

# 玉米免耕播种机侧置切刀与拨茬齿盘组合清茬装置研究

曹鑫鹏<sup>1,2</sup> 王庆杰<sup>1,2</sup> 李洪文<sup>1,2</sup> 何进<sup>1,2</sup> 卢彩云<sup>1,2</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部河北北部耕地保育农业科学观测试验站, 北京 100083)

**摘要:** 针对我国东北地区在秸秆全量还田条件下进行玉米免耕播种作业时, 种带清茬率低、播种后秸秆在风力作用下被吹回清理后的播种带, 从而造成秸秆回垄的问题, 设计一种侧置切刀与拨茬齿盘组合式清茬装置。通过对清茬装置的切茬性能进行分析, 确定了切茬圆盘类型、尺寸及安装参数; 对拨茬过程中种带秸秆及表土在拨茬齿盘作用下的运动轨迹进行分析, 得出影响清茬率及秸秆回垄的拨茬齿盘主要参数为: 回转半径、曲率半径、拨齿长度。以种带清茬率与秸秆压土量为试验指标, 采用离散元软件 EDEM 进行二次旋转正交组合仿真试验, 确定了拨茬齿盘的最优参数组合为: 回转半径 163 mm、曲率半径 350 mm、拨齿长度 52 mm。采用最佳参数组合进行田间验证试验, 结果表明, 在 20 cm 清茬宽度下, 种带清茬率与秸秆压土量分别为 91.4% 和 5 833 cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, 与仿真结果基本一致, 作业后行间秸秆被种带表土覆盖, 且未出现秸秆回垄现象, 满足免耕播种作业农艺和技术要求。

**关键词:** 免耕播种机; 玉米; 清茬装置; 离散元法

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)03-0036-09

OSID:



## Combined Row Cleaners Research with Side Cutter and Stubble Clean Disk of Corn No-till Seeder

CAO Xinpeng<sup>1,2</sup> WANG Qingjie<sup>1,2</sup> LI Hongwen<sup>1,2</sup> HE Jin<sup>1,2</sup> LU Caiyun<sup>1,2</sup>

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

2. Cultivated Land Conservation Agricultural Science Observation and Experiment Station, Northern Hebei Province, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China)

**Abstract:** According to the existing problems of no-till corn seeding in full straw returning in the northeastern part of China, such as the low stubble removal rate in seeding row, the secondary cover of seeding row after sowing caused by the return of straw under the action of wind, a row cleaner with side cutter and stubble clean disk was developed. The stubble-breaking performance was analyzed to determine the type, size and installation parameters of cutter. Through the analysis of the trajectory of straw and topsoil under the action of stubble clean disk, the main parameters of the stubble clean disk affecting the stubble removal rate and the straw returning were clarified as follows: radius of gyration, radius of curvature and length of teeth. The simulation experiment of quadric rotation orthogonal combination was carried out in discrete element software EDEM, taking the stubble removal rate and the amount of straw covering soil as evaluation indexes, the optimal parameter combination of the stubble clean disk was determined as follows: the radius of gyration was 163 mm, the radius of curvature was 350 mm, and the length of teeth was 52 mm. The best parameter combination was used for field verification test, which showed that the stubble removal rate and the amount of straw covering soil were 91.4% and 5 833 cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> under the 20 cm clear width, which was similar to the simulation results. After the operation of the combine of side cutter and stubble clean disk, the straw between the rows was covered by the topsoil of the row and there was no straw return phenomenon, which satisfied the agronomic and technical requirements of no-till seeding.

**Key words:** no-till seeder; corn; stubble removal device; discrete element method

收稿日期: 2020-06-09 修回日期: 2020-10-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200600)

作者简介: 曹鑫鹏(1996—),男,博士生,主要从事保护性耕作技术与装备研究, E-mail: caoxinpeng@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

## 0 引言

保护性耕作是对农田进行少耕免耕、用作物秸秆覆盖地表,从而减少风蚀和水蚀、提高土壤肥力和抗旱能力的先进农业耕作技术<sup>[1-2]</sup>。东北地区为我国玉米主产区,该地区气温较低,在玉米秸秆全量粉碎还田条件下,秸秆覆盖量大、茎秆粗壮且较难粉碎<sup>[3]</sup>。春季免耕播种时,易造成开沟器等土壤耕作部件的缠绕及堵塞,影响播种作业效果及出苗质量<sup>[4-5]</sup>。另外,播种后秸秆覆盖播种带,导致土壤升温缓慢,延缓玉米出苗、影响后期生长,从而影响了玉米产量<sup>[6-8]</sup>。因此,研究高效的种带清茬装置是该地区推广保护性耕作技术的关键。

目前,东北地区使用的种带清茬装置按照动力来源可分为主动式与被动式两种,其中,被动轮盘式清茬装置具有动力消耗少、保墒效果好、成本低等优点,应用较为广泛。贾洪雷等<sup>[9]</sup>通过仿真分析的方法对影响清茬效果的清茬轮工作参数进行分析,确定了清茬轮最佳工作参数,提高了种带清茬率。王奇等<sup>[10]</sup>通过离散元仿真的方法对星齿凹面盘式清茬防堵装置的结构参数进行分析,确定了星齿凹面盘的最优结构参数组合,在提高种带清茬率的同时降低了作业阻力。林静等<sup>[11]</sup>通过对清茬刀进行运动学分析,确定了切拨防堵装置的最佳作业参数,提高了种带根茬切断及清茬率。现有研究多以提高种带清茬率、降低作业阻力为目标,并未考虑播种作业后秸秆在风力作用下回垄和二次覆盖种带影响免耕播种作业质量的问题。

为此,本文结合东北地区免耕作业秸秆覆盖情况及播种需求,设计一种能够实现秸秆侧向切分及抛掷、种带表土覆盖秸秆的侧置切刀与拨茬齿盘组合式清茬装置,通过理论与多因素离散元仿真试验获得清茬装置的最佳结构参数组合,并通过田间试验对该装置的作业性能进行验证。

