

# 螺旋切分式种带清理装置设计与试验

于畅畅<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> 刘慧<sup>3</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实验站, 北京 100083;  
3. 北京市延庆区农业农村局, 北京 102100)

**摘要:** 针对东北地区免耕播种时易出现秸秆堵塞等问题, 本研究设计一种螺旋切分式种带清理装置。通过理论分析, 确定了清茬刀的排布方式和清茬刀刃口曲线参数, 并得到影响种带清理效果的主要因素: 拖拉机前进速度、螺旋切分式种带清理装置转速和螺距。在离散元软件 EDEM 中建立螺旋切分式种带清理装置仿真模型, 以种带清秸率为试验指标, 以前进速度、转速和螺距为试验因素, 进行了二次回归组合仿真试验, 建立了种带清秸率的回归模型, 结果表明, 前进速度、转速和螺距对种带清秸率影响极显著 ( $P < 0.01$ ), 其中转速影响最为显著。利用 Design-Expert 软件对影响因素进行优化求解, 得到最优参数组合为: 前进速度 2 m/s、转速 400 r/min、螺距 570 mm, 最佳组合下种带清秸率为 92.55%。在最优参数下进行了田间验证试验, 试验种带清洁率比仿真减少了约 2.89 个百分点, 基本满足玉米免耕播种的要求。该研究为东北地区免耕播种机秸秆清理与防堵装置的研究提供了参考。

**关键词:** 免耕播种; 种带清理; 螺旋切分; 离散元仿真; 防堵

**中图分类号:** S223.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0212-08

## Design and Experiment of Spiral-split Sowing Strip Cleaning Device

YU Changchang<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> LIU Hui<sup>3</sup>

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

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

3. Yanqing District Bureau of Agriculture and Rural Affairs of Beijing Municipality, Beijing 102100, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of clogging of straw when no-tillage sowing in Northeast China, a spiral-split sowing strip cleaning device was designed. The arrangement of the stubble blade and the parameters of the blade curve were determined through theoretical analysis, and the main factors that affected the cleaning effect of the sowing strip were obtained: forward speed of tractor, rotating speed of spiral-split sowing strip cleaning device and pitch. The simulation model of spiral-split sowing strip cleaning device was established in EDEM, which was a discrete element software. Quadratic regression general combination experiments were conducted in EDEM by taking the sowing strip straw removing rate as the evaluation index, forward speed, rotating speed and pitch as the test factors. The simulation experiment results were assessed by analysis of variance (ANOVA) and quadratic regression model was set up by response surface methodology with Design-Expert. Analyses showed that forward speed, rotating speed and pitch had extremely significant effect ( $P < 0.01$ ), and rotating speed had a greater influence than other factors. The optimizing function of Design-Expert was used for optimization. The result showed that when forward speed was 2 m/s, rotating speed was 400 r/min and pitch was 570 mm, the sowing strip straw removing rate had optimal result, which was 92.55%. Verification field experiment was carried out to testify the regression models by using the optimal combination of parameters. The experiment value of sowing strip straw removing rate was decreased by 2.89 percentage points compared with predicted value, meeting the requirements of no-till seeding. The research result provided a

收稿日期: 2020-08-10 修回日期: 2020-09-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200600)

作者简介: 于畅畅(1994—),男,博士生,主要从事保护性耕作与智能农业装备研究, E-mail: yuchang@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与智能农业装备研究, E-mail: wangqingjie@cau.edu.cn

reference for the research on straw cleaning and anti-blocking device of no-tillage seeder in Northeast China.

**Key words:** no-tillage sowing; sowing strip cleaning; spiral-split; discrete element simulation; anti-clogging

## 0 引言

保护性耕作是一种将农作物秸秆覆盖在地表,对农田进行免耕、少耕的先进农业耕作技术,具有减少风蚀、水蚀,提高土壤肥力和抗旱能力等优点<sup>[1-2]</sup>,其中,免少耕播种是实施保护性耕作技术的关键环节。东北地区玉米生长期长,秸秆量大,在进行免少耕播种时易出现秸秆、残茬堵塞播种机的问题,严重影响播种效果及出苗质量<sup>[3-4]</sup>,同时,种带秸秆覆盖量较大不利于地温提升,影响种子发芽和出苗。因此,研究可靠有效的秸秆清理与防堵装置很有必要。

