

# 油菜机械直播机开沟浅旋装置设计与试验

张青松<sup>1,2</sup> 齐涛<sup>1</sup> 敖倩<sup>1</sup> 舒彩霞<sup>1,2</sup> 廖宜涛<sup>1,2</sup> 廖庆喜<sup>1,2</sup>  
(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:** 针对长江中下游稻油轮作区油菜轻简高效生产需求及目前机具作业易出现厢面不平、碎土质量不高及“晾种”, 导致油菜出苗率低的问题, 设计了一种油菜机械直播机开沟浅旋装置, 实现中间开畦沟, 畦沟土壤抛送覆盖两侧厢面, 浅旋匀土部件匀土、细碎厢面土壤及埋覆土壤和秸秆功能; 基于滑切减阻原理及挤压力学理论, 确定了中间开畦沟部件、清沟整形部件及浅旋匀土部件结构参数, 得出中间开畦沟刀盘安装弯刀数量为4, 切土节距为60 mm, 清沟整形部件整形面侧面倾角为67°, 前面倾角为3°, 浅旋弯刀侧切刃偏心圆半径为182 mm, 滑切角为42.4°; 运用EDEM软件开展正交旋转组合试验, 确定了螺旋匀土叶片的最佳结构参数: 螺旋半径为100 mm、螺距为350 mm、螺旋头数为1, 并确定了浅旋弯刀及螺旋匀土叶片结构布局; 田间试验表明, 当机组前进速度为7 km/h时, 安装有开沟浅旋装置的油菜直播机作业后厢面平整, 畦沟沟型完好, 秸秆埋覆率为84.38%, 碎土率为86.41%, 厢面平整度为30.18 mm, 畦沟沟深及沟宽稳定性均大于85%, 出苗率为75.47%, 油菜生长状态良好, 装置作业效果满足油菜直播作业要求。

**关键词:** 油菜直播机; 开畦沟抛土; 浅旋埋茬; 螺旋匀土

中图分类号: S223.2<sup>+</sup>5      文献标识码: A      文章编号: 1000-1298(2023)10-0058-10      OSID: 

## Design and Experiment of Rapeseed Direct Seeding Machine with Furrow Opener and Shallow Plowing

ZHANG Qingsong<sup>1,2</sup> QI Tao<sup>1</sup> AO Qian<sup>1</sup> SHU Caixia<sup>1,2</sup> LIAO Yitao<sup>1,2</sup> LIAO Qingxi<sup>1,2</sup>  
(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:** For rice-oil rotation area of the mid-lower Yangtze River rapeseed simple and highly-scale production needs and the current machine operation prone to uneven compartment surface, crushed soil quality and “drying seed”, resulting in low seedling rate of oilseed rape production problems, a kind of rapeseed direct seeding machine with furrow opener and shallow plowing was designed, to achieve the middle open border furrow, the border furrow soil throwing cover both sides of the compartment surface, shallow rotary soil leveling parts to level soil, fine crushed compartment soil and evenly mixed soil and straw function. Based on the principle of slip-cutting and resistance reduction and the theory of extrusion mechanics, the structural parameters of middle open bed furrow components, gully shaping components and shallow rotating screed components were determined, resulting in the number of curved knives installed in the middle open bed trench disc being 4, the cutting pitch being 60 mm, the lateral inclination of the shaping surface of gully shaping components being 67°, the front inclination being 3°, the eccentric circle radius of the side cutting edge of the shallow rotary knife being 182 mm and the slip-cutting angle being 42.4°. The EDEM software was used to carry out orthogonal test. The optimum structural parameters to be taken for the spiral screed blades were determined as follows: 100 mm for spiral radius, 350 mm for pitch and number of spiral heads was 1; and the shallow rotary blade and spiral

收稿日期: 2023-06-13    修回日期: 2023-07-31  
**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2021YFD2000401)、国家自然科学基金项目(32001427)和财政部和农业农村部:国家现代油菜产业技术体系项目(CARS-12)  
**作者简介:** 张青松(1987—),男,副教授,博士,主要从事现代农业装备设计与测控研究, E-mail: qszhang@mail.hzau.edu.cn  
**通信作者:** 廖庆喜(1968—),男,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: liaoxq@mail.hzau.edu.cn

screed blades structural layout were determined. The field experiments showed that when the forward speed of the unit was 7 km/h, the rapeseed direct seeding machine with furrow opener and shallow plowing device had a flat compartment surface, complete with ravine furrow pattern, the stubble burying rate was 84.38%, the soil broking rate was 86.41%, the soil surface planeness was 30.18 mm, the furrow depth and furrow width stability were more than 85%, seedling emergence rate was 75.47%. The results met the requirements for direct seeding of oilseed rape. The research result can provide a reference for the design of implements to achieve light, efficient and high quality mechanized direct seeding of rape in the region.

**Key words:** rapeseed direct seeding machine; throwing ditching furrow soil; shallow rotary stubble burial; spiral vane conveying soil

## 0 引言

长江中下游是我国冬油菜的主产区,其种植方式以稻油轮作为主<sup>[1]</sup>。为了提高油菜直播作业生产效率,在稻茬田留有均匀抛撒的切碎秸秆地表,采用开沟撒播的多工序单独作业种植模式。该模式多工序单独作业,需多种机具配套,油菜种子落于秸秆覆盖地表,易形成“晾种”,出苗率低,立式旋转开畦沟装置开沟抛土,畦沟土壤厢面覆盖不均匀,厢面不平,不适宜油菜轻简高效生产需求<sup>[2-3]</sup>。为适应油菜轻简高效生产作业需求,设计一种适合油菜高效生产作业的油菜种床整备装置具有重要意义。

针对轻简高效作业机具,国内外相关学者进行了研究。MALASLI 等<sup>[4]</sup>对免耕播种机上圆盘开沟器进行受力分析,得出圆盘角度增加会降低作业阻力;TOROTWA 等<sup>[5]</sup>拟合鼯鼠爪曲线,设计了一种缺口圆盘,降低了作业阻力并提高了切茬率;张银平等<sup>[6]</sup>通过反转灭茬与正转防堵相结合的方式实现秸秆覆盖地水稻免耕播种;贾洪雷等<sup>[7]</sup>对免耕播种机进行研究,提高免耕播种机播种作业质量;史乃煜等<sup>[8]</sup>基于最速降线原理,设计了一种免耕播种机强制回土装置,有效提高了土壤回填率;赵艳忠等<sup>[9]</sup>设计了免耕播种机侧深分层施肥部件,提高了免耕播种机横向稳定性。国外对于高效作业机具的研究主要集中在大型联合机械上,一次完成多道作业工序,生产效率高,适合大规模生产作业,而我国长江中下游地区农田面积小,较为分散,国外大型机械不适合该区域作业,因此,针对该区域油菜轻简高效生产作业的种床整备装置研究较少,生产上缺乏相关集成机具。

为提高长江中下游冬油菜产区油菜机械作业生产效率,同时针对目前生产上相关机具作业时,易出现厢面不平、碎土质量不高及“晾种”,导致油菜出苗率低的生产难题,本文设计一种油菜机械直播机开沟浅旋装置,通过中间开畦沟、畦沟土壤抛送覆盖

