doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.017

稻茬田油菜直播机组合式开种沟装置设计与试验

燕　桓[1]　魏国梁[2]　张青松[1,3]　卢长康[1]　蔡家顺[1]　廖庆喜[1,3]　廖宜涛[1,3]

（1.华中农业大学工学院，武汉 430070；2.湖北工业大学农机鉴定站，武汉 430068；
3.农业农村部长江中下游农业装备重点实验室，武汉 430070）

摘要：针对长江中下游地区稻收后油菜直播作业时土壤黏重板结、水稻秸秆残留量多，直播机开种沟部件易黏附堵塞，致使开种沟深度一致性差、种床厢面不平等问题，设计了一种稻茬田油菜直播机组合式开种沟装置，实现仿形平整厢面、开沟落种作业。根据稻茬田油菜直播播种作业要求，对旋压开沟盘、仿形平整板与靴型导种器等关键参数进行了设计。利用 EDEM－RecurDyn 耦合方法建立了土壤与组合式开种沟装置仿真模型，研究了旋压开沟盘直径、仿形平整板连接机构和靴型导种器仿形连接机构对开种沟深度一致性系数和厢面平整度影响规律。采用三因素五水平正交旋转中心组合试验方法，以旋压开沟盘直径、仿形平整板连接弹簧预紧力和靴型导种器仿形连接弹簧预紧力为试验因素，厢面平整度 Y 和开种沟深度一致性系数 U 为评价指标开展仿真试验，结果表明：当旋压开沟盘直径为 140 mm、仿形平整板连接弹簧预紧力为 350 N、靴型导种器仿形连接弹簧预紧力为 40 N 时，开种沟深度一致性系数为 90.71%、厢面平整度为 13.45 mm；对优化后的组合式开种沟装置开展不同作业速度的土槽试验，开种沟深度一致性系数为 85.3%～91.78%；田间试验结果表明：机具作业过程中组合式开种沟装置未出现缠草、堵土现象，作业后种沟深度平均值为 19.8 mm，开种沟深度一致性系数为 89.85%，厢面平整度平均值为 16.2 mm，各项指标均满足油菜种植种床要求。

关键词：油菜直播机；开种沟装置；厢面平整；仿形；DEM－MBD 耦合仿真

中图分类号：S223.2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)09-0199-13　　**OSID**：

Design and Experiment of Combined Seed Furrow Opener for Rapeseed Direct Seeder in Rice Stubble Field

YAN Huan[1]　WEI Guoliang[2]　ZHANG Qingsong[1,3]　LU Changkang[1]　CAI Jiashun[1]
LIAO Qingxi[1,3]　LIAO Yitao[1,3]

(1. *College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan* 430070, *China*
2. *Agricultural Machinery Appraisal Station, Hubei University of Technology, Wuhan* 430068, *China*
3. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: In the Mid-lower Reaches of the Yangtze River, the soil is sticky and harden during the direct seeding of rape after rice harvest, and the residual amount of rice straw is large. The components of the direct seeding machine are easy to adhere and block, resulting in poor consistency of the depth of the seed furrow and inequality of the seed bed surface. A combined seed opening furrow device for rape direct seeding machine in rice stubble field was developed to realize profiling flat surface, ditching and seeding operation. According to the requirements of rapeseed direct seeding operation in rice stubble field, the key parameters such as spinning ditching plate, profiling flat plate and boot type seed guide device were designed. The simulation model of soil and combined ditching device was established by EDEM－RecurDyn coupling method. The influence of the diameter of spinning ditching disc, the connecting mechanism of profiling flat plate and the profiling connecting mechanism of boot-type seed

收稿日期：2025－06－30　修回日期：2025－07－20

基金项目：国家自然科学基金项目(32572225)、湖北省自然科学基金项目(2025AFB596)和财政部和农业农村部：国家现代农业产业技术体系项目(CARS－12)

作者简介：燕桓(2001—)，男，博士生，主要从事现代农业装备设计与测控研究，E-mail：yanhuan@webmail.hzau.edu.cn

通信作者：张青松(1987—)，男，副教授，博士生导师，主要从事油菜机械化生产技术与装备研究，E-mail：qszhang@mail.hzau.edu.cn

guide on the depth consistency coefficient of ditching and the flatness of chamber surface was studied. The three-factor and five-level orthogonal rotation center combination test method was used to carry out the simulation test with the diameter of the spinning ditching disc, the pre-tightening force of the profiling connection spring of the profiling flat plate and the pre-tightening force of the profiling connection spring of the boot type seed guide as the test factors, and the flatness of the box Y and the consistency coefficient U of the opening ditch depth as the evaluation indexes. The results showed that when the diameter of the spinning ditching disc was 140 mm, the pre-tightening force of the profiling connection spring of the profiling flat plate was 350 N, and the pre-tightening force of the profiling connection spring of the boot type seed guide was 40 N, the consistency coefficient of the opening ditch depth was 90.71%, and the flatness of the box was 13.45 mm. The soil bin test of different operating speeds was carried out on the optimized combined seed ditch device, and the consistency coefficient of the depth of the seed ditch was 85.3% ~ 91.78%. The results of field experiment showed that there was no grass wrapping and soil blocking phenomenon in the combined furrow opening device during the operation of the machine. After the operation, the average depth of the furrow was 19.8 mm, the consistency coefficient of the depth of the furrow was 89.85%, and the average flatness of the surface was 16.2 mm. All indicators met the requirements of rapeseed planting seedbed.

Key words: rapeseed direct seeder; seed furrows opener; flat surface; profile modeling; DEM - MBD coupling simulation

0 引言

油菜是我国重要的油料作物[1-2],菜籽油占我国食用植物油总产量的 55% 左右,长江流域稻油轮作区是我国重要的油菜种植区域,其种植面积占全国总面积的 85%[3-5]。在长江中下游区域开展油菜直播作业时,由于该区域土壤粘重板结,稻田存在大量残留秸秆及浮草,现有开种沟部件作业时,常发生土壤粘附堵塞、秸秆缠绕等现象,造成厢面质量较差、播种深度不稳定等问题[6-7],导致出苗率低。

油菜直播时种床质量会对油菜生长造成影响,厢面平整度和种沟深度一致性是衡量种床质量重要指标。为了提高机具作业后种床质量及播种深度一致性,国内外学者针对开种沟部件和厢面平整部件进行了研究。魏松等[8]设计了一种棉花直播机的独立仿形开沟器,并研究了弹簧刚度和作业速度对作业效果的影响。衣淑娟等[9]设计了一种玉米高速免耕播种机液压主动仿形机构,通过静力学分析与试验验证,优化了液压缸初始伸出量与作业速度的匹配关系。李运通等[10]针对菠菜等小粒径蔬菜的种植需求,设计了一种圆盘-滑刀式小粒径蔬菜窄行密植播种机,通过离散元仿真优化了开沟器结构参数。WANG 等[11]设计并评估了一种带有开沟器的沟槽压实装置,用于改善玉米精播机的播种质量,提高播种深度的一致性和种子间距的均匀性。李尚平等[12]基于有效落种空间形成条件,设计了一种组合式甘蔗横向种植开沟器,通过优化关键部件参数提高落种质量和作业性能。意大利马斯奇奥公司研制的 MTR No - Till 播种单体,采用指式镇压装置对种沟进行塑形,并结合种沟镇压轮对种沟进行镇压,为种子提供一个理想的种床环境。德国 HORSCH 公司研制的 Pronto 播种机使用 TurboDisc 种子犁刀进行土壤覆盖和播种,并且每个犁刀装有橡胶减震器,提高机具在高速运行情况下的播深稳定性。欧美等国外学者和研究机构开发的开种沟部件和平整部件主要用于大规模农场免耕作业,而我国长江流域油菜种植区域主要为稻茬田,地块面积较小,目前对稻茬田油菜直播开种沟装置研究较少。

本文针对长江中下游地区油菜直播作业时土壤黏重板结、水稻秸秆残留量多,直播机开种沟部件作业时易黏附堵塞,致使开种沟深度一致性差、种床厢面不平,以及现有机具平整部件与开沟落种部件单独作业,机具整体结构较大等问题,开展组合式开种沟装置设计与试验,旨在实现仿形平整厢面、开沟落种作业。

1 装置整体结构与工作原理

1.1 整体结构

油菜直播机主要由组合式开种沟装置、排种系统、排肥系统、机架、开畦沟部件、反旋旋耕装置等组成,其中组合式开种沟装置主要由旋压开沟盘、仿形平整板与靴型导种器组成。仿形平整板通过销轴与播种机机架链接,旋压开沟盘通过转轴固定于仿形平整板上,靴型导种器位于旋压开沟盘后方并通过转轴固定于仿形平整板上。油菜直播机及组合式开种沟装置结构如图 1 和图 2 所示。

