doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.02.026

# 基于 DEM - MBD 耦合的棉花直播机仿形开沟过程机理仿真与优化试验

魏　松[1]　张驰海[1]　詹振宇[1]　农　峰[1]　丁幼春[1,2]

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

**摘要**: 针对现有长江流域棉区麦后直播装备仿形效果差、播种深度合格指数低、播种深度一致性不理想等问题,结合长江流域棉区麦后直播棉农艺要求设计了一种独立仿形棉花直播机,在深入分析长江流域棉区麦后直播过程中仿形开沟过程基础上,采用离散元法与多体动力学耦合方法对仿形开沟作业过程进行了仿真,确定了影响种沟深度的关键结构与工作参数。利用 EDEM - RecurDyn 耦合仿真建立了土壤与仿形开沟装置互作模型,研究了弹簧刚度和机具作业速度对开沟深度合格指数及一致性变异系数的影响规律。以开沟深度合格指数和开沟深度一致性变异系数为评价指标进行单因素二次正交旋转组合试验,确定最优参数组合为弹簧刚度 15 N/mm、作业速度 0.8 m/s,最优参数组合条件下:开沟深度合格指数为 86.7%,开沟深度一致性变异系数为 11.6%。最优参数组合下田间试验结果为:开沟深度合格指数 84%,开沟深度一致性变异系数 12.80%,田间与仿真开沟深度合格指数、开沟深度一致性变异系数相对误差为 3.21%、9.38%。优化后参数组合与其他组合田间试验结果为:开沟深度合格指数提高不小于 6 个百分点,开沟深度一致性变异系数降低不小于 1.69 个百分点,田间出苗效果满足长江流域棉区麦后直播作业要求。

**关键词**: 棉花; 播种机; DEM - MBD 耦合; 仿形机构; 播种深度

**中图分类号**: S223.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)02-0275-15　　**OSID**:

# Simulation and Optimization Test of Imitation Furrowing Process of Cotton Direct Seeding Machine Based on DEM - MBD Coupling

WEI Song[1]　ZHANG Chihai[1]　ZHAN Zhenyu[1]　NONG Feng[1]　DING Youchun[1,2]

(1. *College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan* 430070, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan* 430070, *China*)

**Abstract**: Aiming at the existing direct seeding equipment in the cotton area of the Yangtze River Basin, which has poor imitation effect, low seeding depth qualification index, and unsatisfactory consistency of seeding depth, an independent imitation cotton direct seeding machine was designed. The discrete element method and multi-body dynamics coupling method were used to simulate and analyze the operation process of imitation furrowing, and the key structure and working parameters affecting the depth of seeding furrow were determined. A one-factor quadratic orthogonal rotational combination test was conducted with the qualified index of furrowing depth and the coefficient of variation of furrowing depth consistency as evaluation indexes, and the optimal parameter combinations were determined to be the spring stiffness of 15 N/mm and the operating speed of 0.8 m/s. Under the conditions of optimal parameter combinations, the qualified index of furrowing depth was 86.7% and the coefficient of variation of furrowing depth consistency was 11.6%. The results of field test under the optimal parameter combination showed that the qualified index of furrowing depth was 84%, the coefficient of variation of furrowing depth consistency was 12.80%, and the relative errors of field and simulation of qualified index of furrowing depth and coefficient of variation of furrowing depth consistency were 3.21% and 9.38%.

收稿日期: 2024-09-25　修回日期: 2024-10-18

**基金项目**: 湖北洪山实验室重大科研项目(2021hszd006)和湖北省棉花科技支撑计划项目(2023)

**作者简介**: 魏松(1994—),男,博士生,主要从事农业机械设计及理论研究,E-mail: weisong0707@163.com

**通信作者**: 丁幼春(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事智慧农业技术与装备研究,E-mail: kingbug163@163.com

Optimized parameter combinations and other combinations of field test results were as follows: open furrow depth qualified index was increased by not less than 6 percentage points, open furrow depth consistency coefficient of variation was decreased by not less than 1.69 percentage points, and the field emergence effect can meet the requirements of the Yangtze River Basin cotton area live operation.

**Key words**: cotton; seeder; DEM - MBD coupling; profilling mechanism; seeding depth

## 0 引言

棉花作为国家重要战略物资和经济作物,随着国家陆续恢复内陆棉种植生产,长江流域棉区棉花种植面积和产量稳定对国家农业具有重要意义[1-2]。棉花播种质量对其产量有重大影响,由于棉花种子破土能力比小麦、玉米较弱,长江流域麦棉轮作区土壤黏重且播种地块通常会伴有秸秆残茬,地表起伏较大,播种深度难以保证,进而影响种子播深一致性[3-6]。播深一致性是衡量播种机作业质量的重要指标。

仿形机构是播种机能够开出稳定的开沟深度,保证播深一致的关键。常见的仿形机构平行四连杆与仿形轮相结合的结构,主要包括平行四连杆、仿形轮、拉簧和仿形调节机构。仿形机构按照仿形方式分为被动式和主动式。被动仿形通过利用弹簧或单体配重来改变下压力,其结构简单、成本低和安装调节便利,目前国内应用较为广泛[7-8]。何勋等[9]为了解决黄淮海地区小麦播种质量差问题,设计了一种具有仿形的种沟镇压播种装置,能够有效保证播后镇压均匀性性。JIA 等[10]针对东北黏重土壤玉米播种质量差,设计了一种同步开沟镇压装置,能够得到光滑的 V 形种沟,为种子创建了优质的种沟环境。赵淑红等[11]设计了一种滑刀集成式播种开沟器,实现了种子先于土壤流入沟底,解决了传统开沟器扰动土壤流入种沟,难以保证播深的一致性的问题。吕金庆[12]等设计了一种马铃薯播种机播深调控装置,采用单独的仿形播种结构,解决了传统马铃薯播种整体仿形、适应性差等问题。主动仿形是在被动仿形结构的基础上,安装液压缸和空气囊等方式,基于传感器实时检测播种单体对地压力,根据检测结果实时调控液压缸或空气囊来调节播种单体对地表的压力,使得播种单体与地面紧密贴合保证播种深度一致性。黄东岩等[13]利用 PVDF 压电薄膜传感器来检测玉米免耕播种单体限深轮的胎面形变量来表示播种单体对地压力,通过调节平行四连杆和机架的空气弹簧来实时控制对地压力来控制播种深度。白慧娟等[14]采用压力传感器实时测定播种单体对地压力,根据检测结果控制液压缸对播种单体下压力进而实时调节播深。Precision Planting 公司研制了一种仿形机构压力调节系统,基于传感器实时检测播种单体对地压力,根据检测结果调控空气囊的压力,保证播种单体与地表紧密贴合,能够有效播种深度稳定性,试验结果表明采用该方式可使玉米每公顷增产 500 kg。国外对于精密播种作业机具均采用独立仿形,可以独立控制播种单体播深、粒距(株距),适合大田规模作业,而我国长江流域农田小且分散,难以在长江流域棉区推广应用。长江流域棉区麦后直播集中在 5 月下旬,该时节降水量大,目前长江流域棉区麦后直播装备由于缺少仿形机构,为了保证播种质量,在播种前先进行平整地后再进行播种作业,作业复合度低,机械多次进地碾压,表土整理后,导致墒情不一致、出苗不齐,甚至缺苗断垄。

在播种深度控制研究中,需分析机具土壤之间的相互作用及其规律,目前研究主要采用理论分析和试验相结合的方法,受机具与土壤间复杂作用的影响以及试验条件和测量技术的限制,无法准确分析仿形机构关键参数及作业参数对开沟装置作业性能影响规律。本文设计一种独立仿形机构的棉花直播机。分析开种沟过程并建立开沟深度稳定性的动力学微分方程,获取影响开沟效果的因素。并通过 EDEM - RecurDyn 耦合仿真和正交旋转中心组合试验得到最优工作及结构参数组合,最后通过田间试验对耦合仿真模型准确性以及开沟的工作性能进行验证,以期为长江流域麦后棉花直播机械化开沟技术与装备研制提供理论支撑。

## 1 农艺要求与总体结构

### 1.1 农艺要求

长江流域麦后直播棉生产模式如图 1 所示,5 月中下旬小麦收获后,采用直播机一次性下地完成种床旋耕灭茬,厢面两侧开畦沟便于雨季排水,精量播种及覆土工序[15-17]。播种前免施基肥,苗前喷施除草剂封闭杂草,后期进行中耕施肥、催熟脱叶等环节。

长江流域麦后直播棉种植模式:采用行距 76 cm,株距 9 ~ 15 cm,播量 87 000 ~ 138 000 粒/$hm^2$,播种深度为 2 ~ 4 cm,三行一厢,厢面两侧开畦沟,每穴精量播种 1 ~ 2 粒(图 2)。

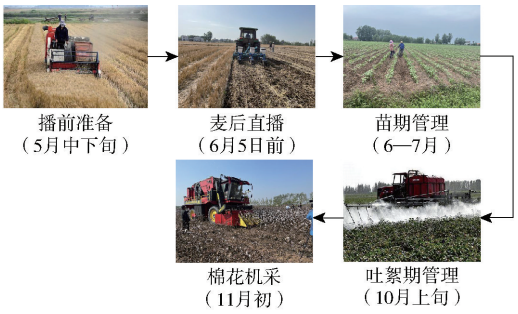



图 1　长江流域麦后直播棉生产模式

Fig. 1　Post-wheat direct cotton production model in Yangtze River Basin

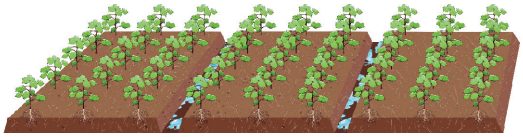


图 2　长江流域麦后棉花直播种植模式

Fig. 2　Cotton direct seeding planting pattern for post-harvest wheat in Yangtze River Basin

### 1.2　总体结构

棉花直播机(图 3)主要由仿形播种单体、排种系统、机架、测速雷达、旋耕装置、开畦沟装置、播种控制终端等组成。工作时,直播机由拖拉机牵引前进,其中双圆盘开沟器实现开种沟功能,仿形弹簧、仿形调节螺钉及仿形拉杆等实现仿形调节功能,旋耕装置在拖拉机动力输出轴驱动下将土壤细碎、疏松,并将麦茬土壤混合物裹挟旋入耕层土壤,构建良好种床环境,两侧前后组合式开沟犁开出畦沟,利于排水;同时,棉花种子从气力式排种器排种口落到双圆盘开沟器内置的导种管中完成投种作业,测速雷达实时采集机具作业速度,播种控制终端根据设定的播种量及株距,结合机具作业速度等信息驱动排种电机转动,实现随速播种作业。整机主要技术参数如表 1 所示。

