



魏子翔,何瑞银,李毅念,等. 稻茬田带状立旋作业参数对种床清秸与平整效果的影响[J]. 南京农业大学学报,2024,47(5):1037-1048.  
WEI Zixiang, HE Ruiyin, LI Yinian, et al. Analysis of strip vertical rotation working parameters on seedbed straw cleaning and flatness effect in rice stubble field[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2024, 47(5): 1037-1048.

## 稻茬田带状立旋作业参数对种床清秸与平整效果的影响

魏子翔,何瑞银\*,李毅念,徐高明,丁启朔

(南京农业大学工学院/江苏省智能化农业装备重点实验室,江苏 南京 210031)

**摘要:**[目的]本文旨在研究稻茬地秸秆-土壤-带状立式旋耕系统的相互作用机理,探究三者交互作用下关键作业参数对种床清秸与平整效果的影响,为秸秆田间综合管理和水旱轮作系统耕作机械优化设计提供依据。[方法]基于离散元法构建三维立旋仿真模型;模拟水稻秸秆覆盖条件下条带立旋还田作业过程,优化参数范围并进行室内土槽试验验证。以条带立旋作业过程中的前进速度、刀轴转速、秸秆长度为影响因素,以种床清秸率和种床耕后平整度为指标,采用响应面法构建数学模型,分析各因素对种床质量的影响并进行性能优化试验。[结果]在设定耕作深度为15 cm时,影响种床清秸率和种床耕后平整度的主次顺序为前进速度、刀轴转速、秸秆长度。多因素正交试验优化结果表明:机具前进速度 $1.09\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、刀轴转速 $281.5\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、秸秆长度6.89 cm时种床质量最优,种床清秸率为81.95%,种床平整度为8.67 mm。[结论]本文构建的交互作用模型经验证可靠,能有效评价稻茬田立旋作业参数对种床清秸平整效果。

**关键词:**带状立旋;离散元;响应面;种床清秸率;种床平整度

中图分类号:S233.1

文献标志码:A

文章编号:1000-2030(2024)05-1037-12

## Effects of strip vertical rotation working parameters on seedbed straw cleaning and flatness in rice stubble field

WEI Zixiang, HE Ruiyin\*, LI Yinian, XU Gaoming, DING Qishuo

(College of Engineering/Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment of Jiangsu Province,  
Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

**Abstract:**[Objectives] This paper aimed to study the interaction mechanism of straw-soil-strip vertical rotary tillage system in rice stubble field, explore the influence of key operation parameters under the interaction of the three on the clearing and leveling effect of seedbed, and play a guiding role in the integrated straw field management and the optimal design of tillage machinery in the water-drought rotation system. [Methods] A 3D vertical rotation simulation model was constructed based on discrete element method. The process of vertical strip rotation under rice straw mulching was simulated, and the parameter range was optimized and verified by laboratory soil tank test. In the process of strip vertical rotation, the forward speed, the rotational speed of tool shaft and the stubble length were taken as the influencing factors. The response surface method was used to build a mathematical model to analyze the influence of each factor on the quality of the seedbed and carry out the performance optimization test. [Results] When the tillage depth was set to 15 cm, the main and secondary factors affecting the cleaning rate of stubble and the flatness of seedbed were the forward speed, the tool shaft rotational speed and stubble length. The results of multi-objective optimization showed that the quality of seedbed was the best when the tool forward speed was  $1.09\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , the tool shaft rotational speed was  $281.5\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  and the stubble length was 6.89 cm. The straw cleaning rate of seedbed was 81.95% and the seedbed flatness was 8.67 mm. [Conclusions] The interaction model established in this paper was proved to be reliable and could effectively reflect the effect of vertical rotation operation parameters on the clearing of straw in seed bed.

**Keywords:** strip vertical rotary tillage; discrete element; response surface; seedbed straw cleaning rate; seedbed flatness

长江中下游地区种植模式多为稻麦水旱轮作,周年干湿交换过程导致土壤黏且重板结适耕性差,前茬水稻秸秆残留量大,机具作业时易缠绕堵塞<sup>[1-2]</sup>。在稻茬田采用适宜的保护性带状耕作方式可以有效改善种床土壤环境,解决堵塞和种床清理关键问题,是提高水旱轮作系统的可持续生产能力与保障粮食安全的重要途径<sup>[3-4]</sup>。

收稿日期:2023-11-06

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD2300700)

\*通信作者:何瑞银,教授,博导,研究方向为耕作播种技术与装备研究,E-mail:ryhe@njau.edu.cn。

带状耕作下种床土壤质量受带状耕作部件结构、运动参数、土壤秸秆性质、秸秆还田方式等多因素影响,评价指标主要包括种床清秸率、秸秆位移量、种床平整度等。为分析带状耕作部件在秸秆还田条件下的耕作性能,近年来国内外学者建立带状耕作部件-秸秆-土壤耦合系统交互作用模型,从不同角度对土壤-秸秆-带状耕作系统三者交互作用规律与耕作质量关系进行研究<sup>[5-8]</sup>。Matin 等<sup>[9]</sup>研究表明砂壤土条件下缩短旋耕刀弯曲部分能有效增加土壤回填。方会敏等<sup>[10]</sup>基于离散元法从微观和宏观角度对卧式旋耕作业过程中秸秆-旋耕刀-土壤交互作用下的秸秆分布均匀度进行分析,为机具参数优化提供理论依据。赵宏波等<sup>[11]</sup>通过旋耕刀旋转碎秸侧抛特性分析,再结合离散元仿真和田间试验确定条带行间侧抛清秸装置最优参数组合。杨艳山等<sup>[12]</sup>设计制造了一种田间原位耕作试验台,并对凿型、直刃和 IT225 三种不同旋耕刀进行离散元仿真与田间原位耕作试验,发现耕作部件形状与刀轴转速直接影响土壤回填效果和种床截面扰动率。

国外种床土壤耕整机械多采用立轴式驱动方式作业,可实现土壤疏松、保墒灭草、碎土的良好效果。但这些机具功率大,作业时对土壤压实较为严重,且机具幅宽大易造成漏耕,土壤扰动量大,不适用于稻茬田小地块带状耕作模式。近年来,随着国内稻茬地洁区带状免耕播种技术的应用与推广<sup>[13-14]</sup>,立式带状旋耕技术以其良好的条带清秸碎土效果,可有效构建良好种床环境,平衡秸秆处理与水土流失。王英博等<sup>[15]</sup>在国外立轴式耕整机械基础上结合离散元仿真分析设计了一种立式驱动浅旋耙,其碎土和平整效果达到少免耕作业碎土和秸秆覆盖要求。聂胜委等<sup>[16]</sup>设计的一种立式旋耕(粉垄)机构可有效降低小麦关键生育时期土壤紧实,改善土壤结构促进小麦根系生长。王伟等<sup>[17]</sup>提出的麦秸流扰动理论,通过田间免耕条带直播作业验证发现,条带立式旋耕可有效提升种床平整度,促进苗期生长。

鉴于稻茬田种床土壤物理性质复杂和带状耕作作业影响因素较多,上述带状立式耕作机具研究大多集中于带状立旋耕作机构设计优化及秸秆还田效应分析,对稻茬田带状立式旋耕作业性能研究不系统,对多因素交互作用下立式旋耕最佳工作参数优化研究不深入。因此,本文对立式旋耕装置整体结构进行设计分析,并基于离散元法建立立旋仿真模型,结合多目标控制的方法构建带状立式旋耕土槽试验平台,并对稻茬田土壤环境下带状立旋作业种床构建过程进行模拟分析。通过对比不同带状立旋作业参数条件对种床清秸和平整效果的影响,进行指标测定与分析,探究稻茬田环境下不同作业参数对种床清秸平整效果的影响规律,寻求较优参数组合,以期为带状耕作免耕关键部件与机具设计优化提供理论依据。

