.2 mm, 沟深稳定性系数分别为90.6%、86.4%、88.2%, 满足油麦玉播种农艺要求。

关键词: 播种机; 种床整理; 离散元法; 切茬开沟; 黏重土壤; 多作物兼用

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)11-0162-14

OSID:



Design and Test of Rotary Stubble-cutting and Seedbed Preparation Device for Multi-crop Combined Precision Seeder

LI Yuntong¹ CAI Lang¹ LI Tian¹ ZHANG Qingsong^{1,2} LIAO Qingxi^{1,2} LIAO Yitao^{1,2}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Aiming to address the challenges associated with heavy clay soil, high stubble retention, insufficient stability in furrowing depth, and stubble interference with seedling emergence in Southern China, a seedbed preparation device integrating rotary pressing for ridge formation, stubble cutting, furrowing, soil covering, and compaction was developed. Accordingly, a compatible multi-purpose planter was designed to achieve combined sowing of rapeseed, wheat, and corn in wet fields with stubble retention. The overall design scheme of the planter was elaborated, featuring an active rotary pressing seedbed preparation device. Through an analysis of the interaction mechanism between the components and stubble, as well as the optimization of critical component designs, the configuration of the ridge-forming and furrowing device was determined, along with the structural dimensions and kinematic parameters of four types of disc coulters. Discrete element method (DEM) simulations were conducted to model the stubble cutting process under the combined action of an active disc coulter and a runner-type opener. The results indicated that the optimal cutting performance was achieved with an Archimedean spiral disc rotating at 301.18 r/min and a runner-type opener width of 31.49 mm. Bench tests were subsequently constructed and executed; the relative error for both the stubble cutting rate and soil disturbance area between the bench tests and simulation results was less than 10%, confirming the

收稿日期: 2026-03-16 修回日期: 2026-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52575286)、湖北数智农机产业技术体系岗位专家项目(2025HBSXTX-15)、华中农业大学“要术开物计划”培育项目(2662025GXYP004)和国家现代油菜产业技术体系油菜耕种机械化岗位项目(CARS-12-27)

作者简介: 李运通(1998—),男,博士生,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究,E-mail: liyuntong7188@163.com

通信作者: 廖宜涛(1982—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: liaotao@mail.hzau.edu.cn

reliability of the simulation model. Field performance and sowing trials demonstrated that, under heavy clay soil conditions with stubble retention, the multi-purpose planter achieved a ridge surface flatness of 15.68 mm and a seed furrow stubble cutting rate of 93.7%. The sowing depths for rapeseed, wheat, and corn were 13.2 mm, 30.4 mm, and 52.2 mm, with depth stability coefficients of 90.6%, 86.4%, and 88.2%, respectively. These performance metrics satisfied the agronomic requirements for the cultivation of rapeseed, wheat, and corn. The research result can provide a valuable reference for the design of multi-purpose planters in the rapeseed-wheat-corn planting regions of the middle and lower reaches of the Yangtze River.

Key words: planters; seedbed preparation; discrete element method; stubble cutting and furrowing; heavy soil; multi-crop planting

0 引言

油菜、小麦和玉米是我国重要的粮油作物,在长江中下游地区普遍采用稻油、稻麦、麦玉、油玉等双熟连作模式,以提高土地利用率。受抢收抢种农时紧张、水旱交替、土壤板结等因素的影响,近年来耕播集成、复式作业的精量联合直播机在该区域得到广泛的推广应用^[1-2]。但由于排种技术兼用性和种床整理装置农艺适应性的制约,播种机普遍适用单一作物,新型经营主体购置机器成本较高、机具利用率低。

为拓展播种机兼用型,提升机具利用率,国内外针对兼用排种技术开展较多研究,如国内农哈哈、亚澳、雷沃等公司研发的指夹式、勺轮式、气吸式排种技术,国外马斯奇奥、阿玛松等公司研发的气吸式排种、气送式导种技术,并推出 MT、SP、Cirrus 等系列播种机。为提升播种机播深稳定性,研发单体仿形播种方式提高机具适应性和开沟深度稳定性^[3-4],通过可调节限深结构或镇压力系统调整播种深度^[5-6],以适应不同作物播深农艺要求。但长江中下游地区受土壤黏重板结、复种前茬秸秆残留量大等影响,旋耕播种作业存在厢面不平整、单体仿形不稳定、土壤粘附和种沟内残留秸秆,降低了播深稳定性和出苗一致性等问题。

针对秸秆残茬易导致机具堵塞、影响播深稳定性甚至瞭种,研究者开发了多种被动式和驱动式清秸装置^[7-8]。被动式清秸防堵装置因结构简单、土壤扰动小等优势被广泛应用于免耕播种机,现有研究主要通过改进圆盘结构和优化仿形装置参数增强其清秸功能^[9-10];为进一步提升秸秆残茬清理效果,研究者通过设计与优化驱动式清秸防堵装置结构与运动参数,利用高速旋转的工作组件破碎或转移厢面秸秆,有效提升清秸率^[11]。针对种床平整和黏重土壤整型问题,有研究提出主动旋压式整型仿形装置并开展主动防粘机理研究和参数优化^[12],该装置在湿烂地亦能获得良好种床整理效果;但旋压式起垄装置多设置辊外开沟环开沟作业^[13-14],主要

适应油菜浅表层播种,兼用性不足。

为解决长江中下游黏重土壤种植区播种机粘附土壤、播深不稳、种沟残茬影响出苗等问题、配套课题组气力滚轮式兼用排种器播种,本文提出一种旋压起垄灭茬式多作物兼用种床整理工艺及联合直播机;通过分析圆盘切茬刀与秸秆互作力学过程,确定切茬刀形式和种床整理装置关键参数;开展主动切茬和开沟部件仿真与台架试验,优化切茬刀与滑刀式开沟器结构和运动参数;开展田间试验,验证种床整理装置土壤整型和切茬开沟性能与播种机作业效果。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

油麦玉兼用联合播种机主要由旋耕排肥装置与旋压灭茬式种床整理装置组成,整机结构如图 1 所示,主要技术参数如表 1 所示。旋耕排肥装置由排肥装置、前犁、旋耕装置等构成,旋压灭茬式种床整

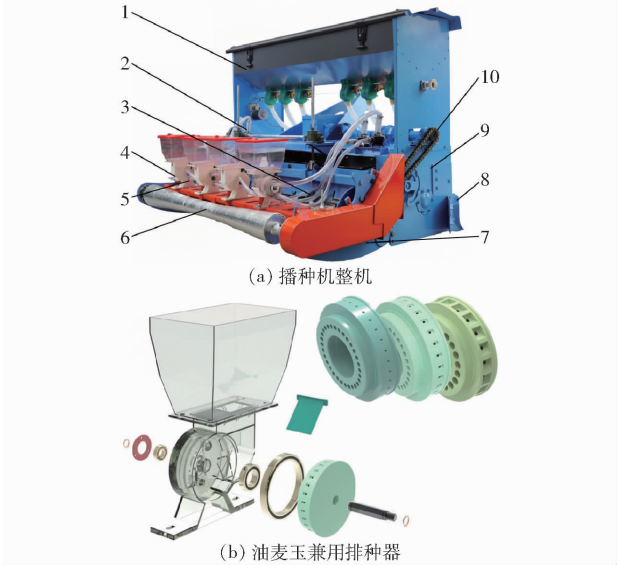


图 1 油麦玉兼用联合播种机结构示意图

Fig. 1 Structural schematic diagram of multi-crop combined seeder

1. 排肥装置 2. 垂直升降连接装置 3. 主动起垄切茬装置 4. 播深可调开沟装置 5. 排种器 6. 覆土镇压装置 7. 挂接侧板 8. 前犁 9. 旋耕装置 10. 传动系统

理装置主要包括垂直升降连接装置、主动起垄切茬装置、播深可调开沟装置、覆土镇压装置、挂接侧板、传动系统等。

表 1 播种机主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of precision seeder

参数	数值
长×宽×高/(mm×mm×mm)	2 100×2 000×1 700
整机质量/kg	650
工作幅宽/mm	2 000
作业速度/(km·h ⁻¹)	2.0~5.4
播种行数/行	8(油菜小麦)、3(玉米)
播种行距/mm	200(油菜小麦)、600(玉米)
播种深度/mm	0~20(油菜)、30~40(小麦)、 40~60(玉米)

为提升播种机播种均匀性和播深稳定性,本研究所用播种装置采用低位投种方式,将种子直接投送至土壤表面或浅表层,减少种子弹跳^[15]。所用排种器为课题组研制的气力滚轮式多作物兼用单粒精密排种器^[16-17],通过设计滚轮型孔和侧向充种室结构,适用于油麦玉兼用单粒精密排种(图1b)。

1.2 工作原理

油麦玉兼用联合播种机通过三点悬挂与拖拉机挂接,动力经拖拉机 PTO、中央齿轮箱等传输至旋耕装置、主动起垄切茬辊与覆土镇压辊。工作时前犁与旋耕装置首先进行碎土、翻土、破茬,而后由主动起垄切茬辊进行土壤旋切和初步镇压、起垄,形成相对平整的厢面以保证开沟深度稳定;同时主动起垄切茬辊通过圆盘切茬刀对开沟器前方秸秆进行二次切割,降低种沟内秸秆残留、减小开沟器前进阻力;之后播深可调开沟装置和排种装置等在平整厢面完成开沟、低位投种工作;播种小麦与玉米时,由覆土镇压装置进行种沟覆土,并对厢面进行二次镇压,保护墒情、提高厢面平整度。整机通过旋耕装置、主动起垄切茬装置、播深可调开沟装置、覆土镇压装置协调作业,一次工作实现浅旋碎土、切茬开沟、播深控制、覆土镇压等功能。播种机作业工艺如图2所示。

