

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.018

# 玉米少免耕播种机种带灭茬清理装置设计与试验

刘俊孝<sup>1</sup> 王浩<sup>1</sup> 王庆杰<sup>1</sup> 李绍华<sup>2</sup> 李洪文<sup>1</sup> 何进<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 内蒙古长明机械股份有限公司, 赤峰 024200)

**摘要:** 针对东北一年一熟玉米种植区秸秆覆盖还田条件下, 少免耕播种玉米时条带旋耕作业后土秆混杂严重、种带清洁度低导致的晾籽率高、播种质量差等问题, 设计了一种适用于秸秆覆盖条件下玉米少免耕播种机的种带灭茬清理装置。为达到最佳的清理效果, 对灭茬刀的侧切刃长度进行分析, 计算了种带清理弯刀的侧切刃曲线及受力, 并利用 EDEM 软件进行单因素仿真, 确定了最优弯折角为 150°; 分析比较了 2 种装置作业后的种带清洁度及土壤扰动量, 结果表明, 种带灭茬清理装置作业后种带清洁度均值为 86.59%, 比传统条带灭茬装置提高了 26.89%, 土壤扰动比减少了 2/3, 平均扭矩降低了 33.19%; 试验与仿真结果基本一致, 验证了仿真的可靠性。为研究各因素对种带灭茬清理装置作业性能的影响, 设计了三因素三水平正交试验, 得出对种带清洁度产生显著影响的因素为前进速度及秸秆覆盖量, 对土壤扰动量产生显著影响的因素为前进速度及入土深度。田间试验表明, 该装置在秸秆覆盖量为 0.4~1.4 kg/m<sup>2</sup> 时, 机具通过性良好, 各组试验种带清洁度均在 80% 以上, 土壤扰动比较低, 符合设计要求。

**关键词:** 少免耕播种; 玉米; 种床清理; 土秆分离; EDEM

**中图分类号:** S223.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2018)S0-0132-09

## Design and Experiment of Strip Cleaning Device of No and Minimum-tillage Corn Planter

LIU Junxiao<sup>1</sup> WANG Hao<sup>1</sup> WANG Qingjie<sup>1</sup> LI Shaohua<sup>2</sup> LI Hongwen<sup>1</sup> HE Jin<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Inner Mongolia Changming Machinery Co., Ltd., Chifeng 024200, China)

**Abstract:** Under the conditions of straw mulching in the northeast of China, straw plugging problem often occurs when sowing corn. After the strip-rotating anti-blocking operation, soil and stalks mixing generate some seeds landed on the straw, which reduced seeding quality. Combined with the agronomic and operational requirements for corn planting in the one-year-old ripe area in Northeast China, a device for eliminating stubbles and cleaning seed bed was designed, which was suitable for seeding corn under no-tillage condition. The device was mainly composed of a cutter head, a stubble cutter, a planting-strip cleaning knife and a spring assembly. Force and side-cutting edge curve analysis were performed and the main technical parameters of the two cutting tools were designed. The force model was established for cleaning straws or weeds with planting-strip cleaning knife, and different bending angles were simulated by EDEM discrete element simulation. Using cutting resistance as the optimization indicator, it was confirmed that the optimum bending angle of the planting-strip cleaning knife was determined to be 150°. The cleanliness and soil disturbance after the operation of the two devices were analyzed and compared. The results showed that the average cleanliness of the strips after operation was 86.59%, which was 26.89% higher than that of the traditional strip annihilation device and the soil disturbance quantity was reduced by 2/3, and average torque was reduced by 33.19%. The test and simulation results were basically the same, verifying the reliability of the simulation. In order to study the influence of various factors on the operation performance of the stripping and cleaning device, a three-factor and three-level orthogonal test was designed to determine the factors that had significant impact on the cleanliness of the

收稿日期: 2018-07-10 修回日期: 2018-08-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200600)和教育部创新团队发展计划项目(IRT13039)

作者简介: 刘俊孝(1992—),男,博士生,主要从事保护性耕作及播种技术与装备研究,E-mail: B20173070539@cau.edu.cn

通信作者: 王庆杰(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作技术与装备研究,E-mail: wangqingjie@cau.edu.cn

strip were the working speed and amount of straw mulching, and those on the soil disturbance were the working speed and depth of soil. Field experiments showed that the equipment had good passability and significant anti-blocking effect when straw cover rate was in range of  $0.4 \sim 1.4 \text{ kg/m}^2$ . The seed bed cleanliness was all above 80%. The research provided the theoretical and technological support for the development of seed bed cleaning devices under the condition of no and minimum-tillage planting.