## 1 整体结构

### 1.1 立旋装置整体结构与工作原理

立旋装置主要由锥齿轮箱、刀盘底座、固定销以及立旋刀齿组成,如图 1 所示。每组立旋刀上部各直联 1 组螺旋锥齿轮传动箱,锥齿轮箱安装在机架上并有横向调节空间。刀齿与刀盘通过固定销连接,以减小作业过程中刀具受冲击振动造成的磨损。拖拉机后端输出轴与 1-U1 传动中央齿轮箱相连,中央齿轮箱通过中间传动机构将动力传递给每组锥齿轮箱,带动立旋刀组进行带状立旋整地作业。

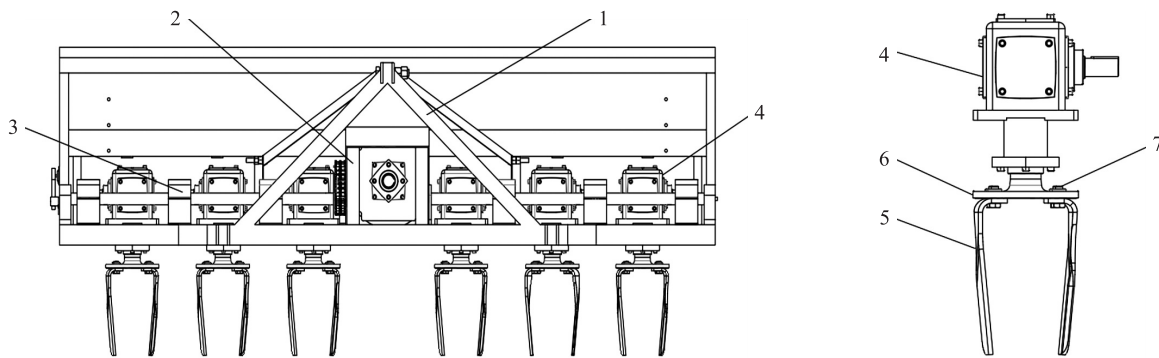


图 1 立旋装置结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the vertical rotation device structure

1. 机架 Frame; 2. 中央齿轮箱 Central gear box; 3. 中间传动机构 Intermediate transmission mechanism; 4. 锥齿轮箱 Bevel gear box; 5. 立旋刀齿 Vertical rotary tool; 6. 刀盘底座 Cutter base; 7. 固定销 Fixed pin.

### 1.2 立旋装置主要技术参数与评价指标

整机结构需满足稻茬田带状耕作要求,可打破犁底层,作业深度需达到 15 cm 以上,一次性作业完成松碎土壤、清理秸秆、平整种床等工序,减轻对土壤结构的扰动破坏,增强土壤蓄水保墒能力。整机配套动力为 71.2 kW。作业幅宽 2 450 mm、工作速度 0~8 km·h<sup>-1</sup>、作业深度 0~250 mm,相关参数可由拖拉机液压提升装置动态调节,本文选用常规的中科腾森 1BQ-3.0 立式旋耕刀片作为作业部件,刀片采用交叉对置式排布,刀轴回转直径 200 mm,耙齿材料为 65 Mn,热处理区洛氏硬度为 40~45。刀片厚度 20 mm,刀刃工作长度 230 mm,刀具滑切角 45°。选用中精工 T8 系列锥齿轮传动箱与立式旋耕刀连接,刀轴转速范围 120~400 r·min<sup>-1</sup>,额定输出扭矩可达 300 N·m,确保立旋装置正常作业。

### 1.3 立旋装置运动学分析

立旋装置绝对运动是由本身圆周运动与机具前进运动合成的,其运动轨迹为余摆线,刀齿运动轨迹如图 2 所示。

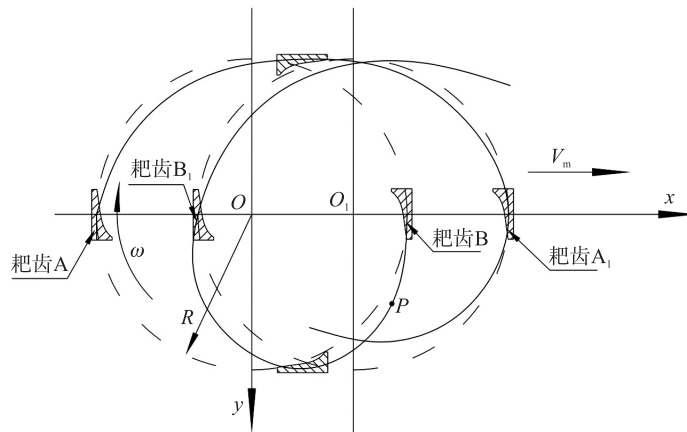


图 2 立旋刀具运动轨迹

Fig. 2 Motion trajectory of vertical rotary tool

*O* 为刀轴回转中心,*O*<sub>1</sub> 为刀轴 *t* 时刻回转中心;*R* 为刀具回转中心 *O* 到刀刃端点的距离(回转半径)。

*O* is the center of rotation of the tool shaft, and *O*<sub>1</sub> is the center of rotation of the tool shaft at time *t*; *R* is the distance from the tool rotation center *O* to the end point of the blade(rotation radius).

**1.3.1 运动轨迹方程** 以刀齿的旋转轴心为原点建立坐标系,设机具的前进方向为 *x* 轴方向,设机具的前进速度为 *V<sub>m</sub>*,立旋刀的回转角速度为 *ω*,*R* 为刀具回转半径,*t* 为时间,则刀齿上任意一点的运动轨迹方程:

$$\begin{cases} x = V_m t + R \cos(\omega t) \\ y = R \sin(\omega t) \end{cases} \quad (1)$$

消去时间 *t*,可得到刀齿任意一点的运动方程:

$$x = \frac{V_m}{\omega} \arcsin \frac{y}{R} + \sqrt{R^2 - y^2} \quad (2)$$

**1.3.2 刀齿切削速度 *V*** 对公式(1)时间求导,可得刀齿在 *x* 轴和 *y* 轴方向分速度:

$$\begin{cases} V_x = \frac{dx}{dt} = V_m - R\omega \sin(\omega t) \\ V_y = \frac{dy}{dt} = R\omega \cos(\omega t) \end{cases} \quad (3)$$

由公式(3)可知刀齿切削速度 *V* 大小:

$$V = \sqrt{V_m^2 + R^2 \omega^2 - 2V_m R \omega \sin(\omega t)} \quad (4)$$

**1.3.3 刀具切土节距 *S*** 刀具切土节距 *S* 为同一水平面内相邻 2 把刀相继切土的时间间隔内机具前进的距离。本文立旋装置同一刀盘安装 2 把交叉对置排布的刀齿,相继切土时间间隔(*t*<sub>1</sub>):

$$t_1 = \frac{\pi}{\omega} \quad (5)$$

切土节距  $S$ :

$$S = V_m t_1 = \frac{V_m \pi}{\omega} \quad \text{或} \quad S = \frac{30V_m}{n} \quad (6)$$

式中:  $S$  为刀盘转过  $\pi$  角时间内刀轴前进距离(m);  $t_1$  为刀盘转过  $\pi$  角刀齿切土时间间隔(s);  $n$  为刀齿转速( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )。

