

高速精量播种机阿基米德螺线型弧面双齿盘 覆土装置设计与试验

刘 芳¹ 高筱钧¹ 贾 宪¹ 黄玉祥^{1,2} 张崇勤³

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 陕西省农业装备工程研究中心, 陕西杨凌 712100;

3. 潍柴雷沃智慧农业科技股份有限公司, 潍坊 261000)

摘要: 针对现有重型精量播种机在高速作业时存在覆土装置影响播种均匀性、种沟内种子被“架空”等问题, 基于阿基米德螺线切刃曲线与挤压式覆土原理相结合的思路, 设计了一种阿基米德螺线型弧面双齿盘覆土装置, 实现了覆土厚度适宜且均匀一致, 降低覆土作业对播种均匀性影响的目的。本研究对覆土装置的结构参数、覆土量进行分析, 确定了影响覆土效果的主要参数取值范围; 利用 EDEM 离散元仿真技术建立了覆土装置-种子-土壤间的离散元模型, 对关键参数进行仿真优化, 确定弧面双齿盘的最优参数组合; 通过田间试验对该装置的作业性能进行了验证。研究结果表明: 影响弧面双齿盘作业性能的主要结构参数为阿基米德螺线型弧面双齿盘的中心间距、安装倾角、入土深度。当弧面双齿盘的中心间距为 142.6 mm、安装倾角为 20°、入土深度为 55 mm 时, 该装置通过性能良好, 覆土厚度均匀一致, 平均厚度为 47 mm, 合格粒距标准差、变异系数与空白对照组分别相差 0.22 mm、1.81 个百分点, 对播种均匀性影响小, 满足精量播种的农艺要求。

关键词: 精量播种机; 覆土装置; 阿基米德螺线型; 弧面双齿盘

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)06-0091-10

OSID:



Design and Experiment of Archimedean Spiral-type Arc Double-toothed Disc Soil-covering Device for High-speed Precision Planter

LIU Fang¹ GAO Xiaojun¹ JIA Xian¹ HUANG Yuxiang^{1,2} ZHANG Chongqin³

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Shaanxi Engineering Research Center for Agricultural Equipment, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. Weichai Lovol Intelligent Agricultural Technology Co., Ltd., Weifang 261000, China)

Abstract: Aiming at the existing heavy-duty precision planter soil-covering device at high speed, there are problems such as high impact on seed spacing uniformity, seed being overhead, etc., the proposed combination of Archimedean spiral-type and extruded soil cover technical ideas, an Archimedean spiral-type arc double-toothed disc soil-covering device was designed, to achieve suitable and uniform mulch thickness and reduce the impact of mulching operations on seed spacing uniformity. The structural parameters of the mulching device and the amount of mulch were analyzed, and the range of values of the main parameters affecting the effect of mulching was determined; the simulation and optimization analyses of the designed components were carried out by using EDEM software to determine the optimal parameter combinations of the arc double-toothed disc; and the operational performance of the device was verified through field experiments. The results showed that the main structural parameters affecting the operational performance of the arc double-toothed disc were the center distance, installation inclination, and embedded depth of the arc double-toothed disc. When the center distance of the arc double-toothed disc was 142.6 mm, the installation inclination was 20°, and embedded depth was 55 mm, the device passed well with suitable and uniform mulch thickness, the average mulch thickness was 47 mm, and the

收稿日期: 2024-01-09 修回日期: 2024-03-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000404, 2021YFD2000405)

作者简介: 刘芳(1998—), 女, 硕士生, 主要从事现代农业装备研究, E-mail: liuf0919@nwafu.edu.cn

通信作者: 黄玉祥(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤-机器系统研究, E-mail: hyx@nwsuaf.edu.cn

standard deviation and coefficient of variation of qualified spacing differed from the blank control group by 0.22 mm and 1.81 percentage points, which was a small influence on the uniformity of sowing and met the agronomic requirements of precision sowing.

Key words: precision planter; soil-covering device; Archimedean spiral-type; arc double-toothed disc

0 引言

随着播种机作业速度的提高,具备入土阻力小等优点的双圆盘开沟器被广泛应用于玉米、大豆高速精量播种机^[1],双圆盘开沟器两侧的限深轮对种沟两侧土壤具有压实作用,造成种沟两侧土壤流动性变差,现有V型覆土镇压装置只将种沟上层表土闭合,位于种沟下方的种子被“架空”,影响出苗率^[2]。因此,为配有双圆盘开沟器和限深轮的重型高速精量播种机设置专门的覆土装置具有实际价值。

研究人员围绕覆土装置的性能参数以及覆土、碎土等功能进行了大量研究^[3-9]。王景立等^[10]对八字型、双圆盘、挤压式3种覆土器进行了研究,得出种子位移与前进速度呈正相关、与种子形状无关的结论;邴政^[11]根据仿生学原理设计出了适用于大豆播种的破碎式和挤压式2种覆土装置;GENG等^[12]为铲式开沟器设计了一种配有分土板的圆盘覆土装置,提升了免耕播种机播种质量;卢琦等^[2]利用EDEM仿真软件建立种沟土壤-种子-覆土装置三者互作离散元模型,为覆土装置工作原理及覆土过程土壤、种子微观运动的研究提供基础。上述研究为覆土装置的设计提供了借鉴,但缺少对配有双圆盘开沟器和限深轮的重型高速精量播种机的覆土装置以及由于土壤流速造成播种均匀性降低问题的研究。

为此,本文提出阿基米德螺线刃口曲线与挤压式覆土原理相结合的思路,设计一种适用于双圆盘开沟装置的弧面双齿盘覆土装置,通过横向挤压覆土的方式,在实现紧密覆土的同时,降低土壤在前进方向上流动速度对播种均匀性的影响;通过分析不同参数对覆土量的影响,确定覆土装置的关键参数,借助EDEM仿真技术得到最优参数组合,并通过田间试验对优化参数加以验证。

1 覆土装置类型确定与工作原理

1.1 覆土盘类型选择

弧面双齿盘覆土装置的主要作用是通过横向挤压的方式进行覆土,降低土壤在前进方向上的流动速度,保证播种均匀性。综合考虑到现有轮式覆土装置的覆土效果受镇压功能限制,本设计选择脱土

效果较好的盘面覆土^[13]。3种不同盘面形状和布置方式的覆土圆盘装置如图1所示。

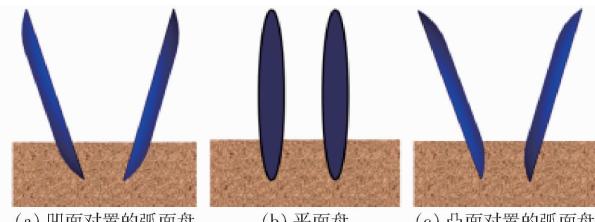


图1 不同盘面形状和布置方式的覆土圆盘
Fig. 1 Soil-covering disc with different disc shapes and arrangements