## 1 整体结构与工作原理

### 1.1 整体结构

侧置切刀与拨茬齿盘组合式清茬装置主要针对东北地区全量秸秆粉碎还田覆盖条件下玉米免耕播种农艺要求设计。其结构如图1所示,主要由安装架、机架、过载弹簧、缺口切茬圆盘、仿形弹簧、拨茬齿盘和刮土板组成。拨茬齿盘安装在缺口切茬圆盘左后方,独立仿形。

### 1.2 工作原理

如图1所示,清茬装置通过安装架安装在免耕播种机开沟装置前方,拨茬齿盘中心与种带中心对

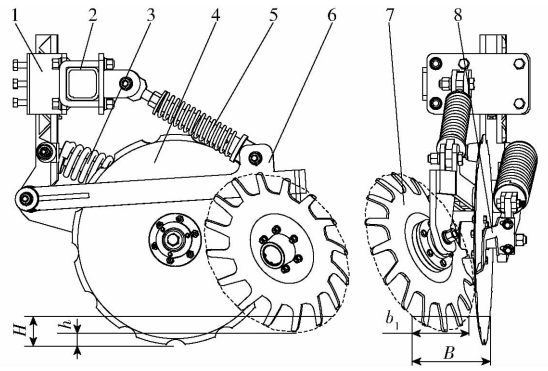


图1 侧置切刀与拨茬齿盘组合式清茬装置结构示意图

Fig. 1 Schematics of row cleaner with side cutter and stubble clean disk

1. 安装架 2. 机架 3. 过载弹簧 4. 缺口切茬圆盘 5. 仿形弹簧 6. 拨茬齿盘 7. 拨茬齿盘 8. 刮土板

齐,沿机具前进方向运动。作业前,根据作业地表情况,调节缺口切茬圆盘入土深度 $H$ 与拨茬齿盘入土深度 $h$ ;作业时,缺口切茬圆盘将种带中心右侧10 cm处秸秆在地表土壤的支撑作用下切断,同时切碎地表硬土并将秸秆及硬土向左上方抛送至拨茬齿盘清理宽度 $b_1$ 范围内,拨茬齿盘齿尖沿切茬圆盘切出土壤位置入土,在地表秸秆及土壤的力矩作用下,绕定轴转动;秸秆及表土在拨茬齿盘的作用下沿其切线方向向种带左侧前方滑移,当秸秆及表土运动到拨茬齿盘外圆方向与地面交点位置时,秸秆及表土在拨茬齿盘的作用下沿凹面切线方向向左前方先后抛出;被侧向抛掷的秸秆在重力与惯性力的作用下先落至种带左侧后被种带表土覆盖。在切茬圆盘的切茬及拨茬齿盘侧向抛茬的作用下,清理出宽度为 $B$ 的清洁种带,同时利用种带表土将侧向抛掷的秸秆覆盖。

## 2 清茬装置设计

### 2.1 侧置切刀机构

目前东北地区播种机多采用拨茬轮清理种带,田间试验发现,仅靠拨茬装置侧推作用无法将长秸秆抛离种带,同时拨茬轮齿较难入土,影响清茬装置作业稳定性;在播种带中心切断秸秆,秸秆易被压入播种带影响清茬率的进一步提高。针对以上问题,设计了侧置切刀机构,主要由图1中的安装架、缺口切茬圆盘、刮土板和过载弹簧组成,可保证切茬圆盘在种带一侧切分地表秸秆的同时破碎并侧推地表硬土,提高拨茬齿盘的作业效果及稳定性。

#### 2.1.1 切刀类型

圆盘式切茬装置结构简单、工作性能稳定且具有较好的滑切性能,因此选用圆盘刀对秸秆残茬进

行切割。缺口圆盘相较于平面圆盘及波纹圆盘,对秸秆残茬的砍切作用较强,入土阻力较小且具有一定的分茬作用<sup>[12]</sup>,最终确定切刀类型为缺口圆盘。

### 2.1.2 切茬圆盘直径

为保证切茬圆盘在秸秆覆盖量较大地表具有良好的通过性,需满足秸秆切割过程中不被切茬圆盘推动,通过静力学分析可知,切茬圆盘需要满足的条件为

$$\arccos\left(1 - \frac{2h_1 + d}{D_1}\right) \leq \varphi_1 + \varphi_2 \quad (1)$$

式中  $D_1$ ——切茬圆盘直径,mm

$h_1$ ——切茬圆盘入土深度,mm

$d$ ——秸秆直径,mm

$\varphi_1$ ——秸秆与地面摩擦角, (°)

$\varphi_2$ ——秸秆与切茬圆盘摩擦角, (°)

结合实地测量取秸秆直径  $d = 35$  mm;为保证稳定切茬效果,切茬圆盘入土深度通常为  $80 \sim 100$  mm<sup>[13]</sup>,本文取最大入土深度  $h_1 = 100$  mm;玉米秸秆与 65Mn 钢摩擦角为  $23^\circ \sim 33^\circ$ ,计算中取最大值  $\varphi_2 = 33^\circ$ <sup>[14]</sup>;针对播种机工作地表情况,秸秆与地面摩擦角  $\varphi_1$  按  $30^\circ$  计算,得圆盘直径  $D_1 \geq 430$  mm。切茬圆盘直径越大,圆盘对秸秆残茬的切割效果越好<sup>[14]</sup>,但是随着圆盘直径增大,圆盘入土压力增大<sup>[15]</sup>,设计中常取  $430 \sim 460$  mm<sup>[5,16]</sup>,为保证切茬圆盘较好的切茬效果,本文取切茬圆盘直径  $D_1 = 460$  mm。