通过对立旋刀具运动学理论分析并结合相关研究可知<sup>[15-17]</sup>, 在立旋刀结构参数固定且不考虑土壤、秸秆等环境因素的情况下, 刀具的运动参数即刀轴回转角速度( $\omega$ )与机具前进速度( $V_m$ )是影响刀具运动轨迹、切削土壤性能从而影响土壤立旋作业效果的主要因素。

## 2 材料与方法

### 2.1 室内土槽立旋试验平台构建

实际田间试验受作物生长周期及天气等因素影响, 为了实现关键作业参数的定量控制, 在江苏省智能化农业装备重点实验室土槽耕作试验平台进行条带立旋耕作试验。该平台主要由试验台车、电机牵引系统、液压悬挂系统、试验土槽、转速扭矩传感器、带状立式旋耕装置单体、移动导轨、操控系统和数据采集系统等组成, 其整体结构如图3所示。其中立旋装置安装固定在自制台架上, 通过锥齿轮传动箱与台车驱动电机输出轴连接实现  $360 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  内转速可调。动态转速扭矩传感器通过联轴器安装在锥齿轮箱动力输出端与立旋装置刀盘轴之间, 实时监测转速。立旋装置通过三点悬挂与试验台车相连, 立式旋耕刀耕作深度通过试验台车液压升降杆自动调节, 前进速度通过操控台车电机牵引系统调节。

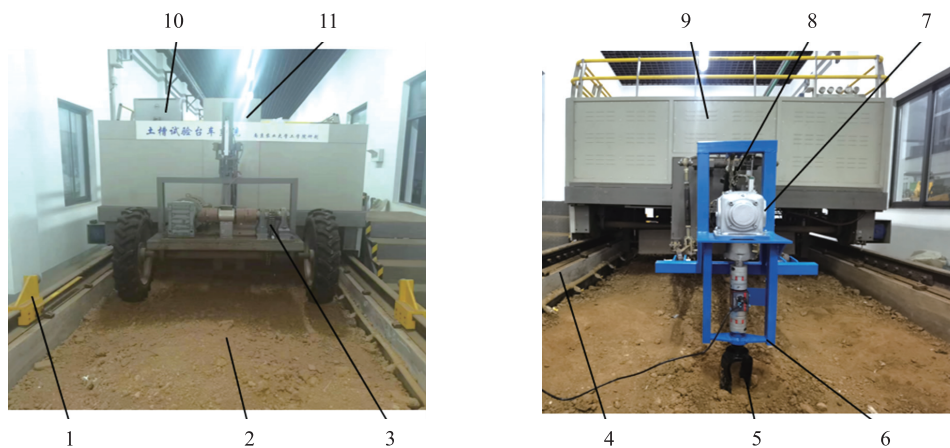


图3 土槽耕作试验平台

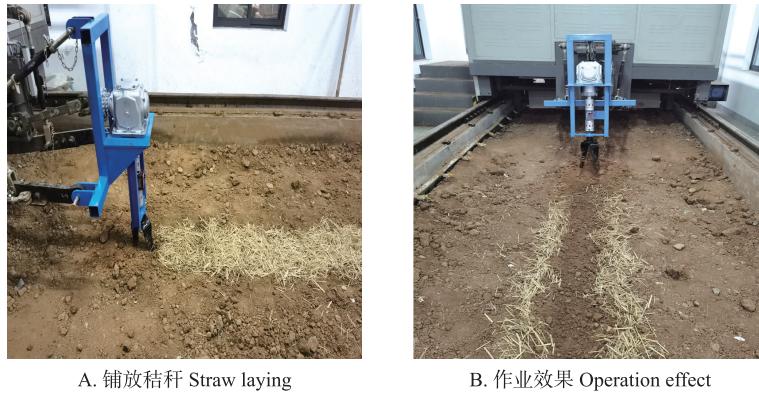
Fig. 3 Soil bin and testing platform

1. 限位装置 Limit device; 2. 试验土槽 Test soil tank; 3. 电机牵引系统 Motor traction system; 4. 移动导轨 Moving guide; 5. 立旋刀 Vertical rotary tool; 6. 转速扭矩传感器 Speed torque sensor; 7. 减速齿轮箱 Reduction gear box; 8. 液压悬挂系统 Hydraulic suspension system; 9. 试验台车 Test car; 10. 数据采集系统 Data acquisition system; 11. 操控系统 Control system.

土槽长×宽×高为  $2.4 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ , 试验土壤取自南京市永宁镇, 类型为黏土, 土壤砂粒、壤粒和黏粒的质量分数分别为 11%、47% 和 41%, 土壤经过调湿和夯实后的平均含水率为 16%、平均土壤坚实度为  $(3.21 \times 10^5) \text{ Pa}$ 。试验材料为切碎后的水稻秸秆茎秆部分, 依据《保护性耕作机械 第6部分: 秸秆粉碎还田机: GB/T 24675.6—2021》, 水稻秸秆粉碎长度小于 15 cm。为便于进行定量参数研究将田间获取的秸秆统一切碎处理为 5、10、15 cm 3 种长度进行分析, 秸秆量控制在  $749.62 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 与测量的田间秸秆密度一致<sup>[18]</sup>。

### 2.2 试验方法

立式旋耕试验前准备如图4-A所示。试验前先在大小为  $5000 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$  作业区域土壤表层依据实际测量秸秆密度均匀铺放处理后的水稻秸秆。调节液压升降杆带动立旋装置入土, 保持耕作深度为 15 cm。在试验过程中, 通过上位机控制信号启动台车驱动电机, 动力通过换向阀传递到扭矩传感器并驱动立旋作业, 参照测取的每组试验作业参数秸秆清理和作业后种床整理情况, 各处理均进行 3 次重复试验, 取平均值。试验结束台车归位后效果如图4-B所示。



A. 铺放秸秆 Straw laying

B. 作业效果 Operation effect

图 4 土槽耕作试验方法

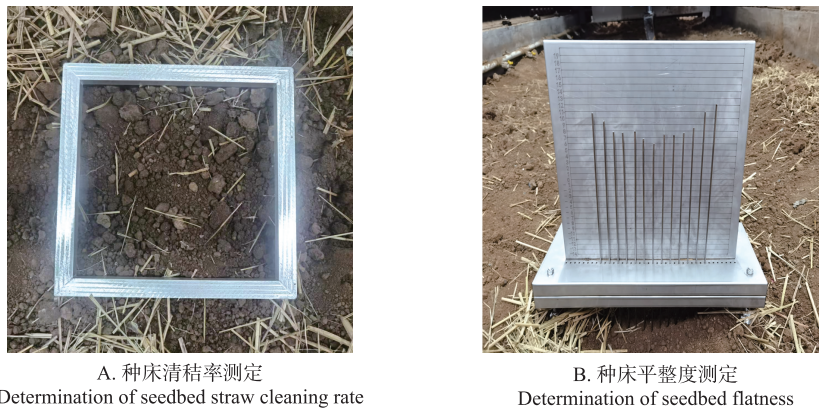
Fig. 4 Soil bin tillage test method

2.3 评价指标与测试方法

2.3.1 种床清秸率测量 种床清秸率是定量评价作业后种床秸秆清洁程度的物理量,利用 0.25 m×0.25 m 取样框在实际清洁带宽内等距选取 8 个采样区(图 5-A),统计立旋作业前、后采样区秸秆,并用精度为 0.1 g 电子秤称重。种床清秸率( $\eta$ )计算式:

$$\eta = \left( 1 - \frac{m_{22}}{m_{11}} \right) \times 100\% \tag{7}$$

式中: $m_{11}$ 为作业前单位面积秸秆覆盖量( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ); $m_{22}$ 为作业后单位面积秸秆残留量( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )。