**Key words:** no and minimum-tillage sowing; maize; seed bed cleaning; soil and stalks separation; EDEM

## 0 引言

在东北一年一熟区实施保护性耕作技术,可有效减少水土流失、风沙扬尘等<sup>[1-5]</sup>问题。但在玉米秸秆覆盖条件下进行种植作业时,秸秆会对播种产生影响<sup>[6-7]</sup>,因此需对种床进行整备。条带旋耕即作为一种有效的种床整备技术<sup>[8-9]</sup>,但现有条带旋耕装置作业后存在种带清洁度低、秸秆土壤混杂等现象<sup>[10-11]</sup>,进而导致了晾籽、机具堵塞等问题<sup>[12-13]</sup>,严重制约了玉米产量的提高<sup>[14]</sup>。种带清理装置可以将种带内的秸秆与土壤分离并清理至行间,能显著增强播种机的通过性,提高种床清洁度,减少拥堵及晾籽现象<sup>[15-16]</sup>。常见的种带清理装置多为被动式,只能进行地表清理,无法对根茬进行粉碎,对后续播种作业会产生影响,且在秸秆覆盖量较大和高留茬地作业时,仍存在通过性差、晾籽等问题<sup>[17]</sup>。若将灭茬装置与种带清理装置相结合,降低灭茬装置动土量,灭茬时可同步完成种带清理作业,即可为种子入土提供一条清洁的播种带。

本文设计一种能够实现同步灭茬并清理种床,实现土籽分离,解决晾种、机具通过性差等问题的玉米少免耕播种机种带灭茬清理装置,以期改善传统少免耕播种机的作业性能,为东北一年一熟区种带灭茬清理装置的研究提供理论与技术支撑。

## 1 种带灭茬清理装置设计

### 1.1 整体结构设计

结合传统条带旋耕灭茬装置的优点设计了种带灭茬清理装置,可在实现灭茬的同时将种带内残余秸秆清理至行间,其结构如图1所示。

主要由灭茬刀(左、右)、种带清理弯刀、弹簧组件、刀盘等组成。其中,灭茬刀和种带清理弯刀为该装置的核心部件,灭茬刀交错均匀分布于刀盘的两侧;种带清理弯刀与灭茬刀错开一定角度;在靠近种带清理弯刀端部位置安装弹簧组件,通过调节弹簧组件端部螺母改变预紧力来控制弹开秸秆或残茬的弹力。

### 1.2 工作原理

作业前,根据待工作土壤的表面秸秆覆盖量、播

种作物、农艺要求及根茬大小等因素调节弹簧组件的预紧力,使装置可清理出适宜宽度的清洁种带,为之后的开沟播种作业提供便利条件。整机图及种带清理图如图2、3所示。

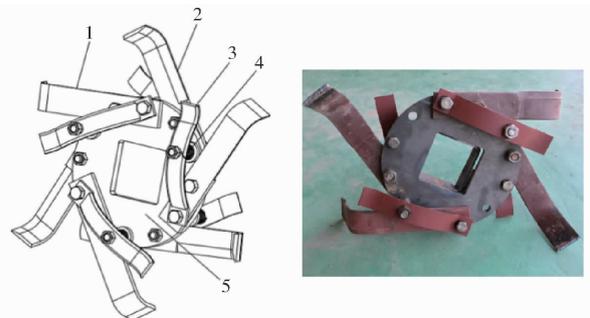


图1 种带灭茬清理装置结构示意图

Fig. 1 Schematic of planting-strip cleaning device

1. 灭茬刀(右) 2. 灭茬刀(左) 3. 种带清理弯刀 4. 弹簧组件
5. 刀盘

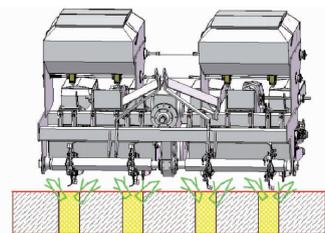


图2 整机安装示意图

Fig. 2 Schematic of device installation

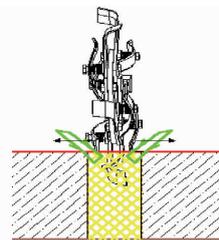


图3 种带清理示意图

Fig. 3 Schematic of planting-strip cleaning

工作时,拖拉机后输出轴提供动力输出,驱动种带灭茬清理装置;前进时,灭茬刀切断玉米残茬、秸秆及杂草;种带清理弯刀与灭茬刀错开一定的角度,弯刀随即对秸秆及杂草进行二次切割并在弹簧组件的作用下将长秸秆清理至玉米行间,同时防止杂草缠绕至刀盘上;即可清理出一条适宜播种的清洁种带。



$\varphi_0$ ——侧切刃初始滑切角, ( $^\circ$ )

$\rho_0$ ——初始极径, mm

式(5)即为种带清理弯刀正弦指数曲线型侧切刃刃口曲线方程。选取不同的  $\varphi_0$  和  $K$  可以获得不同的正弦指数曲线型。在保障刃口具有较好的滑切效果, 并且功耗较小时, 根据文献[23], 弯刀刃口曲线起点的静态滑切角  $\varphi_0$  取  $42^\circ$ 、比例参数  $K$  取 0.2。此时弯刀的正弦指数型侧切刃刃口曲线如图 5 的 AE 所示。

#### 1.4.2 种带清理弯刀参数设计

弯刀侧刃处与土壤面的夹角对作业效果有较大影响, 为种带清理弯刀关键参数, 如弯角过小, 则刀盘及刀根部易缠草, 降低了作业效果; 如弯角处变大, 则切断杂草的能力增强, 但作业阻力会有所增大。根据刃口曲线方程, 弯折角设计范围为  $120^\circ \sim 180^\circ$ 。为确定最优的弯折角, 需结合离散元仿真结果加以确定。

结合灭茬刀工作参数、秸秆尺寸参数、有限元强度校核、农业机械设计手册等研究计算, 种带清理弯刀其余参数如表 2 所示。

表 2 种带清理弯刀参数

Tab.2 Planting-strip cleaning knife parameters

参数	回转半径 $R/\text{mm}$	弯曲半径 $r/\text{mm}$	刀角 $i/$ ( $^\circ$ )	刀片厚度 $d/\text{mm}$
数值	140	0.401	12	6