不同盘面形状、对置方式的覆土装置对于土壤砍切、堆积、扰动的作用效果不同。凹面对置的弧面盘入土阻力大、覆土作用小,平面盘要实现覆土作用需要设计开口角度,但会导致前进阻力大、土壤流速随前进速度变化大;凸面对置的弧面盘入土和出土部分比中间开口较大,中间部分对土壤进行挤压覆土,相较平面盘布置的方式对土壤在前进方向的推挤作用小,也对土壤间的粘结作用具有一定的破坏作用。为保证工作阻力小的同时实现横向挤压覆土作用,覆土装置选择凸面对置的弧面盘(图1c)。

1.2 弧面齿盘刃口曲线选择

在凸面对置弧面盘设计基础上,为实现覆土装置入土性能好、覆土均匀、工作阻力小等目标,对弧面盘进行齿盘设计,针对不同刃口曲线的弧面齿盘受力情况进行分析,如图2所示。图中,v为前进速度,h为入土深度,D为弧面双齿盘覆土装置直径,f_t为土壤对圆盘刀的滑动阻力,f_n为土壤对圆盘部分的正压力,f_r为土壤对刃口部分的正压力,f_s为土壤对刃口部分的滑切阻力。

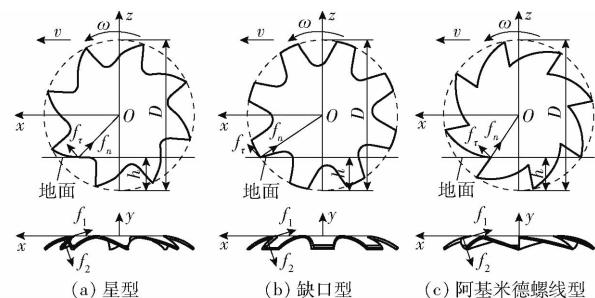


图2 不同刃口曲线的弧面覆土圆盘结构示意图
Fig. 2 Schematics of soil-covering discs with different edge curves

由于弧面盘具备一定的倾角,其切土方式为被

动式,在作业过程中覆土量、工作阻力、对土壤的砍切和滑切作用效果不同。由图2可知,星型、阿基米德螺线型刃口曲线的覆土装置作业过程中以滑切为主,缺口型刃口曲线以砍切为主;星型、缺口型缺口部分大形成漏切区,两者挤压覆土过程的均匀性差、覆土量少,而阿基米德螺线型刃口曲线的覆土装置可实现由远及近切入土壤,在避免漏切的同时,工作过程更为流畅^[14-18]。为保证齿盘配合凸面对置的弧面盘实现覆土均匀、工作阻力小、不发生漏切的目的,确定以阿基米德螺线(图2c)作为覆土装置的弧面齿盘刃口曲线。

1.3 工作原理

阿基米德螺线型弧面双齿盘覆土装置的2个弧面齿盘呈对称分布,具有一定中心间距和安装倾角,安装在精量播种机末端。其工作原理与作业过程如图3所示,当播种机具以速度v作业时,连接装置带动覆土装置切入土壤后滚动并前进。覆土装置作业时,弧面双齿盘覆土装置切入土壤后继续前进,土壤从开口较大部分被弧面逐渐挤压至开口较小的中间部位,土壤就此进入种沟完成挤压覆土。此过程由于弧面盘结合盘齿结构,既实现了对种子进行有效包裹的覆土作用,还实现了湿土覆盖种子和部分土壤破碎的作用,为种子萌发提供优良的土壤覆盖环境,是精量播种作业过程中的重要环节。

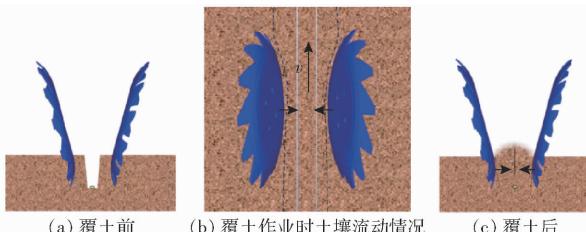


图3 覆土装置工作原理与作业过程示意图

Fig. 3 Schematic of working principle and operation process of soil-covering device

2 弧面双齿盘覆土装置设计

阿基米德螺线型弧面双齿盘覆土装置参数设计必须结合开沟器开出的开沟宽度、形状等参数进行。采用雷沃2BMQE-2E型精量播种机在田间进行开沟试验,将播种深度设置为50 mm,通过测量得到沟上侧宽L为43 mm,沟底宽a为20 mm,沟深H为50 mm,开沟过程中形成的种沟两侧堆土由于被限深轮倾轧,种沟两侧土壤厚度可忽略不计。

2.1 阿基米德螺线型刃口曲线设计

阿基米德螺线型刃口曲线参数如图4所示,其极坐标方程和螺距设计公式为

$$R = R_0 + K\theta \quad (1)$$

$$l = 360 \frac{R_{\max} - R_0}{\theta_{\max}} \quad (2)$$

式中 R —阿基米德螺线型刃口极径,mm

K —常数

θ —刃口极角,(°)

l —阿基米德螺线螺距,mm

R_{\max} —最大极径,mm

R_0 —起始极径,mm

θ_{\max} —最大包角,(°)

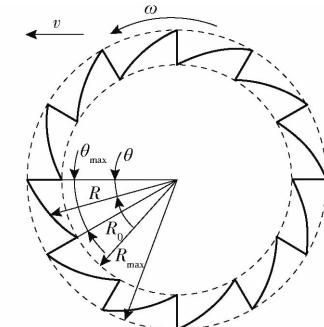


图4 阿基米德螺线型覆土装置刃口曲线参数示意图

Fig. 4 Schematic parameters of edge profile of Archimedean spiral-type soil-covering device

已有相关研究中,拨草轮以及缺口圆盘缺口数量一般为8~15个^[19-20],覆土装置盘齿个数过多,会增加接触面积,增大前进阻力,导致盘齿结构复杂易磨损,制造难度和成本过高,过少会导致覆土量少、漏切区域大且在盘面结构上不好布置,本研究将盘齿个数设计为10~14个。盘齿深度设计考虑入土部分缺口面积,过大会导致覆土不均匀、漏切,考虑其具有部分松土功能,设计为与种沟内湿土厚度相近的30 mm。

由于齿尖部分易发生应力集中造成盘齿弯折或磨损,降低切土效果,因此将齿尖部分增加顶宽设计,在保证破茬刀外缘半径和内缘起始半径不变的情况下,将最大极径增大5 mm。根据以上设计参数,弧面双齿盘覆土装置齿形结构简图如图5所示。