A. 种床清秸率测定

Determination of seedbed straw cleaning rate

B. 种床平整度测定

Determination of seedbed flatness

图 5 土槽试验指标测定方法

Fig. 5 Method for determination of soil bin test index

2.3.2 种床平整度测量 种床平整度是衡量耕作后种床平整效果的重要指标。参照《旋耕机:GB/T 5668—2017》规定的试验方法,在播种行实际清洁带宽内每个处理沿机具前进方向随机取  $n$  横行,以各个横行耕后的地表最高点作为水平基准线,并将地表沿横行方向选取  $m$  个等分测试点,测定各点至基准面的垂直距离(图 5-B)。以各个横行的标准差平均值作为该行程地表平整度的测试结果。种床平整度( $S_{MN}$ ,mm)计算公式:

$$S_{MN} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (h_{ij} - \bar{h})^2}{mn - 1}} \tag{8}$$

式中: $h_{ij}$ 为任意测试点到基准面的垂直距离(mm); $m$ 为被测区域每横行等分测试点数量; $n$ 为被测区域沿机具前进方向取横行数量。

3 离散元仿真分析

3.1 旋耕装备三维模型的建立

在 Pro/E 5.0 中按照 1:1 的比例建立立旋装置触土部件三维模型,并以 stl 格式导入 EDEM2018 仿真软

件。为防止仿真过程中虚拟土槽边缘轮廓对立旋装备作业的影响,建立长×宽×高为 5 000 mm×2 500 mm×400 mm 的虚拟土槽。

### 3.2 土壤-秸秆颗粒模型的建立

选取 Hertz-Mindlin 模型模拟秸秆或土壤颗粒与立式旋耕刀之间接触特性,选取 JKR with Bonding 模型模拟秸秆与土壤颗粒间接接触特性,黏性土壤颗粒间接接触特性采用 Hertz-Mindlin with Bonding 模型模拟。为提高计算机离散元仿真计算效率,节省数据存储空间,多数研究采用的仿真模型颗粒一般都大于实际土壤颗粒<sup>[19-23]</sup>,本研究选用半径为 5 mm 球形颗粒模拟土壤颗粒。由于水稻秸秆易弯折、中空且含水率动态变化等特性,离散元仿真模拟秸秆颗粒难度较大。目前相关研究大多采用刚性模型模拟秸秆颗粒,虽然部分学者<sup>[24-25]</sup>提出了柔性秸秆仿真模型,但模型仿真难度较大且难以预测因旋耕作业导致柔性秸秆弯曲断裂对其数量与分布位置变化的影响。

为了简化秸秆模型及优化仿真时间成本,秸秆颗粒模型选用 9 个直径为 8 mm、球心间距为 3 mm 的刚性球形颗粒组成的总长 4.8 cm 的线性模型来模拟长度 5 cm 秸秆,如图 6 所示。同理分别生成总长度 100、150 mm 的线性模型模拟 10、15 cm 长度秸秆。

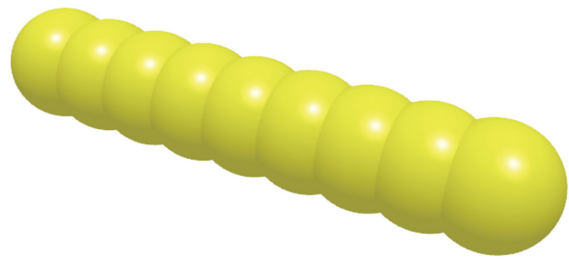


图 6 水稻秸秆颗粒参数模型

Fig. 6 Rice straw particle parameter model

EDEM 离散元仿真模型参数包括材料参数和接触参数。通过查阅相关文献<sup>[19-22]</sup>获得的材料参数包括立旋刀、土壤、水稻秸秆的泊松比、堆积密度、剪切模量。接触参数主要是指材料间的碰撞恢复系数、动静摩擦系数等。通过休止角仿真标定方法<sup>[19,24]</sup>获得土壤与土壤间静、滚动摩擦系数,调整参数得到与实际土壤试验一致的结果时,选择该参数为仿真模型参数。利用直剪试验法对土壤进行压缩获取土壤-立旋刀静摩擦系数,通过斜板试验法测量获取土壤-立旋刀、秸秆-立旋刀滚动摩擦系数,通过查阅文献<sup>[25-27]</sup>获得其他接触参数。仿真模型设置所需参数如表 1 所示。

表 1 离散元模型的仿真参数

Table 1 Simulation parameters of discrete element model

参数 Parameters	数值 Value	参数 Parameters	数值 Value
立旋刀泊松比 $\nu_1$ Vertical rotary tool poisson ratio	0.3	土壤-土壤恢复系数 $e_1$ Soil-soil recovery coefficient	0.6
立旋刀剪切模量 $G_1$ /Pa Vertical rotary tool shear elasticity	$7.9 \times 10^{10}$	土壤-立旋刀恢复系数 $e_2$ Soil-vertical rotary tool recovery coefficient	0.6
立旋刀密度 $\rho_1$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) Vertical rotary tool density	7 860	土壤-秸秆恢复系数 $e_3$ Soil-straw recovery coefficient	0.5
耕层土壤泊松比 $\nu_2$ Surface soil poisson ratio	0.38	秸秆-立旋刀恢复系数 $e_4$ Straw-vertical rotary tool recovery coefficient	0.3
耕层土壤剪切模量 $G_2$ /Pa Surface soil shear elasticity	$6 \times 10^7$	土壤-土壤静摩擦因数 $f_{s1}$ Soil-soil static friction factor	0.5
耕层土壤密度 $\rho_2$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) Surface soil density	1 280	土壤-立旋刀静摩擦因数 $f_{s2}$ Soil-vertical rotary tool static friction factor	0.6
犁底层土壤泊松比 $\nu_3$ Plough bottom soil poisson ratio	0.3	土壤-秸秆静摩擦因数 $f_{s3}$ Soil-straw static friction factor	0.5
犁底层土壤剪切模量 $G_3$ /Pa Plough bottom soil shear elasticity	$1 \times 10^8$	秸秆-立旋刀静摩擦因数 $f_{s4}$ Straw-vertical rotary tool static friction factor	0.3
犁底层土壤密度 $\rho_3$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) Plough bottom soil density	1 500	耕层土壤-耕层土壤滚动摩擦因数 $f_{d1}$ Surface soil-surface soil rolling friction factor	0.6
秸秆泊松比 $\nu_4$ Straw poisson ratio	0.4	耕层土壤-立旋刀滚动摩擦因数 $f_{d2}$ Surface soil-vertical rotary tool rolling friction factor	0.35
秸秆剪切模量 $G_4$ /Pa Straw shear elasticity	$1 \times 10^6$	秸秆-立旋刀滚动摩擦因数 $f_{d3}$ Straw-vertical rotary tool rolling friction factor	0.01
秸秆密度 $\rho_4$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) Straw density	241	秸秆-耕层土壤滚动摩擦因数 $f_{d4}$ Straw-surface soil tool rolling friction factor	0.05

### 3.3 仿真过程

仿真作业前在虚拟土槽 0~150 mm 深度生成耕层土壤颗粒,在 150~500 mm 深度生成犁底层土壤颗粒,查阅相关文献<sup>[18-19]</sup>选取仿真模型稻茬田犁底层土壤孔隙度为 40%,耕层土壤孔隙度为 50%,然后在耕层土壤表层生成均匀平铺的秸秆颗粒。秸秆颗粒生成密度与田间实际测量一致,控制在  $749.62 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。设定导入的三维旋耕模型作业参数、仿真模块配置参数后开始立旋还田仿真作业。