#### 1.5 轴上刀片排列设计

种带灭茬清理装置刀片在刀轴上的排列对刀轴的受力均匀性起到关键性作用。其中, 对机具的振动、作业稳定性以及功耗影响显著。因此刀片的排

列应使刀轴的轴向和径向受力均匀。整个刀轴均匀分布 12 把种带灭茬清理装置, 单轴相位差  $6^\circ$  的种带灭茬刀和种带清理弯刀左右对称安装, 相继入土, 使轴向力抵消; 左右刀轴上刀具对称装配, 可减小机具扭矩, 其中左右轴上安装的刀片以 1/2 个等分角相位差入土, 平衡切割阻力, 减小整机的振动扭矩; 同一刀盘上两对刀片 (Aa 和 Bb), 左右对称, 使刀轴径向受力均匀。工作时, 刀片交替入土, 两对称刀片组相继入土的相位差为  $30^\circ$ 。其刀轴上刀片排列如图 6 所示。

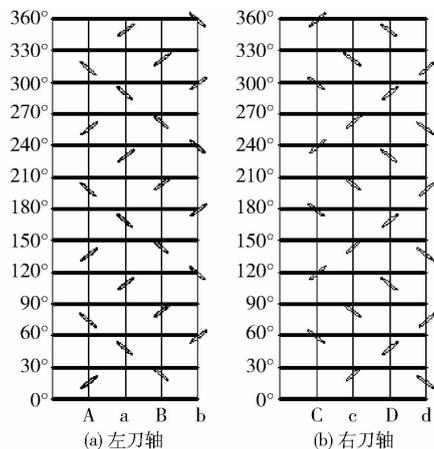


图 6 装置左右刀轴刀片排列图

Fig.6 Left and right cutter shaft arrangement diagram

## 2 种带灭茬清理装置仿真分析与参数优化

### 2.1 仿真参数确定

试验测定土壤及秸秆来自内蒙古赤峰市宁城县试验示范田。经测量并与仿真对比标定得出仿真关键参数<sup>[24-26]</sup>如表 3 所示。

表 3 仿真参数

Tab.3 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值	参数	数值
土壤剪切模量/MPa	1	秸秆剪切模量/MPa	1	土-刀静摩擦因数	0.109
土壤颗粒泊松比	0.3	秸秆颗粒泊松比	0.4	土-刀动摩擦因数	0.315
土-土恢复系数	0.6	秆-刀静摩擦因数	0.3	土-土静摩擦因数	0.6
秸秆颗粒半径/mm	16	秆-刀动摩擦因数	0.01	土-土动摩擦因数	0.4
秸秆模型长度/mm	55/75/105	秆-刀恢复系数	0.3	土-刀恢复系数	0.6

建立长 1 000 mm × 宽 400 mm × 高 300 mm 离散元土壤模拟土槽, 在土壤上覆盖一层高 30 mm 的秸秆模型<sup>[27]</sup>, 如图 7 所示。

其中, 秸秆模型分为 3 类; 第 1 类长度为 55 mm 的短秸秆, 第 2 类长度为 75 mm 的中等长度秸秆, 第 3 类长度为 105 mm 的长秸秆。利用 SolidWorks 软件创建出三维模型, 导入到 EDEM 软件中进行模拟; 将两者的前进速度设为 0.56 m/s, 绕着自身轴心

的旋转速度为 313 r/min, 装置灭茬刀作业深度为 85 mm。设置 Rayleigh 仿真时间步长为 5%, 总时间为 2 s, 网格大小为  $3R_{\min}$ , 总共生成颗粒 43 792 个。

### 2.2 最佳弯折角优化

为了确定种带清理弯刀阻力最小的弯折角, 对其进行单因素试验, 以  $5^\circ$  为间距等分利用 SolidWorks 软件创建出折弯角分别为  $120^\circ$ 、 $125^\circ$ 、 $130^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $140^\circ$ 、 $145^\circ$ 、 $150^\circ$ 、 $155^\circ$ 、 $160^\circ$ 、 $165^\circ$ 、 $170^\circ$ 、

175°、180°共13种不同的弯折角的种带清理弯刀,每把弯刀的其他参数条件均保持一致。取各角度种带清理弯刀工作节奏均匀的工作时间,其综合平均阻力如图8所示。

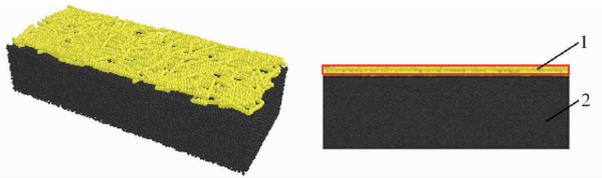


图7 土壤与秸秆模型图

Fig. 7 Diagram of soil and straw model

1. 秸秆模型层 2. 土壤模型层

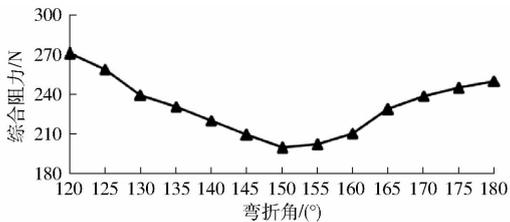


图8 不同弯折角种带清理弯刀平均阻力折线图

Fig. 8 Line graph of different angles planting-strip cleaning knife average resistance