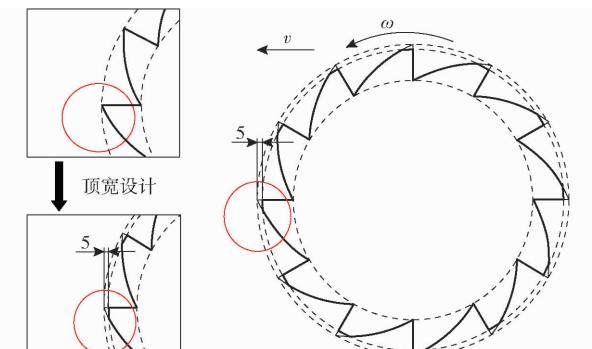


图5 阿基米德螺线型覆土装置优化后示意图

Fig. 5 Schematic of optimized Archimedean spiral-type soil-covering discs

2.2 弧面双齿盘参数设计

弧面双齿盘覆土装置由于入土时伴随碎土功能,可同属于浅耕碎土式圆盘耙类,相关参数可参考浅耕圆盘耙设计经验公式进行计算,其结构参数如图6所示。

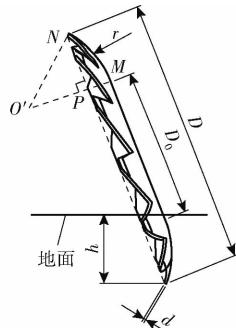


图6 弧面双齿盘覆土装置参数示意图

Fig. 6 Schematic parameters of arc double-toothed disc soil-covering device

弧面双齿盘覆土装置直径 D 设计经验公式为

$$D_{\max} = kh_{\max} \quad (3)$$

式中 D_{\max} —— 直径最大值, mm

k —— 径深比

h_{\max} —— 入土深度最大值, mm

国内浅耕圆盘耙径深比 k 选取 5~6, 在满足作业质量前提下, 选取下限径深比 5 作为最小参照。玉米播深一般为 30~50 mm, 本设计中开沟深度取 50 mm, 考虑到弧面双齿盘下方对于土壤的挤压作用较轻, 故入土深度最大值 $h_{\max} = 60$ mm, 计算得直径最大值 $D_{\max} = 300$ mm。

考虑到陕西关中平原为小麦玉米轮作种植, 玉米播种前茬作物为小麦, 防止覆土作业过程中在轴承座下方造成秸秆堵塞, 确定弧面双齿盘覆土装置直径 D 需要将小麦秸秆厚度考虑在内, 需同时满足公式结构要求, 即

$$D > 2h + 2d_1 + d_2 \quad (4)$$

式中 d_1 —— 田间小麦秸秆厚度, mm

d_2 —— 轴承座外壳直径, mm

经测量, 玉米播种机进行播种作业前小麦秸秆厚度为 20~40 mm, 参考 6204 深沟球轴承座外壳直径约为 85 mm, 因此 D 应大于 285 mm。最终选取 $D = 290$ mm。

弧面双齿盘覆土装置厚度 d 设计经验公式为

$$d = (0.008 \sim 0.012)D \quad (5)$$

计算得弧面双齿盘覆土器厚度 d 为 2~3 mm, 考虑到作业条件下土壤硬度较大, 选择能够承受更大工作负荷厚度, 即 $d = 2.5$ mm。

弧面曲率半径 r 决定了覆土装置翻土能力与工作阻力, 曲率半径 r 越小, 翻土能力越大, 但工作阻

力越大; 反之, 曲率半径 r 越大, 翻土能力越小, 但工作阻力越小。设计经验公式为

$$r = \frac{D - D_0}{2\sin\varphi} \quad (6)$$

式中 D_0 —— 平面部分直径, mm

φ —— 扇形半角, ($^{\circ}$)

扇形半角一般取 $21^{\circ} \sim 27^{\circ}$, D_0 取 160 mm(即弧面部分 l_{PN} 为 65 mm), 计算得弧面曲率半径 r 为 $143 \sim 181$ mm。弧面盘侧面宽度 l_{PM} 根据弦长公式计算, 即

$$r^2 = (r - l_{PM})^2 + l_{PN}^2 \quad (7)$$

代入 r, l_{PN} 进行计算, 该范围的弧面盘侧面宽度 l_{PM} 最大值约为 15.6 mm。为增强覆土装置将土壤挤压至种沟的能力, 弧面盘侧面宽度 l_{PM} 需适当增加, 本设计将其侧面宽度增加约 10 mm, 重新代入式(7), 最终取整得到弧面曲率半径 $r = 100$ mm。

2.3 安装参数与覆土量关系分析

通过覆土装置覆土量需求计算中心间距 s , 覆土量还与弧面双齿盘覆土装置齿数 N 、安装倾角 α 、入土深度 h 等参数以及沟型尺寸有关。其中弧面双齿盘各项参数范围已知, 覆土装置与种沟土壤关系如图 7 所示。

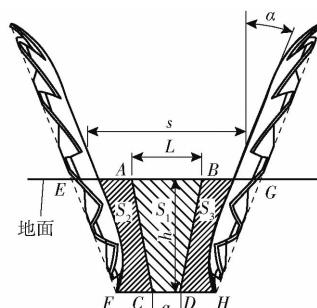


图7 覆土装置与种沟土壤关系示意图

Fig. 7 Schematic of soil-covering device in relation to soil of seed trench

种沟中间区域有少量回土, 由于其土壤密度较小可忽略不计。同时, 由于覆土作业后要进行镇压作业, 即中间区域在镇压作业后较镇压作业前土壤密度增大, 该区域土壤密度相较于种沟两侧区域覆土作业前土壤密度大。因此所需覆土量应大于两侧区域, 同时满足最终覆土厚度 h' 不小于 30 mm, 入土深度 h 为 40~60 mm, 各安装参数计算式为

$$S_1 < S_2 + S_3 \quad (8)$$

$$S_2 + S_3 > (l_{FH} + h'\tan\alpha)h' \quad (9)$$

$$S_1 = \frac{(a + L)h}{2} \quad (10)$$

$$S_2 = S_3 \quad (11)$$

$$S_{2\max} = S_{ACFE} \quad (12)$$

$$S_{ACFE} = \frac{(2htan\alpha + 2s - 2Dtan\alpha - a - L)h}{4} \quad (13)$$

式中 S_1 ——种沟中间面积,种沟曲线 $ABDC$ 围成的区域面积, mm^2

S_2, S_3 ——种沟两侧面积,种沟曲线 $ACFE$ 、 $BDHG$ 围成的区域面积, mm^2

为增强覆土装置入土能力,将覆土装置齿尖部位设计为垂直入土,即覆土装置安装倾角与扇形半角范围基本一致,又考虑到增强其挤压覆土能力,覆土装置安装倾角 α 可略小于该范围,最终设计为 $15^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$ 。

通过对覆土量的详细计算,转换成两个弧面双齿盘中心间距得出 $s > 129 \text{ mm}$,在保护性耕作背景下,为减少土壤扰动,覆土装置作业幅宽 l_{EG} 不应过大,同时作业幅宽过大会导致弧面盘对土壤推挤作用小,本设计中覆土作业最大幅宽 l_{EG} 为 120 mm ,同时保证弧面盘推挤土壤厚度在 30 mm 之内,即 l_{AE} 与 l_{FC} 的平均值小于 30 mm ,以入土深度 60 mm 、安装倾角 25° 为上限,最大中心间距经计算取整后得 150 mm ,因此最终中心间距 s 设计为 $130 \sim 150 \text{ mm}$ 。