仿真结束后利用后处理模块中 Grid Bin Group 在立式旋耕刀片作业幅宽内,以 600 mm 为间距沿机具方向设置相应作业区域(图 7),划分测算立旋作业前、后区域地表秸秆数量。对各区域仿真作业前、后秸秆颗粒数量进行统计,设定各区域初始秸秆颗粒数与作业后剩余秸秆颗粒数百分比的平均值为种床清秸率。截取土壤耕作区 X 方向耕作截面(图 8),利用 Grid Bin Group 模块提取土壤颗粒 Z 方向的高程值,以

土槽底部作为基准线,耕后地表线为测量拟合对象。以等距划分的各区域边界作为等分测试点,测定每个等分点基准线与耕后地表线的垂直高度,计算耕作横断面垂直距离的平均值和标准差,并以标准差值表示为耕后地表平整度。

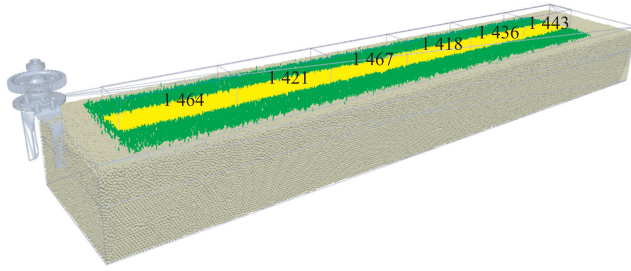


图 7 离散元仿真模型区域划分

Fig. 7 Region division of discrete element simulation model  
数值代表各等间距划分区域中水稻秸秆数量。The numerical value represents the quantity of rice straw in each equidistant partition area.

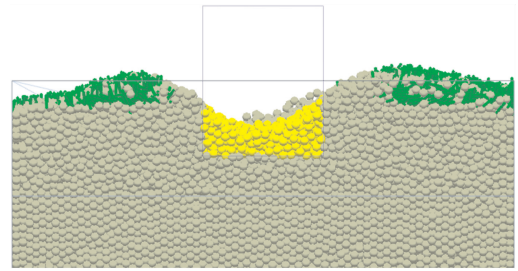


图 8 仿真结束后耕作断面

Fig. 8 Cultivation profile after simulation

## 4 试验设计与结果分析

### 4.1 单因素试验

参照《驱动耙:GB/T 25420—2021》和《旋耕机:GB/T 5668—2017》规定的参数标准与整机工作实际参数范围确定合适作业参数范围,并以种床清秸率、耕后种床平整度作为立旋装置作业性能评价标准。在离散元仿真模型前处理模块中,通过调整立旋装置运动参数和秸秆颗粒参数来模拟 5 种机具前进速度(0.6、0.9、1.2、1.5、1.8  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )、5 种刀轴转速(120、180、240、300、360  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )、3 种地表秸秆长度(5、10、15 cm)的立旋还田作业过程。每次试验耕作深度保持在 15 cm。仿真结束后测定种床清秸率、耕后种床平整度,仿真结果如图 9 所示。

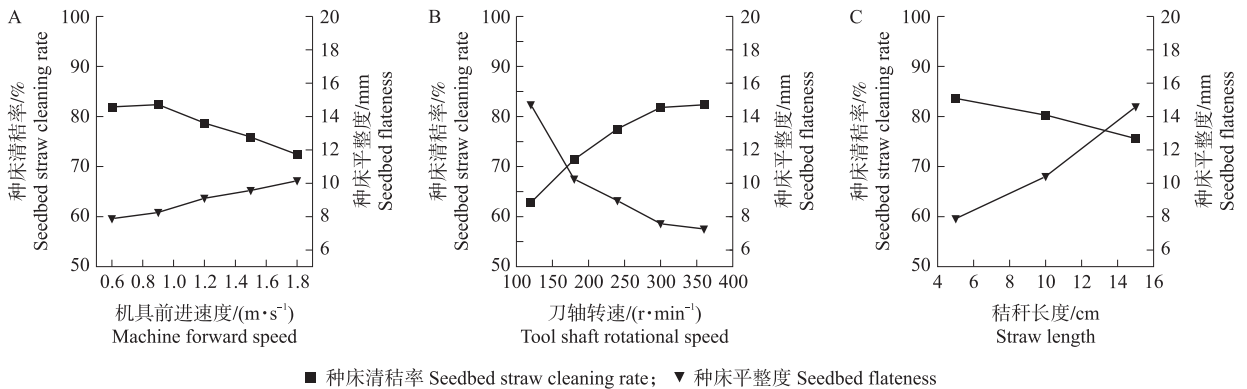


图 9 机具前进速度(A)、刀轴转速(B)和秸秆长度(C)对种床清秸率和种床平整度的影响

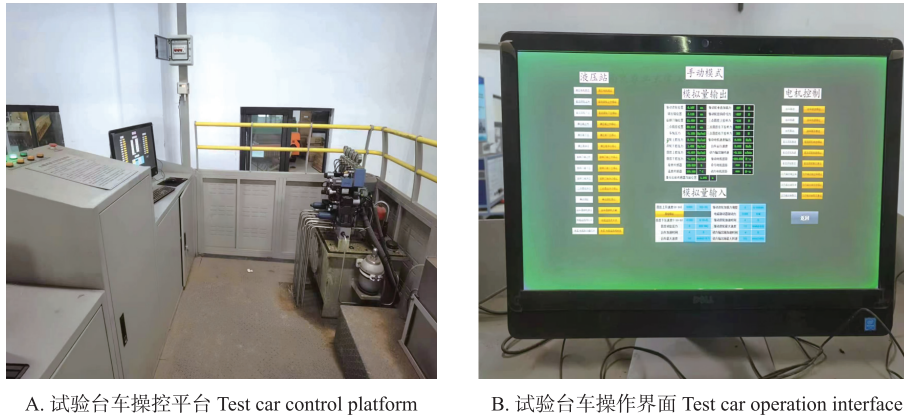
Fig. 9 Effect of machine forward speed(A)、tool shaft rotational speed(B) and straw length(C) on seedbed straw cleaning rate and seedbed flatness

从图 9-A 可见,随机具前进速度增加,种床清秸率呈减小趋势,种床平整度呈增加趋势。刀轴转速一定时适当提高机具前进速度有利于提升立旋刀切削碎土能力,同时使秸秆获得较大动能,增加秸秆侧向位移能力,但当机具前进速度过快时刀具与土壤秸秆接触时间缩短,旋耕速比降低易产生漏耕现象。从图 9-B 可见,随刀轴转速增加,种床清秸率先增加后趋于稳定,种床平整度增加。说明刀轴转速的变化对种床清秸率和种床平整度影响较显著,转速增加与土壤秸秆间接触作用增大,清秸平整效果较好。图 9-C 表明,秸秆长度增加种床清秸效果呈下降趋势,种床平整度有增加趋势。这是由于当刀轴转速和机具前进速度都不变时,秸秆长度较大,立旋刀入土切削阻力增加,秸秆位移量减小。

### 4.2 多因素正交试验

4.2.1 三因素三水平正交试验设计 为明确关键作业参数对种床耕作质量的影响并优化参数组合,选取机具前进速度、刀轴转速、秸秆长度为试验因素,选取种床清秸率、种床表平整度为评价指标,利用 Design-Expert 软件 Box-Behnken 试验原理于室内土槽试验台开展三因素三水平正交组合试验。为使机具在不漏