### 2.1.3 切茬圆盘安装

切茬圆盘与前进方向的偏角及与垂直方向的倾角影响切茬圆盘对秸秆侧抛作用、破茬能力及牵引阻力。在一定垂直压力下,随着切茬圆盘倾角的增大,切茬圆盘切茬率降低,且牵引阻力降低。当切茬圆盘的偏角增大时,对秸秆及地表硬土的侧抛作用越明显,有利于拨茬齿盘的侧向拨茬,但相同切茬深度下切茬圆盘所需垂直压力增大。为提高拨茬齿盘的作业效果,选择切茬圆盘安装偏角为  $5^\circ$ ,倾角为  $0^\circ$ <sup>[14,16-17]</sup>。

## 2.2 拨茬齿盘机构

### 2.2.1 运动分析

拨茬齿盘是清茬装置主要工作部件,安装在切茬圆盘侧后方,其盘面与前进方向及垂直方向成一定的角度,作业过程中拨茬齿盘被动旋转,利用拨齿将秸秆及表土抛送至行间,因此拨齿在地表上的运动轨迹直接影响拨茬装置作业质量。假定拨茬过程中拨茬齿盘前进速度为匀速,作业深度保持稳定,对拨茬齿盘拨茬过程进行分析<sup>[13]</sup>。由于拨齿数量较多,现以 4 个均布拨齿为例,建立如图 2 所示的坐标系,  $y$  轴正向为机具前进方向。

拨茬齿盘拨茬过程中,拨茬齿盘在连接支臂的

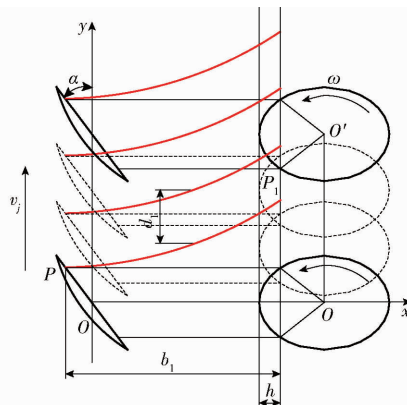


图 2 拨茬齿盘拨茬过程示意图

Fig. 2 Cleaning process of stubble clean disk

拉力和土壤的反作用力下绕安装轴转动,在仿形装置的作用下齿尖入土,齿根位置与地表相切,拨齿边转动边推动秸秆沿地表向侧前方滑移。如图 2 所示,拨茬齿盘与机具前进方向的夹角为  $\alpha$ ,当机器以速度  $v_j$  沿前进方向运动时,拨茬齿盘角速度为  $\omega$ 。作业过程中拨茬齿盘齿尖的绝对运动轨迹为以圆盘中心连线  $OO'$  为回转中心的空间螺旋线,拨茬齿盘旋转一周在地表留下 4 条间距为  $d_1$  的曲线,拨齿自点  $P$  位置开始入土,当到达  $P_1$  位置时拨齿出土,秸秆及表土沿拨茬齿盘曲面切线被抛离种带。

理想状态下拨齿沿地表的绝对运动轨迹即为秸秆与地表土的运动轨迹。如图 3 所示,曲线  $PEP_1$  为在拨齿作用下秸秆与表土沿地表的绝对运动轨迹,其运动过程可分解为:在平面圆盘作用下沿地表的直线滑移  $PG$  及沿凹面圆盘的齿刃滑移  $FE$ ,其中曲线  $FE$  沿地表的投影为直线  $GE$ 。实际拨茬过程中,两种滑移同时发生,无先后顺序<sup>[14]</sup>。

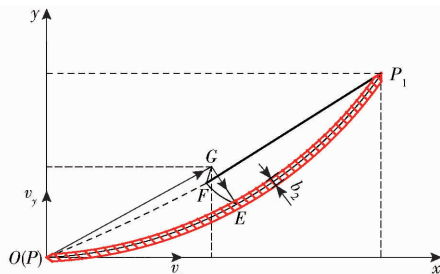


图 3 秸秆与表土运动轨迹分析

Fig. 3 Trajectory of straw and topsoil

拨齿沿地表划过轨迹方程为

$$\begin{cases} x = v_x t + l_{de} \frac{v_x}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} \\ y = v_y t + l_{de} \frac{v_y}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} \\ b_2 = w \sin \alpha \\ d_1 = \frac{2\pi r_c}{n} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $v_x, v_y$ ——拨茬齿盘沿  $x, y$  轴分速度, m/s  
 $l_{de}$ ——齿刃沿地面的投影长度, mm  
 $b_2$ ——地表轨迹宽度, mm  
 $w$ ——拨齿宽度, mm  
 $d_1$ ——相邻拨齿沿地表绝对轨迹间距, mm  
 $r_c$ ——齿根圆半径, mm  
 $n$ ——拨齿数量

由式(2)可知,影响拨齿沿地表运动轨迹的因素有  $\alpha, v_x, v_y, l_{de}, r_c, w, n$ 。

由拨茬齿盘的结构可知

$$\begin{cases} v_x = v_j \sin \alpha \\ v_y = v_j (1 - \cos \alpha) \\ l_{de} = \sqrt{\rho^2 - (r - h)^2 - (r - l \sqrt{v_x^2 + v_y^2})^2} \\ r_c = r - l \\ h = l - \delta_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\rho$ ——曲率半径, mm  
 $r$ ——回转半径, mm  
 $t$ ——时间, s  
 $l$ ——拨齿长度, mm  
 $\delta_1$ ——地表秸秆覆盖厚度, mm

由式(2)、(3)可知,影响拨茬齿盘清茬效果及秸秆压土量的结构参数有:拨茬齿盘回转半径  $r$ 、曲率半径  $\rho$ 、拨齿长度  $l$ 、宽度  $w$ 、齿数  $n$ 。