3 离散元仿真

3.1 离散元仿真模型建立

覆土作业对象为开沟、播种作业后的土壤和种子,是具有不同性质的离散性颗粒。跟随机具前进的被动旋转覆土过程中散体颗粒群与机具之间具有相互作用,土壤、种子、机具的运动状态和受力的变化不尽相同,难以通过实际试验探究土壤、种子、机具的各项参数实时变化情况。为进一步探究机具性能,运用离散元仿真软件 EDEM 建立种沟土壤-种子-覆土装置间的相互作用模型,模拟弧面双齿盘覆土装置实际作业情况,结合试验优化方法,对弧面双齿盘覆土装置进行主要结构参数与安装参数优化,得出覆土作业效果较好的参数组合。

3.1.1 模型仿真参数

由于土壤颗粒一般为粒状和团块状,根据土壤这一特点采用 Hertz – Mindlin with Bonding 土壤接触模型使土壤颗粒产生粘结键^[21],在机具作业后土壤会因为粘结键的作用呈团块状。种子、土壤、覆土装置本征参数通过文献和田间实际参数标定获得,详细参数见表 1^[22–24]。

3.1.2 种沟覆土离散元模型构建

根据玉米播种的农艺要求,参考玉米机械播种行距范围 $50 \sim 60 \text{ mm}$,并根据试验田播种深度、田间覆土量以及覆土装置作业幅宽等因素,在离散元仿真软件中建立覆土装置-种子-土壤间的离散元模

表 1 离散元仿真模型基本参数

Tab. 1 Basic parameters of discrete element simulation model

| 参数 | 数值 |
|--|----------------------|
| 土壤密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 1 510 |
| 土壤泊松比 | 0.38 |
| 土壤剪切模量/Pa | 1×10^6 |
| 钢板密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 7 830 |
| 钢板泊松比 | 0.35 |
| 钢板剪切模量/Pa | 7.9×10^{10} |
| 玉米颗粒密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 1 197 |
| 玉米泊松比 | 0.4 |
| 玉米剪切模量/Pa | 1.37×10^8 |
| 土壤-土壤恢复系数 | 0.6 |
| 土壤-土壤静摩擦因数 | 0.4 |
| 土壤-土壤动摩擦因数 | 0.31 |
| 土壤-钢板恢复系数 | 0.3 |
| 土壤-钢板静摩擦因数 | 0.5 |
| 土壤-钢板动摩擦因数 | 0.05 |
| 玉米-土壤恢复系数 | 0.7 |
| 玉米-土壤静摩擦因数 | 0.17 |
| 玉米-土壤动摩擦因数 | 0.05 |

型:虚拟土槽长×宽×高为 $1 500 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$,土层厚度为 150 mm ,如图 8 所示。玉米种子间距较大,若实际按行间距会导致计算量少,考虑到玉米种子种间距对覆土过程影响较小和便于仿真,3 种形状玉米种子位于种沟中间位置均匀间隔分布 50 粒,通过单粒种子在前进方向上的位移标准差(以下简称种子位移标准差)来表示播种均匀性。利用 Solidworks 软件将覆土装置按 1:1 建立 3D 模型,并保存为.igs 格式。

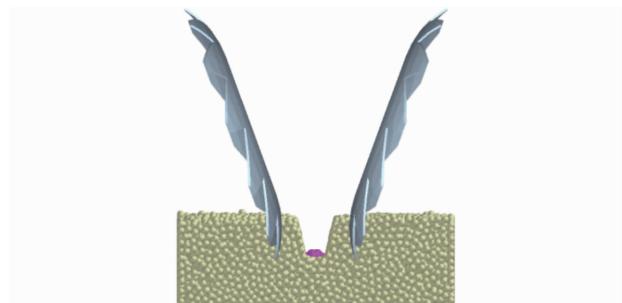


图 8 覆土装置-种子-土壤间的离散元模型

Fig. 8 Discrete element model between soil-covering device – seed – soil

3.2 单因素仿真实验

通过理论分析得到的弧面双齿盘覆土装置齿数 N 、中心间距 s 、安装倾角 α 、入土深度 h 等参数的区间值,以及试验过程的关键作业参数——前进速度 v 为试验因素,分析各个因素对覆土量(在土槽中,以土槽中心在前进方向上取 $1 000 \text{ mm}$ 范围为长、种沟中心 42 mm 为宽、沟底以上 100 mm 为高,用该区

域土壤质量代替覆土量)、种子位移标准差等试验指标的影响规律,并确定各因素范围。

考虑覆土作业对覆土量的要求,设定单因素试验中水平为:弧面双齿盘覆土装置齿数12个、中心间距140 mm、安装倾角20°、入土深度50 mm、前进速度2 m/s。进行某一因素试验时将其他因素设为中间水平。单因素试验因素水平如表2所示,试验

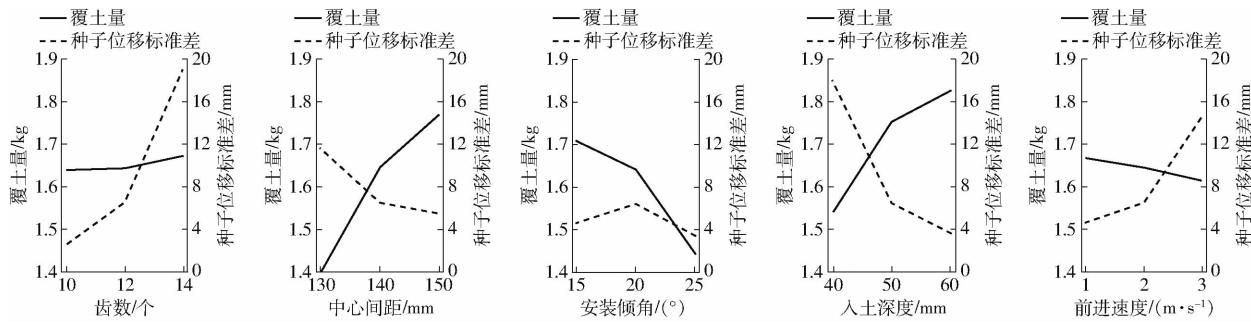


图9 单因素仿真试验结果

Fig. 9 Results of single factor simulation experiment

(1) 分析弧面双齿盘覆土装置齿数分别为10、12、14个时对覆土效果的影响。覆土量随齿数增加缓慢增加,与齿数变化效果差异不显著;种子位移标准差随齿数增加先缓慢增加后显著增加,与齿数变化效果差异显著。结果表明,弧面双齿盘覆土装置齿数对种子位移标准差有显著影响,齿数为10、12个时差异不显著,最终选择覆土量较大、漏切区域小的12个。