1.2 工作原理

机具作业时,拖拉机通过三点悬挂装置带动机

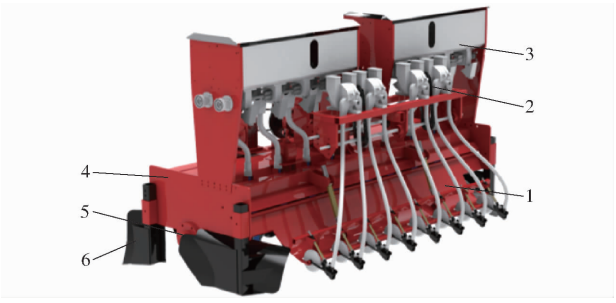


图 1　配有组合式开种沟装置的油菜直播机结构图

Fig. 1　Structure diagram of rapeseed direct seeder with combined seed furrow opener

1. 组合式开种沟装置　2. 排种系统　3. 排肥系统　4. 机架　5. 开畦沟部件　6. 反旋旋耕装置

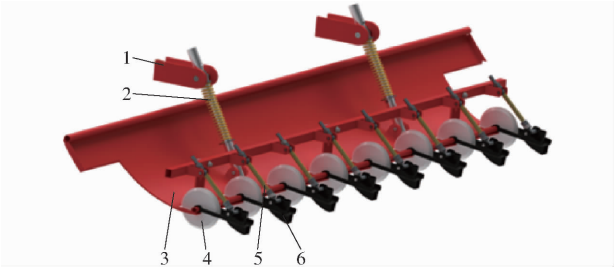


图 2　组合式开种沟装置结构图

Fig. 2　Structure diagram of combined seed furrow opener

1. 连接架　2. 仿形平整板连接机构　3. 仿形平整板　4. 旋压开沟盘　5. 靴型导种器仿形连接机构　6. 靴型导种器

具向前运动，同时拖拉机 PTO 带动机具旋耕刀辊作业。作业过程中，开畦沟部件开沟作畦，排肥系统进行施肥，旋耕装置细碎土壤、埋覆秸秆，组合式开种沟装置对旋耕后的厢面进行平整处理并构建种沟，排种系统按需供种，各功能部件配合作业，实现油菜直播机旋耕、开畦沟、施肥、开沟落种一体化作业。

其中，组合式开种沟装置作业过程如图 3 所示。直播机作业时，组合式开种沟装置工作在旋耕装置作业后的松散土壤-秸秆区域，机具行进过程中，旋压开沟盘在地表摩擦力作用下旋转，实现压茬破土作业，有效防止秸秆缠绕并初步形成种沟；随后仿形平整板对旋压开沟盘作业后的厢面进行平整，并通过仿形平整板连接机构实现整体仿形作业；最后靴型导种器实现落种，并在靴型导种器仿形连接机构作用下，实现播种单行仿形，确保播种深度的稳定性。

2　关键部件设计与分析

2.1　旋压开沟盘设计与分析

组合式开种沟装置作业时，机具向前运动带动旋压开沟盘旋转作业，旋压开沟盘将秸秆压入土壤并且挤压土壤初步形成种沟，为增强压茬和破土能力，旋压开沟盘采用刃口设计[13]。旋压开沟盘主要

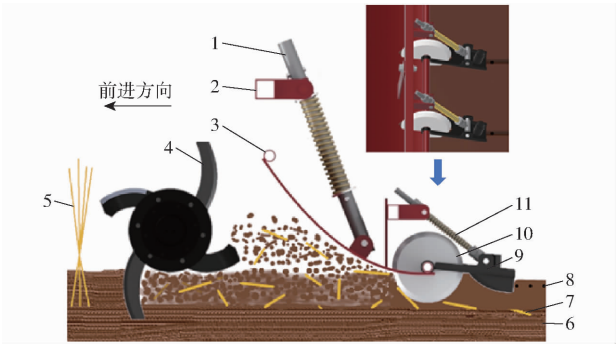


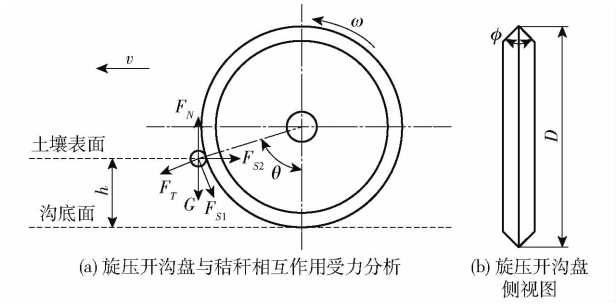
图 3　组合式开种沟装置作业原理图

Fig. 3　Principle of operation of combined seed furrow opener

1. 仿形平整板连接机构　2. 连接架　3. 仿形平整板　4. 旋耕装置　5. 秸秆　6. 土壤　7. 细碎秸秆　8. 油菜种子　9. 靴型导种器　10. 旋压开沟盘　11. 靴型导种器仿形连接机构

结构参数为旋压开沟盘直径 D 与开沟盘刃口角度 ϕ，其结构参数的改变会对作业性能及作业质量造成影响。

为了确定旋压开沟盘结构参数，以旋压开沟盘刃口处的秸秆作为分析对象，对旋压开沟盘压茬、开种沟作业时的受力情况进行分析，如图 4 所示。



(a) 旋压开沟盘与秸秆相互作用受力分析　(b) 旋压开沟盘侧视图

图 4　旋压开沟盘力学分析

Fig. 4　Mechanical analysis of rotary stubble opening disc

对秸秆所受到的作用力进行分析可得

$$\begin{cases} F_T\sin\theta - F_{S1}\cos\theta - F_{S2} = 0 \\ F_T\cos\theta + G + F_{S1}\sin\theta - F_N = 0 \end{cases} \tag{1}$$

其中

$$\begin{cases} F_{S1} = F_T\tan\varphi_1 \\ F_{S2} = F_N\tan\varphi_2 \\ \cos\theta = 1 - \dfrac{2h}{D} \end{cases}$$

式中　F_T——旋压开沟盘对秸秆的作用力，N

F_{S1}——旋压开沟盘对秸秆的摩擦力，N

F_{S2}——种床对秸秆颗粒的摩擦力，N

G——秸秆颗粒自身重力，N

F_N——种床对秸秆颗粒的作用力，N

θ——压力角，(°)

φ_1——秸秆与旋压开沟盘摩擦角，(°)

φ_2——秸秆与种床摩擦角，(°)

h——作业深度，mm

为保证旋压开沟盘顺利压茬开沟,需满足

$$F_T\sin\theta \geqslant F_{S1}\cos\theta + F_{S2} \tag{2}$$

联立式(1)、(2)可得

$$\tan\theta \geqslant \frac{\tan\varphi_1 + \tan\varphi_2}{1 - \tan\varphi_1\tan\varphi_2} \tag{3}$$

为保证旋压开沟盘良好的压茬、开种沟效果并且使靴型导种器能够顺利开沟落种,旋压开沟盘的作业深度应大于油菜的播种深度,油菜播种深度 0 ~ 20 mm,考虑土壤回流,取旋压开沟盘作业深度为 30 ~ 50 mm。取旋压开沟盘与秸秆间摩擦角为 25°,种床与秸秆间摩擦角为 30°,种床土壤颗粒间摩擦角为 37°[14],代入式(3),可得旋压开沟盘直径 $D \leqslant 190$ mm。旋压开沟盘直径过小会使旋压开沟盘作业时转动受阻和造成土壤堆积等问题,故取旋压开沟盘直径为 130 ~ 150 mm。

旋压开沟盘刃口角度较小可以减低切削阻力、提升压茬效果,但过小会导致刃口磨损较快,适当的刃口角度可以增强刃口强度,根据《农业机械设计手册》[15],综合考虑选取旋压开沟盘刃口角度为 80°。

2.2 仿形平整板设计与分析

2.2.1 仿形平整板结构设计与分析

仿形平整板主要对旋压开沟盘作业后的厢面进行平整,如图 5 所示,其截面形状为曲线 EF,由曲线 EO 和 OF 组成。在仿形平整板前进作业过程中土壤会与仿形平整板产生相互作用,土壤颗粒在与曲面接触后会发生剪切变形,土壤颗粒与弧面碰撞反弹或者沿曲面滑落。相关研究发现平整部件的仿形平整板截面曲线会对机具所受牵引阻力造成影响,其中指数模型牵引阻力的增长幅度随速度变化最为平缓[16],所以选用指数模型作为曲线 EO。曲线 OF 所在区域主要起镇压作用,采用直线设计。