## 2.2.2 结构参数

### 2.2.2.1 拨茬齿盘轮盘

#### (1) 回转半径与拨齿长度

在地表秸秆覆盖情况相同条件下,拨茬齿盘的清茬宽度如图4所示。

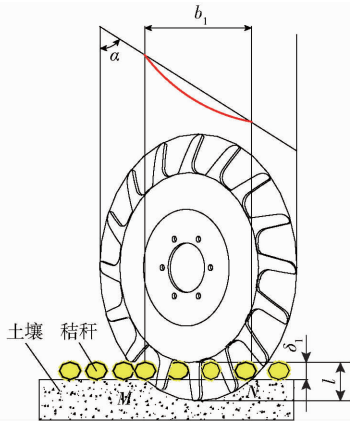


图4 拨茬齿盘清茬宽度示意图

Fig. 4 Cleaning width of stubble clean disk

作业过程中拨茬齿盘与前进方向偏角为  $\alpha$  时,拨茬齿盘理论清茬宽度  $b_1$  为

$$b_1 = l_{MN} \sin \alpha \quad (4)$$

其中  $l_{MN} = \sqrt{r^2 - (r - l + \delta_1)^2}$  (5)

式中  $l_{MN}$ ——拨茬齿盘与地表交点距离, mm

由式(4)、(5)可知,种带清茬宽度  $b_1$  由拨齿长度  $l$  及回转半径  $r$  共同决定,为满足清理指定宽度的种带要求,需选择合适的拨茬齿盘回转半径与拨齿长度。

#### (2) 曲率半径

具有一定曲率的拨茬齿盘对地表秸秆、残茬等覆盖物有侧推作用和翻抛作用,秸秆、残茬及表土可沿曲面上升、抛掷,在秸秆覆盖量较大情况下,拨茬、脱茬及脱土效果更理想<sup>[15]</sup>。

#### (3) 厚度

拨茬齿盘厚度  $\delta_2$  越小,拨齿入土压力越小,但磨损较快且容易插入秸秆,影响作业稳定性。拨茬齿盘的厚度参照现有平面弯齿式拨草轮及圆盘耙在粘重土壤上作业的经验公式<sup>[16]</sup>

$$\delta_2 = 0.016r + 1 \quad (6)$$

式中  $\delta_2$ ——拨茬齿盘厚度, mm

拨茬齿盘厚度取 6 mm。

### 2.2.2.2 拨茬齿盘拨齿

#### (1) 拨齿倾角

按照拨齿与过圆心直线的夹角  $\theta$  的大小,拨茬齿盘拨齿布置形式可分为径向 ( $\theta = 0^\circ$ )、前倾 ( $\theta > 0^\circ$ ) 和后倾 ( $\theta < 0^\circ$ )。当拨齿前倾时,拨茬过程中拨齿 AB 段接触秸秆,秸秆受力如图5所示,为达到拨茬的效果需满足

$$f_1 + f_2 \cos(\varphi - \theta) \leq F \sin(\varphi - \theta) \quad (7)$$

式中  $f_1$ ——地表对秸秆的摩擦力, N

$f_2$ ——拨齿对秸秆的摩擦力, N

$F$ ——拨齿对秸秆的压力, N

$\varphi$ ——某时刻拨齿与地表的夹角, ( $^\circ$ )

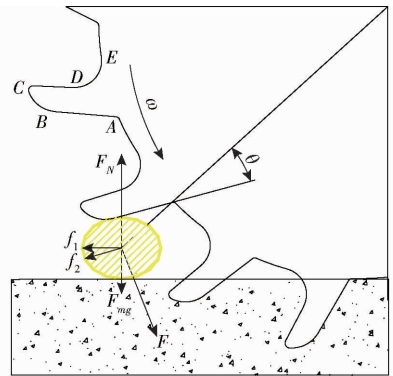


图5 拨茬齿盘拨齿倾角分析

Fig. 5 Angle analysis of teeth on stubble clean disk

由式(7)、图5可知,随着  $\theta$  的减小,拨齿拨动秸秆所需的作用力  $F$  减小,拨齿抛茬作用减小。当  $\theta < 0$  时,在作业过程中秸秆与拨齿会发生自锁,不利于脱茬作业。结合现有的拨茬轮指结构,最终选定拨齿前倾角为  $30^\circ$ 。

## (2) 拨齿宽度

拨齿宽度  $w$  越大, 秸秆与齿尖接触面积越大, 从而增大拨齿的入土压力; 但当拨齿宽度过小时, 拨齿易插入秸秆中, 降低拨齿强度。综合考虑东北地区秸秆直径、拨齿强度及现有免耕拨草轮拨齿宽度, 选择拨齿宽度  $w$  为 16 mm。

## (3) 齿数

拨茬齿盘拨齿齿数  $n$  为

$$n = \frac{2\pi(r-l)}{d_2} \quad (8)$$

式中  $d_2$ ——相邻拨齿间距, mm

拨齿的排列方式如图 6 所示, 拨茬齿盘的齿距需要在保证对秸秆连续拨动、抛送, 防止两个拨齿齿根部分夹秆、漏拨的基础上, 降低拨齿入土压力。由式(8)可知, 拨茬齿盘回转半径  $r$  与齿长  $l$  相同情况下拨齿齿数  $n$  越多, 相邻拨齿间距  $d_2$  越小, 清茬效果越好, 但拨茬齿盘入土压力增大, 且拨齿间距过小时易夹秆, 影响脱茬, 因此需根据拨茬齿盘半径与拨齿长度确定齿数  $n$ 。

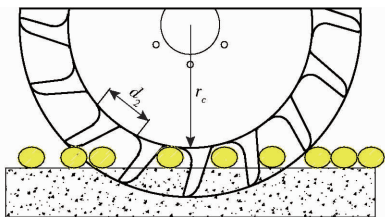


图6 拨茬齿盘拨齿齿形分析

Fig. 6 Shape analysis of teeth on stubble clean disk

### 2.2.3 拨茬齿盘安装

拨茬齿盘的入土深度直接影响其清茬效果及秸秆压土量。现有的免耕拨草轮安装大多以铰接的方式与机架连接, 拨齿的入土深度变化较大, 严重影响拨茬作业质量及稳定性。针对现有的拨茬机构仿形能力较差的问题, 设计的拨茬齿盘仿形机构如图 1 所示, 主要由安装架、仿形弹簧、拨茬齿盘支臂组成。当地表起伏时, 通过弹簧的弹性变形, 实现拨茬齿盘的对地仿形。为达到最佳抛茬效果与合理抛送距离, 确定拨茬齿盘与前进方向偏角为  $37.5^\circ$ , 与竖直方向倾角为  $15^\circ$  [9, 18]。

