

基于离散元法的冬小麦划锄断根追肥联合作业装置设计与试验

武广伟^{1,2} 韩亚磊¹ 安晓飞^{1,2} 魏学礼² 孟志军² 陈立平²

(1.新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2.北京市农林科学院智能装备技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 结合冬小麦返青期划锄断根与追肥深施作业农艺要求,针对行间断根和化肥深施联合作业需求,设计了一种划锄断根追肥联合作业装置,以降低作业阻力、提高断根率并保证施肥深度为目标,系统开展了结构设计与参数优化研究。首先,基于作业机理分析与力学建模,对开沟器、断根铲及施肥管等关键部件进行了结构设计,提出了开沟器前刃采用指数曲线、施肥管采用最速降线曲线的设计方案;其次,基于离散元法(DEM)构建了划锄断根追肥联合作业装置-土壤-根系-肥料仿真模型。以断根率和作业阻力为评价指标,对断根铲刃线型、入土角和翼张角等关键参数进行了分析,并结合小麦农艺需求确定了合理参数范围;在此基础上,采用 Box-Behnken 正交组合仿真试验进行参数优化,得到断根铲的最优结构组合为:铲刃为阿基米德螺旋线、入土角 6.43°、翼张角 54.99°;优化后的结构参数可提高断根率并降低作业阻力;最速降线施肥管仿真结果显示施肥深度合格率最高达到 94.0%,排肥过程稳定。田间对比试验表明,在作业速度 4 km/h 条件下,划锄断根追肥联合作业装置作业效果良好,平均断根深度为 117 mm,断根率达 82.9%,施肥深度合格率为 90.6%,所设计装置能实现划锄断根追肥深施作业功能。

关键词: 冬小麦; 划锄断根; 追肥装置; 离散元法; 结构优化

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)11-0146-16

OSID:



Design and Experiment of Combined Operation Device for Hoeing, Root Cutting and Topdressing of Winter Wheat Based on Discrete Element Method

WU Guangwei^{1,2} HAN Yalei¹ AN Xiaofei^{1,2} WEI Xueli² MENG Zhijun² CHEN Liping²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

2. Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: Aiming to meet the agronomic requirements for hoeing, root-cutting, and deep fertilization during the winter wheat greening stage, and address the need for integrated inter-row root-cutting and fertilizer application, an integrated hoeing, root-cutting, and topdressing device was designed. With the objectives of reducing draft force, increasing the root-cutting rate, and ensuring fertilization depth, structural design and parameter optimization were systematically conducted. Firstly, based on operation mechanism analysis and mechanical modeling, key components, including the furrow opener, root-cutting shovel, and fertilizer tube were designed. A design scheme was proposed, featuring an exponential curve for the leading edge of the furrow opener and a brachistochrone curve for the fertilizer tube. Secondly, a discrete element method (DEM) simulation model for the “integrated device – soil – root – fertilizer” system was established. Using the root-cutting rate and draft force as evaluation indicators, key parameters such as the shovel blade profile, penetration angle, and wing angle were analyzed, and reasonable parameter ranges were determined based on wheat agronomic requirements. Subsequently, a Box-Behnken design simulation experiment was employed for parameter optimization. The optimal structural combination for the root-cutting shovel was determined to be an Archimedes spiral blade profile, a penetration angle of 6.43°, and a wing angle of 54.99°. The optimized structural parameters effectively increased the root-cutting rate and reduced draft force. Simulation results for the

收稿日期: 2026-03-16 修回日期: 2026-03-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1701000)、财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-03)和北京市农林科学院杰出科学家团队项目(JKTD2025005)

作者简介: 武广伟(1981—),男,研究员,博士,主要从事农机智能装备技术研究,E-mail: wugw@nrcita.org.cn

brachistochrone fertilizer tube showed a maximum fertilization depth qualification rate of 94% with a stable discharging process. Field comparative experiments indicated that at an operating speed of 4 km/h, the integrated device performed well, achieving an average root-cutting depth of 117 mm, a root-cutting rate of 82.9%, and a fertilization depth qualification rate of 90.6%. The results confirmed that the designed device successfully fulfilled the functions of hoeing, root-cutting, and deep fertilizer application.

Key words: winter wheat; hoeing and root-cutting; topdressing device; discrete element method; structural optimization

0 引言

黄淮海小麦种植区作为中国最主要的小麦生产区域,其播种面积和产量分别约占全国小麦总量的 68% 和 75%^[1]。通过农艺措施与装备技术协同提升小麦单产,已成为保障黄淮海地区粮食稳定供给的重要途径^[2]。在冬小麦田间管理过程中,划锄断根深施肥技术能够有效改善根系通气状况、调控分蘖数量和提升成穗率,同时延缓叶片衰老、提升籽粒数及粒质量,是提高冬小麦产量的重要措施^[3]。在返青期小麦断根基础上配合深施尿素肥料,能够进一步促进根系再生并增强养分利用率^[4-5]。该技术的实施,依赖于能够协同完成开沟、断根与深施肥功能的专用装置。在作业过程中,断根铲、开沟器与施肥管作为关键部件,其结构形式及联合作业方式直接影响作业效果。断根铲主要决定断根深度与断根效果,开沟器影响土壤破碎与回流过程,而施肥管则控制肥料的位置与输送稳定性。合理的结构设计是降低作业阻力、稳定作业性能并满足农艺要求的关键问题。

国内外针对返青期小麦断根与追肥联合作业装置的相关研究较少,国外学者在菊芋、甘蔗等不同作物的断根农艺研究中,证实了断根处理可促进单产提升^[6-7],但是针对断根装置的相关研究相对较少。国内学者围绕多类作物断根部件开展了相关结构设计 with 参数优化研究^[8-11]。

现有冬小麦追肥装置^[12-13]多采用双圆盘开沟器结构,其作业方式以开沟为主,对根系的有效切断能力有限,且施肥深度波动大;而已有相关断根装置研究多针对园艺作物或宽行距作物,其根系分布特征、种植模式及作业农艺要求与冬小麦返青期差异显著,相关装置难以直接应用于冬小麦断根与深施肥联合作业。

在冬小麦断根追肥联合作业装置的研究过程中,土壤开沟、根系断裂与部件运动相互影响的机理分析成为研究难点。针对上述问题,离散元法因其能够描述颗粒的接触行为与动力学响应,在土壤-根系-作业部件互作研究中展现出独特优势。CHE

等^[14]针对玉米根土复合体,通过 DEM 对双圆盘挖掘铲进行了参数优化与数值分析,显著提升了其切土、碎土性能并降低了作业阻力。李明生等^[15]设计了一种切振共作深松机,通过 DEM 仿真试验得出深松作业最佳参数,试验验证减阻降耗效果明显。离散元法为研究土壤运动、根系受力与农机部件交互过程提供了有效手段,可在微观尺度上表征土壤-根系-作业部件之间的力学响应。相比传统试验,DEM 能够系统分析结构参数对作业性能的影响,为复杂作业部件的设计优化提供新的思路和方法。

针对小麦返青期作业农艺要求及行间断根和肥料深施作业需求,本研究设计一种划锄断根追肥深施联合作业装置。通过离散元仿真分析不同结构参数条件下断根铲的作业阻力与断根率变化规律,确定关键部件的最优结构参数组合,并结合田间试验对优化后装置在典型工况下的作业性能进行验证,以实现划锄断根与肥料深施的稳定协同作业,以期 为冬小麦返青期断根追肥联合作业装置的设计与优化提供理论依据和技术支撑。

1 整体结构与工作原理

断根深施肥装置结构如图 1 所示。作业时,装置挂载于施肥机机架,由拖拉机牵引并控制起降。断根铲采用可拆卸双翼结构,通过螺栓连接于开沟器,便于调整与更换;施肥管固定安装在开沟器后方。

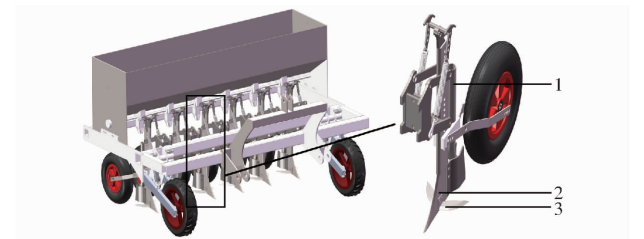


图 1 划锄断根追肥装置结构示意图
Fig.1 Structural diagram of hoeing, root-cutting and topdressing device
1. 最速降线施肥管 2. 开沟器 3. 断根铲

划锄断根装置作业原理如图 2 所示。图中,红色直线为划锄断根装置工作行,单个装置可同步完

成 2 行小麦的断根追肥作业。作业时,开沟器先行切削并松动土壤,可降低后续断根阻力,然后两侧断根铲在目标深度横向切断根系,施肥管两侧翼板通过推离沟壁松土辅助肥料均匀深施,最终由覆土轮完成回填镇压。

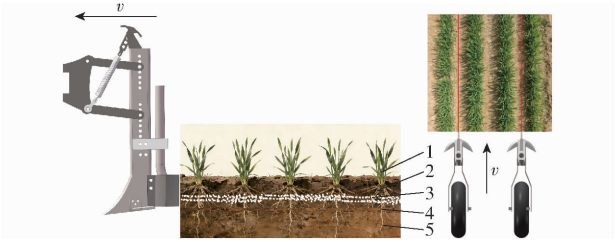


图 2 划锄断根追肥装置作业示意图

Fig.2 Schematic of hoeing, root severing and topdressing device operation

1. 麦苗 2. 未断小麦根系 3. 肥料颗粒 4. 断根截面 5. 已断小麦根系

2 关键部件计与分析

2.1 开沟器结构参数设计与分析

在划锄断根作业过程中,不同前刃曲线形式的开沟器在作业过程中所受阻力存在显著差异,常见的开沟器前刃曲线包括圆弧形曲线、指数函数曲线和抛物线曲线^[16],为满足断根作业的破土与回土要求,本文在开沟器前刃结构设计中选择指数函数曲线。如图 3 所示,建立前刃曲线的直角坐标系,设曲线起点坐标为 $O(x,y)$,曲线终点坐标为 $L(x_n,y_m)$ 。

