

牧草免耕播种机滑刃式倒 T 型开沟器设计与试验

衣淑娟¹ 周 涛¹ 王 淞¹ 杨 林² 陶桂香¹ 毛 欣¹

(1. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319; 2. 德邦大为(佳木斯)农机有限公司, 佳木斯 100176)

摘要: 针对牧草免耕播种机开沟器存在播种深度不均匀、土壤回填过多等问题,结合滑切作用原理,设计一种牧草免耕播种机滑刃式倒 T 型开沟器。基于质点动力学分析土壤与开沟器之间的相互作用,确定影响其作业性能的主要因素,结合沙蟒头部轮廓对倒 T 型成形块进行仿生设计,仿真对比结果表明,仿生成形块所产生的土壤颗粒流速与楔式成形块相比提高 5.48%,作业阻力减少 15.88%。建立 EDEM 仿真模型并以作业速度、滑切角度、上倾角度为试验因素,回土深度、开沟深度稳定系数为试验指标,开展二次回归正交旋转组合试验,通过 Design-Expert 软件对二次回归正交旋转组合试验的结果进行分析,确定开沟器最优参数组合为:滑切角度 40.24°、作业速度 7.60 km/h、上倾角度 12.43°,此时开沟深度稳定系数为 88.64%、回土深度为 19.43 mm。土槽试验表明,最优参数组合下开沟深度稳定系数为 87.21%、开沟器平均回土深度为 22.00 mm,仿生成形块的作业阻力低于楔形成形块,平均降阻幅度为 8.66%。田间试验结果表明,在作业速度 6~10 km/h 范围内,滑刃式倒 T 型开沟器开沟深度稳定系数均高于 80.86%,回土深度均小于 26.00 mm,在草原土壤环境中具有良好的开沟性能。

关键词: 牧草; 免耕播种机; 倒 T 型开沟器; 滑刃式; 仿生工程; 离散元仿真

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)11-0077-12 **OSID:** 

Design and Testing of Sliding-edge Inverted T-shaped Opener for No-tillage Seeder of Forage Crops

YI Shujuan¹ ZHOU Tao¹ WANG Song¹ YANG Lin² TAO Guixiang¹ MAO Xin¹

(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China

2. Debon Dawei (Jiamusi) Agricultural Machinery Co., Ltd., Jiamusi 100176, China)

Abstract: Aiming at the problems of uneven seeding depth and excessive soil backfilling of the no-till grass seeder opener, a sliding blade type inverted T-shaped opener for no-till grass seeder was designed based on the principle of sliding cutting. The interaction between soil and the opener was analyzed based on particle dynamics, and the main factors affecting its working performance were determined. The inverted T-shaped forming block was designed based on the sand boa. The simulation results showed that the soil particle flow rate generated by the bionic forming block was 5.48% higher than that of the wedge-shaped forming block, and the working resistance was reduced by 15.88%. An EDEM simulation model was established, and the working speed, sliding cutting angle, and upper inclination angle were taken as the test factors, while the backfilling depth and the stability coefficient of the furrow depth were taken as the test indicators. A quadratic regression orthogonal rotation combination test was carried out. The optimal parameter combination of the opener was determined as: sliding cutting angle of 40.24°, working speed of 7.60 km/h, and upper inclination angle of 12.43°. At this time, the stability coefficient of the furrow depth was 88.64% and the backfilling depth was 19.43 mm. The soil trough test showed that the stability coefficient of the furrow depth was 87.21% and the average backfilling depth of the opener under the optimal parameter combination was 22.00 mm. The working resistance of the bionic forming block was lower than that of the wedge-shaped forming block, with an average resistance reduction of 8.66%. The field test results showed that within the working speed range of 6~10 km/h, the stability coefficient of the furrow depth of the inverted T-shaped opener was higher than 80.86%, and the backfilling depth was

收稿日期: 2025-11-11 修回日期: 2025-12-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1501005-06)、中国科学技术协会青年人才培养工程博士生专项计划项目(156-O-416-0000259-2)和黑龙江八一农垦大学研究生创新科研项目(YJSCX2024-Y39、YJSCX2024-Z02)

作者简介: 衣淑娟(1965—),女,教授,博士,主要从事牧草机械化研究,E-mail: yishujuan_2005@126.com

less than 26.00 mm, indicating good furrow opening performance in grassland.

Key words: forage crops; no-tillage seeder; inverted T-shaped opener; sliding-edge type; bionic engineering; discrete element simulation

0 引言

免耕播种是草地改良应用的重要手段,可以快速增加单位面积的牧草群落密度,缩短退化草地的恢复时间^[1-2]。其中开沟器是对播种效果影响最为直接的耕作部件,直接决定了种沟质量、种子着床环境和幼苗生长态势^[3-6]。倒 T 型开沟器能够疏松和破碎种沟土壤,增加种沟土壤的孔隙度,为种子发芽创造适宜的条件^[7]。但现有草地耕作部件多数基于农田土壤设计,应用到具有土壤根系复合体结构的板结性草土层难以保证开沟深度的稳定性,继而对牧草种子发芽和幼苗建植产生不利影响。所以开展草地倒 T 型开沟器优化设计对草地改良耕作部件研发十分关键^[8]。

国内外关于免耕播种机倒 T 型开沟器的研究多集中于保墒效果及降低土壤扰动等方面,且针对草原免耕播种开沟部件研究较少。白旭普等^[9]设计了一款集切根、开沟、回土功能于一体的多功能集成式开沟装置,田间试验表明切根圆盘与倒 T 型开沟器能够形成结构稳定、深度均匀的种沟,对土壤的扰动较小,侧垄宽不超过 50 mm。张英俊等^[10]通过试验发现倒 T 型开沟器能够形成“上窄下宽”的开沟效果,不仅能够在开沟过程中有效保持土壤墒情,而且减小原生植物对补播物种的地下竞争。DU 等^[11]也发现,与三圆盘开沟器和锄铲式开沟器相比,倒 T 型开沟器的小麦出苗率最高。然而,根据 TOW 等^[12]的研究,倒 T 型开沟器所需的开沟阻力是尖角型开沟器的 2~3 倍。针对农机触土部件实现高效减阻这一难题,仿生学作为一种重要方法得到广泛应用,国内外学者根据动物口器、切齿等器官几何特征或生物行为特征对农机触土部件进行仿生设计及结构优化,显著提高农机触土部件的降粘减阻性能^[13-15]。综合分析,现有倒 T 型开沟器对草地的适配性较弱,针对草地开沟部件研究较少,故基于机械扰动改良和补播改良工艺融合的草地免耕播种机倒 T 型开沟器研究十分关键。