## 3 仿真分析

为研究清茬防堵装置在东北一年一熟区玉米秸秆覆盖地的清茬作业性能, 分析影响清茬防堵装置作业性能的拨茬齿盘结构参数, 采用离散元软件 EDEM 建立土壤-秸秆仿真模型, 以拨茬齿盘回转半径、曲率半径和拨齿长度为试验因素, 以清茬率和秸秆压土量为评价指标, 进行三因素五水平二次旋转正交组合试验, 从而得到种带清茬装置的最优结构

参数。

### 3.1 土壤秸秆模型的建立

#### 3.1.1 清茬装置模型

清茬装置田间作业过程中, 缺口切茬圆盘与拨茬齿盘为主要作业部件, 因此对清茬装置进行简化处理, 去除仿真过程中无关部件后导入 EDEM 软件中, 如图 7 所示。设置仿真模型的材料为 65Mn 钢, 泊松比为 0.3, 剪切模量为  $7.0 \times 10^{10}$  Pa, 密度为  $7800 \text{ kg/m}^3$ 。

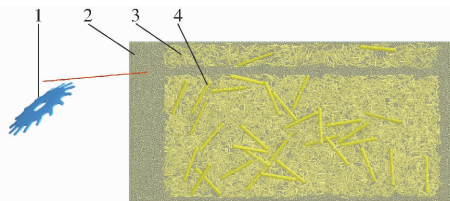


图7 土壤秸秆离散元模型

Fig. 7 Simulation soil bin and geometric model

1. 清茬装置模型 2. 土壤 3. 细碎叶片 4. 茎秆

#### 3.1.2 土壤秸秆模型

为真实地反映田间秸秆与土壤在清茬装置作用下的速度与位移情况, 在 EDEM 中建立土壤模型并覆盖秸秆。选择 Hertz - Mindlin with no slip 模型作为土壤颗粒间接触模型, 其中土壤模型由半径 5 mm 的球形颗粒表示, 建立土槽尺寸(长 × 宽 × 高)为  $1400 \text{ mm} \times 700 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 土壤厚度为 100 mm, 土壤密度  $2650 \text{ kg/m}^3$ 。土槽高度与土壤厚度相同, 保证土槽边缘不影响秸秆的运动。

图 7 所示为初始状态时地表覆盖情况, 通过对收获机粉碎后地表覆盖物进行分析发现, 播种期地表覆盖物主要分为细碎叶片及茎秆两大类。因此仿真试验中按两种覆盖物的平均尺寸及质量分布分别生成尺寸为  $3 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 39 \text{ mm}$  的叶片共 487 g, 及尺寸(长轴 × 短轴 × 高)为  $13.5 \text{ mm} \times 17 \text{ mm} \times 170 \text{ mm}$  椭圆形截面玉米茎秆共 521 g。为加快仿真速度, 初始状态时默认切茬圆盘将秸秆切断, 因此以切茬圆盘为中心, 两侧分别预留宽度为 20 mm 无秸秆覆盖区域, 其中玉米秸秆密度  $243 \text{ kg/m}^3$ , 秸秆覆盖量为  $1.2 \text{ kg/m}^2$ 。根据文献 [10, 19 - 21] 得到仿真材料间接触参数如表 1 所示。

### 3.2 仿真试验方法

根据玉米免耕播种作业情况, 设置清茬装置作业速度为  $6 \text{ km/h}$ , 切茬圆盘入土深度为 80 mm, 拨茬齿盘齿根距土槽上表面 30 mm。通过预试验确定保证仿真准确性的固定时间步长为  $8.2 \times 10^{-5} \text{ s}$ , 总仿真时间为 1.2 s。以上文理论分析中选定的拨茬齿盘回转半径  $r$ 、曲率半径  $\rho$ 、拨齿长度  $l$  为试验因素, 以清茬装置种带清茬率与秸秆压土量为试验指标,

表 1 仿真试验材料接触参数

Tab.1 Material contact parameters of simulation

材料	恢复系数	静摩擦因数	动摩擦因数
秸秆-65Mn 钢	0.3	0.30	0.01
秸秆-土壤	0.5	0.30	0.05
秸秆-秸秆	0.3	0.65	0.06
土壤-65Mn 钢	0.6	0.60	0.30
土壤-土壤	0.6	0.35	0.17

采用三因素五水平二次旋转正交组合试验,确定各因素及其交互作用对试验指标的影响,优化拨茬齿盘最佳参数组合,试验因素编码如表 2 所示。

表 2 试验因素编码

Tab.2 Experimental factors codes

编码	因素		
	回转半径 $x_1$ /mm	曲率半径 $x_2$ /mm	拨齿长度 $x_3$ /mm
-1.682	160.0	300.0	40.0
-1	178.2	401.3	48.1
0	205.0	550.0	60.0
1	231.8	698.7	71.9
1.682	250.0	800.0	80.0

### 3.2.1 种带清茬率测定

目前国内对于免耕作业机具清茬效果的测定主要通过清茬率来确定。仿真试验中通过修改仿真区域的大小,提取清茬装置作业前后 20 cm 宽度种带内秸秆颗粒质量的变化来计算清茬装置清茬率,如图 8 所示。