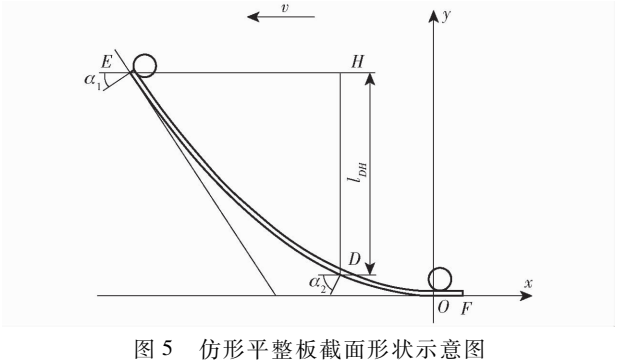


图 5 仿形平整板截面形状示意图

Fig. 5 Section shape of profiled flat plate

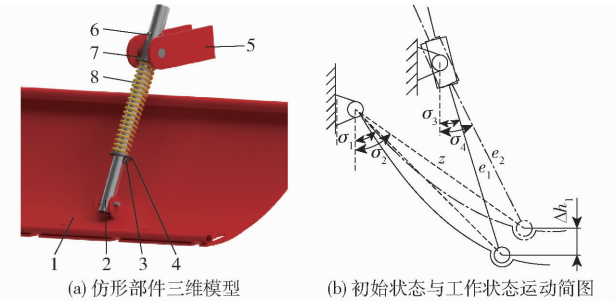
由图 5 可知曲线 EO 形状由仿形平整板高度 l_{DH}、起始推压角 α_1 和终止推压角 α_2 确定,设其曲线方程为

$$y = \left[\mathrm{e}^{(\cot\alpha_1 - \cot\alpha_2)/l_{DH}}\right]^x \tag{4}$$

由于仿形平整板的作业高度由机具作业深度和机具机架位置确定,机具的旋耕作业深度为 130 ~ 180 mm,旋耕刀辊的最大外径为 270 mm,本文取仿形平整板高度 l_{DH} 为 240 mm。土壤颗粒与仿形平整板之间的作用力与土壤颗粒和仿形平整板的特性相关,推压角是造成仿形平整板作业过程中牵引阻力变化的关键参数。当推压角大于摩擦角,土壤颗粒可以沿着仿形平整板曲面向下运动,完成平整作业并且减小机具阻力[17]。土壤与仿形平整板之间摩擦角一般为 23°[18-19],故推压角 α 取值范围为 23° ~ 67°。起始推压角处主要使土壤颗粒能够沿着曲面顺利滑落,考虑仿形平整板的安装和机具整体结构轻简,起始推压角取值应该偏大,取起始推压角 α_1 为 55°。终止推压角处需要使秸秆-土壤混合物能够沿仿形平整板曲面下滑,防止其前端出现积土阻滞现象,从而有效完成厢面平整作业,同时考虑曲线 EO 与曲线 OF 顺滑过渡,取终止推压角 α_2 为 35°。仿形平整板曲线 OF 为直线,其所在断面主要是对土壤进行镇压,线型的长度也与旋压开沟盘的安装尺寸相关,综合考虑取曲线 OF 长度为 25 mm。

2.2.2 仿形平整板连接机构设计与分析

仿形平整板的作业区域为旋压开沟盘作业后的土壤与秸秆混合物,为了保证作业后厢面平整,仿形平整板通过仿形平整板连接机构实现仿形平整厢面,其结构如图 6 所示,仿形平整板连接机构包括机架连接架、直杆、直杆套筒、仿形平整板连接弹簧、直杆垫片、上插口销、下插口销。当仿形平整板作业时,镇压作业区域产生的反作用力会使仿形平整板产生向上运动的趋势,致使仿形平整板连接弹簧收缩,进而实现仿形连接机构的仿形功能。



(a) 仿形部件三维模型 (b) 初始状态与工作状态运动简图

图 6 仿形平整板连接机构示意图

Fig. 6 Schematic of connecting mechanism of profiling flat plate

1. 仿形平整板 2. 直杆 3. 下插口销 4. 直杆垫片 5. 机架连接架 6. 上插口销 7. 直杆套筒 8. 仿形平整板连接弹簧

仿形平整板连接机构一端连接机架,另一端连接于仿形平整板。仿形平整板连接机构的直杆外侧设有仿形平整板连接弹簧,弹簧两端分别设置直杆套筒和下插口销,通过改变下插口销的安装位置对

仿形平整板连接弹簧的压缩长度进行调节。仿形平整板连接机构可调节的高度 Δh_1 为

$$\Delta h_1 = z\cos\sigma_1 - z\cos\sigma_2 = e_1\cos\sigma_3 - e_2\cos\sigma_4 \quad (5)$$

式中　z——仿形平整板直线长度，mm

σ_1——仿形平整板起始角度，(°)

σ_2——仿形平整板作业时角度，(°)

σ_3——仿形平整板连接机构起始角度，(°)

σ_4——仿形平整板连接机构作业时角度，(°)

e_1——作业前下插口销到直杆套筒连接处的距离，mm

e_2——作业后下插口销到直杆套筒连接处的距离，mm

仿形平整板调节高度与平整板的长度、作业时偏移角度相关，考虑整机结构尺寸以及仿形平整板作业过程中处于极限位置时曲线 OF 能够维持水平状态，设定仿形平整板调节范围 Δh_1 为 50 mm、仿形平整板的起始角度 σ_1 在 30°，仿形平整板直线长度 z 根据前面曲面设计为 354 mm，代入式(5)可知仿形平整板作业时可调节角度 $\Delta\sigma$ 为 10°。

当机具作业向后抛撒细碎土壤颗粒至仿形平整板时，仿形平整板连接弹簧提供压力对厢面镇压，实现平整作业。为了更好地实现仿形平整板连接机构仿形功能，仿形连接机构在初始安装时需要有一定的预紧力，以施加一定的压力使仿形平整板能够有效平整厢面。取仿形平整板平整作业时的状态，对仿形连接机构与仿形平整板连接点 N 进行受力分析。

图 7 为仿形平整板与仿形连接机构连接处受力情况，由水平及竖直方向受力平衡可得

$$\begin{cases} F_{2x} = F_1\sin\sigma_4 + f_1 \\ G_0 + F_{2y} + F_1\cos\sigma_4 = T_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中　G_0——仿形平整板重力，N

T_0——厢面对仿形平整板的法向力，N

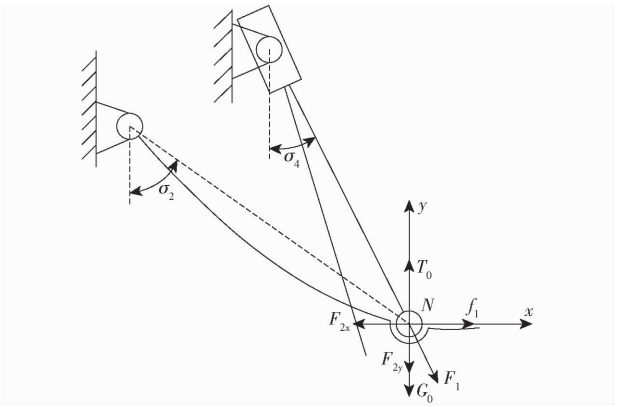


图 7　仿形平整板力学模型

Fig. 7　Mechanical model of profiling flat plate

f_1——厢面对仿形平整板的摩擦力，N

F_1——仿形连接机构对点 N 作用力，N

F_{2x}——仿形平整板对点 N 在 x 轴方向作用力，N

F_{2y}——仿形平整板对点 N 在 y 轴方向作用力，N

仿形平整板对连接处的作用力主要在 x 轴方向，带动其向前运动，忽略自身重力与体积，y 轴方向平衡方程可简化为

$$F_1\cos\sigma_4 = T_0 \quad (7)$$

参考《农业机械学》[20]，仿形平整板在作业过程中对土壤的压强在 3 ~ 5 N/cm^2 较为合适。根据机具幅宽为 230 cm，设计仿形平整板的长度为220 cm，其作业时作业宽度为 15 ~ 25 mm，考虑作业时仿形平整板还受到旋压开沟盘的作用力，则取压强范围为 4 ~ 5 N/cm^2，作业宽度为 20 mm，则仿形平整板作业时向下的镇压力为 2 000 ~ 2 500 N。仿形平整板上安装了两个仿形平整板连接机构，单个仿形连接机构在作业时受力为 1 000 ~ 1 250 N，取弹簧的劲度系数 k 为 1.8×10^5 N/m，作业过程弹簧的变化长度为 50 mm，作业角度为 35°，则单个仿形平整板连接机构的弹簧预紧力为 350 ~ 450 N。