为提升倒 T 型开沟器在板结草地土壤环境下的作业效果,以提高开沟深度稳定性,降低回土深度为目的,设计一种滑刃式倒 T 型开沟器。通过质点动力学对开沟器与土壤的相互作用过程进行动力学分析,并依据沙蟒头部轮廓对倒 T 型成形块外轮廓

进行仿生优化。开展离散元仿真试验,确定开沟器最佳结构参数和作业参数,以期为牧草免耕播种作业提供有效的技术支持。

1 整机结构与工作原理

设计的滑刃式倒 T 型开沟器安装在牧草免耕播种机上,牧草免耕播种机主要由排种器、种箱、肥箱、配重箱、镇压轮、滑刃式倒 T 型开沟器、限深轮、松土开沟盘、破土切根圆盘等部件组成,如图 1 所示。

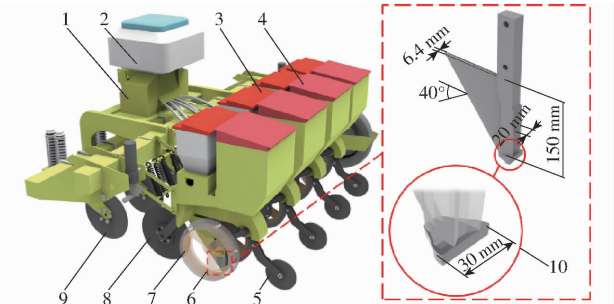


图 1 牧草免耕播种机结构示意图

Fig. 1 Schematic of no-till forage seeder

1. 排种器 2. 种箱 3. 肥箱 4. 配重箱 5. 镇压轮 6. 滑刃式倒 T 型开沟器 7. 限深轮 8. 松土开沟盘 9. 破土切根圆盘
10. 倒 T 型成形块

牧草免耕播种机作业时,先由松土开沟盘将杂草和残留牧草根系切断,为开沟器入土创造有利条件。随后开沟器开出上窄下宽的种子沟,其中倒 T 型成形块对种沟底部进行疏松,增加种沟底部土壤孔隙度^[13],同时牧草种子由开沟器后侧的种管落入沟底的湿土上,随后一部分土壤在重力作用下回落将种子进行覆盖,最终由镇压轮完成镇压,开沟示意图如图 2 所示。

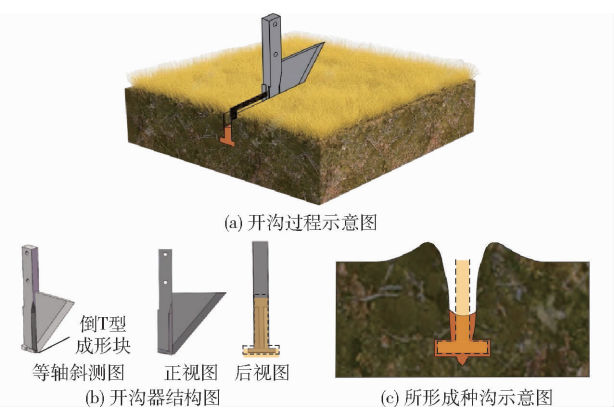


图 2 开沟示意图

Fig. 2 Diagrams of ditching

2 开沟器结构分析与设计

2.1 开沟器分析与设计

2.1.1 开沟器受力分析

钝角开沟器可以在作业过程中对土壤产生向下运动的力,减小作业过程中对草地的翻动和抬升作用,进而减少对草场的破坏^[16],根据钝角开沟器这一特点并结合倒 T 型开沟器所形成种沟在出苗率上的优势,设计出滑刃式倒 T 型开沟器。作业时,开沟器在机组牵引下利用刀具刃口将草地板层划开,其单位长度在作业时的受力分析如图 3 所示,参考文献[17],草地土壤在受到开沟器的剪切作用时会对其产生开沟阻力 F ,开沟阻力 F 主要表现为土壤对斜刃的摩擦力、粘附力、压力和粘结力,其表达式为

$$F = F_c + 2f_1 \cos \frac{\alpha}{2} + 2n_1 \cos \frac{\alpha}{2} + 2N_1 \sin \frac{\alpha}{2} + 2f_2 + 2n_2 \quad (1)$$

式中 F_c ——草地土壤粘结力, N
 f_1 ——开沟器刃口所受摩擦力, N
 α ——开沟器水平刃口角, ($^\circ$)
 n_1 ——开沟器刃口上的粘附力, N
 N_1 ——开沟器刃口上的压力, N
 f_2 ——开沟器侧壁所受摩擦力, N
 n_2 ——开沟器侧壁上的粘附力, N

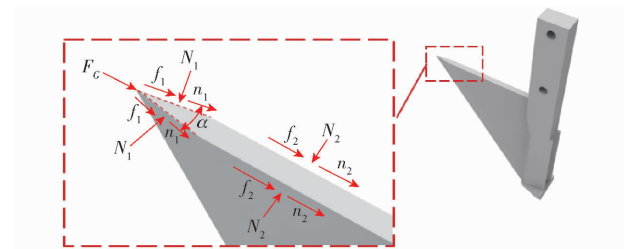


图 3 开沟器受力分析图

Fig. 3 Force analysis diagram of the trencher

由式(1)可得影响单位长度开沟器开沟阻力的因素除了开沟器和土壤间的粘附力 n_1 、摩擦力 f_1 和粘结力 F_c 之外,还有水平刃口角 α 和刃口压力 N_1 。其中粘附力 n_1 、摩擦力 f_1 和粘结力 F_c 与土壤类型有关,刃口压力 N_1 受水平刃口角 α 与开沟深度影响,当 α 减小时,刃口对土壤的剪切角度更为平缓,有助于降低刃口压力 N_1 ,但 α 过小会加快刃口磨损,降低结构强度。因此,为在保证结构强度的前提下减小切削阻力,需要对开沟器水平刃口角 α 进一步分析设计。