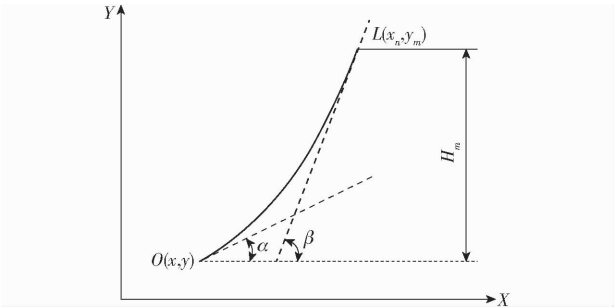


图 3 开沟器前刃曲线示意图

Fig.3 Schematic of front blade curve of trenching tool

划锄断根追肥装置开沟器前刃的指数函数曲线方程为

$$y = a^x - 1 \tag{1}$$

式中 a ——指数函数底数,大于 1

分别过 O 、 L 两点作曲线切线,切线与 x 轴的夹角定义为对应位置的入土角。由式(1)可得

$$\begin{cases} y'_O = y_O \ln a = \tan \alpha \\ y'_L = y_L \ln a = \tan \beta \\ y_m - y = H_m \end{cases} \tag{2}$$

式中 α ——曲线起始角, ($^\circ$)

β ——曲线终止角, ($^\circ$)

H_m ——追肥开沟深度, mm

y_O ——曲线起始点 O 的纵坐标

y_L ——曲线终止点 L 的纵坐标

y'_O ——曲线点 O 的导数

y'_L ——曲线点 L 的导数

根据式(2)可得

$$a = e^{\frac{\tan \beta - \tan \alpha}{H_m}} \tag{3}$$

将式(3)代入到式(1)可得开沟器前刃曲线方程为

$$y = e^{\frac{\tan \beta - \tan \alpha}{H_m} x} - 1 \tag{4}$$

对划锄断根追肥开沟器作业情况进行受力分析,如图 4 所示。

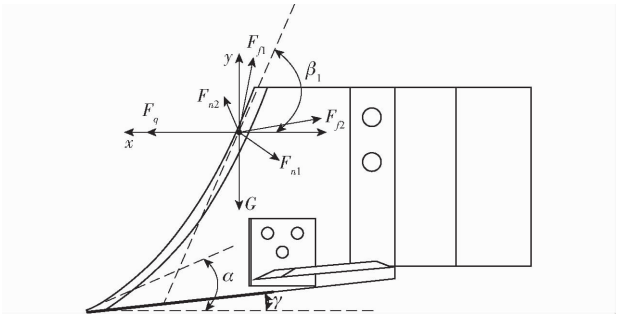


图 4 开沟器作业过程受力分析

Fig.4 Force analysis of furrow opener during operation

在开沟器作业过程中,土壤对开沟器产生的剪切摩擦力主要沿前刃曲线的切线方向分布,其方向与入土角相关;相应的法向压力分别作用于前刃曲线法线方向及入土角方向。开沟器在土壤作用下的受力情况为

$$\begin{cases} F_x = F_{f1} \cos \beta_1 + F_{n1} \sin \gamma - F_{n2} \sin \gamma + F_{f2} \cos \gamma - F_q \\ F_y = F_{f1} \sin \beta_1 - F_{n1} \cos \beta_1 + F_{n2} \cos \gamma + F_{f2} \sin \gamma \end{cases} \tag{5}$$

其中 $\beta_1 = \int_0^{H_1} \arctan f'(x) \tag{6}$

式中 F_x ——开沟器前进方向的合力, N
 F_y ——开沟器垂直入土方向的合力, N
 F_q ——水平方向牵引力, N
 F_{n1} ——开沟器所受法向压力, N
 F_{n2} ——土壤对开沟器底部的方向压力, N
 F_{f1} ——开沟器前刃曲线所受滑动摩擦力, N
 F_{f2} ——开沟器底部所受摩擦力, N
 β_1 ——开沟器前刃曲线任意一点切线与水平方向夹角, ($^\circ$)
 γ ——开沟器入土角, ($^\circ$)
 H_1 ——开沟器前刃曲线上任意一点的高度, mm
 $f'(x)$ ——开沟器前刃曲线导数
动摩擦力主要由开沟器与土壤接触面的法向压

力引起,开沟器前刃在法向上受到土壤自身重力作用。所受法向压力与摩擦力为

$$\begin{cases} F_{n1} = G_1 \cos \alpha = \\ \rho g B \left[H_m L' - \int_0^{H_m} \left(e^{\frac{\tan \beta - \tan \alpha}{H_m}} - 1 \right) dx \right] \cos \alpha \\ F_{f1} = F_{n1} \tan \delta \\ F_{f2} = F_{n2} \tan \delta \end{cases} \quad (7)$$

式中 G_1 ——土壤重力, N
 g ——重力加速度, m/s^2
 ρ ——土壤密度, kg/m^3
 B ——开沟器宽度, mm
 L' ——开沟器高度, mm
 H_m ——开沟器入土深度, mm
 δ ——土壤摩擦角, ($^\circ$)

根据式(7)可得划锄断根开沟器所受土壤对其底部压力 F_{n2} 公式为

$$F_{n2} = \rho g B \left[H_m L' - \int_0^{H_m} \left(e^{\frac{\tan \beta - \tan \alpha}{H_m}} - 1 \right) dx \right] \cdot \cos \alpha \frac{\cos \alpha - \tan \delta \sin \alpha}{\cos \gamma + \tan \delta \sin \gamma} \quad (8)$$

开沟器在 x 方向受力平衡,牵引力 F_q 与工作阻力相等,将式(6)、(7)、(8)代入式(5)并令式(5)的 $F_x = 0$,即可得开沟器入土过程中的工作阻力 F_r 计算式为

$$F_r = \rho g B \left[H_m L' - \int_0^{H_m} \left(e^{\frac{\tan \beta - \tan \alpha}{H_m}} - 1 \right) dx \right] \cdot (\cos^2 \beta_1 \tan \delta + \sin \beta_1 \cos \beta_1) \left(1 - \frac{\sin \gamma - \cos \gamma \tan \delta}{\cos \gamma + \sin \gamma \tan \delta} \right) \quad (9)$$

由式(6)、(9)可得开沟器所受阻力受土壤密度 ρ 、土壤摩擦角 δ 、开沟器宽度 B 、入土深度 H_m 、入土角 γ 、起始角 α 和终止角 β 影响。其中土壤在本研究中不作为分析变量。本研究只针对开沟器宽度 B 、入土深度 H_m 、入土角 γ 、起始角 α 和终止角 β 结构参数展开研究。

冬小麦属于典型密植作物,其种植行距随地域农艺要求不同而存在差异。黄淮海平原主要采用 150 mm 等行距播种模式。窄行距形成的有限作业空间内,开沟器宽度需在满足深施肥沟槽成形要求的同时,严控对作物根系的扰动范围。本研究以此窄行距作为设计基准,旨在确保机具在极端受限工况下的作业精度。综合考虑开沟阻力、土壤扰动以及机具行间通过性等多因素影响,确定开沟器设计宽度 B 为 20 mm。冬小麦断根在 100 ~ 120 mm 增产效果显著^[17],为保证开沟器具备充足的入土空间并满足断根与深施肥作业需求,综合考虑作业深度与

通过性,将开沟器设计总高度 H_m 取为 150 mm。确保在最大断根深度 120 mm 下,开沟器柄部仍留有 30 mm 的非入土余量,以防止田间残茬、土块在作业过程中产生拥堵,提高机具通过性。当开沟器前刃终止角大于土壤摩擦角时具备滑切土壤能力,取土壤摩擦角 δ 为 15° ,开沟器入土角 γ 取 10° ,前刃曲线终止角 β 取 70° ,开沟器前刃起始角取 30° ^[18-19]。最终设计开沟器如图 5 所示。

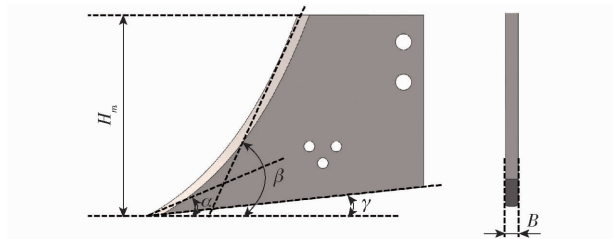


图 5 开沟器三维图

Fig. 5 3D diagram of furrow opener

2.2 断根铲结构设计

断根铲构型决定作业质量与能耗。本文设计一种分段式复合刃口结构:近端采用直线刃,利用其高强度与大入土角确立破土稳定性;远端采用曲线刃,利用滑切原理在低阻条件下精准断根。断根铲受力如图 6 所示,铲体作业阻力主要由接触面摩擦力、法向压力及土壤变形引起的综合阻力构成。

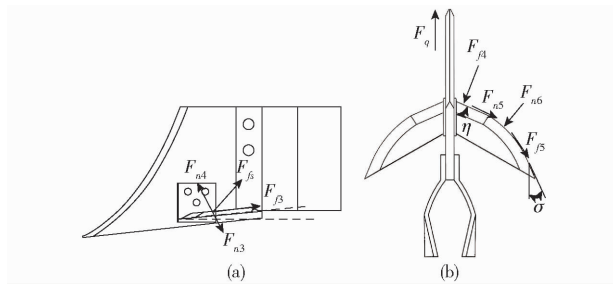


图 6 划锄断根铲受力分析

Fig. 6 Force analysis of hoe blade for root severing

纵截面受力如图 6a 所示:断根铲上表面承受土壤正压力与滑动摩擦力,铲刃克服根系与土壤的切割阻力,下表面边缘则承受法向支撑力。综合上述分量,建立受力平衡方程为

$$\begin{cases} F_q = F_{n3} \sin \varepsilon + F_{n3} \cos \varepsilon + F_{f3} \cos \varepsilon - F_{n4} \sin \varepsilon \\ F_{f3} \sin \varepsilon = F_{n3} \cos \varepsilon - F_{f3} \sin \varepsilon - F_{n4} \cos \varepsilon \end{cases} \quad (10)$$