2.3　靴型导种器设计与分析

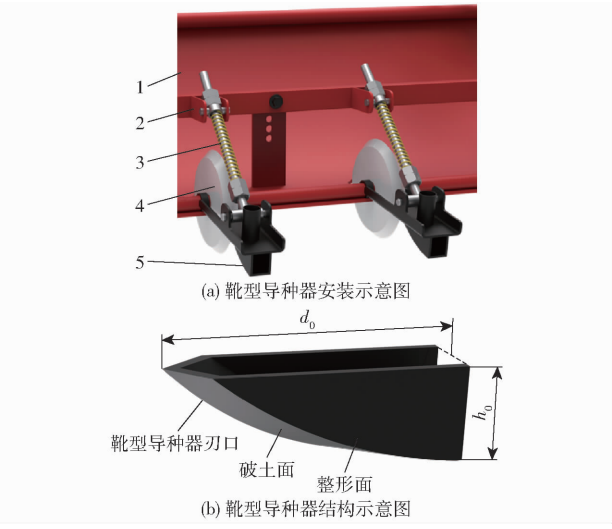
2.3.1　靴型导种器结构设计与分析

靴型导种器主要实现落种并防止土壤粘附，其安装及结构如图 8 所示，组合式开种沟装置作业时，靴型导种器在旋压开沟盘后方进行开沟落种，并通过靴型导种器仿形连接机构弹簧的弹性调节作用，实现播种深度的一致性。

由于油菜播种深度为 0 ~ 20 mm，考虑靴型导种器作业时土壤会存在回流，设计靴型导种器刃口部位的长度 d_0 为 80 mm、高度 h_0 为 30 mm。靴型导种器的刃口曲线影响其入土效果，是决定作业性能的关键因素。根据滑切原理，要想使靴型导种器作业时与土壤颗粒发生剪切破坏，靴型导种器刃口曲线的滑切角应大于摩擦角，本研究采用抛物线函数构建靴型导种器刃口曲线，能够有效保证滑切角始终满足大于摩擦角的条件要求[21]。设靴型导种器刃口曲线方程为过原点的抛物线，如图 9 所示，设刃口曲线方程 $y = ax^2$，a 为常数。取靴型导种器刃口曲线任意两点 A 和 C，设点 A 的坐标为 (x_1, y_1)，点 C 的坐标为 (x_2, y_2)，可推导得出曲线上点的斜率为

$$\begin{cases} k_1 = \tan\lambda_1 = 2ax_1 \\ k_2 = \tan\lambda_2 = 2ax_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中　k_1、k_2——刃口曲线在点 A、C 的斜率



(a) 靴型导种器安装示意图

(b) 靴型导种器结构示意图

图 8 靴型导种器

Fig. 8 Boot-type seed guider

1. 仿形平整板 2. 固定杆 3. 靴型导种器仿形连接机构 4. 旋压开沟盘 5. 靴型导种器

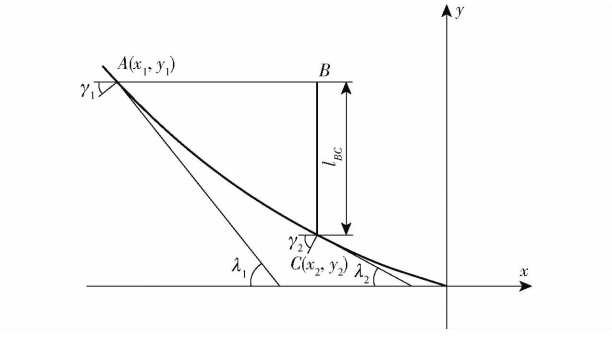


图 9 靴型导种器刃口曲线

Fig. 9 Boot-type seed guide blade curve

λ_1、λ_2——刃口曲线在点 A、C 切线与 x 轴夹角,(°)

由于点 A 滑切角 γ_1、点 C 滑切角 γ_2 与 λ_1、λ_2 互为余角,可得最终刃口曲线方程为

$$y = \frac{\tan^2(90° - \gamma_1) - \tan^2(90° - \gamma_2)}{4l_{BC}} x^2 \tag{9}$$

由图 9 可知,刃口曲线滑切角呈逐渐增大的趋势,即点 C 滑切角 γ_2 大于点 A 滑切角 γ_1。根据滑切原理的基本要求,点 A 滑切角 γ_1 的设定值应大于土壤摩擦角 β,结合该机具作业工况取摩擦角 β 为 23°[22],因此需要满足 $\gamma_1 > 23°$,可得点 C 滑切角 $\gamma_2 < 67°$。由式(9)可知,当靴型导种器高度确定时,通过调整滑切角会得到不同形态的刃口曲线。靴型导种器刃口曲线滑切角设置过大,作业阻力会因土壤结构破坏区域增大而增大;靴型导种器刃口曲线滑切角设置过小,靴型导种器需增大尺寸,致使接触面增加从而使作业阻力上升,综合考虑取点 A 滑切角 γ_1 为 40°,点 C 滑切角 γ_2 为 50°,则得到靴型导种器刃口曲线方程为

$$y = 0.005\,968x^2 \tag{10}$$

2.3.2 靴型导种器仿形连接机构设计与分析

在机具作业过程中,地表不平会导致种沟深度不一致。为确保播深稳定性,靴式开沟器通过靴式开沟器仿形连接机构实现单行自适应调节,维持沟深恒定。靴式开沟器仿形连接机构结构如图 10 所示,靴型导种器仿形连接机构包括螺纹杆套筒、螺纹杆、靴型导种器仿形连接弹簧、上对顶螺母、下对顶螺母、固定销和固定杆。当靴型导种器接触土壤时,会使靴型导种器有向上运动的趋势,绕着旋压开沟盘转轴转动,从而带动螺纹杆沿着螺纹杆套筒移动,靴型导种器仿形连接弹簧收缩,实现靴型导种器仿形连接机构的仿形功能。

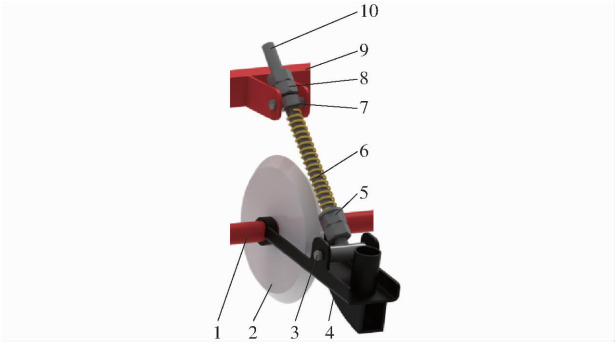


图 10 靴型导种器仿形连接机构结构示意图

Fig. 10 Structure diagram of boot-type seed guide imitation connection mechanism

1. 安装转轴 2. 旋压开沟盘 3. 固定销 4. 靴型导种器 5. 下对顶螺母 6. 靴型导种器仿形连接弹簧 7. 上对顶螺母 8. 螺纹杆套筒 9. 固定架 10. 螺纹杆

螺纹杆两端安装上下对顶螺母,通过调节下对顶螺母的位置调节靴型导种器仿形连接弹簧的压缩长度,进而调节靴型导种器高度和倾斜角度。为了更好实现靴型导种器仿形连接机构仿形效果,在初始安装阶段需施加适当的预紧力,使靴型导种器产生足够的正向压力,从而有效完成开沟落种作业。为确定满足作业要求的弹簧预紧力范围,建立靴型导种器仿形连接机构作业过程中动力学模型,如图 11 所示。

由图 11 靴型导种器仿形连接机构作业过程中点 M 受力平衡可得

$$\begin{cases} F_{4x} = F_3 \sin\eta_2 + f_2 \\ G_1 + F_{4y} + F_3 \cos\eta_2 = T_1 \end{cases} \tag{11}$$

式中 G_1——靴型导种器重力,N

T_1——厢面对点 M 的法向力,N

f_2——厢面对点 M 的摩擦力,N

F_3——单体仿形机构对点 M 作用力,N

F_{4x}——机具对点 M 在 x 轴方向作用力,N

F_{4y}——机具对点 M 在 y 轴方向作用力,N

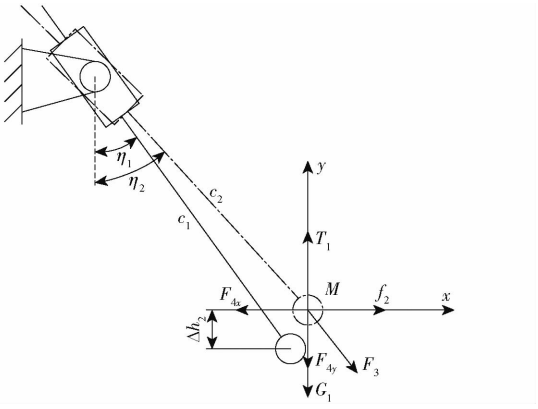


图 11　靴型导种器仿形连接机构动力学模型

Fig. 11　Mechanical model of profiling connection mechanism of boot-type seed guider