(2) 分析弧面双齿盘覆土装置安装中心间距分别为130、140、150 mm时对覆土效果的影响。覆土量随中心间距增大先快速增加后缓慢增加,与中心间距变化效果差异明显;种子位移标准差随中心间距增大先缓慢增加后缓慢减少,在覆土量符合条件下,与中心间距变化效果差异不明显。结果表明,弧面双齿盘覆土装置安装中心间距对覆土量有极显著影响,最终取覆土量符合条件中心间距130~150 mm。

(3) 分析弧面双齿盘覆土装置安装倾角分别为15°、20°、25°时对覆土效果的影响。覆土量随安装倾角增大先缓慢减少后快速减少,与安装倾角变化效果差异明显,其中安装倾角为25°时覆土量不能达到覆土厚度要求,其原因是中心间距相同的情况下,安装倾角过大,不能达到覆土量要求导致;种子位移标准差随安装倾角增大先缓慢增加后缓慢减少,在覆土量符合条件下,与安装倾角变化效果差异不明显。由于覆土作业效果还与其他因素有关,最终选取安装倾角为15°~25°。

(4) 分析入土深度分别为40、50、60 mm时对覆土效果的影响。覆土量随入土深度先快速增加后缓

慢增加,种子位移标准差随入土深度增大先快速减少后缓慢减少,各试验指标均与入土深度变化效果差异明显。结果表明,弧面双齿盘覆土装置的入土深度对覆土量、种子位移标准差有显著影响,种子位移标准差的结果说明入土深度越接近种子位于种沟内的深度,种子上方所覆土壤由上方抛撒入土转为侧向挤压覆土,种子位移标准差就越小,入土深度最终选择覆土量较大、种子位移标准差小的范围50~60 mm。

(5) 分析前进速度分别为1、2、3 m/s时对覆土效果的影响。覆土量变化随前进速度增加缓慢减少,与前进速度变化效果差异不显著;种子位移标准差先缓慢增加后快速增加,与前进速度变化效果差异显著。结果表明,弧面双齿盘覆土装置前进速度对种子位移标准差有显著影响。为保证种子在高速条件下的播种均匀性,前进速度选择3 m/s。

3.3 Box-Behnken Design 仿真试验

为了进一步确定本设计中弧面双齿盘覆土装置各参数对覆土量、种子位移标准差效果最好的最优组合,在单因素试验基础上,选取影响覆土量、种子位移标准差的3个关键因素(中心间距s、安装倾角 α 、入土深度h)为试验因素,采用三因素三水平进行Box-Behnken设计的方法,研究关键因素与试验指标之间的关系。根据前期理论分析与单因素仿真试验结果,试验选取机组前进速度为3 m/s,弧面双齿盘覆土装置齿数为12个,间距s为130~150 mm,安装倾角为15°~25°,入土深度h为50~60 mm。试验因素编码如表3所示,试验方案与结果如表4所示。其中由于覆土厚度测量存在误差,在仿真试验

表2 单因素仿真试验因素水平

Tab. 2 Single factor simulation experimental factor levels

| 水平 | N/个 | s/mm | $\alpha/(^{\circ})$ | h/mm | $v/(m \cdot s^{-1})$ |
|----|-----|------|---------------------|------|----------------------|
| 1 | 10 | 130 | 15 | 40 | 1 |
| 2 | 12 | 140 | 20 | 50 | 2 |
| 3 | 14 | 150 | 25 | 60 | 3 |

结果中,选取长度1300 mm、宽度50 mm、深度50 mm范围内的土壤质量表示覆土量。

表3 试验因素编码

Tab. 3 Experimental factor code

| 编码 | 因素 | | |
|----|------|-------------------|------|
| | s/mm | $\alpha/(^\circ)$ | h/mm |
| -1 | 130 | 15 | 50 |
| 0 | 140 | 20 | 55 |
| 1 | 150 | 25 | 60 |

表4 试验方案与结果

Tab. 4 Experimental programs and results

| 序号 | 因素 | | 覆土量/kg | 种子位移标 准差/mm |
|----|------|-------------------|--------|----------------|
| | s/mm | $\alpha/(^\circ)$ | | |
| 1 | 130 | 15 | 55 | 1.919 |
| 2 | 150 | 15 | 55 | 1.903 |
| 3 | 130 | 25 | 55 | 1.347 |
| 4 | 150 | 25 | 55 | 1.615 |
| 5 | 130 | 20 | 50 | 1.619 |
| 6 | 150 | 20 | 50 | 1.754 |
| 7 | 130 | 20 | 60 | 1.835 |
| 8 | 150 | 20 | 60 | 1.963 |
| 9 | 140 | 15 | 50 | 1.839 |
| 10 | 140 | 25 | 50 | 1.382 |
| 11 | 140 | 15 | 60 | 2.017 |
| 12 | 140 | 25 | 60 | 1.599 |
| 13 | 140 | 20 | 55 | 1.843 |
| 14 | 140 | 20 | 55 | 1.806 |
| 15 | 140 | 20 | 55 | 1.821 |
| 16 | 140 | 20 | 55 | 1.790 |
| 17 | 140 | 20 | 55 | 1.801 |

试验使用Design-Expert软件进行分析,覆土作业仿真试验方差分析见表5、6。方差分析表明弧面双齿盘安装的中心间距s、安装倾角 α 、入土深度h对覆土量、种子位移标准差影响极显著,得到覆土量E、种子位移标准差F与中心间距s、安装倾角 α 、入土深度h之间的回归方程

$$E = -0.3909 + 0.0257s - 0.1039\alpha + 0.0312h - 0.0014s\alpha - 0.0040\alpha^2 \quad (14)$$

$$F = 300.906 - 4.528s + 1.133\alpha + 0.390h + 0.019sh + 0.011s^2 - 0.041\alpha^2 \quad (15)$$

为进一步分析各因素的交互作用对覆土装置试验评价指标的影响规律,本研究通过Design-Expert软件对试验数据进行处理,可得到弧面双齿盘覆土装置中心间距、安装倾角、入土深度交互作用对覆土量E、种子位移标准差F的响应曲面,如图10、11所示。