式中 F_{n3} 、 F_{n4} ——土壤对断根铲和对侧翼铲刃的法向压力, N

F_{f3} 、 F_{f4} ——土壤对断根铲和对侧翼铲刃的滑动摩擦力, N

ε ——断根铲入土角, ($^\circ$)

F_{f3} ——断根铲阻力, N

作业时,铲刃先行破土并于设定深度切断根系。

切削过程中, 铲刃受到由根系和土壤产生的切割阻力, 阻力方向与刃口的法线方向一致, 其大小与断根铲的宽度和厚度成正比^[20]。表达式为

$$F_{fs} = k_b bl \tag{11}$$

式中 k_b ——切割比阻力, N/mm^2
 b ——断根铲厚度, mm
 l ——断根铲宽度, mm

断根铲上表面在法向上受到土壤重力。滑动摩擦力主要由断根铲与土壤接触面上的法向压力引起, 断根铲的法向力 F_{n3} 和滑动摩擦力 F_{f3} 为

$$\begin{cases} F_{n3} = G \cos \varepsilon \\ F_{f3} = F_{n3} \tan \delta \end{cases} \tag{12}$$

将式(11)、(12)代入式(10)可得 F_{n4} 为

$$F_{n4} = G \frac{\cos(2\varepsilon)}{\cos \varepsilon} - k_b bl \tan \varepsilon \tag{13}$$

断根铲在 y 方向上受力平衡, 故其牵引力 F_q 与其所受工作阻力 F_{r1} 相等, 将式(11)、(12)、(13)代入式(10), 可得断根铲纵截面所受阻力 F_{r1} 为

$$F_{r1} = G(\cos^2 \varepsilon + \sin \varepsilon \tan \delta) + G \tan \delta \frac{\sin^2 \varepsilon}{\cos \varepsilon} \tag{14}$$

如图 6b 所示, 横截面受力分析表明: 铲体前部及侧翼曲线处承受土壤法向压力, 并因相对运动产生滑动摩擦力。横截面上的铲刃受力情况表示为

$$\begin{cases} F_{n5} \cos \eta = F_{f5} \sin \eta + F_{n6} \cos \sigma - F_{f6} \sin \sigma \\ F_q = F_{n5} \sin \eta + F_{f5} \cos \eta + F_{n6} \sin \sigma + F_{f6} \cos \sigma \end{cases} \tag{15}$$

其中 $\sigma = \int_0^l \arctan g'(x) dx$ (16)

式中 F_{n5} ——土壤对断根铲前部的法向压力, N
 F_{n6} ——土壤对断根铲侧翼曲线处的法向压力, N
 F_{f5} ——土壤对断根铲前部的滑动摩擦力, N
 F_{f6} ——土壤对断根铲侧翼曲线处的滑动摩擦力, N
 σ ——断根铲铲刃曲线上任意一点处切线与水平方向夹角, $(^\circ)$
 $g'(x)$ ——断根铲铲刃曲线导数
 η ——断根铲翼张角, $(^\circ)$

法向压力 F_{n5} 和摩擦力 F_{f5} 表达式为

$$\begin{cases} F_{n5} = G \cos \eta \\ F_{f5} = F_{n5} \tan \delta \end{cases} \tag{17}$$

将式(17)代入式(15), 可得土壤对断根铲侧翼曲线处的法向压力 F_{n6} 为

$$F_{n6} = \frac{G \cos \eta \cos(\eta + \delta)}{\cos(\sigma + \delta)} \tag{18}$$

可得断根铲横截面所受阻力 F_{r2}

$$\begin{aligned} F_{r2} = & G \cos \eta \sin \eta + G_1 \cos^2 \eta \tan \delta + \\ & G \cos \eta \frac{\cos(\eta + \delta) \sin \sigma}{\cos(\delta + \sigma)} + \\ & G \cos \eta \frac{\cos(\eta + \delta) \tan \delta \cos \sigma}{\cos(\delta + \sigma)} \end{aligned} \tag{19}$$

由式(19)可知, 断根铲所受阻力主要受土壤重力、翼张角、铲刃曲线以及入土角等因素的影响。通过对翼张角、铲刃曲线形状及入土角进行合理设计, 可有效降低断根铲作业阻力, 并提高断根效果^[21]。

设计断根铲如图 7 所示, 开沟器两侧断根铲结构及尺寸参数保持一致。根据小麦种植农艺并参考文献[8], 宽度 l_a 取 25 mm, 宽幅 l 取 70 mm, 直线铲刃段 l_b 取 30 mm, 断根铲厚度 b 取 5 mm, 铲刃角 ψ 取 15° 。

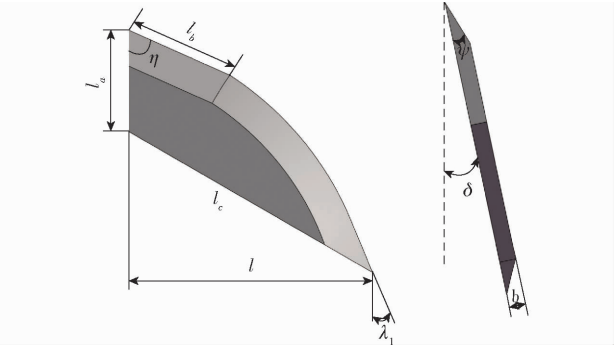


图 7 划锄断根铲结构示意图

Fig. 7 Schematic of hoeing and root-cutting shovel

整体小麦划锄断根装置安装三维图如图 8 所示。为进一步提升作业效率并保护关键部件, 将断根铲作业平面设定高度 H_k 高于开沟器底部 15 mm。这一设计使得开沟器预先破土, 使土壤松动, 断根铲随后在土壤深度为 100 ~ 120 mm 区间作业, 既满足了农艺要求, 又有效降低了断根作业阻力。为确保行间老旧根系的彻底切断, 断根铲作业宽度 L_k 为 160 mm。

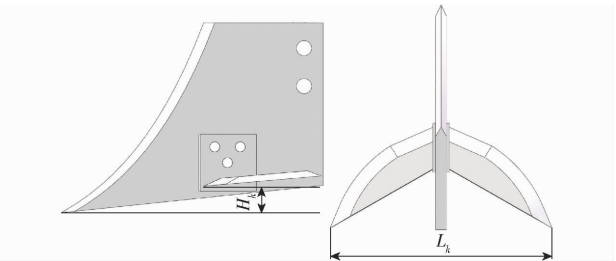


图 8 开沟器和断根铲装结构图

Fig. 8 Furrow opener and root cutter assembly

如图 9 所示, 在绿色实线 150 mm 种植行距下, 装置通过在红色虚线居中作业, 双侧断根铲切断相邻两个行间的侧根。可完全覆盖进行断老根促新根。

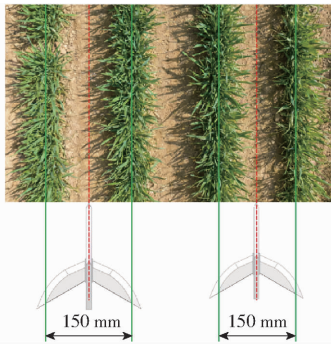


图 9 装置作业与小麦根系空间位置关系示意图

Fig. 9 Schematic of spatial relationship between device operation and wheat root distribution

2.3 最速降线施肥管曲线设计与分析

农艺要求冬小麦返青期追肥深度在 50 ~ 80 mm 范围内^[6]。冬小麦返青期追肥作业过程中土壤含水率较高、黏性较强,施肥管在随开沟器入土作业时易发生肥料颗粒滞留和堆积,施肥管口易产生土壤粘附^[22]。本文基于最速降线原理,设计一种施肥管结构,能够实现肥料颗粒快速、低阻和连续输送。该结构可减小肥料颗粒在输送过程中的滞留与堆积概率,有效解决土壤粘附等问题。最速降线原理如图 10 所示,其解析方程为^[23]

$$\begin{cases} x = r(\theta - \sin\theta) \\ y = r(1 - \cos\theta) \end{cases} \quad (20)$$

式中 r ——肥料半径,mm

θ ——肥料滚动时的转角, (°)

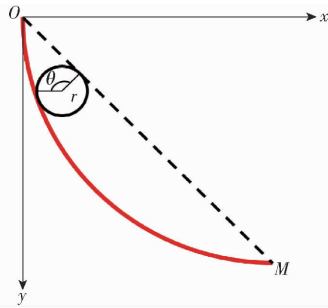


图 10 最速降曲线几何图

Fig. 10 Geometric diagram of the steepest descent curve

在工程实际中应用最速降曲线时,需要考虑摩擦力对最速降线的影响^[24],肥料的动能变化为

$$d\left(\frac{mv^2}{2}\right) = mgdy - \mu_2 mg \cos\varphi ds = mgd(y - \mu_2 x) \quad (21)$$

其中 $\mu_2 = \tan\varphi \quad (22)$

$$v = \sqrt{2g(y - \mu_2 x)} \quad (23)$$

式中 m ——肥料质量,kg

μ_2 ——肥料和肥管的摩擦因数

φ ——肥料和肥管的摩擦角, (°)

s ——肥料运动路径长度,m

v ——肥料运动速度,m/s

此时,肥料从起点 O 运动到终点 M 的时间 T 计算式为

$$T = \int_0^{x_M} Fdx = \int_0^{x_M} \frac{\sqrt{1+y'^2}}{\sqrt{2g(y-\mu_2 x)}} dx \quad (24)$$

式中 x_M ——终点 M 处横坐标,m

y' ——最速降线方程一阶导数

将 Oxy 坐标系沿顺时针方向旋转 φ ,得到 OXY 坐标系如图 11 所示。转换后的运动时间为

$$T = \int_0^{X_M} \frac{\sqrt{1+y'^2}}{\sqrt{\frac{2g}{\cos\varphi}Y}} dX \quad (25)$$

