

黏重土壤芯铧式播种开沟器优化设计与试验

郝建军^{1,2} 屈鹏程¹ 刘天龙¹ 赵佳乐³ 殷常峰⁴ 赵建国^{1,5} 王新芳⁶

(1. 河北农业大学机电工程学院, 保定 071001; 2. 河北省农业机械作业刀具重点实验室, 定州 073000;
3. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 4. 山东旭拓新材料科技有限公司, 潍坊 261000;
5. 河北省耕作机械技术创新中心, 宁晋 055551; 6. 河北圣和农业机械有限公司, 宁晋 055551)

摘要: 针对播种开沟器在黏重土壤环境下作业时粘土严重、开沟阻力大等问题, 本文设计了一种适宜黏重土壤的芯铧式播种开沟器。通过理论分析与经验设计, 确定了芯铧式播种开沟器的结构参数为: 入土角 45°、入土隙角 5°、斜切角 30°、起始滑切角 23°、终止滑切角 45°、芯铧幅宽 45 mm。为进一步改善黏重土壤环境下芯铧式播种开沟器减粘脱附性能, 基于仿生学的非光滑表面减粘降阻原理, 采用增加凸筋方式对芯铧式播种开沟器犁体表面局部进行织构化改形设计, 以凸筋几何参数为试验因素, 利用 EDEM 软件模拟开沟器在土槽中的运动情况, 采用响应面试验分析凸筋几何参数对土壤粘附量和开沟阻力的影响规律, 优化凸筋几何参数最佳组合为: 凸筋宽度 7.623 mm、凸筋高度 1.344 mm、相邻凸筋间距 11.782 mm, 此时开沟器土壤粘附量为 159.88 g, 开沟阻力为 60.065 N。土槽试验结果表明: 在相同工作条件下, 织构化改形开沟器较普通开沟器土壤减粘率为 16.33%, 开沟阻力降低了 2.91% ~ 4.45%, 达到了预期的减粘降阻效果。

关键词: 播种机; 芯铧式开沟器; 黏重土壤; EDEM; 减粘降阻; 优化设计

中图分类号: S223 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)01-0180-11

OSID:



Optimized Design and Testing of Core-share Seed Drill Furrow Opener Suitable for Heavy Clay

HAO Jianjun^{1,2} QU Pengcheng¹ LIU Tianlong¹ ZHAO Jiale³ YIN Changfeng⁴
ZHAO Jianguo^{1,5} WANG Xinfang⁶

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China
2. Hebei Provincial Key Laboratory of Agricultural Machinery Operational Cutting Tools, Dingzhou 073000, China
3. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China
4. Shandong Xutuo New Material Technology Co., Ltd., Weifang 261000, China
5. Hebei Provincial Tillage Machinery Technology Innovation Center, Ningjin 055551, China
6. Hebei Shenghe Agricultural Machinery Co., Ltd., Ningjin 055551, China)

Abstract: Aiming at the problems of serious clay and high resistance to furrow opening when the seeding coulter operates under the environment of clay soil, a core-share seeding coulter suitable for clay soil was optimally designed. Through theoretical analysis and empirical design, it was determined that the furrow coulter had an entry angle of 45°, a gap angle of 5°, a bevel angle of 30°, a start slip angle of 23°, a termination slip angle of 45°, and a with of 45 mm. In order to improve the performance of the furrow opener in viscosity reduction and desludging, basing on the principle of viscosity and drag reduction of non-smooth surfaces of biomimicry, it was determined that the surface of the plough body of the furrow opener was locally textured reshaped by increasing the convex ribs, and the movement of the furrow coulter in the soil groove was simulated by EDEM software. Using EDEM software to simulate the movement of the furrower in the soil groove, taking the surface characteristic geometric parameters as the test factors, the soil adhesion amount and furrowing resistance as the evaluation indexes, and adopting the response surface test to analyze the influence law of each geometric parameter on the evaluation indexes, it was determined that the optimal combination of the surface characteristic geometric parameters of the furrower body was as

follows: width of the convex rib was 7.623 mm, thickness of the convex rib was 1.344 mm, and the spacing between the adjacent convex ribs was 11.782 mm, at this time, the soil adhesion amount of the furrower was 159.88 g, the furrowing resistance was 60.065 N. The soil trench test showed that under the same working conditions, the soil viscosity reduction rate of the textured reshaping furrow opener was 16.33%, compared with the conventional furrow coulter, the working resistance was reduced by 2.91% ~ 4.45%, achieving the expected viscosity reduction and resistance effect.

Key words: seeder; core-share furrow opener; heavy clay; EDEM; anti-adhesion and friction-reducing; optimized design

0 引言

开沟器作为播种机的重要部件,其工作性能对播种机的作业质量具有至关重要的影响^[1-4]。在黏重土壤条件下作业时,开沟器粘附土壤严重,土壤粘附不仅会使开沟阻力增大、作业能耗增加,而且还会造成土壤扰动大、种床不规范、播深一致性差等不良影响,显著降低播种质量,最终影响作物出苗率^[5]。开展播种开沟器减粘脱附相关研究,对于降低作业能耗、提升播种质量具有重要意义。

针对降低开沟阻力、提高播深一致性、减少土壤扰动等问题,研究人员开发了多种适用于不同作物和土壤环境的新型开沟器。BARR 等^[6]为解决高速作业时免耕播种机窄直开沟器土壤扰动大的问题,研制了一种 Bentleg 弯腿开沟器;赵淑红等^[7]为提高播深均匀性,设计了一种集开沟、回土、镇压于一体的多功能集成式播种开沟装置;HASIMU 等^[8]对比分析了锄式、翼铲式、勺式开沟器对土壤的扰动情况及其耕作阻力,结果表明,锄式开沟器土壤扰动最小,综合作业性能最佳;王超等^[9]针对双圆盘开沟器堵塞严重、入土困难等问题,研制了一种具有良好切茬、入土和防堵能力的非对称式大小圆盘开沟装置;苟文等^[10]针对开沟器缠草、堵塞及使用寿命短等问题,研制了一种可更换前刀的圆弧刃口型开沟装置;AWAD-ALLAH 等^[11]针对 V 形开沟器开展研究,结果表明,耕作阻力与 V 形开沟器的刃口角度、耕作速度和深度成正比;王庆杰等^[12]研制的可更换前刀的楔刀型免耕开沟器,相较于尖角式开沟器开沟阻力降低 13.2%,整机单位面积油耗降低 15%。上述研究针对播种开沟器易堵塞、阻力大、播深不一致、土壤扰动大等问题,通过优化开沟器结构参数以适应不同土壤环境农艺及作业要求。

芯铧式开沟器结构简单、开沟宽度大、入土性能好、工作稳定可靠,对播前整地要求不高,能够形成较为平整的种沟沟底,常用于丘陵山地的中小型播种机上。黏重土壤土质粘重,土壤孔隙率低、结构紧密,主要分布在低山、丘陵和岗地。近年来,基于仿生学非光滑表面减粘降阻原理开发的农机装备减粘

降阻触土部件备受关注,如分别基于蜈蚣爪趾、臭蜥螂腹部、蚯蚓体节、野猪拱嘴、鼯鼠脚趾、鲨鱼皮等的挖掘铲^[13-17]、镇压辊^[18-20]、旋耕刀^[21]、深松铲^[22-23]等相关研究成果,为解决黏重土壤环境下播种开沟器土壤粘附严重问题提供了有益参考。