按照驱动方式不同,秸秆清理与防堵装置主要分为被动式和主动式。对于被动式秸秆清理与防堵装置,贾洪雷等<sup>[5]</sup>研究了凹面爪式清茬机构,通过清茬机构爪齿将秸秆抛向侧后方;王奇等<sup>[6]</sup>研究了星齿凹面盘式清秸防堵装置,通过理论分析、离散元仿真和试验确定了清秸防堵装置的最优参数;林静等<sup>[7-8]</sup>研究了阿基米德螺旋线型缺口圆盘破茬刀,通过对缺口形状参数的研究与优化,验证了其破茬效果的优越性。被动式秸秆清理与防堵装置多采用破茬刀或清茬轮的被动转动实现秸秆的切割与清理,秸秆量较少时作业效果良好,但秸秆量较大时堵塞问题较为严重。对于主动式秸秆清理与防堵装置,陈海涛等<sup>[9]</sup>研究了针对大垄玉米原茬地的免耕播种机防堵装置,作业后大垄上形成清洁的双行播种带;侯守印等<sup>[10]</sup>、陈海涛等<sup>[11]</sup>提出采用秸秆侧向抛洒的方式,通过螺旋刀组的循环打击,将秸秆运输并抛洒至清秸装置侧向;卢彩云等<sup>[12-13]</sup>研究了滑板压秆旋切式防堵装置和作业时秸秆的摩擦特性,相比带状旋耕防堵装置,土壤扰动量减少。主动式秸秆清理与防堵装置通过提供主动动力驱动清茬机构,将秸秆与土壤混合或侧抛,在秸秆覆盖量较大的情况下依然适用,但土壤扰动量、功耗较大,且侧向抛洒清茬轮作业后地表不平整。

针对东北地区免耕播种时存在秸秆堵塞等问题,结合螺旋输送特点,本文提出一种螺旋切分式种带清理装置。通过理论分析,确定种带清理装置关键部件的参数;采用离散元方法建立螺旋切分式种带清理装置仿真模型,进行二次回归组合仿真试验,确定最佳结构参数与工作参数,并通过田间试验

证仿真结果,以期为东北地区免耕播种机秸秆清理与防堵装置的研究提供参考。

## 1 整体结构与工作原理

### 1.1 整体结构

螺旋切分式种带清理装置的总体结构如图1所示,主要由缺口圆盘、螺旋刀辊、清茬刀、刀轴、刀轴法兰、侧板 I 和侧板 II 组成。其中,刀轴与刀轴法兰焊接在一起,并通过螺栓将刀轴法兰与侧板 I、缺口圆盘固定,螺旋刀辊与侧板 I 焊接在一起,侧板 II 通过螺栓与螺旋刀辊固定,从而实现刀轴与螺旋刀辊、缺口圆盘的同步转动。清茬刀按照螺旋线均匀的分布在螺旋刀辊上,缺口圆盘左右各排布 4 组刀组且螺旋旋向相反,每组安装 4 把清茬刀。清茬刀入土深度为 40 mm,能同时清除表层土壤和秸秆,有利于地温升高,对于提高东北等气温较低区域免耕播种的质量有重要意义。

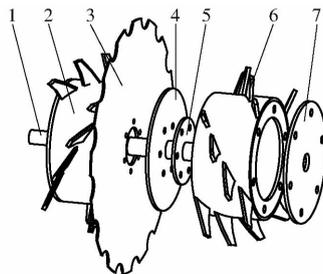


图1 螺旋切分式种带清理装置结构图

Fig.1 Structure diagram of spiral-split sowing strip cleaning device

1. 刀轴 2. 螺旋刀辊 3. 缺口圆盘 4. 侧板 I 5. 刀轴法兰  
6. 清茬刀 7. 侧板 II

### 1.2 工作原理

该螺旋切分式种带清理装置安装在免耕播种机前方,沿机具前进方向运动,并与机具后方的播种单体在同一直线上,实现播种单体在螺旋切分式种带清理装置作业后形成的清洁种带上的播种作业。工作时,刀辊的旋转方向与机具前进方向相同,转动的缺口圆盘可对地表秸秆与地下的根茬进行切割,从而在螺旋切分式种带清理装置中间形成一条断裂的秸秆分界线,被缺口圆盘切断后的秸秆在按螺旋排布的清茬刀的作用下,分别向左右两侧输送,从而形成以缺口圆盘为中心线的一定宽度的清洁种带,实现对秸秆、根茬的切割与清理。螺旋切分式种带清理装置的动力可由拖拉机的后输出轴、电机或液压

马达提供。

## 2 种带清理装置关键部件设计

### 2.1 清茬刀排布方式与参数确定

为了得到一定宽度的清洁播种带,本研究利用螺旋旋转时具有轴向输送物料的功能,通过左旋向螺旋和右旋向螺旋的对称排布将缺口圆盘切割断裂的秸秆分别输送到两侧,从而实现秸秆的清理。其中,清茬刀的螺旋排布方式的具体参数是影响种带清理效果的关键因素,因此,有必要对螺旋排布的相关参数进行研究。

在不考虑物料在螺旋内与螺旋面的摩擦和压缩,并且物料轴向运动速度等于叶片轴向推移速度的情况下,等距单螺旋的流量计算公式<sup>[14-15]</sup>为

$$Q = \frac{60\pi}{4} D^2 \rho_1 \varphi S_1 n_1 CK \quad (1)$$

式中  $Q$ ——单位时间内物料输送量,kg/h  
 $D$ ——螺旋直径,m  
 $\rho_1$ ——物料密度,kg/m<sup>3</sup>  
 $\varphi$ ——填充率,%  $S_1$ ——螺距,m  
 $n_1$ ——螺旋转速,r/min  
 $C$ ——倾斜输送修正系数  
 $K$ ——螺旋叶片影响系数