其中 $\varphi = \arctan\mu_2 \quad (26)$

式中 X_M ——转换位置后颗粒横坐标,m

(X,Y) ——转换后肥料颗粒坐标,m

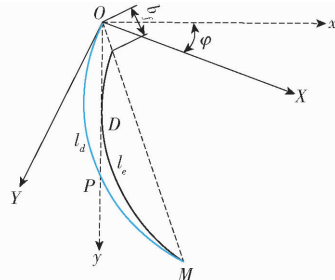


图 11 旋转坐标系后的最速降线

Fig. 11 Locus of the steepest descent after rotating coordinate system

由图 11 旋转后的坐标系可知,曲线 l_d 一部分在 $x < 0$ 区域,肥料沿着摆线 l_d 在 N 处的速度小于其自由落体时的速度,并非最优路径,对最速降线方程进行伸缩平移变换得到

$$\begin{cases} x = R(\theta - \sin\theta) + b_f \\ y = R(1 - \cos\theta) \end{cases} \quad (27)$$

式中 R ——变换后的曲线半径,mm

b_f ——最速降线方程横向平移量,mm

变换后肥料颗粒运动路径从点 O 沿 y 轴自由落体进入点 D ,再沿最速降线 l_e 滑梯至点 M ,此时肥料运动所用时间为

$$T = \sqrt{\frac{2y_D}{g}} + \int_{x_D}^{x_M} \frac{\sqrt{1+y'^2}}{\sqrt{2g(y-\mu_2 x)}} dx \quad (28)$$

式中 (x_D, y_D) ——点 D 坐标,mm

当点 D 处位置发生变化时得到

$$\delta T = \frac{1}{\sqrt{2gy_D}} \left(1 - \frac{y'}{\sqrt{1+y'^2}}\right) \delta y_D \quad (29)$$

当点 D 为极值点时,有 $\delta T = 0$,即 $y' = \infty$ 。因此当曲线 l_e 与 y 轴相切时,此曲线为在摩擦力作用下从点 O 到点 M 间的最速降线。此时点 D 位置应该满足公式

$$\begin{cases} \left. \frac{dX}{dY} \right|_D = \frac{1 - \cos\theta_D}{\sin\theta_D} = \mu_2 \\ X_D = R(\theta_D - \sin\theta_D) + b_f \\ Y_D = 1 - \cos\theta_D + b_f \\ X_D = \mu_2 Y_D \end{cases} \quad (30)$$

式中 (X_D, Y_D) ——旋转坐标系后点 D 坐标, mm
 θ_D ——肥料滚动到点 D 转角, ($^\circ$)

由式(29)可得最速降线方程横向平移量计算公式为

$$\begin{cases} \mu_2 = \tan \frac{\theta_D}{2} \\ \theta_D = 2\arctan\mu_2 = 2\varphi \\ b_f = 2R(\mu_2 - \arctan\mu_2) \end{cases} \quad (31)$$

根据式(30)由施肥管最速降线设计可知最速降线参数 R, b_f 仅取决于 O, M 两点相对位置和摩擦因数。摩擦阻力下的最速降线由一条直线与一条最速降线 OM 共同构成, 施肥管直线段与最速降线段的过渡不会引起肥料颗粒碰撞的加剧, 得到最速降线施肥管如图 12 所示。 O, M 两点间纵向距离 H_f 取 120 mm, 横向距离 L_f 取 60 mm。

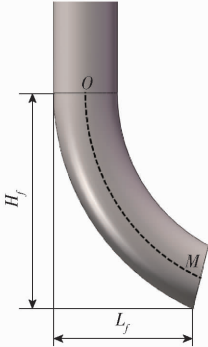


图 12 最速降线施肥管截面图

Fig. 12 Cross-sectional view of brachistochrone fertilizing pipe

施肥管布置于断根铲之后, 其前后间距 l_s 为 80 mm, 施肥管末端设置在断根铲所在水平面上方 H_s 为 60 mm 处。该空间布置方式可有效避免施肥过程中肥料回弹与滞留, 保障深施稳定性。划锄断根追肥装置的整体结构如图 13 所示。

3 离散元仿真试验

3.1 离散元模型构建

在划锄断根追肥作业中, 断根效果、作业阻力和施肥深度合格率主要受断根铲和开沟器等关键部件结构参数的影响。为优化断根铲结构并验证最速降线施肥管的作业效果, 使用离散元软件 EDEM 构建划锄断根追肥作业的仿真模型。仿真作业流程与实际作业一致, 依次完成开沟、断根和施肥。

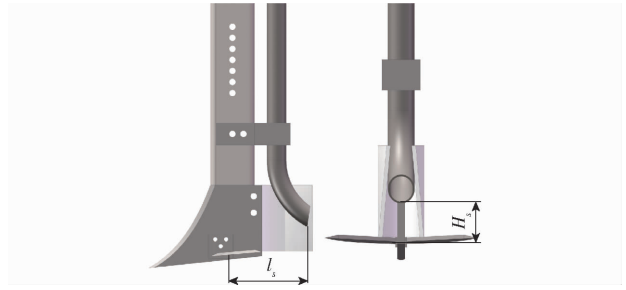


图 13 最速降线施肥管安装位置

Fig. 13 Installation position of brachistochrone fertilizing pipe

3.1.1 离散元模型及参数确定

本研究针对不同作业仿真选用接触模型: 肥料与装置间采用 Hertz - Mindlin no - slip 模型; 土壤及其交互作用选用 Hertz - Mindlin with JKR 模型, 以准确表征其粘附特性^[25]; 针对小麦根系, 采用 Hertz - Mindlin with bonding 模型, 利用颗粒间 Bond 键传递力矩, 实现对根系受力断裂行为的精准模拟^[26]。小麦根系颗粒间接触模型如图 14 所示。

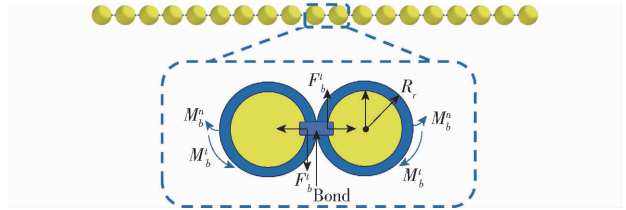


图 14 颗粒接触模型

Fig. 14 Particle contact model

颗粒间的力与力矩计算关系式为

$$\begin{cases} \delta F_b^n = -v_n K_n A_d \delta_t \\ \delta F_b^t = -v_t K_t A_d \delta_t \\ \delta M_b^n = -\omega_n K_n J \delta_t \\ \delta M_b^t = -\omega_t K_t \frac{J}{2} \delta_t \end{cases} \quad (32)$$

其中

$$\begin{cases} A_d = \pi R_r^2 \\ J = \frac{1}{2} \pi R_r^4 \end{cases} \quad (33)$$

式中 δ ——增量算子

δF_b^n ——颗粒间法向力, N

δF_b^t ——颗粒间切向力, N

δM_b^n ——颗粒间法向力矩, N·m

δM_b^t ——颗粒间切向力矩, N·m

ω_n ——法向角速度, rad/s

ω_t ——切向角速度, rad/s

v_n ——法向速度, m/s

v_t ——切向速度, m/s

K_n ——单位面积法向接触刚度, N/m³

K_t ——单位面积切向接触刚度, N/m³

A_d ——颗粒接触面积, m^2
 J ——球形单元惯性矩, m^4
 R_r ——粘结半径, mm
 δ_t ——时间步长, s

当粘结键受到的力超过最大法向和切向应力时, 粘结键发生断裂, 断裂条件为

$$\begin{cases} \sigma_{\max} < \frac{-F_n}{A_d} + \frac{2M'_b R_r}{J} \\ Q_{\max} < \frac{-F_t}{A_d} + \frac{2M_b^n R_r}{J} \end{cases} \quad (34)$$

式中 $\sigma_{\max}$ ——法向应力, Pa
 $Q_{\max}$ ——切向应力, Pa
 F_n ——颗粒所受法向力, N
 F_t ——颗粒所受切向力, N

根据前期试验和田间实地测量得到的小麦根系表征参数如表 1 所示, 小麦根系离散元模型 Bond 模型参数如表 2 所示^[27]。

表 1 京冬 22 号根系建模参数

Tab.1 Root system modeling parameters of JD 22				
种类	直径/mm	数量	入土深度/mm	入土角度/(°)
初生根	0.8	4.0	168.8	0
次生根	1.0	15.0	112.8	45.0

表 2 小麦 Bond 模型参数

Tab.2 Bond model parameters of wheat					
直径/ mm	单位面积 法向刚度	单位面积 切向刚度	临界法向 应力 $\sigma_{\max}$ /	临界切向 应力 $Q_{\max}$ /	粘结 半径 /
	系数 K_n /	系数 K_t /	应力 $\sigma_{\max}$ /	应力 $Q_{\max}$ /	半径 /
	($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	Pa	Pa	mm
0.8	4.73×10^{10}	6.05×10^9	3.52×10^6	2.9×10^7	0.65
1.0	6.15×10^{10}	8.55×10^9	5.04×10^6	2.9×10^7	0.65

划锄断根追肥装置等触土部件的材料以 45 号钢代替。根据前期测量试验结果并结合文献[28 – 30], 设置仿真土壤粒径为 3 mm, 0.3 ~ 1.7 倍随机生成, 土壤 JKR 模型表面能为 1.12 J/m^2 。模型参数如表 3、4 所示。

3.1.2 小麦根系-土壤-肥料仿真模型构建

为简化模型并提升仿真效率, 构建根系模型时忽略侧根, 仅保留了初生根与次生根^[31]。采用 Solidworks 建模、HyperWorks 网格划分和 EDEM 颗粒填充的建模方法: 基于实测参数构建三维模型并划分网格, 初生根与次生根分别选用 0.8、1.0 mm 颗粒以对应所测尺寸。通过将颗粒填充至网格节点坐标并建立 Bond 键粘结连接, 最终形成的小麦根系离散元模型如图 15 所示。

本研究以中国石油天然气股份有限公司生产的昆仑牌尿素为试验肥料, 进行肥料颗粒建模。随机

表 3 模型物理参数

Tab.3 Physical parameters of model			
参数	泊松比	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	剪切模量/ kPa
土壤	0.38	2 750	1.15×10^4
尿素	0.25	1 337	3.4×10^4
钢	0.3	7 865	7.9×10^7
小麦根	0.3	358.6	2.96×10^5