机具对连接处点 M 的作用力主要在 x 轴方向，带动平整部件向前运动，忽略自身重力与体积，y 轴方向平衡方程为

$$F_3\cos\eta_2 = T_1 \tag{12}$$

仿形连接机构可调节的高度 Δh_2 为

$$\Delta h_2 = c_1\cos\eta_1 - c_2\cos\eta_2 \tag{13}$$

式中　η_1——单体仿形机构起始角度，(°)

η_2——单体仿形机构作业时角度，(°)

c_1——靴型导种器仿形连接弹簧作业前长度，mm

c_2——靴型导种器仿形连接弹簧作业后长度，mm

为了使机具作业时靴型导种器处于极限位置时能够保持水平状态，将播种作业时深度调节区间 Δh_2 设定为 20 mm，单体仿形机构起始角度在 40°左右，靴型导种器作业时可调节角度 $\Delta\eta$ 约为 5°。

参考《农业机械学》[20]，机具在作业过程中对土壤的压强在 3 ~ 5 N/cm^2 比较合适。通过 Solidworks 软件对靴型导种器的受力面进行面积特征提取，得到受力面积为 50 cm^2，则压强范围为 4 ~ 5 N/cm^2，靴型导种器作业时向下的镇压力为 200 ~ 250 N。取单体仿形机构作业时角度 η_2 为 45°、弹簧的长度变化为 20 mm、弹簧劲度系数 k 为 1.4×10^4 N/m，则作业过程中弹簧给予的作用力为 196 N，靴型导种器仿形连接弹簧预紧力为 34 ~ 45 N。

3　仿真试验

3.1　EDEM - RecurDyn 耦合仿真模型构建

种床的形成与旋压开沟盘、仿形平整板和靴型导种器相关，开种沟深度一致性和厢面平整度是评价种床质量的关键指标。组合式开种沟装置仿真作业过程中土壤与装置作用复杂，仿形机构运动分析难度较大，采用离散元软件 EDEM 和多体动力学软件 RecurDyn 耦合模拟机具作业过程[23]。在 EDEM 中建立土壤-秸秆模型，长江中下游稻茬田土壤含水率较高，实际土壤颗粒之间存在比较强的粘结力，故选用 Hertz - Mindlin with Bonding V2 接触模型作为土壤-秸秆颗粒间接触模型[24]，土壤生成后，在土槽表面生成长度为 304 mm 的秸秆模型，每个秸秆模型由秸秆颗粒粘结而成，Bonding 键粘结参数参照文献[25]进行设置，单位面积法向刚度为 1.8×10^9 N/m^3，单位面积切向刚度为 2.3×10^9 N/m^3，临界法向应力为 43 MPa，临界切向应力为 12.6 MPa，粘结半径为 1.0 mm。在 RecurDyn 中对装置进行运动设置，在仿形平整板与机架之间、旋压开沟盘与仿形平整板转轴之间、靴型导种器与仿形平整板转轴之间添加旋转副，将机架与地面之间设置为移动副，设置机具沿着设定的方向直线运动。分别在 EDEM 与 RecurDyn 中将旋压开沟盘的材料属性设定为 ABS，其余材料属性设定为 steel。耦合仿真模型如图 12 所示，仿真模型材料参数和接触参数如表 1 所示[26-28]。

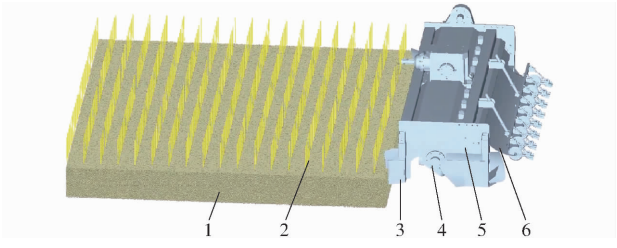


图 12　DEM - MBD 耦合模型

Fig. 12　Construction of DEM - MBD coupling model

1. 土壤　2. 秸秆　3. 开畦沟部件　4. 旋耕装置　5. 机架　6. 组合式平整开种沟装置

3.2　试验指标

在 EDEM 软件后处理模块选取机具作业过程中稳定区域内垂直机具行进方向的平面进行平面截取，以 100 mm 为间距连续截取种沟截面，共获取 10 个断面样本。如图 13 所示，测量种床表面到沟底的垂直距离作为开种沟深度，开种沟深度一致性系数为

$$T_w = 1 - T_b \tag{14}$$

其中

$$\begin{cases} T_b = \dfrac{S_z}{h_z}\times 100\% \\ S_z = \sqrt{\dfrac{\sum\limits_{i-1}^{n_0}(h_i - h_z)^2}{n_0 - 1}} \end{cases}$$

式中　h_z——平均种沟深度，mm

h_i——第 i 个取样点的种沟深度，mm

S_z——种沟深度标准差

n_0——数据采集次数

T_b——种沟深度变异系数，%

T_w——开种沟深度一致性系数，%

表 1 仿真模型材料参数

Tab. 1 Contact parameters of simulation model

类型	参数		数值
基本参数	土壤泊松比		0.37
	土壤密度/(kg·m^{-3})		2 650
	土壤剪切模量/Pa		1.82×10^{6}
	秸秆泊松比		0.4
	秸秆密度/(kg·m^{-3})		241
	秸秆剪切模量/Pa		7×10^{7}
	机具(钢材)泊松比		0.3
	机具(钢材)密度/(kg·m^{-3})		7 850
	机具(钢材)剪切模量/Pa		7.9×10^{10}
	ABS 泊松比		0.394
	ABS 密度/(kg·m^{-3})		1 060
	ABS 剪切模量/Pa		1.4×10^{9}
接触参数	土壤-土壤	静摩擦因数	0.422
		动摩擦因数	0.282
		恢复系数	0.363
	土壤-秸秆	静摩擦因数	0.5
		动摩擦因数	0.01
		恢复系数	0.5
	土壤-机具	静摩擦因数	0.584
		动摩擦因数	0.266
		恢复系数	0.422
	土壤- ABS	静摩擦因数	0.55
		动摩擦因数	0.1
		恢复系数	0.4
	秸秆-秸秆	静摩擦因数	0.54
		动摩擦因数	0.05
		恢复系数	0.28

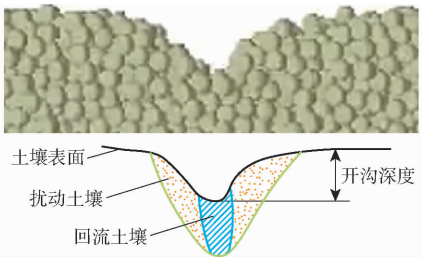


图 13 作业后种沟截面图

Fig. 13 Cross section of seed furrow after operation

在各行程内,以所在厢面最高点为基准设置水平基准线,沿耕宽方向将厢面等分为 10 个测点,分别测定各点至水平基准线的垂直距离,平整度为所测距离的标准差平均值,各行程测量 3 次,取均值作为该行程的厢面平整度。

3.3 作业过程分析

为了研究旋压开沟盘直径、仿形平整板连接弹簧预紧力、靴型导种器仿形连接弹簧预紧力对土壤-机具相互作业机理的影响,对组合式开种沟装置作业过程进行分析,如图 14 所示,主要分为 4 个主要阶段:旋压开沟盘刚与土壤接触、旋压开沟盘完全进入土壤、靴型导种器开始接触土壤、靴型导种器完全进入土壤,分析可知:刚开始作业时,旋压开沟盘接触土壤进行预开沟作业,土壤颗粒扰动量较大,作业出较深种沟;随着旋压开沟盘继续向前运动,仿形平整板开始对旋压开沟盘作业后的厢面进行整平,部分颗粒开始回流落入种沟,紧接着靴型导种器接触土壤,稳定种沟沟壁,形成满足作业条件的种沟深度。