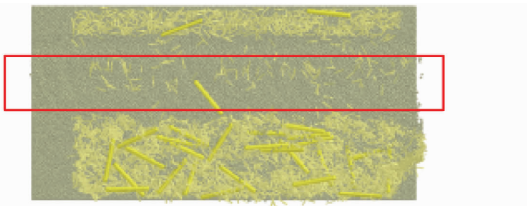


图 8 种带清茬率计算区域

Fig.8 Calculation area of stubble removal rate

### 3.2.2 秸秆压土量测定

秸秆压土量通过调整仿真区域,提取仿真结束后种带间土槽上表面土壤颗粒数量,计算得

$$V = \frac{n_1}{n_0} V_0 \quad (9)$$

式中  $V$ ——秸秆总压土量,  $\text{cm}^3$

$V_0$ ——土槽总体积,  $\text{cm}^3$

$n_1$ ——土槽上表面颗粒数量

$n_0$ ——土槽总颗粒数量

### 3.3 仿真结果分析

侧置切刀与拨茬齿盘组合式清茬装置的试验结果如表 3 所示,应用 Design-Expert 软件进行数据处理和统计分析。

表 3 试验方案与结果

Tab.3 Schemes and results of tests

试验 编号	试验因素			试验指标	
	回转 半径	曲率 半径	拨齿 长度	清茬率 $Y_1/\%$	秸秆压土 量 $Y_2/$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ )
	$x_1/\text{mm}$	$x_2/\text{mm}$	$x_3/\text{mm}$		
1	178.2	401.3	48.1	91.6	5 425
2	178.2	698.7	48.1	90.0	4 404
3	231.8	401.3	48.1	89.0	6 769
4	231.8	698.7	48.1	86.4	6 010
5	178.2	401.3	71.9	88.3	10 106
6	178.2	698.7	71.9	90.8	5 260
7	231.8	401.3	71.9	83.0	14 435
8	231.8	698.7	71.9	83.0	13 367
9	205.0	300.0	60.0	87.5	9 008
10	205.0	800.0	60.0	89.1	7 960
11	160.0	550.0	60.0	91.7	6 115
12	250.0	550.0	60.0	87.7	10 888
13	205.0	550.0	40.0	88.3	4 729
14	205.0	550.0	80.0	86.6	13 085
15	205.0	550.0	60.0	89.1	8 000
16	205.0	550.0	60.0	87.4	8 998
17	205.0	550.0	60.0	87.4	7 679
18	205.0	550.0	60.0	87.4	7 663
19	205.0	550.0	60.0	88.2	8 988
20	205.0	550.0	60.0	89.1	7 702
21	205.0	550.0	60.0	89.9	8 715
22	205.0	550.0	60.0	89.9	7 831
23	205.0	550.0	60.0	86.5	7 529

### 3.3.1 回归分析与显著性检验

对试验结果进行二次回归分析,并进行多元回归拟合,得到试验指标种带清茬率  $Y_1$  与秸秆压土量  $Y_2$  的回归方程,并检验其显著性。

种带清茬率  $Y_1$  方差分析如表 4 所示,由表可知,试验整体模型极显著 ( $P < 0.01$ )。回转半径  $x_1$  与拨齿长度  $x_3$  影响极显著,其他各项不显著,回转半径对种带清茬率的影响大于拨齿长度。剔除交互项与二次项中的不显著因素,得到种带清茬率  $Y_1$  回归方程

$$Y_1 = 107.95 - 0.07x_1 - 4.88 \times 10^{-4}x_2 - 0.09x_3 \quad (10)$$

表 4 种带清茬率方差分析

Tab.4 Variance analysis of stubble removal rate

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	65.62	3	21.87	9.79	0.000 4
$x_1$	49.60	1	49.60	22.19	0.000 2
$x_2$	0.072	1	0.072	0.032	0.859 6
$x_3$	15.95	1	15.95	7.14	0.015 1
残差	42.46	19	2.23		
失拟差	30.39	11	2.76	1.83	0.200 2
总和	108.09	22			

秸秆压土量  $Y_2$  方差分析如表 5 所示,由表可知,试验整体模型显著 ( $P < 0.01$ )。回转半径  $x_1$ 、曲率半径  $x_2$ 、拨齿长度  $x_3$ 、回转半径与拨齿长度的交互项  $x_1x_3$  对压土量  $Y_2$  的影响极显著。剔除不显著因素,得到种带清茬率  $Y_2$  回归方程

$$Y_2 = 30\,764.94 - 4.66x_1 - 159.51x_2 - 550.80x_3 + 3.73x_1x_3 \quad (11)$$

表 5 秸秆压土量方差分析

Tab. 5 Variance analysis of straw covering soil amount

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	$1.457 \times 10^8$	4	$3.642 \times 10^7$	54.14	<0.000 1
$x_1$	$4.014 \times 10^7$	1	$4.014 \times 10^7$	59.68	<0.000 1
$x_2$	$6.548 \times 10^6$	1	$6.548 \times 10^6$	9.73	0.005 9
$x_3$	$8.773 \times 10^7$	1	$8.773 \times 10^7$	130.44	<0.000 1
$x_1x_3$	$1.125 \times 10^7$	1	$1.125 \times 10^7$	16.72	0.000 7
残差	$1.211 \times 10^7$	18	$6.726 \times 10^5$		
失拟差	$9.204 \times 10^6$	10	$9.204 \times 10^5$	2.54	0.100 2
总和	$1.578 \times 10^8$	22			

### 3.3.2 结果分析与参数优化

通过对数据的处理得出各因素及其交互项对种带清茬率与秸秆压土量的影响,通过仿真试验确定各因素对试验指标影响机理。

对于种带清茬率  $Y_1$ ,在选定回转半径与拨齿长度范围内,种带清茬率与拨茬齿盘回转半径及拨齿长度呈负相关。随着拨齿长度的增加,秸秆沿拨齿齿间漏拨的几率增加。随回转半径的增大,切茬圆盘与拨茬齿盘回转中心距离增加,缺口切茬圆盘对清茬作业的辅助作用降低;切茬圆盘、拨茬齿盘与地面交线距离增加,造成漏清区,限制清茬率的提高。玉米免耕播种作业中种带清茬率越高,种带秸秆越少,对玉米生长影响越小。