由式(1)可知,在物料类型及安装角一定的情况下,影响单位时间内物料输送量的主要因素有螺旋直径、转速和螺距,且成正比关系,即螺旋直径、转速和螺距越大,单位时间内物料输送量也越大,因此,在满足安装及其他影响要素的同时,螺旋切分式种带清理装置的清茬刀在按螺旋排列时螺旋直径、转速和螺距应尽量大。

本文螺旋切分式种带清理装置上的缺口圆盘选用免耕播种机上常用的直径为460 mm、材料为65Mn钢的缺口圆盘。根据前期调研,东北地区玉米根茬深度一般为100~120 mm,因此,确定螺旋刀辊直径为220 mm,计算可得螺旋切分式种带清理装置缺口圆盘的入土深度为120 mm,能够满足对根茬进行切割的要求。为了改善东北地区地温低、墒情差、不利于玉米种子发芽和幼苗生长等问题,可将播种带上的秸秆清理干净并将表层土壤除去,使播种带区域得到充足的阳光照射,促使地温升高,另外,考虑到土壤扰动量不宜过大,因此,清茬刀可以适当地入土并将表层土输送到两侧,本文取清茬刀入土深度为40 mm。清茬刀按螺旋方式安装在螺旋刀辊上,且螺旋刀辊在实际工作中起到限深的作用,因此,入土深度即为清茬刀长度,从而确定了螺旋切分式种带清理装置的螺旋直径为300 mm。

螺旋切分种带清理装置上的清茬刀工作时是以铣切原理进行切割土壤与秸秆,使得螺旋刀辊上同一回转平面内的清茬刀切割土壤与秸秆的过程是间歇的。参考旋耕机切土节距的定义<sup>[16]</sup>,螺旋切分式种带清理装置上清茬刀作业时切土节距计算公式为

$$S = vt \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} t = \frac{\theta}{\omega} \\ \theta = \frac{2\pi}{Z} \\ \omega = 120\pi n \end{cases} \quad (3)$$

式中  $S$ ——清茬刀切土节距,m

$v$ ——机具前进速度,m/s

$t$ ——同一安装平面内相邻清茬刀的间隔时间,s

$\theta$ ——同一安装平面内相邻清茬刀安装角,rad

$Z$ ——同一安装平面内均匀安装的清茬刀片数

$\omega$ ——清茬刀转动角速度,rad/s

$n$ ——清茬刀转速,r/min

化简式(2)可得

$$S = \frac{60v}{Zn} \quad (4)$$

由式(4)可知,切土节距  $S$  随机具前进速度的增大而变大,随清茬刀转速和同一安装平面内均匀安装的清茬刀片数成反比。一般来说,切土节距  $S$  越小越好,可通过降低前进速度或增加清茬刀转速和同一安装平面内均匀安装的清茬刀片数实现。东北地区免耕播种机工作速度一般在3~7 km/h,参考旋耕机转速,清茬刀转速一般为300~400 r/min,对于有秸秆覆盖的土壤,作业时切土节距取10~12 cm。为满足上述的农艺要求,将各参数代入式(4),可计算出同一安装平面内均匀安装的清茬刀片数不小于3.59,取整数为4,即清茬刀按4条螺旋线均匀排布在螺旋刀辊上,如图2所示。

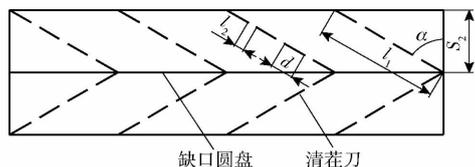


图2 清茬刀排布图

Fig. 2 Arrangement diagram of stubble-cleaner knife

根据图2可知,单个螺旋线螺距计算公式为

$$S_1 = S_2 \frac{2\pi}{\alpha} \quad (5)$$

其中

$$\alpha = \arccos \frac{S_2}{l_1}$$

式中  $S_2$ ——单侧螺旋刀辊宽度,mm

$\alpha$ ——螺旋偏角,rad

$l_1$ ——螺旋线长度,mm

根据式(1),在其他条件一定的情况下,螺距越大,单位时间内的物料输送量越大,因此,本研究的螺距应尽量大。根据式(5)可知,螺距  $S_1$  主要由单侧螺旋刀辊宽度  $S_2$  和螺旋线长度  $l_1$  决定,且与单侧螺旋刀辊宽度  $S_2$  成正比,与螺旋线长度  $l_1$  成反比。单侧螺旋刀辊宽度  $S_2$  由清理的种带宽度决定,由于东北地区温度较低,种带较窄时不利于地温回升,造成出苗质量不佳,但种带宽度不易过宽,否则会出现保水能力差、水土流失等问题,本文确定清理后的种带宽度为 200 mm,由于缺口圆盘左右各有一个螺旋刀辊,因此单侧螺旋刀辊宽度  $S_2$  为 100 mm。