种带灭茬清理装置的平均阻力随着弯折角的增加表现出先减小后增大的走势。由图8可知,当弯折角在150°时阻力最小,优化并确定种带清理弯刀最优弯折角为150°。

### 2.3 与条带灭茬装置种带清理效果对比分析

两种装置进行仿真作业后,利用秸秆与土壤模型组成的虚拟土槽测定模型颗粒数量来定义种带清理效果。若表层秸秆模型颗粒在种带范围(8 cm)内的数量越少则种带清理效果优,反之则种带清理效果较差。利用软件中 clipping 选项中的 plan 方式,将土-秆模型槽剪切成厚度为80 mm切片,长度为400 mm,高度为土槽原始高度330 mm。最后读取两种装置作业后秸秆模型颗粒的数量,结果如图9所示。

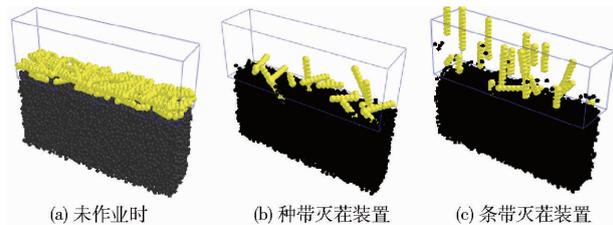


图9 种带清理效果对比

Fig. 9 Comparison of strip cleaning effect

根据图9a可知,未作业时种带内3种秸秆模型总数经过统计为61。经条带灭茬装置作业后,种带内剩余秸秆模型的数量为29;经过种带灭茬清理装置作业后,种带内剩余的秸秆模型数量为19。因此种带灭茬清理效果优于条带灭茬装置;且种床的整

洁程度较条带灭茬装置高,如图10所示。经过条带灭茬装置作业后的种带内,部分土壤模型颗粒被翻至秸秆上方,说明出现了秸秆或者杂草与土壤混杂现象。

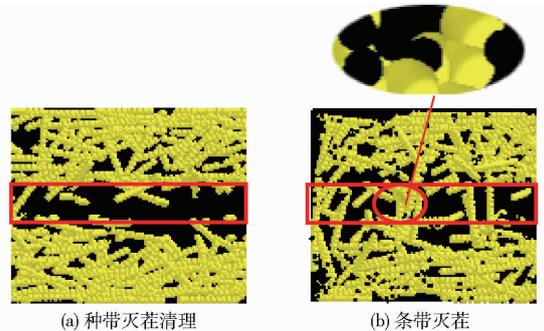


图10 种床整洁度对比

Fig. 10 Comparison of seed bed cleanliness

### 2.4 与条带灭茬装置土壤扰动情况对比分析

将两种装置仿真作业时土壤扰动情况进行对比分析。利用土壤颗粒模型的速度及运动颗粒的数量来表征作业时土壤扰动情况,高速运动的土壤颗粒模型数量少,则作业时土壤扰动量小,情况较好,反之则较差。截取正在作业时刻的土槽截面,土壤颗粒模型受力及运动状态如图11所示。

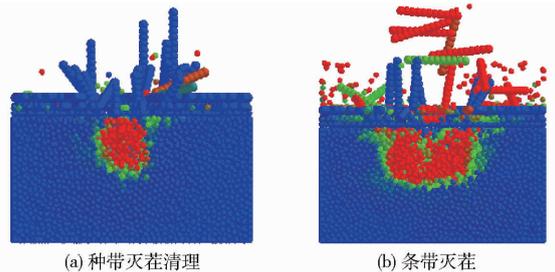


图11 土壤横截面扰动效果对比

Fig. 11 Comparison of soil disturbance effects in cross-section

图11中,红色颗粒代表受力较大,蓝色颗粒代表受力较小,绿色颗粒则介于两者之间。两种装置对土壤层的冲击差异较大。条带灭茬装置作业时对土壤的冲击范围较大且部分土壤和秸秆都被抛至后方(图示红色颗粒模型位于上方);相比于条带灭茬装置,本文所设计的种带灭茬清理装置作业时,对土壤模型颗粒冲击范围较小,主要冲击在种带内,秸秆被清理至行间,土层扰乱小。

为了量化两种装置作业对土壤的扰动<sup>[28]</sup>的影响,使用 EDEM 中 Clipping 模块的 slice 方式将颗粒模型运动截面选取一个厚度为50 mm,宽度和高度不变的切片网格,并提取该时刻颗粒的坐标位置,将坐标位置输出到 AutoCAD 中。将一系列的坐标点绘出并连接得到两种装置作业时的土壤扰动边界线。利用整个装置在作业时的作业宽度  $D_0$  并划分

等量长度  $d$  (20 mm) 为标记点,测定高速运动土壤颗粒边界距水平基准线的垂直距离,并分别乘以对应宽度  $D_1$  和  $D_2$  计算出扰动面积平均值和标准差,如图 12 所示。