对于秸秆压土量  $Y_2$ ,选定回转半径、曲率半径及拨齿长度范围内,曲率半径与秸秆压土量呈负相关,回转半径与拨齿长度对秸秆压土量存在交互作用。当回转半径一定时,秸秆压土量与拨齿长度呈正相关;当拨齿长度一定时,秸秆压土量与回转半径呈正相关。曲率半径减小,种带土壤更易沿曲面上升,秸秆压土量增大;随拨齿长度与回转半径增加,单位宽度内的拨茬齿盘拨齿入土投影面积增大,秸秆压土量增大,对种床地表干土的清理效果增加。秸秆压土量越大,秸秆被风吹回种带的可能越小,但种带抛土量过大造成种带与种带间高度差,不利于地温的提升,影响前期种子出苗。

为获得该种带清茬装置的最优结构参数组合,对试验因素进行优化设计,遵循提高种带清茬率、保证秸秆压土量的原则,根据播种机实际作业条件及

理论分析选择优化的约束条件,建立目标及约束函数

$$\begin{cases} \max Y_1(x_1, x_2, x_3) \\ 5\,000 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \leq Y_2(x_1, x_2, x_3) \leq 10\,000 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \\ \text{s. t.} \begin{cases} 160 \text{ mm} \leq x_1 \leq 250 \text{ mm} \\ 300 \text{ mm} \leq x_2 \leq 800 \text{ mm} \\ 40 \text{ mm} \leq x_3 \leq 80 \text{ mm} \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

对目标函数中参数进行优化求解,得到多种参数组合。考虑到实际作业要求,得到的最优组合为:拨茬齿盘回转半径 163 mm、曲率半径 350 mm、拨齿长度 52 mm,种带清茬率为 91.8%,秸秆压土量为  $5\,190 \text{ cm}^3/\text{m}^2$ 。根据所优化的结果进行虚拟验证试验,其清茬率为 91%,秸秆压土量为  $5\,259 \text{ cm}^3/\text{m}^2$ ,与优化结果基本一致。

## 4 田间试验

为验证上述理论分析及仿真试验的准确性并测定侧置切刀与拨茬齿盘组合式清茬防堵装置的田间作业性能,于 2020 年 5 月在辽宁省抚顺市清原满族自治县进行玉米播种试验,试验地土壤质地为黑壤土,试验地常期春玉米连作,秋季采用自走式玉米联合收获机收获的同时将秸秆进行全量粉碎还田,播种试验期间日平均气温  $16 \sim 22^\circ\text{C}$ ,无降水,试验区田间地况主要参数如表 6 所示。

表 6 田间试验主要参数

Tab. 6 Main parameters of field tests

	参数	数值
地表秸秆	茎秆平均长度/mm	170
	覆盖厚度/mm	40
	平均直径/mm	17
	覆盖量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	1.0
0~100 mm 土层	含水率/%	4.07
	坚实度/MPa	411
	含水率/%	11.02
	容重/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	1.31
作业参数	播种深度/cm	2
	作业面积/ $\text{hm}^2$	6

加工试制侧置切刀与拨茬齿盘组合式清茬装置,拨茬齿盘结构参数选取仿真分析优化后结果:回转半径为 163 mm,曲率半径为 350 mm,拨齿长度、宽度、齿数分别为 52 mm、16 mm、19。清茬装置安装在玉米免耕播种机播种单体前方,拨茬齿盘中心正对种带中心。试验前根据土壤紧实度与秸秆覆盖情况调节切茬圆盘入土深度与拨茬齿盘仿形弹簧预紧力,保证缺口切茬圆盘将秸秆切断,拨茬齿盘拨齿入土,田间试验现场如图 9 所示。



图9 田间试验现场

Fig.9 Platform experiment site

每次试验结束后,对种带及种带两侧秸秆及土壤分布进行测量。测量区域划分如图10所示,图中红色线与种带中心对齐,由于秸秆单侧抛掷,因此在作业区内随机选择种带左侧长度40 cm,右侧长度20 cm、宽度15 cm的测量区,将测量区划分为长度5 cm、宽度15 cm共计10个测量小区,分别取样测量每个小区内的秸秆质量、表土质量。作业后在作业区随机选取3个测量点取平均值,通过对比作业前后种带秸秆覆盖质量与种带间土壤质量的变化计算种带清茬率与秸秆压土量,其中种带土壤分布测量以种带最低点为零点,种带间土壤分布测量以未耕作地表为零点。



图10 试验数据测量方式

Fig.10 Measuring method of test data

试验结果如图11所示,秸秆及种带表土向横坐标轴正向抛掷。

由图11可知,在切茬圆盘与拨茬齿盘的作用下,种带秸秆及表土被侧向抛掷,作业完成后种带右侧秸秆被表土覆盖,种带左侧表土堆积且高于种带,有利于抑制秸秆回垄现象。当作业速度为6 km/h时,20 cm宽种带清茬率为91.4%,种带间地表秸秆

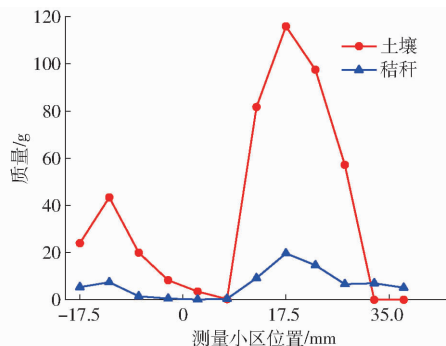


图11 作业后地表秸秆及土壤分布

Fig.11 Straw and topsoil distribution after operation

压土量为 $5\ 833\ \text{cm}^3/\text{m}^2$ ,其中秸秆压土量误差较大,较仿真试验增加10.9%,可能是由于仿真过程中土壤颗粒半径较大,同时土壤模型未考虑颗粒间粘结力造成。田间试验结果表明,侧置切刀与拨茬齿盘组合式清茬装置满足东北地区对玉米播种种带清茬率要求,且能实现对秸秆的侧抛及表土覆盖,播种作业后秸秆未出现被风吹回已清理播种带现象。