螺旋线长度  $l_1$  主要取决于单个螺旋线上安装的清茬刀个数和相邻清茬刀之间的安装间距。为防止玉米秸秆卡到两个相邻的清茬刀之间,要求相邻清茬刀之间的间距大于玉米秸秆的最大直径,经前期调研,玉米秸秆直径小于 20 mm,因此确定相邻清茬刀之间的安装间距不小于 20 mm。考虑到清茬效率,本研究确定每条螺旋线上安装 4 把清茬刀,且设计的清茬刀根部宽度为 40 mm,计算可知螺旋线长度  $l_1$  为

$$l_1 \geq 3l_2 + 4d \quad (6)$$

式中  $d$ ——清茬刀根部宽度,mm

$l_2$ ——相邻清茬刀之间的安装间距,mm

将上述数据代入式(6)可得螺旋线长度  $l_1 \geq 220$  mm,螺旋偏角  $\alpha \geq 63^\circ$ ,螺距  $S_1 \leq 572$  mm。

通过上述分析,后续仍需对最佳的前进速度、转速和螺距等参数进一步研究。

## 2.2 清茬刀刃线设计

清茬刀在使用的过程中需要完成对秸秆与土壤的切割,因此需要对清茬刀刃线进行设计与研究。参考农业机械设计手册中旋耕弯刀的设计方法,常见的刀刃线类型有阿基米德螺线、偏心圆弧线和正弦指数曲线等<sup>[16]</sup>。偏心圆弧线是指以偏离中心点一定距离的一点为圆心,以一定半径所画的圆上的一段圆弧,为简化设计过程,本研究中采用偏心圆弧线作为清茬刀的刀刃线曲线,如图 3 所示。

图 3 中,以点  $O$  为圆心建立极坐标系,偏心圆圆心与坐标原点  $O$  的偏心距为  $e$ ,偏心圆直径为  $R$ ,可得到偏心圆上任一点的参数方程为

$$\rho = e \cos \gamma \pm e \sqrt{\left(\frac{R}{e}\right)^2 - \sin^2 \gamma} \quad (7)$$

式中  $\rho$ ——刃口任一点到旋转中心的距离,mm

$\gamma$ ——过刃口上任一点和圆心的连线与水平方向的夹角, ( $^\circ$ )

滑切相对于正切、砍切等具有节约功耗等优点,

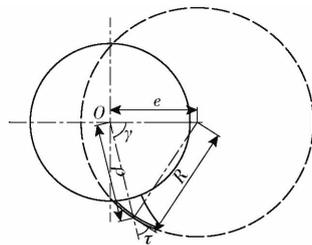


图 3 清茬刀刃口曲线图

Fig. 3 Cutting edge curve diagram of stubble-cleaner knife

本文清茬刀对秸秆与土壤进行滑切。为实现滑切效果,关键是在刃口设计时使清茬刀刃线静态摩擦角满足一定关系,参考农业机械设计手册<sup>[16]</sup>,刀刃的静态滑切角是指刃线上某一点的极径与该点切线之间的夹角,如图 3 中的  $\tau$  所示。由滑切角定义及清茬刀刃口曲线方程可得

$$\tau = \arccos \left( \frac{e}{R} \sin \gamma \right) \quad (8)$$

为实现清茬刀对秸秆的切割,应保证刃口部分的滑切角大于金属与秸秆间的摩擦角(一般为  $23^\circ \sim 33^\circ$ )<sup>[17]</sup>。由式(8)可知,在  $\gamma$  选定后,当  $e/R$  小于  $\pi/2$  时,滑切角  $\tau$  随  $e/R$  增大而减小,因此,在选取  $e/R$  时应尽量小些,但是太小时会使得刃口弧线和悬臂很长,造成清茬刀根部刚度差,易失效。参照文献<sup>[18]</sup>,当  $e/R$  为 0.74 时,具有较好的滑切作业性能且清茬刀不易失效,本研究选取  $e$  为 120 mm,  $R$  为 160 mm,  $\gamma$  为  $68^\circ \sim 88^\circ$ ,计算可得清茬刀滑切角  $\tau$  为  $41.5^\circ \sim 46^\circ$ ,满足清茬刀对秸秆的滑切要求。

## 3 离散元仿真试验

随着计算机数值模拟技术的发展,离散元法已广泛应用于各个领域。在农业领域,离散元法常用来研究作业部件与土壤、作业部件与作物之间的作用关系<sup>[5,19-21]</sup>,可从颗粒微观角度分析颗粒与作业部件的力与位移关系,为机具的设计优化提供参考。EDEM 是常用的离散元仿真软件,本文通过建立秸秆-土壤-工作部件的 EDEM 仿真模型,选取拖拉机前进速度、螺旋切分式种带清理装置转速和螺距作为主要试验因素,种带清秸率为试验指标,模拟螺旋切分式种带清理装置的实际作业过程,分析各试验因素对种带清秸率的影响规律,以获得最优参数值,为后续的加工与试验奠定基础。