表 4 模型接触参数

Tab.4 Contact parameters of model			
参数	恢复系数	静摩擦因数	动摩擦因数
土壤-土壤	0.40	0.38	0.21
土壤-钢	0.33	0.47	0.26
土壤-麦根	0.46	0.52	0.36
尿素-尿素	0.35	0.32	0.22
尿素-钢	0.43	0.41	0.10
尿素-土壤	0.45	0.40	0.15
钢-麦根	0.36	0.48	0.32
麦根-麦根	0.51	0.53	0.33

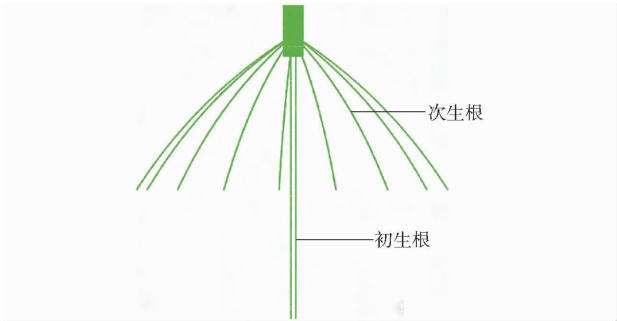


图 15 小麦根系模型

Fig. 15 Wheat root system model

取出 1 000 粒尿素颗粒, 使用数显电子游标卡尺测得肥料颗粒平均尺寸为: 长 3.81 mm, 宽 2.79 mm, 高 4.32 mm。球形率计算式为

$$B_a = \frac{D}{L} \times 100\%$$

(35)

其中

$$D = \sqrt[3]{LWT_1}$$

(36)

式中 L ——肥料颗粒长度, mm

W ——肥料颗粒宽度, mm

T_1 ——肥料颗粒高度, mm

D ——肥料颗粒等效直径, mm

B_a ——肥料颗粒球形率, %

计算的尿素颗粒等效直径为 3.58 mm, 球形度为 93.98%, 肥料颗粒仿真模型采用直径为 3.6 mm 的球形颗粒进行仿真试验。

基于 EDEM 构建了离散元仿真模型如图 16 所示。模型中设定小麦行距为 150 mm, 生成 10 株小麦根系, 生成 3 759 992 个不同粒径的土壤颗粒。仿真模型的构建分为 2 个阶段: 首先在 0 ~ 0.5 s 内生成小麦根系模型, 待其稳定后再生成土壤颗粒; 当土

壤颗粒生成完成并趋于稳定时,模型构建完成。由于土壤颗粒自然下落,根系在土体中呈现出弯曲形态。最后将生成的根系-土壤模型导出为固定模型。为加快仿真效率,肥料颗粒未在前期模型构建阶段生成,而是在作业仿真开始后,直接于施肥管内部的指定位置动态生成。

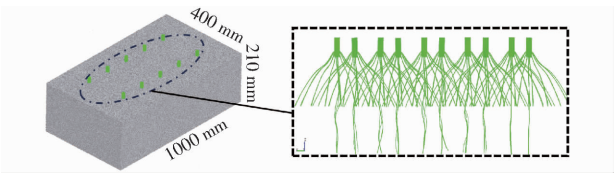


图 16 根土离散元模型
Fig. 16 Root-soil discrete element model

3.2 划锄断根追肥装置参数优化试验

3.2.1 试验因素水平确定

基于分析确定翼张角 η 、断根铲铲刃线型 a_0 和入土角 ε 为关键影响因素。根据曲线降阻原理,选择阿基米德螺旋曲线和圆弧型两种线型与直线型进行对比验证试验,设定入土角范围为 $1.5^{\circ} \sim 15.5^{\circ}$ 以及翼张角范围为 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ^[8],试验因素编码见表5。参考文献[32],作业速度固定为4 km/h,此速度下断根率与作业阻力的变异系数最小,可有效避免速度波动对试验结果的干扰,确保结构参数优化的准确性。

表 5 试验因素编码
Tab.5 Experimental factors codes

编码	因素		
	铲刃线型 a_0	入土角 $\varepsilon/(^{\circ})$	翼张角 $\eta/(^{\circ})$
-1	直线型	1.5	30
0	阿基米德螺旋曲线	8.5	45
1	圆弧型	15.5	60

3.2.2 Box – Behnken 响应面试验设计

以断根铲作业阻力 Y_1 及断根率 Y_2 为评价指标,采用 Box – Behnken 响应面试验方法对断根铲结构参数进行试验设计。仿真过程中,断根深度设置为110 mm,仿真步长为 4.65×10^{-7} s,数据保存时间为0.001 s。不同铲刃线型仿真试验如图17所示。

3.2.3 最速降线施肥管仿真试验

仿真中,颗粒工厂设于最速降线管上方150 mm,生成速率为8 000 粒/s。考虑到实际作业速度波动及高速易导致肥料堵塞,试验在典型速度4 km/h基础上,扩展至5 km/h和6 km/h。该区间覆盖了返青期追肥常用范围,旨在全面验证装置在不同工况下的普适性。仿真结束后,利用 Analyst 模块提取数据,沿路径中心线划分区统计颗粒分布。依据施肥深度农艺要求,基于颗粒三维坐标筛选在深度范

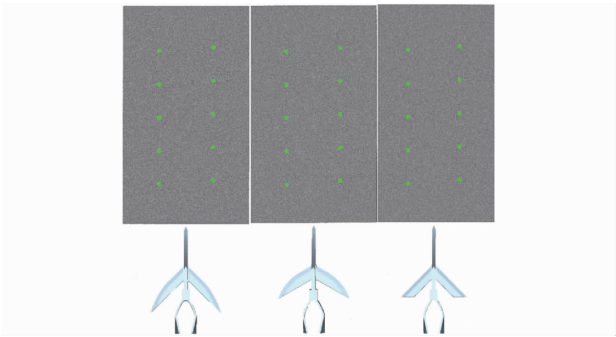


图 17 不同铲刃线型仿真试验
Fig. 17 DEM simulation setup for shovel blades with different edge profiles

围内的颗粒,计算施肥深度合格率。验证过程如图18所示。

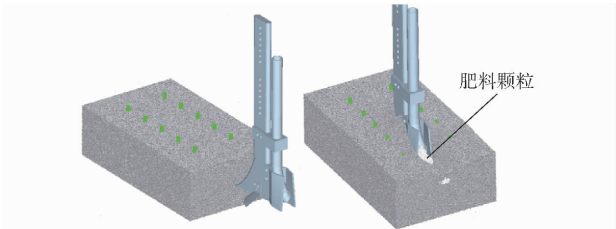


图 18 最速降线施肥管仿真
Fig. 18 Simulation of brachistochrone fertilizing pipe

3.3 仿真试验结果与分析

基于离散元仿真结果与响应面数据,系统分析铲刃线型、入土角及翼张角对作业阻力与断根率的单因素及交互影响。通过构建回归模型求解最优参数组合,可为装置优化与田间验证提供理论支撑。

3.3.1 Box – Behnken 试验结果

图19展示了小麦划锄断根作业的 EDEM 仿真全过程。随着断根铲前进,根系模型在铲刃接触作用下发生变化。通过后处理隐藏土壤颗粒,不仅突出了根系的动态行为,同时验证了离散元模型的有效性。

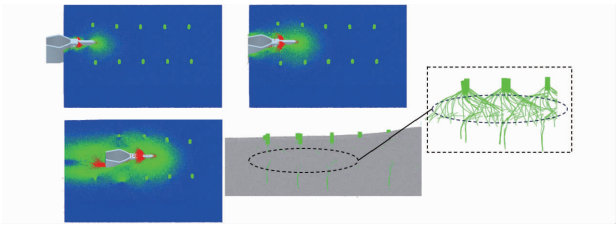


图 19 划锄断根装置仿真过程
Fig. 19 Simulation process of cultivation and root severing device

仿真经历2个阶段:首先,断根铲接触根系,使其产生弯曲变形与位移,此阶段根系内部 Bond 键受力逐渐增加;随后,根系在曲线刃段刃口滑切作用下受到的剪切作用,导致 Bond 键达到破坏极限而断裂,验证了直线段负责稳定切入、曲线段负责低阻滑切的机理有效性。

利用 EDEM 后处理 Analyst 模块导出的断根铲作业阻力如图 20 所示,原始阻力数据呈现明显的随机波动,数值离散度大且伴随局部峰值。这主要源于断根过程中土壤颗粒、根系与触土部件之间的随机接触、碰撞及破坏行为,掩盖了阻力变化的整体规律。使用 Origin 软件对作业阻力数据进行了平滑处理。处理后的曲线整体变化趋势更加清晰,有助于揭示作业阻力的真实变化规律。

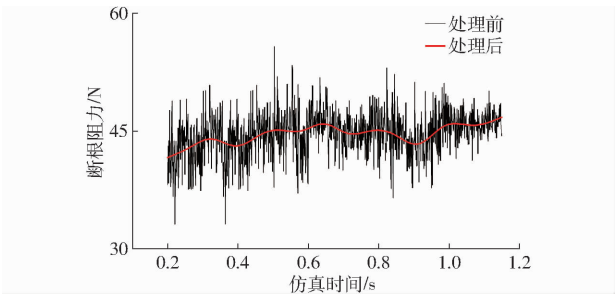


图 20 断根铲仿真阻力-时间曲线

Fig. 20 Simulated resistance – time curve of root-cutting shovel

仿真通过统计小麦根系中 Bond 键的断裂情况计算断根率。小麦根系键断裂情况如图 21 所示。导出试验的 Bond 键数据,以仿真结束时 Bond 键最大值与最小值之差作为断裂键数量,从而计算小麦根系的断根率。

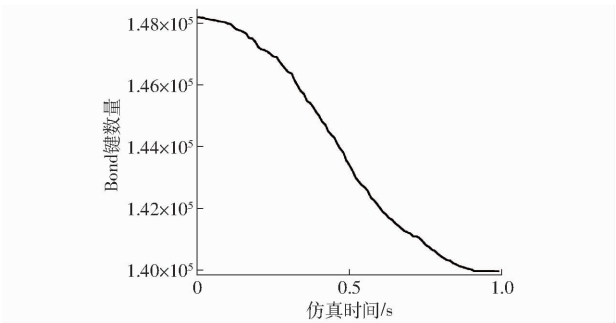


图 21 小麦根系 Bond 键变化情况

Fig. 21 Bond failure evolution of wheat root system during root-cutting process

仿真试验结果见表 6,表中 X_1 、 X_2 、 X_3 分别为 α_0 、 ε 、 η 的编码值。采用 Design-Expert 软件对仿真结果进行分析与回归拟合,分别建立断根铲作业阻力 Y_1 和断根率 Y_2 的回归模型,为断根铲关键结构参数的优化提供依据。