2 种床旋压灭茬关键部件设计

油麦玉兼用旋压灭茬式种床整理装置主要包括:起垄切茬辊、可调开沟装置、覆土镇压辊等,其主要结构如图3所示。

2.1 主动起垄切茬装置设计

长江中下游油麦玉种植区播种作业时秸秆量大,旋耕机难以完全切断和埋覆秸秆,种沟内秸秆易导致种子无法有效接触土壤,降低作物出苗均匀性,导致缺苗、断条等问题。为减少种沟内秸秆留存,现

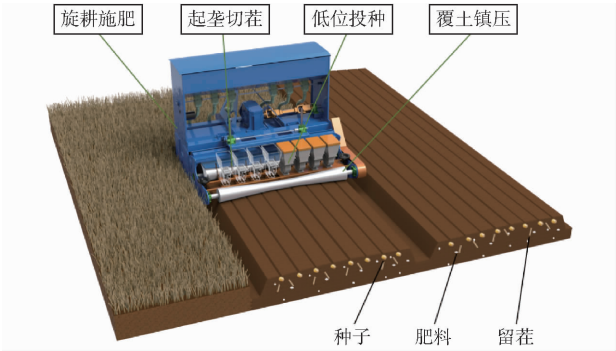


图 2 起垄整型装置作业工艺图

Fig.2 Process diagram of ridge shaping operations

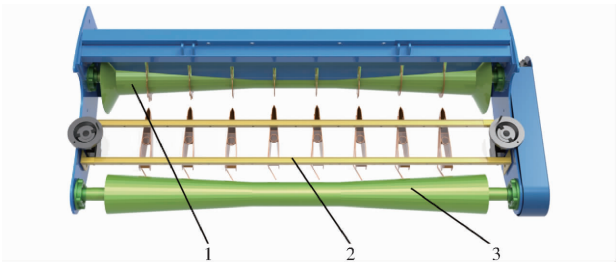


图 3 兼用旋压灭茬式种床整理装置结构图

Fig.3 Structure diagram of active spinning seedbed finishing device

1. 起垄切茬辊 2. 可调开沟装置 3. 覆土镇压辊

有播种机多采用滑刀式开沟器、单圆盘式开沟器或双圆盘式开沟器等被动式开沟器切茬开沟。滑刀式开沟器在黏重土壤作业时特殊曲面可有效降低土壤扰动、保证沟深、沟型稳定性,但在湿烂田作业时易出现秸秆缠绕、堆土等现象。单圆盘式和双圆盘式开沟器依靠与土壤产生摩擦力产生旋转驱动,从而达到切茬开沟效果,但在高含水率黏重土壤工况作业时,被动圆盘开沟器易因粘附土壤、秸秆等失去旋切能力,并随着机具平移运动造成导致壅土、堵土,严重影响播种质量。为提高种床整理装置切茬开沟性能,本研究设计一种主动起垄切茬装置(图4),其主要由圆盘切茬刀、圆形凸台轴承座、变径起垄辊以及开沟盘等组成,将圆盘切茬刀安装在起垄辊外侧,随起垄辊做旋转运动,实现主动切茬、初步镇压与厢面起垄功能。

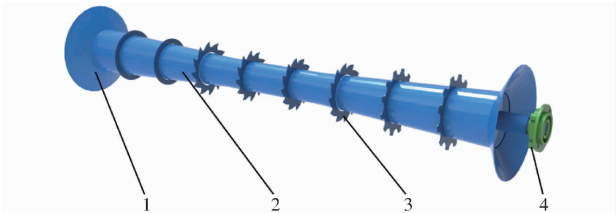


图 4 主动起垄切茬装置结构示意图

Fig.4 Structure diagram of active stubble ridging device

1. 开沟盘 2. 变径起垄辊 3. 圆盘切茬刀 4. 圆形凸台轴承座

圆盘切茬刀转速取值直接影响灭茬效果和种沟

沟型稳定性。相关研究表明,秸秆切断率、横向抛撒距离及土壤扰动面积均随刀盘角速度增加而增大,但土壤扰动过大会降低种沟沟型稳定性,不利于后续播种。为保证灭茬效果,灭茬刀最大线速度需大于机具前进速度。因此综合考虑机具灭茬性能与开种沟效果,结合机具设计参数,初定圆盘切茬刀转速区间为 200 ~ 400 r/min。

2.2 播深可调开沟装置设计

为满足低位投种设计要求,本研究设计一种滑刀式开沟器搭配丝杆升降装置的播深可调开沟装置,如图 5 所示,其主要由低位投种平台、手柄摇杆、播深定位板、丝杆升降装置、滑刀式开沟器、机架等组成。滑刀式开沟器与圆盘切茬刀前后对应,圆盘切茬刀工作后形成的预种沟可为后续滑刀式开沟器降低前进阻力,减少机具工作能耗。

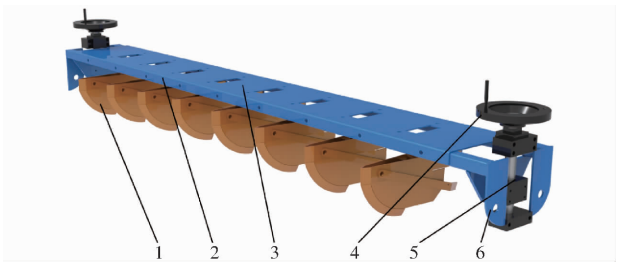


图 5 播深可调开沟装置结构示意图

Fig.5 Structure diagram of sowing depth adjustable ditching device

1. 滑刀式开沟器 2. 机架 3. 低位投种平台 4. 手柄摇杆 5. 丝杆升降装置 6. 播深定位板

播种机播深测量以厢面几何轮廓线为参考,理想的厢面几何轮廓线应与起垄切茬辊元线保持一致^[18],因此本研究以起垄切茬辊元线为开沟器入土基准线,并以此设计滑刀式开沟器安装孔高度,滑刀式开沟器最低点连线所形成的折线段与起垄切茬辊元线相平行。由于不同作物播深要求不同,因此设计播深可调开沟装置实现种床整理装置油麦玉兼用播种。由于油菜播深为 0 ~ 20 mm、小麦播深为 30 ~ 40 mm、玉米播深为 40 ~ 60 mm,因此选择 60 mm 行程的丝杆升降装置,保证开沟器的垂直行程满足 3 种作物的播深要求。

2.3 覆土镇压装置设计

播前镇压可增加土壤密实度、形成整齐苗床,播后二次镇压可进一步压实土壤、起到保墒作用,利于小麦和玉米生长^[19-20]。本研究通过设置前主动起垄切茬辊实现初步整型、起垄、开畦沟,通过切茬圆盘刀断茬、碎茬,设置后覆土镇压辊进行种子覆土镇压和土壤二次整型,考虑到油菜无需覆土镇压,覆土镇压装置需方便可拆,故覆土镇压辊取消开畦沟开沟盘设计,如图 6 所示。

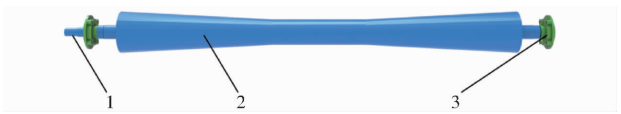


图 6 覆土镇压装置结构图

Fig.6 Structural diagram of soil covering and compacting device

1. 传动轴 2. 变径起垄辊 3. 圆型凸台轴承座

覆土镇压装置依靠自身重力和播种机其他装置产生的下压力对覆土后的种床进行旋压,在其旋压作用下土壤颗粒重新排列,可降低种床大孔隙数量,增加种子与土壤的接触面积;同时覆土镇压装置可在种床表层构建紧实层,形成毛细管阻断效应,从而减少水分蒸发,实现保墒目的。

为确保镇压效果且不造成土壤过度压实,对镇压辊下压参数进行计算,镇压强度是衡量镇压装置对土壤压力大小的指标,需根据土壤性质和墒情确定,分析覆土镇压装置与土壤互作关系可得

$$q_{zy} = \frac{G_{zy} + F_{zy}}{S_{zy}} \leq [q] \tag{1}$$

式中 q_{zy} ——实际镇压强度, kPa
 G_{zy} ——覆土镇压装置自重, N
 F_{zy} ——播种机附加压力, N
 S_{zy} ——覆土镇压装置与土壤接触面积, m^2
 $[q]$ ——播种机附加压强, kPa