针对黏重土壤环境下开沟器土壤粘附严重、开沟阻力大等问题,本文对丘陵山地普遍采用的中小型播种机传统芯铧式开沟器进行优化设计,并通过试验验证其对减粘脱附的有效性,以期研制适宜黏重土壤的播种开沟器提供可行的研究方法,为设计轻量型丘陵山地播种机提供技术支撑。

1 结构参数优化设计

芯铧式播种开沟器主要由挡土板、开沟犁体和犁尖组成,如图 1a 所示。其主要结构参数包括脊线、铧高 H 、入土角 α 、入土隙角 ε 、斜切角 β 和芯铧幅宽 B ,如图 1b 所示。

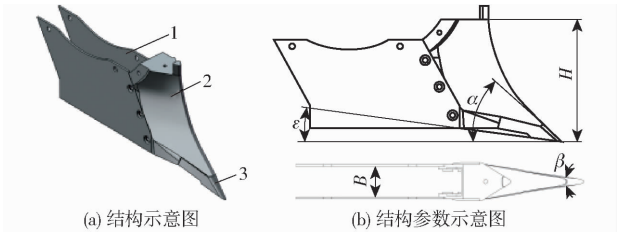


图 1 芯铧式播种开沟器
Fig.1 Core-share seed drill furrow opener
1. 挡土板 2. 犁体 3. 犁尖

1.1 脊线曲线分析

对称布置的开沟犁体两斜侧面交汇形成脊线,常见脊线有圆弧型、直线型、抛物线型和指数型等,脊线对开沟器的破土效果和开沟阻力具有重要影响^[24-25]。黏重土壤环境下,播种开沟阻力通常较大,为此本设计选用开沟阻力较小的圆弧型脊线。

芯铧式开沟器脊线如图 2 所示,以圆弧型脊线的最低端点 O 为原点,建立脊线 AB 的方程,即

$$y = R + \sqrt{R^2 - x^2} \tag{1}$$

式中 R ——脊线所在圆弧的半径,mm

由图 2 中几何关系可知

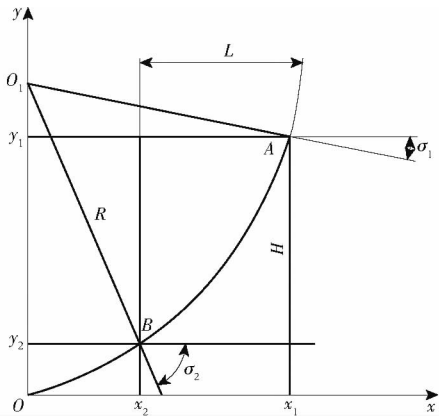


图 2 芯铧式开沟器脊线示意图

Fig. 2 Schematic of ridgeline for core-share seed drill furrow opener

$$\begin{cases} H = y_1 - y_2 \\ L = R \cos \sigma_1 - R \cos \sigma_2 \\ l_{OO_1} = R \sin \sigma_1 + y_1 = R \sin \sigma_2 + y_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中 L ——脊线 AB 曲线开度, mm

σ_1 ——点 A 处滑切角, ($^\circ$)

σ_2 ——点 B 处滑切角, ($^\circ$)

l_{OO_1} ——线段 OO_1 长度, mm

y_1 ——挡土板高度, mm

y_2 ——开沟器犁体高度, mm

联合式(1)、(2)可得, 脊线 AB 的圆弧半径 R 为

$$R = \frac{H}{\sin \sigma_2 - \sin \sigma_1} \quad (3)$$

则圆弧脊线 AB 曲线方程为

$$y = \frac{H}{\sin \sigma_2 - \sin \sigma_1} + \sqrt{\frac{H^2}{(\sin \sigma_2 - \sin \sigma_1)^2} - x^2} \quad (4)$$

由式(4)可知, 铧高 H 、点 A 处滑切角 σ_1 、点 B 处滑切角 σ_2 对开沟器脊线形状均有影响作用。为使芯铧式开沟器能更好地切削土壤并保证土壤能够及时回填, 确定铧高 H 为 100 mm^[26]。

1.2 滑切角设计

滑切角 σ 是指开沟器与土壤发生滑切时刀刃运动方向与刀刃法线之间的夹角。滑切角过小时, 滑切效果不明显; 滑切角过大时, 开沟阻力大。由图 2 可知, 起始滑切角 σ_1 小于终止滑切角 σ_2 。研究表明, 当 $\sigma_1 > 23^\circ$ 、 σ_2 为 $35^\circ \sim 55^\circ$ 时, 开沟器与土壤产生滑切的阻力较小^[27-28], 结合预试验, 确定起始滑切角和终止滑切角分别为 23° 和 45° 。

1.3 入土角设计

入土角 α 是指开沟器工作面与地面间的夹角, 其大小影响开沟器的入土能力及犁体前端曲面强度。入土角过小, 前端犁体曲面应力较集中, 容易发生犁体断裂, 影响开沟器使用寿命; 入土角过

大, 入土性能差, 开沟阻力大^[29]。当开沟器入土后, 取脊线上任一点 A 为分析对象, 受力分析如图 3 所示。

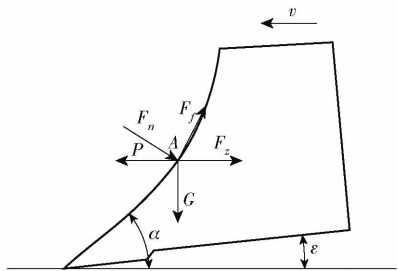


图 3 开沟器脊线上点 A 受力分析图

Fig. 3 Force analysis diagram of point A on ridge line of furrow opener

以点 A 为坐标原点建立坐标系, 根据静力学平衡可知

$$\begin{cases} P - F_f \cos \alpha - F_z - F_n \sin \alpha = 0 \\ F_f \sin \alpha - G - F_n \cos \alpha = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$F_f = \mu F_n \quad (6)$$

式中 P ——播种机对开沟器的牵引力, N

F_f ——土壤与开沟器刃口面的摩擦力, N

F_z ——土壤对开沟器刃口面的切向阻力, N

F_n ——土壤对开沟器刃口面的法向压力, N

G ——土壤重力, N

μ ——摩擦因数

联立式(5)、(6)可得

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{P - F_z + G}{F_n (\mu + 1)} - \frac{\pi}{4} \right) \quad (7)$$

结合式(7)及参考文献[30-31]可知: 入土角 α 在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 范围内, 开沟阻力随入土角的增大而减小; 入土角 $\alpha > 20^\circ$ 时, 开沟阻力与入土角呈线性增长趋势; 入土角 $\alpha = 20^\circ$ (切土深度 10 cm) 时, 开沟阻力比入土角为 $45^\circ \sim 60^\circ$ 时降低 35% ~ 50%。但入土角过小, 会降低开沟器犁体曲面强度, 为减小开沟阻力, 保证犁体曲面强度, 取入土角 $\alpha = 45^\circ$ 。

1.4 入土隙角设计

入土隙角 ε 是指开沟器底面与地面之间的夹角, 对开沟器的入土性能及沟底平整度具有影响。入土隙角过小, 开沟器入土性能差, 且开沟器底面的摩擦力大, 开沟阻力大; 入土隙角过大, 易造成沟底不平。入土隙角一般为 $5^\circ \sim 10^\circ$ ^[10], 入土隙角由 5° 增加到 10° 时, 前进阻力也增大^[32], 故确定入土隙角为 5° 。