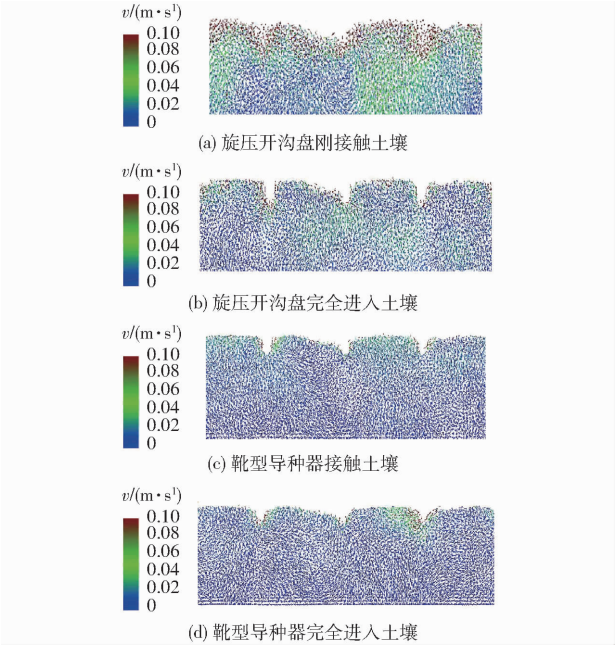


图 14 组合式开种沟装置作业过程

Fig. 14 Combined seed furrow opener operation process

3.4 试验与结果分析

为了研究旋压开沟盘直径、仿形平整板连接弹簧预紧力和靴型导种器仿形连接弹簧预紧力对组合式开沟装置作业效果的影响及变化规律,采用三因素五水平正交旋转中心组合试验方法,以旋压开沟盘直径、仿形平整板连接弹簧预紧力和靴型导种器仿形连接弹簧预紧力为试验因素,厢面平整度 Y 和开种沟深度一致性系数 U 为评价指标,应用 DEM-MBD 耦合仿真技术进行仿真试验,试验因素及编码表如表 2 所示,共进行 23 组仿真试验。根据油菜种植农艺要求及油菜直播机实际作业效率,参考文献[29],设置作业时机具耕深为 170 mm,前进速度

表 2 因素编码

Tab. 2 Experimental factors code

编码	旋压开沟盘直径/mm	仿形平整板连接弹簧预紧力/N	靴型导种器仿形连接弹簧预紧力/N
-1.682	130	350	35
-1	134	370	37
0	140	400	40
1	146	430	43
1.682	150	450	45

为 3 km/h。

仿真试验结果如表 3 所示，A、B、C 为因素编码值。组合式开种沟装置作业后厢面平整度变化范围为 12 ~ 17 mm，开种沟深度一致性系数为 82.31% ~ 92.5%。

使用 Design-Expert 13 软件对厢面平整度和开种沟深度一致性系数进行回归模型方差分析，分析结果如表 4 所示。由表 4 可知，厢面平整度 Y 和开种沟深度一致性系数 U 的回归模型均显著（$P < 0.01$），失拟项均不显著（$P > 0.05$），由各因素 P 值得出各因素对厢面平整度影响显著性按大到小排序依次为：仿形平整板连接弹簧预紧力 B、旋压开沟盘直径 A、靴型导种器仿形连接弹簧预紧力 C；对开种沟深度一致性影响显著性按大到小排序依次为：旋压开沟盘直径 A、靴型导种器仿形连接弹簧预紧力 C、仿形平整板连接弹簧预紧力 B。

建立厢面平整度 Y 与开种沟深度一致性系数 U 对旋压开沟盘直径 A、仿形平整板连接弹簧预紧力 B、靴型导种器仿形连接弹簧预紧力 C 的回归模型，厢面平整度 Y 模型的 R^2 为 0.942 8，开种沟深度一致性系数 U 模型的 R^2 为 0.933 8，其回归方程为

$$\begin{cases} Y = 14.83 - 0.168\,1A + 0.960\,1B - 0.15C - 0.383\,7AB + \\ \quad 0.311\,3AC - 0.472\,8B^2 + 0.706\,3C^2 \\ U = 91.35 + 1.55A - 0.613B - 0.626C + 1.05AC - \\ \quad 1.89A^2 - 0.638\,4B^2 - 0.733\,9C^2 \end{cases} \tag{15}$$

表 3　仿真试验结果

Tab. 3　Simulation experiment results

试验序号	试验因素			试验指标	
	A	B	C	厢面平整度 Y/mm	开种沟深度一致性系数 U/%
1	−1	−1	−1	14.36	90.46
2	1	−1	−1	13.87	89.46
3	−1	1	−1	16.89	87.25
4	1	1	−1	15.29	89.15
5	−1	−1	1	13.11	86.13
6	1	−1	1	14.29	90.03
7	−1	1	1	16.35	84.71
8	1	1	1	15.57	90.13
9	−1.682	0	0	15.01	82.31
10	1.682	0	0	14.65	88.81
11	0	−1.682	0	12.21	90.14
12	0	1.682	0	14.97	88.04
13	0	0	−1.682	17.21	89.78
14	0	0	1.682	16.64	87.86
15	0	0	0	14.35	90.89
16	0	0	0	14.14	90.95
17	0	0	0	15.11	92.50
18	0	0	0	14.77	91.39
19	0	0	0	15.22	90.31
20	0	0	0	14.76	91.77
21	0	0	0	14.73	92.16
22	0	0	0	15.17	90.31
23	0	0	0	15.22	92.04

表 4　方差分析结果

Tab. 4　ANOVA results

方差来源	厢面平整度 Y					开种沟深度一致性系数 U				
	平方和	自由度	均方	F	P	平方和	自由度	均方	F	P
模型	26.85	9	2.98	23.80	< 0.000 1 **	126.07	9	14.01	20.38	< 0.000 1 **
A	0.385 8	1	0.385 8	3.08	0.102 9	32.76	1	32.76	47.67	< 0.000 1 **
B	12.59	1	12.59	100.44	< 0.000 1 **	5.13	1	5.13	7.47	0.017 1 *
C	0.307 3	1	0.307 3	2.45	0.141 4	5.35	1	5.35	7.79	0.015 3 *
AB	1.18	1	1.18	9.40	0.009 0 **	2.44	1	2.44	3.55	0.082 0
AC	0.775 0	1	0.775 0	6.18	0.027 3 *	8.86	1	8.86	12.89	0.003 3 **
BC	0.040 6	1	0.040 6	0.324 0	0.578 9	0.605 0	1	0.605 0	0.880 3	0.365 2
A^2	0.018 8	1	0.018 8	0.150 3	0.7045	56.55	1	56.55	82.28	< 0.000 1 **
B^2	3.55	1	3.55	28.34	0.000 1 **	6.48	1	6.48	9.42	0.009 0 **
C^2	7.93	1	7.93	63.24	< 0.000 1 **	8.56	1	8.56	12.45	0.003 7 **
剩余	1.63	13	0.125 3			8.93	13	0.687 3		
失拟项	0.406 1	5	0.081 2	0.531 2	0.748 2	3.77	5	0.754 0	1.17	0.401 5
误差	1.22	8	0.152 9			5.16	8	0.645 5		
总和	28.48	22				135.01	22			

注：* 为显著（$0.01 < P < 0.05$），** 为极显著（$P \leqslant 0.01$）。

基于 Design-Expert 软件对参数化模型进行多目标优化求解，构建优化模型

$$\begin{cases} \min Y \\ \max U \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1.682 \leqslant A \leqslant 1.682 \\ -1.682 \leqslant B \leqslant 1.682 \\ -1.682 \leqslant C \leqslant 1.682 \end{cases} \end{cases} \tag{16}$$

得出最优参数组合为：旋压开沟盘直径为 140.04 mm、仿形平整板连接弹簧预紧力为 351.15 N、靴型导种器仿形连接弹簧预紧力为 38.78 N。考虑机具加工和试验的可行性，对最优参数进行规整，取最优参数组合为：旋压开沟盘直径为 140 mm、仿形平整板连接弹簧预紧力为 350 N、靴型导种器仿形连接弹簧预紧力为 40 N，以得到的较优参数组合进行 3 次仿真试验并取试验结果均值作为仿真试验结果，仿真作业后厢面平整度为 13.45 mm，开种沟深度一致性系数为 90.71%。

4 土槽试验

4.1 试验条件与方法

为验证组合式开种沟装置最佳参数组合在不同运行速度下的作业效果，开展土槽试验，以开种沟深度一致性系数和厢面平整度为评价指标，设置装置运行速度分别为 2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 km/h。试验前，对土槽内土壤进行旋耕、刮平、镇压、补水等操作，使土槽内土壤平均含水率为 35%，0 ~ 100 mm 土壤平均坚实度为 2 000 kPa，同时在仿形连接机构与单体仿形机构上安装了压力传感器，调节仿形平整板连接弹簧预紧力为 350 N、靴型导种器仿形连接弹簧预紧力为 40 N，组合式开种沟装置试验台架如图 15 所示。