两侧厢面,浅旋匀土部件匀土及细碎厢面土壤和混合均匀土壤和秸秆,高效作业,创造良好油菜种子着床条件,以期为该区域油菜轻简高效高质机械化直播作业机具设计提供参考。

## 1 整体结构与工作原理

### 1.1 整体结构

油菜机械直播机主要由开沟浅旋装置、破土犁、拖土部件、中央齿轮箱、排种系统、排肥系统、三点悬挂、机架等组成,整体结构如图 1a 所示。其中开沟浅旋装置如图 1b 所示,包括中间开畦沟部件、清沟整形部件、浅旋匀土部件 3 部分。

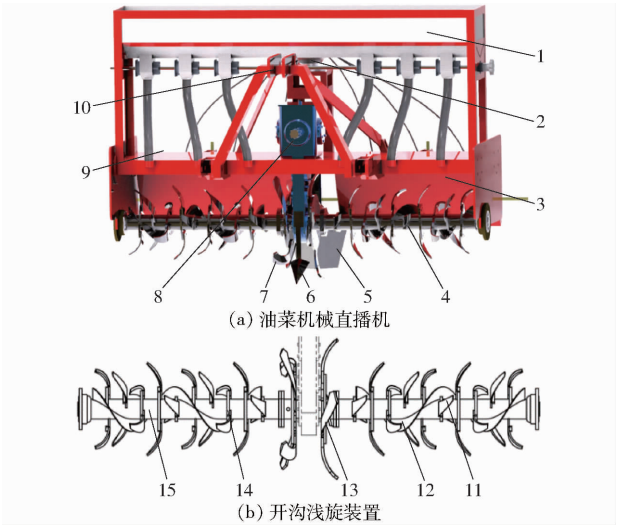


图 1 装置结构示意图

Fig. 1 Schematics of machine structure

1. 肥箱 2. 排种器和种箱 3. 拖土板 4. 浅旋匀土部件 5. 清沟整形部件 6. 破土犁 7. 中间开畦沟部件 8. 中央齿轮箱 9. 机架 10. 三点悬挂 11. 浅旋弯刀 12. 螺旋匀土叶片 13. 开畦沟弯刀 14. 浅旋刀盘 15. 刀轴

中间开畦沟部件包括左、右 2 个开畦沟刀盘,对称布置在中央齿轮箱两侧,其刀盘上安装有开畦沟弯刀。浅旋匀土部件包括左、右 2 个刀辊,对称布置在中间开畦沟部件两侧,每个刀辊刀轴上安装有浅旋弯刀、浅旋弯刀刀盘及螺旋匀土叶片。破土犁安装于中间开畦沟部件正前方,清沟整形部件安装于

中间开畦沟部件正后方。主要技术参数如表 1 所示。

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

| 参数                         | 数值    | 参数                          | 数值      |
|----------------------------|-------|-----------------------------|---------|
| 配套动力/kW                    | ≥70   | 刀轴转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 360~480 |
| 作业速度/(km·h <sup>-1</sup> ) | 6~8   | 开畦沟宽度/mm                    | 250~340 |
| 作业幅宽/mm                    | 2 000 | 开畦沟深度/mm                    | 190~220 |
| 播种行数/行                     | 6     | 旋耕深度/mm                     | 25~55   |

1.2 工作原理

机具作业时,由拖拉机带动机具向前移动,拖拉机 PTO 通过万向节向中央齿轮箱传递动力,中央齿轮箱输出轴带动中间开畦沟部件和浅旋匀土部件同轴转动。机具作业前进过程中,作业效果如图 2 所示,肥料施于未耕地表,破土犁作业消除中央齿轮箱安装区域的漏耕区;中间开畦沟部件开畦沟弯刀高速旋切土壤,并将土壤抛送至畦沟两侧厢面,初步作业出畦沟。浅旋匀土部件左右两边刀辊转动,带动螺旋匀土叶片和浅旋弯刀作业;螺旋匀土叶片作业使中间开畦沟部件开畦沟弯刀作业抛送的土壤均匀覆盖厢面;浅旋弯刀浅旋作业,旋切未耕地表土壤和秸秆,使作业厢面土壤细碎、土壤和秸秆混合均匀;拖土板压实平整厢面,达到合适的土壤空隙度,创造良好油菜种子着床条件;清沟整形部件清理畦沟底部松碎土壤及压实畦沟沟壁,作业出沟壁紧实、沟型稳定的排水畦沟。最后,油菜种子通过排种系统播于作业厢面,完成机具整个作业功能。

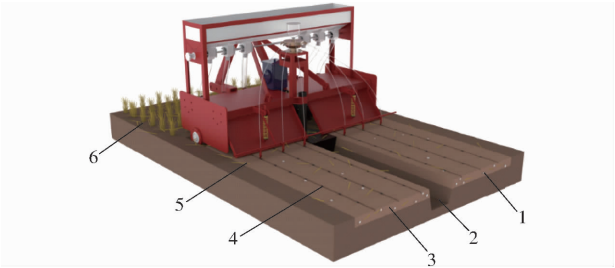


图 2 油菜机械直播机作业效果图

Fig.2 Operation effect diagram of rapeseed direct seeding  
1. 肥料 2. 畦沟 3. 浅旋土壤层 4. 油菜籽 5. 未埋覆的稻茬秸秆 6. 地表秸秆

2 关键部件设计与分析

2.1 中间开畦沟部件设计

2.1.1 开畦沟弯刀刃口曲线设计

中间开畦沟弯刀的刃口曲线由正切刃、过渡刃和侧切刃组成,其中正切刃采用空间曲线,形成一个弧形的曲面,即为开畦沟弯刀的正切面,在正切刃上各点处的滑切角沿着刃线的增大而增大,能够增大

土壤颗粒的脱出速度。为了能够使开畦沟弯刀的正切面和侧切面光滑过渡,设计了一段空间曲线的过渡刃,过渡面的弧面可提高开畦沟弯刀的侧向抛土性能及分散在作业过程中产生的集中应力,避免刀具产生疲劳破坏。

在开畦沟作业过程中,开畦沟弯刀的侧切刃沿纵向入土,使土壤和作物根茬沿刃口发生滑切,开畦沟弯刀作业过程如图 3 所示。

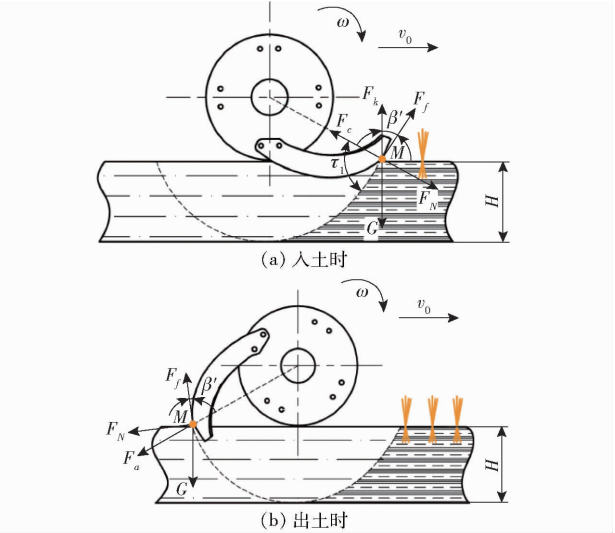


图 3 开畦沟弯刀作业状态分析

Fig.3 Diagrams of force on trenching knife in operation

开畦沟弯刀在作业过程中,结合图 3a 所示,开畦沟弯刀在入土作业时,受力方程为

$$\begin{cases} G\cos\beta' + F_c\cos\tau_1 - F_f - F_k\cos\beta' \geq 0 \\ G\sin\beta' + F_N - F_c\sin\tau_1 - F_k\sin\beta' = 0 \\ F_f = \mu F_N \\ F_c = m\omega^2 r \\ F_k = 2m\omega v_0 \\ \tau_1 \leq 90^\circ - \arctan\mu \end{cases} \quad (1)$$