2.1.2 开沟器滑切过程分析

水平刃口角 α 受到滑切角 δ 和实际刃口角 γ 的影响,具体关系如图 4 所示,图中 AC 垂直于 CDE 平

面, $l_{AD} = l_{AE} = l_{CD} = l_{CE}$ 且 B 为 ED 中点,根据三角函数定理可得

$$\begin{cases} \cos \delta = \frac{l_{CB}}{l_{AB}} \\ \tan \frac{\gamma}{2} = \frac{l_{BD}}{l_{CB}} \\ \tan \frac{\alpha}{2} = \frac{l_{BD}}{l_{AB}} \end{cases} \quad (2)$$

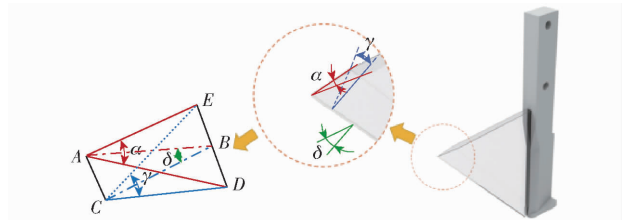


图 4 水平刃口角与实际刃口角关系原理图

Fig. 4 Schematic of relationship between horizontal edge angle and actual edge angle

经简化可得

$$\cos \delta = \frac{\tan \frac{\alpha}{2}}{\tan \frac{\gamma}{2}} \quad (3)$$

参考文献[18],滑切角 δ 、实际刃口角 γ 的取值范围在 $[0, \pi/2]$ 之间,代入公式(3)可得水平刃口角 α 的取值范围为 $0 \sim \gamma$,即当实际刃口角 γ 一定时,随着滑切角 δ 增加,水平刃口角 α 减小。综合考虑开沟器刃口的强度和剪切性能,将开沟器实际刃口角 γ 确定为 45° 。为进一步确定滑切角的区间范围,取在开沟器上作用的任一土壤质点作为研究对象进行运动学分析。

如图 5 所示,当开沟器工作时,开沟器与土壤颗粒间的相对运动为复合运动^[19],其由开沟器对土壤质点产生的沿前进方向的牵连运动和开沟器刃口向下的切割运动复合而成,此运动中,土壤颗粒受到开沟器刃口的法向力 F_N 、土壤颗粒受到开沟器刃口的摩擦力 F_τ 、周围土壤对土壤颗粒的作用反力 F_k 。 τ

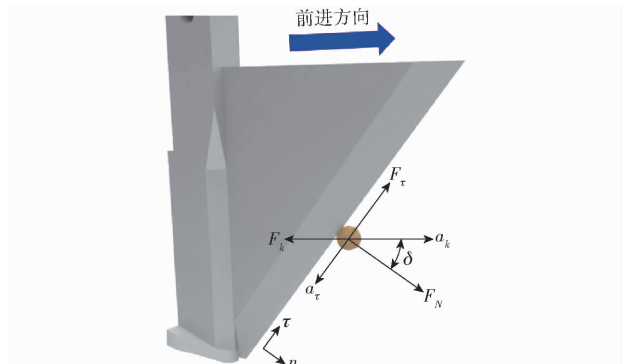


图 5 开沟器滑切受力分析图

Fig. 5 Analysis diagram of force on sliding cutting of trencher

为开沟器切向方向, n 为开沟器法向方向。建立质点动力学平衡方程为

$$\begin{cases} F_N - F_k \cos \delta = m a_k \cos \delta \\ F_k \sin \delta - F_\tau = m (a_\tau - a_k \sin \delta) \\ F_\tau = F_N \tan \theta \end{cases} \quad (4)$$

式中 m ——土壤颗粒质量, kg
 a_k ——土壤颗粒的牵连加速度, m/s^2
 a_τ ——土壤颗粒的相对加速度, m/s^2
 θ ——土壤与开沟器摩擦角, $(^\circ)$

整理可得

$$F_N \tan \delta - F_N \tan \theta = m a_\tau \quad (5)$$

如图 5 所示, 开沟器在正常工作状态下法向力 $F_N > 0$, 为使开沟器和土壤颗粒之间产生相对滑动, 土壤颗粒切向加速度必然大于零, 即 $a_\tau > 0$, 由式(5)可得 $\delta > \theta$, 即滑切角大于开沟器和土壤间的摩擦角才能产生滑切效果。滑切角过小滑切效果不明显, 滑切角过大会导致开沟器尺寸过大, 综合考虑滑切特性及整体尺寸^[20], 确定开沟器滑切角范围为 $35^\circ \sim 55^\circ$, 应用离散元仿真试验对滑切角进行优化。

2.2 倒 T 型成形块受力分析与设计

2.2.1 倒 T 型成形块受力分析

适宜的孔隙度是种子萌发的关键, 倒 T 型成形块的作用是疏松种沟土壤, 创造良好的种沟孔隙度, 为了探究倒 T 型成形块对种沟疏松效果的影响, 对倒 T 型成形块与土壤间的作用情况进行受力分析。

土壤与倒 T 型成形块的关系可以表达为图 6 所示的二面楔受力图, 坐标系原点是倒 T 型成形块与土壤接触面上的一个点, F_p 是倒 T 型成形块所受土壤的正压力, F_{px} 是 F_p 在水平方向上的分力, 则倒 T 型成形块在前进方向上所受土壤阻力 F_d 的计算公式为

$$F_d = F_p \sin \varphi + T \cos \varphi \quad (6)$$

式中 φ ——成形块上倾角度, $(^\circ)$
 T ——成形块前进方向所受摩擦力, N

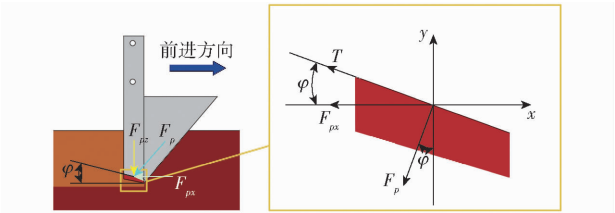


图 6 倒 T 型成形块受力分析

Fig. 6 Force analysis of inverted T-shaped formed blocks

如图 7 所示, 正压力 F_p 的主要来源是倒 T 型成形块上方的土壤重力 G , 还有待疏松区域土壤给运动中的土壤压力 N_5 以及土壤的内聚力 C , d_1 为疏松土壤高度, d 为土壤疏松深度^[21], 通过受力分析得