1.5 斜切角设计

斜切角 β 是指开沟犁体两斜侧面间的夹角。斜切角影响土壤对开沟器的挤压反力, 开沟阻力随着斜切角的增大而显著增加^[33]。开沟器斜切角 β 一

一般为 $30^{\circ} \sim 80^{\circ}$ ^[34]。为减小开沟阻力,设定斜切角 β 为 30° 。

1.6 芯铧幅宽设计

芯铧幅宽 B 对开沟阻力影响较大,开沟阻力随着幅宽的增大而增大,减小芯铧幅宽可降低开沟阻力,同时减小土壤扰动。为降低开沟阻力及土壤扰动,结合预试验,设定芯铧幅宽 B 为 45 mm。

2 开沟器犁体表面织构化改形设计

2.1 表面织构化改形设计方案

研究表明,肋条(沟槽)表面能有效降低壁面摩擦阻力^[35]。针对黏重土壤环境下开沟器犁体表面土壤粘附严重且开沟器脊线周边易出现壅土等问题,借鉴肋条(沟槽)减阻原理,在开沟器犁体表面增加横向凸筋进行改形,从而达到采用非光滑表面实现减粘降阻的目的,如图 4a 所示。

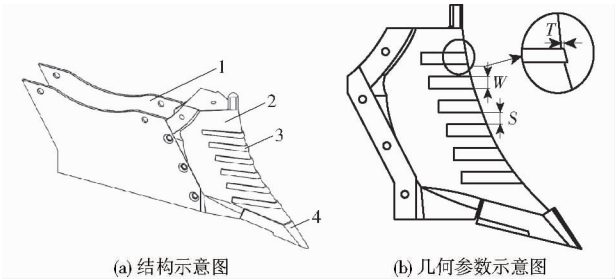


图 4 增加凸筋改形开沟器示意图

Fig. 4 Add convex rib modification furrow opener schematics

1. 挡土板 2. 开沟犁体 3. 凸筋 4. 犁尖

犁体表面形状对减粘降阻效果有重要影响,凸筋的几何参数决定了犁体表面形状。采用凸筋宽度 W 、相邻凸筋间距 S 、凸筋高度 T 3 个参数表征改形后的犁体表面形状特征,如图 4b 所示。凸筋宽度 W 过大,相邻凸筋间距 S 过小,容易造成凸筋缝隙间卡土现象;凸筋宽度 W 过小,相邻凸筋间距 S 过大,则会降低凸筋对开沟器的减粘效果;凸筋高度 T 影响开沟阻力和种沟沟形,当凸筋高度 T 过大时,开沟阻力增大,且种沟沟型不规整。综合考虑开沟器整体结构参数,结合预试验,初步确定凸筋宽度 W 和相邻凸筋间距 S 均为 6 ~ 14 mm,凸筋高度 T 为 0.5 ~ 2.5 mm。

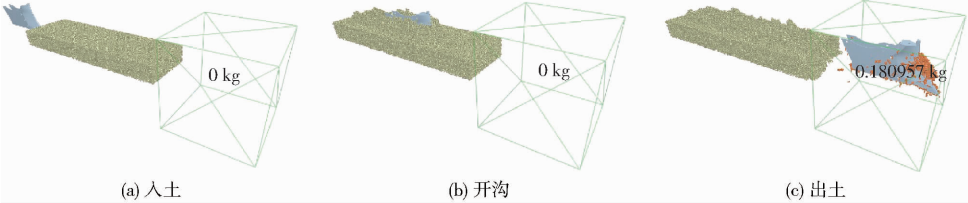


图 5 开沟器作业过程模拟仿真

Fig. 5 Analog simulation for tillage process of furrow opener

2.2 基于 EDEM 的凸筋几何参数优化

2.2.1 基于 EDEM 的开沟过程仿真

仿真试验选用半径为 3 mm 的球形颗粒模拟土壤颗粒,为了较好地模拟土壤颗粒间及土壤开沟器间的粘结力,选用 Hert - Mindlin with JKR 接触模型,设置土槽尺寸(长 × 宽 × 高)为 1 000 mm × 300 mm × 100 mm。根据文献[36 - 40]和 GEMM 数据库确定土壤颗粒模型参数,如表 1 所示。

表 1 EDEM 仿真参数设置

Tab. 1 EDEM simulation parameter settings

参数	数值
土壤密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 490
土壤泊松比	0.38
土壤剪切模量/Pa	1×10^6
65Mn 钢密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 830
65Mn 钢泊松比	0.35
65Mn 钢剪切模量/Pa	7.27×10^{10}
土壤-土壤 JKR 表面能/($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)	10.21
土壤-土壤恢复系数	0.23
土壤-土壤静摩擦因数	0.59
土壤-土壤滚动摩擦因数	0.16
土壤-65Mn 钢 JKR 表面能/($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)	5.50
土壤-65Mn 钢恢复系数	0.61
土壤-65Mn 钢静摩擦因数	0.68
土壤-65Mn 钢滚动摩擦因数	0.083

图 5 所示为开沟器的入土、开沟、出土 3 个作业过程的模拟仿真。为符合播种开沟作业实际情况,设置开沟速度为 1.4 m/s,开沟深度为 60 mm。土壤生成并沉积稳定后单独保存,设置仿真时长为 1.1 s。为保证开沟过程与实际作业过程一致,将土槽沿 x 轴方向两侧设置为不封闭,对开沟器添加一个沿 x 轴正方向的水平运动。当开沟器出土完全脱离土壤模型后,利用 EDEM 后处理 Setup Selections 功能建立统计区域,测量开沟器所粘附土壤质量;利用 EDEM 后处理 Create Gragh 模块导出并整合数据,获得其开沟阻力。

2.2.2 仿真结果与分析

2.2.2.1 单因素试验

选取凸筋宽度 A 、凸筋高度 B 、相邻凸筋间距 C 为试验因素,分别取 5 个水平做单因素试验,分析表

面特征几何参数对开沟器土壤粘附量和开沟阻力的影响。试验因素水平见表 2, 试验过程中, 其它参数取中间值。

表 2 单因素试验水平
Tab.2 Single factor test levels mm

因素水平	凸筋宽度	凸筋高度	相邻凸筋间距
1	6	0.5	6
2	8	1.0	8
3	10	1.5	10
4	12	2.0	12
5	14	2.5	14

各凸筋几何参数对土壤粘附量和开沟阻力的影响规律分别如图 6、7、8 所示。

由图 6 可知, 随凸筋宽度的增大, 土壤粘附量和开沟阻力整体呈上升趋势。凸筋宽度为 6 ~ 10 mm 时, 土壤粘附量较小; 凸筋宽度为 6 ~ 10 mm 时, 开沟阻力上升趋势较大, 但相对其它区间范围的开沟阻力较小。综合考虑凸筋宽度对土壤粘附量和开沟阻力的影响, 确定凸筋宽度取值范围为 6 ~ 10 mm。