式中  $F_N$ ——开畦沟弯刀对土壤和秸秆压力,N  
 $F_f$ ——开畦沟弯刀所受的摩擦力,N  
 $G$ ——土壤和秸秆重力,N  
 $F_c$ ——向心力,N  
 $F_k$ ——科氏力,N  
 $\beta'$ ——摩擦力与重力的夹角,(°)  
 $\mu$ ——开畦沟弯刀与土壤颗粒间的摩擦因数  
 $\tau_1$ ——开畦沟弯刀的静态滑切角,(°)  
 $r$ ——螺旋线极径,mm  
 $\omega$ ——中间开畦沟弯刀回转角速度,rad/s  
 $v_0$ ——机具前进速度,m/s  
 $m$ ——土壤质点质量,kg

开畦沟弯刀在脱离土壤时,受力如图 3b 所示,受力方程为

$$\begin{cases} G\cos\beta' + F_a\cos\tau_1 - F_f \geq 0 \\ F_N + F_a\sin\tau_1 - G\sin\beta' = 0 \\ F_a = F_c \\ F_f = \mu F_N \end{cases} \quad (2)$$

式中  $F_a$ ——离心力, N

由式(1)、(2)可知,开畦沟弯刀在入土和脱离土壤 2 个阶段时,开畦沟弯刀的侧切刃螺旋线极径  $r$  应满足

$$\begin{cases} r \geq \frac{(2v_0\omega - g)(\mu\sin\beta' + \cos\beta')}{\omega^2(\cos\tau_1 - \mu\sin\tau_1)} & (\text{入土时}) \\ r \geq \frac{g(\mu\sin\beta' - \cos\beta')}{\omega^2(\cos\tau_1 + \mu\sin\tau_1)} & (\text{出土时}) \end{cases} \quad (3)$$

常见的刃口曲线主要有阿基米德螺旋线、正弦指数曲线和等角螺旋线<sup>[10]</sup>,根据相关研究可知<sup>[11]</sup>,当安装角大于 15°时,阿基米德螺旋线的滑切角大于正弦指数曲线,且侧切刃刃口曲线为阿基米德螺旋线的旋耕刀片多应用于旋耕深度小于 300 mm、作业幅宽小于 200 mm 的旋耕作业,适用于油菜开畦沟作业,因此选取阿基米德螺旋线作为开畦沟弯刀片的侧切刃刃口曲线。根据侧切刃阿基米德螺旋线方程,可确定螺旋线极径  $r$  为

$$r = r_0(1 + K\theta) \quad (4)$$

式中  $K$ ——静态滑切角正切值与极径比例系数  
 $\theta$ ——刃口曲线任意点处极角, rad  
 $r_0$ ——阿基米德螺旋线起点处极径, mm

由式(4)可知,独立参数包括刃口曲线起点处极径  $r_0$  与比例系数  $K$ ,当开畦沟弯刀的刃口曲线初始极径  $r_0$  为 160 mm,终点处极径取 320 mm,静态滑切角  $\tau_1$  为 40°~70°时,满足式(3)设计要求,将值代入

$$\tau_0 = \tau_1 - \arctan \frac{\cos\theta}{\lambda \frac{r}{R} - \sin\theta} \quad (5)$$

式中  $\tau_0$ ——刃口曲线的动态滑切角, (°)  
 $\lambda$ ——旋耕速比  
 $R$ ——刀尖处半径, mm

得到动态滑切角  $\tau_0$  为 36°~66°,可得  $K$  为 2.62~17.17。将  $K$  取整,由于  $K > 15$  时曲线逐渐趋于平滑,因此  $K$  取为 3~15 内整数,在此范围,得到不同  $K$  值的阿基米德螺旋线刃口曲线,如图 4 所示。

由图 4 所示,  $K$  越小,刃口曲线长度越长,开畦沟作业时,刀片与土壤相互作用的时间就越长;当  $K \geq 8$  时,阿基米德螺旋线截取范围变短,滑切角变小,因此  $K$  最佳取值为 5,则开畦沟弯刀的侧切刃方程为

$$r = 160(1 + 5\theta)$$

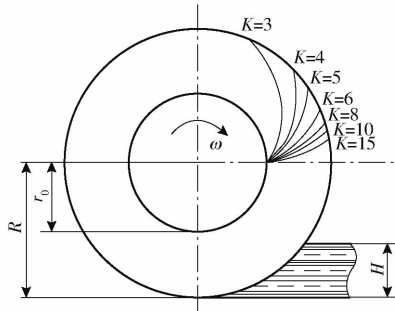


图 4 不同比例系数下的阿基米德螺旋线

Fig.4 Archimedean spirals at different scale factors

2.1.2 刀盘安装弯刀数量分析

机具工作时,开畦沟弯刀的运动轨迹为摆线<sup>[12]</sup>。以开畦沟刀盘圆心为坐标原点建立坐标系,则开畦沟弯刀端点的运动轨迹如图 5 所示。

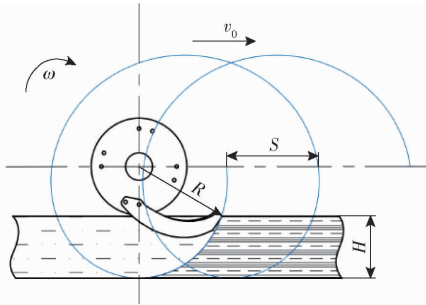


图 5 中间开畦沟弯刀运动轨迹

Fig.5 Diagram of movement of rotary blade

由图 5 可知,中间开畦沟弯刀沿着余摆线的轨迹形状运动,在同一回转平面上两相邻刀片切下的土堡厚为切土节距  $S$ ,切土节距  $S$  对畦沟两侧厢面上的覆土层土壤的细碎程度有较大影响,切土节距  $S$  越大,则切下的土堡厚度越大,土壤细碎程度越低。切土节距计算式为

$$S = \frac{2\pi v_0}{Z\omega} \quad (6)$$

式中  $Z$ ——同一切削小区内的刀片数量

由式(6)可知,当油菜直播机前进速度  $v_0$  和浅旋匀土刀辊角速度  $\omega$  为定值时,切土节距与同一回转平面内开畦沟弯刀数量  $Z$  有关。根据《农业机械设计手册》,在稻茬田切土节距  $S$  为 60~90 mm,为保证机具作业碎土质量,切土节距  $S$  取 60 mm,得出同一切削单元内安装 4 把开畦沟弯刀。