## 5 结论

(1)设计一种适用于东北地区玉米免耕播种的侧置切刀与拨茬齿盘组合式清茬装置,该装置通过缺口切茬圆盘对种带一侧秸秆进行切分,使用拨茬齿盘将种带秸秆拨离,并利用种带表土将秸秆掩埋覆盖,明显抑制了秸秆回垄现象。

(2)通过对拨茬过程中拨齿沿地表的运动轨迹进行分析,确定影响拨茬齿盘作业性能的主要结构参数为回转半径、曲率半径及拨齿长度。以种带清茬率和秸秆压土量为试验指标,对各影响因素进行二次旋转正交组合仿真试验,得出拨茬齿盘的最优参数组合为:回转半径163 mm、曲率半径350 mm、拨齿长度52 mm。

(3)田间试验表明,侧置切刀与拨茬齿盘组合式清茬装置清茬效果较好,对种带间秸秆的掩埋压土效果明显,在20 cm清茬宽度下,种带清茬率91.4%、秸秆压土量为 $5\ 833\ \text{cm}^3/\text{m}^2$ ,与仿真结果基本一致。

## 参 考 文 献

- [1] KASSAM A, FRIEDRICH T, DERPSCH R, et al. Overview of the worldwide spread of conservation agriculture[J]. Field Actions Science Reports, 2015, 8: 1-11.
- [2] 何进,李洪文,陈海涛,等.保护性耕作技术与机具研究进展[J/OL].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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1-19. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180401&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180401&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.001. (in Chinese)
- [3] 包文育.东北垄作免耕播种机关键部件研究与整机设计[D].沈阳:沈阳农业大学,2009. BAO Wenyu. Study on key parts and holistic device of the no-till planter of the ridge cropping system in northeast area of China [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2009. (in Chinese)



- [4] 林静, 李博, 李宝筏, 等. 阿基米德螺旋线型缺口圆盘破茬刀参数优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 118-124.  
LIN Jing, LI Bo, LI Baofa, et al. Parameter optimization and experiment on Archimedes spiral type of gap cutting disc [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 118-124. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140619&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140619&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.019. (in Chinese)
- [5] 王超, 刘从京, 李洪文, 等. 非对称式大小圆盘开沟装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 28-36.  
WANG Chao, LIU Congjing, LI Hongwen, et al. Design and experiment of asymmetric large-small double discs ditching device [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 28-36. (in Chinese)
- [6] 方旭飞. 种植模式和覆盖方式对土壤水分和玉米生长指标的影响及效益分析[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.  
FANG Xufei. Effects of the soil moisture and the growth index of maize and benefit analysis under the different mulching methods and planting pattern [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [7] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 65-75. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180508&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180508&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.008. (in Chinese)
- [8] 郭宗凯, 林中冠, 孙艳云, 等. 温度胁迫对玉米种子萌发出苗的影响[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(2): 147-152.  
GUO Zongkai, LIN Zhongguan, SUN Yanyun, et al. The effect of the temperature stress on the corn seed germination and emergence [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(2): 147-152. (in Chinese)
- [9] 贾洪雷, 刘行, 余海波, 等. 免耕播种机凹面爪式清茬机构仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 68-77.  
JIA Honglei, LIU Hang, YU Haibo, et al. Simulation and experiment on stubble clearance mechanism with concave claw-type for no-tillage planter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 68-77. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20181108&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181108&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.008. (in Chinese)
- [10] 王奇, 贾洪雷, 朱龙图, 等. 免耕播种机星齿凹面盘式清茬防堵装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 68-77.  
WANG Qi, JIA Honglei, ZHU Longtu, et al. Design and experiment of star-toothed concave disk row cleaners for no-till planter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 68-77. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190208&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190208&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.008. (in Chinese)
- [11] 林静, 钱巍, 牛金亮. 玉米垄作免耕播种机新型切拔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)
- [12] 杨帆, 李问盈. 免耕播种机防堵装置的设计[J]. 农机化研究, 2009, 31(7): 59-61.  
YANG Fan, LI Wenying. The design of anti-blocking device of no tillage planter [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(7): 59-61. (in Chinese)
- [13] 梁宁. 免耕播种机缺口圆盘刀设计与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.  
LIANG Ning. Design and numerical simulation of gap cutting coulter for no-till planter [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [14] 庄健, 贾洪雷, 马云海, 等. 具有滑刀式缺口的圆盘开沟器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊1): 83-88.  
ZHUANG Jian, JIA Honglei, MA Yunhai, et al. Design and experiment of sliding-knife-type disc opener [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Suppl. 1): 83-88. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2013s116&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s116&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.016. (in Chinese)
- [15] 白晓虎, 林静, 吕长义, 等. 免耕播种机圆盘破茬刀工作性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 1-9.  
BAI Xiaohu, LIN Jing, LÜ Zhangyi, et al. Analysis and experiment on working performance of disc coulter for no-tillage seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(15): 1-9. (in Chinese)
- [16] 马洪亮, 高焕文, 李洪文, 等. 斜置驱动圆盘免耕播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2006, 37(5): 45-47.  
MA Hongliang, GAO Huanwen, LI Hongwen, et al. Design and experiment of no-till planter with oblique driven disc [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(5): 45-47. (in Chinese)
- [17] 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(29): 104304.
- [18] 王奇. 行间清耕整关键技术与条带耕整机研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.  
WANG Qi. Research on key technologies of inter-row clean-tillage and its strip-till machine [D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)
- [19] 方会敏. 基于离散元法的秸秆-土壤-旋耕刀相互作用机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.  
FANG Huimin. Research on the straw-soil-rotary blade interaction using discrete element method [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [20] 郑智旗. 玉米秸秆捡拾粉碎沟理还田机研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.  
ZHENG Zhiqi. Study on corn straw pickup-chopping and ditch-burying returning field machine [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [21] ZENG Zhiwei, CHEN Ying. Simulation of straw movement by discrete element modelling of straw-sweep-soil interaction [J]. Biosystems Engineering, 2019, 180(2): 25-35.