2.4 圆盘切茬刀设计与分析

2.4.1 圆盘切茬刀型选型

圆盘切茬刀型是影响起垄切茬辊切茬效果的主要因素,目前主流的圆盘切茬刀根据刃口结构特征可分为 3 大类:平面型、波纹型以及缺口型^[21]。参考现有研究中常用被动式圆盘切茬刀刃与耙片刃口曲线,设计 4 种主动式圆盘切茬刀分别为:阿基米德螺旋线型、星形线型、缺口型、平面型圆盘切茬刀(图 7)。平面型、星形线型以及阿基米德螺旋线型刃口曲线在切茬作业过程中对留茬的切割作用以滑切为主,缺口型刃口曲线以砍切为主,相关研究表明,圆盘齿数一般为 8 ~ 15 个^[12],若圆盘齿数过多会增大与土壤的刀刃接触面积,影响切茬效果;若圆盘齿数过少会增大与土壤接触面积,增大前进阻力^[22],因此初选圆盘刀齿数为 12 个。

进行圆盘切茬刀尺寸设计时,需满足油麦玉的播深要求,但随切茬刀尺寸增大其运动阻力和扰土面积亦呈线性增加,考虑到切茬刀后续设置滑刀式开沟器可进行留茬压覆、滑切作业,因此初选刀型参数设计:圆盘切茬刀入土深度为 40 mm,刀片宽度为 3 mm。

2.4.2 圆盘切茬刀内径参数设计与分析

基于油菜与小麦种植行距农艺要求,本种床整

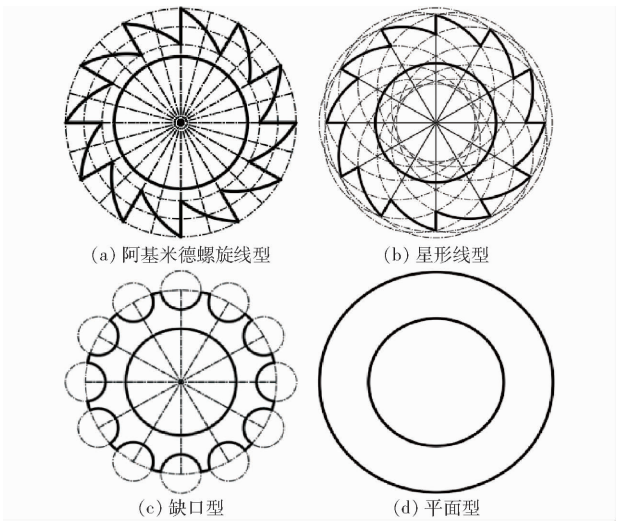


图7 4种圆盘切茬刀型

Fig.7 Four kinds of disc stubble cutters

理装置设置8行油菜、小麦播种装置或4行玉米播种装置,因而需在起垄辊外侧设置8片圆盘切茬刀,其关于起垄辊中轴线左右对称分布,如图8所示。

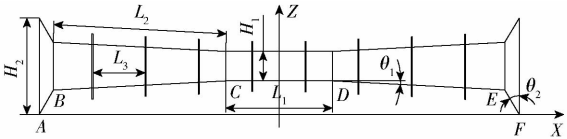


图8 主动起垄切茬辊结构图

Fig.8 Shape and parameters of active stubble ridging roller

由于起垄辊变径部分设置倾角,圆盘内径与变颈线段BC、DE有关,线段BC与DE关于Z轴对称。设各点坐标为A(x₁,0)、B(x₂,y₂)、C(x₃,y₃)、D(x₄,y₄)、E(x₅,y₅)、F(x₆,0),则各部分线段方程为

$$\begin{cases} Z_{AB} = k_1x + C_1 \\ Z_{BC} = k_2x + C_2 \\ Z_{CD} = C_3 \\ Z_{DE} = -k_2x + C_2 \\ Z_{EF} = -k_1x + C_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中 k₁、k₂、C₁、C₂、C₃均为常数。

将点 D(x₄,y₄)、E(x₅,y₅)代入直线 DE 方程可得

$$Z_{DE} = -\tan\theta_1x + \frac{D_2 - D_1}{2} + \frac{L_1}{2}\tan\theta_1 \quad (3)$$

式中 θ₁——变颈部分倾角,(°)

L₁——中间直筒辊长度,mm

D₁——直筒部分直径,mm

D₂——开沟盘部分直径,mm

根据课题组前期研究,设置起垄辊变颈部分倾角为3°,起垄辊部分倾角为61°,中间直筒辊长度L₁为400 mm,变颈筒长度L₂为649 mm,圆盘切茬刀安装间距L₃为200 mm,直筒辊直径H₁为110 mm,开沟

盘最外部分直径H₂为360 mm,则通过直线方程推导出圆盘切茬刀型的内径大小方程为

$$\begin{cases} f(x_{CD}) = 110 & (0 < x_{CD} \leq x_4) \\ f(x_{DE}) = 2\left(\frac{H_2}{2} - Z_{DE}\right) & (x_4 < x_{DE} \leq x_5) \end{cases} \quad (4)$$

当 x = 100 mm 时, f(x) = 110 mm; 当 x = 300 mm 时, f(x) = 120.48 mm; 当 x = 500 mm 时, f(x) = 141.44 mm; 当 x = 700 mm 时, f(x) = 162.41 mm。

考虑制造因素将所得结果取整,内径 R_n分别为110、121、142、163 mm。

2.4.3 圆盘切茬刀型设计与分析

为保证所选用的4种圆盘切茬刀作业过程中有效切割秸秆,开展各切茬刀与秸秆互作过程受力分析,验证圆盘切茬刀预选参数的可行性。

(1) 阿基米德螺旋线型圆盘切茬刀

阿基米德螺旋线型圆盘切茬刀型刀口参数如图9a所示,其单齿极坐标方程、齿数设计公式为

$$\begin{cases} r = R_a + b\theta & (\theta \in (0, \theta_{\max})) \\ \theta_{\max} = \frac{360^\circ}{Z} \end{cases} \quad (5)$$

式中 r——阿基米德螺旋线刀口极径,mm

R_a——起始极径,mm

b——极径增长系数,取1 mm/(°)

θ——刀口极角,(°)

θ_{max}——最大包角,(°)

Z——圆盘齿数,取12

计算可得 θ_{max} = 30°。

圆盘切茬刀工作时刀刃先接触秸秆,以秸秆为研究对象,分析秸秆颗粒与阿基米德螺旋线型圆盘切茬刀接触时受力情况,则阿基米德螺旋线型圆盘切茬刀对秸秆作用力如图9b所示。

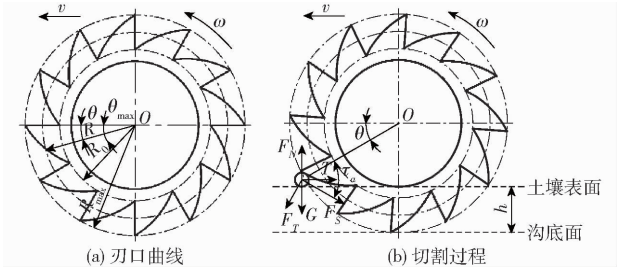


图9 阿基米德螺旋线型圆盘切茬刀

Fig.9 Archimedes spiral disc stubble cutter on straw

由秸秆颗粒静力平衡关系可得

$$\begin{cases} F_T \sin(\tau_a - \theta) - T - F_S \cos(\tau_a - \theta) = 0 \\ F_N - F_T \cos(\tau_a - \theta) - G - F_S \sin(\tau_a - \theta) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中 F_T——圆盘切茬刀对秸秆的作用力,N

F_S——圆盘对秸秆的摩擦力,N

T——土壤对秸秆的摩擦力,N

G ——秸秆自重, N
 F_N ——土壤对秸秆的支持力, N
 τ_a ——刃口曲线上任一点滑切角, ($^\circ$)
 h ——圆盘切茬刀入土深度, 取 40 mm

由图 9 可知, 为保证秸秆能被有效切断, 需满足

$$F_T \sin(\tau_a - \theta) \geq T + F_S \cos(\tau_a - \theta) \tag{7}$$

设秸秆与钢板摩擦角为 φ_1 , 秸秆与土壤摩擦角为 φ_2 , 忽略秸秆质量与体积, 联立式(6)、(7)可得

$$\tan(\tau_a - \theta) \geq \frac{\tan\varphi_1 + \tan\varphi_2}{1 - \tan\varphi_1 \tan\varphi_2} \tag{8}$$

根据相关研究可知, 秸秆与钢板摩擦角 φ_1 范围为 $17^\circ \sim 26^\circ$, 秸秆与土壤摩擦角 φ_2 为 $17^\circ \sim 33^\circ$ ^[23], 开展相关参数验证得秸秆与钢板摩擦角 $\varphi_1 = 21^\circ$, 秸秆与土壤摩擦角 $\varphi_2 = 25^\circ$, 代入式(8)得

$$\tau_{a\min} \geq 46^\circ \tag{9}$$

式中 $\tau_{a\min}$ ——刃口最小滑切角, ($^\circ$)

为保持秸秆和土壤在刀刃上的滑切, 根据滑切原理, 应使刃口全长的滑切角 τ_a 大于秸秆对钢板摩擦角和秸秆对土壤摩擦角。阿基米德螺旋线型最小滑切角处在两盘齿交汇处, 即

$$\theta = k \frac{\pi}{6} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, 11) \tag{10}$$

为计算最小滑切角, 将极坐标转换为直角坐标系

$$\begin{cases} x = r \cos \theta = (a + b\theta) \cos \theta \\ y = r \sin \theta = (a + b\theta) \sin \theta \end{cases} \tag{11}$$

点 $\theta = \theta_0$ 处的切线方程为

$$y - y_0 = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{\theta_0} (x - x_0) \tag{12}$$