2.2 清沟整形部件设计

中间开畦沟部件作业时会出现土壤回流现象,且作业后的初步畦沟沟壁不紧实、易坍塌、沟形不稳定,因此清沟整形部件对畦沟进行压实、清沟整形,以提高开畦沟作业的稳定性的。

清沟整形部件主要由破土面  $ABCD$  及  $ABC'D'$ 、整形面  $CDFE$  和  $C'D'F'E'$ 、上下底板和犁柱等组成,犁柱上有安装孔,便于调节开畦沟深度。作业时

土壤随破土面向两侧移动,流经清沟整形部件的整形面时,通过整形面对土壤进行侧向挤压,形成完整的畦沟沟形。

清沟整形部件中左右对称布置的平面  $ABCD$  和  $ABC'D'$  为破土面,两破土面倾斜相交形成一个倒梯形的截面  $CC'D'D$ 。破土面在前进的过程中主要受到向前的推力  $F_x$  和向两侧的压力  $F_y$ 。当清沟整形部件刃口角  $\psi$  为  $90^\circ$  时,破土面在前进的过程中主要受到的挤力  $F_x$  和压力  $F_y$  相等,此时清沟整形部件破土效果最佳。

清沟整形部件主要是通过整形面对土壤进行挤压成型<sup>[13]</sup>,对整形面土壤颗粒进行受力分析,受力如图 6a 所示。

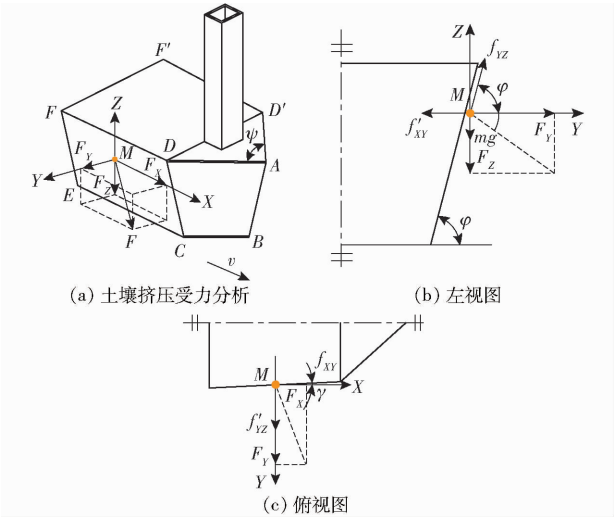


图 6 清沟整形部件受力分析

Fig. 6 Force analysis of trench cleaning and shaping components

土壤质点  $M$  受力方程为

$$\begin{cases} F_x + f_{xy} \cos \gamma = ma_x \\ F_y + f'_{yz} - f'_{xy} = ma_y \\ F_z + mg - f_{yz} \sin \varphi = ma_z \\ F_x = F_y \tan \gamma \\ F_z = F_y \frac{1}{\tan \varphi} \\ f'_{xy} = f_{xy} \sin \gamma = \tan \varphi_1 \sin \gamma \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \\ f'_{yz} = f_{yz} \cos \varphi = \tan \varphi_1 \cos \varphi \sqrt{F_y^2 + F_z^2} \\ F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中  $F_x$ ——质点所受压力在  $X$  方向分力,  $N$   
 $F_y$ ——质点所受压力在  $Y$  方向分力,  $N$   
 $F_z$ ——质点所受压力在  $Z$  方向分力,  $N$   
 $f_{xy}$ ——质点所受摩擦力在  $XOY$  平面分力,  $N$   
 $f_{yz}$ ——质点所受摩擦力在  $YOZ$  平面分力,  $N$   
 $f'_{xy}$ ——摩擦力  $f_{xy}$  在  $Y$  方向分力,  $N$

$f'_{yz}$ ——摩擦力  $f_{yz}$  在  $Y$  方向分力,  $N$   
 $\varphi$ ——整形面侧面倾角,  $(^\circ)$   
 $\gamma$ ——整形面前面倾角,  $(^\circ)$   
 $a_x$ ——质点加速度在  $X$  方向分量,  $m/s^2$   
 $a_y$ ——质点加速度在  $Y$  方向分量,  $m/s^2$   
 $a_z$ ——质点加速度在  $Z$  方向分量,  $m/s^2$   
 $\varphi_1$ ——土壤摩擦角,  $(^\circ)$

整理式 (7) 可得

$$\begin{cases} a_x = \frac{F(\tan \gamma + \tan \varphi_1)}{m \sqrt{1 + \cot^2 \varphi + \tan^2 \gamma}} \\ a_y = \frac{F[1 + \tan \varphi_1(\cot \varphi + \tan \gamma)]}{m \sqrt{1 + \cot^2 \varphi + \tan^2 \gamma}} \\ a_z = \frac{F(\cot \varphi_1 - \tan \varphi)}{m \sqrt{1 + \cot^2 \varphi_1 + \tan^2 \gamma}} + g \end{cases} \quad (8)$$

根据挤压力学理论可得,土壤摩擦角  $\varphi_1$ 、整形面的侧面倾角  $\varphi$  和前面倾角  $\gamma$  是影响整形面作业效果主要因素。由式 (8) 可知,当整形面侧面倾角  $\varphi$  满足  $\varphi < 90^\circ - \varphi_1$  时,加速度沿  $Z$  轴的分量值  $a_z$  越大,整形面对初步畦沟的向下挤压力越大,土壤摩擦角  $\varphi_1$  为  $23^\circ$ <sup>[14]</sup>,因此整形面侧面倾角  $\varphi$  取  $67^\circ$ 。当整形面前面倾角  $\gamma$  过小,导致对沟壁压实不充分,沟壁土壤松散,易掉落于沟底,影响畦沟形状和质量,过大会导致沟壁压实量大,沟型变形量大,影响畦沟形状且作业阻力大<sup>[14]</sup>,综合考虑,整形面前面倾角  $\gamma$  取  $3^\circ$ 。

2.3 浅旋匀土部件设计

2.3.1 浅旋弯刀设计

浅旋弯刀在作业过程中,需要旋切未耕地表土壤和秸秆,使作业厢面土壤细碎、埋覆秸秆。浅旋弯刀刃口曲线对刀片作业性能具有重要影响。因浅旋弯刀结构较小,刃口曲线较短,偏心圆弧线作为刃口曲线时,浅旋弯刀刀片正切刃和侧切刃可以采用同一曲线,高质量完成厢面土壤细碎平整、秸秆埋覆功能,同时刀片安装时,其刃口贴合刀盘,降低刀片作业时夹土现象发生,因此正切刃和侧切刃都采用偏心圆弧线。

如图 7 所示建立极坐标系,取刀轴旋转中心  $O$  点距离  $e$  处  $O'$  为偏心圆圆心,偏心圆的半径为  $R'$ ,偏心圆弧线的参数方程和静态滑切角  $\tau_2$  表达式为

$$\begin{cases} \rho = e \cos \gamma_1 + e \sqrt{K_1^2 - \sin^2 \gamma_1} \\ \tau_2 = \pi - \arccos \frac{\sin \gamma_1}{K_1} \end{cases} \quad (9)$$