由图10a可知,当中心间距一定时,覆土量随安装倾角的增加呈现减小的趋势;当安装倾角一定时,覆土量随中心间距的增加基本呈增大趋势,增幅相

表5 覆土量仿真试验方差分析

Tab. 5 Variance analysis of soil covering volume simulation experiment

| 异差来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | F | P |
|------------|--------|-----|--------|---------|---------|
| 模型 | 0.5584 | 9 | 0.0620 | 236.21 | <0.0001 |
| s | 0.0332 | 1 | 0.0332 | 126.23 | <0.0001 |
| α | 0.3763 | 1 | 0.3763 | 1432.62 | <0.0001 |
| h | 0.0841 | 1 | 0.0841 | 320.01 | <0.0001 |
| s α | 0.0202 | 1 | 0.0202 | 76.77 | <0.0001 |
| sh | 0.0000 | 1 | 0.0000 | 0.0466 | 0.8352 |
| α h | 0.0004 | 1 | 0.0004 | 1.45 | 0.2680 |
| s^2 | 0.0011 | 1 | 0.0011 | 4.29 | 0.0772 |
| α^2 | 0.0420 | 1 | 0.0420 | 159.83 | <0.0001 |
| h^2 | 0.0000 | 1 | 0.0000 | 0.1541 | 0.7064 |
| 残差 | 0.0018 | 7 | 0.0003 | | |
| 失拟 | 0.0002 | 3 | 0.0001 | 0.1234 | 0.9415 |
| 误差 | 0.0017 | 4 | 0.0004 | | |
| 总和 | 0.5602 | 16 | | | |

表6 种子位移标准差仿真试验方差分析

Tab. 6 Variance analysis of seed displacement standard deviation simulation experiment

| 异差来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | F | P |
|------------|--------|-----|--------|--------|--------|
| 模型 | 41.49 | 9 | 4.61 | 10.27 | 0.0028 |
| s | 9.35 | 1 | 9.35 | 20.83 | 0.0026 |
| α | 1.77 | 1 | 1.77 | 3.94 | 0.0877 |
| h | 14.34 | 1 | 14.34 | 31.94 | 0.0008 |
| s α | 0.9604 | 1 | 0.9604 | 2.14 | 0.1870 |
| sh | 3.63 | 1 | 3.63 | 8.08 | 0.0249 |
| α h | 0.7396 | 1 | 0.7396 | 1.65 | 0.2402 |
| s^2 | 5.42 | 1 | 5.42 | 12.07 | 0.0104 |
| α^2 | 4.50 | 1 | 4.50 | 10.01 | 0.0158 |
| h^2 | 1.30 | 1 | 1.30 | 2.90 | 0.1326 |
| 残差 | 3.14 | 7 | 0.4490 | | |
| 失拟 | 0.6744 | 3 | 0.2248 | 0.3643 | 0.7835 |
| 误差 | 2.47 | 4 | 0.6171 | | |
| 总和 | 44.63 | 16 | | | |

对较小。由图10b可知,当入土深度一定时,覆土量随中心间距的增加呈增大趋势;当中心间距一定时,覆土量随入土深度的增加呈增大趋势。由图10c可知,当入土深度一定时,覆土量随安装倾角的增加而减少;当安装倾角一定时,覆土量随入土深度的增加基本呈线性增大趋势,增幅相对较小。

由图11a可知,当中心间距一定时,种子位移标准差随安装倾角的增加呈现先增后减的趋势;当安装倾角一定时,种子位移标准差随中心间距的增加而逐渐减小。由图11b可知,当中心间距一定时,种子位移标准差随入土深度的增加而增加;当入土深度一定时,种子位移标准差随中心间距的增加呈现先减后增的趋势。由图11c可知,当入土深度一定

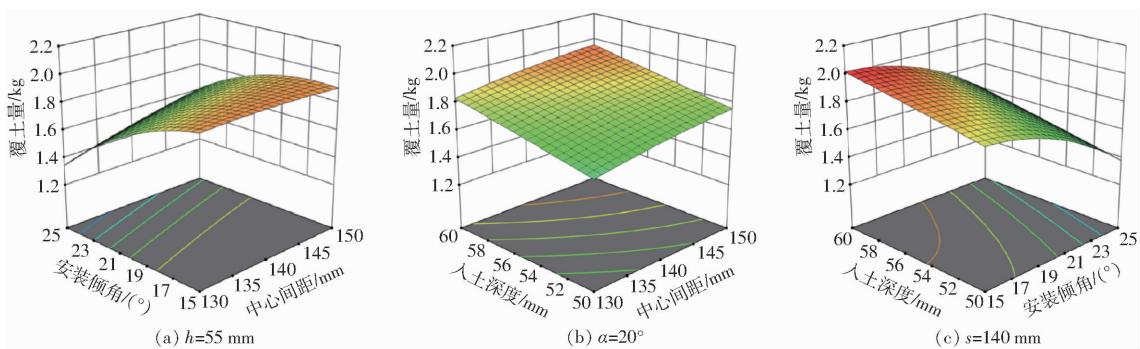


图 10 各因素交互作用对覆土量影响的响应曲面

Fig. 10 Response surfaces of influence of factor interactions on soil covering volume

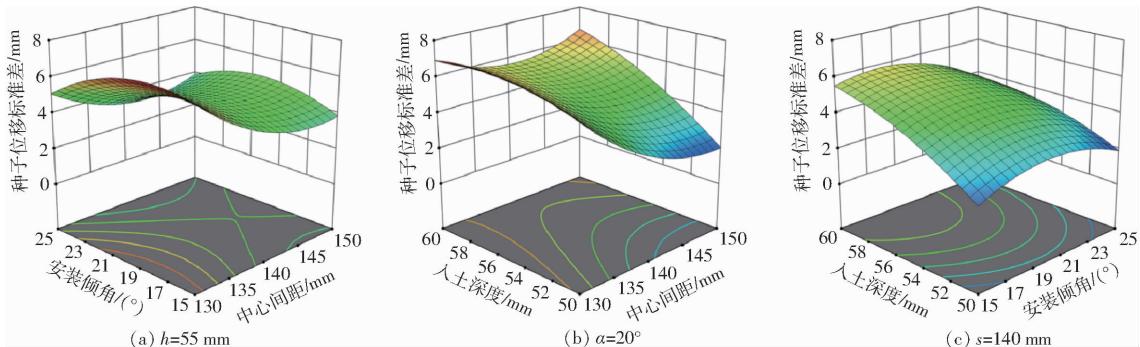


图 11 各因素交互作用对种子位移标准差影响的响应曲面

Fig. 11 Response surfaces of influence of factor interactions on seed displacement standard deviation

时,种子位移标准差随安装倾角的增加呈现先增加后减少的趋势;当安装倾角一定时,种子位移标准差随入土深度的增加而增加。

为了得到弧面双齿盘覆土装置最优结构参数,采用多目标变量优化方法,对影响覆土量、种子位移标准差的各个试验因素进行优化设计,遵循覆土量适宜、种子位移标准差小的原则,结合各试验因素边界条件,确定约束条件为

$$\begin{cases} 1.7 \text{ kg} \leq E \leq 1.9 \text{ kg} \\ 0 \text{ mm} \leq F \leq 5 \text{ mm} \\ 130 \text{ mm} \leq s \leq 150 \text{ mm} \\ 15^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ \\ 50 \text{ mm} \leq h \leq 60 \text{ mm} \end{cases} \quad (16)$$