3.3.2 方差分析

(1)断根铲作业阻力分析

对断根铲作业阻力进行方差和显著性分析,结果如表 7 所示,关于断根阻力回归模型 Y_1 模型显著 ($P < 0.05$)。表明所选因素对阻力具有显著影响。模型的 R^2 为 0.924 0,与试验结果有较好的拟合。在各模型项中, X_1 、 X_2 和 X_3 的 P 值均小于 0.05,说明

表 6 试验方案与结果

Tab.6 Experimental design scheme and results

序号	因素			Y_1/N	$Y_2/\%$
	X_1	X_2	X_3		
1	1	0	1	38.13	68.56
2	-1	-1	0	72.31	42.18
3	-1	0	-1	70.32	55.64
4	0	1	-1	72.56	82.63
5	0	0	0	55.48	82.16
6	0	-1	1	38.65	63.43
7	0	0	0	59.32	84.35
8	0	-1	-1	55.46	50.13
9	0	0	0	58.55	84.29
10	0	1	1	63.15	92.39
11	-1	1	0	72.63	65.44
12	1	-1	0	45.78	45.36
13	1	0	-1	59.98	69.72
14	0	0	0	57.43	83.68
15	1	1	0	59.44	93.56
16	-1	0	1	75.26	70.26
17	0	0	0	51.03	83.16

对断根铲阻力影响显著。交互项 X_1X_3 的 P 值小于 0.05,说明对断根铲阻力有显著影响,二次项均不显著 ($P > 0.05$)。通过表 7 数据分析可知,影响断根铲阻力的因素由大到小是铲刃线型、入土角和翼张角,可获得断根铲作业阻力回归方程为

$$Y_1 = 56.36 - 10.9X_1 + 6.95X_2 - 5.39X_3 + 3.33X_1X_2 - 6.70X_1X_3 + 1.85X_2X_3 + 4.82X_1^2 + 1.63X_2^2 - 0.2623X_3^2$$

(37)

(2)断根率分析

由表 7 可知,断根率回归模型 Y_2 模型极其显著 ($P < 0.0001$),模型能有效反映断根率变化。模型的 R^2 为 0.982 6,与试验结果有较好的拟合。其中 X_2 的 P 值小于 0.0001,说明对断根率影响极其显著, X_1 和 X_3 的 P 值均小于 0.05,说明对断根率影响显著;交互项 X_1X_2 和 X_1X_3 的 P 值均小于 0.05,对断根率具有显著影响。二次项 X_1^2 的 P 值小于 0.0001,对断根率影响极其显著。 X_2^2 的 P 值均小于 0.05,对响应变量影响显著,其他项都不显著。通过表 7 数据分析可知,影响断根率的因素由大到小是入土角、铲刃线型和翼张角,可获得断根率模型回归方程为

$$Y_2 = 83.53 + 5.46X_1 + 16.62X_2 + 4.57X_3 + 6.24X_1X_2 - 3.95X_1X_3 - 0.8850X_2X_3 - 14.00X_1^2 - 7.90X_2^2 - 3.49X_3^2$$

(38)

3.3.3 显著性交互作用响应面分析

为进一步分析各因素显著性交互作用对断根铲性能试验评价指标的影响规律,对试验数据进一步

表 7 断根铲阻力与断根率方差分析

来源	断根铲阻力				断根率			
	平方和	自由度	<i>F</i>	<i>P</i>	平方和	自由度	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	1 915. 43	9	9. 45	0. 003 6	4 067. 77	9	43. 91	<0. 000 1
<i>X</i> ₁	950. 26	1	42. 21	0. 000 3	238. 49	1	3. 17	0. 001 9
<i>X</i> ₂	386. 14	1	17. 15	0. 004 3	2 208. 47	1	214. 56	<0. 000 1
<i>X</i> ₃	232. 52	1	10. 33	0. 014 8	166. 71	1	16. 20	0. 005 0
<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₂	44. 49	1	1. 98	0. 202 6	155. 50	1	15. 11	0. 006 0
<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₃	179. 43	1	7. 97	0. 025 7	62. 25	1	6. 05	0. 043 5
<i>X</i> ₂ <i>X</i> ₃	13. 69	1	0. 608 1	0. 461 0	3. 13	1	0. 304 4	0. 598 3
<i>X</i> ₁ ²	97. 93	1	4. 35	0. 075 4	824. 85	1	80. 14	<0. 000 1
<i>X</i> ₂ ²	7. 73	1	0. 343 5	0. 576 2	262. 55	1	25. 51	0. 001 5
<i>X</i> ₃ ²	0. 289 6	1	0. 012 9	0. 912 9	51. 18	1	4. 97	0. 061 0
残差	157. 59	7			72. 05	7		
失拟项	113. 70	3	3. 45	0. 131 1	68. 77	3	27. 90	0. 003 8
误差	43. 89	4			3. 29	4		
总和	2 073. 01	16			4 139. 82	16		

处理,得到试验因素交互作用对评价指标的响应曲面,如图 22 所示。

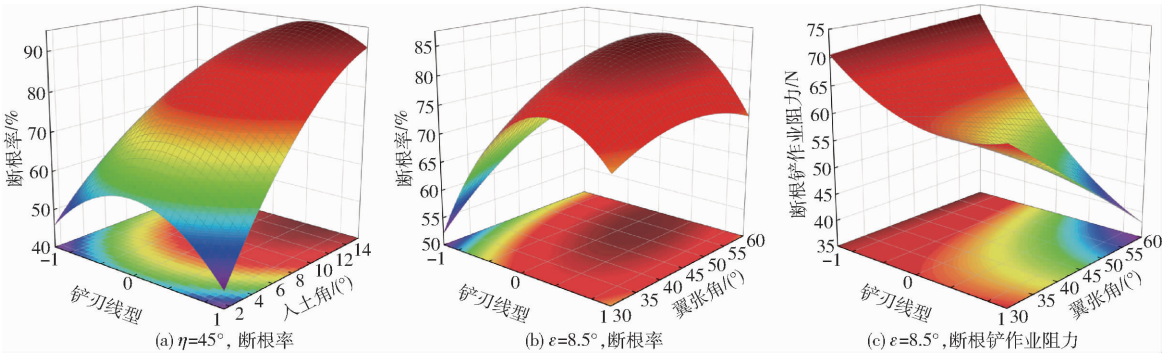


图 22 各因素显著影响交互项对性能指标的响应曲面

Fig. 22 Response surfaces of significant factors and their interaction terms on performance indicators

图 22a 为翼张角一定时,铲刃线型与入土角对断根率 Y_2 的交互影响。入土角对断根率 Y_2 影响显著。当铲刃线型固定时,随着入土角的增大,断根率 Y_2 呈现急剧上升后趋于平缓的趋势;而当入土角固定时,铲刃线型从直线型向圆弧型变化,断根率 Y_2 也呈上升趋势。

图 22b 为入土角一定时,铲刃线型与翼张角交互作用对断根率 Y_2 的影响。响应面呈显著的凸形抛物面特征。随着翼张角的增大,断根率 Y_2 呈现先显著升高、达到峰值后迅速下降的趋势,表明翼张角过小或过大均不利于断根。同时,铲刃线型从直线向圆弧变化能进一步提升断根率 Y_2 。

图 22c 为入土角一定时,铲刃线型与翼张角交互作用对断根铲作业阻力 Y_1 的影响。曲面整体呈现倾斜状。铲刃线型对阻力的影响最为显著,随着线型从直线型向圆弧型过渡,断根铲作业阻力 Y_1 显著且持续降低,验证了滑切减阻原理。而随着翼张角的增大,作业阻力呈单调上升趋势。

为获取装置最佳结构参数,利用 Design-Expert 软件,以断根率最大和阻力最小为目标,对回归模型进行多目标求解

$$\begin{cases} \min Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \max Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (39)$$

得出最佳结构参数为:断根铲刀型为阿基米德螺旋线、入土角为 6.43°、翼张角为 54.99°。在此参数组合下,Design-Expert 软件预测断根作业时阻力为 50.39 N,断根率为 79.58%。

3.3.4 最速降线施肥管仿真结果

仿真过程如图 23 所示,使用 Origin 软件绘制肥料颗粒分布如图 24 所示。为计算施肥深度合格率,以土槽模型地表平面的中心为坐标原点,计算长度 x 方向坐标区间与土槽长度一致,为 -500 ~ 500 mm,宽度 y 方向坐标区间为 -25 ~ 25 mm,深度 z 方向坐