其中  $K_1 = \frac{R'}{e}$   
式中  $\rho$ ——刃口任一点到回转中心距离,  $mm$

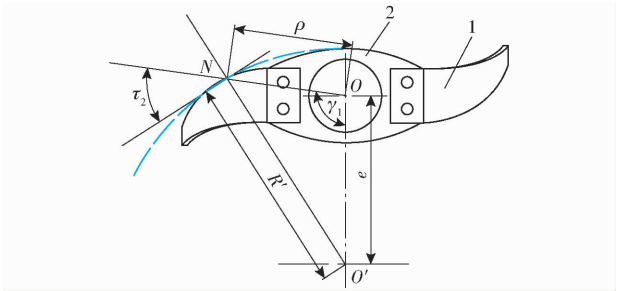


图 7 浅旋弯刀刀口曲线

Fig. 7 Edge profile of shallow rotary bender

1. 浅旋弯刀 2. 浅旋弯刀刀盘

- $\gamma_1$ —— $NO$  连线与水平的夹角, ( $^\circ$ )
- $R'$ ——偏心圆半径, mm
- $e$ ——坐标系原点与偏心圆圆心距离, mm
- $\tau_2$ ——浅旋弯刀任一点处静态滑切角, ( $^\circ$ )

当浅旋弯刀刀口处滑切角大于金属与秸秆之间的摩擦角(一般为  $23^\circ \sim 33^\circ$ )时,则会产生滑切现象<sup>[15]</sup>。由式(9)可知,当  $NO$  连线与水平夹角  $\gamma_1$  一定时,若偏心圆半径  $R'$  和坐标系原点与偏心圆圆心间的距离  $e$  的比值  $K_1$  小于  $\pi/2$ ,滑切角  $\tau_2$  随比值  $K_1$  增大而减小,但比值  $K_1$  过小,会使得浅旋弯刀刀口曲线过长,造成浅旋弯刀与土壤接触时间增加,增大功率消耗。当  $K_1$  为 0.74 时,具有较好的滑切性能且刀口曲线不会过长<sup>[16-17]</sup>。设计浅旋弯刀刀口曲线偏心距  $e$  为 135 mm,则偏心圆弧半径  $R'$  为 182 mm,且  $NO$  连线与竖直方向的夹角  $\gamma_1$  为  $97^\circ$ ,得浅旋弯刀滑切角  $\tau_2$  为  $42.4^\circ$ 。

2.3.2 螺旋匀土叶片设计

在中间开畦沟弯刀片的作用下,畦沟内的土壤被抛送至两侧厢面,畦沟附近处堆积的土壤较多,螺旋匀土叶片可向两侧厢面输送土壤,使作业后厢面平整,但螺旋头数增多会增加机械装置的复杂程度。浅旋匀土部件左刀辊上的螺旋匀土叶片旋向为左,右刀辊上的螺旋匀土叶片旋向为右。螺旋匀土叶片采用圆柱螺旋线<sup>[18]</sup>,其形状取决于螺距  $s$ 、螺旋半径  $a_1$  和螺旋叶片工作幅宽,其中螺旋叶片工作幅宽与浅旋匀土刀辊一致,为 840 mm。圆柱螺旋线展开为一条倾斜的直线,该直线与水平方向的夹角即为螺旋升角  $\delta$ ,其公式为

$$\delta = \arctan \frac{dz}{\sqrt{dx^2 + dy^2}} = \arctan \frac{s}{2\pi a_1} \tag{10}$$

在螺旋匀土叶片的作用下,土壤的受力与速度都会对厢面平整度造成影响。受力分析及运动分析如图 8 所示,将土壤颗粒简化为质点  $M$  建立空间坐标系,质点  $M$  受到法向推力  $F_{N1}$ 、切线方向上的摩擦力  $F_{f1}$  和地表对其的摩擦力  $f_0$ ,合力为  $F_0$ 。将土壤颗粒合力  $F_0$  沿  $Y$  和  $Z$  方向分解成轴向分力  $F_1$  和周向

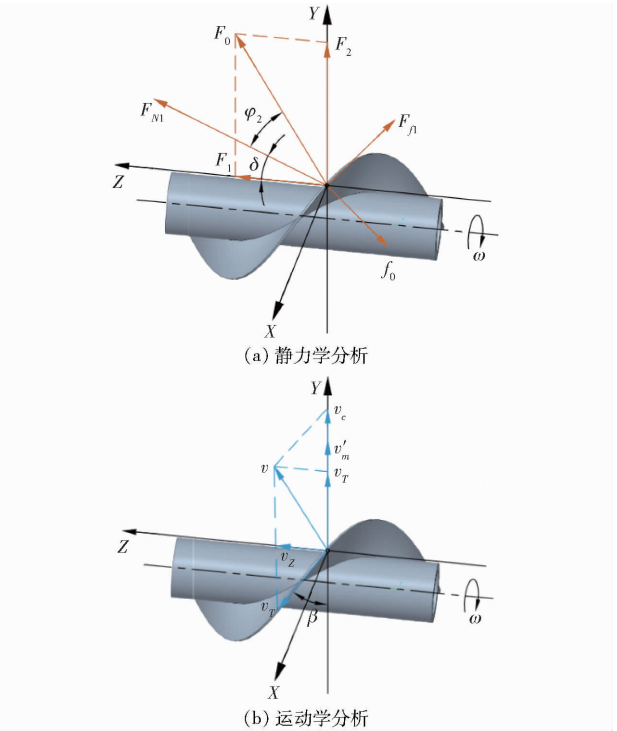


图 8 螺旋叶片分析

Fig. 8 Analysis of soil particles under action of spiral blade

分力  $F_2$  为

$$\begin{cases} F_1 = F_0 \cos(\varphi_2 + \delta) \\ F_2 = F_0 \sin(\varphi_2 + \delta) \end{cases} \tag{11}$$

式中  $\varphi_2$ ——土壤与螺旋叶片间摩擦角, ( $^\circ$ )

在该参考系下质点  $M$  沿螺旋匀土叶片旋转的合速度  $v$  是由牵连速度  $v_c$  与相对速度  $v_r$  合成。分解合速度  $v$ ,并考虑在机具前进过程中速度  $v_0$  产生的沿坐标系  $Y$  轴方向的周向分速度  $v'_m$ ,得到土壤颗粒在  $Z$ 、 $Y$  方向上的绝对分速度  $v_y$ 、 $v_z$  为

$$\begin{cases} v_z = \frac{n\pi a_0 \sin\delta}{30\cos\varphi} \cos(\delta + \varphi_2) \\ v_y = \frac{n\pi a_0 \sin\delta}{30\cos\varphi} \sin(\delta + \varphi_2) + v'_m \end{cases} \tag{12}$$

式中  $a_0$ ——土壤颗粒至刀辊中心的距离, mm

$n$ ——单位时间质点经过的螺旋个数

由式(11)、(12)可知,土壤颗粒所受的分力  $F_1$ 、 $F_2$  和分速度  $v_y$ 、 $v_z$  与螺旋叶片螺距  $s$ 、螺旋半径  $a_1$  和刀辊角速度  $\omega$  有关。其中浅旋匀土刀辊作业时,螺旋匀土叶片不宜入土过深,以免增大旋耕阻力,增加功耗,且螺旋匀土叶片在土壤中会产生磨损,降低机具使用寿命,螺旋匀土叶片作业深度设计为 10 ~ 30 mm,若使土壤从中部向两侧运动,需满足  $\delta \leq 90^\circ - \varphi$ ,则螺旋半径  $a_1$  为 80 ~ 100 mm。由式(10) ~ (12)可得螺距  $s \leq 546.6$  mm,为避免在作业过程中发生壅土现象,螺距  $s$  大于两倍切土节距要求的土堡边长,可得  $s \geq 120$  mm,综合考虑机具尺