耕前提下保证耕后地表平整,刀轴转速不宜过快。通过前期预试验及单因素仿真试验分析结果,参考立式旋耕刀实际作业情况<sup>[20-24]</sup>确定刀轴转速围为 180~300 r·min<sup>-1</sup>。由于带状立式驱动耙多安装于播种机上与其作业速度一致,结合单因素仿真试验结果最终选取带状立式旋耕刀前进速度为 0.9~1.5 m·s<sup>-1</sup>。通过土槽试验台车操作系统(图 10)界面控制牵引电机和液压驱动系统实现作业参数的实时调节。采集正交试验数据并进行方差分析及作业参数优化。三因素三水平正交试验因素编码如表 2 所示,试验结果如表 3 所示。



A. 试验台车操控平台 Test car control platform B. 试验台车操作界面 Test car operation interface

图 10 室内土槽试验台车操作系统

Fig. 10 Control system of indoor soil bin test car

表 2 试验因素编码

Table 2 Codes of test factors

编码 Encode	影响因素 Influence factor	水平 Level		
		-1	0	+1
X <sub>1</sub>	机具前进速度/(m·s <sup>-1</sup> ) Machine forward speed	0.9	1.2	1.5
X <sub>2</sub>	刀轴转速/(r·min <sup>-1</sup> ) Tool shaft rotational speed	180	240	300
X <sub>3</sub>	秸秆长度/cm Straw length	5	10	15

表 3 三因素三水平正交试验结果

Table 3 Results of orthogonal tests with three factors and three levels

编号 Number	机具前进速度 X <sub>1</sub> Machine forward speed	刀轴转速 X <sub>2</sub> Tool shaft rotational speed	秸秆长度 X <sub>3</sub> Straw length	种床清秸率 Y <sub>1</sub> / % Seedbed straw cleaning rate	种床平整 Y <sub>2</sub> /mm Seedbed flatness
1	-1	-1	0	78.10	10.76
2	1	-1	0	60.20	10.57
3	-1	1	0	74.70	8.70
4	1	1	0	72.20	10.96
5	-1	0	-1	78.60	9.60
6	1	0	-1	69.70	10.06
7	-1	0	1	72.10	9.40
8	1	0	1	64.60	11.65
9	0	-1	-1	64.40	10.01
10	0	1	-1	81.80	9.11
11	0	-1	1	73.80	10.05
12	0	1	1	68.10	10.00
13	0	0	0	81.70	8.52
14	0	0	0	76.10	9.34
15	0	0	0	79.30	8.93
16	0	0	0	82.20	8.82
17	0	0	0	78.30	9.20

4.2.2 方差分析与回归模型建立 基于 Design Expert 13 软件对三因素三水平试验结果进行回归分析,得到机具前进速度、刀轴转速、秸秆长度 3 个自变量间的回归模型,根据得到的方差分析结果进行显著性检验。

1) 种床清秸率显著性分析

种床清秸率 Y<sub>1</sub> 方差分析结果如表 4 所示。机具前进速度 X<sub>1</sub>、刀轴转速 X<sub>2</sub>、秸秆长度 X<sub>3</sub> 对种床清秸

率  $Y_1$  的回归方程显著且失拟项不显著,表明回归模型在设计变量约束范围内与真实情况拟合精度高,可准确反映种床清秸率  $Y_1$  与机具前进速度  $X_1$ 、刀轴转速  $X_2$ 、秸秆长度  $X_3$  之间交互作用关系。主因素中机具前进速度  $X_1$  对种床清秸率  $Y_1$  的影响为极显著,刀轴转速  $X_2$ 、秸秆长度  $X_3$  对种床清秸率  $Y_1$  的影响显著。根据模型  $F$  值可知,各试验因素对种床清秸率  $Y_1$  影响的主次顺序为  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 。在保证回归模型显著且失拟项不显著的情况下,去除不显著项,得到各因素与种床清秸率之间回归方程:

$$Y_1 = 79.52 - 4.60X_1 + 2.54X_2 - 1.99X_3 + 3.85X_1X_2 - 5.77X_2X_3 - 4.50X_1^2 - 3.72X_2^2 - 3.77X_3^2 \quad (9)$$

表 4 种床清秸率方差分析结果

Table 4 Variance analysis results of seedbed straw cleaning rate

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方和 Sum of mean squares	F 值 F-value	P 值 P-value	显著性 Significance
模型 Model	672.68	9	74.74	14.94	0.000 9	**
$X_1$	169.28	1	169.28	33.83	0.000 7	**
$X_2$	51.51	1	51.51	10.29	0.014 9	*
$X_3$	31.60	1	31.60	6.31	0.040 2	*
$X_1X_2$	59.29	1	59.29	11.85	0.010 8	*
$X_1X_3$	0.49	1	0.49	0.10	0.763 5	
$X_2X_3$	133.40	1	133.40	26.66	0.001 3	**
$X_1^2$	85.17	1	85.17	17.02	0.004 4	**
$X_2^2$	58.35	1	58.35	11.66	0.011 2	*
$X_3^2$	59.92	1	59.92	11.97	0.010 5	*
残差 Residual	35.03	7	5.00			
失拟项 Lack of fit	9.86	3	3.29	0.522 5	0.689 6	
纯误差 Pure error	25.17	4	6.29			
总和 Total	707.71	16				

Note: \*\*  $P < 0.01$ , \*  $P < 0.05$ . The same below.

2) 种床平整度显著性分析

种床平整度  $Y_2$  方差分析结果如表 5 所示。机具前进速度  $X_1$ 、刀轴转速  $X_2$ 、秸秆长度  $X_3$  对种床平整度  $Y_2$  的回归方程显著且失拟项不显著,表明回归模型在设计变量约束范围内与真实情况拟合精度高,可准确反映种床平整度  $Y_2$  与机具前进速度  $X_1$ 、刀轴转速  $X_2$ 、秸秆长度  $X_3$  之间交互作用关系。主因素中机具前进速度  $X_1$  对种床平整度  $Y_2$  的影响极显著,刀轴转速  $X_2$ 、秸秆长度  $X_3$  对种床平整度  $Y_2$  的影响显著。根据模型  $F$  值可知各试验因素对种床平整度  $Y_2$  影响的主次顺序为  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 。在保证回归模型显著且失拟项不显著的情况下,去除不显著项,得到各因素与种床平整度之间回归方程:

$$Y_2 = 8.96 + 0.60X_1 - 0.33X_2 + 0.29X_3 + 0.61X_1X_2 + 0.45X_1X_3 + 0.84X_1^2 + 0.45X_2^2 + 0.38X_3^2 \quad (10)$$

表 5 种床平整度方差分析结果

Table 5 Variance analysis results of seedbed flatness

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方和 Sum of mean squares	F 值 F-value	P 值 P-value	显著性 Significance
模型 Model	11.70	9	1.30	16.30	0.000 7	**
$X_1$	2.86	1	2.86	35.79	0.000 6	**
$X_2$	0.86	1	0.86	10.75	0.013 5	*
$X_3$	0.67	1	0.67	8.43	0.022 9	*
$X_1X_2$	1.50	1	1.50	18.81	0.003 4	**
$X_1X_3$	0.80	1	0.80	10.04	0.015 7	*
$X_2X_3$	0.18	1	0.18	2.26	0.176 1	
$X_1^2$	2.94	1	2.94	36.81	0.000 5	**
$X_2^2$	0.85	1	0.85	10.70	0.013 7	*
$X_3^2$	0.61	1	0.61	7.63	0.028 0	*
残差 Residual	0.56	7	0.08			
失拟项 Lack of fit	0.14	3	0.05	0.46	0.727 3	
纯误差 Pure error	0.42	4	0.10			
总和 Total	12.26	16				