以 $\theta \in (0^\circ, 30^\circ)$ 为例, 当式(10)中 $k = 0$ 时, $x_0 = -a, y_0 = 0$, 代入式(12)得

$$y = \frac{a}{b}(x + a) \tag{13}$$

将式(9)代入

$$\tau = \arctan\left(\frac{a}{b}\right) \tag{14}$$

得 $a \geq 1.04$ 。

由前文分析可知圆盘切茬刀内径 $R_n \geq 110$ mm, 可得起始极径 $R_a \geq 55$ mm, 满足滑切角 τ_a 大于秸秆与钢板摩擦角 φ_1 和土壤与钢板间摩擦角 φ_2 要求, 故阿基米德螺旋线圆盘切茬刀圆盘齿数为 12, 入土深度为 40 mm 满足设计要求。若起始极径过大, 导致圆盘切茬刀与土壤接触面积过大, 增大阻力, 影响土壤扰动面积; 若起始极径过小, 影响圆盘切茬刀整体强度, 缩短圆盘切茬刀使用寿命, 有形变、断裂等风险。综上所述, 将阿基米德螺旋线型圆盘切茬刀起始极径确定为 65 mm, 此时阿基米德螺旋线圆盘切

茬刀滑切角 τ_a 满足秸秆切断要求。

(2) 星形线型圆盘切茬刀型

依据《农业机械设计手册》^[24] 设计星形线刃口曲线如图 10 所示, 其曲线方程为

$$\tau_x = \arccos\left(\frac{R_Q \cos \theta}{R_1}\right) \tag{15}$$

式中 R_Q ——刃口曲线的曲率半径, mm

R_1 ——星形线曲率半径, mm

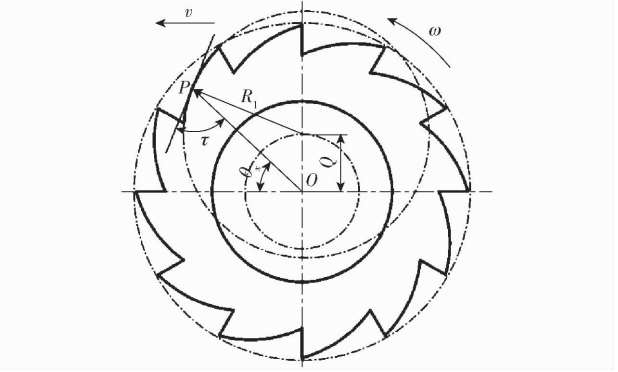


图 10 星形线型圆盘切茬刀刃口曲线

Fig. 10 Cutting edge curve of star-shaped disc cutter

星形线型圆盘切茬刀对秸秆作用力如图 11 所示, 刀具工作时, 刀刃先接触秸秆, 以秸秆为研究对象, 分析其与星形线型圆盘切茬刀接触时受力情况。

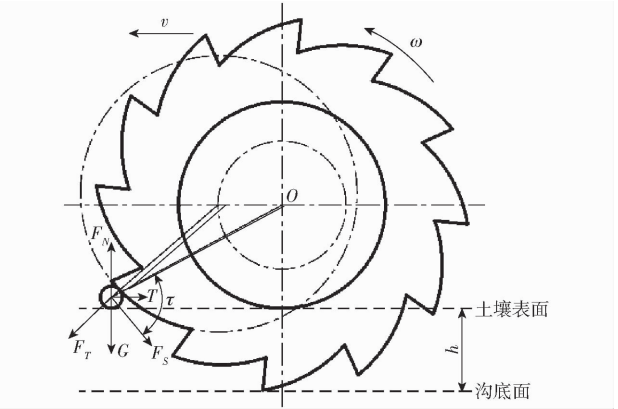


图 11 星形线型圆盘切茬刀对秸秆作用力

Fig. 11 Force of star-shaped disc stubble cutter on straw

其力学计算公式同上述阿基米德螺旋线型圆盘切茬刀与秸秆互作用力学公式, 则可得

$$\tan(\tau_x - \theta_x) \geq \frac{\tan\varphi_1 + \tan\varphi_2}{1 - \tan\varphi_1 \tan\varphi_2} \tag{16}$$

$$\tau_{x\min} \geq 46^\circ \tag{17}$$

式中 θ_x ——星形线型切茬刀包角, ($^\circ$)

$\tau_{x\min}$ ——星形线型切茬刀最小滑切角, ($^\circ$)

星形线滑切角最小处在两盘齿交汇处, 即

$$\theta_x(k) = k \frac{\pi}{6} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, 11) \tag{18}$$

当 $k = 0$ 时式(15)变形为

$$\tau_{x\min} = \arccos \frac{R_Q}{R_1} \quad (19)$$

由已有研究可知,曲率半径 R_1 值取小于圆盘切茬刀外径 R_w 的 1/2,根据圆盘切茬刀最大内径 R_n 为 163 mm,得出最大外径 R_w 为 243 mm,即 $R_1 \leq 121.5$ mm。为简化计算确定 R_1 为 100 mm,并将式(16)代入式(19)得 $R_Q \leq 69.47$ mm,取整得 $R_Q = 70$ mm,所得星形线型滑切角 τ_x 满足秸秆切断要求。

(3) 缺口型圆盘切茬刀型

为提高以砍切为主的缺口型圆盘切茬刀的切茬能力,选择半圆弧形的缺口刀口曲线作为缺口型圆盘切茬刀的刀口曲线。缺口型圆盘切茬刀工作时,其对秸秆作用力可简化为平面型圆盘切茬刀对秸秆切割,如图 12 所示。

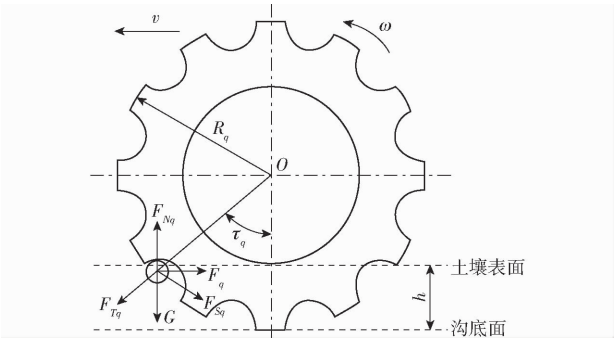


图 12 缺口型圆盘切茬刀对秸秆作用力

Fig. 12 Force of notched disc stubble cutter on straw

由秸秆颗粒静力平衡关系可知

$$\begin{cases} F_{Tq} \sin \tau_q - T - F_{Sq} \cos \tau_q = 0 \\ F_N - F_{Tq} \cos \tau_q - G - F_{Sq} \sin \tau_q = 0 \end{cases} \quad (20)$$

式中 F_{Tq} ——缺口型圆盘切茬刀对秸秆作用力, N
 F_{Sq} ——缺口型圆盘切茬刀对秸秆摩擦力, N
 τ_q ——缺口型刀口曲线上任一点滑切角, (°)

由图 12 可知,为保证秸秆能被有效切断,需满足

$$F_{Tq} \sin \tau_q \geq T + F_{Sq} \cos \tau_q \quad (21)$$

设秸秆与钢板摩擦角为 φ_1 , 秸秆与土壤摩擦角为 φ_2 , 忽略秸秆质量与体积, 联立式(20)、(21)可得

$$\begin{cases} \tan \tau_q \geq \frac{\tan \varphi_1 + \tan \varphi_2}{1 - \tan \varphi_1 \tan \varphi_2} \\ \tau_{q\min} \geq 46^\circ \end{cases} \quad (22)$$

由图 12 可知

$$\begin{cases} \cos \tau_q = 1 - \frac{h}{R_q} \\ R_{q\max} = \frac{R_{n\max} + 2h}{2} \end{cases} \quad (23)$$

计算得 $R_{q\max}$ 最大半径为 121.5 mm, 代入式(23), 得 $\tau_{q\min} \geq 47.98^\circ$ 。故缺口型圆盘切茬刀滑

切角 τ_q 满足秸秆切断要求。

3 主动切茬及开沟工作部件仿真与台架试验

3.1 仿真模型

建立土壤工作过程 EDEM 离散元仿真模型, 需要确定材料参数、接触参数、颗粒参数、几何与运动参数等^[25]。本研究以稻茬地土壤和秸秆为作业对象构建仿真模型, 进行仿真试验。参考已有研究中水稻秸秆离散元标定参数, 结合试验过程和研究对象选用半径为 3.1 mm、球心距为 6.2 mm 长线性球型颗粒进行粘结以模拟水稻柔性秸秆, 设置秸秆 Bonding 键单位面积切向刚度为 2.3×10^9 N/m³、单位面积法向刚度为 1.3×10^9 N/m³、切向临界应力为 1.26×10^7 Pa 以及法向临界应力为 4.3×10^7 Pa^[26]。

接触参数作为离散元仿真的重要参数, 需根据所模拟的实际工作过程进行选择。Hertz - Mindlin with Bonding V2 接触模型通过 Bonding 键将仿真颗粒粘结, 该模型通常用于将一定尺寸的有限颗粒粘结成一个更大的颗粒; Hertz - Mindlin with JKR 接触模型是一种粘结性颗粒接触模型, 引进表面能代表颗粒间的相互作用力, 适用于模拟颗粒间明显粘结和团聚的物料^[27]。为模拟秸秆间相互作用, 本研究选用 Hertz - Mindlin with Bonding V2 接触模型模拟秸秆颗粒间的粘结、内聚、摩擦及破碎等关系^[33]; 为模拟稻茬地土壤间的相互作用, 本研究选用 Hertz - Mindlin with JKR 接触模型模拟土壤颗粒间的粘黏、摩擦等关系。