寸及作业效果,选取螺距  $s$  为 250 ~ 350 mm。

2.3.3 浅旋弯刀安装数量分析

左右 2 个浅旋匀土刀辊与齿轮箱呈中间对称布置,浅旋弯刀朝外侧等距排布在刀轴上,即浅旋左弯刀安装在左刀辊上,浅旋右弯刀安装在右刀辊上,实现土壤向畦沟两侧厢面迁移。

为避免同一切土区域内浅旋弯刀之间夹土,设计在一个浅旋弯刀刀盘上安装两把浅旋弯刀,且两把浅旋弯刀相隔 180°,则浅旋匀土刀辊上安装的浅旋弯刀的总数量为

$$Q' = \frac{D_2 Q}{B} \tag{13}$$

其中  $B = b + b'$

式中  $B$ ——刀座间距,mm

$Q'$ ——浅旋匀土刀辊上浅旋弯刀总数量

$Q$ ——同一切土小区内浅旋弯刀数量

$b$ ——浅旋弯刀工作幅宽,mm

$b'$ ——刀盘间距,取 15 ~ 20 mm

$D_2$ ——浅旋匀土刀辊工作幅宽,mm

浅旋弯刀在作业的过程中可与周围的土发生撕扯,因此浅旋弯刀刀盘间隙  $b'$  取 15 ~ 20 mm,经计算浅旋刀辊上需安装浅旋弯刀总数为 40,即左、右弯刀各 20。

浅旋弯刀按双头螺旋线排布<sup>[19]</sup>,螺旋匀土叶片安装在其间,螺旋升角  $\delta$  为

$$\delta = \arctan \frac{2\pi a_1}{D_2} \tag{14}$$

当螺旋匀土叶片作业深度为 10 ~ 30 mm 时,螺旋半径  $a_1$  为 80 ~ 100 mm,此时螺旋升角  $\delta$  为 30° ~ 36°。

3 仿真

3.1 仿真模型建立

通过 EDEM 软件建立离散元仿真模型,研究螺旋匀土叶片不同结构参数对装置作业效果,如图 9 所示,参照文献[20 - 23]设置仿真模型相关参数。考虑到长江中下游地区土壤黏重,土壤颗粒接触模型选用 Hertz - Mindlin with Bonding 模型,该模型适用于模拟粘性颗粒之间破碎和断裂。土壤颗粒半径设置为 8 mm,采用 8 个半径为 6 mm 的球形颗粒组成的长条型模型模拟实际作业中地表秸秆。

3.2 试验因素与方法

开展三因素三水平正交旋转组合试验,螺旋匀土叶片结构参数因素及水平如表 2 所示,选取作业后厢面平整度为评价指标。由于机具后方的拖土板对作业厢面具有一定的平整压实作用,为了更好地体现浅旋匀土刀辊的整平效果,在仿真模型中提高

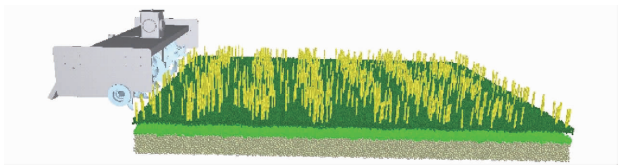


图 9 仿真模型

Fig. 9 Simulation model

表 2 仿真试验因素编码

| Tab. 2 Simulation experiment factors and codes |         |       |      |
|------------------------------------------------|---------|-------|------|
| 编码                                             | 因素      |       |      |
|                                                | 螺旋半径/mm | 螺距/mm | 螺旋头数 |
| -1                                             | 80      | 300   | 0    |
| 0                                              | 90      | 350   | 1    |
| 1                                              | 100     | 400   | 2    |

拖土板的高度,使其处于土槽颗粒上方,仅起到遮挡飞溅的土壤颗粒的作用,将仿真模型导入已建立的土槽中。仿真时设置浅旋匀土部件前进速度为 7 km/h。

仿真结束后,利用 Clipping 切片功能对浅旋匀土部件作业后的土壤稳定区进行随机采样,每隔 500 mm 截取厚度为 10 mm 的土壤切片作为一个样本,每次仿真试验采集 3 个样本。将每个样本切片的切面分别导入 CAD 中,在作业幅宽范围内每隔 160 mm 做该处最高点颗粒的切线,测量此处切线与土槽底部横线的距离,记为  $X_i$  (取样点序号  $i = 1, 2, \dots, 12$ ),测量方法如图 10 所示,计算标准差,即为厢面平整度<sup>[24]</sup>,计算式为

$$S' = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \tag{15}$$

式中  $S'$ ——厢面平整度,mm

$n$ ——取样点数量,取 12

$\bar{X}$ ——测量点切线处与土槽底距离平均值,mm

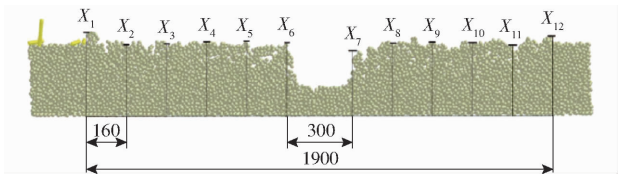


图 10 样本截面数据提取方法

Fig. 10 Sample section data extraction methods

3.3 结果分析

正交试验结果如表 3 所示,  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为因素编码值,对正交试验结果进行多元线性回归,建立厢面平整度  $S'$  对螺旋半径、螺距、螺旋头数的二次多项式回归模型,其回归方程为

$$S' = 13.03 - 0.2050A - 0.5362B - 0.0337C - 0.1375AB + 0.04430A^2 + 0.1355B^2 + 0.5405C^2 \tag{16}$$

表 3 正交试验结果

Tab.3 Results of orthogonal test

| 试验号 | 因素     |      |        | 厢面平整度  |
|-----|--------|------|--------|--------|
|     | 螺旋半径 A | 螺距 B | 螺旋头数 C | S'/mm  |
| 1   | 1      | 0    | -1     | 13. 87 |
| 2   | -1     | 0    | -1     | 14. 27 |
| 3   | 0      | 0    | 0      | 13. 15 |
| 4   | 0      | 1    | -1     | 13. 04 |
| 5   | 0      | 1    | 1      | 13. 20 |
| 6   | -1     | -1   | 0      | 14. 11 |
| 7   | -1     | 0    | 1      | 14. 28 |
| 8   | 1      | 0    | 1      | 13. 65 |
| 9   | 0      | 0    | 0      | 12. 96 |
| 0   | 0      | 0    | 0      | 12. 93 |
| 11  | 0      | 0    | 0      | 13. 01 |
| 12  | 1      | 1    | 0      | 12. 84 |
| 13  | 0      | 0    | 0      | 13. 12 |
| 14  | 0      | -1   | -1     | 14. 41 |
| 15  | 1      | -1   | 0      | 14. 08 |
| 16  | -1     | 1    | 0      | 13. 42 |
| 17  | 0      | -1   | 1      | 14. 19 |