### 3.1 EDEM 模型建立

螺旋切分式种带清理装置的仿真模型如图 4 所示,主要包含土槽模型和螺旋切分式种带清理装置,土槽模型中包含土壤模型和秸秆模型。仿真时,秸秆均匀铺放在土壤上,用于模拟实际覆盖有一定秸秆量的地块,螺旋切分式种带清理装置按一定的前

进速度与转速做平面运动,模拟实际工作时种带清理过程。

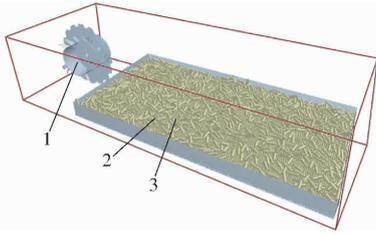


图4 螺旋切分式种带清理装置仿真模型

Fig. 4 Simulation model of spiral-split sowing strip cleaning device

1. 螺旋切分式种带清理装置 2. 土壤 3. 秸秆

为提高仿真计算的效率,对螺旋切分式种带清理装置模型进行简化,将不影响作业效果的零件去除。在三维建模软件 SolidWorks 中建立螺旋切分式种带清理装置模型,保存为 .stp 文件并导入 EDEM 中,并为螺旋切分式种带清理装置添加沿  $x$  方向的直线运动和绕刀轴中心轴转动的旋转运动,分别模拟拖拉机的前进运动与螺旋切分式种带清理装置的旋转运动。本研究中设置仿真模型材料属性为 45 号钢,其中,泊松比为 0.31,密度为  $7\ 800\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,剪切模量为  $7.0 \times 10^{10}\ \text{Pa}$ 。

同样考虑到仿真计算效率,土壤颗粒采用直径为 10 mm 的球体代替,土壤颗粒材料属性分别为:泊松比为 0.38,密度为  $1\ 850\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,剪切模量为  $1.0 \times 10^6\ \text{Pa}$ ,土壤颗粒间接触模型采用 Hertz - Mindlin with bonding 模型,用于模拟土壤颗粒之间的粘结作用。为了模拟粉碎后的秸秆,根据秸秆实际尺寸,选用 12 个直径为 16 mm、球心间距为 4 mm 组成的长度为 60 mm 的长线性模型作为秸秆颗粒模型,秸秆颗粒材料属性分别为:泊松比为 0.4,密度为  $241\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,剪切模量为  $1.0 \times 10^6\ \text{Pa}$ 。为了模拟螺旋切分式种带清理装置实际在地块作业的情况,建立虚拟土槽,根据播种地块覆盖秸秆情况,设置土槽尺寸为  $1\ 500\ \text{mm} \times 800\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$ ,土槽中土壤深度为 60 mm,秸秆覆盖量按  $1.44\ \text{kg}/\text{m}^2$  均匀铺放,在生成土壤模型时,使土壤颗粒靠重力作用自由沉降,仿真时间尽量长些,保证土壤颗粒之间生成稳定的粘结键并且颗粒完全静止。

为保证仿真的准确进行,还需要设置土壤与土壤、秸秆与秸秆、土壤与秸秆、45 号钢与土壤颗粒和 45 号钢与秸秆之间的接触参数,参照文献 [22 - 23],确定仿真模型接触参数如表 1 所示。

### 3.2 EDEM 仿真试验

#### 3.2.1 试验方案

根据上述的理论分析,影响种带清理效果的主

表 1 仿真模型接触参数

Tab. 1 Contact parameters of simulation model

参数	数值
土壤-土壤恢复系数	0.20
土壤-土壤动摩擦因数	0.25
土壤-土壤静摩擦因数	0.40
秸秆-秸秆恢复系数	0.30
秸秆-秸秆动摩擦因数	0.01
秸秆-秸秆静摩擦因数	0.30
土壤-秸秆恢复系数	0.50
土壤-秸秆动摩擦因数	0.05
土壤-秸秆静摩擦因数	0.30
45 号钢-土壤恢复系数	0.28
45 号钢-土壤动摩擦因数	0.04
45 号钢-土壤静摩擦因数	0.50
45 号钢-秸秆恢复系数	0.30
45 号钢-秸秆动摩擦因数	0.01
45 号钢-秸秆静摩擦因数	0.30

要因素有拖拉机前进速度、螺旋切分式种带清理装置转速和螺距,为获得最佳的种带清理效果,以种带清秸率为评价指标,以前进速度、转速和螺距为试验因素,在 EDEM 中进行二次回归组合仿真试验,根据理论分析与预试验,确定前进速度取值范围为  $1 \sim 2\ \text{m}/\text{s}$ 、转速取值范围为  $300 \sim 400\ \text{r}/\text{min}$ 、螺距取值范围为  $510 \sim 570\ \text{mm}$ ,根据 Design-Expert 软件中 Box - Behnken 设计原理,确定试验因素编码<sup>[24-25]</sup>,如表 2 所示。

表 2 试验因素水平

Tab. 2 Level of test factors

编码	因素		
	前进速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	转速/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	螺距/mm
-1	1.0	300	510
0	1.5	350	540
1	2.0	400	570