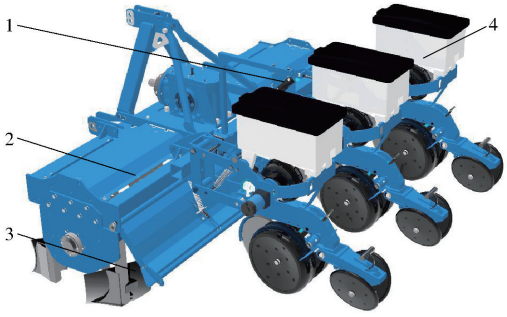



图 3　整机结构示意图

Fig. 3　Machine structure diagram

1. 测速雷达　2. 旋耕装置　3. 开畦沟装置　4. 播种单体主体

### 1.3　仿形开种沟结构与工作原理

播种单体如图 4 所示,播深调节装置主要由平行四连杆机构、播种系统、限深轮、覆土器和开沟器 6 部分组成。播种作业时,通过平行四连杆的上下

表 1　主要技术参数

Tab. 1　Main technical parameters

| 参数 | 数值/形式 |
|---|---|
| 外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm) | 2 100×2 500×850 |
| 作业行数/行 | 3 |
| 行距/mm | 760 |
| 排种器形式 | 气吸式 |
| 播种深度/mm | 20～40 |
| 工作幅宽/mm | 2 300 |
| 作业速度/(m·s$^{-1}$) | 0.5～1.7 |
| 配套动力/kW | ≥80 |

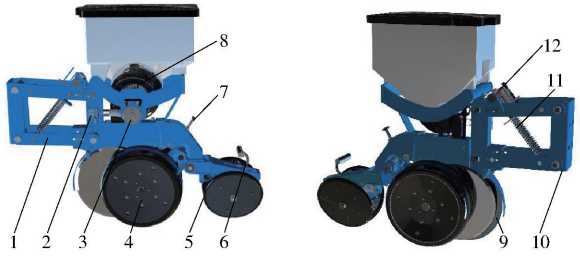



图 4　播种单体结构图

Fig. 4　Overall structure diagram of planter unit

1. 平行四连杆　2. 直流无刷涡轮风机　3. 直流减速电机　4. 限深轮　5. 镇压覆土装置　6. 镇压调节杆　7. 限深调节杆　8. 气吸式棉花排种器　9. 双圆盘开沟装置　10. 快速连接板　11. 仿形弹簧　12. 弹簧调节螺钉

仿形来适应地表凹凸不平运动,其中上拉杆与下拉杆始终保持平行状态,通过刚性连接的开沟装置在实际作业过程中入土角度恒定。当播种单体运动到地势高位置时,拉簧对平行四连杆有下压力作业,可以有效避免开沟深度变小,反之同理。同时开沟器两侧设置有限深轮,保证地势高低不平下开出稳定的种沟深度,开沟过程如图 5 所示。

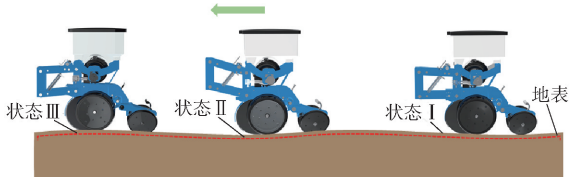



图 5　仿形开沟工作原理示意图

Fig. 5　Sketches of working principle

## 2　仿形开沟装置结构设计

### 2.1　平行四杆仿形尺寸设计

播深不一致会影响出苗率和作物产量,因此,保证播种深度稳定性至关重要。四连杆仿形单体结构简单、适应性好,可以保证播种单体随地表起伏变化而变化,保证播种深度的一致性[18]。为了保证开沟器稳定工作,在四连杆上设置拉力弹簧,使限深轮上始终保持适宜的接地压力,从而使开沟深度基本一致,当土壤坚硬、整地质量差或播种单体重量较轻

时,在四连杆上安装拉力弹簧,以调节限深轮对地压力,从而实现开沟深度一致[19-21]。播种单体工作时,受力分析如图 6 所示。

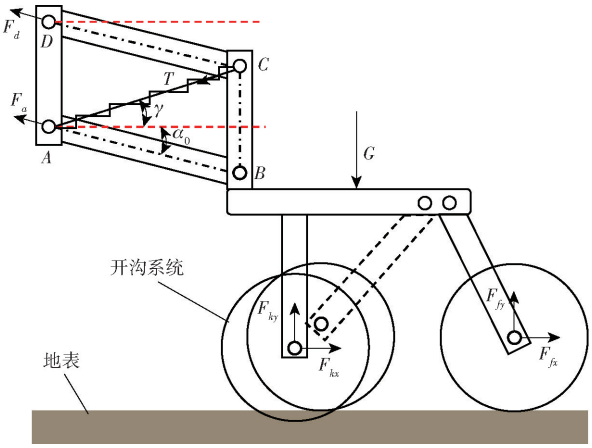



图 6 播深调控装置结构示意图

Fig. 6 Schematic of sowing depth control structure

整机稳定作业时,其受力平衡条件为

$$\begin{cases} F_a\cos\alpha_0 + F_d\cos\alpha_0 + T\cos\gamma - F_{kx} - F_{fx} = 0 \\ F_a\sin\alpha_0 + F_d\sin\alpha_0 - T\sin\gamma - G + F_{ky} + F_{fy} = 0 \end{cases} \tag{1}$$

其中

$$F_{ky} = \mu F_{kx} \tag{2}$$

式中 $F_a$——下拉杆受力,N

$F_d$——上拉杆受力,N

$F_{kx}$、$F_{ky}$——开沟系统受力水平、竖直分力,N

$F_{fx}$、$F_{fy}$——镇压覆土受力水平、竖直分力,N

$T$——拉簧拉力,N

$\gamma$——拉簧拉力与水平方向夹角,(°)

$\alpha_0$——仿形机构初始牵引角,(°)

$G$——播种单体重力,N

$\mu$——阻尼系数

整理式(1)可得开沟器所受到的垂直反力为

$$F_{ky} = \frac{G + T(\sin\gamma + \cos\gamma\tan\alpha_0) - F_{fx}\tan\alpha_0 - F_{fy}}{1 + \mu\tan\alpha_0} \tag{3}$$

为了保证播种机在田间地表起伏不平状况下开沟作业稳定,需保持 $F_{ky} > 0$,即

$$T > \frac{F_{fy} + F_{fx}\tan\alpha_0 - G}{\sin\gamma + \cos\gamma\tan\alpha_0} \tag{4}$$

其中

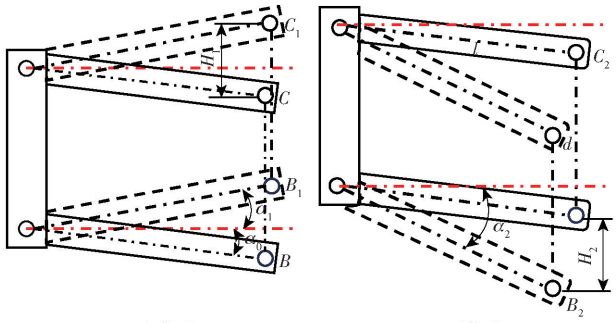
$$T = kx \tag{5}$$

式中 $k$——弹簧刚度,N/mm

$x$——形变量,mm

播种机在地表不平作业时,需保证开沟深度 $h$ 稳定,需保证弹簧有一定的预紧力。当弹簧预紧力过小,仿形向下力过小,开沟过浅;弹簧预紧力过大,仿形向下力过大,开沟深度过深。因此,在弹簧刚度一定时,需保证合适的弹簧预紧力。

同时,为保证播种机稳定作业,同时需考虑仿形机构长杆长度 $l$、初始牵引角 $\alpha_0$,对平行四边形仿形结构进行分析如图 7 所示。




(a) 上仿形 (b) 下仿形

图 7 平行四边形仿形结构示意图

Fig. 7 Schematics of parallelogram profile

由图 7 可得,平行四连杆仿形机构总仿形量 $H$ 为

$$H = H_1 + H_2 \tag{6}$$

其中

$$\begin{cases} H_1 = l\sin(\alpha_0 + \alpha_1) \\ H_2 = l\sin(\alpha_0 + \alpha_2) - l\sin\alpha_0 \end{cases} \tag{7}$$

式中 $H_1$——上仿形量,mm

$H_2$——下仿形量,mm

$\alpha_1$——上仿形变化角,(°)

$\alpha_2$——下仿形变化角,(°)

由式(6)可知,仿形机构总仿形量固定时,平行四连杆长杆长度 $l$ 越大,仿形机构上下总变化角度越小,机具纵向尺寸大,整机重心降低并后移,此时播种机作业稳定性越好,利于播种作业,但机具纵向尺寸过大不利于机具田间调头以及运输。故需保证开沟深度一致,须选取合适的平行四连杆长杆长度和上下仿形角度。一般仿形总变化角 $\alpha_1 + \alpha_2 \leqslant 45°$[22]。

综合考虑整机播种和悬挂作业稳定,选择上仿形变化角 $\alpha_2$ 为 10°,下仿形变化角 $\alpha_1$ 为 10°,初始牵引角 $\alpha_0$ 为 0°,平行四连杆长杆长度为 260 mm,短杆长度为 100 mm,代入式(6)中,计算并取整得 $H$ 为 90 mm。一般播种机仿形量为 80 ~ 100 mm[23],平行四连杆仿形结构达到了设计要求。

## 2.2 同步限深双圆盘开沟器

播种开沟器工作时,将部分土壤抛起、抛翻、推挤或挤压形成沟痕[24]。双圆盘开沟结构示意图及开沟轮廓如图 8 所示。圆盘半径太小,易发生转不动和壅土,增加阻力。参考《农业机械设计手册》,本文设计为圆盘半径 $R$ 为 190 mm。

如图 8 所示,圆盘夹角 $\delta$ 越小,开出的沟越小,工作阻力小。但过小,会使两圆盘之间的空间无法容纳导种管[25],综合考虑取 $\delta$ 为 15°。

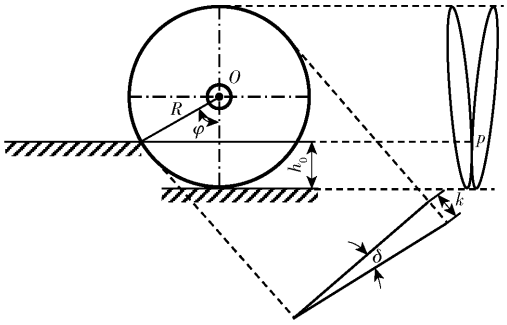



图 8　双圆盘开沟示意图

Fig. 8　Double disc opener structure diagram

由图 8 可得

$$\begin{cases}\cos\varphi=\dfrac{R-h_0}{R}\\ L=2R\sin\varphi\\ K=2L\sin\dfrac{\delta}{2}\end{cases}\tag{8}$$

式中　$\varphi$——聚点 $m$ 在竖直方向的夹角，(°)

$h_0$——开沟深度，mm

$L$——聚点位置对应弦长，mm

$K$——开沟宽度，mm

根据长江流域棉花直播农艺要求，开沟器对土壤切削过程中最大切削深度为 20 ~ 40 mm。将上述圆盘参数代入式(8)求出圆盘开沟宽度 $K$ 为 44.31 ~ 60.90 mm，$\varphi$ 为 26.53° ~ 37.87°。能够满足长江流域地区麦后直播棉作业的要求。同时在双圆盘开沟器左右两侧设计有同步限深轮，可通过播深调节手把来调节开沟深度。