对正交试验结果进行方差分析,其结果如表 4 所示。

表 4 正交试验结果方差分析

Tab.4 Regression equation analysis of orthogonal test results

| 方差来源           | 平方和      | 自由度 | 均方       | F       | P            |
|----------------|----------|-----|----------|---------|--------------|
| 模型             | 5. 09    | 9   | 0. 565 8 | 46. 22  | <0. 000 1 ** |
| A              | 0. 336 2 | 1   | 0. 336 2 | 27. 46  | 0. 001 2 **  |
| B              | 2. 30    | 1   | 2. 30    | 187. 92 | <0. 000 1 ** |
| C              | 0. 009 1 | 1   | 0. 009 1 | 0. 7444 | 0. 416 8     |
| AB             | 0. 075 6 | 1   | 0. 075 6 | 6. 18   | 0. 041 9 *   |
| AC             | 0. 013 2 | 1   | 0. 013 2 | 1. 08   | 0. 333 2     |
| BC             | 0. 036 1 | 1   | 0. 036 1 | 2. 95   | 0. 129 6     |
| A <sup>2</sup> | 0. 826 3 | 1   | 0. 826 3 | 67. 50  | <0. 000 1 ** |
| B <sup>2</sup> | 0. 077 3 | 1   | 0. 077 3 | 6. 31   | 0. 040 2 *   |
| C <sup>2</sup> | 1. 23    | 1   | 1. 23    | 100. 48 | <0. 000 1 ** |
| 残差             | 0. 085 7 | 7   | 0. 012 2 |         |              |
| 失拟项            | 0. 048 0 | 3   | 0. 016 0 | 1. 70   | 0. 304 6     |
| 误差             | 0. 037 7 | 4   | 0. 009 4 |         |              |
| 总和             | 5. 18    | 16  |          |         |              |

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

由表 4 可知,螺旋半径 A、螺距 B 及其交互项 AB 对响应值均具有显著影响,其中螺旋半径 A、螺距 B 表现为极显著,而螺旋头数 C 和交互项 AC、BC 则均表现为不显著,3 个试验因素对厢面平整度的影响程度从大到小依次为螺距 B、螺旋半径 A、螺旋头数 C。

交互项 AB 表现为显著,为研究螺旋半径与螺

距间交互作用对厢面平整度的影响规律,将螺旋头数取为 1,则交互作用响应曲面如图 11 所示。

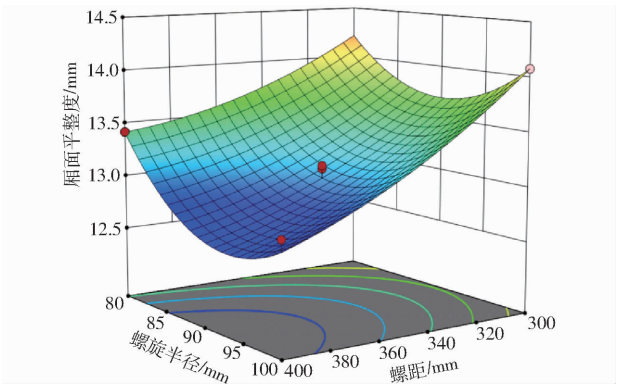


图 11 交互作用响应曲面

Fig. 11 Response surface for interaction

由图 11 可知,在螺距一定时,厢面平整度 S'随螺旋半径增加呈先减小后增大的趋势;在螺旋半径一定时,厢面平整度随螺距增加而先减小后增大,当螺旋半径为 97.57 mm、螺距为 336.28 mm、螺旋头数为 1.15 时,厢面平整度最优,为 12.69 mm,为便于加工制造,螺旋匀土叶片最佳结构参数:螺旋半径为 100 mm、螺距为 350 mm、螺旋头数为 1,此时螺旋升角  $\delta$  为  $30^\circ$ ,对应的浅旋弯刀及螺旋匀土叶片结构布局如图 12 所示。在该参数下,机具进行仿真作业,作业后效果如图 13 所示。

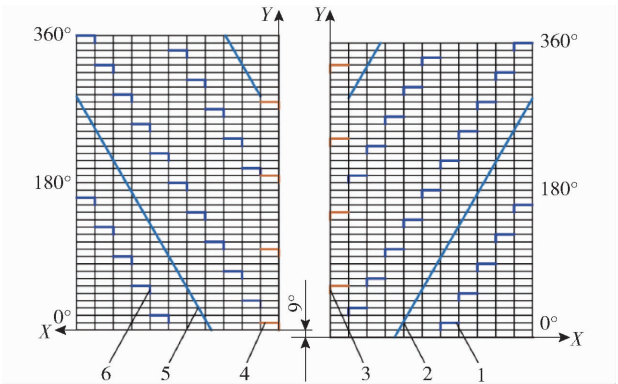


图 12 浅旋匀土刀辊排布示意图

Fig. 12 Arrangement diagram of uniform distribution device for furrow soil

1. 浅旋右弯刀 2. 右螺旋叶片 3. 开畦沟右弯刀 4. 开畦沟左弯刀 5. 左螺旋叶片 6. 浅旋左弯刀

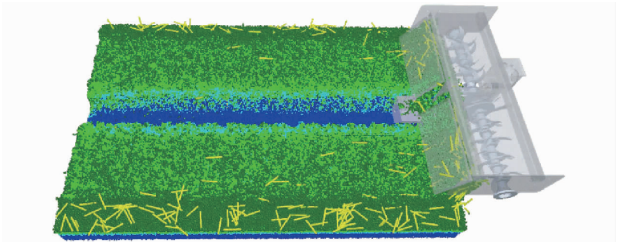


图 13 机具仿真作业效果

Fig. 13 Simulation effect

## 4 田间试验

### 4.1 试验条件与方法

为验证油菜中间开沟浅旋匀土装置作业性能,在湖北省荆州市监利县华中农业大学稻-油轮作全程机械化生产示范基地开展田间试验。试验工况均为常年采用稻-油轮作模式的田块,其土壤类型为偏黏性土,前茬作物为水稻;试验工况如表 5 所示。试验设备包括东方红 954 型拖拉机、安装有开沟浅旋装置的油菜直播机、TJSD-9570 型数显土壤坚实度测定仪(浙江托普云农科技股份有限公司,精度 $\pm 0.005\%$  FS)、直尺(500 mm)、卷尺(5 m)、土壤取样环刀、电子天平、干燥箱等。

表 5 试验工况参数  
Tab.5 Test conditions parameters

| 参数                                     | 数值    | 参数                                      | 数值    |
|----------------------------------------|-------|-----------------------------------------|-------|
| 土壤坚实度/kPa                              | 2 013 | 秸秆留茬高度/mm                               | 226   |
| 土壤含水率/%                                | 32.62 | 秸秆存留量/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) | 823   |
| 土壤容重/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | 1.26  | 秸秆含水率/%                                 | 53.12 |

试验时设置机具作业速度为 7 km/h,机组每个行程沿直线方向的作业距离为 50 m,取每个行程的中间 30 m 作为测量区域,每组试验重复 3 次。参考 NY/T 740—2003《田间开沟机械作业质量》、GB/T 5668—2008《旋耕机》和 NY/T1143—2006《播种机质量评价技术规范》,结合油菜种植农艺要求,确定试验指标有耕深及耕深稳定性系数、畦沟沟型及稳定性系数、厢面平整度、碎土率、秸秆埋覆率及出苗率等指标。