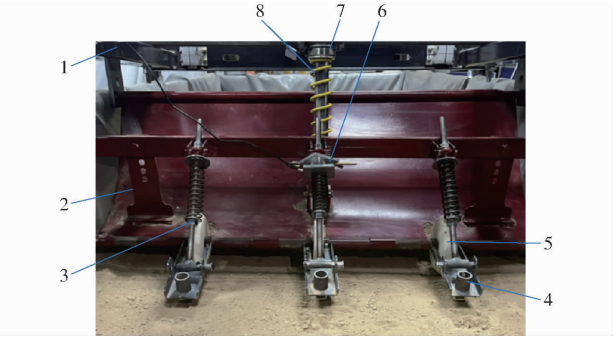


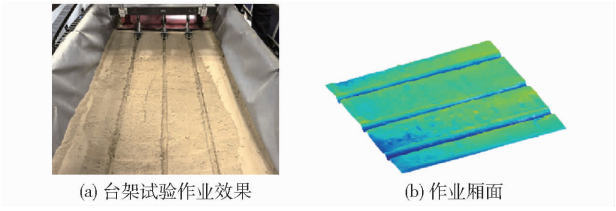
图 15 组合式开种沟装置试验台架

Fig. 15 Experiment bench of combined seed furrow opener

1. 悬挂装置 2. 仿形平整板 3. 单体仿形机构 4. 靴型导种器 5. 旋压开沟盘 6、7. 压力传感器 8. 仿形连接机构

4.2 试验结果分析

组合式开种沟装置土槽试验作业效果如图 16a 所示，并用三维激光扫描仪不同运行速度作业后的厢面进行点云数据采集，结果如图 16b 所示，测量厢面平整度指标值，得到厢面平整度变化范围为 5.1 ~ 10.4 mm，表明该装置在不同作业速度条件下能够稳定作业，作业后的厢面平整度满足油菜种床质量要求。



(a) 台架试验作业效果 (b) 作业厢面

图 16 组合式开种沟装置土槽试验结果

Fig. 16 Bench experiment results of combined seed furrow opener

对不同运行速度下的组合式开种沟装置台架试验的开种沟深度及其一致性系数进行分析，如图 17 所示，随着前进速度的增大，开种沟一致性系数呈先增后减的趋势；在不同作业速度下，作业后的开种沟深度在 17.2 ~ 21.2 mm 之间，种沟深度一致性系数在 85.3% ~ 91.78% 之间。台架试验表明该装置在 2 ~ 4 km/h 作业速度下，具有良好的开种沟作业效果。

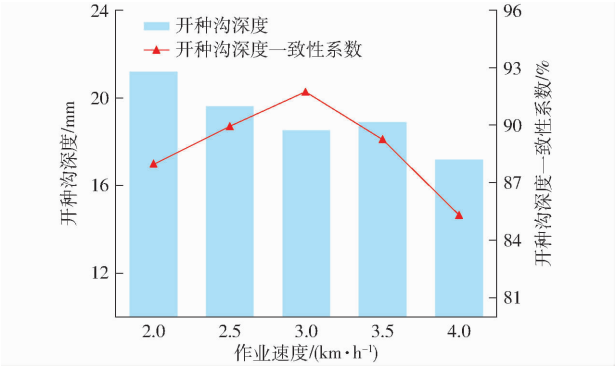


图 17 作业速度对指标的影响

Fig. 17 Influence of operation speeds on index

5 田间试验

5.1 试验条件与方法

为验证组合式开种沟装置作业效果，于 2024 年 10 月在湖北省荆门市京山市屈家岭管理区华中农业大学稻-油轮作试验基地开展田间试验并进行播种作业。试验工况为水稻收获后地表，试验前对试验工况土壤与秸秆物理机械特性进行测定，测定结果如表 5 所示。

田间试验以东方红 954-C 型拖拉机为动力，调节拖拉机挡位为低速Ⅱ挡，前进速度为 3.0 km/h 左右。作业前将组合式开种装置的弹簧压缩量调节至与台架试验弹簧压缩量一致，使仿形平整板连接弹

表 5　作业前工况物理特性参数

Tab. 5　Physical characteristic parameters of working conditions before operation

工况编号	土壤参数			秸秆参数		
	坚实度/kPa	含水率/%	容重/(g·cm^{-3})	留茬高度/mm	留存量/(kg·m^{-2})	含水率/%
1	2 602	33.2	1.29	322	1.7	29.8
2	1 979	37.8	1.12	544	3.9	35.5

簧预紧力为 350 N，靴型导种器仿形连接弹簧预紧力为 40 N。作业时保证机具直线行驶，作业后取中间行程 20 m 进行相关数据测量，厢面平整度、种沟深度、开种沟深度一致性系数和耕深等指标测量方法参考 GB/T 5668—2017《旋耕机》。

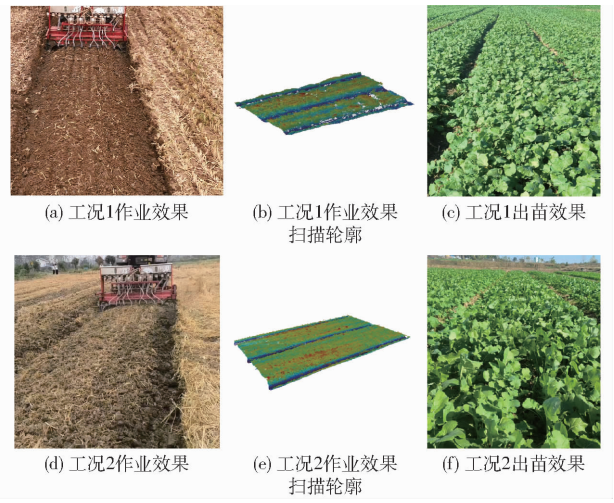
5.2　试验结果分析

组合式开种沟装置田间试验结果如表 6 及图 18 所示，机具作业后平均耕深达到 166.1 mm，厢面平整度平均值为 16.2 mm，种沟深度平均值为 19.8 mm，开种沟深度一致性系数为 89.85%，参考 NY/T 2709—2015《油菜播种机作业质量》、DB42/T 1587—2020《合理耕层构建的水旱轮作耕整作业技术规程》等相关标准，作业后各项质量指标均已达到较优水平。组合式开种沟装置作业过程中未出现缠草、堵土现象，整机通过性能良好。两种工况下油菜出苗效果良好，满足长江流域稻后直播油菜种植农艺种植要求。

表 6　田间试验结果

Tab. 6　Field experiment results

工况编号	耕深/mm	耕深标准差/mm	厢面平整度/mm	厢面平整度标准差/mm	种沟深度/mm	种沟深度标准差/mm	开种沟深度一致性系数/%
1	158.6	8.48	15.2	2.11	20.5	1.42	90.24
2	173.5	11.42	17.1	1.56	19.2	2.14	89.45



(a) 工况1作业效果　(b) 工况1作业效果扫描轮廓　(c) 工况1出苗效果

(d) 工况2作业效果　(e) 工况2作业效果扫描轮廓　(f) 工况2出苗效果

图 18　田间试验及出苗效果

Fig. 18　Field experiment and effect of rapeseed seedling emergence

6　结论

(1)研制了一种稻茬田油菜直播机组合式开种沟装置，该装置主要由旋压开沟盘、仿形平整板与靴型导种器组成，实现仿形平整厢面、开沟落种作业。

(2)所设计的组合式开种沟装置优化参数组合为：旋压开沟盘直径为 140 mm、仿形平整板连接弹簧预紧力为 350 N、靴型导种器仿形连接弹簧预紧力为 40 N，仿真作业后厢面平整度达 13.45 mm、开种沟深度一致性系数达 90.71%。

(3)开展了较优运行参数下组合式开种沟装置试验研究，土槽试验结果表明：不同作业速度下开种沟深度为 17.2 ~ 21.2 mm，其种沟深度一致性系数为 85.3% ~ 91.78%；田间试验结果表明：厢面平整度平均为 16.2 mm，种沟深度平均为 19.8 mm，种沟深度一致性系数平均为 89.85%，台架试验和田间试验所得指标均满足油菜种床质量要求。

参　考　文　献

[1] 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）

[2] 刘成，冯中朝，肖唐华，等. 我国油菜产业发展现状、潜力及对策[J]. 中国油料作物学报，2019，41(4)：485 - 489.
LIU Cheng，FENG Zhongchao，XIAO Tanghua，et al. Development，potential and adaptation of Chinese rapeseed industry[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences，2019，41(4)：485 - 489.（in Chinese）

[3] 张青松，齐涛，燕桓，等. 稻茬田油菜直播秸秆覆盖还田装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2025，56(1)：186 - 196.
ZHANG Qingsong，QI Tao，YAN Huan，et al. Design and experiment of rape direct seeding straw mulching returning device in rice stubble field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2025，56(1)：186 - 196.（in Chinese）