## 3　开沟稳定性数学模型建立

为探索播种调节装置各因素对开沟深度稳定性的影响关系，采用播种单体开沟稳定性数学模型对播种深度进行数学模型建立[25-26]。如图 9 所示，假设机具以一定速度匀速前进，播种单体在初始稳定作业状态重心为 $P_0$，当运动到地表不平位置重心为 $P_1$。

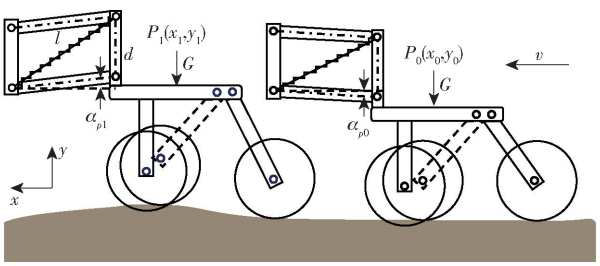



图 9　播种单体仿形过程示意图

Fig. 9　Schematic of seeding monomer profiling process

以单体开沟圆盘和覆土轮中心连线与理论水平作业平面平行为势能零点，仿形后点 $P_1$ 系统势能为

$$U=mg(h_2-h_1)+\frac{k\Delta x^2}{2}\tag{9}$$

其中
$$\begin{cases}h_2-h_1=l(\sin\alpha_{p0}-\sin(\alpha_{p0}-\beta))\\ \Delta x=\sqrt{l^2+h^2-2lh\sin(\alpha_{P0}-\beta)}-L_0\\ L_0=\sqrt{l^2+h^2-2lh\sin\alpha_{P0}}\\ \beta=\alpha_{P0}-\alpha_{P1}\end{cases}\tag{10}$$

式中　$U$——系统势能，J

$m$——系统质量，kg

$h_2$——系统竖直仿形后质心高度，mm

$h_1$——系统竖直仿形前质心高度，mm

$\Delta x$——弹簧形变量，mm

$L_0$——系统竖直仿形前四连杆对角长度，mm

在点 $P_1(x_1,y_1)$ 处，横、纵向坐标值可表示为

$$\begin{cases}x_1=x_0+vt-l\cos(\alpha_{P0}-\beta)+l\cos\alpha_{P0}\\ y_1=y_0+l(\sin\alpha_{P0}-\sin(\alpha_{P0}-\beta))\end{cases}\tag{11}$$

式中　$v$——前进速度，m/s

$t$——播种单体仿形工作时摆动时间，s

对式(11)求导得

$$\begin{cases}\dot{x}_1=v-l\dot{\beta}\sin(\alpha_{P0}-\beta)\\ \dot{y}_1=l\dot{\beta}\cos(\alpha_{P0}-\beta)\end{cases}\tag{12}$$

由式(12)可得，应用广义坐标及其导数表示此仿形后系统动能 $T_1$ 为

$$T_1=\frac{mv^2+ml^2\dot{\beta}^2-2mvl\dot{\beta}\sin(\alpha_{P0}-\beta)+I\dot{\beta}^2}{2}\tag{13}$$

式中　$I$——平面系统对质心转动惯量，kg·m$^2$

在牵引角向上摆动量 $\beta$ 作为广义坐标系中建立拉格朗日微分方程为

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial(T_1-U)}{\partial\dot{\beta}}\right)-\frac{\partial(T_1-U)}{\partial\beta}=0\tag{14}$$

由式(9)、(10)、(13)得

$$\begin{cases}\dfrac{\partial(T_1-U)}{\partial\dot{\beta}}=ml^2\dot{\beta}-mvl\sin(\alpha_{P0}-\beta)+I\dot{\beta}\\ \dfrac{\partial(T_1-U)}{\partial\beta}=mvl\dot{\beta}\cos(\alpha_{P0}-\beta)-mgl\cos(\alpha_{P0}-\beta)+\\ \qquad klh\cos(\alpha_{P0}-\beta)-\dfrac{kL_0lh\cos(\alpha_{P0}-\beta)}{\sqrt{l^2+h^2-2lh\sin(\alpha_{P0}-\beta)}}\\ \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\dfrac{\partial(T_1-U)}{\partial\dot{\beta}}\right)=ml^2\ddot{\beta}+mvl\dot{\beta}\cos(\alpha_{P0}-\beta)+I\ddot{\beta}\end{cases}\tag{15}$$

将式(12)代入式(11)，以向上摆角 $\beta$ 为广义坐标方程为

$$ml^2\ddot{\beta}+I\ddot{\beta}+mgl\cos(\alpha_{P0}-\beta)-klh\cos(\alpha_{P0}-\beta)+\frac{kL_0lh\cos(\alpha_{P0}-\beta)}{\sqrt{l^2+h^2-2lh\sin(\alpha_{P0}-\beta)}}=0\tag{16}$$

对式(13)积分得

$$ml^2\dot{\beta}+I\dot{\beta}+mgl\cos(\alpha_{P0}-\beta)t-klh\cos(\alpha_{P0}-\beta)t+\frac{kL_0lh\cos(\alpha_{P0}-\beta)t}{\sqrt{l^2+h^2-2lh\sin(\alpha_{P0}-\beta)}}+C_1=0 \tag{17}$$

式中 $C_1$——常数

当播种单体实际工作时,向上摆动角 $\beta$ 很小,令

$$\begin{cases} a=mgl\cos\alpha_{P0} \\ b=lh\cos\alpha_{P0} \\ c=\dfrac{L_0lh\cos\alpha_{P0}}{\sqrt{l^2+h^2-2lh\sin\alpha_{P0}}} \end{cases} \tag{18}$$

将式(18)代入式(17)整理得

$$\dot{\beta}=\frac{(kb-a-kc)t+C_2}{ml^2+I} \tag{19}$$

式中 $C_2$——常数

对式(19)积分得 $C_2=0$。最终得到开沟深度稳定性数学模型为

$$\beta=\frac{(kb-a-kc)t^2}{2(ml^2+I)} \tag{20}$$

由式(19)、(20)可知,作业速度和弹簧刚度 $k$ 直接影响播种单体仿形时牵引角向上摆动量 $\beta$,进而影响开沟深度一致性。同时,机构质量与尺寸、初始牵引角等对开沟深度稳定性也具有一定影响。

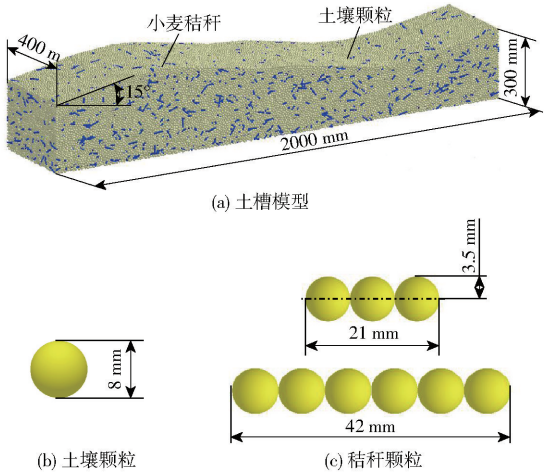
## 4 仿真试验

### 4.1 EDEM-RecurDyn 耦合系统仿真建模

播种深度形成是由开沟器开沟、土壤回流和覆土镇压共同作用的结果,其中开沟器开沟深度一致性是最主要的影响因素[7]。开种沟过程土壤与开种沟装置作用关系复杂,理论分析难度大,DEM-MBD 耦合仿真手段被广泛应用于机械装置与土壤、种子等散粒体间的互作机理分析[27]。

#### 4.1.1 离散元模型

针对长江中下游麦后棉花种植土壤作业环境及仿真时效性等特点,仿形开种沟装置作业于旋耕后土壤,消耗功率小,较少颗粒发生二次破碎,故不考虑颗粒破碎。选取 Hertz-Mindlin(no slip)为颗粒与颗粒间接触模型,计算量少,计算速度快[28]。麦茬秸秆采用 Hertz-Mindlin with Bonding 接触模型,该模型表达秸秆破碎过程[29-30]。土壤与麦茬秸秆复合模型,采用半径为 4 mm 的球体作为土壤基体,球径倍率分布为 1~2,麦茬秸秆颗粒中空圆柱体,截面近似椭圆形,为简化模型,采用球颗粒组合方式,秸秆主要由两种长度 21 mm 和 42 mm 组成,采用半径为 3.5 mm 球体,球径倍率分布为 1~2,Bonding 键粘结参数参照文献[31]进行标定设置,单位面积法向刚度 $1.0\times10^{10}$ N/m$^3$,单位面积切向刚度 $1.0\times10^{6}$ N/m$^3$,临界法向应力 20 MPa,临界切向应力 8 MPa,粘结半径 1.0 mm。开沟刀盘材料采用不锈钢。结合仿真时效性和准确性设置土槽尺寸(长×宽×高)为 2 000 mm×400 mm×300 mm,土槽呈凹凸不平地表,最大起伏角度为 15°。仿形播种单体与土壤接触作用面积(沿 $Y$ 方向)最大为 260 mm 和开沟过程中不影响土壤侧向位移距离,仿真土槽宽度 400 mm,土壤竖直方向距离依据前置旋耕土壤层深度最大为 240 mm,仿真土槽高度 300 mm,依据仿形播种单体沿机具作业长度及后文取样长度,仿真土槽长度取 2 000 mm;结合经验以及参照文献[32],秸秆、土壤比例 4∶96 生成,土壤与秸秆均匀分布,仿真土槽生成土壤颗粒总数量为 2 330 500,秸秆颗粒总数量约 93 200,如图 10 所示。土壤、秸秆和不锈钢接触参数如表 2 所示[33-36]。




(a) 土槽模型 (b) 土壤颗粒 (c) 秸秆颗粒

图 10 土槽离散元模型

Fig. 10 Soil tank models

#### 4.1.2 多体动力学模型

为了节约仿真时间以及仿真计算准确性,对仿形播种单体进行简化,删除种箱、棉花排种器等排种系统,仅保留开沟覆土及导种管等关键结构,后期在 RecurDyn 中进行同等质量添加力处理。RecurDyn 软件中耦合模型如图 11 所示。利用 Solidworks 建立开种沟装置三维模型并进行装配与干涉检查,保存为 STEP 格式导入 RecurDyn 前处理模块。开沟刀盘材料属性设定与 EDEM 相对应的参数。根据已生成的 EDEM 土槽模型空间坐标方向及尺寸,通过 Advanced Object Control 模块调整开沟装置在 RecurDyn 环境下,初始运动状态的空间坐标方向同 EDEM 土槽模型保持一致,在 RecurDyn 软件中定义仿形开沟装置相关运动副。为模拟装置在实际作业中开沟工况,在 RecurDyn 软件中定义快速连接板与基准快(地面)之间为移动副,设置匀速直线运动,