参考长江中下游地区田间作业离散元标定过程和已有研究文献及材料手册确定初始范围和初选值^[22,26], 并开展土壤堆积角测定等试验进行参数校准, 通过响应面法优化求解, 以仿真与实测误差小于 10% 为基准验证参数可靠性, 确定离散元仿真模型接触参数如表 2 所示。土壤颗粒粘结半径 R_b ^[29] 根据实测试验田土壤含水率和密度得

$$R_b = R \sqrt[3]{1 + \frac{P_s \rho_s}{\rho_w}} \quad (24)$$

式中 R ——土壤颗粒半径, mm

P_s ——土壤含水率, %

ρ_s ——土壤密度, kg/m³

ρ_w ——水密度, 取 10^3 kg/m³

计算得 $R_b = 6.8$ mm。

采用 EDEM 2021 离散元仿真软件, 建立 1 500 mm × 500 mm × 200 mm (长 × 宽 × 高) 的土壤仿真区域, 采用颗粒工厂中完全填充法, 静置 0.5 s 后土壤颗粒自动堆积。建立 1 400 mm × 400 mm ×

表 2 仿真模型接触参数

Tab.2 Simulation model contact parameters		
项目	参数	数值
土壤颗粒	密度/(kg·m ⁻³)	2 650
	泊松比	0.37
	剪切模量/Pa	1.82×10 ⁶
	粘结半径/mm	6.8
钢	密度/(kg·m ⁻³)	7 850
	泊松比	0.3
	剪切模量/Pa	7.9×10 ¹⁰
秸秆	密度/(kg·m ⁻³)	241
	泊松比	0.4
	剪切模量/Pa	7×10 ⁷
土壤-土壤	恢复系数	0.363
	静摩擦因数	0.422
	动摩擦因数	0.282
土壤-钢	恢复系数	0.422
	静摩擦因数	0.584
	动摩擦因数	0.266
土壤-秸秆	恢复系数	0.5
	静摩擦因数	0.5
	动摩擦因数	0.01
秸秆-钢	恢复系数	0.3
	静摩擦因数	0.6
	动摩擦因数	0.01
秸秆-秸秆	恢复系数	0.28
	静摩擦因数	0.54
	动摩擦因数	0.05

50 mm(长×宽×高)的秸秆仿真区域,设置秸秆仿真区域上表面与土壤仿真区域上表面共面,为便于观察秸秆切碎情况,结合单辊旋压机具作业后厢面秸秆残留量统计数据,通过颗粒工厂中总量填充法生成 50 只长度为 400 mm 的秸秆模型,每个秸秆模型皆由 72 个秸秆颗粒粘结形成,再通过修改位置参数,将秸秆模型以 20 mm 间隔距离横置于土壤仿真区域。为对比 4 种圆盘切茬刀切茬效果,只保留圆盘切茬刀和部分起垄辊,对零件进行简化合并处理,后导入几何体并调整相对位置使圆盘切茬刀入土深度为 40 mm。

3.2 切茬刀刀型单因素试验

依照前文对圆盘切茬刀的设计方案开展离散元仿真单因素试验,以圆盘切茬刀型 *B* 为类别型试验因素,以圆盘切茬刀转速 *V* 为数值型试验因素;以秸秆切断率 *Y*₁ 为试验评价指标,以相同的前进速度,每组试验重复 5 次,取试验数据平均值为试验结果,如表 3 所示。

结合前文理论分析结果,确定类别型试验因素的圆盘切茬刀型包括:阿基米德螺旋线型、星形线型、缺口型、平面型;数值型试验因素为圆盘切茬刀

转速 *V* 范围 200~400 r/min;秸秆切断率 *Y*₁ 是判断不同刀型切茬能力的评价指标,秸秆切断率越高,则刀型切茬能力越优。

将单因素试验数据导入 Design-Expert 软件中,通过对相关数据处理分析得各因素和评价指标的回归分析如表 4 所示。

表 3 单因素试验结果
Tab.3 Single factor test results

圆盘切茬刀型 <i>B</i>	圆盘切茬刀转速	秸秆切断率
	<i>V</i> /(r·min ⁻¹)	<i>Y</i> ₁ /%
阿基米德螺旋线型 <i>B</i> ₁	200	88.3
	250	92.0
	350	96.4
	400	99.0
	300	96.2
星形线型 <i>B</i> ₂	200	86.2
	250	90.8
	350	95.2
	400	97.5
	300	94.2
缺口型 <i>B</i> ₃	200	76.4
	250	80.8
	350	85.0
	400	88.2
	300	82.4
平面型 <i>B</i> ₄	200	81.0
	250	85.2
	350	93.2
	400	95.4
	300	88.8

表 4 仿真试验回归方程分析
Tab.4 Regression equation analysis of simulation test

方差来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	1 220.76	8	152.59	300.49	<0.000 1**
<i>V</i>	634.87	1	634.87	1 250.17	<0.000 1**
<i>B</i>	566.68	3	188.89	371.96	<0.000 1**
<i>VB</i>	11.43	3	3.81	7.50	0.001 7**
<i>V</i> ²	7.78	1	7.78	15.32	0.000 9**
残差	5.21	12	0.43		
失拟项	7.05	11	0.64	1.97	0.172 3
误差	2.60	8	0.33		
总和	1 230.40	27			

注:**表示该项极显著(*P*<0.01)。

由表 4 可知该回归模型极显著,其中圆盘切茬刀转速 *V*、圆盘切茬刀类型 *B*、圆盘切茬刀转速与圆盘切茬刀类型交互项 *VB* 和圆盘切茬刀转速平方项 *V*²对秸秆切断率 *Y*₁ 的影响皆为极显著。分析得到总回归线方程以及各圆盘切茬刀在单因素条件下与秸秆切断率的回归线方程分别为:

总回归线方程

$$\gamma_0 = 90.24 + 5.94V + 4.74B_1 + 3.08B_2 - 6.95B_3 - 0.69VB_1 - 0.43VB_2 - 0.23VB_3 - 1.26V^2$$

阿基米德螺旋线型
$$\gamma_1 = 67.93716 + 0.12784V - 0.0000125652V^2$$

星形线型

$$\gamma_2 = 65.48002 + 0.13050V - 0.0000125652V^2$$

缺口型

$$\gamma_3 = 54.85145 + 0.13250V - 0.0000125652V^2$$

平面型

$$\gamma_4 = 56.20383 + 0.14828V - 0.0000125652V^2$$

利用 Design-Expert 软件处理试验数据并绘制各刀型试验结果图,如图 13 所示。由图可知,在圆盘切茬刀转速相同条件下,阿基米德螺旋线型相较于其他 3 种刀型对秸秆的切断性能更优,因此选用阿基米德螺旋线型圆盘切茬刀开展后续设计。

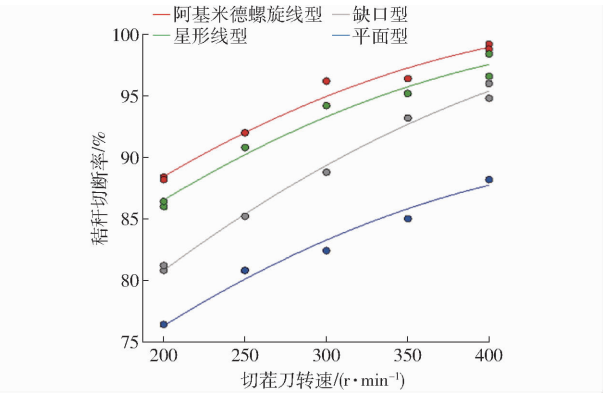


图 13 4 种圆盘切茬刀型作业效果对比图
Fig. 13 Comparison of interaction of four stubble cutter types

由图 13 可知,在相同转速条件下,不同形式切茬刀的秸秆切断率存在显著差异,秸秆切断率由高到低依次为阿基米德螺旋线型、星形线型、缺口型、平面型。且阿基米德螺旋线型切茬刀在各转速下秸秆切断率均最高,在 400 r/min 时可达 99.0%,结合力学分析和试验现象可知,阿基米德螺旋线型刀片具有变滑切角特性,可实现低阻力切割,有效减少秸秆撕裂与漏切。转速对各刀型合格率亦有影响,但阿基米德螺旋线型在 200 ~ 400 r/min 范围内始终保持最优且最稳定,表明其对转速适应性更强,综上选用阿基米德螺旋线型圆盘切茬刀开展后续设计。

3.3 切茬刀运动参数正交试验

3.3.1 试验设计

为考察圆盘切茬刀和滑刀式开沟器共同作用下,种床整理装置切茬和开沟性能受开沟装置结构和运动参数影响过程,设置前进速度 A 、圆盘切茬刀转速 V 和滑刀式开沟器宽度 L 为试验因素,设置秸秆切断率 Y_1 和土壤扰动面积 Y_2 为评价指