#### 3.2.2 试验指标

根据上述分析,螺旋切分式种带清理装置种带清理宽度为 200 mm,为评价种带清理效果,利用 EDEM 软件后处理中的 Setup Selections 功能,通过计算宽度为 200 mm 的长方形区域内秸秆清理前后质量的变化得到相应的种带清秸率,如图 5 所示。

种带清秸率计算公式为

$$C = \frac{m - m_1}{m} \times 100\% \quad (9)$$

式中  $C$ ——种带清秸率, %

$m$ ——仿真作业前秸秆质量, kg

$m_1$ ——仿真作业后秸秆质量, kg

#### 3.2.3 结果与分析

根据 Box - Behnken 试验设计原理,共需进行

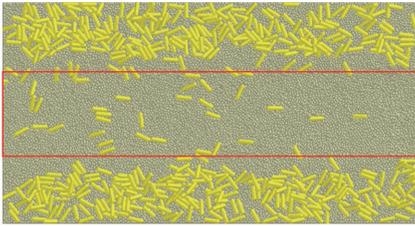


图 5 种带清秸率测量方法示意图

Fig. 5 Schematic of measurement method for sowing strip straw removing rate

17 组试验, 每组重复 3 次取平均值, 得出该组的条带清秸率。试验安排与结果如表 3 所示, 表中  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  为因素编码值。

表 3 试验安排与结果

Tab. 3 Arrangement and results of test

试验序号	因素			种带清秸率/%
	前进速度 $X_1$	转速 $X_2$	螺距 $X_3$	
1	0	0	0	83.13
2	0	-1	1	80.10
3	0	-1	-1	74.37
4	1	1	0	88.24
5	-1	1	0	89.45
6	0	0	0	82.01
7	-1	0	1	87.04
8	-1	0	-1	84.93
9	0	0	0	83.09
10	0	1	1	90.35
11	0	1	-1	83.42
12	0	0	0	83.22
13	1	0	-1	78.30
14	-1	-1	0	79.50
15	1	-1	0	77.09
16	0	0	0	83.02
17	1	0	1	88.24

应用 Design-Expert 软件对表 3 中试验数据进行拟合和方差分析, 采用 Quadratic 模型建立种带清秸率的回归模型, 并得到回归模型的显著性检验结果如表 4 所示。

由表 4 可知,  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_1X_3$ 、 $X_1^2$  和  $X_2^2$  的系数均达到极显著水平 ( $P < 0.01$ ), 其余项不显著。回归模型  $P$  小于 0.01, 而失拟项  $P$  为 0.488 5, 回归模型的极显著且失拟项不显著, 回归有效。删除不显著项后得到种带清秸率回归方程为

$$C = 69.69 - 9.26X_1 + 0.36X_2 - 0.09X_3 + 0.13X_1X_3 + 6.51X_1^2 - 0.00038X_2^2 \quad (10)$$

### 3.2.4 响应面分析

由表 4 可知, 前进速度和螺距对种带清秸率具有交互作用, 两交互作用的响应曲面图如图 6 所示。

由图 6 可知, 在螺旋切分式种带清理装置作业

表 4 种带清秸率回归模型显著性分析

Tab. 4 Significant analysis of regression model for sowing strip straw removing rate

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	320.15	6	202.78	< 0.000 1 **
$X_1$	10.24	1	38.91	< 0.000 1 **
$X_2$	204.02	1	775.35	< 0.000 1 **
$X_3$	76.32	1	290.06	< 0.000 1 **
$X_1X_3$	15.33	1	58.25	< 0.000 1 **
$X_1^2$	11.19	1	42.51	< 0.000 1 **
$X_2^2$	3.73	1	14.17	0.003 7 **
残差	2.63	10		
失拟项	1.63	6	1.09	0.488 5
纯误差	1.00	4		
总值	322.78	16		

注: \*\*表示极显著 ( $P < 0.01$ )。

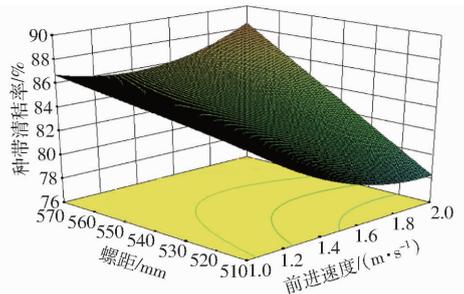


图 6 交互因子对种带清秸率的影响

Fig. 6 Effects of interaction factors on sowing strip straw removing rate

速度一定时, 种带清秸率随螺距的增大而增大, 两者呈正相关, 因为螺距越大, 单位时间内螺旋输送物料的输送量越大, 种带上的秸秆清理效果越好, 与理论分析一致。在螺旋切分式种带清理装置螺距一定时, 种带清秸率随着作业速度的变化与螺距有关, 当螺距较小时, 种带清秸率随作业时速度的增大而减小, 因为作业速度越大, 切茬刀作业时的切土节距越大, 相应切茬刀作用在秸秆次数减少, 降低了清茬率; 当螺距较大时, 作业速度对种带清秸率影响不大, 因为当螺距较大时, 在确定的作业速度范围内, 即使切土节距较大, 螺旋切分式种带清理装置的秸秆输送量也能达到秸秆覆盖量要求。种带清秸率沿螺距方向的变化速率大于沿作业速度方向的变化速率, 说明在所确定的作业速度范围内, 螺距对种带清秸率的影响大于前进速度对种带清秸率的影响。