**表 2　离散元仿真参数**

**Tab. 2　DEM simulation parameters**

| 材料 | 参数 | 数值 |
|---|---|---|
| 土壤 | 密度/(kg·m$^{-3}$) | 1 741 |
| | 泊松比 | 0. 38 |
| | 剪切模量/Pa | 1. 86×10$^{6}$ |
| 秸秆 | 密度/(kg·m$^{-3}$) | 241 |
| | 泊松比 | 0. 40 |
| | 剪切模量/Pa | 1. 0×10$^{6}$ |
| 钢 | 密度/(kg·m$^{-3}$) | 7. 87×10$^{3}$ |
| | 泊松比 | 0. 30 |
| | 剪切模量/Pa | 7. 9×10$^{10}$ |
| 土壤-土壤 | 恢复系数 | 0. 35 |
| | 静摩擦因数 | 0. 35 |
| | 动摩擦因数 | 0. 26 |
| 秸秆-秸秆 | 恢复系数 | 0. 32 |
| | 静摩擦因数 | 0. 30 |
| | 动摩擦因数 | 0. 02 |
| 秸秆-土壤 | 恢复系数 | 0. 24 |
| | 静摩擦因数 | 0. 57 |
| | 动摩擦因数 | 0. 08 |
| 土壤-钢 | 恢复系数 | 0. 35 |
| | 静摩擦因数 | 0. 60 |
| | 动摩擦因数 | 0. 10 |
| 秸秆-钢 | 恢复系数 | 0. 75 |
| | 静摩擦因数 | 0. 6 |
| | 动摩擦因数 | 0. 11 |

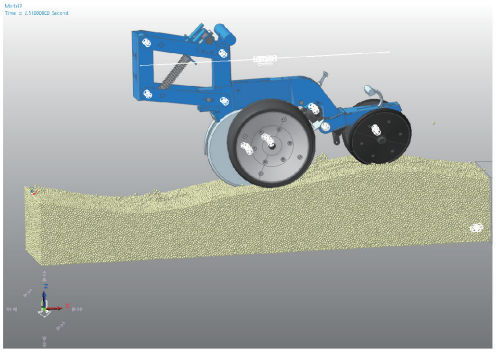


图 11　开种沟过程 RecurDyn 仿真模型

Fig. 11　RecurDyn simulation model of seed furrow opening process

方向与机具前进方向相同，快速连接板相对基准块运动控制方程为step(time,0. 3,0,0. 5, －800)，快速连接板相对基准块运动控制方程(以 0. 8 m/s 为例)为 step(time,0. 3,0,0. 5, －800)，驱动函数方程 0. 3 s 前，考虑播种单体下落过程和稳定作业，设置机具速度为 0；为了播种单体不受过大的冲击力，设置 0. 3～0. 5 s 为增速过程，表示播种单体速度速度从 0 增加到 800 mm/s；仿形拉杆与快速连接板之间为旋转副，快速连接板与弹簧调节螺钉为固定副，限深轮与限深臂连接杆中心旋转副，限深臂与播种单体架为旋转副，镇压轮与播种单体架之间为旋转副，镇压轮与镇压主体架为旋转副。为保证播种单体开沟装作耦合运动的稳定性和实际作业下落过程，初始状态设置距离仿真地表 10 cm。

#### 4. 1. 3　耦合仿真模型建立

为开展土壤-仿形开沟互作机理联合仿真，利用 EDEM 2021 与 RecurDyn 2023 之间的耦合接口，在 RecurDyn 的 External SPI 模块中将耦合文件 Wall 导入至 EDEM 前处理模块，并设置土壤、秸秆与开沟装置间力学接触模型为 Hertz－Mindlin (no slip)。设置 EDEM 和 RecurDyn 软件呈整数倍仿真时间步长。进入 RecurDyn 分析模块，设置 Maximum time step 为 1×10$^{-3}$，initial time step 为 1×10$^{-6}$；在 EDEM 相应的仿真时间为 10s，离散元仿真时间步长为 2×10$^{-6}$ s。

当开沟装置在土壤中进行开种沟作业时，EDEM 与 RecurDyn 分别将土壤颗粒信息和动力学信号进行双向交互传递。耦合仿真过程与原理如图 12 所示。

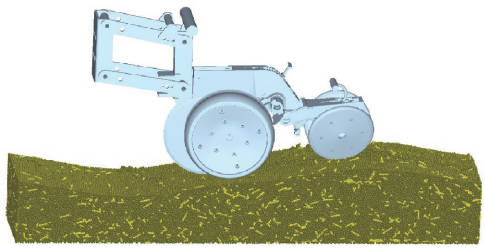


图 12　开种沟过程 EDEM 仿真模型

Fig. 12　EDEM simulation model of seed furrow opening process

### 4. 2　耦合仿真优化试验指标与方法

利用 EDEM 软件后处理 Clipping 模块沿垂直于机具前进方向($X$ 轴方向)取开沟稳定段，未经过覆土前的区域进行截断分析，切片间隔 200 mm，共取 5 个切片。将各切片沿 $Y$ 轴方向的正视图导入 Matlab 经二值化处理、边缘轮廓检测以及去除内部干扰点后，导入 AutoCAD 缩放至实际尺寸后测量沟深数据，记为 $N_i$(取样点 $i$=1、2、3、4、5)，开沟深度合格指数计算式为

$$Y=\frac{h_3}{n}\times 100\% \tag{21}$$

式中　$Y$——开沟深度合格指数，%

$h_3$——开沟深度合格穴数

$n$——测试区总穴数

开沟深度一致性变异系数计算式为

$$V=\frac{S}{\overline{X}}\times 100\% \tag{22}$$

式中　$V$——开沟深度一致性变异系数，%

$S$——开沟深度标准差，mm

$\overline{X}$——开沟深度平均值，mm

### 4.3 土壤颗粒扰动情况

为了研究机具作业速度和弹簧刚度对土壤-机具相互作业机理的影响,先对单因素进行试验讨论,探究各个因素对机具受力及对土壤位移和速度的影响规律,土壤特指土壤和秸秆混合体。其中土壤位移和速度是开沟器最重要的性能指标,决定开沟深度均匀性[31]。种沟截面如图 13 所示,$h$ 为开沟深度,$k_0$ 为开沟宽度。

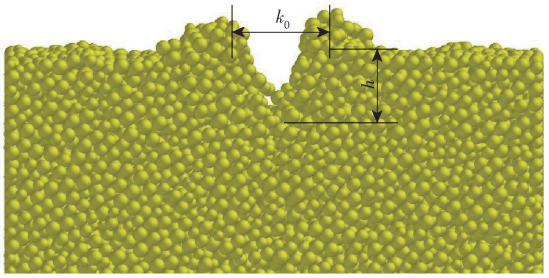



图 13 种沟部分截面示意图

Fig. 13 Schematic cross-section of seed furrow

为了更为直观观察仿形开沟过程,在 EDEM 后处理界面,只显示双圆盘开沟器,其余零部件设置为不显示。如图 14 所示,仿形开沟装置与土壤的相互作用分为 4 个主要阶段:图 14a 仿形开沟装置刚接触土槽;图 14b 仿形开沟装置完全进入土槽;图 14c 仿形开沟装置刚离开土槽;图 14d 仿形开沟装置完全离开土壤。当仿形开沟器刚接触土壤时,仿形开沟装置阻力突然增加,这是由于土壤层破碎所致,当圆盘离开土槽时,圆盘前的微裂缝并不存在,这将增加开沟圆盘阻力。从图 14c 到图 14d,开沟圆盘阻力逐渐减小。从图 14b 到图 14c 稳定波动阶段平均值作为圆盘开沟阻力。一般来说,开沟阻力越小,表示开沟性能越好[36]。

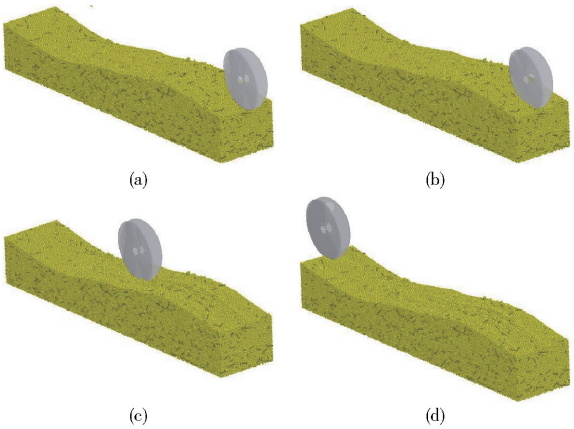



图 14 仿形种沟形成过程

Fig. 14 Formation process of imitation seed furrow

土壤扰动和移动是由开沟器圆盘对土壤施加的力产生土壤扰动和移动。图 15 显示了在凹凸不平地表处对正向和侧向土壤扰动的影响。由图 15 可知,土壤扰动速度最大为开沟中心线,沿着种沟两侧逐渐减小,土壤扰动速度从种沟底部向上两侧指向。随着作业速度增大,土壤颗粒扰动量越大,颗粒扰动速度越大,当机具前进速度为大于 1.2 m/s 时,有少量土壤颗粒回落至种沟中。原因为随着机具前进速度增加,土壤颗粒沿着机具前进方向流动量增大,土壤扰动速度越大,容易造成土壤回落种沟中。

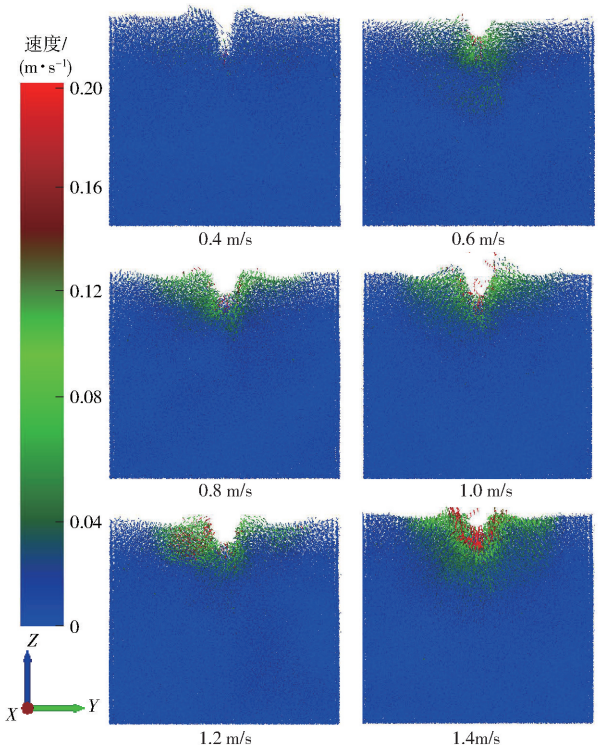



图 15 土壤颗粒扰动速度分析

Fig. 15 Soil particle disturbance velocity analysis

### 4.4 单因素试验

根据经验和相关文献设定单因素试验中心水平为:弹簧刚度 13 N/mm、作业速度 0.8 m/s(表 3),研究某一因素对各性能指标的影响时,另外 1 个因素取中间水平。