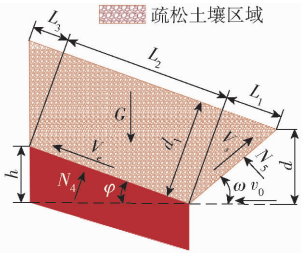


图 7 倒 T 型成形块土壤疏松区域示意图

Fig. 7 Schematic of soil looseness range of inverted T-shaped formed block

出倒 T 型成形块与疏松土壤在水平方向和竖直方向受力平衡方程分别为

$$\begin{cases} G + (CS + a) \sin \omega = N_4 (\cos \varphi - \mu \sin \varphi) + N_5 (\cos \omega - \mu \sin \omega) \\ N_4 (\sin \varphi + \mu \cos \varphi) = N_5 (\sin \omega + \mu \cos \omega) + (CS + a) \cos \varphi \\ \mu = \tan \theta \end{cases} \quad (7)$$

式中 N_4 ——成形块对土壤支持力, N
 a ——土壤运动加速度, m/s^2
 ω ——土壤前失效倾角, $(^\circ)$
 S ——成形块疏松土壤面积, mm^2
 μ ——土壤与开沟器间摩擦因数

联立式(6)、(7)得

$$\begin{cases} F_p = \frac{G}{k} + \frac{CS + a}{k'} \\ k = \frac{\cos \varphi - \mu \sin \varphi}{\sin \varphi - \mu \cos \varphi} + \frac{\cos \omega - \mu \sin \omega}{\sin \omega + \mu \cos \omega} \\ k' = \frac{\cos \varphi - \mu \sin \varphi}{\sin \varphi + \mu \cos \varphi} + \frac{\cos \omega - \mu \sin \omega}{\sin \omega + \mu \cos \omega} \cdot (\sin \omega + \mu \cos \omega) \end{cases} \quad (8)$$

因此倒 T 型成形块作业阻力与土壤重力 G 、土壤内聚力 C 以及土壤加速度 a 、土壤疏松面积 S 有关, 其中 G 和 C 与土壤类型有关, 加速度 a 受到开沟速度 v 影响, 疏松面积 S 由图 7 可得

$$S = L_2 d_1 + \frac{1}{2} d_1 (L_1 + L_3) \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} d_1 = d \frac{\sin(\varphi + \omega)}{\sin \omega} \\ L_1 = d_1 \tan \left(\frac{\pi}{2} - \varphi - \omega \right) \\ L_3 = d_1 \tan \varphi \\ L_2 = \frac{h}{\sin \varphi} \end{cases} \quad (10)$$

简化得

$$S = d \frac{\sin(\varphi + \omega)}{\sin \omega} \left[\frac{h}{\sin \varphi} + \frac{1}{2} d \frac{\sin(\varphi + \omega)}{\sin \omega} \cdot (\cot(\varphi + \omega) + \tan \varphi) \right] \quad (11)$$

式中 h ——成形块厚度,mm

由式(11)得,倒 T 型成形块疏松土壤面积与成形块厚度 h 、成形块上倾角 φ 和土壤前失效倾角 ω 有关,其中土壤前失效倾角 ω 与土壤类型有关,增大成形块厚度 h 可以提高疏松面积 S ,增强种沟孔隙度,为种子萌发提供优越土壤环境。但过大的成形块厚度 h 会增加土壤作业阻力,降低开沟效率。为确保种沟土壤疏松厚度能够覆盖种子粒径范围的同时避免过大的作业阻力,结合苜蓿种子粒径范围 $2 \sim 3 \text{ mm}$ [22],将成形块厚度 h 设计为 5 mm ,通过分析土壤颗粒在倒 T 型成形块上的运动状态确定成形块上倾角 φ 的取值范围。

为保证运动学分析的合理性,选择与成形块接触的土壤颗粒为研究对象,进行质点动力学分析。假设开沟器匀速作业,开沟深度保持稳定,倒 T 型成形块对土壤颗粒的支持力 N_4 可以分解为与开沟器前进方向相同的分力 N_i 和沿接触面方向的分力 N_k 。 N_i 使土壤颗粒跟随开沟器运动, N_k 使土壤颗粒在接触面上进行滑动。土壤颗粒运动学分析图如图 8 所示,其平衡方程为

$$\begin{cases} m \frac{dx^2}{dt^2} = N_4 \cot \varphi - F_0 - A_1 - mg \sin \varphi \\ F_0 = N_4 \tan \theta \\ N_4 = mg \cos \varphi \\ A_1 = q_B \tan \theta \end{cases} \quad (12)$$

式中 A_1 ——土壤颗粒与成形块间粘附力,N
 F_0 ——土壤颗粒与成形块间摩擦力,N
 g ——重力加速度, m/s^2
 q_B ——土壤黏滞阻力,N
 t ——土壤颗粒在成形块上的运动时间,s

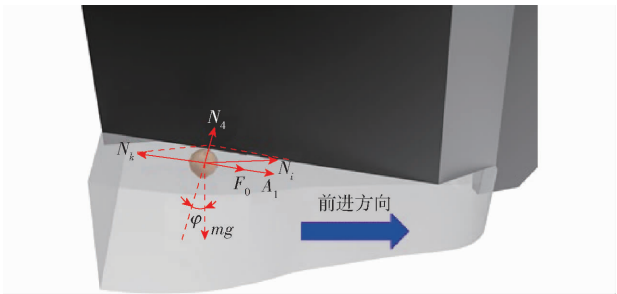


图 8 土壤颗粒在倒 T 型成形块上端运动学分析
Fig.8 Kinematic analysis of soil particles at upper end of furrow wing

整理式(12)得到土壤颗粒在倒 T 型成形块上端面上的运动微分方程为

$$m \frac{dx^2}{dt^2} = mg \left(\frac{\cos \varphi^2}{\sin \varphi} - \sin \varphi - \cos \varphi \tan \theta \right) - q_B \tan \theta \quad (13)$$