标,每个因素设置 3 个水平,开展三因素三水平试验。

滑刀式开沟器宽度 L 对秸秆侧推以及土壤扰动面积影响较大, L 越宽滑刀式开沟器前刃分土角度越大,土壤扰动面积越大且会产生额外的前进阻力;若 L 过窄可能导致种子弹跳、株距不均和秸秆侧推。综合考虑所用排种器落种口宽度和加工工艺,设计滑刀式开沟器宽度 L 于 20 ~ 60 mm 范围,开沟器入土深度为 50 mm。

土壤扰动面积 Y_2 作为圆盘切茬刀与开沟器组合工作时对土壤扰动情况的评价指标,测定方法为:在 EDEM 的后处理模块,取垂直于作业方向的土壤横截面,通过 CAD 中样条曲线拟合土壤轮廓测量得到土壤扰动面积。土壤扰动面积越小,则圆盘切茬刀与开沟器组合工作效果越优。

综上所述取前进速度 A 范围为 2 ~ 5 km/h,圆盘切茬刀转速 V 范围为 200 ~ 400 r/min,滑刀式开沟器宽度 L 范围为 20 ~ 60 mm,仿真过程如图 14 所示,试验因素编码如表 5。

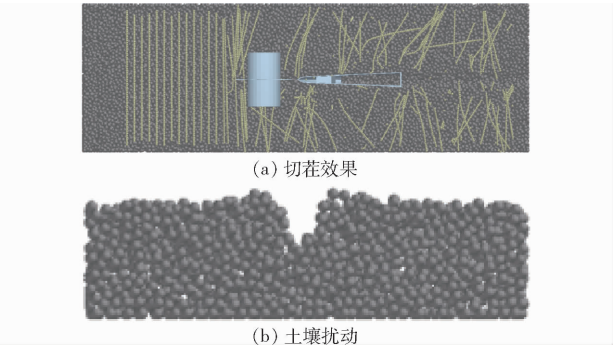


图 14 秸秆-土槽仿真仿真模型
Fig. 14 Simulation models of furrow opening process

表 5 试验因素编码			
Tab.5 Experimental factors coding			
编码	因素		
	前进速度 $A/(km \cdot h^{-1})$	圆盘切茬刀转速 $V/(r \cdot min^{-1})$	滑刀式开沟器 宽度 L/mm
-1	2.0	200	20
0	3.5	300	40
1	5.0	400	60

3.3.2 试验结果与分析

依据试验因素水平,通过 Design-Expert 得到正交试验表,并进行 EDEM 仿真试验,每组仿真试验重复 5 次取平均值,试验结果如表 6 (X_1 、 X_2 、 X_3 分别表示前进速度、圆盘切茬刀转速、滑刀式开沟器宽度编码值)所示。

分析可知秸秆切断率 Y_1 与土壤扰动面积 Y_2 对前进速度、圆盘切茬刀转速、滑刀式开沟器宽度的二次回归关系式为

$$Y_1 = 95.96 - 3.1X_1 + 3.88X_2 - 2.33X_3 - 0.5X_1X_2 + 0.1X_1X_3 + 0.75X_2X_3 - 1.76X_1^2 - 1.81X_2^2 - 1.6X_3^2 \quad (25)$$

$$Y_2 = 2\,255.27 + 149.95X_1 + 295.66X_2 + 383.39X_3 - 107.76X_1X_2 - 30.85X_1X_3 + 59.07X_2X_3 + 14.86X_1^2 + 143.18X_2^2 + 86.13X_3^2 \quad (26)$$

对回归方程进行方差分析,结果如表 7 所示。根据表 7 可知,回归模型极显著 ($P < 0.01$);失拟项不显著 ($P > 0.05$)。因素前进速度、圆盘切

茬刀转速、滑刀式开沟器宽度、前进速度与滑刀式开沟器宽度交互项、前进速度平方项、圆盘切茬刀转速平方项以及滑刀式开沟器宽度平方项对秸秆切断率影响极显著,前进速度与圆盘切茬刀转速交互项对秸秆切断率影响显著,其余项不显著,影响秸秆切断率显著性的因素主次顺序为:圆盘切茬刀转速、前进速度、滑刀式开沟器宽度。

因素前进速度、圆盘切茬刀转速、滑刀式开沟器宽度、前进速度与圆盘切茬刀转速交互项、圆盘切茬刀转速平方项以及滑刀式开沟器宽度平方项对土壤扰动面积影响极显著,圆盘切茬刀转速与滑刀式开沟器宽度交互项对土壤扰动面积影响显著,其余项不显著,影响土壤扰动面积显著性的因素主次顺序为:滑刀式开沟器宽度、圆盘切茬刀转速、前进速度。

剔除模型不显著项,则秸秆切断率和土壤扰动面积的二次回归模型分别为

$$Y_1 = 95.96 - 3.1X_1 + 3.88X_2 - 2.33X_3 - 0.5X_1X_2 + 0.75X_2X_3 - 1.76X_1^2 - 1.81X_2^2 - 1.6X_3^2 \quad (27)$$

$$Y_2 = 2\,261.52 + 149.95X_1 + 295.66X_2 + 383.39X_3 - 107.76X_1X_2 + 59.07X_2X_3 + 143.97X_2^2 + 86.91X_3^2 \quad (28)$$

通过 Design-Expert 处理数据,得到前进速度、圆盘切茬刀转速对秸秆切断率 Y_1 影响,圆盘切茬刀转速、滑刀式开沟器宽度对秸秆切断率 Y_1 影响,其响应曲面如图 15 所示。

由图 15a 可知,滑刀式开沟器宽度一定时,秸秆切断率随圆盘切茬刀转速增大而增加,秸秆切断率随前进速度增大呈先增大后减小的趋势;由图 15b

表 6 阿基米德螺旋线型圆盘切茬刀正交试验结果
Tab.6 Archimedes spiral stubble cutter orthogonal test results

试验序号	X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	Y_2/mm^2
1	-1	-1	0	91.4	1 864.82
2	1	-1	0	86.2	2 390.21
3	-1	-1	0	99.6	2 651.92
4	1	-1	0	92.4	2 746.27
5	-1	1	0	98.2	1 810.11
6	1	1	0	91.8	2 161.74
7	-1	0	-1	93.2	2 612.46
8	1	0	-1	87.2	2 840.69
9	-1	0	1	91.4	1 841.65
10	1	0	1	98.2	2 334.58
11	0	-1	-1	85.4	2 516.44
12	0	1	-1	95.2	3 245.64
13	0	-1	1	95.6	2 178.24
14	0	1	1	96.4	2 220.15
15	0	0	0	96.2	2 261.41
16	0	0	0	96.0	2 299.56
17	0	0	0	95.6	2 316.97

表 7 方差分析
Tab.7 Analysis of variance

方差来源	秸秆切断率 Y_1				土壤扰动面积 Y_2			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	285.47	9	191.08	<0.000 1 **	2.246×10^6	9	114.04	<0.000 1 **
X_1	76.88	1	463.13	<0.000 1 **	1.799×10^5	1	82.20	<0.000 1 **
X_2	120.13	1	723.64	<0.000 1 **	6.993×10^5	1	319.58	<0.000 1 **
X_3	43.25	1	260.51	<0.000 1 **	1.176×10^6	1	537.38	<0.000 1 **
X_1X_2	1.00	1	6.02	0.043 8 *	46 448.87	1	21.23	0.002 5 **
X_1X_3	0.040	1	0.24	0.638 5	3 806.89	1	1.74	0.228 7
X_2X_3	2.25	1	13.55	0.007 8 **	13 955.88	1	6.38	0.039 5 *
X_1^2	12.97	1	78.12	<0.000 1 **	929.23	1	0.42	0.535 4
X_2^2	13.72	1	82.64	<0.000 1 **	86 321.87	1	39.45	0.000 4 **
X_3^2	10.85	1	65.34	<0.000 1 **	31 234.00	1	14.27	0.006 9 **
残差	1.16	7			15 317.90	7		
失拟项	0.65	3	1.69	0.305 1	2 344.67	3	0.24	0.864 0
误差	0.51	4			12 973.23	4		
总和	286.64	16			2.261×10^6	16		

注:** 表示极显著 ($P < 0.01$); * 表示显著 ($0.01 \leq P < 0.05$)。

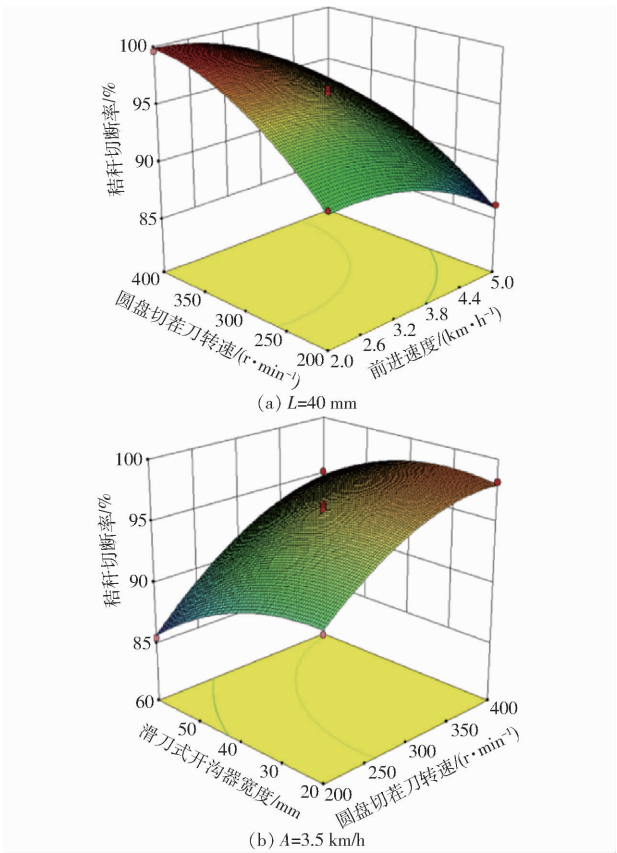


图 15 交互因素对秸秆切断率响应面
Fig. 15 Response surface analysis of interaction factors on straw cutting rate