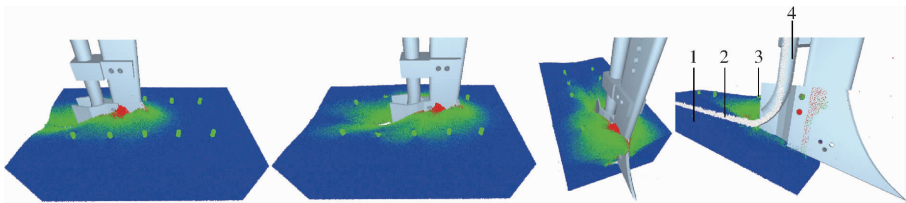


图 23 最速降线施肥管仿真过程

Fig. 23 DEM simulation process of brachistochrone fertilizer tube

1. 土壤 2. 肥料 3. 小麦根系 4. 最速降线施肥管

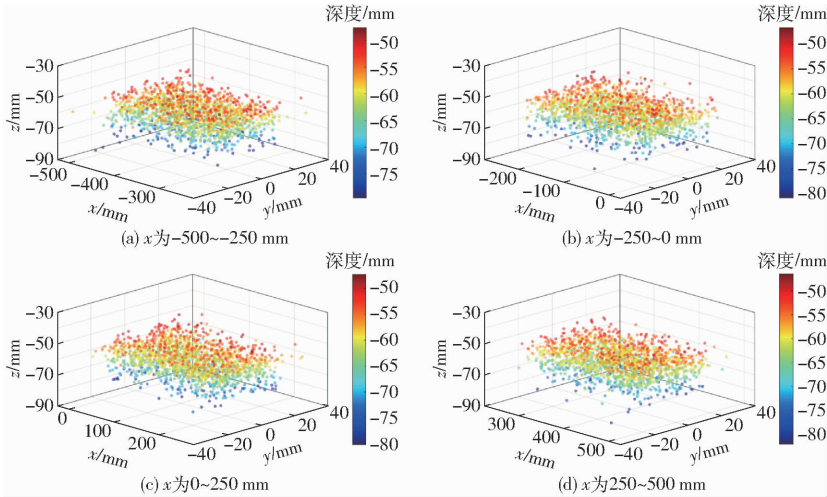


图 24 肥料深度分布图

Fig. 24 Fertilizer depth distributions

标区间为 $-120 \sim 0$ mm, 肥料颗粒深度在 $-80 \sim -50$ mm 范围与冬小麦返青期追肥深度农艺要求一致。

试验结果表明,在作业速度为 4、5、6 km/h 的工况下,施肥深度合格率分别为 94.0%、91.2% 和 87.5%。施肥深度合格率随着作业速度增加呈现逐渐下降趋势。该结果验证了所设计的最速降线施肥管能有效保证施肥深度的一致性,满足小麦施肥的农艺要求。

4 田间试验

离散元仿真与参数优化试验能够获得断根铲入土角、翼张角及铲刃线型等关键结构参数的最优组合。但仿真模型基于对土壤、根系和肥料颗粒的简化,难以完全反映田间作业的复杂工况。需开展田间试验以验证最优参数在真实复杂工况下的可靠性。试验以断根深度、断根率及施肥深度合格率为关键指标,评估装置性能。通过对比分析仿真与试验结果,为装置设计提供依据。

4.1 试验地点与试验方案

试验地点位于北京市小汤山镇精准农业研究示范基地(40.18°N,116.44°E)。试验于 2025 年 3 月冬小麦返青期进行,经测量,试验地点土壤含水率为 12.53%。选取了长势一致的“京冬 22 号”冬小麦

品种进行划锄断根追肥试验,该品种小麦种植模式规范,长势一致,株高及分蘖状况均匀,符合试验要求。

试验设备与材料包括约翰迪尔 904 型拖拉机、优化后的划锄断根追肥联合作业装置、农芯科技自动导航系统、环刀、100 m 钢卷尺、500 mm 直尺以及中国石油天然气股份有限公司生产的昆仑牌尿素肥料等。将该优化后作业装置安装在小麦双圆盘施肥机机架上,并设置双圆盘施肥机为对照组。

为确保精准对行并避免伤及主根,试验田采用了“播种-追肥同步导航”模式。小麦播种环节已预先通过农芯科技北斗自动导航系统确立精准基准线,后期断根施肥作业时,由搭载同精度自动导航系统约翰迪尔 904 型拖拉机牵引作业。该系统能有效将作业偏差控制在厘米级,从而实现精准对行断根施肥。试验参数设定:机具作业速度恒定为 4 km/h,目标施肥量 150 kg/hm^2 ,目标断根深度 110 mm,农艺要求施肥深度 $50 \sim 80$ mm,目标施肥深度 65 mm,试验如图 25 所示。

4.2 评价指标与方法

为验证装置田间适用性,构建了以断根率、平均断根深度及施肥深度合格率为核心的评价体系。该体系立足农艺需求,旨在定量表征装置在实际工况下的断根稳定性与施肥精准度。



图 25 冬小麦划锄断根施肥机田间试验
Fig. 25 Field trial of winter wheat root-cutting and
fertilizer application machine

(1)断根率

在作业区间内等间距选取 10 条作业条带,每条作业带选取 10 个采样点。作业后,在划锄断根追肥装置作业条带每个采样点开挖一个宽 50 cm、深 20 cm 的土壤剖面。采用细刷与喷壶清理土壤,完整取出位于目标断根深度范围内的所有小麦根系;统计断裂根段数量,仅统计断口深度位于小麦断根农艺要求深度范围内的根段,断裂面平整的根段为成功断根;符合上述条件的切断根计入有效断根数。断根率 C_y 计算公式为

$$C_y = \frac{N_c}{N_v} \times 100\% \tag{40}$$

式中 N_c ——有效根段数

N_v ——目标断根深度范围内小麦根系总段数为表征数据统计的不确定性,本研究同时给出断根率的 95% 置信区间 (I_{C95}),并基于二项分布近似进行计算。断根率不确定性通过标准误差 (r_{SE}) 进行表征,标准误差反映断根率估计值的离散程度,其计算公式为

$$r_{SE} = \sqrt{\frac{C_y(1 - C_y)}{N_s}} \tag{41}$$

式中 N_s ——采样样本总数

95% 置信区间计算公式为

$$I_{C95} = C_y \pm 1.96r_{SE} \tag{42}$$

(2)施肥深度合格率

研究以施肥深度合格率作为划锄断根追肥联合作业装置的施肥效果评价指标。在作业区间内交错选取 10 个施肥带,并在每个施肥带中每隔 5 m 选取一个采样点,依次选取 10 个采样点。在每一采样点施肥位置上方沿垂直方向切开土层,以地表作为测量基准面,使用钢尺测量肥料层最低点至地表的垂直距离,作为该采样点的施肥深度。将各采样点测得的施肥深度与目标深度范围进行对比,落入目标范围内的采样点判定为合格点。

合格点数量占对应采样点总数的比例,定义为施肥深度合格率,深度合格率越高,说明施肥管的施肥深度越精准。对施肥深度合格率进行计算,其计

算式为

$$C_s = \frac{1}{10}K_s \times 100\% \tag{43}$$

式中 C_s ——深度合格率, %

K_s ——合格点位数

平均深度计算式为

$$H_s = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} H_{si} \tag{44}$$

式中 H_s ——平均深度, mm

H_{si} ——第 i 个检测点深度, mm

4.3 田间试验结果与分析

4.3.1 断根合格率分析

如图 26 和图 27 所示,对田间试验数据进行采集与统计分析。结果表明,在作业速度 4 km/h 下,小麦平均断根深度为 117 mm,满足农艺要求;断根率达 82.9% (95% 置信区间为 [75.5% ,90.3%])。

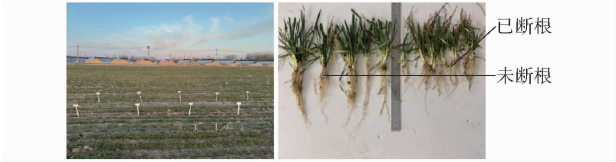


图 26 断根数据采集

Fig. 26 Field test data collection



图 27 断根深度测量

Fig. 27 Measurement of root-cutting depth

仿真与田间试验结果的差异主要源于以下因素:田间土壤物理特性、根系生长状态的差异;机具作业中地表不平与速度波动引发的振动;根土间复杂的摩擦与粘结作用在仿真中的简化。这些因素共同导致实际作业环境较仿真条件更为复杂,也说明本装置在真实农田中具备较好的工况适应性。

4.3.2 施肥深度合格率分析

如图 28 所示,对最速降线施肥管田间试验验证结果进行统计分析。计算结果表明,在作业速度为 4 km/h 的工况下,最速降线施肥管的施肥深度合格率为 90.6%。

田间与仿真结果的差异主要因为:土壤参数非均匀性影响肥料下落位置;机具作业时受地表起伏与速度变化干扰,引起施肥管偏移;土壤中肥料颗粒与土壤的相互作用较难在田间试验中完全复现;实际作业中开沟宽度、施肥角度等参数存在自然波动。



图 28 施肥深度测量
Fig. 28 Measurement of fertilizer depth

4.3.3 产量对比分析

为进一步验证划锄断根追肥联合作业装置对小麦产量的影响,本研究在收获期对断根深施追肥处理组与双圆盘机追肥装置对照组进行了测产对比。通过五点采样法,分别获取试验组和对照组每采样点 1 m² 的小麦,将获取的小麦进行脱粒处理,使用电子精密天平(量程 30 kg,精度 1 g)测量籽粒质量,试验过程如图 29 所示。试验结果表明,处理组小麦的平均产量较对照组提高了 5.2% ($P < 0.05$)。



图 29 小麦产量对比试验
Fig. 29 Wheat yield comparison trial

测产试验结果表明装置在返青期通过 82.9% 的精准断根,配合深施肥技术,促进了返青期冬小麦

生长。测产数据证明了返青期适度断根和深施肥对小麦后续生长的积极促进作用。

5 结论

(1) 针对冬小麦返青期行间断根与追肥深施联合作业需求,设计了一种划锄断根追肥联合作业装置,系统分析了装置的作业机理与受力特性。通过计算分析,完成了开沟器、断根铲和施肥管等关键部件的结构设计,分析了断根铲铲刃线型、入土角和翼张角等关键参数对作业性能的影响。

(2) 基于离散元法构建了装置-土壤-根系-肥料耦合仿真模型,以断根率和作业阻力为评价指标,对断根铲铲刃线型、入土角和翼张角参数进行了优化试验,确定最优结构参数组合为:阿基米德螺旋线铲刃、入土角 6.43°、翼张角 54.99°,在保证断根效果的同时有效降低了作业阻力。在此基础上,基于最速降线原理设计了施肥管结构,不同作业速度工况下的仿真结果表明:排肥过程连续稳定,施肥深度分布集中,仿真作业速度为 4 km/h 时施肥深度合格率达到 94.0%。

(3) 田间对比试验结果表明,在作业速度为 4 km/h 条件下,作业过程稳定。装置在田间作业中平均断根深度为 117 mm,断根率为 82.9%,施肥深度合格率为 90.6%,收获期测产结果显示,本装置处理组的小麦产量较对照组提升了 5.2%。试验验证了返青期断根配合深施肥技术对冬小麦产量的提升作用,所设计装置满足小麦返青期断根追肥的农艺要求。

参 考 文 献

[1] 李森,韩丽娟,张蕾,等. 黄淮海地区干热风灾害致灾因子时空特征分析[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(1): 183 – 192.
LI Sen, HAN Lijuan, ZHANG Lei, et al. Spatial-temporal characteristics of dry-hot wind factors in Huang-Huai-Hai region[J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29(1): 183 – 192. (in Chinese)

[2] MAMABOLO E, MASHALA M J, MUGARI E, et al. Application of precision agriculture technologies for crop protection and soil health[J]. Smart Agricultural Technology, 2025, 12: 101270.