### 3.2.5 参数优化

为获得螺旋切分式种带清理装置最优参数组合, 利用 Design-Expert 软件中的多目标参数优化模块对上述建立的回归模型进行优化求解。试验因素的约束条件为: 前进速度 1 ~ 2 m/s, 转速 300 ~ 400 r/min, 螺距 510 ~ 570 mm, 评价指标种带清秸率

取目标最大值为 100%。优化得到 3 个试验因素参数值分别为:前进速度 2 m/s, 转速为 400 r/min, 螺距为 570 mm, 最佳种带清秸率为 92.55%。利用优化得到最佳参数在 EDEM 进行仿真试验, 仿真 3 次取平均值, 最终得到种带清秸率约为 92.04%, 与优化结果基本一致。

#### 4 田间试验验证

为验证螺旋切分式种带清理装置的实际作业性能, 于 2020 年 6 月在辽宁省农业机械化研究所试验田进行了验证试验, 试验现场如图 7 所示。螺旋切分式种带清理装置挂接在免耕播种机前, 免耕播种机的前进动力由约翰迪尔 1354 型拖拉机提供, 螺旋切分式种带清理装置由电机带动。试验仪器与设备包括免耕播种机、螺旋切分式种带清理装置、约翰迪尔 1354 型拖拉机、减速电机及其控制器(常州金坛浩宇电动机械制造有限公司, 功率为 1 kW, 供电电压为 48 V)、卷尺(香港宏利莱有限公司, 0~5 m, 精度为 1 mm)、雷逸 MB01 型秒表和测速仪(广州市速为电子科技有限公司, 测量范围为 2.5~99 999 r/min, 转速为 2.5~999.9 r/min 时分辨率为 0.1 r/min)。试验田间地块基本情况: 秸秆覆盖量为 1.44 kg/m<sup>2</sup>、秸秆含水率 4.7%、0~100 mm 土层坚实度 410 MPa、土壤含水率 11%、土壤容重 1.31 g/cm<sup>3</sup>。



(a) 试验样机

(b) 作业效果

图 7 田间试验

Fig. 7 Field experiment

加工试制的螺旋切分式种带清理装置螺距为 570 mm, 机具作业时, 设定拖拉机前进速度为 2 m/s,

种带清理装置转速为 400 r/min, 在作业后的地块, 随机选取 5 块宽度为 200 mm, 长度为 500 mm 已清理的种带区域, 测量其残余秸秆质量, 5 次取平均值作为作业后秸秆质量, 同理, 作业前在地块上随机选取同样大小区域, 收集地表秸秆并称量, 5 次取平均值作为作业前秸秆质量, 根据式(9)计算得到种带清秸率为 89.15%, 比仿真试验减少了约 2.89 个百分点, 产生误差的原因是实际地块中存在细碎叶子等覆盖物, 无法进行有效清除, 而仿真中只考虑了秸秆的存在, 另外, 在田间试验时, 由于清茬装置转速较高, 两行同时作业时会有少量秸秆被抛到相邻种带上, 也会造成种带清秸偏低。总体来说, 螺旋切分式种带清理装置基本满足免耕播种作业要求。

#### 5 结论

(1) 设计了螺旋切分式种带清理装置, 能够实现对秸秆的切割并分别输送到种带的左右两侧, 作业后形成宽度为 200 mm 清洁种带, 同时将地块表面的土壤清理, 有利于地温回升, 促进种子发芽。

(2) 对螺旋切分式种带清理装置清茬刀的排布方式和清茬刀刃口曲线进行理论分析与设计, 得到了清茬刀安装和刃口曲线参数, 并确定了影响种带清理效果的主要因素有: 前进速度、转速和螺距。

(3) 在离散元仿真软件 EDEM 中建立螺旋切分式种带清理装置仿真模型, 以种带清秸率为试验指标, 以前进速度、转速和螺距为试验因素, 进行了二次回归组合仿真试验, 结果表明, 前进速度、转速和螺距对种带清秸率影响极显著 ( $P < 0.01$ ), 其中转速影响最为显著。利用 Design-Expert 软件对影响因素进行优化求解, 得到最优参数组合为: 前进速度 2 m/s, 转速为 400 r/min, 螺距为 570 mm, 最佳组合下种带清秸率为 92.55%。