可知,当前进速度一定时,秸秆切断率随滑刀式开沟器宽度增大呈先增大后减小的趋势,秸秆切断率随圆盘切茬刀转速增大而增加。

通过 Design-Expert 处理数据,得到前进速度、圆盘切茬刀转速对土壤扰动面积 Y_2 影响,圆盘切茬刀转速、滑刀式开沟器宽度对土壤扰动面积 Y_2 影响,其响应曲面如图 16 所示。

由图 16a 可知,当滑刀式开沟器宽度一定时,土壤扰动面积随圆盘切茬刀转速增大而增加增大;由图 16b 可知,当前进速度一定时,土壤扰动面积随滑刀式开沟器宽度增大而增加。

为保证开种沟时切茬效果优良、沟型整齐稳定,使用 Design-Expert 软件中的 Optimization 模块进行最优运行参数预测,设置约束条件为:前进速度 2 ~ 5 km/h、圆盘切茬刀转速 200 ~ 400 r/min、滑刀式开沟器宽度 20 ~ 60 mm,秸秆切断率设置目标范围大于 95%,土壤扰动面积设置优化目标为最小。

求解可得,该仿真模型最优运行参数为前进速度为 3.22 km/h,圆盘切茬刀转速为 301.18 r/min,滑刀式开沟器宽度为 31.49 mm,此时秸秆切断率为 96.22%,土壤扰动面积为 2 084.04 mm²。考虑传动设计与加工过程,优化后前进速度为 3.2 km/h,圆

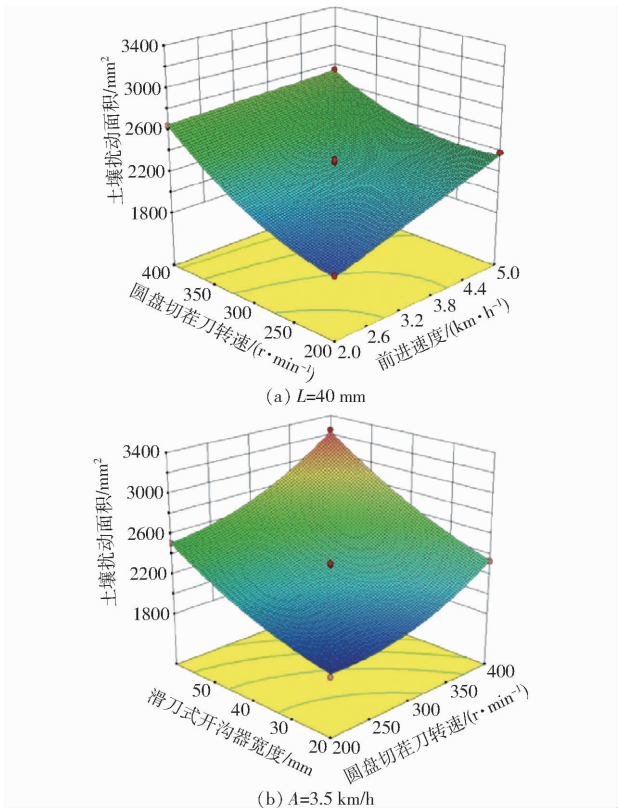


图 16 交互因素对土壤扰动面积响应面
Fig. 16 Response surface analysis of interactive factors on soil disturbance area

盘切茬刀转速为 301 r/min,滑刀式开沟器宽度为 32 mm。

3.4 台架验证试验

为验证仿真试验准确性和正交试验优化后数据可靠性,搭建试验台架并开展相关试验。根据种床整理装置工作原理,所设计的圆盘切茬刀试验台架包括主动切茬及开沟装置与土槽输送装置两部分,主动切茬及开沟装置通过调节电机转速改变圆盘切茬刀转速,土槽输送装置通过皮带传动带动土槽移动,模拟圆盘切茬刀与滑刀式开沟器前进。

为满足试验条件,搭建 1 000 mm × 400 mm × 150 mm (长 × 宽 × 高) 土槽台架,铺设厚度为 100 mm 土层,所用秸秆为干稻茬,试验时将秸秆横置于土层上方并保持一定间距。

为验证正交试验优化所得最优运行参数的可靠性。设置装置关键作业参数为正交试验优化后参数,评价指标为秸秆切断率与土壤扰动面积。台架试验效果如图 17 所示,台架与仿真试验平均秸秆切断率分别为 94.0% 和 96.2%,平均土壤扰动面积分别为 1 980.72 mm² 和 2 084.02 mm²。由试验结果可知,台架试验与仿真试验相对误差小于 10%,仿真试验结果与正交试验优化参数可靠。

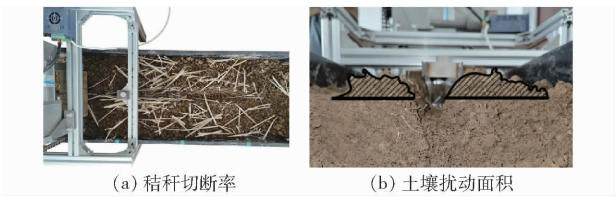


图 17 台架试验效果图
Fig. 17 Bench test effect diagrams

4 田间试验

为验证最佳参数组合下的种床整理装置和油麦玉兼用播种机整机的作业效果,开展机具种床整理性能试验和田间播种试验。

4.1 试验方法

于 2024 年 10—11 月在湖北省荆门市沙洋县进行田间试验,试验设备包括油麦玉兼用联合直播机、托普仪器 TJSD-750 型数显坚实度仪、德力西电子称重器、威盟士手持式土壤参数速测记录仪、卷尺等,试验田平均秸秆量为 745.91 g/m²。试验过程中拖拉机前进速度 3.2 km/h,播种机沿直线方向作业 50 m,选取中间段工作稳定区域作为测量区域,每隔 3 m 测量开沟深度及土壤扰动量,随机选取 10 个开沟测量点。为考察起垄灭茬装置作业性能,调节播深可调装置中油菜、小麦、玉米 3 挡,分别对厢面平整度、上种沟宽、上种沟宽稳定性系数、种沟深度、种沟深度稳定性系数进行测定。

4.2 试验结果

机具工作后测量所用机具作业性能的各评价指标。试验得到中间段切茬刀平均土壤扰动面积为 1 971.39 mm²,开沟器入土深度为 50 mm 时种沟秸秆切断率为 93.7%,与台架试验误差小于 10%,台架试验可靠。种床整理试验开沟试验结果如表 9 所示,沟深稳定性系数均在 85% 以上,厢面平整度为 15.68 mm,试验表明开沟装置各试验指标均满足需要。

表 9 播深可调开沟装置各项指标评价结果
Tab. 9 Sowing depth adjustable ditching device indicators evaluation results

作物种类	平均上种沟宽/mm	上种沟宽稳定性系数/%	平均种沟深度/mm	种沟深度稳定性系数/%
油菜	10.4	91.8	13.2	90.6
小麦	20.2	93.8	30.4	86.4
玉米	35.2	92.4	52.2	88.2

为验证油麦玉兼用联合播种机的播种性能,开展田间播种试验,如图 18 所示。油麦玉兼用联合播种机工作时未见堵土、壅土现象,播种后作物出苗均匀,长势良好。试验结果表明,油麦玉兼用联合播种机工作性能满足设计任务要求,旋压灭茬式种床整理装置能够保证播种均匀和良好种床质量。

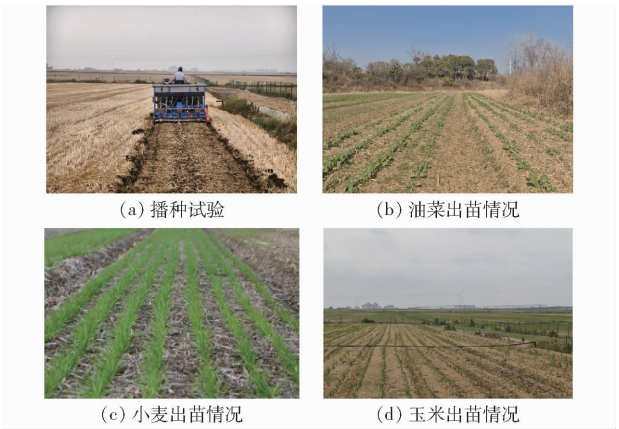


图 18 田间播种试验
Fig. 18 Field seeding experiment

5 结论

(1)结合油菜、小麦和玉米的种植农艺要求和黏重留茬田作业环境,提出一种结构布局为“主动起垄切茬辊-播深可调开沟装置-覆土镇压辊”的旋压灭茬式种床整理装置,并设计配套油麦玉兼用联合播种机,适用于南方黏重土壤兼用播种。