土壤颗粒在倒 T 型成形块上表面的运动速度 v_x

与位移 x 计算公式为

$$\begin{aligned} v_x &= gt \left(\frac{\cos \varphi^2}{\sin \varphi} - \sin \varphi - \cos \varphi \tan \theta \right) - q_B t \tan \theta \quad (14) \\ x &= \frac{1}{2} gt^2 \left(\frac{\cos \varphi^2}{\sin \varphi} - \sin \varphi - \cos \varphi \tan \theta \right) - \frac{1}{2} q_B t^2 \tan \theta \quad (15) \end{aligned}$$

分析式(15)可知,影响土壤颗粒速度的主要因素为成形块上倾角度 φ 以及运动时间 t ,而土壤颗粒在倒 T 型成形块上的运动时间与开沟器的作业速度 v 有关,即改变倒 T 型成形块上倾角度 φ 以及开沟器作业速度 v 则土壤回流位移发生改变,影响回土深度。综合考虑倒 T 型成形块对回土深度及种沟土壤疏松效果的影响,将上倾角度 φ 的取值范围设置为 $10^\circ \sim 30^\circ$,通过离散元仿真进行优化设计。

2.2.2 倒 T 型成形块仿生优化设计

倒 T 型成形块作为开沟器的重要组件,对倒 T 型种沟的形成以及种沟底部土壤疏松效果有重要影响,因此为提升倒 T 型成形块在土壤中的穿透效率,本研究参考掘穴蛇类的头部,结合逆向仿生工程对倒 T 型成形块的形状轮廓进行设计。沙蟒在长期进化过程中形成了适应土壤环境的高效穿透能力,其头部通过渐进式剪切破坏土壤,而非直接挤压,提高了土壤中的穿行效率。且流线形外形可降低土壤的黏滞阻力,提升了倒 T 型成形块在土壤中的穿透效率及适应性,为成形块轮廓的优化设计提供依据 [23]。

如图 9 所示,通过 Matlab 软件对头部俯视图轮廓线进行提取,并根据相对位置坐标点采用分段多项式曲线拟合原理进行数学分析,计算出拟合轮廓方程,并以决定系数 R^2 为指标判断各曲线段拟合曲线方程的拟合程度,所提取的轮廓曲线及拟合方程如表 1 所示。

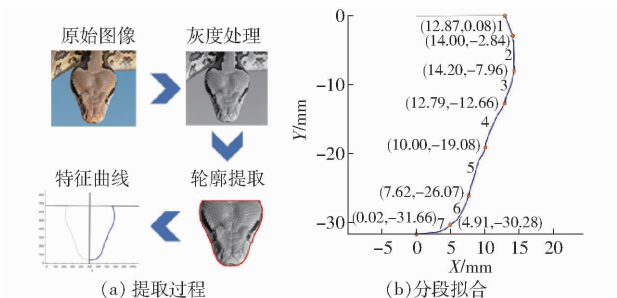


图 9 沙蟒头部轮廓曲线提取及拟合示意图

Fig.9 Schematics of extracting and fitting contour curve of python's head

从分段曲线拟合方程可以看出,决定系数 R^2 都不小于 0.93,拟合程度较高。通过该数学模型并利用三维制图软件中的“方程式驱动曲线工具”对仿

表 1 轮廓曲线拟合方程

Tab.1 Contour curve fitting equations

曲段	拟合曲线方程	R^2	x 范围/mm
1	$y_1 = -11.53x^6 - 3.588x^5 + 3.291x^4 + 0.8807x^3 - 0.4471x^2 - 2.878x - 1.469$	0.99	12.87 ~ 14.00
2	$y_2 = 4.808 \times 10^9 x^8 - 4.489 \times 10^7 x^7 - 7.803 \times 10^7 x^6 - 6.672 \times 10^5 x^5 + 3.289 \times 10^5 x^4 + 2.184 \times 10^3 x^3 - 3.519 \times 10^2 x^2 - 67.66x - 3.507$	0.93	14.00 ~ 14.20
3	$y_3 = 6.083x^6 + 0.8058x^5 - 5.072x^4 + 0.7623x^3 + 2.183x^2 + 3.008x - 10.41$	0.99	12.79 ~ 14.20
4	$y_4 = -0.1278x^6 + 0.2756x^5 + 0.1824x^4 - 0.3876x^3 - 0.4174x^2 + 2.285x - 1.559$	0.99	10.00 ~ 12.79
5	$y_5 = -0.333x^6 + 0.8215x^5 + 0.5812x^4 - 1.468x^3 - 0.8044x^2 + 3.507x - 2.229$	0.99	7.62 ~ 10.00
6	$y_6 = 6.689 \times 10^{-3} x^6 - 2.388 \times 10^{-2} x^5 - 0.1249x^4 - 9.514 \times 10^{-4} x^3 + 0.6545x^2 + 1.822x - 2.857$	0.99	4.91 ~ 7.62
7	$y_7 = -4.441 \times 10^{-4} x^6 - 1.233 \times 10^{-3} x^5 + 6.594 \times 10^{-3} x^4 + 3.896 \times 10^{-2} x^3 + 5.353 \times 10^{-2} x^2 + 9.913 \times 10^{-2} x - 3.142$	0.99	0.02 ~ 4.91

生成形块进行三维绘制,如图 10 所示。

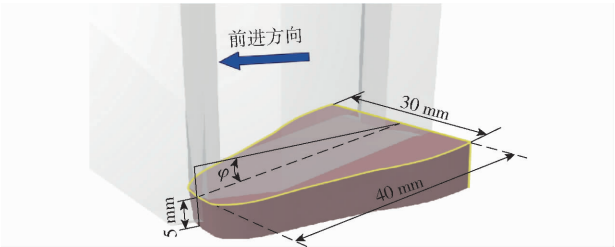


图 10 倒 T 型成形块三维图

Fig. 10 Three-dimensional diagram of inverted T-shaped formed block

3 离散元仿真分析

3.1 接触模型选取及离散元参数确定

由于退化草地土壤板结严重,土壤颗粒之间粘结力较大,故颗粒接触模型选用粘结接触模型(Hertz – Mindlin with JKR),并以 65Mn 钢作为开沟器材料。土壤粘结参数不易获取,为使土壤粘结模型能够表征土壤实际力学特性,参考文献[9]确定离散元仿真参数,如表 2 所示。