**4.2.3 响应曲面分析** 根据回归模型,利用 Design-expert 生成各影响因素交互项对种床清秸率和种床平整度的响应曲面,如图 11、12 所示。刀轴转速一定时,随着机具前进速度增加,种床清秸率呈现减小趋势;当机具前进速度一定时,种床清秸率随刀轴转速增大而增大后趋于稳定(图 11-A)。机具前进速度与秸秆长度交互作用对种床清秸率影响不显著(图 11-B)。秸秆长度一定时,随刀轴转速增大,种床清秸率逐渐增大;刀轴转速一定时,随秸秆长度增加种床清秸率先增大后趋于稳定(图 11-C)。刀轴转速一定时,随着机具前进速度增加,种床平整度呈增大的趋势;机具前进速度一定时,刀轴转速增加种床平整度呈增大趋势(12-A)。秸秆长度一定时,随着机具前进速度增加,种床平整度呈增大的趋势;机具前进速度一定时,随秸秆长度增加,种床平整度呈减小趋势(图 12-B)。刀轴转速与秸秆长度交互作用对种床平整度影响不显著(图 12-C)。

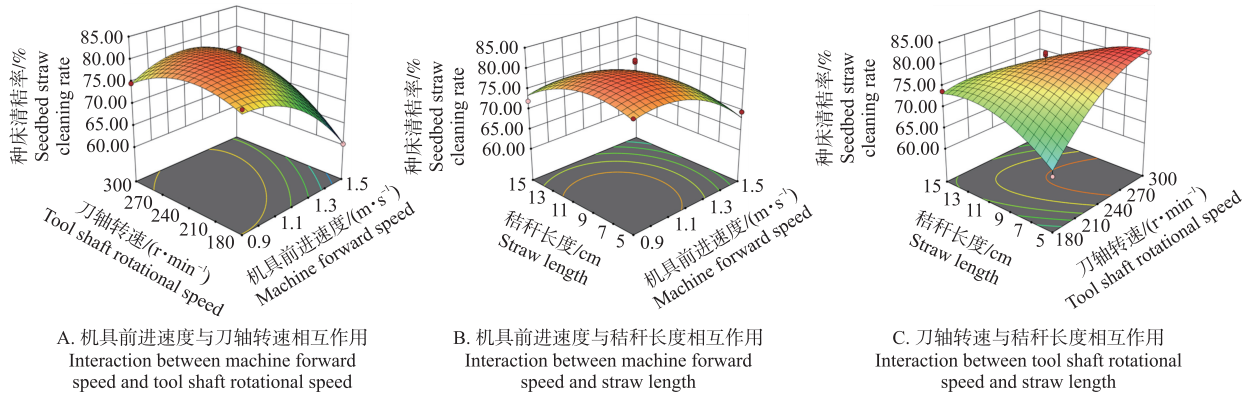


图 11 交互因素对种床清秸率的影响

Fig. 11 Influence of interaction factors on seedbed straw cleaning rate

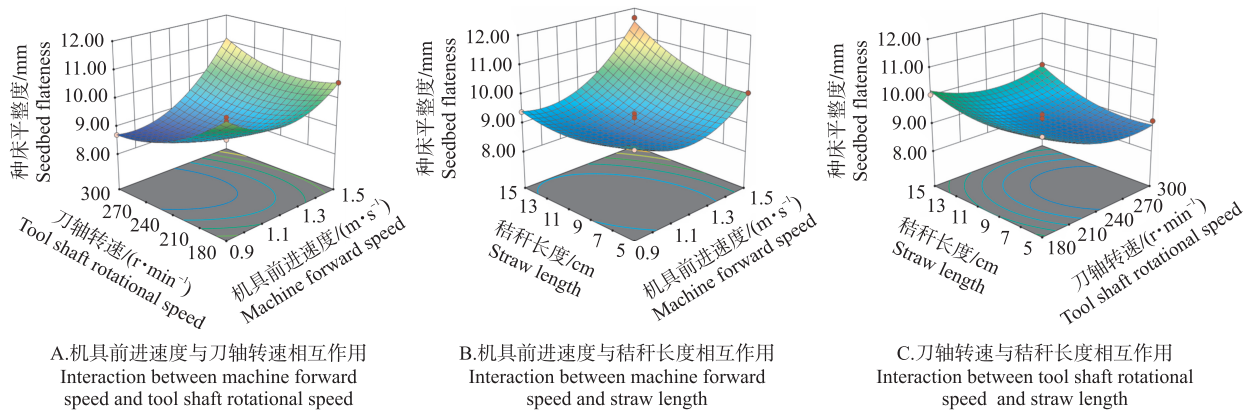


图 12 交互因素对种床平整度的影响

Fig. 12 Influence of interaction factors on seedbed flatness

**4.2.4 参数优化与验证** 根据回归模型分析结果,为获得稻茬田立旋装置最佳作业参数,利用 Design-expert 13 寻优模块对回归模型进行约束目标优化求解。在提高种床耕作质量同时考虑田间实际旋耕作业情况确定优化约束条件、约束目标,并建立种床清秸率、种床平整度双目标约束函数模型:

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ 0.9 \leq X_1 \leq 1.5 \\ 180 \leq X_2 \leq 300 \\ 5 \leq X_3 \leq 15 \end{cases} \quad (11)$$

双目标优化求解后的结果:当机具前进速度为  $1.09 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、立旋刀轴转速为  $281.5 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、水稻秸秆长度  $6.89 \text{ cm}$  时,种床清秸率为  $81.95\%$ ,种床平整度为  $8.67 \text{ mm}$ 。为验证优化后作业参数的有效性,将立旋作业参数调整至最优解后进行 3 次重复试验,得到种床清秸率 3 次试验值为  $79.75\%$ 、 $78.90\%$ 、 $79.90\%$ ,种床平整度 3 次试验值为  $8.90$ 、 $8.81$ 、 $9.03 \text{ mm}$ 。经验证,试验数值与模型最优解相对误差小于  $5\%$ ,说明研究模型可靠性强。

## 5 结论

本文基于离散元法构建了秸秆-土壤-立旋刀耦合系统的仿真模型,通过调整立式旋耕刀轴转速、机具前进速度及水稻秸秆长度来模拟稻茬田不同关键作业参数下的立旋刀具作业性能。以种床清秸率和种床平整度为评价指标,通过单因素仿真试验确定影响因素与指标关系。搭建立式带状旋耕室内土槽试验台,研究秸秆-土壤-立旋装置交互作用对种床清秸与平整效果的影响。基于响应面法构建目标函数的回归模型,分析各因素间相互作用对种床清秸率和种床平整度的影响,确定影响种床清秸率和种床平整度各因素主次顺序为机具前进速度、刀轴转速、秸秆长度。对回归模型优化求解,得到种床清秸率高且种床平整度低的最优参数组合:机具前进速度为  $1.09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、刀轴转速为  $281.5 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、秸秆长度  $6.89 \text{ cm}$ 。该最优条件下的种床清秸率为  $81.95\%$ ,种床平整度为  $8.67 \text{ mm}$ 。对优化的参数验证后得到实测值与模型优化值平均相对误差小于  $5\%$ ,该模型可为稻茬田带状立式旋耕作业参数调整提供参考,为研究带状耕作关键部件与机具设计优化提供理论依据。

从土槽台架试验和离散元仿真试验探究不同关键作业参数下的立旋刀具作业性能,但实际水旱轮作制度下的稻茬田土壤和秸秆条件差异性大,后续还有待于进一步进行多点田间试验验证。也可考虑借助现代信息技术,如通过搭载可移动式智能化检测平台实现带状立旋耕作机械种床质量的定量检测研究,为进行带状立旋耕作机械结构优化与作业参数调整提供依据。