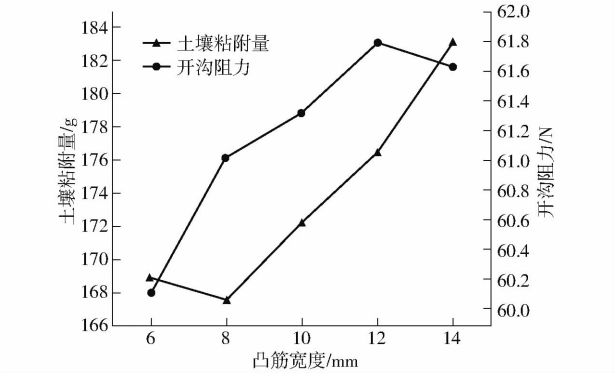


图 6 凸筋宽度对土壤粘附量、开沟阻力的影响

Fig.6 Effect of convex width on soil adhesion and ditching resistance

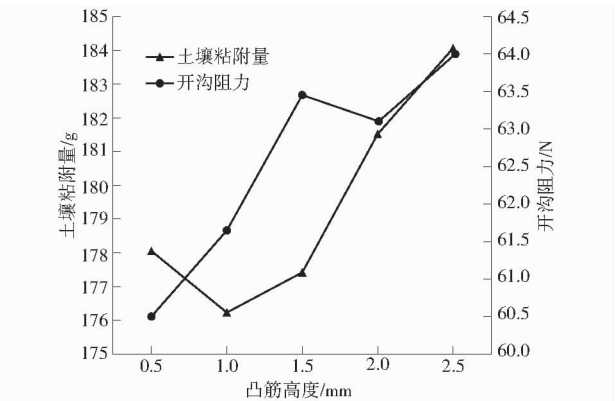


图 7 凸筋高度对土壤粘附量、开沟阻力的影响

Fig.7 Effect of convex bar height on soil adhesion and ditching resistance

由图 7 可知, 土壤粘附量随凸筋高度增加先减小而后明显增大, 凸筋高度为 0.5 ~ 1.5 mm 时, 土

壤粘附量较小; 开沟阻力随凸筋高度增加呈先增大后减小再增大的趋势。综合考虑凸筋高度对土壤粘附量和开沟阻力的影响, 确定凸筋高度取值范围为 0.5 ~ 1.5 mm。

由图 8 可知, 随相邻凸筋间距的增大, 土壤粘附量和开沟阻力呈先上升后下降趋势。相邻凸筋间距为 10 ~ 14 mm 时, 土壤粘附量较少且开沟阻力下降趋势显著。综合考虑相邻凸筋间距对土壤粘附量和开沟阻力的影响, 确定相邻凸筋间距取值范围为 10 ~ 14 mm。

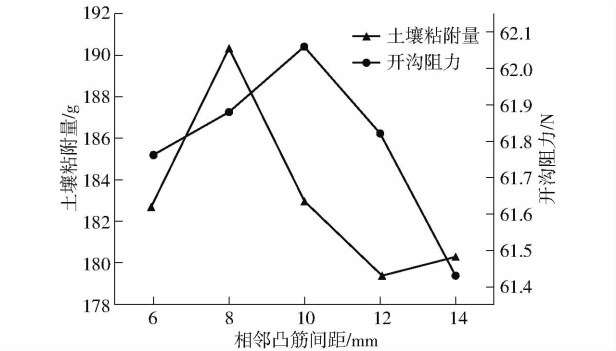


图 8 相邻凸筋间距对土壤粘附量、开沟阻力的影响

Fig.8 Effect of adjacent convex rib spacing on soil adhesion and ditching resistance

2.2.2.2 多因素试验

为分析不同凸筋几何参数组合对土壤粘附量和开沟阻力的交互影响, 求解织构化改形开沟器表面特征几何参数最优组合, 利用 Design-Expert 13 软件设计 Box - Behnken 试验, 试验因素编码见表 3, EDEM 仿真试验结果见表 4。

表 3 织构化改形开沟器仿真试验因素编码

Tab.3 Textured reshaping furrow opener simulation test

factors and codes mm			
编码	凸筋宽度 A	凸筋高度 B	相邻凸筋间距 C
-1	6	0.5	10
0	8	1.0	12
1	10	1.5	14

(1) 凸筋几何参数对土壤粘附量的影响

通过 Design-Expert 13 软件得到开沟器土壤粘附量 Y_1 和凸筋宽度、凸筋高度、相邻凸筋间距的二次多项式回归方程

$$Y_1 = 922.28 - 75.42A - 137.25B - 59.79C - 5.63AB - 0.09AC + 13.09BC + 5.32A^2 - 0.43B^2 + 1.81C^2 \quad (8)$$

土壤粘附量方差分析如表 5 所示。由表 5 可知土壤粘附量的回归模型 P 小于 0.01, 失拟项 P 值大于 0.05, 失拟项不显著, 因变量与各自变量间均呈现极显著性, 模型整体具有显著的统计学意义; 该模型的决定系数 $R^2 = 0.9620$, 校正决定系数 $R^2_{adj} = 0.9132$,

表 4 织构化改形开沟器仿真试验设计与结果

Tab.4 Simulation test design and results of textured reshaping furrow opener					
编号	凸筋宽度/ mm	凸筋高度/ mm	相邻凸筋 间距/mm	土壤粘附 量/g	开沟阻力/ N
1	6	0.5	12	193.57	62.53
2	10	0.5	12	215.65	62.04
3	6	1.5	12	175.21	60.07
4	10	1.5	12	174.76	62.34
5	6	1.0	10	195.30	62.07
6	10	1.0	10	209.57	62.78
7	6	1.0	14	185.40	61.77
8	10	1.0	14	198.31	62.82
9	8	0.5	10	210.70	63.04
10	8	1.5	10	161.84	60.66
11	8	0.5	14	163.50	61.74
12	8	1.5	14	166.98	61.52
13	8	1.0	12	160.84	60.79
14	8	1.0	12	165.27	60.10
15	8	1.0	12	170.05	60.40
16	8	1.0	12	172.67	60.47
17	8	1.0	12	174.29	60.63

表 5 土壤粘附量方差分析

Tab.5 Analysis of variance of soil adhesion					
来源	平方和	自由度	均值	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	5 189.33	9	576.59	19.70	0.000 4
<i>A</i>	297.80	1	297.80	10.18	0.015 3
<i>B</i>	1 368.43	1	1 368.43	46.76	0.000 2
<i>C</i>	499.60	1	499.60	17.07	0.004 4
<i>AB</i>	126.90	1	126.90	4.34	0.075 8
<i>AC</i>	0.462 4	1	0.462 4	0.015 8	0.903 5
<i>BC</i>	684.87	1	684.87	23.40	0.001 9
<i>A</i> ²	1 907.00	1	1 907.00	65.17	<0.000 1
<i>B</i> ²	0.049 3	1	0.049 3	0.001 7	0.968 4
<i>C</i> ²	220.66	1	220.66	7.540	0.028 7
残差	204.85	7	29.26		
失拟项	82.50	3	27.50	0.899 1	0.515 4
误差	122.35	4	30.59		
总和	5 394.180	16			

注:0.01 < *P* ≤ 0.05 表示影响显著,*P* ≤ 0.01 表示影响极显著。下同。

均接近于 1,变异系数为 2.97%,精密度为 13.766 4,说明该拟合回归模型具有较高的可靠性。对于土壤粘附量来说,凸筋高度(*B*)、相邻凸筋间距(*C*)、凸筋高度与相邻凸筋间距的交互项(*BC*)、凸筋宽度的二次项(*A*²)的 *P* 值均小于 0.01,说明其对土壤粘附量影响极显著;凸筋宽度(*A*)、相邻凸筋间距的二次项(*C*²)的 *P* 值均小于 0.05,说明其对土壤粘附量影响显著;其他项 *P* 值均大于 0.05,说明其对土壤粘附量无显著影响。