[4] 李谷成，牛秋纯，冷博峰，等. 新时代十年：我国油菜产业发展与路径选择[J]. 中国油料作物学报，2024，46(2)：228 - 235.
LI Gucheng，NIU Qiuchun，LENG Bofeng，et al. The decade of rapeseed industry in the new era：development and its pathchoice[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences，2024，46(2)：228 - 235.（in Chinese）

[5] 万星宇，廖庆喜，廖宜涛，等. 油菜全产业链机械化智能化关键技术装备研究现状及发展趋势[J]. 华中农业大学学报，2021，40(2)：24 - 44.
WAN Xingyu，LIAO Qingxi，LIAO Yitao，et al. Situation and prospect of key technology and equipment in mechanization and

intelligentization of rapeseed whole industry chain[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(2): 24 - 44. (in Chinese)
[6] ZHOU H, ZHANG C L, ZHANG W L, et al. Evaluation of straw spatial distribution after straw incorporation into soil for different tillage tools[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 196: 104440.
[7] 刘国阳, 夏俊芳, 郑侃, 等. 振动横挡阻隔式旋耕防粘结刀辊设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(23): 29 - 40.
LIU Guoyang, XIA Junfang, ZHENG Kan, et al. Design and experiments of the barrier type rotary anti-adhesion blade roller with vibration crosspiece[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(23): 29 - 40. (in Chinese)
[8] 魏松, 张驰海, 詹振宇, 等. 基于 DEM - MBD 耦合的棉花直播机仿形开沟过程机理仿真与优化试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 275 - 289, 341.
WEI Song, ZHANG Chihai, ZHAN Zhenyu, et al. Simulation and optimization test of imitation furrowing process of cotton direct seeding machine based on DEM - MBD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 275 - 289, 341. (in Chinese)
[9] 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)
[10] 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 experiment of narrow-row close planting seeder with disc coulter for small-size vegetable seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 197 - 209. (in Chinese)
[11] WANG J W, XU Y N, WANG C Y, et al. Design and simulation of a trenching device for rice straw burial and trenching based on MBD - DEM[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 207:107722.
[12] 李尚平, 潘家枫, 钟家勤, 等. 基于有效落种空间的甘蔗横向种植机开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 162 - 170.
LI Shangping, PAN Jiafeng, ZHONG Jiaqin, et al. Design and experiment of furrow opener for transversal sugarcane planter based on effective seeding space[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 162 - 170. (in Chinese)
[13] 秦宽, 丁为民, 方志超, 等. 收获开沟埋草一体机双圆盘开沟机构设计与参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 27 - 35.
QIN Kuan, DING Weimin, FANG Zhichao, et al. Design and parameter optimization of double disk opener mechanism for harvest ditch and stalk-disposing machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(18): 27 - 35. (in Chinese)
[14] 夏俊芳, 张朋, 苑宏文, 等. 水稻秸秆离散元柔性模型参数标定与试验验证[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 174 - 184.
XIA Junfang, ZHANG Peng, YUAN Hongwen, et al. Calibration and verification of flexible rice straw model by discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 174 - 184. (in Chinese)
[15] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上)[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 2007.
[16] 赵鹏飞, 巨晓腾, 杨鹏琨, 等. 肥管前置式小麦宽苗带旋耕施肥播种机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(20): 12 - 21.
ZHAO Pengfei, JU Xiaoteng, YANG Pengkun, et al. Design and experiment of wide-seed-band rotary tillage fertilizer-seeding machine with front-mounted fertilizer tube[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(20): 12 - 21. (in Chinese)
[17] 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)
[18] 孙文峰, 付天鹏, 何跃, 等. 水田带状复式整地机关键部件设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 50 - 62.
SUN Wenfeng, FU Tianpeng, HE Yue, et al. Design and test on key components of strip compound ground preparation machine in paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 50 - 62. (in Chinese)
[19] 赵宏波, 何进, 李洪文, 等. 条带式旋切后抛防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 65 - 75.
ZHAO Hongbo, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of strip rotary-cut-throw anti-blocking implement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 65 - 75. (in Chinese)
[20] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2003.
[21] 赵淑红, 杨罗罗, 张鑫, 等. 大豆垄上双行免耕播种机锯齿式开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 74 - 84.
ZHAO Shuhong, YANG Luoluo, ZHANG Xin, et al. Design and experiment of zigzag opener for double-row no-tillage seeding on soybean ridge[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 74 - 84. (in Chinese)
[22] 赵淑红, 谭贺文, 王加一, 等. 多功能集成式播种开沟器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 58 - 67.
ZHAO Shuhong, TAN Hewen, WANG Jiayi, et al. Design and experiment of multifunctional integrated seeding opener[J].

Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 58 - 67. (in Chinese)
[23] 张青松,郑中原,廖庆喜,等. 农业工程领域耦合仿真技术应用现状与展望[J]. 农业机械学报,2025,56(7):20 - 37,149.
ZHANG Qingsong, ZHENG Zhongyuan, LIAO Qingxi, et al. Application status and prospect of coupled simulation in agricultural engineering research[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(7):20 - 37,149. (in Chinese)
[24] CHENG J, XIA J F, ZHENG K, et al. Construction and analysis of a discrete element model for calculating friction resistance of the typical rotary blades[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 214: 108303.
[25] 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 machinefor rapeseed direct seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(1): 75 - 86. (in Chinese)
[26] DU J, HENG Y, ZHENG K, et al. Investigation of the burialand mixing performance of a rotary tiller using discreteelement method[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 220: 105349.
[27] 廖庆喜, 谢昊明, 张青松, 等. 驱动圆盘犁与双刃型旋耕刀组合式耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 99 - 110,195.
LIAO Qingxi, XIE Haoming, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of driven disc plow and double-edged rotary tillage combined tiller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 99 - 110,195. (in Chinese)
[28] 李蒙良, 廖庆喜, 裴立民, 等. 油菜直播机旋切式微垄种床制备装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 47 - 58,90.
LI Mengliang, LIAO Qingxi, PEI Limin, et al. Design and experiment of rotary-cut micro-ridge seedbed device for rapeseed direct seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 47 - 58,90. (in Chinese)
[29] 杜文斌, 周国威, 张青松, 等. 油菜直播组合式埋茬防堵装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(5): 60 - 70.
DU Wenbin, ZHOU Guowei, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of the anti-blocking device combined stubble burying for rapeseed direct seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(5): 60 - 70. (in Chinese)

(上接第 51 页)

[21] 李晓冉,廖庆喜,王磊,等. 稻麦油兼用高速气送式集排器型孔轮设计与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(14):35 - 48.
LI Xiaoran, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Design and experiments of the type-hole wheel with high-speed air-assisted centralized metering device for rice, wheat and rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(14): 35 - 48. (in Chinese)
[22] 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京:机械工业出版社,1982:67 - 313.
[23] 李晓冉,廖庆喜,廖宜涛,等. 稻麦油兼用高速气送集排器螺旋斜置式搅种装置研制[J]. 农业工程学报,2024,40(4): 51 - 61.
LI Xiaoran, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Development of the spiral-inclined seed stirring equipment in high-speed air-assisted centralized metering for rice, wheat, and rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(4): 51 - 61. (in Chinese)
[24] 雷小龙,廖宜涛,张闻宇,等. 油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验[J]. 农业机械学报,2017, 48(3): 57 - 68.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Wenyu, et al. Simulation and experiment of gas-solid flow in seed conveying tube for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(3): 57 - 68. (in Chinese)
[25] WU Zhijun, LI Mengliang, LEI Xiaolong, et al. Simulation and parameter optimisation of a centrifugal rice seeding spreader for a UAV[J]. Biosystems Engineering,2020,192:275 - 293.
[26] 雷小龙,杨文浩,刘礼阳,等. 杂交稻气送式集排器成穴供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 58 - 67.
LEI Xiaolong, YANG Wenhao, LIU Liyang, et al. Design and experiment of seed hill feeding device in pneumatic centralized metering device for hybrid rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(11): 58 - 67. (in Chinese)
[27] 王磊,席日晶,廖宜涛,等. 油麦兼用型气送式集排器匀种涡轮设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 62 - 72, 97.
WANG Lei, XI Rijing, LIAO Yitao, et al. Design and test on even seeding turbine of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 62 - 72, 97. (in Chinese)
[28] 全国农业机械标准化技术委员会. 水稻直播机:GB/T 25418—2022[S]. 北京:中国农业出版社,2022.
[29] 全国农业机械标准化技术委员会. 播种机质量评价技术规范:NY/T 1143—2006[S]. 北京:中国农业出版社,2006.
[30] 全国农业机械标准化技术委员会. 油菜播种机作业质量:NY/T 2709—2015[S]. 北京:中国农业出版社,2015.