基于 Design-Expert 软件中的 Optimization 模块进行分析求解,综合考虑中心间距、安装倾角、入土深度对弧面双齿盘覆土装置覆土量、种子位移标准差的影响,从优化结果中选取一组作为最优参数组合,即中心间距为 142.6 mm、倾角 20° 和入土深度 55 mm 时,覆土量为 1.73 kg(经测量覆土厚度为 43 mm),种子位移标准差为 4.7 mm,覆土量、种子位移标准差均能满足精量播种机覆土作业要求,且能达到减少种子位移标准差的目的。

4 田间试验

为验证阿基米德螺线型弧面双齿盘覆土装置

田间作业性能,于陕西省杨凌示范区西北农林科技大学北校区试验田开展验证试验。试验田土质类型为壤土,试验期间平均温度为 18.5 ℃,土壤含水率为 18.7%,密度为 1.49 g/cm³,本试验需确认覆土装置在有秸秆残茬的情况下是否会发生堵塞,试验前已铺设厚度 30 mm 小麦秸秆于试验田地表。根据优化后弧面双齿盘覆土装置各项参数:中心间距为 142.6 mm、倾角 20° 和入土深度 55 mm 进行加工制造,并安装在 2BMQE-2E 型精量播种机单体上进行试验,设定机组前进速度为 1~3 m/s。

4.1 对比试验

采用对比试验法,将阿基米德螺线型弧面双齿盘覆土装置与未安装覆土镇压装置的单体(空白对照组)作业情况进行对比试验,比较覆土装置对播种均匀性的影响,试验过程及结果如图 12 所示。

通过试验过程中跟随拍摄与观察,空白对照组在限深轮压实作用下开沟整齐,种沟两侧土壤回土效果不明显;阿基米德螺线型弧面双齿盘覆土装置在作业过程中覆土装置前进顺畅,未发生秸秆堵塞和晾籽现象,通过性能良好。弧面双齿盘覆土装置扎入土中的弧面双齿盘会将下方大部分湿土挤压至种沟下部,覆土厚度均匀一致,有效达到了挤压覆土的功能。本次对比试验验证了覆土效果,达到了覆



Fig. 12 田间对比试验
Fig. 12 Comparative field experiences

土均匀一致的要求。

4.2 覆土厚度与合格粒距变异系数

试验完成后,将种子找出,分别测量安装弧面双齿盘覆土装置与未安装任何覆土镇压装置作业后的覆土厚度和播行内相邻两粒种子间的距离,同时观察种子上方所覆土壤是否为下层较为湿润的土壤,过程如图 13 所示,结果如表 7、8 所示。经测量计算,覆土厚度平均值为 47 mm,与仿真值相差 3 mm;合格粒距标准差、变异系数与空白对照组分别相差 0.22 mm、1.81 个百分点。



图 13 覆土厚度和种子粒距测量过程
Fig. 13 Soil covering thickness and seed spacing measurement process

对比试验结果说明,弧面双齿盘覆土装置覆土作业后覆土厚度以及合格粒距变异系数与未安装覆土镇压装置的对照组结果基本一致,同时,种子上方

表 7 覆土厚度测量结果

Tab. 7 Measurement results of soil covering thickness

| 测量序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------|----|----|----|----|----|
| 覆土厚度/mm | 53 | 47 | 51 | 42 | 42 |

表 8 合格粒距测量结果

Tab. 8 Measurement results of qualified seed spacing

| 类型 | 标准差/mm | 标准差/mm | 变异系数/% | 变异系数/% |
|------|--------|--------|--------|--------|
| 空白对照 | 3.53 | | 16.33 | |
| | 3.63 | 3.46 | 17.20 | 16.05 |
| | 3.21 | | 14.36 | |
| 覆土后 | 3.78 | | 18.50 | |
| | 3.56 | 3.68 | 17.27 | 17.86 |
| | 3.69 | | 17.81 | |

是与种沟底部较为湿润土壤一致的土壤。因此,弧面双齿盘覆土装置在完成挤压覆土功能的同时,实现了对种子粒距均匀性影响小且湿土覆盖种子的功能,达到了预期效果。

5 结论

(1) 针对现有 V 型覆土镇压装置易在重型高速精量播种机的限深轮压实作用下导致种子被“架空”、高速条件下土壤流速造成播种均匀性降低的问题,设计了一种阿基米德螺线型弧面双齿盘覆土装置,通过结构参数与种沟参数对覆土量进行分析,确定了覆土装置的关键结构参数及其取值范围。覆土装置入土深度 h 为 40~60 mm,安装倾角 α 为 $15^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$,中心间距 s 为 130~150 mm。

(2) 通过 BBD 试验设计方法和 EDEM 仿真试验得到了覆土量适宜、种子位移标准差小的较优参数组合:中心间距 142.6 mm、倾角 20° 和入土深度 55 mm,此参数组合下覆土厚度为 43 mm,种子位移标准差为 4.7 mm。

(3) 田间试验与优化仿真结果对比分析表明,覆土厚度平均值为 47 mm,与仿真值相差 3 mm;合格粒距的标准差、变异系数与空白对照组分别相差 0.22 mm、1.81 个百分点,试验各指标与优化结果基本一致,均满足精量播种的农艺要求。

参 考 文 献

- [1] 赵淑红,刘汉朋,侯磊涛,等.基于离散元法的免耕深施肥分段式玉米播种开沟器研制[J].农业工程学报,2021,37(13): 1~10.
ZHAO Shuhong, LIU Hanpeng, HOU Leitao, et al. Development of deep fertilizing no-tillage segmented maize sowing opener using discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(13): 1~10. (in Chinese)
- [2] 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)