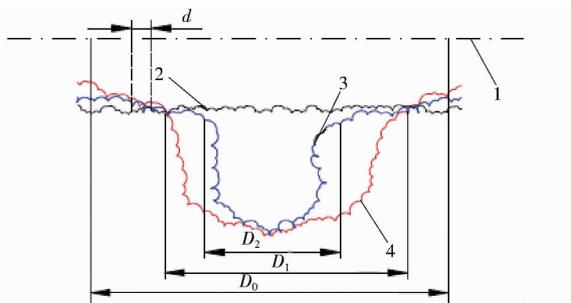


图 12 土壤横截面扰动对比

Fig. 12 Comparison of cross-section soil disturbance

- 1. 水平基准线 2. 土壤地表线 3. 本文装置土壤扰动边界线
- 4. 条带灭茬装置土壤扰动边界线

分别近似估算两种装置作业时土壤扰动面积,并取 5 次平均值。利用标准差来衡量土壤扰动量,计算得本文设计装置平均土壤扰动量为  $5.31 \text{ mm}^2$ ,条带灭茬装置平均土壤扰动量为  $18.94 \text{ mm}^2$ 。设计的种带灭茬清理装置对土壤的扰动量明显小于条带灭茬装置,更有利于保持土壤的墒情。

### 2.5 与条带灭茬装置扭矩对比分析

利用 EDEM 软件生成两种装置工作稳定时间内的合扭矩<sup>[29]</sup>与仿真时间的变化曲线,如图 13 所示。

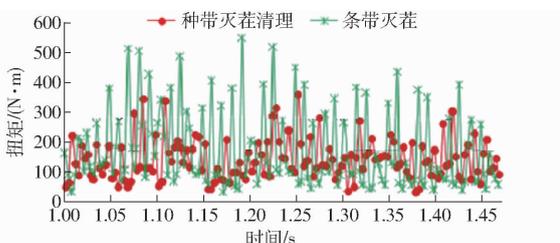


图 13 扭矩随时间变化曲线对比

Fig. 13 Comparison of torque changed with time

两种装置在稳定工作时,扭矩随仿真时间的增加出现波浪形的上下浮动,就总体走势来看,种带灭茬清理装置扭矩小于条带灭茬装置扭矩,种带灭茬清理装置的扭矩平均值为  $192.85 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,条带灭茬装置的扭矩平均值为  $288.24 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。经计算可知本文设计的装置比条带灭茬装置的扭矩减少了  $33.19\%$ ,计算出种带灭茬清理装置扭矩的标准差为  $18.56 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,条带灭茬装置扭矩的标准差为  $32.68 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,由此表明本文所设计的种带灭茬清理装置的扭矩离散程度小,扭矩波动更稳固,受力更均匀。

截取仿真过程截面,统计此刻运动颗粒数量,如图 14 所示。条带灭茬装置激起的运动颗粒数为 87,种带灭茬清理装置激起的运动颗粒数为 26;验

证了种带灭茬清理装置可以减少土壤飞溅,降低土秆混杂程度。

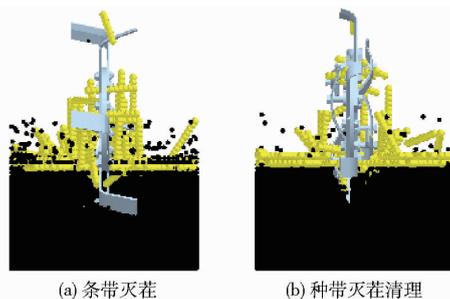


图 14 装置作业激起的土壤颗粒数对比  
Fig. 14 Comparison of soil particles number

## 3 田间试验与数据分析

### 3.1 试验条件

为了验证设计样机的各种性能指标,并为进一步改进提供设计依据,在内蒙古赤峰市长明机械试验田内开展了机具田间工作性能试验。其整机布置如图 15 所示。试验土壤类型为黄壤土;地表有秸秆和残茬覆盖,其秸秆参数如表 4 所示。

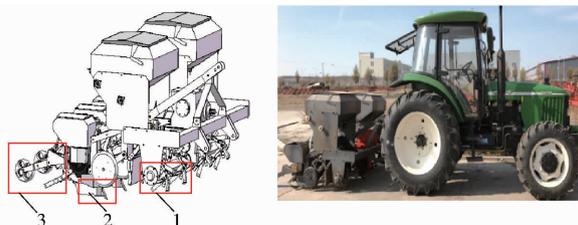


图 15 试验样机

Fig. 15 Test prototype

- 1. 种带灭茬清理装置 2. 开沟器 3. 覆土及镇压装置

表 4 秸秆及根茬指标测定结果

Tab. 4 Measurement results of straw and root index

参数	秸秆覆盖量/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ )	秸秆含水 率/%	留茬高度/ cm	残茬长度/ mm
数值	0.79	20.70	11.68	77.2

### 3.2 试验设计

#### 3.2.1 条带灭茬装置和种带灭茬清理装置对比试验

分别测试传统条带灭茬装置和种带灭茬清理装置作业性能,评价指标为种带清洁度及土壤扰动比,结果如表 5 所示。

表 5 装置作业效果对比测试结果

Tab. 5 Comparison of measurement results in operation effect

装置	种带清洁度		土壤扰动比	
	均值	标准差	均值	标准差
种带灭茬清理	86.59	2.19	8.83	0.87
条带灭茬	68.24	2.80	26.78	2.15