(2)凸筋几何参数对开沟阻力的影响

通过 Design-Expert 13 软件得到开沟阻力 *Y*₂ 和凸筋宽度、凸筋高度、相邻凸筋间距的二次多项式回归方程

$$Y_2 = 124.64 - 4.5A - 15.78B - 6.38C + 0.69AB + 0.02AC + 0.54BC + 0.24A^2 + 1.29B^2 + 0.23C^2$$

(9)

开沟阻力方差分析如表 6 所示。

表 6 开沟阻力方差分析

Tab.6 Analysis of variance of ditching resistance					
来源	平方和	自由度	均值	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	16.21	9	1.80	42.33	<0.000 1
<i>A</i>	1.57	1	1.57	36.82	0.005
<i>B</i>	2.83	1	2.83	66.58	<0.000 1
<i>C</i>	0.061 2	1	0.061 2	1.44	0.269 2
<i>AB</i>	1.90	1	1.90	44.77	0.000 3
<i>AC</i>	0.028 9	1	0.028 9	0.679 4	0.437 0
<i>BC</i>	1.17	1	1.17	27.42	0.001 2
<i>A</i> ²	3.75	1	3.75	88.11	<0.000 1
<i>B</i> ²	0.440 6	1	0.440 6	10.36	0.014 7
<i>C</i> ²	3.71	1	3.71	87.18	<0.000 1
残差	0.297 8	7	0.042 5		
失拟项	0.028 3	3	0.009 4	0.140 0	0.930 9
误差	0.269 5	4	0.067 4		
总和	16.50	16			

由表 6 可知开沟阻力的回归模型 *P* 小于 0.01,失拟项 *P* 大于 0.05,失拟项不显著,因变量与各自变量间均呈现极显著性,模型整体具有显著的统计学意义;该模型的决定系数 *R*² = 0.982 0,校正决定系数 *R*_{adj}² = 0.958 8,均接近于 1,变异系数为 0.34%,精密度为 18.617 1,说明该拟合回归模型具有较高的可靠性。对于开沟阻力来说,凸筋宽度(*A*)、凸筋高度(*B*)、凸筋宽度与凸筋高度的交互项(*AB*)、凸筋高度与相邻凸筋间距的交互项(*BC*)、凸筋宽度的二次项(*A*²)、相邻凸筋间距的二次项(*C*²)的 *P* 均小于 0.01,说明其对开沟阻力影响极显著;凸筋高度的二次项(*B*²)的 *P* 小于 0.05,说明其对开沟阻力影响显著;其他项 *P* 均大于 0.05,说明其对开沟阻力无显著影响。

2.2.3 各因素交互作用影响分析

图 9 所示为在多因素仿真试验中,将相邻凸筋间距设定为中心水平 12 mm 时,凸筋宽度和凸筋高度两因素交互作用与土壤粘附量和开沟阻力关系的响应曲面。由图 9 可知,当凸筋宽度在 6 ~ 10 mm 区间内,随着凸筋高度的增大,土壤粘附量减少,开沟阻力呈现先减少后增大的趋势;当凸筋高度在 0.5 ~ 1.5 mm 区间内,随着凸筋宽度的增大,土壤粘附量

呈现先减小后增大的趋势,开沟阻力呈现增大的趋势。

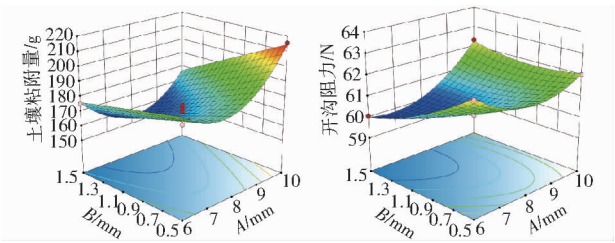


图 9 凸筋宽度与高度交互作用的影响
Fig. 9 Influence of interaction between width and height of convex rib

图 10 所示为在多因素仿真试验中,将凸筋高度设定为中心水平 1.0 mm 时,凸筋宽度和相邻凸筋间距两因素交互作用与土壤粘附量和开沟阻力关系的响应曲面。由图 10 可知,当凸筋宽度在 6 ~ 10 mm 区间内,随着相邻凸筋间距的增大,土壤粘附量和开沟阻力均呈现先减小后增大的趋势;当相邻凸筋间距在 10 ~ 14 mm 区间内,随着凸筋宽度的增大,土壤粘附量和开沟阻力均呈现先减小后增大的趋势。

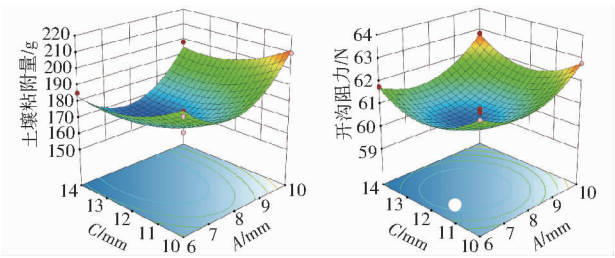


图 10 凸筋宽度与相邻间距交互作用的影响
Fig. 10 Influence of interaction between width and spacing of ribs

图 11 所示为在多因素仿真试验中,将凸筋宽度设定为中心水平 8 mm 时,凸筋高度和相邻凸筋间距两因素交互作用与土壤粘附量和开沟阻力关系的响应曲面。由图 11 可知,当凸筋间距在 10 ~ 14 mm 区间内,随着凸筋高度的增大,土壤粘附量呈下降趋势,开沟阻力呈现先减小后增大的平缓趋势;当凸筋高度在 0.5 ~ 1.5 mm 区间内,随着相邻凸筋间距的增大,土壤粘附量有平缓增大的趋势,开沟阻力呈现先减小后增大的趋势。

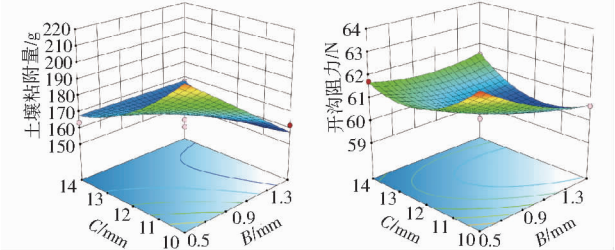


图 11 凸筋高度与相邻间距交互作用的影响
Fig. 11 Influence of interaction between height and spacing of ribs

本研究对播种开沟器优化的主要目的是获得土壤粘附量小、开沟阻力小的播种开沟器表面特征几何参数最优组合。为此,根据上述交互作用影响分析及实际工作条件,设定试验因素约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1 \\ \min Y_2 \\ \text{s. t.} \begin{cases} 6 \text{ mm} \leq A \leq 10 \text{ mm} \\ 0.5 \text{ mm} \leq B \leq 1.5 \text{ mm} \\ 10 \text{ mm} \leq C \leq 14 \text{ mm} \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

通过 Design-Expert 13 软件中 Optimization 模块的 Numerical 功能,以土壤粘附量和开沟阻力的最小值为求解目标,对回归模型进行寻优求解。得到最优凸筋几何参数组合为宽度 7.623 mm、高度 1.344 mm、相邻凸筋间距 11.782 mm,此时最优几何参数下织构化改形开沟器的土壤粘附量为 159.878 g,开沟阻力为 60.065 N。