### 参考文献 References:

- [1] 房焕,李奕,周虎,等. 稻麦轮作区秸秆还田对水稻土结构的影响[J]. 农业机械学报,2018,49(4):297-302.  
Fang H, Li Y, Zhou H, et al. Effects of straw incorporation on paddy soil structure in rice-wheat rotation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4):297-302 (in Chinese with English abstract).
- [2] 赵宏波,何进,李洪文,等. 秸秆还田方式对种床土壤物理性质和小麦生长的影响[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊1):60-67.  
Zhao H B, He J, Li H W, et al. Effect of straw returning manners on seedbed soil physical properties and winter wheat growth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Suppl 1):60-67 (in Chinese with English abstract).
- [3] Mitchell J P, Shrestha A, Mathesius K, et al. Cover cropping and no-tillage improve soil health in an arid irrigated cropping system in California's San Joaquin Valley, USA[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 165:325-335.
- [4] 张卫卫,刘正平,郝向泽,等. 稻田全程机械化作业环节的关键障碍因子研究[J]. 中国农机化学报,2018,39(5):116-118.  
Zhang W W, Liu Z P, Hao X Z, et al. Study on the key obstacle factors of mechanized operation in rice fields[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(5):116-118 (in Chinese with English abstract).
- [5] Lee K S, Park S H, Park W Y, et al. Strip tillage characteristics of rotary tiller blades for use in a dryland direct rice seeder[J]. Soil and Tillage Research, 2003, 71(1):25-32.
- [6] Zhang L B, Cai Z X, Wang L W, et al. Coupled Eulerian-Lagrangian finite element method for simulating soil-tool interaction[J]. Biosystems Engineering, 2018, 175:96-105.
- [7] Matin M A, Fielke J M, Desbiolles J M A. Furrow parameters in rotary strip-tillage; effect of blade geometry and rotary speed[J]. Biosystems Engineering, 2014, 118:7-15.
- [8] Barr J B, Ucgul M, Desbiolles J M A, et al. Simulating the effect of rake angle on narrow opener performance with the discrete element method[J]. Biosystems Engineering, 2018, 171:1-15.
- [9] 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.
- [10] 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]. 农业机械学报, 2016, 47(1):60-67.  
Fang H M, Ji C Y, Tagar A A, et al. Simulation analysis of straw movement in straw-soil-rotary blade system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):60-67 (in Chinese with English abstract).
- [11] 赵宏波,何进,郑智旗,等. 少免耕播种机条带型行间侧地清秸防堵装置研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12):24-34.  
Zhao H B, He J, Zheng Z Q, et al. Strip tillage inter-row residue side-throwing device of no/minimum-till seeder for anti-blocking and seedbed-cleaning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12):24-34 (in Chinese with English abstract).
- [12] 杨艳山,吴凡,赵亚平,等. 耕作部件对带状旋耕耕作质量的影响研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(12):184-189.  
Yang Y S, Wu F, Zhao Y P, et al. Effect of tillage tools on the quality of strip rotary tillage[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(12):184-189 (in Chinese with English abstract).
- [13] 顾峰玮,胡志超,陈有庆,等. “洁区播种”思路下麦茬全秸秆覆盖地花生免耕播种机研制[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20):15-23.  
Gu F W, Hu Z C, Chen Y Q, et al. Development and experiment of peanut no-till planter under full wheat straw mulching based on “clean area planting”[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering, 2016, 32(20):15-23 (in Chinese with English abstract).

- [14] 施印炎,罗伟文,胡志超,等. 全量秸秆粉碎条铺与种带分型清秸装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(4):58-67.  
Shi Y Y,Luo W W,Hu Z C,et al. Design and test of equipment for straw crushing with strip-laying and seed-belt classification with cleaning under full straw mulching[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(4):58-67(in Chinese with English abstract).
- [15] 王英博,荣高,李洪文,等. 立式驱动浅旋耙设计与参数优化[J]. 农业工程学报,2019,35(9):38-47.  
Wang Y B,Rong G,Li H W,et al. Design and parameter optimization of vertical driving-type surface rotary tillage machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering,2019,35(9):38-47(in Chinese with English abstract).
- [16] 聂胜委,张浩光,张巧萍,等. 立式旋耕对小麦生长季土壤紧实度及产量的影响[J]. 农业资源与环境学报,2021,38(1):36-42.  
Nie S W,Zhang H G,Zhang Q P,et al. Effects of vertical rotary tillage on wheat yield and soil compaction during wheat growing seasons[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment,2021,38(1):36-42(in Chinese with English abstract).
- [17] 王伟伟,吴晓芳,王晴晴,等. 免耕直播下秸秆还田方式对夏玉米苗期生长的影响[J]. 农业机械学报,2020,51(5):315-323.  
Wang W W,Wu X F,Wang Q Q,et al. Effects of different seedbed straw treatments on summer maize seedling growth under no-tillage direct seeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(5):315-323(in Chinese with English abstract).
- [18] 徐高明,丁启朔,汪小昂,等. 秸秆-土壤-旋耕机交互下秸秆位移与埋覆效果研究[J]. 农业机械学报,2022,53(7):23-29.  
Xu G M,Ding Q S,Wang X C,et al. Analysis of straw displacement and burying effect in straw-soil-rotary tiller interaction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(7):23-29(in Chinese with English abstract).
- [19] 何瑞银,段庆飞,陈信信,等. 旋耕还田秸秆空间分布质量离散元分析[J]. 农业机械学报,2022,53(6):44-53.  
He R Y,Duan Q F,Chen X X,et al. DEM analysis of spatial distribution quality of rotary tillage straw returning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(6):44-53(in Chinese with English abstract).
- [20] Tang Z Y,Gong H,Wu S L,et al. Modelling of paddy soil using the CFD-DEM coupling method[J]. Soil and Tillage Research,2023,226:105591.
- [21] Mak J,Chen Y,Sadek M A. Determining parameters of a discrete element model for soil-tool interaction[J]. Soil and Tillage Research,2012,118:117-122.
- [22] 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]. 农业机械学报,2017,48(12):78-85.  
Wang X L,Hu H,Wang Q J,et al. Calibration method of soil contact characteristic parameters based on DEM theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(12):78-85(in Chinese with English abstract).
- [23] Ucgul M,Saunders C,Fielke J M. Comparison of the discrete element and finite element methods to model the interaction of soil and tool cutting edge[J]. Biosystems Engineering,2018,169:199-208.
- [24] 郝志豪,郑恩来,李勋,等. 免耕播种机旋耕刀耕作性能分析与结构优化[J]. 农业工程学报,2023,39(2):1-13.  
Hao Z H,Zheng E L,Li X,et al. Performance analysis of the soil-contacting parts for no-tillage planters and optimization of blade structure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2023,39(2):1-13(in Chinese with English abstract).
- [25] 王奇瑞,毛罕平,李青林. 基于离散元的柔性作物茎秆振动响应仿真[J]. 农业机械学报,2020,51(11):131-137.  
Wang Q R,Mao H P,Li Q L. Simulation of vibration response of flexible crop stem based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(11):131-137(in Chinese with English abstract).
- [26] 丁启朔,任骏,BELAL Eisa Adam,等. 湿黏水稻土深松过程离散元分析[J]. 农业机械学报,2017,48(3):38-48.  
Ding Q S,Ren J,Adam B E,et al. DEM analysis of subsoiling process in wet clayey paddy soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(3):38-48(in Chinese with English abstract).
- [27] 黄玉祥,杭程光,苑梦婵,等. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(7):80-88.  
Huang Y X,Hang C G,Yuan M C,et al. Discrete element simulation and experiment on disturbance behavior of subsoiling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(7):80-88(in Chinese with English abstract).

责任编辑:沈波