种带灭茬清理装置作业后的种带清洁度平均值

为 86.59%, 大于条带灭茬装置作业后的 68.24%, 且标准差为 2.19% 小于条带装置的 2.8%; 土壤扰动比平均值为 8.83% 远小于条带灭茬装置的 26.78%, 试验结果与离散元仿真的种带清洁度、土壤扰动比的结果基本一致, 说明本文设计的装置作业效果优于传统条带灭茬装置。

### 3.2.2 正交试验结果

为检验种带灭茬清理装置在不同作业条件下的种带清洁度和土壤扰动量, 试验采用三因素三水平正交设计试验。经过样机初期预试验, 结合内蒙古地区秸秆覆盖量特点, 选取对装置的种带清洁度和土壤扰动比影响较大的 3 个影响因素: 装置前进速度  $v$ 、装置入土深度  $h$ 、秸秆覆盖量  $\delta$ 。以种带清洁度和土壤扰动量为测量指标, 试验因素水平如表 6 所示。

表 6 正交试验因素水平

Tab.6 Orthogonal test factors and levels

水平	因素		
	前进速度 $v/$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	入土深度 $h/mm$	秸秆覆盖量 $\delta/$ ( $kg \cdot m^{-2}$ )
1	1.0	60	0.4
2	1.5	80	0.9
3	2.0	100	1.4

### 3.2.3 播种性能试验结果

为验证播种机配套种带清理装置后在秸秆覆盖地的播种性能, 将种带清理装置安装于免耕播种机在试验田进行播种性能试验。秸秆覆盖情况如表 4 所示, 机具前进速度及入土深度为 1.5 m/s、80 mm。试验重复 5 次取平均值, 播种性能指标测定结果如表 7 所示。

表 7 播种性能指标测定结果

Tab.7 Measurement result of seeding performance index

试验编号	性能指标			
	合格率	漏播率	重播率	晾籽率
1	95.2	1.8	0.8	0.98
2	96.1	1.6	1.7	0.78
3	95.8	1.7	1.4	0.75
4	97.1	0.9	1.3	1.55
5	94.2	1.4	0.7	1.20
平均值	95.41	1.48	1.18	1.05

### 3.3 结果分析

试验结果如表 8 所示。

应用 SPSS 19.0<sup>[30]</sup> 软件对结果数据进行数理统计分析。由表 9 方差分析可得, 3 个因素中对土壤扰动量影响由大到小依次为: 入土深度、前进速度、

表 8 试验结果

Tab.8 Experiment results

组数	因素			土壤扰动 比 $y_1/\%$	种带清洁 度 $y_2/\%$
	前进速度	入土深度	秸秆 覆盖量		
1	1	1	1	7.21	90.59
2	1	2	2	9.25	88.25
3	1	3	3	12.70	86.85
4	2	1	2	8.89	83.21
5	2	2	3	10.98	81.14
6	2	3	1	14.03	85.69
7	3	1	3	10.16	80.19
8	3	2	1	12.21	84.24
9	3	3	2	15.89	82.08

表 9 方差分析

Tab.9 Variance analysis

方差来源	平方和	自由度	均方	$F$	$P$
前进速度	13.81	2	6.905	201.2	0.005
土壤 入土深度	45.49	2	22.75	663.1	0.002
扰动 秸秆覆盖量	0.058	2	0.029	0.849	0.541
比 误差	0.069	2	0.034		
总计	59.43	8			
前进速度	69.47	2	34.73	1683	0.001
种带 入土深度	0.167	2	0.084	4.057	0.198
清洁 秸秆覆盖量	25.53	2	12.76	618.5	0.002
度 误差	0.041	2	0.021		
总计	95.21	8			

秸秆覆盖量。秸秆覆盖量对土壤扰动比的影响不显著。土壤扰动量与入土深度、前进速度成正相关关系, 其原因是入土深度增加, 装置灭茬刀对土壤的纵切割截面越大, 产生的沟宽加大, 故土壤扰动增大。随着速度的增加, 装置灭茬刀的转速增加, 刀顶部线速度增加, 故破土能力提高。

3 个因素中对种带清洁度影响由大到小依次为: 前进速度、秸秆覆盖量、入土深度。入土深度对种带清洁度影响不显著。种带清洁度与装置前进速度、秸秆覆盖量呈负相关关系, 主要原因是装置速度增加, 种带清理弯刀清理种带内秸秆的时间变短, 导致种带清理不彻底; 当秸秆覆盖量增加, 装置的种带清弯刀的作业量增加, 易导致秸秆漏清, 种带清理度降低。在第 7 组试验中取到最低种床清洁度为 80.19%, 仍比条带灭茬装置作业后的 68.24% 提升了 17.5%; 在第 1 组试验中取到最佳种床清洁度为 90.59%, 最小土壤扰动比为 7.21%。并且种带灭茬清理装置在不同条件下作业过程中, 通过性良好, 多余的长秸秆被清理至行间, 作业性能良好。作业后种床效果如图 16 所示。在播种性能试验中平均合格率可达 95.41%, 晾籽率为 1.05%, 可达到较好