### 4.2 试验结果分析

安装有开沟浅旋装置的油菜直播机田间作业效果如图 14 及表 6 所示,作业后厢面平整,畦沟沟型完好,机具作业耕深平均为 51.3 mm,耕深稳定性系数达到 90% 以上,秸秆埋覆率达到 84.38%,碎土率达到 86.41%,厢面平整度达到 30.18 mm,平均畦沟沟深为 212.8 mm,上沟宽为 328.2 mm,下沟宽为 264.8 mm,畦沟沟深沟宽稳定性均大于 85%,无明显土壤回流现象,油菜出苗率为 75.47%,如图 15 所示,油菜生长状态良好,装置作业效果满足油菜直



(a) 多厢连续作业效果 (b) 单厢作业效果  
图 14 机具田间作业效果  
Fig. 14 Effectiveness of machine work in field

播作业要求。各项指标均满足 NY/T 740—2003《田间开沟机械作业质量》、GB/T 5668—2008《旋耕机》和 NY/T 1143—2006《播种机质量评价技术规范》标准要求。

表 6 田间试验结果  
Tab.6 Test conditions parameters

| 评价指标       | 数值    | 评价指标       | 数值    |
|------------|-------|------------|-------|
| 平均耕深/mm    | 51.3  | 耕深稳定性系数/%  | 92.2  |
| 畦沟平均上沟宽/mm | 328.2 | 上沟宽稳定性系数/% | 88.63 |
| 畦沟平均下沟宽/mm | 264.8 | 下沟宽稳定性系数/% | 90.6  |
| 畦沟平均沟深/mm  | 212.8 | 沟深稳定性系数/%  | 91.62 |
| 厢面平整度/mm   | 30.18 | 秸秆埋覆率/%    | 84.38 |
| 碎土率/%      | 86.41 |            |       |



图 15 播种试验出苗效果  
Fig. 15 Seedling emergence results

## 5 结论

(1)针对油菜轻简高效生产需求及目前机具作业易出现厢面不平、碎土质量不高及“晾种”,导致油菜出苗率低的生产难题,设计了一种油菜机械直播机开沟浅旋装置,实现中间开畦沟、畦沟土壤抛送覆盖两侧厢面,浅旋匀土部件匀土及细碎厢面土壤、埋覆土壤和秸秆功能。

(2)基于滑切减阻原理及挤压力学理论,确定了中间开畦沟部、清沟整形部件及浅旋匀土部件结构参数,得出中间开畦沟刀盘安装弯刀数量为 4,切土节距为 60 mm,清沟整形部件整形面侧面倾角为 67°,前面倾角为 3°,浅旋弯刀侧切刃偏心圆半径为 182 mm,滑切角为 42.4°;运用 EDEM 软件开展正交旋转组合试验,确定了螺旋匀土叶片的最佳结构参数取值:螺旋半径为 100 mm、螺距为 350 mm、螺旋头数为 1,并确定了浅旋弯刀及螺旋匀土叶片结构布局。

(3)安装有开沟浅旋装置的油菜直播机田间试验表明,当机组前进速度为 7 km/h 时,安装有开沟浅旋装置的油菜直播机作业后厢面平整,畦沟沟型完好,机具作业耕深为 51.3 mm,耕深稳定性系数大于 90%,秸秆埋覆率为 84.38%,碎土率为 86.41%,厢面平整度为 30.18 mm,平均畦沟沟深为 212.8 mm,

上沟宽为 328.2 mm,下沟宽为 264.8 mm,畦沟沟深 75.47%,油菜生长状态良好,装置作业效果满足油菜沟宽稳定性系数均大于 85%,油菜出苗率为油菜直播作业要求。

参 考 文 献

[1] 刘立超. 油菜免耕直播机开畦沟装置设计与厢面质量研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2019.  
LIU Lichao. Design and quality of furrow opening device of rapeseed no-tillage live broadcast machine[D]. Wuhan:Huazhong Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[2] VOLKER P. On-farm effects of tillage and crops on soil erosion measured over 10 years in Switzerland[J]. Soil and Tillage Research, 2012, 120: 137 – 146.

[3] 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)

[4] MALASLI M Z, CELIK A. Disc angle and tilt angle effects on forces acting on a single-disc type no-till seeder opener[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 194: 104304.

[5] TOROTWA I, DING Q, MAKANGE N R, et al. Performance evaluation of a biomimetically designed disc for dense-straw mulched conservation tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 212: 105068.

[6] 张银平,杜瑞成,刁培松,等. 正反转组合式水稻宽苗带灭茬播种机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 7 – 13.  
ZHANG Yinping, DU Ruicheng, DIAO Peisong, et al. Design and experiment of wide band seeding rice seeder with reversed stubble cleaning and anti-blocking[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3): 7 – 13. (in Chinese)

[7] 贾洪雷,朱龙图,黄东岩,等. 基于 Flex 传感器的免耕播种机播深自动控制系统[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(1): 166 – 175.  
JIA Honglei, ZHU Longtu, HUANG Dongyan, et al. Automatic control system of sowing depth for no-tillage planter based on Flex sensor[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(1): 166 – 175. (in Chinese)

[8] 史乃煜,陈海涛,魏志鹏,等. 基于最速降线原理的免耕播种机强制回土装置研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 37 – 44.  
SHI Naiyu, CHEN Haitao, WEI Zhipeng, et al. Design and test of forced-return device based on principle of brachistochrone [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 37 – 44. (in Chinese)

[9] 赵艳忠,王勇,龚振平,等. 免耕播种机侧深分层施肥播种部件设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 40 – 50.  
ZHAO Yanzhong, WANG Yong, GONG Zhenping, et al. Design and experiment on side deep and layered fertilizing and seeding components of no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 40 – 50. (in Chinese)

[10] 秦宽,梁小龙,曹成茂,等. 茶园切抛组合式开沟刀设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 74 – 82.  
QIN Kuan, LIANG Xiaolong, CAO Chengmao, et al. Design and experiment of combined cutting and throwing ditching blade for tea garden[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 74 – 82. (in Chinese)

[11] 康建明. 果园开沟施肥机开沟刀片理论与试验研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院, 2017.  
KANG Jianming. Theoretical and experimental study on ditching blade of orchard ditching fertilizer spreader[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization, 2017. (in Chinese)

[12] 杨庆璐,陈桂斌,谢立娟,等. 伸缩指杆式玉米秸秆旋耕掩埋机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 35 – 43.  
YANG Qinglu, CHEN Guibin, XIE Lijuan, et al. Design and experiment of telescopic finger stalk of maize straw burying machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 35 – 43. (in Chinese)

[13] 刘晓鹏,张青松,刘立超,等. 基于微分几何与 EDEM 的船型开畦沟装置触土曲面优化[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 59 – 69.  
LIU Xiaopeng, ZHANG Qingsong, LIU Lichao, et al. Surface optimization of ship type ditching system based on differential geometry and EDEM simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 59 – 69. (in Chinese)

[14] 刘晓鹏,肖文立,马磊,等. 油菜联合直播机组式船型开沟器设计与开沟质量试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 79 – 87.  
LIU Xiaopeng, XIAO Wenli, MA Lei, et al. Design and ditching quality experiment on combined ship type opener of direct rapeseed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 79 – 87. (in Chinese)

[15] 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)