- [3] 宋鲁鹏, 杨先海, 李倩. 基于SPH无网格法的精密播种圆盘覆土器仿真研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(2): 29–32, 42.
SONG Lupeng, YANG Xianhai, LI Qian. Simulation study of precision seeding disc covering device based on SPH's mesh less method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(2): 29–32, 42. (in Chinese)
- [4] 杨文彩, 蒲望, 潘吴建, 等. 三七育苗播种覆土镇压装置的研究设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2022, 43(2): 122–132.
YANG Wencai, PU Wang, PAN Wujian, et al. Design and experiment of soil covering and compacting device for *Panax notoginseng* seedling sowing[J]. Journal of South China Agricultural University, 2022, 43(2): 122–132. (in Chinese)
- [5] 赵建秋, 赵伟, 田帅, 等. 基于EDEM的平贝母覆土部件仿真试验研究[J]. 农机化研究, 2023, 45(10): 24–31.
ZHAO Jianqiu, ZHAO Wei, TIAN Shuai, et al. Simulation test of soil covered parts of *Fritillaria ussuriensis* Maxim based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(10): 24–31. (in Chinese)
- [6] 周龙. 基于离散元法的玉米种子建模及播种过程的仿真分析与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
ZHOU Long. DEM-based modelling of maize seeds and the simulation analysis and experimental study of the seed-sowing[D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese)
- [7] 晁宝宝, 袁盼盼, 韩长杰, 等. 移栽机覆土量自动调节装置设计[J]. 农机化研究, 2022, 44(1): 54–58.
CHAO Baobao, YUAN Panpan, HAN Changjie, et al. Design of automatic regulating device for soil cover of transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(1): 54–58. (in Chinese)
- [8] ZHENG Zhiqi, FU Zuoli, WANG Chenyang, et al. Design and experimental research on soil covering device with linkage and differential adjustment of potato planter[J]. Agriculture, 2021, 11(7): 665.
- [9] HOU Shouyin, WANG Shengzhe, JI Zhangchi, et al. Design and experimental of the clearing and covering of a minimum-tillage planter for corn stubble[J]. Agriculture, 2022, 12(8): 1209.
- [10] 王景立, 刘选伟, 韩明月, 等. 双圆盘式覆土器的优化设计[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(1): 37–39.
WANG Jingli, LIU Xuanwei, HAN Mingyue, et al. Optimization design of double-disc coverer[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(1): 37–39. (in Chinese)
- [11] 邱政. 大豆播种机覆土器仿生优化设计及其分析[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
BING Zheng. Bionic optimization design and analysis on soil coverer of soybean seeder[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [12] GENG Yuanle, WANG Xianliang, ZHONG Xiaokang, et al. Design and optimization of a soil-covering device for a corn no-till planter[J]. Agriculture, 2022, 12(8): 12–18.
- [13] 王景立. 精密播种机覆土与镇压过程对种子触土后位置控制的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
WANG Jingli. The research of position control after seed contacting soil in the process of soil covering and rolling with precision seeder[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [14] 林静, 李博, 李宝筏, 等. 阿基米德螺线型缺口圆盘破茬刀参数优化与试验[J]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 118–124. (in Chinese)
- [15] 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 Zhihao, ZHENG Enlai, LI Xun, et al. Performance analysis of the soil-contacting parts for no-tillage planters and optimization of blade structure[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(2): 1–13. (in Chinese)
- [16] 黄玉祥, 高鹏洋, 张庆凯, 等. 免耕播种机切茬导草组合式草土分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 67–78.
HUANG Yuxiang, GAO Pengyang, ZHANG Qingkai, et al. Design and experiment of grass soil separation device with combination of stubble cutting and grass guiding used for no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 67–78. (in Chinese)
- [17] 李博. 免耕播种机新型破茬开沟装置的设计与试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2013.
LI Bo. Design and experimental research of new maize residues cutting and opening device for no-till planter[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [18] 林静, 李宝筏, 李宏哲. 阿基米德螺线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)
- [19] 洪洋. 免耕播种机分拨草防堵装置的设计与研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
HONG Yang. The design and research of weed divider blocking device in no tillage seeder[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [20] 袁盼盼, 李洪文, 蒋贵菊, 等. 滴灌区窄行玉米免耕播种带秸秆清理装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 43–52.
YUAN Panpan, LI Hongwen, JIANG Guiju, et al. Design and experiment of straw cleaning device for wide narrow maize no-tillage sowing strip in drip irrigation area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 43–52. (in Chinese)

- Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [21] 王磊, 廖宜涛, 万星宇, 等. 油麦兼用型气送式集排器混种部件设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 68–79, 97.
WANG Lei, LIAO Yitao, WAN Xingyu, et al. Design and test on mixing component of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 68–79, 97. (in Chinese)
- [22] SOO L S. Particulates and continuum-multiphase fluid dynamics: multiphase fluid dynamics [M]. New York: CRC Press, 2018.
- [23] GEORGE Y, GENNADY Z. Multiphase flow phenomena and applications: memorial volume in honor of Gad Hetsroni [M]. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2018.
- [24] 雷小龙, 廖宜涛, 张闻宇, 等. 油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验 [J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 57–68.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Wenyu, et al. Simulation and experiment of gas-solid flow in seed conveying tube for rapeseed and wheat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 57–68. (in Chinese)
- [25] EFSTATHIOS E M, MARTIN S, BEREND V W. Multiphase flows with droplets and particles [M]. Third Edition. Boca Raton: CRC Press, 2022.
- [26] 禹华谦, 陈春光, 麦继婷, 等. 工程流体力学 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2018.
- [27] 袁竹林, 朱立平, 耿凡, 等. 气固两相流动与数值模拟 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2013.
- [28] ZHANG Xirui, WEN Zhentuo, WANG Qingjie, et al. Research on characteristics of airway pressure loss in seeding-wheel-type pneumatic seeder [J]. Agriculture, 2022, 12(12): 2021.
- [29] 曹成茂, 丁武阳, 刘忠滨, 等. 基于 Rocky Dem 的宁前胡排种器设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2023, 54(8): 53–64.
CAO Chengmao, DING Wuyang, LIU Zhongbin, et al. Design and experiment of seed disperser for ning-guo *Radix peucedani* based on Rocky Dem [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 53–64 (in Chinese)
- [30] 刘凡一, 张舰, 李博, 等. 基于堆积试验的小麦离散元参数分析及标定 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 247–253.
LIU Fanyi, ZHANG Jian, LI Bo, et al. Calibration of parameters of wheat required in discrete element method simulation based on repose angle of particle heap [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 247–253. (in Chinese)
- [31] 俞传阳, 陈状, 陈黎卿. 小麦小区条播机电控排种系统设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 75–83.
YU Chuanyang, CHEN Zhuang, CHEN Liqing. Design and test of electronic control seeding system for wheat plot drill [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 75–83. (in Chinese)
- [32] 胡昱, 黄小华, 陶启友, 等. 基于 CFD – DEM 的自动投饵饲料颗粒气力输送数值模拟 [J]. 南方水产科学, 2019, 15(3): 113–119.
HU Yu, HUANG Xiaohua, TAO Qiyou, et al. Simulation of automatic pneumatic conveying process of automatic feeding system based on computational fluid dynamics – discrete element method [J]. South China Fisheries Science, 2019, 15(3): 113–119. (in Chinese)
- [33] ARZU Y, ADNAN D. Measurement of seed spacing uniformity performance of a precision metering unit as function of the number of holes on vacuum plate [J]. Measurement, 2014, 56: 128–135.
-

(上接第 100 页)

- [21] 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 Yuxiang, HANG Chengguang, YUAN Mengchan, 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)
- [22] 董建鑫, 高筱钧, 张仕林, 等. 玉米姿控驱动式排种器导向投种机构设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 25–34.
DONG Jianxin, GAO Xiaojun, ZHANG Shilin, et al. Design and test of guiding seed throwing mechanism for maize posture control and driving metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 25–34. (in Chinese)
- [23] 王云霞, 梁志杰, 张东兴, 等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 36–42.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, ZHANG Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 36–42. (in Chinese)
- [24] 刘瑞, 李衍军, 刘忠军, 等. 包衣玉米种子离散元参数分析与标定 [J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊): 1–8, 18.
LIU Rui, LI Yanjun, LIU Zhongjun, et al. Analysis and calibration of discrete element parameters of coated maize seed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 1–8, 18. (in Chinese)