**表 3 试验因素和水平**

**Tab. 3 Test factors and levels**

| 水平 | 弹簧刚度/(N·mm⁻¹) | 机具作业速度/(m·s⁻¹) |
|---|---|---|
| 1 | 4 | 0.2 |
| 2 | 7 | 0.4 |
| 3 | 10 | 0.6 |
| 4 | 13 | 0.8 |
| 5 | 16 | 1.0 |
| 6 | 19 | 1.2 |
| 7 | 22 | 1.4 |

#### 4.4.1 不同弹簧刚度对土壤-机具的互作机理的影响

不同弹簧刚度对土壤的影响,如图 16 所示,$x$ 方向为机具前进方向,$y$ 方向为机具侧向方向,$z$ 为竖直方向。总体上,当开沟器接近土壤作业层时,

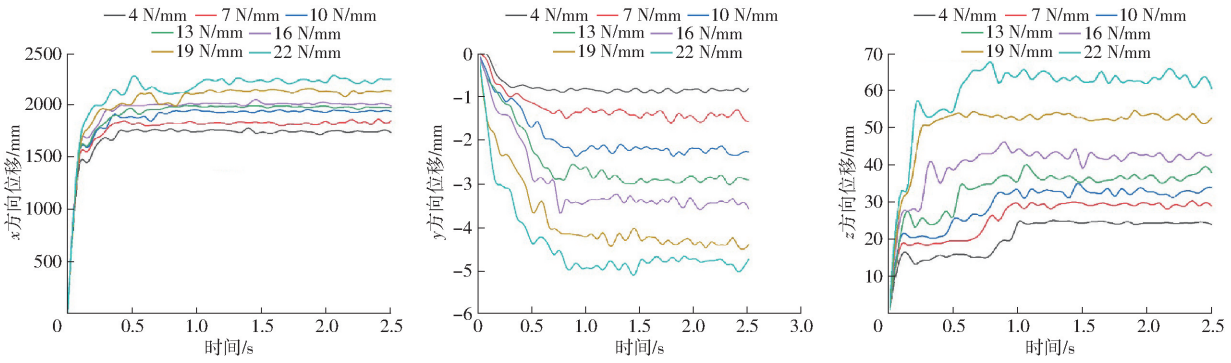



图 16　不同弹簧刚度下土壤颗粒位移

Fig. 16　Soil particle displacement with different spring stiffness coefficients

土壤颗粒在 3 个方向位移开始增加。随着弹簧刚度增大，土壤颗粒位移增加的时间更短，原因为入土阶段开沟器受自身重力及弹簧初始预紧力作用，因随弹簧刚度增大弹簧初始预紧力增大，开沟器具有更大的竖直向下加速度，能够更早入土。随着弹簧刚度增加，土壤位移均增大，经过一段时间后均达到稳定状态。在不同弹簧刚度作业下，土壤在 3 个方向土壤颗粒位移整体相差不大，在开沟器稳定开沟时，3 个方向上位移均在一定范围内波动。随着弹簧刚度增加，达到所需稳定状态时间越短，弹簧对仿形补偿作用越明显。

弹簧刚度对各指标（开沟深度合格指数、开沟深度一致性变异系数）的影响规律如图 17 所示，当弹簧刚度取 16 N/mm，开沟深度合格指数最佳，开沟深度一致性变异系数最小，开沟稳定性最好。在弹簧刚度 4 ~ 16 N/mm 内，随着弹簧刚度增大，开沟深度合格指数增大，开沟深度一致性变异系数越小，开沟深度越稳定；随着弹簧刚度超过 16 N/mm 时，随着弹簧刚度增大，开沟深度合格指数下降，开沟深度一致性变异系数增大，开沟深度稳定性下降。原因为弹簧刚度越大，弹簧对仿形开沟装置加载的预拉力越大，会造成仿形开沟限深不稳定，开沟深度过大。

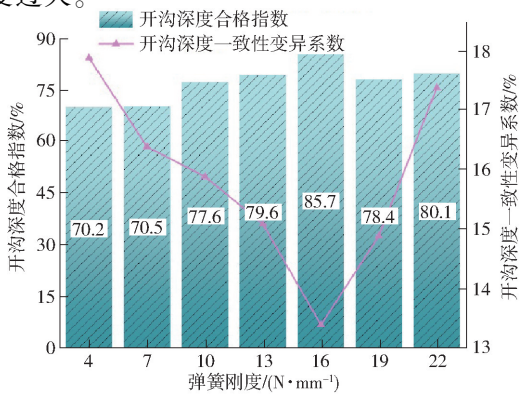



图 17　弹簧刚度对指标的影响

Fig. 17　Relationship between the spring stiffness and each prerformance index

### 4.4.2　作业速度对土壤-开沟器互作机理的影响

不同作业速度下开沟器在 3 个方向的受力情况如图 18 所示，机具在与土壤接触初始瞬间，机具所受到较大冲击，开沟器阻力较大，这是由于开沟器刚接触土壤，土壤颗粒颗粒破碎所致，随后机具进入稳定作业阶段，受力呈现连续周期性波动的变化趋势，整体受力随作业速度增加而增加。在运动初始阶段，随着作业速度的增大，开沟器达到受力峰值时间越短，其峰值也越大，跳跃性越显著。在稳定作业阶段，如图 18a 所示，机具 $x$ 向受力在 0 ~ 240 N 范围内，呈周期性变化；如图 18b 所示，机具沿坐标系 $y$ 负方向受力，整体受力与合力方向相反，整体受力在稳定开沟段，波动较为稳定。如图 18c 所示，机具 $z$ 方向受到的土壤冲击力也较小，在 0 ~ 400 N 范围内波动，说明开沟器在侧向受力冲击较小。如图 18d 所示，机具合力随着作业速度增加而增加，作业速度越小机具受力波峰越靠后。造成该现象的原因是速度小使得机具受到的土壤扰动量进而对开沟装置作用力越小。

机具作业速度对开沟深度稳定性的影响关系，开沟深度稳定性随作业速度的增加呈先上升后下降，如图 19 所示。由图 19 可知，机具作业速度从 0.2 m/s 增至 0.8 m/s，开沟合格指数从 77.9% 增至 85.6%；随着作业速度从 0.8 m/s 增至 1.4 m/s，开沟深度合格指数从 85.6% 降至最低值 75.9%，这是由于在开沟深度和机具前进速度一定时，作业速度越大则单位时间内的土壤切削量和抛送量越大，土壤回土量随之增加，开沟稳定性降低。

## 4.5　多因素试验

根据单因素试验结果，当弹簧刚度为 10 ~ 19 N/mm、机具作业速度为 0.6 ~ 1.2 m/s 时，开沟深度合格指数、开沟深度一致性变异性系数较好。试验因素编码如表 4 所示。

### 4.5.1　试验结果与分析

根据 Design-Expert 8.0.6 软件中的响应曲面法

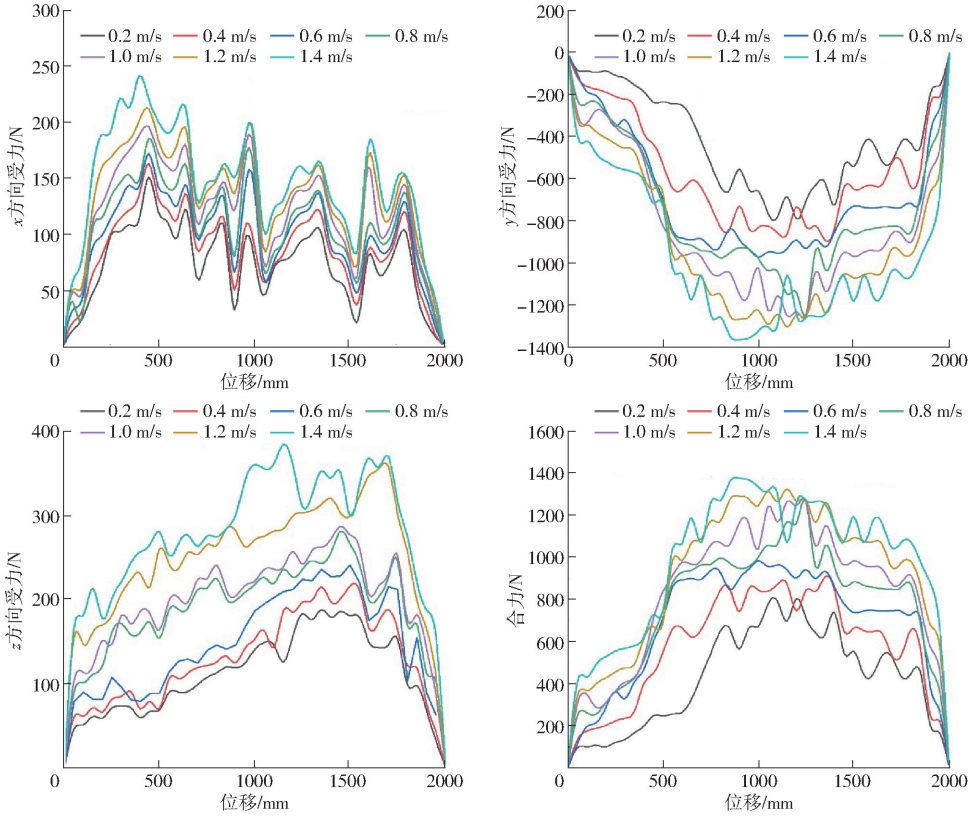



图 18 不同速度下仿形开沟器受力

Fig. 18 Simulation of spear harvesting process

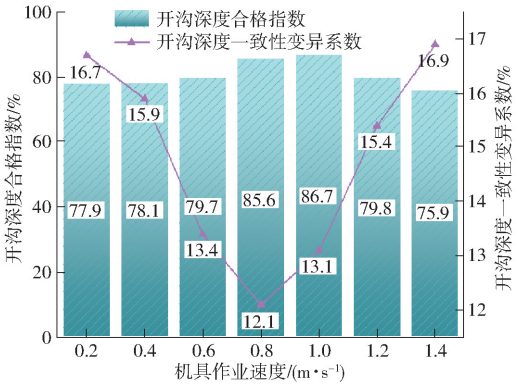



图 19 机具作业速度对指标的影响

Fig. 19 Relationship between the operating speed and each performance index

**表 4 试验因素编码**

**Tab. 4 Experimental values and coded level**

| 编码 | 因素 | |
|---|---|---|
| | 弹簧刚度/(N·mm⁻¹) | 机具作业速度/(m·s⁻¹) |
| -1.414 | 8.13 | 0.52 |
| -1 | 10.00 | 0.60 |
| 0 | 14.50 | 0.90 |
| 1 | 19.00 | 1.20 |
| 1.414 | 20.87 | 1.28 |