(2)利用 EDEM 开展切茬刀型单因素试验,试验结果表明,阿基米德螺旋线型圆盘切茬刀在转速 200~400 r/min 时秸秆切断率最高,且显著优于其他刀型;开展正交试验优化切茬开沟部件关键参数,以最优运行参数设置台架试验,台架试验表明秸秆切断率为 94%,土壤扰动面积为 1 980.72 mm²,仿真试验与台架试验中各试验指标误差均小于 10%。

(3)田间试验结果表明,阿基米德螺旋线型圆盘切茬刀的平均土壤扰动面积为 1 971.39 mm²,试验结果与台架试验误差小于 10%;厢面平整度为 15.68 mm,种沟秸秆切断率为 93.7%,油菜、小麦和玉米种沟深分别为 13.2、30.4、52.2 mm,沟深稳定性系数均 85% 以上,油菜、小麦和玉米出苗均匀,满足油麦玉兼用播种要求。

参 考 文 献

[1] 赵淑红,高连龙,袁溢文,等. 基于离散元法的深松作业玉米秸秆运动规律[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 53-62.
ZHAO Shuhong, GAO Lianlong, YUAN Yiwen, et al. Maize straw motion law in subsoiling operation using discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(20): 53-62. (in Chinese)
[2] 王磊,边祺旺,廖庆喜,等. 高茬黏重稻茬田油菜直播埋茬防堵深施肥复合装置研究[J]. 农业机械学报, 2023,

54(2): 83–94.

WANG Lei, BIAN Qiwan, LIAO Qingxi, et al. Burying stubble and anti-blocking deep fertilization composite device for rapeseed direct planting in high stubble and heavy soil rice stubble field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 83–94. (in Chinese)

- [3] 张青松, 廖庆喜, 肖文立, 等. 油菜种植耕整地技术装备研究与发展[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(5): 702–711.
ZHANG Qingsong, LIAO Qingxi, XIAO Wenli, et al. Research process of tillage technology and equipment for rapeseed growing[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5): 702–711. (in Chinese)

- [4] 衣淑娟, 李怡凯. 主动仿形技术研究现状与展望[J]. 中国农机装备, 2023(9): 2–7.
YI Shujuan, LI Yikai. Research status and prospect of active profiling technology[J]. China Agricultural Machinery Equipment, 2023(9): 2–7. (in Chinese)

- [5] CUI Tao, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Design and experiment of collocated-copying and semi-low-height planting-unit for corn precision seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(Sup.2): 18–23.

- [6] 衣淑娟, 李怡凯, 李衣菲, 等. 玉米高速免耕播种机液压主动仿形机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12): 110–120, 133.

YI Shujuan, LI Yikai, LI Yifei, et al. Design and test of hydraulic active profiling mechanism for high-speed no-till corn planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 110–120, 133. (in Chinese)

- [7] 张仕林, 黄玉祥, 赵宏波, 等. 切抛组合式小麦宽幅沟播破茬清秸防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 40–52.

ZHANG Shilin, HUANG Yuxiang, ZHAO Hongbo, et al. Design and experiment of cutting and throwing combined anti-blocking device for wide-seedbed seeding of wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 40–52. (in Chinese)

- [8] 史乃煜, 陈海涛, 叶俊宏, 等. 华东稻麦轮作区立旋自走电驱动式定角度清秸机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(8): 127–137.

SHI Naiyu, CHEN Haitao, YE Junhong, et al. Design and experiment of vertical rotating self-propelled fixed-angle straw cleaning machine in East China rice and wheat crop rotation area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 127–137. (in Chinese)

- [9] 侯守印, 纪张驰, 薛东辉, 等. 适配免耕播种单体的清秸装置改进设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 111–122.

HOU Shouyin, JI Zhangchi, XUE Donghui, et al. Improved design and test of straw removal device for no-tillage seeding unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 111–122. (in Chinese)

- [10] 刘芳, 高筱钧, 贾宪, 等. 高速精量播种机阿基米德螺线型弧面双齿盘覆土装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(6): 91–100, 120.

LIU Fang, GAO Xiaojun, JIA Xian, et al. Design and experiment of Archimedean spiral-type arc double-toothed disc soil-covering device for high-speed precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 91–100, 120. (in Chinese)

- [11] 张银平, 郝泽华, 徐婷, 等. 玉米免耕播种机动力补偿自适应清秸装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1): 174–185.

ZHANG Yinping, HAO Zehua, XU Ting, et al. Design and experiment of dynamic compensation adaptive straw removal device for corn no-till seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 174–185. (in Chinese)

- [12] 刘海, 廖宜涛, 王磊, 等. 小白菜正负气压组合式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 54–65.

LIU Hai, LIAO Yitao, WANG Lei, et al. Design and experiment of positive and negative pressure combination precision metering device for pakchoi[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 54–65. (in Chinese)

- [13] 廖宜涛, 武安阳, 秦永豪, 等. 油菜精量联合直播机凸垄厢面构建装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12): 121–133.

LIAO Yitao, WU Anyang, QIN Yonghao, et al. Design and experiment of convex ridge surface shaping device for rapeseed direct seeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 121–133. (in Chinese)

- [14] 张青松, 蔡家顺, 于良航, 等. 冷浸田起垄平整装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 50–59.

ZHANG Qingsong, CAI Jiashun, YU Lianghang, et al. Design and experiment of ridging leveling device for cold waterlogged paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 50–59. (in Chinese)

- [15] 李运通, 郑娟, 张百祥, 等. 圆盘滑刀式小粒径蔬菜窄行密植播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1): 197–209.

LI Yuntong, ZHENG Juan, ZHANG Baixiang, et al. Design and testing of a disc-sliding knife narrow-row precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 197–209. (in Chinese)

- [16] 廖宜涛, 刘嘉诚, 廖庆喜, 等. 正负气压组合滚轮式油菜精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5):

- 63 – 76.
- LIAO Yitao, LIU Jiacheng, LIAO Qingxi, et al. Design and test of positive and negative pressure combination roller type precision seed-metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 63 – 76. (in Chinese)
- [17] 李甜, 张翼, 廖庆喜, 等. 气力滚轮式多作物兼用单粒精密排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2025, 41(18): 62 – 71.
- LI Tian, ZHANG Yi, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of pneumatic roller multi-crop dual-purpose single-grain precision seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(18): 62 – 71. (in Chinese)
- [18] 刘立超, 张青松, 肖文立, 等. 油菜机械直播作业厢面地表粗糙度测量与分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 38 – 47.
- LIU Lichao, ZHANG Qingsong, XIAO Wenli, et al. Measurement and analysis of surface roughness of rapeseed mechanized direct seeding operation[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(12): 38 – 47. (in Chinese)
- [19] JIA H, WANG W, LUO X, et al. Effects of profiling elastic press roller on seedbed properties and soybean emergence under double row ridge cultivation[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 162: 34 – 40.
- [20] 郭慧, 陈志, 贾洪雷, 等. 锥形轮体结构的覆土镇压器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 56 – 65.
- GUO Hui, CHEN Zhi, JIA Honglei, et al. Design and experiment of soil-covering and soil-compacting device with cone-shaped structure of wheel[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(12): 56 – 65. (in Chinese)
- [21] 何进, 李洪文, 陈海涛, 等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 1 – 19.
- HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1 – 19. (in Chinese)
- [22] 贾洪雷, 郑健, 赵佳乐, 等. 仿蚯蚓运动多功能开沟器设计及参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 62 – 71.
- JIA Honglei, ZHENG Jian, ZHAO Jiale, et al. Design and parameter optimization of earthworm-like multi-function opener[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 62 – 71. (in Chinese)
- [23] 刘鹏, 何进, 娄尚易, 等. 异速圆盘动态支撑式玉米秸秆粉碎装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 41 – 50.
- LIU Peng, HE Jin, LOU Shangyi, et al. Design and experiment for dynamic supporting type maize straw chopping retention device with different rotation speeds of disc blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 41 – 50 (in Chinese)
- [24] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [25] 曾智伟, 马旭, 曹秀龙, 等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 1 – 20.
- ZENG Zhiwei, MA Xu, CAO Xiulong, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 1 – 20. (in Chinese)
- [26] 林建新, 廖庆喜, 康艳, 等. 油菜机械直播铲锹式种床整备机往复滑切刀设计与试验[J]. 农业工程学报, 2025, 41(1): 75 – 86.
- LIN Jianxin, LIAO Qingxi, KANG Yan, et al. Oscillating slide-cutting blade in shovel-type seedbed preparation machine for rapeseed direct seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(1): 75 – 86. (in Chinese)
- [27] MUDARISOV S, LOBACHEVSKY Y, FARKHUTDINOV I, et al. Justification of the soil dem-model parameters for predicting the plow body resistance forces during plowing[J]. Journal of Terramechanics, 2023, 109: 37 – 44.
- [28] 廖庆喜, 张季钦, 张青松, 等. 平行犁组翻扣与旋耕组合式油菜种床制备装置研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 190 – 201.
- LIAO Qingxi, ZHANG Jiqin, ZHANG qingsong, et al. Design and test of rapeseed seed bed preparation device combined with parallel plow group turnbuckle and rotary tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 190 – 201. (in Chinese)
- [29] DU J, HENG Y, ZHENG K, et al. Investigation of the burial and mixing performance of a rotary tiller using discrete element method[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 220: 105349.