(4) 为验证仿真结果准确性, 进行了田间验证试验, 种带清秸率试验结果较仿真结果减小了 2.89 个百分点, 基本满足免耕播种对于种带清秸率要求。

#### 参 考 文 献

- [1] 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)
- [2] KASSAM A, FRIEDRICH T, DERPSCH R, et al. Overview of the worldwide spread of conservation agriculture [J]. The Journal of Field Actions, 2015, 8: 1-11.
- [3] 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)
- [4] 廖庆喜, 高焕文, 舒彩霞. 免耕播种机防堵技术研究现状与发展趋势[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 108-112. LIAO Qingxi, GAO Huanwen, SHU Caixia. Present situations and prospects of anti-blocking technology of no-tillage planter [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 108-112. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 王奇,贾洪雷,朱龙图,等.免耕播种机星齿凹面盘式清秸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)
- [7] 林静,李宝筏,李宏哲.阿基米德螺旋型破茬开沟和切拔防堵装置的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(17):10-19. LIN Jing, LI Baofa, LI Hongzhe. Design and experiment of Archimedes spiral type stubble breaking ditching device and stubble breaking anti blocking device[J]. Transactions of the CSAE,2015, 31(17):10-19. (in Chinese)
- [8] 林静,李博,李宝筏,等.阿基米德螺旋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)
- [9] 陈海涛,侯磊,侯守印,等.大垄玉米原茬地免耕播种机防堵装置设计与优化试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(8):59-67. CHEN Haitao, HOU Lei, HOU Shouyin, et al. Design and optimization experiment of anti-blocking mechanism of no-tillage planter for grand ridge with raw corn stubble[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8):59-67. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180807&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180807&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.007. (in Chinese)
- [10] 侯守印,陈海涛,邹震,等.玉米原茬地侧向清茬刀设计与试验[J].农业工程学报,2020,36(2):59-69. HOU Shouyin, CHEN Haitao, ZOU Zhen, et al. Design and test of lateral stubble cleaning blade for corn stubble field[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(2):59-69. (in Chinese)
- [11] 陈海涛,查韶辉,顿国强,等.2BMFJ系列免耕精量播种机清秸装置优化与试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(7):96-102. CHEN Haitao, ZHA Shaohui, DUN Guoqiang, et al. Optimization and experiment of cleaning device of 2BMFJ type no-till precision planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(7):96-102. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160714&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160714&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.014. (in Chinese)
- [12] 卢彩云,赵春江,孟志军,等.基于滑板压秆旋切式防堵装置的秸秆摩擦特性研究[J].农业工程学报,2016,32(11):83-89. LU Caiyun, ZHAO Chunjiang, MENG Zhijun, et al. Straw friction characteristic based on rotary cutting anti-blocking device with slide plate pressing straw[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(11):83-89. (in Chinese)
- [13] 卢彩云,李洪文,何进,等.小麦免耕播种机浮动支撑式防堵装置[J/OL].农业机械学报,2013,44(12):52-55,153. LU Caiyun, LI Hongwen, HE Jin, et al. Floated support anti-blocking device of wheat no-till seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(12):52-55,153. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20131209&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131209&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.009. (in Chinese)
- [14] 刘四麟.粮食工程设计手册[M].郑州:郑州大学出版社,2002.
- [15] MONDAL D. Study on filling factor of short length screw conveyor with flood-feeding condition[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(1): 1286-1291.
- [16] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [17] ZHAO Jiale, HUANG Dongyan, JIA Honglei, et al. Analysis and experiment on cutting performances of high-stubble maize stalks[J]. The International Journal of Agricultural and Biological Engineering,2017,10(1):40-52.
- [18] 张才权.水田耙星形耙片几何参数的研究[J].农业机械学报,1979,10(2):85-95. ZHANG Caiquan. Research of geometric parameters of star-shape disc for paddy field harrow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1979,10(2):85-95. (in Chinese)
- [19] MATIN M A, FIELKE J M, DESBIOLLES J M A. Torque and energy characteristics for strip-tillage cultivation when cutting furrows using three designs of rotary blade[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 329-340.
- [20] ZENG Z, CHEN Y. Performance evaluation of fluted coulters and rippled discs for vertical tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 183: 93-99.
- [21] 郑侃,何进,李洪文,等.基于离散元深松土壤模型的折线破土刀深松铲研究[J/OL].农业机械学报,2016,47(9):62-72. 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. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160910&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160910&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.010. (in Chinese)
- [22] 方会敏,姬长英,AHMED Ali Tagar,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. FANG Huimin, JI Changying, AHMED Ali Tagar, 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. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160109&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160109&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.009. (in Chinese)
- [23] 余海波.免耕播种机凹面爪式清茬机构仿真与试验[D].长春:吉林大学,2017. YU Haibo. Simulation and experiment on the concave claw-type stubble clearance mechanism of no-tillage planter[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [24] 王云霞,张东兴,杨丽,等.液压激振源自激振动深松机深松单体设计与试验[J].农业工程学报,2018,34(11):40-48. WANG Yunxia, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Design and experiment of hydraulically self-excited vibration subsoiler[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11):40-48. (in Chinese)
- [25] 贾洪雷,郑健,赵佳乐,等.仿蚯蚓运动多功能开沟器设计及参数优化[J].农业工程学报,2018,34(12):62-71. JIA Honglei, ZHENG Jian, ZHAO Jiale, et al. Design and parameter optimization of earthworm-like multi-function opener[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12):62-71. (in Chinese)