2.2.4 仿真验证试验

为了验证回归模型的准确性,使用最优凸筋几何参数组合下的织构化改形开沟器开展仿真验证试验。利用 Solidworks 对最优凸筋几何参数组合下的开沟器进行 1:1 三维建模,将模型另存为 STEP 格式导入 EDEM 中。仿真试验中所用到的仿真参数、土槽尺寸与上文保持一致,共重复进行 3 次,取平均值为最终结果,试验结果如表 7 所示。

表 7 仿真验证试验结果
Tab. 7 Simulation verification test results

次序	土壤粘附量				开沟阻力			
	土壤粘附量/g	标准差/g	变异系数/%	误差/%	开沟阻力/N	标准差/N	变异系数/%	误差/%
1	164.30				60.07			
2	166.14	2.75	1.68	2.17	63.39	1.99	3.17	4.49
3	159.61				64.82			
平均值	163.35				62.76			

由表 7 可知,优化后开沟器的土壤粘附量平均值为 163.35 g,标准差为 2.75 g,变异系数为 1.68%,其中土壤粘附量平均值相对求解回归模型所得的土壤粘附量 159.878 g 的误差为 2.17%;优化后开沟器的开沟阻力平均值为 62.76 N,标准差为 1.99 N,变异系数为 3.17%,其中开沟阻力平均值相对求解回归模型所得开沟阻力 60.07 N 的误差为 4.49%。说明 3 次仿真试验所得的结果较为稳定,仿真试验结果与回归模型预测结果基本一致。

3 土槽试验

3.1 试验装置

依据 EDEM 仿真试验与响应面试验优化后的几

何参数设计织构化改形开沟器,如图 12 所示。土槽试验车为哈尔滨博纳科技有限公司生产的 TCC 电力四驱土槽试验台车,土槽试验场景如图 13 所示。



图 12 增加凸筋改形开沟器实物图

Fig. 12 Adding convex rib modified furrow opener physical diagram

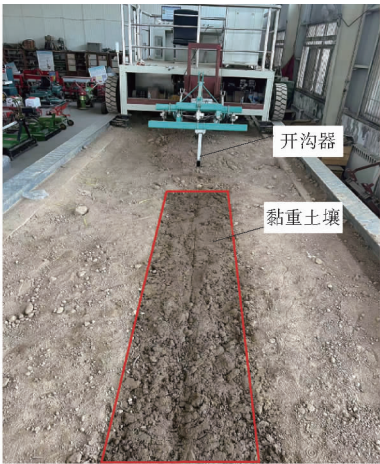


图 13 土槽试验

Fig. 13 Soil bin test

开沟阻力通过土槽试验台车后座的六分力测力架装置测量,将开沟器通过 U 型螺栓安装在六分力测力架尾部的横梁上,六分力测力架与土槽试验台车通过三点悬挂装置连接固定,使土槽试验车行走时可平稳带动开沟器运动,如图 14 所示。



图 14 开沟器的安装固定

Fig. 14 Installation and fixation of furrow opener

3.2 试验方案

为了模拟田间黏重土壤的真实状态,先将土槽内 20 cm 深度的土壤取出,然后将含水率为 25% ~ 30% 的黏重土壤填入、整平和压实,所用土壤为四川省眉山市仁寿县丘陵山区缓坡地黏重土壤。为保持试验的一致性,尽量减少试验过程中其他因素的干扰。将优化前开沟器与优化后开沟器分别进行多次土槽试验,每次作业后整平土壤,并调整开沟器位置,避免上次试验的影响,每次试验后,用刷子将开沟器所粘土壤刮下并称其质量。

为了验证织构化改形开沟器减粘效果,设定开沟深度为 60 mm,开沟速度为 1.4 m/s,对普通开沟器和改形开沟器分别进行 5 次开沟试验,对开沟器表面粘附土壤进行称量并整理数据。

为了验证织构化改形开沟器减阻效果,探究工作速度、开沟深度对开沟阻力的影响,工作速度设定为 1.2、1.4、1.6 m/s,开沟深度设定为 40、50、60 mm。以开沟阻力为试验指标,对比分析不同试验条件对试验指标的影响。

3.3 试验结果及分析

3.3.1 土壤粘附量

两种开沟器的土壤粘附情况如图 15 所示。通过分析土壤粘附情况可知,普通开沟器粘附土壤的位置主要集中在开沟器犁体表面和脊线周围,黏重土壤由于黏性较大,以块状团聚体为主黏结在开沟器犁体前端表面,而改形开沟器有效地避免犁体表面土壤形成大面积土块,开沟器脊线前端未出现壅土现象。

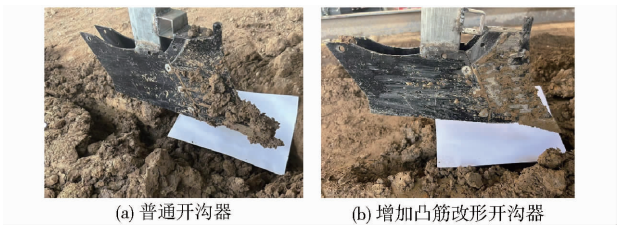


图 15 两种开沟器土壤粘附情况

Fig. 15 Two furrow opener soil adhesion

为了评价改形开沟器的减粘脱附性能,以普通开沟器土壤粘附量作为参考,计算改形开沟器的减粘率,即相同工作条件下普通开沟器土壤粘附量减改形开沟器土壤粘附量,两者的差值再与普通开沟器土壤粘附量进行对比。减粘率的计算公式为

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \tag{11}$$

式中 w ——减粘率, %

m_1 ——普通开沟器的土壤粘附量, g

m_2 ——改形开沟器的土壤粘附量, g

两种开沟器土壤粘附量对比情况如表 8 所示。在开沟深度 60 mm,工作速度 1.4 m/s 条件下,普通开沟器土壤粘附量在 169.35 ~ 230.05 g 范围内,平均土壤粘附量为 198.18 g;改形开沟器土壤粘附量在 140.93 ~ 177.29 g 范围内,平均土壤粘附量为 165.82 g,减粘率为 16.33%。

表 8 两种开沟器土壤粘附量对比

Tab.8 Comparison of soil adhesion between two kinds of furrow opener

开沟器类型	编号	土壤粘附量/g	平均值/g
普通开沟器	1	196.38	198.18
	2	230.05	
	3	176.40	
	4	218.72	
	5	169.35	
改形开沟器	1	172.02	165.82
	2	172.47	
	3	166.39	
	4	177.29	
	5	140.93	

3.3.2 开沟阻力

如表 9、10 所示,通过数据采集装置得到优化前、后开沟器的开沟阻力结果,选取稳定运行区的数据为试验结果,将试验数据整理后得到两种开沟器在不同工作速度、不同开沟深度情况下的开沟阻力。

表 9 普通开沟器开沟阻力

Tab.9 Ditching resistance of ordinary furrow opener

开沟深度/mm	试验序号	工作速度/(m·s ⁻¹)		
		1.2	1.4	1.6
40	1	43.62	48.23	56.73
	2	45.01	49.76	57.58
	3	44.15	50.30	55.37
	平均值	44.26	49.43	56.56
50	1	49.35	53.85	61.27
	2	49.80	56.08	62.72
	3	50.07	54.85	60.23
	平均值	49.74	54.93	61.41
60	1	58.20	62.34	67.68
	2	60.20	63.19	69.65
	3	55.74	60.98	67.84
	平均值	58.05	62.17	68.39