进行试验方案设计,试验方案与结果如表 5 所示,$X_1$、$X_2$ 为因素编码。

开沟深度合格指数方差分析结果如表 6 所示,

**表 5 试验方案与结果**

**Tab. 5 Test scheme and results**

| 试验序号 | 因素 | | 开沟深度合格指数 $Y$/% | 开沟深度一致性变异系数 $V$/% |
|---|---|---|---|---|
| | $X_1$ | $X_2$ | | |
| 1 | 0 | 0 | 87.9 | 11.3 |
| 2 | 1.414 | 0 | 79.3 | 14.5 |
| 3 | 0 | 0 | 88.3 | 10.9 |
| 4 | -1 | 1 | 74.6 | 13.9 |
| 5 | 0 | 1.414 | 79.6 | 11.2 |
| 6 | 1.414 | 0 | 75.6 | 12.6 |
| 7 | -1 | -1 | 77.6 | 11.6 |
| 8 | 1 | -1 | 79.6 | 12.4 |
| 9 | 0 | 0 | 87.6 | 10.9 |
| 10 | 0 | 0 | 87.6 | 11.2 |
| 11 | 0 | 0 | 89.3 | 10.5 |
| 12 | 0 | 1.414 | 73.6 | 16.2 |
| 13 | 1 | 1 | 74.6 | 15.7 |

对表 6 中的数据进行二元多次回归拟合,得到种沟作业后开沟深度合格指数 $Y$ 对各自因素编码值回归方程为

$$Y = 88.14 + 0.9X_1 - 2.06X_2 - 0.5X_1X_2 - 5.45X_1^2 - 5.88X_2^2 \quad (23)$$

由表 6 可知,除了交互项项影响不显著,其他影响因子均极其显著。各因子开沟深度合格指数的显著性由大到小依次为机具作业速度、弹簧刚度。

开沟深度一致性变异系数的方差分析如表 7 所

**表 6　开沟深度合格指数方差分析结果**

**Tab. 6　Analysis of variance for qualification rate of sowing depth**

| 方差来源 | 平方和 | 自由度 | 均方和 | $F$ | $P$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 模型 | 437. 04 | 5 | 87. 41 | 164. 97 | <0. 000 1 ** |
| $X_1$ | 6. 54 | 1 | 6. 54 | 12. 34 | 0. 009 8 ** |
| $X_2$ | 33. 97 | 1 | 33. 97 | 64. 11 | <0. 000 1 ** |
| $X_1X_2$ | 1. 00 | 1 | 1. 00 | 1. 89 | 0. 211 9 |
| $X_1^2$ | 206. 72 | 1 | 206. 72 | 390. 16 | <0. 000 1 ** |
| $X_2^2$ | 240. 21 | 1 | 240. 21 | 453. 36 | <0. 000 1 ** |
| 失拟项 | 1. 70 | 3 | 0. 77 | 1. 12 | 0. 438 7 |
| 纯误差 | 2. 01 | 4 | 0. 76 | | |
| 总和 | 440. 75 | 12 | | | |

注：** 表示该项极显著（$P$ <0. 01），下同。

**表 7　开沟深度一致性变异系数方差分析结果**

**Tab. 7　Analysis of variance of coefficient of variation of sowing depth**

| 方差来源 | 平方和 | 自由度 | 均方和 | $F$ | $P$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 模型 | 43. 88 | 5 | 8. 78 | 80. 34 | <0. 000 1 ** |
| $X_1$ | 3. 49 | 1 | 3. 49 | 31. 98 | 0. 000 8 ** |
| $X_2$ | 20. 07 | 1 | 20. 07 | 183. 71 | <0. 000 1 ** |
| $X_1X_2$ | 0. 25 | 1 | 0. 25 | 2. 29 | 0. 174 1 |
| $X_1^2$ | 10. 67 | 1 | 10. 67 | 97. 72 | <0. 000 1 ** |
| $X_2^2$ | 12. 01 | 1 | 12. 01 | 109. 91 | <0. 000 1 ** |
| 失拟项 | 0. 37 | 3 | 0. 12 | 1. 27 | 0. 398 1 |
| 纯误差 | 0. 39 | 4 | 0. 098 | | |
| 总和 | 44. 65 | 12 | | | |

示，对表 7 中的数据进行开沟深度一致性变异系数二元多次回归拟合，得到开沟深度一致性变异系数对各自因素编码值回归方程为

$$V = 10.96 + 0.66X_1 + 1.58X_2 + 0.25X_1X_2 + 1.24X_1^2 + 1.31X_2^2 \quad (24)$$

由表 7 可知，除了交互项影响不显著，其他影响因子都显著。各因子开沟深度一致性变异系数的显著性由大到小依次为机具作业速度、弹簧刚度。

#### 4. 5. 2　试验结果优化

利用 Design-Expert 8. 0. 6 软件中的优化模块对回归模型进行求解，根据实际工作条件及上述相关模型分析结果，确定试验因素约束条件为：弹簧刚度 13 ~ 18 N/mm、作业速度 0. 7 ~ 1. 1 m/s；Design-Expert 8. 0. 6 软件中对模型参数优化结果为：弹簧刚度为 14. 39 N/mm、作业速度 0. 8 m/s，开沟深度合格指数为 88. 15%，开沟深度一致性变异系数为 10. 57%。为便于后续试验，结合上文单因素试验在弹簧刚度低于 16 N/mm 时，弹簧刚度越大，开沟越稳定，故弹簧刚度取整为 15 N/mm。

以最优参数组合进行仿真验证试验，重复 3 次。使用 EDEM Cliping Planes 平面剪切工具沿种沟底部竖直及水平平面剪切种床，并使用 EDEM Template 显示模式，显示模式仅影响显示效果，不影响其空间位置及分布性能指标值；如图 20 从左到右为沿整体、局部横向及深度方向分布图。由表 8 可知，最优参数组合下，开沟深度平均值为 33. 4 ~ 36. 8 mm，整体试验开沟深度平均值为 35. 08 mm，标准差为 4. 07 mm，开沟深度合格指数为 86. 7%，开沟深度一致性变异系数为 11. 6%。仿真试验开沟效果能满足长江流域棉区麦后直播对开沟深度要求。

## 5　田间试验

### 5. 1　试验条件与设备

为验证耦合仿真模型准确性以及优化后棉花直播机工作性能，于 2024 年 5 月在华中农业大学荆州棉花种植示范基地开展田间试验。如图 21 所示，试验前茬作物为麦残茬，土壤类型为粘壤土，深度 0 ~ 0. 30 m 范围内平均土壤含水率为 17%。留（麦）茬高度为 0. 26 ~ 0. 35 m，麦秸留在田里平均长度为 0. 31 m。

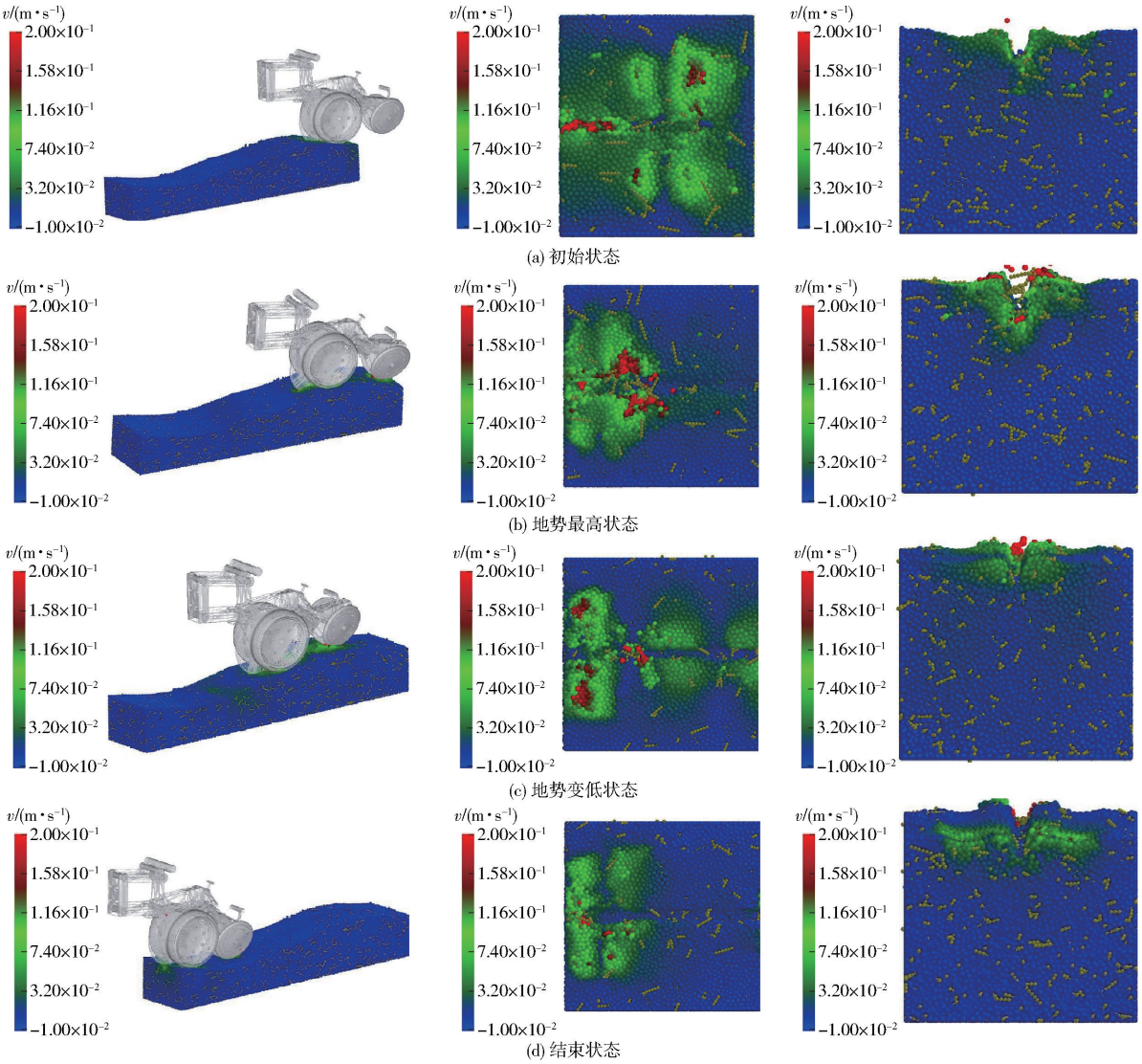
### 5. 2　试验方法

为了进一步验证基于耦合仿真模型优化方法设计的麦后棉花直播机的适用性，进行了田间不同参数结合下与优化最佳不同作业速度机弹簧刚度组合下进行开沟深度合格指数和开沟深度一致性变异系数指标对比。结合田间实际作业情况，设置机具作业速度为 0. 6 ~ 1. 2 m/s；弹簧刚度为 10 ~ 19 N/mm。试验时，约翰迪尔 1204 型拖拉机搭载棉花直播机作为试验平台。试验采用拖拉机 12 V 蓄电池作为电源，为排种器直流电机提供动力，利用随速播种控制系统设置亩播量、粒距等参数。试验区长度为 80 m，为保证试验数据准确性，播种机加减速段各减 5 m，中间 10 m 为数据采集区，使用卷尺每隔 1 m 选取一个采样点，在测试小区内均布。在测试点上垂直切开土层，等距取 10 个测试点，测量原地表到沟底的垂直距离作为播种深度。并按式（21）、（22）计算开沟深度合格指数及开沟深度一致性变异系数。田间试验过程与开沟测量如图 22 所示。