的作业要求。

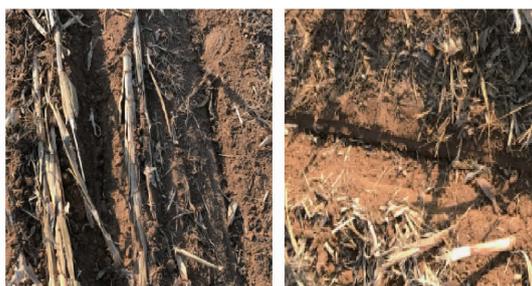


图 16 田间试验种带清理以及土壤扰动效果图

Fig. 16 Picture of strip cleaning and soil disturbance effect in field test

## 4 结论

(1) 设计了种带灭茬清理装置, 阐述了机构的工作原理, 确定了灭茬刀、种带清理弯刀等关键部件的结构与参数, 计算了种带清理弯刀的刃口曲线方程。

(2) 利用离散元仿真, 优化并确定了种带清理弯刀的最优折弯角为  $150^\circ$ , 并通过种带清理度、土

壤扰动量两个作业性能指标对比得出, 种带灭茬清理装置的种带清洁度比传统条带灭茬装置的高, 土壤扰动量小于传统条带灭茬装置。

(3) 通过田间试验, 对比种带灭茬清理装置与传统条带灭茬装置的作业效果, 试验结果表明, 种带灭茬清理装置作业后的种带清洁度为 86.59%, 相较于传统条带灭茬装置作业后的种带清洁度 68.24% 提升了 26.89%; 土壤扰动比平均值为 8.83%, 远小于传统条带灭茬装置的 26.78%。各项试验结果与离散元仿真结果基本一致。

(4) 通过正交试验, 确定了对种带清洁度产生显著影响的因素为前进速度及秸秆覆盖量, 对土壤扰动比产生显著影响的因素为前进速度及入土深度。在秸秆覆盖量为  $0.4 \sim 1.4 \text{ kg/m}^2$ , 机具通过性良好, 种带清洁度均在 80% 以上, 验证了装置在不同作业条件下, 种带清理性能均符合要求, 且播种性能试验中合格率平均值可达 95.41%, 晾籽率平均值仅为 1.05%, 符合播种作业要求。

## 参 考 文 献

- 高焕文, 李问盈, 李洪文. 中国特色保护性耕作技术[J]. 农业工程学报, 2003, 19(3): 1-4.  
GAO Huanwen, LI Wenying, LI Hongwen. Conservation tillage technology with Chinese characteristics[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(3): 1-4. (in Chinese)
- 陈源泉, 李媛媛, 隋鹏, 等. 不同保护性耕作模式的技术特征值及其量化分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 161-167.  
CHEN Yuanquan, LI Yuanyuan, SUI Peng, et al. Technological characteristics and quantitative analysis of different conservation tillage patterns[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 161-167. (in Chinese)
- 贾洪雷, 马成林, 李慧珍, 等. 基于美国保护性耕作分析的东北黑土区耕地保护[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 28-34.  
JIA Honglei, MA Chenglin, LI Huizhen, et al. Tillage soil protection of black soil zone in Northeast of China based on analysis of conservation tillage in the United States[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 28-34. (in Chinese)
- PANDEY D, AGRAWAL M, BOHRA J. Effects of conventional tillage and no tillage permutations on extracellular soil enzyme activities and microbial biomass under rice cultivation[J]. Soil & Tillage Research, 2014, 136: 51-60.
- ZHANG Z, QIANG H, MCHUGH A, et al. Effect of conservation farming practices on soil organic matter and stratification in a mono-cropping system of Northern China[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 156: 173-181.
- 高焕文, 李洪文, 姚宗路. 我国轻型免耕播种机研究[J]. 农业机械学报, 2008, 39(4): 78-82.  
GAO Huanwen, LI Hongwen, YAO Zonglu. Study on the Chinese light no-till seeders[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(4): 78-82. (in Chinese)
- GIAMBALVO D, AMATO G, BADAGLIACCA G, et al. Switching from conventional tillage to no-tillage: soil N availability, N uptake, N-15 fertilizer recovery, and grain yield of durum wheat[J]. Field Crops Research, 2018, 218: 171-181.
- 林静, 钱巍, 牛金亮. 玉米垄作免耕播种机新型切拨防堵装置的设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报, 2015, 46(6): 55-62.  
LIN Jing, QIAN Wei, NIU Jinliang. Design and experiment of stubble-cutting and anti-blocking mechanism for ridge-till and no-till planter[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2015, 46(6): 55-62. (in Chinese)
- 廖庆喜, 高焕文, 王世学, 等. 免耕播种机新型锯切防堵装置的试验研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(6): 91-95.  
LIAO Qingxi, GAO Huanwen, WANG Shixue, et al. Experimental study on sawtooth anti-blocking mechanism for no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(6): 91-95. (in Chinese)
- 王庆杰, 李洪文, 何进, 等. 螺旋刀型垄台清理装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 109-113.  
WANG Qingjie, LI Hongwen, HE Jin, et al. Design and experiment on twist type ridge-clear device[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 109-113. (in Chinese)
- 周春焯. 2BMF-3 型麦茬地免耕精播机防堵装置的设计与试验[J]. 农机化研究, 2018, 40(8): 163-167.  
ZHOU Chunye. The design and experiment of anti-blocking device of 2BMF-3 type no-tillage precision seeder in stubble field[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(8): 163-167. (in Chinese)
- 姚宗路, 高焕文, 王晓燕, 等. 2BMX-5 型小麦-玉米免耕播种机设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(12): 64-68.  
YAO Zonglu, GAO Huanwen, WANG Xiaoyan, et al. Design and experiment on 2BMX-5 no-till wheat-maize seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(12): 64-68. (in Chinese)