3.2 仿真模型建立

根据播种深度、开沟器尺寸确定土壤模型尺寸为 600 mm × 300 mm × 210 mm。并将开沟器三维图转为.igs 格式,导入 EDEM 软件,建立开沟器与土壤的互作模型,设置开沟深度为 40 mm,仿真步长为 1×10^{-6} s,网格单元尺寸为 2.5 倍最小颗粒半径,仿真模型图如图 11 所示。

3.3 评价指标测定

为对开沟器的作业效果进行综合评价,单因素仿真试验评价指标包括开沟深度稳定系数和回土深度。为更加准确地测量评价指标,在排种管内添加虚拟平面作为颗粒工厂,设置初始下落速度为 0.83 km/h、半径为 1 mm 的颗粒来模拟牧草种子排种过程^[24-25],颗粒工厂与开沟器一同运动。

仿真完毕后,通过 EDEM 后处理界面中的 Clipping 功能,截取种沟截面,切片厚度为 2 mm,并利

表 2 离散元模型参数

参数	数值
土壤密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 300
65Mn 钢密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 865
土壤颗粒半径/mm	2.5
土壤剪切模量/Pa	1.0×10^6
65Mn 钢剪切模量/Pa	7.9×10^{10}
土壤泊松比	0.35
65Mn 钢泊松比	0.30
土壤-65Mn 钢静摩擦因数	0.60
土壤-土壤静摩擦因数	0.45
土壤-65Mn 钢恢复系数	0.60
土壤-土壤恢复系数	0.60
土壤-65Mn 钢动摩擦因数	0.05
土壤-土壤动摩擦因数	0.21
土壤颗粒间临界法向应力/Pa	5.5×10^5
土壤颗粒间临界切向应力/Pa	5.3×10^5
土壤颗粒间单位面积法向刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	5.3×10^8
土壤颗粒间单位面积切向刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	4.5×10^8
土壤颗粒间表面能/($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)	10
土壤-65Mn 钢表面能/($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)	3

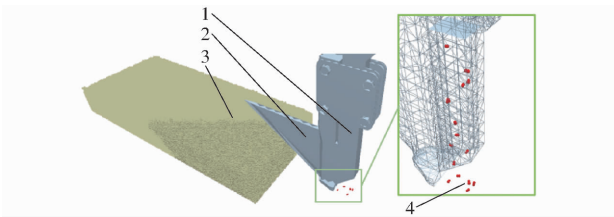


图 11 仿真模型图

Fig. 11 Simulation model diagram

1. 导种管 2. 开沟器 3. 土壤颗粒 4. 牧草种子

用 selectin 模块中的 partical selection 功能,以速度为指标对种沟截面中回流土壤颗粒与未扰动土壤颗粒加以区分,再通过 Manual section 功能将种子颗粒及距离种子颗粒垂直方向最长的回流土壤颗粒以.csv 表格格式将坐标信息导出,二者纵坐标的差值作为开沟器回土深度。开沟深度则是种子颗粒与水平面的纵坐标差值,图 12 所示为评价指标提取示意

图。参考农业行业标准 JB/T 11908—2014《农用圆盘开沟机》，开沟深度稳定系数计算公式为

$$\begin{cases} U = 100\% - V \\ V = \frac{S_D}{b} \times 100\% \\ S_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^j (b_i - b)^2}{j - 1}} \end{cases} \quad (16)$$

式中 U ——开沟深度稳定系数，%
 V ——开沟深度变异系数，%
 S_D ——开沟深度标准差，mm
 b ——开沟深度平均值，mm
 b_i ——测量点开沟深度，mm

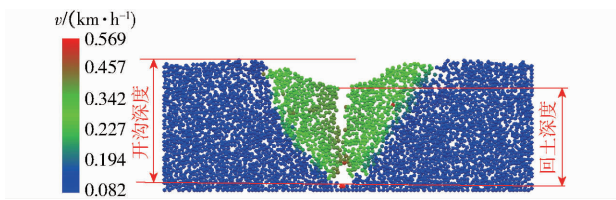


图 12 评价指标提取示意图

Fig. 12 Diagram of test result extraction

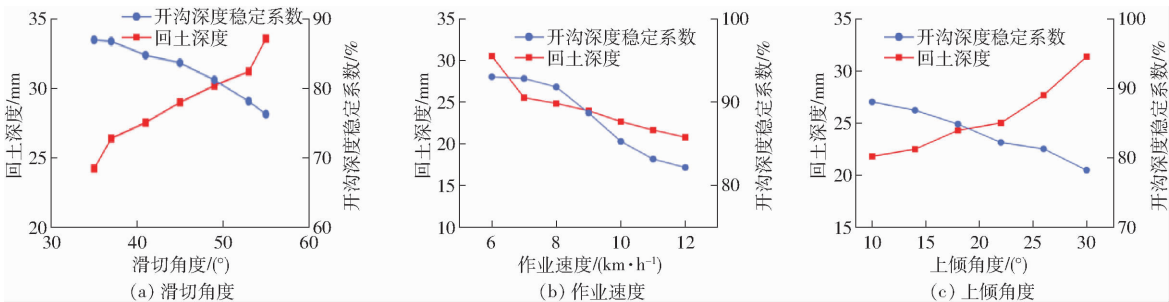


图 13 单因素仿真结果

Fig. 13 Single-factor simulation results

3.4.2 作业速度对各性能指标的影响

由图 13b 可知开沟深度稳定系数随着速度的增加呈现缓慢下降趋势，但均维持在 85% 以上，保持了良好的动态适应性。其原因在于开沟器高速前进时，单位时间内需要推移的土壤体积大幅增加，需要更大的剪切力，使得开沟深度无法保持稳定。随着作业速度的增加回土深度同样呈现下降趋势，是因为随着速度的增加开沟器对种床两侧的土壤扰动增加，导致更多的土壤无法凭借惯性作用回流至种沟。为实现回土深度与开沟深度稳定性的最佳平衡，设置 6 ~ 10 km/h 进行后续的响应面优化试验。

3.4.3 上倾角度对各性能指标的影响

图 13c 显示回土深度随着上倾角度增加而增加，这是由于随着上倾角度的增加，种沟土壤的疏松面积加大，提高了土壤的移动量和变形程度，导致回土深度升高。为了提高开沟深度稳定系数和降低回

j ——测量点总数

3.4 单因素仿真试验结果与分析

为探究滑切角度、作业速度和上倾角度对评价指标的影响，根据 2.2.1 节分析结果设定各单因素范围为：滑切角度 35° ~ 55°、作业速度 6 ~ 12 km/h、上倾角度 10° ~ 30°，研究单一因素对评价指标的影响时，其余因素取中间水平。