根据上述试验数据可知,普通开沟器的平均开沟阻力变化范围为 44.26 ~ 68.39 N,织构化改形开沟器的平均开沟阻力变化范围为 42.29 ~ 66.40 N,开沟阻力降低了 2.91% ~ 4.45%,优化后的开沟器

具有一定的降阻作用。

表 10 织构化改形开沟器开沟阻力

Tab.10 Ditching resistance of textured reshaping furrow opener

开沟深度/mm	试验序号	工作速度/(m·s ⁻¹)		
		1.2	1.4	1.6
40	1	41.10	47.26	54.28
	2	43.59	48.30	55.64
	3	42.17	46.18	53.18
	平均值	42.29	47.25	54.37
50	1	48.63	52.48	58.90
	2	49.74	53.54	60.21
	3	47.22	52.51	58.03
	平均值	48.53	52.84	59.05
60	1	55.62	60.63	66.10
	2	59.13	61.99	68.75
	3	54.55	59.53	64.35
	平均值	56.43	60.72	66.40

4 结 论

(1)完成了开沟器结构参数设计:起始滑切角为 23°、终止滑切角为 45°、入土角为 45°、入土隙角为 5°、斜切角为 30°、芯铧幅宽为 45 mm;以土壤粘附量小、开沟阻力小为目标,对开沟器表面局部通过添加凸筋进行了改形优化,确定了凸筋宽度和相邻凸筋间距取值范围均为 6 ~ 14 mm,凸筋高度取值范围为 0.5 ~ 2.5 mm。

(2)基于 EDEM 仿真及响应面试验完成了开沟器犁体的表面局部几何参数的优化设计。以凸筋宽度、高度和相邻凸筋间距为试验因素,开沟器土壤粘附量和开沟阻力为评价指标,利用 Design-Expert 13 软件设计 Box – Behnken 试验对参数进行寻优,得到了凸筋最优几何参数组合为:宽度 7.623 mm、高度 1.344 mm、相邻凸筋间距 11.782 mm,此时改形开沟器土壤粘附量为 159.878 g,开沟阻力为 60.065 N。最后对最优几何参数的改形开沟器进行仿真验证试验,通过求解回归模型得到的土壤粘附量与仿真试验所得土壤粘附量之间误差为 2.17%,开沟阻力误差为 4.49%,说明回归模型所得最优参数组合具有可靠性。

(3)对普通开沟器与织构化改形开沟器进行了土槽试验对比,结果表明在相同工作条件下,改形开沟器相比于普通开沟器减粘率为 16.33%;优化后开沟器的开沟阻力较优化前降低了 2.91% ~ 4.45%。

参 考 文 献

[1] 贾玉林. 前置式油菜播种机设计与试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
JIA Yulin. Design and experimental research of front-mounted rape seeder[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022. (in Chinese)

[2] 谭贺文. 一种组合式播种开沟器的设计与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
TAN Hewen. Design and experiment of a combined seeding furrow opener[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[3] 朱存玺. 秸秆移位防堵式玉米免耕直播机设计与试验[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019.
ZHU Cunxi. Design and test of corn precision direct seeding machine with straw shift and anti-blocking[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[4] 吕彬. 大豆免耕播种机圆盘刀性能分析与开沟器设计及试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
LÜ Bin. Experimental and analysis on the performance of disc coulter and design opener of soybean no-till seeder[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[5] 贾洪雷, 王万鹏, 陈志, 等. 农业机械触土部件优化研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 1 – 13.
JIA Honglei, WANG Wanpeng, CHEN Zhi, et al. Research status and prospect of soil-engaging components optimization for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 1 – 13. (in Chinese)

[6] BARR J, DESBIOLLES J, UCGUL M, et al. Bentleg furrow coulter performance analysis using the discrete element method[J]. Biosystems Engineering, 2020, 189: 99 – 115.

[7] 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)

[8] HASIMU A, CHEN Y. Soil disturbance and draft force of selected seedcoulters[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 140: 48 – 54.

[9] 王超, 刘从京, 李洪文, 等. 非对称式大小圆盘开沟装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 28 – 36.
WANG Chao, LIU Congjing, LI Hongwen, et al. Design and experiment of asymmetric large-small double discs ditching device[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 28 – 36. (in Chinese)

[10] 苟文, 马荣朝, 杨文钰, 等. 小麦免耕播种机开沟器的设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊 1): 21 – 25.
GOU Wen, MA Rongchao, YANG Wenyu, et al. Design of opener on no-till wheat seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(Supp. 1): 21 – 25. (in Chinese)

[11] AWAD-ALLAH M A, MAHGOUB H M, ABO-ELNOR M E, et al. Experimental investigation of the effect of vibration during tillage process of multi shank plough blade[J]. Aerospace Sciences and Aviation Technology, 2009(13): 1 – 16.

[12] 王庆杰, 姚宗路, 高焕文, 等. 楔刀型免耕开沟器设计与试验[J]. 机械工程学报, 2008, 44(9): 177 – 182.
WANG Qingjie, YAO Zonglu, GAO Huanwen, et al. Design and experiment on a wedge shaped no-tillage opener[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(9): 177 – 182. (in Chinese)

[13] 石林榕, 孙伟, 王蒂, 等. 马铃薯仿生挖掘铲片的设计与仿真[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(1): 268 – 272.
SHI Linrong, SUN Wei, WANG Di, et al. Design and simulation research on potato bionic digging shovel[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 32(1): 268 – 272. (in Chinese)

[14] 刘世豪, 廖宇兰, 王涛, 等. 木薯挖掘铲多目标决策方法及其仿生设计应用[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(1): 67 – 75.
LIU Shihao, LIAO Yulan, WANG Tao, et al. Cassava digging shovels' multi-objective decision-making method and its application in bionic design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(1): 67 – 75. (in Chinese)

[15] 赵萍, 赵吉喆, 樊昱, 等. 马铃薯仿生挖掘铲的设计与有限元静力学分析[J]. 中国科技论文, 2017, 12(22): 2543 – 2548.
ZHAO Ping, ZHAO Jizhe, FAN Yu, et al. Design and finite element stress analysis on the potato bionic digging shovel[J]. China Sciencepaper, 2017, 12(22): 2543 – 2548. (in Chinese)

[16] 李晓鹏, 廖敏, 胡奔, 等. 马铃薯仿生挖掘铲片及其减阻特性研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(6): 19 – 25, 31.
LI Xiaopeng, LIAO Min, HU Ben, et al. Study on the bionic digging shovel of potato and its reduce resistance characteristics[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(6): 19 – 25, 31. (in Chinese)

[17] YU J, MA Y, WANG S, et al. 3D finite element simulation and experimental validation of a mole rat's digit inspired biomimetic potato digging shovel[J]. Applied Sciences, 2022, 12(3): 1761.