### 5. 3　试验结果与分析

#### 5. 3. 1　优化后参数组合田间试验

采用优化后弹簧刚度系数 15 N/mm，机具作业速度控制在 0. 8 m/s 左右。开沟过程结束后，开沟装置开沟性能试验结果如表 9 所示。在测试区Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ内，开沟装置平均开沟深度为 33. 26 mm，开沟装置开沟深度在 19. 6 ~ 41. 8 mm 内呈均匀波动变化，测试区内开沟深度（标准差为 4. 26 mm）均匀波动变化范围较小，开沟装置在田间运行平稳，能够




(a) 初始状态

(b) 地势最高状态

(c) 地势变低状态

(d) 结束状态

图 20 优化后仿真结果

Fig. 20 Simulation results

**表 8 仿真开沟深度试验结果**

**Tab. 8 Test results of ditching depth** mm

| 测试区序号 | 测试序号 | | | 平均值 |
|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | |
| 1 | 35.0 | 36.0 | 32.0 | 34.3 |
| 2 | 42.2 | 36.0 | 33.0 | 37.1 |
| 3 | 31.0 | 41.5 | 31.5 | 34.7 |
| 4 | 37.0 | 37.5 | 30.0 | 34.8 |
| 5 | 30.0 | 33.0 | 40.5 | 34.5 |
| 均值 | 35.04 | 36.80 | 33.40 | 35.08 |
| 变异系数/% | | | | 11.60 |



图 21 播种前茬工况

Fig. 21 Pre-planting stubble condition



(a) 试验过程

(b) 开沟深度测定Ⅰ

(c) 开沟深度测定Ⅱ

(d) 开沟深度局部

图 22 田间试验

Fig. 22 Field trials

保持稳定的开沟作业效果。田间试验的开沟深度合格指数和开沟深度一致性变异系数平均值分别为 84% 和 12.80%。田间开沟深度合格指数与仿真开沟深度合格指数相对误差为 3.21%，由于实际作业

时沟边土壤陷落，田间试验开沟深度一致性变异系数与仿真开沟深度变异系数相对误差为 9.38%。仿真与试验结果表明所建立的仿形种沟耦合模型能够反映仿形开沟的运动规律。田间试验结果满足长江流域棉区麦后直播农艺要求。

**表 9　优化参数后田间试验结果**

**Tab. 9　Results of field trials after optimization of parameters**

| 序号 | 开沟深度/mm | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 测试区Ⅰ | 测试区Ⅱ | 测试区Ⅲ | 测试区Ⅳ | 测试区Ⅴ |
| 1 | 27.2 | 34.7 | 32.4 | 31.2 | 32.3 |
| 2 | 19.6 | 32.3 | 32.5 | 30.2 | 33.1 |
| 3 | 32.5 | 36.2 | 32.6 | 33.1 | 40.5 |
| 4 | 34.1 | 40.7 | 32.5 | 30.7 | 41.8 |
| 5 | 31.5 | 41.5 | 33.7 | 32.2 | 30.3 |
| 6 | 33.3 | 21.7 | 32.2 | 31.7 | 32.7 |
| 7 | 37.2 | 34.2 | 41.3 | 33.2 | 33.4 |
| 8 | 31.5 | 31.3 | 40.8 | 34.3 | 34.3 |
| 9 | 31.4 | 30.7 | 34.3 | 32.5 | 32.7 |
| 10 | 41.2 | 31.2 | 33.8 | 32.1 | 31.6 |

**5.3.2**　不同作业速度和弹簧刚度下田间试验结果

如图 23a 所示，当作业速度 0.6 m/s 时，不同弹簧刚度田间试验下，开沟深度合格指数最优为 78%，开沟深度一致性变异系数最小为 14.49%，比优化后作业参数（机具作业速度 0.8 m/s，弹簧刚度 15 N/mm）田间试验开沟深度合格指数低 6 个百分点，开沟深度一致性变异系数高 1.69 个百分点；如图 23b 所示，当作业速度为 0.8 m/s，弹簧刚度为 15 N/mm 时，在此组合最优；如图 23c 所示，当作业速度为1 m/s 时，不同弹簧刚度田间试验下，开沟深度合格指数最大为 78%，开沟深度一致性变异系数最小值为 14.98%，比优化后最佳组合参数开沟深度合格指数低 6 个百分点，开沟深度一致性变异系数高 2.18 个百分点；如图 23d 所示，当作业速度为 1.2 m/s 时，不同弹簧刚度田间试验下，开沟深度合格指数最大为 78%，开沟深度一致性变异系数最小值为 15.83%，比优化后最佳组合参数开沟深度合格指数低 6 个百分点，开沟深度一致性变异系数高 3.03 个百分点。由图 23 可知，在同一机具作业速度下，随着弹簧刚度的增大，开沟深度合格指数先增大后减小，与单因素仿真试验中结果规律保持一致，并且在在弹簧刚度一定时，开沟深度合格指数和开沟深度一致性变异系数的变化规律也与上文单因素不同作业速度下影响规律一致，在田间试验中，由于实际作业后沟边土壤回落可能会造成不同参数组合田间与仿真试验结果值有一定的误差，但整体相差不大，也进一步表明本文基于 EDM－MBD 建立的仿形开沟仿真方法设计的长江流域麦后棉花直播机能提升开沟深度稳定性。

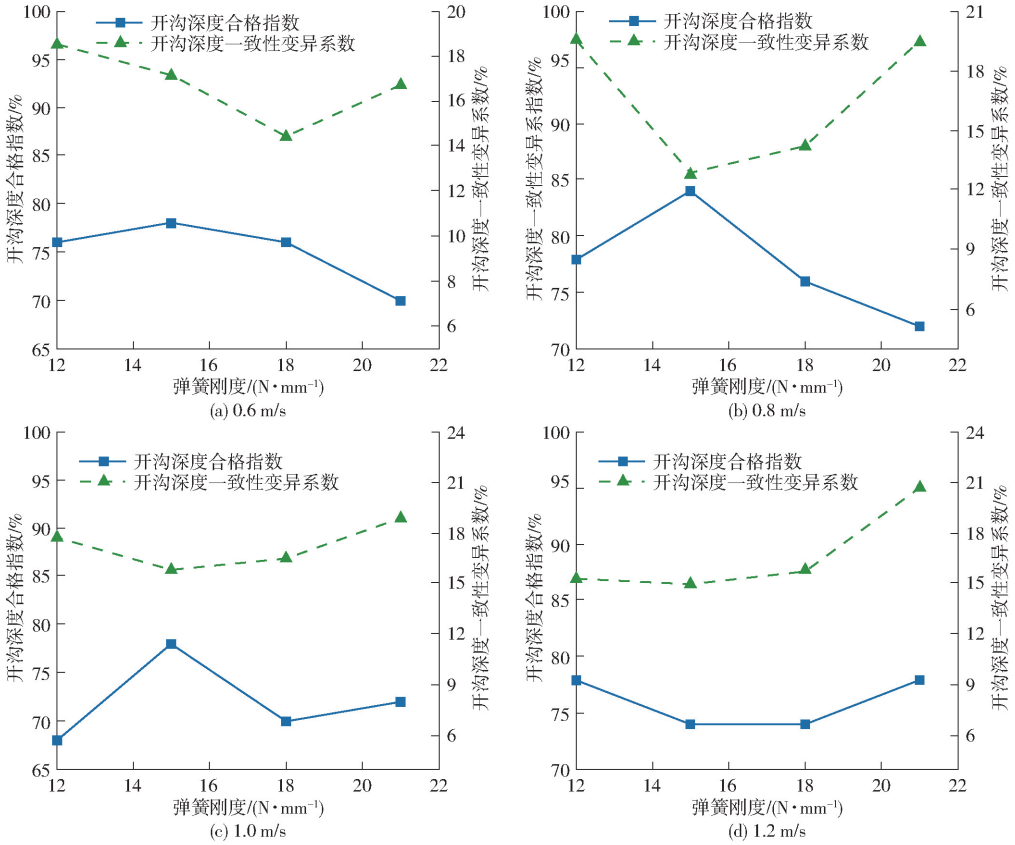



图 23　不同参数组合下田间试验结果

Fig. 23　Results of field trials with different parameter combinations

**5.3.3** 适应性讨论

对比仿真和田间试验结果可知,田间试验开沟效果稳定性略低于仿真结果,造成的原因是在耦合仿真试验中,土壤表面较实际地表更为平整,并且秸秆分布较为均匀,机具通过性更佳;在实际田间作业过程中,由于土壤黏重、土壤颗粒间隙、秸秆含水率、秸秆覆盖率及长度与仿真存在一定的差异,进而导致开沟稳定性有所降低。在实际田间作业时,直播机是旋耕灭茬和播种一体作业,对秸秆有一定的粉碎过程,当秸秆量增大,灭茬效果有所降低,结合田间和仿真试验,机具作业速度和弹簧刚度对开沟效果的影响规律,可适当增加弹簧刚度和降低机具作业速度来保证机具开沟效果。适当在最佳速度范围降低作业速度,降低土壤扰动量,避免土壤和秸秆回落造成开沟稳定性降低;增大弹簧刚度可以增大双圆盘开沟器切茬力,且可以有效避免种子与土壤接触不紧密影响出苗效果。

**5.3.4** 出苗效果

优化后作业参数棉花田间出苗效果如图 24 所示。出苗效果良好,优化后麦后棉花直播机田间作业性能良好,出苗效果能满足长江流域麦后棉花直播精量播种要求。



图 24 田间试验出苗情况

Fig. 24 Seeding test

## 6 结论

(1)针对长江流域棉区麦后直播作业过程中播种深度合格率低、出苗不均匀等问题,设计了具有一种独立仿形棉花直播机,并阐述该独立仿形开沟装置的工作原理。通过在地表起伏不平仿形开沟运动过程分析,确定了仿形四连杆、双圆盘开沟器等关键结构参数。

(2)通过 DEM - MBD 耦合仿真技术,结合单因素和二次正交旋转组合试验分析了各影响因素对开沟深度合格指数和开沟深度一致性变异系数的影响过程仿真模型,明确了弹簧刚度、机具作业速度对开沟深度合格指数和开沟深度一致性变异系数的影响规律。并通过二次旋转正交试验得出最优参数:作业速度 0.8 m/s、弹簧刚度 15 N/mm。最优参数下仿真试验结果为:开沟深度合格指数 86.7%,开沟深度一致性变异系数 11.6%。

(3)田间验证试验的开沟深度合格指数和开沟深度一致性变异系数平均值分别为 84% 和 12.80%,仿真与田间试验开沟深度合格指数和开沟深度一致性变异系数相对误差为 3.21%、9.38%,说明本文基于 DEM - MBD 耦合仿真模型设计的麦后棉花直播机能够解决长江流域棉区麦后直播播种深度稳定差问题。后期棉花出苗效果良好,满足长江流域麦后直播棉花种植农艺种植要求。

## 参 考 文 献


[1] 钟晓丽. 基于 SWOT 分析的河北省棉花产业发展现状及对策[J]. 棉花科学,2021,43(4):12 - 19.
ZHONG Xiaoli. Based on SWOT analysis development status and countermeasures of cotton industry in Hebei Province[J]. Cotton Sciences, 2021, 43(4): 12 - 19. (in Chinese)