3.4.1 滑切角度对各评价指标的影响

如图 13a 所示，随着滑切角度的增加，回土深度呈现上升趋势，开沟深度稳定系数呈现下降趋势，在滑切角度由 41° 上升到 49° 时，开沟深度稳定系数下降较为明显，由 84.85% 下降至 81.27%，为本次试验最显著的变化量。随着滑切角度的增加回土深度随之增加，是因为随着滑切角度增加，刃口对土壤产生了更强的侧向分力，导致土壤更多的向开沟器两侧分散，这种侧向力促使开沟后土壤更容易回流至沟内，从而增加回土深度。结合牧草播种过程中“深开沟，浅回土”的农艺要求，选取回土深度变化较为平缓的滑切角度范围 37° ~ 53° 开展多因素试验。

土深度，在后续的多因素优化试验中将上倾角度的取值范围设为 10° ~ 22°。

3.5 正交试验结果与分析

3.5.1 试验方案

在单因素仿真结果的基础上，采用三因素五水平响应面分析法优化开沟器结构和工作参数，二次回归正交旋转组合试验因素编码如表 3 所示。

3.5.2 试验结果与分析

利用 Design-Expert 软件对结果进行回归分析，试验结果如表 4 所示， X_1 、 X_2 、 X_3 为滑切角度 δ 、作业速度 v 、上倾角度 φ 编码值，方差分析结果如表 5 所示。

分析评价指标中各模型的差异显著性可看出，回土深度 Y_1 回归模型中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1^2 为极显著， X_2X_3 、 X_2^2 为显著，其余项为不显著；开沟深度稳定系数 Y_2 回归模型中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_2^2 为极显著， X_1X_2 为显著，

表 3 试验因素编码
Tab.3 Coding of test factors

编码	因素		
	滑切角度/	作业速度/	上倾角度/
	(°)	(km·h ⁻¹)	(°)
-1.682	37.00	6.00	10.00
-1	40.24	6.81	12.43
0	45.00	8.00	16.00
1	49.76	9.19	19.57
1.682	53.00	10.00	22.00

其余为不显著;将回归方程中不显著交互项剔除后,得到 2 个评价指标与试验因素的二次回归方程为

$$Y_1 = 266.375\,52 - 6.302\,99x_1 - 18.794\,24x_2 - 3.342\,99x_3 + 0.260\,156x_2x_3 + 0.069\,883x_1^2 + 0.635\,624x_2^2 \quad (17)$$

$$Y_2 = 285.656\,68 - 1.734\,50x_1 - 28.325\,98x_2 - 3.446\,83x_3 + 0.205\,282x_1x_2 + 0.944\,379x_2^2 \quad (18)$$

为了探究试验因素之间的交互作用对评价指标的影响,进行交互作用响应曲面分析,如图 14 所示。因交互作用项 X_2X_3 对回土深度 Y_1 影响显著、交互作用项 X_1X_2 对开沟深度稳定系数 Y_2 影响显著,故对二者开展交互作用分析。

作业速度和上倾角度对回土深度的响应面分析

表 5 模型方差分析
Tab.5 Model analysis of variance

方差来源	回土深度 Y_1				开沟深度稳定系数 Y_2			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	305.45	9	18.75	<0.000 1 **	241.02	9	12.98	<0.000 1 **
X_1	40.72	1	22.50	0.000 4 **	46.09	1	22.35	0.000 4 **
X_2	173.83	1	96.04	<0.000 1 **	122.81	1	59.54	<0.000 1 **
X_3	24.48	1	13.53	0.002 8 **	26.44	1	12.82	0.003 4 **
X_1X_2	0.270 1	1	0.149 2	0.705 5	10.79	1	5.23	0.039 6 *
X_1X_3	0.122 5	1	0.067 7	0.798 8	3.82	1	1.85	0.196 5
X_2X_3	9.75	1	5.38	0.037 2 *	1.19	1	0.578 7	0.460 4
X_1^2	39.73	1	21.95	0.000 4 **	0.898 2	1	0.435 5	0.520 8
X_2^2	12.84	1	7.09	0.019 5 *	28.34	1	13.74	0.002 6 **
X_3^2	4.31	1	2.38	0.146 9	0.617 3	1	0.299 3	0.593 6
残差	23.53	13			26.81	13		
失拟	9.41	5	1.07	0.444 1	6.94	5	0.559 1	0.729 6
误差	14.12	8			19.87	8		
总和	328.98	22			267.83	22		

注: * 表示影响显著 (0.01 ≤ P < 0.05); ** 表示影响极显著 (P < 0.01)。

结果如 14a 所示,在一定速度范围内,随着上倾角度减小,回土深度呈现显著降低趋势,因为随着上倾角度的降低,土壤所受向上抛掷分量明显减小,使得回落的土壤量减小。图 14b 为上倾角度为中心水平时,交互因素作业速度和滑切角度对开沟深度稳定

表 4 试验方案与结果
Tab.4 Test scheme and results

编号	试验因素			回土深度/ mm	稳定系 数/%
	X_1	X_2	X_3		
1	-1	-1	-1	25.25	93.15
2	1	-1	-1	28.98	85.22
3	-1	1	-1	16.47	84.74
4	1	1	-1	20.26	81.96
5	-1	-1	1	26.27	88.62
6	1	-1	1	29.82	83.96
7	-1	1	1	21.23	82.26
8	1	1	1	26.19	81.74
9	-1.682	0	0	24.74	85.84
10	1.682	0	0	29.23	80.37
11	0	-1.682	0	31.76	93.71
12	0	1.682	0	18.35	81.40
13	0	0	-1.682	22.28	87.46
14	0	0	1.682	25.69	81.21
15	0	0	0	21.17	86.76
16	0	0	0	22.56	84.37
17	0	0	0	24.37	83.88
18	0	0	0	22.21	84.72
19	0	0	0	21.24	84.40
20	0	0	0	20.87	83.80
21	0	0	0	21.56	81.76
22	0	0	0	22.42	81.48
23	0	0	0	19.62	83.56