[3] LIU K, LI T, CHEN Y, et al. Effects of root morphology and physiology on the formation and regulation of large panicles in rice [J]. Field Crops Research, 2020, 258: 107946.

[4] HU C, SADRAS V O, LU G, et al. Root pruning enhances wheat yield, harvest index and water-use efficiency in semiarid area [J]. Field Crops Research, 2019, 230: 62 – 71.

[5] MA S C, LI F M, XU B C, et al. Effect of lowering the root/shoot ratio by pruning roots on water use efficiency and grain yield of winter wheat[J]. Field Crops Research, 2010, 115(2): 158 – 164.

[6] LIU T Q, FAN D J, ZHANG X X, et al. Deep placement of nitrogen fertilizers reduces ammonia volatilization and increases nitrogen utilization efficiency in no-tillage paddy fields in central China[J]. Field Crops Research, 2015, 184: 80 – 90.

[7] KAWAI T, CHEN Y, TAKAHASHI H, et al. Rice genotypes express compensatory root growth with altered root distributions in response to root cutting[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 830577.

[8] 吕钊钦,李汝莘,尹克容,等. 冬小麦断根铲最佳结构参数试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 83 – 87.
LÜ Zhaoqin, LI Ruxin, YIN Kerong, et al. Experiment on the best structure parameters of root-cutting shovel for winter wheat [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25: 83 – 87. (in Chinese)

[9] ZHANG J, WANG J, DU D, et al. Optimization and validation of root-cutting device for Chinese cabbage harvester based on discrete element method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 214: 108314.

[10] ZOU L, YAN D, NIU Z, et al. Parametric analysis and numerical optimisation of spinach root vibration shovel cutting using discrete element method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 212: 108138.

[11] 崔瑾, 杨欣, 刘俊峰, 等. 苹果实生苗断根铲有限元分析与轻简化设计[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(5): 161 – 164, 178.

CUI Jin, YANG Xin, LIU Junfeng, et al. Finite element analysis and lightweight simplified design of apple seedling root cutting shovel[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(5): 161 – 164, 178. (in Chinese)

[12] 陈满, 施印炎, 汪小岳, 等. 基于光谱探测的小麦精准追肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 26 – 32.

CHEN Man, SHI Yinyan, WANG Xiaochan, et al. Design and experiment of variable rate fertilizer applicator based on crop canopy spectral reflectance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 26 – 32. (in Chinese)

[13] 冯慧敏, 高娜娜, 孟志军, 等. 基于自动导航的小麦精准对行深施追肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 60 – 67.

FENG Huimin, GAO Na'na, MENG Zhijun, et al. Design and experiment of deep fertilizer applicator based on autonomous navigation for precise row-following[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49: 60 – 67. (in Chinese)

[14] CHE H, ZHOU H, ZHANG Y, et al. Parameter optimization and numerical analysis of the double disc digging shovel for corn root-soil complex[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 235: 110386.

[15] 李明生, 王元俊, 谢守勇, 等. 基于离散元法的切振共作深松机作业性能仿真分析及试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(20): 81 – 90.

LI Mingsheng, WANG Yuanjun, XIE Shouyong, et al. Simulation analysis and test of the operation performance of shear vibration co-operation subsoiler based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(20): 81 – 90. (in Chinese)

[16] 赵勤儒, 余佳佳, 陈雄飞, 等. 水稻机械直播深施肥开沟装置设计与试验[J]. 江西农业大学学报, 2024, 46(6): 1599 – 1609.

ZHAO Qinru, YU Jiajia, CHEN Xiongfei, et al. Design and experiment of deep fertilization ditching device for rice mechanical direct seeding[J]. Acta Agriculture Universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(6): 1599 – 1609. (in Chinese)

[17] 吕钊钦, 李汝莘, 董庆裕, 等. 冬小麦增产技术中机械断根方式的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 37(4): 103 – 106.

LÜ Zhaoqin, LI Ruxin, DONG Qingyu, et al. Mechanical root-cutting models for increasing the yield of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 37(4): 103 – 106. (in Chinese)

[18] ZHONG G, LI H, HE J, et al. Design and test of single-disc opener for no-till planter based on support cutting[J]. Agriculture, 2023, 13(8): 1635.

[19] 赵淑红, 刘宏俊, 张先民, 等. 滑推式开沟器设计与作业性能优化试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 26 – 34.

ZHAO Shuhong, LIU Hongjun, ZHANG Xianmin, et al. Design and optimization experiment of working performance of sliding push opener[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(19): 26 – 34. (in Chinese)

[20] 何辰浠. 小麦 T 型槽种肥分施开沟装置设计与试验[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.

HE Chenxi. Design and experiment of wheat T-groove seed and fertilizer separating trenching device[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024. (in Chinese)

[21] 张喜瑞, 杨幼铭, 刘宏新, 等. 双定刀滑切防缠式香蕉秸秆粉碎还田机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 36 – 49.

ZHANG Xirui, YANG Youming, LIU Hongxin, et al. Optimal design and experiment of double fixed knife slip-cutting and anti-tangle banana straw crushing and returning machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 36 – 49. (in Chinese)

[22] 刘晓东, 丁幼春, 舒彩霞, 等. 螺旋锥体离心式排肥器扰动防堵机理分析与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 44 – 54.

LIU Xiaodong, DING Youchun, SHU Caixia, et al. Mechanism analysis and test of disturbance and blockage prevention of spiral cone centrifugal fertilizer apparatus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 44 – 54. (in Chinese)

[23] 史乃煜, 陈海涛, 魏志鹏, 等. 基于最速降线原理的免耕播种机强制回土装置研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 37 – 44.

SHI Naiyu, CHEN Haitao, WEI Zhipeng, et al. Design and test of forced-return device based on principle of brachistochrone [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 37 – 44. (in Chinese)

[24] BARSUK A A, PALADI F. On parametric representation of brachistochrone problem with coulomb friction[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2023, 148: 104265.

[25] SHAIKH S A, LI Y, MA Z, et al. Discrete element method (DEM) simulation of single grouser shoe-soil interaction at varied moisture contents[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 191: 106538.

[26] 赵瑾汶, 于建群, 孙凯, 等. 基于 AgriDEM 软件的小麦根系建模与试验验证[J]. 农业工程学报, 2025, 41(3): 63 –

72.

ZHAO Jinwen, YU Jianqun, SUN Kai, et al. Modeling and verifying wheat roots using AgriDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(3): 63–72. (in Chinese)

[27] HAN Y, LING L, YAN B, et al. Calibration of DEM model for root–soil breakage in winter wheat during the regreening stage[J]. Agriculture, 2025, 15(23): 2427.

[28] 刘彩玲, 魏丹, 宋建农, 等. 颗粒肥料离散元仿真边界参数系统化研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 82–89.

LIU Cailing, WEI Dan, SONG Jiannong, et al. Systematic study on boundary parameters of discrete element simulation of granular fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 82–89. (in Chinese)

[29] 郇晓龙, 冯猛超, 武传宇, 等. 基于 EDEM 的茶园土壤-有机肥混料离散元模型构建与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(12): 267–278.

HUAN Xiaolong, FENG Mengchao, WU Chuanyu, et al. Construction and experiment of discrete element model for tea garden soil-organic fertilizer mixture based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 267–278. (in Chinese)

[30] 周华, 车海龙, 耿端阳, 等. 玉米田耕层典型土壤离散元模型建立与参数标定[J]. 农业机械学报, 2023, 54(11): 49–60, 113.

ZHOU Hua, CHE Hailong, GENG Duanyang, et al. Discrete element modeling and parameter calibration of typical soil in maize field tillage layer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 49–60, 113. (in Chinese)

[31] ZHAO J, YU J, SUN K, et al. A discrete element method model and experimental verification for wheat root systems[J]. Biosystems Engineering, 2024, 244: 146–165.

[32] 吕钊钦, 李汝莘, 董庆裕, 等. 小型小麦断根机的设计[J]. 农业机械学报, 2006, 37(6): 162–164, 161.

LÜ Zhaoqin, LI Ruxin, DONG Qingyu, et al. Design of a small-scale wheat root-cutting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(6): 162–164, 161. (in Chinese)

(上接第 133 页)

[26] SUN X, ZONG W, WEI X. DEM–MBD coupling-based analysis and experiment on loss reduction mechanisms of rapeseed pickup header in hilly and mountainous areas[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 238: 110817.

[27] 张绪, 李骅, 齐新丹, 等. 基于 EDEM 的大蒜挖掘铲减阻特性仿真分析[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(12): 18–24.

ZHANG Xu, LI Hua, QI Xindan, et al. Simulation analysis of drag reduction characteristics of garlic digging shovel based on EDEM[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(12): 18–24. (in Chinese)

[28] 申世龙, 张佳喜, 王毅超, 等. 旋抛式耕层残膜回收机起挖装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(9): 461–472.

SHEN Shilong, ZHANG Jiaxi, WANG Yichao, et al. Design and experimental of lifting device of rotary throw type topsoil residual film recovery machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 461–472. (in Chinese)

[29] 丁力, 袁业超, 李源源, 等. 大豆行间驱拨组合式除草机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(9): 344–354.

DING Li, YUAN Yechao, LI Yuanyuan, et al. Design and testing of combined soybean inter-row roundup weeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 344–354. (in Chinese)

[30] 陈建能, 陈倩雯, 刘林敏, 等. 旋转式两工位名优茶采摘收集一体末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 136–144.

CHEN Jianneng, CHEN Qianwen, LIU Linmin, et al. Design and experiment of rotating two workstations integrated effector for famous tea picking and collection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 136–144. (in Chinese)