[2] 史增录,王美静,张学军,等. 折叠式棉花宽幅铺膜精量播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(8):53 - 62.
SHI Zenglu, WANG Meijing, ZHANG Xuejun, et al. Design and test of folding cotton wide film spreading precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(8):53 - 62. (in Chinese)

[3] 胡梦杰,夏俊芳,郑侃,等. 内充气力式棉花高速精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(8):73 - 85.
HU Mengjie, XIA Junfang, ZHENG Kan, et al. Design and experiment of inside-filling pneumatic high-speed precision seed-metering device for cotton[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 73 - 85. (in Chinese)

[4] 王淞,衣淑娟,赵斌,等. 基于 IWHO - EKF 的高速免耕播种机播种深度监测系统研究[J]. 农业机械学报,2024,55(3):75 - 84.
WANG Song, YI Shujuan, ZHAO Bin, et al. High-speed no-till seeder seeding depth monitoring system based on IWHO - EKF [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(3):75 - 84. (in Chinese)

[5] 周勇,胡梦杰,夏俊芳,等. 内充种组合型孔式播量可调棉花精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(18):59 - 67.
ZHOU Yong, HU Mengjie, XIA Junfang, et al. Design and experiment of inside-filling adjustable precision seed-metering device with combined hole for cotton[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18):59 - 67. (in Chinese)

[6] 王文君. 玉米优质种床构建关键技术及行间耕播机研究[D]. 长春:吉林大学,2019.
WANG Wenjun. Research on key technologies of constructing high-quality maize seedbed and its inter-row rill-plantger[D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)

[7] 杨丽,颜丙新,张东兴,等. 玉米精密播种技术研究进展[J]. 农业机械学报,2016,47(11):38－48.
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 206, 47(11): 38－48. (in Chinese)
[8] 衣淑娟,李怡凯,李衣菲,等. 玉米高速免耕播种机液压主动仿形机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(12):120－133.
YI Shujuan, LI Yikai, LI Yifei, et al. Design and test of hydraulic active profiling mechanism for high-speed no-till corn planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(12):120－133. (in Chinese)
[9] 何勋,张景风,张润,等. 小麦宽苗带种沟镇压播种装置研制[J]. 农业工程学报,2023,39(18):18－29.
HE Xun, ZHANG Jingfeng, ZHANG Run, et al. Development of the seed-ditch compaction device for wide-boundary sowing wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(18): 18－29. (in Chinese)
[10] JIA Honglei, WANG Wenjun, WANG Wanpeng, et al. Application of anti-adhesion structure based on earthworm motion characteristics[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 178: 159－166.
[11] 赵淑红,谭贺文,王加一,等. 多功能集成式播种开沟器的设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(11):58－67.
ZHAO Shuhong, TAN Hewen, WANG Jiayi, et al. Design and experiment of multifunctional integrated seeding opener[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 58－67. (in Chinese)
[12] 吕金庆,杨晓涵,冯雪,等. 马铃薯播种机播深调控装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(12):13－21.
LÜ Jinqing, YANG Xiaohan, FENG Xue, et al. Design and experiment of sowing depth control device of potato planter[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(12): 13－21. (in Chinese)
[13] 黄东岩,朱龙图,贾洪雷,等. 基于压电薄膜的免耕播种机播种深度控制系统[J]. 农业机械学报,2015,46(4):1－8.
HUANG Dongyan, ZHU Longtu, JIA Honglei, et al. Automatic control system of seeding depth based on piezoelectric film for no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(4):1－8. (in Chinese)
[14] 白慧娟,方宪法,王德成,等. 玉米播种机播深和压实度综合控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(9):61－72.
BAI Huijuan, FANG Xianfa, WANG Decheng, et al. Design and test of control system for seeding depth and compaction of corn precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(9):61－72. (in Chinese)
[15] 刘靖怡. 长江流域棉花精量播种监测系统设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2023.
LIU Jingyi. Design and experiment of cotton precision seeding monitoring system for Yangtze River Basin[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese)
[16] 李显恩,马学峰,张钊,等. 夏直播棉成铃时间分布与产量的关系[J]. 棉花学报,2022,34(5):416－429.
LI Xian'en, MA Xuefeng, ZHANG Zhao, et al. Relationship between boll temporal distribution and cotton yield under summer direct seeding[J]. Cotton Science, 2022, 34(5): 416－429. (in Chinese)
[17] 杨长琴,周治国,陈德华,等. 长江流域棉区麦(油)棉两熟种植的棉花增密减肥轻简高效技术[J]. 中国棉花,2018,45(10):1－4.
YANG Changqin, ZHOU Zhiguo, CHEN Dehua, et al. Light-simplified and high efficient cultivation technologies of cotton with increased planting density and reduced fertilizer application for wheat/rape-cotton cropping system in the Yangtze Valley[J]. China Cotton, 2018, 45(10):1－4. (in Chinese)
[18] 丁启朔,尤勇,邢全道,等. 基于精确播深控制目标的播种单体田间台架试验[J]. 农业机械学报,2022,53(11):100－107.
DING Qishuo, YOU Yong, XING Quandao, et al. Field bench of seeding unit based on precise seeding depth control objective[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 100－107. (in Chinese)
[19] FALLAHI S, RAPUFAT M H. Row-crop planter attachments in a conservation tillage system: a comparative study[J]. Soil & Tillage Research, 2008, 98(1):27－34.
[20] AHMAD F, DING W, DING Q, et al. Forces and straw cutting performance of double disc furrow opener in no-till paddy soil[J]. Plos One, 2015, 10(3): e0119648.
[21] 侯守印,陈海涛,史乃煜,等. 双自由度多铰接仿形免耕精量播种单体设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(4):92－101.
HOU Shouyin, CHEN Haitao, SHI Naiyu, et al. Design and experiment of two-degree-of-freedom multi-articulated profiling no-tillage precision drill unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4):92－101. (in Chinese)
[22] 耿端阳,何珂,印祥,等. 玉米花生间作播种施肥一体机研制与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(17):34－41.
GENG Duanyang, HE Ke, YIN Xiang, et al. Design and test of corn-peanut intercropping seeding-fertilizing machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17): 34－41. (in Chinese)
[23] 刘艳芬,林静,李宝筏. 轻量化玉米垄作免耕播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(11):60－69.
LIU Yanfen, LIN Jing, LI Baofa. Design and experiment on lightweight maize ridge planting no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 60－69. (in Chinese)
[24] 周淑辉,王增辉,黄东岩. 基于 Flex 传感器的免耕播种机播深智能调节系统[J]. 吉林大学学报(信息科学版),2020,38(5):555－562.
ZHOU Shuhui, WANG Zenghui, HUANG Dongyan. No-till planter sowing intelligent depth regulation system based on Flex sensor[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2020, 38(5): 555－562. (in Chinese)
[25] 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京:北京机械业出版社,1982:347－362.
[26] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:上册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.

(下转第 341 页)

Robotics,2018,10(1):011004.
[24] FAN P,YAN B,WANG M,et al. Three-finger grasp planning and experimental analysis of picking patterns for robotic apple harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2021,188:106353.
[25] JI W,HE G,XU B,et al. A new picking pattern of a flexible three-fingered end-effector for apple harvesting robot[J]. Agriculture, 2024,14(1):102.
[26] 魏武,李艳杰,廖志鹏,等. 基于旋量理论的蛇形机器人运动学建模[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2019,47(2):1-8.
WEI Wu,LI Yanjie,LIAO Zhipeng,et al. Kinematics modeling of snakelike robot based on screw theory[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition),2019,47(2):1-8. (in Chinese)
[27] 乔贵方,杜宝安,张颖,等. 基于 POE 模型的工业机器人运动学参数二次辨识方法研究[J]. 农业机械学报,2024,55(1):419-425.
QIAO Guifang,DU Baoan,ZHANG Ying,et al. Quadratic identification method of kinematic parameters of industrial robots based on POE model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(1):419-425. (in Chinese)
[28] DEB K,PRATAP A,AGARWAL S,et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2002,6(2):182-197.
[29] 周德志,卢立新. 水蜜桃动态松弛特性与模型表征[J]. 包装工程,2005(6):12-13,21.
ZHOU Dezhi,LU Lixin. Dynamic relaxation property and modelling for peach[J]. Packaging Engineering,2005(6):12-13,21. (in Chinese)

(上接第 289 页)

[27] 王宝山. 小粒径种子兼用精量穴播集排系统设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2023.
WANG Baoshan. Design and experiment of precision hill-seeding centralized metering system for small particle size seeds[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese)
[28] CEEN Zeren, XUE Duomei, WANG Guoqiang, et al. Simulation and optimization of the tracked chassis performance ofelectric shovel based on DEM-MBD[J]. Powder Technology, 2021, 390: 428-441.
[29] 卢琦,刘芳建,刘立晶,等. 种沟土壤-种子-覆土装置互作离散元模型建立与验证[J]. 农业机械学报,2023,54(10):46-57.
LU Qi, LIU Fangjian, LIU Lijing, et al. Establishment and verification of discrete element model for seed furrow soil-seed-covering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(10):46-57. (in Chinese)
[30] KAI Suna, YUAN Jianqun, ZHAO Jinwen, et al. A DEM-based general modeling method and experimental verification for wheat plants in the mature period[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2023,214:108283.
[31] 姚文燕,赵殿报,苗河泉,等. 免耕播种机浅旋清茬斜置式防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(8):42-52.
YAO Wenyan, ZHAO Dianbao, MIAO Hequan, et al. Design and experiment of oblique anti-blocking device for no-tillage planter with shallow plowing stubble clearing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8):42-52. (in Chinese)
[32] 姚文燕. 麦-玉轮作区玉米免耕播种主动防堵技术研究[D]. 淄博:山东理工大学,2023.
YAO Wenyan. Reserch on active anti-blocking technology of no-tillage seeding of corn in wheat-corn rotation area[D]. Zibo: Shandong University of Technology,2023. (in Chinese)
[33] 张智泓,赵亮亮,赖庆辉,等. 基于 DEM-MBD 耦合的铲板式滚动触土部件作业机理分析与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(15):10-20.
ZHANG Zhihong, ZHAO Liangliang, LAI Qinghui, et al. Operation mechanism analysis and experiments of shovel-type rolling soil-engaging components based on DEM-MBD coupling[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(15): 10-20. (in Chinese)
[34] 夏俊芳,张朋,苑宏文,等. 水稻秸秆离散元柔性模型参数标定与试验验证[J]. 农业机械学报,2024,55(9):174-184.
XIA Junfang, ZHANG Peng, YUAN Hongwen,et al. Calibration and verification of flexible rice straw model by discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(9):174-184. (in Chinese)
[35] XIE Dongbo, HE Jiaxun, LIU Tao, et al. Establishment and validation the DEM-MBD coupling model of flexible straw-Shajiang black soil-walking mechanism interactions[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2024,224:109203.
[36] WANG Yueming, XUE Weiliang, MA Yunhai, et al. DEM and soil bin study on a biomimetic disc furrow opener[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019,156:209-216.