- 13 ZHANG Z, MCHUGH A, LI H, et al. Global overview of research and development of crop residue management machinery[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2017, 33(3): 329 - 344.
- 14 李艳梅,陈秧分,刘玉,等. 基于 LMDI 和 EMD 模型的中国玉米产量变化及其波动性研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2015, 51(5): 946 - 954.  
LI Yanmei, CHEN Yangfen, LIU Yu, et al. Evolutive trend of China's corn output and its fluctuation characteristics based on LMDI model and EMD model[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2015, 51(5): 946 - 954. (in Chinese)
- 15 张喜瑞,何进,李洪文,等. 水平拨草轮式玉米免耕播种机设计和试验[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(12): 39 - 43.  
ZHANG Xirui, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment on no-till planter in horizontal residue-throwing finger-wheel type for maize[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(12): 39 - 43. (in Chinese)
- 16 HE J, ZHANG Z, LI H, et al. Development of small/medium size no-till and minimum-till seeders in Asia: a review[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2014, 7(4): 1 - 12.
- 17 王庆杰,何进,姚宗路,等. 驱动圆盘玉米垄作免耕播种机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(6): 68 - 72.  
WANG Qingjie, HE Jin, YAO Zonglu, et al. Design and experiment on powered disc no-tillage planter for ridge-tillage[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(6): 68 - 72. (in Chinese)
- 18 马洪亮,高焕文,李洪文,等. 驱动圆盘刀切断玉米秸秆和根茬的土槽试验[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(5): 47 - 50, 54.  
MA Hongliang, GAO Huanwen, LI Hongwen, et al. Experimental study on corn stalk and rootstalk cutting by driven disc[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(5): 47 - 50, 54. (in Chinese)
- 19 孙峰成,路战远,孟繁盛,等. 内蒙古东北玉米轮作及生态种植面临的问题与对策[J]. *北方农业学报*, 2017, 45(6): 128 - 132.  
SUN Fengcheng, LU Zhanyuan, MENG Fansheng, et al. The problem and countermeasures of maize crop rotation and ecological planting in northeast of Inner Mongolia[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2017, 45(6): 128 - 132. (in Chinese)
- 20 王庆杰,李洪文,何进,等. 凹形圆盘式玉米垄作免耕播种机的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 117 - 122.  
WANG Qingjie, LI Hongwen, HE Jin, et al. Design and experiment on concave disc type maize ridge-till and no-till planter[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(7): 117 - 122. (in Chinese)
- 21 贾洪雷,赵佳乐,姜鑫铭,等. 行间免耕播种机防堵装置设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(18): 16 - 25.  
JIA Honglei, ZHAO Jiale, JIANG Xinming, et al. Design and experiment of anti-blocking mechanism for inter-row no-tillage seeder[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(18): 16 - 25. (in Chinese)
- 22 康建明,李树君,杨学军,等. 正弦指数曲线型开沟刀片结构参数优化[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(11): 91 - 99, 17. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20161112&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161112&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.012.  
KANG Jianming, LI Shujun, YANG Xuejun, et al. Structure parameters optimization of sine exponential curve type ditching blade[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(11): 91 - 99, 17. (in Chinese)
- 23 曲国良,丁为民,彭嵩植. 旋耕弯刀侧切刃曲线分析及新型曲线的推导[J]. *农业机械学报*, 1991, 22(2): 22 - 27.  
QU Guoliang, DING Weimin, PENG Songzhi. Analysis on edge-curves of rotary blades and derivation of new edge-curves[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 1991, 22(2): 22 - 27. (in Chinese)
- 24 王宪良,胡红,王庆杰,等. 基于离散元的土壤模型参数标定方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(12): 78 - 85. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20171209&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171209&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.009.  
WANG Xianliang, HU Hong, WANG Qingjie, et al. Calibration method of soil contact characteristic parameters based on DEM theory[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(12): 78 - 85. (in Chinese)
- 25 冯俊小,林佳,李十中,等. 秸秆固态发酵回转筒内颗粒混合状态离散元参数标定[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(3): 208 - 213. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20150330&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150330&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.030.  
FENG Junxiao, LIN Jia, LI Shizhong, et al. Calibration of discrete element parameters of particle in rotary solid state fermenters[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(3): 208 - 213. (in Chinese)
- 26 UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modelling of tillage: determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil[J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 121: 105 - 117.
- 27 方会敏,姬长英, TAGAR A, 等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(1): 60 - 67. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160109&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160109&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.009.  
FANG Huimin, JI Changying, TAGAR A, et al. Simulation analysis of straw movement in straw-soil-rotary blade system[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(1): 60 - 67. (in Chinese)
- 28 郑侃,何进,李洪文,等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(9): 62 - 72. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160910&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160910&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.010.  
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Research on polyline soil-breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(9): 62 - 72. (in Chinese)
- 29 方会敏,姬长英,张庆怡,等. 基于离散元法的旋耕刀受力分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(21): 54 - 59.  
FANG Huimin, JI Changying, ZHANG Qingyi, et al. Force analysis of rotary blade based on distinct element method[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(21): 54 - 59. (in Chinese)
- 30 邓振伟,于萍,陈玲. SPSS 软件在正交试验设计、结果分析中的应用[J]. *电脑学习*, 2009(5): 15 - 17.