[18] 王文君. 大豆精密播种机仿形仿生镇压装置[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
WANG Wenjun. Bionic press device with profiling mechanism for soybean precision planter[D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)

- [19] 佟金, 张清珠, 常原, 等. 肋条型仿生镇压辊减粘降阻试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 135–140.
TONG Jin, ZHANG Qingzhu, CHANG Yuan, et al. Reduction of soil adhesion and traction resistance of ridged bionic press rollers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 135–140. (in Chinese)
- [20] 佟金, 张清珠, 常原, 等. 仿生镇压辊减粘降阻的有限元分析与试验验证[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 85–92.
TONG Jin, ZHANG Qingzhu, CHANG Yuan, et al. Finite element analysis and experimental verification of bionic press roller in reducing adhesion and resistance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 85–92. (in Chinese)
- [21] 肖茂华, 汪开鑫, 杨望, 等. 基于东方蜈蚣爪趾的仿生旋耕刀设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 55–63.
XIAO Maohua, WANG Kaixin, YANG Wang, et al. Design and experiment of bionic rotary blade based on claw toe of gryllotalpa orientalis burmeister[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 55–63. (in Chinese)
- [22] 邹亮亮, 刘功, 苑进, 等. 主动润滑减阻曲面深松铲设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 34–43.
ZOU Liangliang, LIU Gong, YUAN Jin, et al. Design and test of active lubrication and drag reduction curved subsoiler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 34–43. (in Chinese)
- [23] 邱兆美, 张海峰, 张伏, 等. 基于有限元法的波纹形仿生深松铲仿真分析[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(16): 201–203.
QIU Zhao mei, ZHANG Haifeng, ZHANG Fu, et al. Simulation analysis of corrugated bionic subsoiler based on finite element method[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(16): 201–203. (in Chinese)
- [24] 贾洪雷, 孟凡豪, 刘立晶, 等. 芯铰式开沟器仿生设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 44–49, 77.
JIA Honglei, MENG Fanhao, LIU Lijing, et al. Biomimetic design and experiment of core-share furrow opener[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 44–49, 77. (in Chinese)
- [25] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [26] 王艺达. 油莎豆播种机触土部件的设计与试验研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2023.
WANG Yida. Design and experimental study on soil touching parts of cyperus esculentus planter[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [27] 顾耀权, 贾洪雷, 郭慧, 等. 滑刀式开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 38–42.
GU Yaoquan, JIA Honglei, GUO Hui, et al. Design and experiment of sliding knife furrow opener[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 38–42. (in Chinese)
- [28] 刘晓鹏, 肖文立, 马磊, 等. 油菜联合直播机组合式船型开沟器设计与开沟质量试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 79–87.
LIU Xiaopeng, XIAO Wenli, MA Lei, et al. Design and ditching quality experiment on combined ship type opener of direct rapeseed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 79–87. (in Chinese)
- [29] 宋成友. 轻筒型小麦免耕播种机开沟防堵装置设计与试验[D]. 淄博: 山东理工大学, 2023.
SONG Chengyou. Design and experiment of furrowing and anti-blocking device for light wheat no-till planter[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [30] 张喜瑞, 何进, 李洪文, 等. 水平拨草轮式玉米免耕播种机设计和试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 39–43.
ZHANG Xirui, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment on no-till planter in horizontal residue-throwing finger-wheel type for maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 39–43. (in Chinese)
- [31] 药林桃, 曹晓林, 董力洪, 等. 红壤丘陵区小型花生播种机的设计和试验研究[J]. 江西农业学报, 2015, 27(4): 78–80.
YAO Lintao, CAO Xiaolin, DONG Lihong, et al. Design and experiment on small-size peanut planter in red soil hilly region[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2015, 27(4): 78–80. (in Chinese)
- [32] 姚宗路, 高焕文, 李洪文, 等. 不同结构免耕开沟器对土壤阻力的影响[J]. 农机化研究, 2009, 31(7): 30–34.
YAO Zonglu, GAO Huanwen, LI Hongwen, et al. Effect on different structural no-till openers on soil resistant force[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(7): 30–34. (in Chinese)
- [33] 王海刚. 枣园犁式开沟施肥机关键部件研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2024.
WANG Haigang. Research on key components of ploughshare-type trench fertilizer applicator in Jujube garden[D]. Alaer: Tarim University, 2024. (in Chinese)
- [34] 杨薇. 基于离散元法的巨菌草开沟器结构优化与试验研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2019.
YANG Wei. Structure optimization and experimental study of the *Pennisetum*. sp opener based on the discrete element method[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019. (in Chinese)
- [35] 秦立果, 龚朝永, 孙红江, 等. 非光滑表面减阻研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(8): 107–122.
QIN Liguang, GONG Chaoyong, SUN Hongjiang, et al. Review of research on drag reduction of non-smooth surface[J]. Surface Technology, 2022, 51(8): 107–122. (in Chinese)

[J]. Machinery Design & Manufacture,2013(1):217-219. (in Chinese)

[22] 刘竞一,汪随风,周建文. 原地转向阻力矩计算优化和试验验证[J]. 拖拉机与农用运输车,2016,43(6):14-18,23.
LIU Jingyi, WANG Suifeng, ZHOU Jianwen. Calculation optimization and test validation of pivot steering resistance torque[J]. Tractor & Farm Transporter,2016,43(6):14-18,23. (in Chinese)

[23] 班超,董乃希,黄修炼,等. 基于多维感知的玉米大田巡检平台设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(9):44-52,73.
BAN Chao, DONG Naixi, HUANG Xiulian, et al. Design and experiment of maize field inspection platform based on multi-dimensional perception[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9):44-52,73. (in Chinese)

[24] 张鹏,郭志军. 节流独立控制负载敏感液压系统特性及其仿真分析[J]. 液压与气动,2021,45(4):82-86.
ZHANG Peng, GUO Zhijun. Characteristics and simulation analysis of load sensitive hydraulic system with independent throttle control[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics,2021,45(4):82-86. (in Chinese)

[25] 罗艳蕾,邓行,穆洪云,等. 基于负载敏感的山地液压收割机工作回路性能仿真分析[J]. 机床与液压,2022,50(15):141-145.
LUO Yanlei, DENG Hang, MU Hongyun, et al. Performance simulation analysis of working circuit of mountain hydraulic harvester based on load sensitivity[J]. Machine Tool & Hydraulics,2022,50(15):141-145. (in Chinese)

[26] 鲍继兵,李捷,王毫旗. 基于 AMESim 的液压挖掘机负载敏感液压控制系统仿真分析[J]. 工程机械,2022,53(7):56-63,10-11.
BAO Jibing, LI Jie, WANG Haoqi. Simulation analysis of load sensing hydraulic control system of hydraulic excavator based on AMESim[J]. Construction Machinery and Equipment,2022,53(7):56-63,10-11. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 190 页)

[36] 李俊伟,佟金,胡斌,等. 不同含水率黏重黑土与触土部件互作的离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 130-140.  
LI Junwei, TONG Jin, HU Bin, et al. Calibration of parameters of interaction between clayey black soil with different moisture content and soil-engaging component in northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(6): 130-140. (in Chinese)

[37] 孙景彬,刘琪,杨福增,等. 黄土高原坡地土壤与旋耕部件互作离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 63-73.  
SUN Jingbin, LIU Qi, YANG Fuzeng, et al. Calibration of discrete element simulation parameters of sloping soil on Loess Plateau and its interaction with rotary tillage components[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 63-73. (in Chinese)

[38] 武涛,黄伟凤,陈学深,等. 考虑颗粒间黏结力的黏性土壤离散元模型参数标定[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(3): 93-98.  
WU Tao, HUANG Weifeng, CHEN Xueshen, et al. Calibration of discrete element model parameters for cohesive soil considering the cohesion between particles[J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(3): 93-98. (in Chinese)

[39] 宋占华,李浩,闫银发,等. 桑园土壤非等径颗粒离散元仿真模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 21-33.  
SONG Zhanhua, LI Hao, YAN Yinfa, et al. Calibration method of contact characteristic parameters of soil in mulberry field based on unequal-diameter particles EDEM theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 21-33. (in Chinese)

[40] 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)