系数的响应面,由图可知,随着滑切角度的降低,开沟深度稳定系数升高,并且速度越小,滑切角度所带来的深度稳定系数变化越明显,这是由于在低速条件下开沟器与土壤的作用时间更为充分,使得滑切角度对稳定系数的影响幅度更为剧烈。

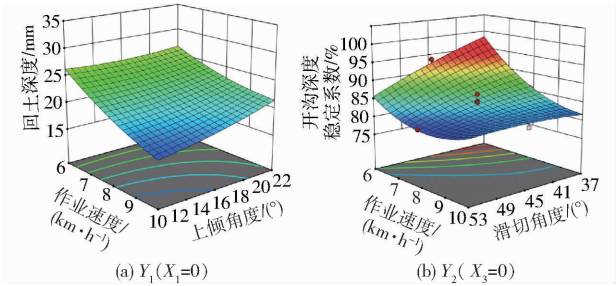


图 14 交互因素对评价指标影响的响应曲面
Fig. 14 Response surfaces of influence of experimental factors on evaluation indicators

3.5.3 参数优化与验证试验

为了得到开沟器最优参数,根据二次回归正交旋转组合试验结果与方程,利用 Design-Expert 软件中的 Numerical 模块以最小回土深度 Y_1 、最大开沟深度稳定系数 Y_2 为目标进行优化求解,约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1 \\ \max Y_2 \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1.682 \leq X_1 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_2 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_3 \leq 1.682 \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

求解得到当滑切角度为 40.24° 、作业速度为 7.60 km/h 、上倾角度为 12.43° 时,开沟器作业性能最佳,此时开沟深度稳定系数为 89.41% ,回土深度为 22.69 mm 。为了验证优化结果的可靠性,在最优参数条件下进行仿真试验,结果得开沟深度稳定系数为 88.64% 、回土深度为 19.43 mm ,验证试验结果接近预测结果,参数优化结果可靠。

3.6 仿生倒 T 型成形块离散元分析对比

为了探究仿生倒 T 型成形块土壤疏松效果,通过离散元仿真分别对配置仿生成形块与普通楔形成形块开沟器的作业效果进行对比分析,设置作业速度为 $6 \sim 10 \text{ km/h}$,开沟深度保持 40.00 mm 。结果如图 15 所示,在不同作业速度下仿生成形块所产生的土壤颗粒最大流速均高于楔形成形块,平均提升幅度为 5.48% ,开沟器作业阻力平均降低 15.88% ,并且随着速度的增加,成形块的土壤流速呈现上升趋势。这是由于仿生成形块的双曲率曲面设计,产生更为平缓的土壤压力梯度,避免了传统楔形前端的突阔流动分离,从而在高速作业时仍能保持良好的土壤流动性。

4 土槽与田间试验

4.1 土槽验证试验

4.1.1 最优组合验证试验

为探究滑刃式倒 T 型开沟器在土壤中的作业

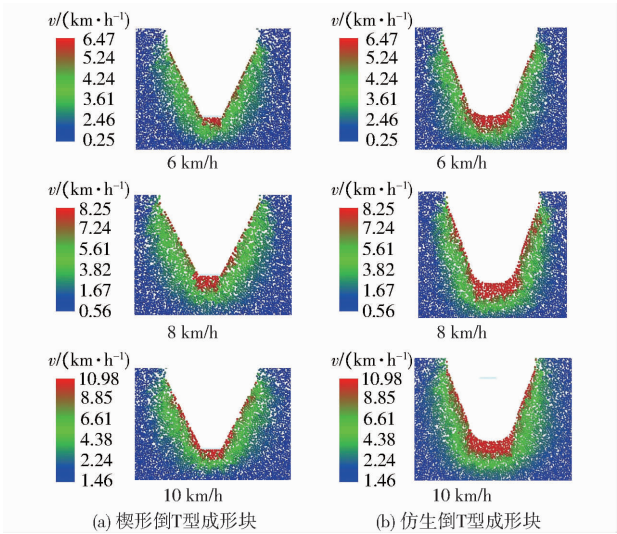


图 15 倒 T 型成形块土壤流速对比图

Fig. 15 Soil flow velocity comparison charts of inverted T-shaped formed blocks

效果及离散元仿真的可靠性。开展开沟器土槽性能试验。试验土壤类型为黑土,容重 1.11 g/cm^3 、坚实度 114 kPa 、土壤含水率为 8.50% 。土槽试验台整体结构如图 16 所示,该试验台包括动力装置、测力装置等,试验重复 5 次,结果取平均值。

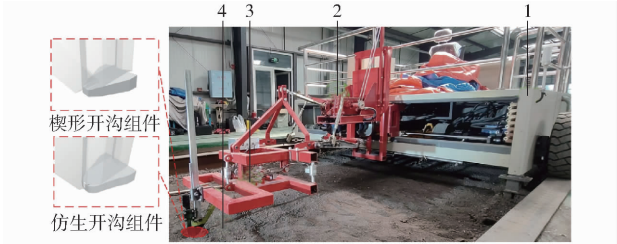


图 16 开沟器土槽性能对比试验

Fig. 16 Test of soil trench performance of openers

1. TCC-4 型电力变频四驱土槽试验车 2. 三点悬挂装置 3. 阻力测量装置 4. 滑刃式倒 T 型开沟器

根据 3.5.3 节确定的开沟器最优参数组合,结合实际试验条件设置滑切角度 40.00° 、作业速度 7.60 km/h 、上倾角度 12.00° ,开沟深度保持 40.00 mm ,开展倒 T 型开沟器土槽验证试验。结果表明在该参数组合下,实测平均回土深度 22.00 mm 、开沟深度稳定系数 87.21% ,两项指标验证结果与仿真预测值相符合,证明了离散元模型及响应面优化结果的可靠性,开沟器具有良好的作业性能。

4.1.2 不同作业参数下的性能对比

在验证最优参数可靠性的基础上,分别对配置仿生成形块与普通楔形成形块的滑刃式倒 T 型开沟器在作业速度 $6 \sim 10 \text{ km/h}$ 下进行对比试验。

如图 17 所示,在整个速度范围内,仿生成形块的作业阻力在不同速度下均低于楔形成形块,平均降阻幅度为 8.66% 。这归因于其仿生轮廓优化了

土壤流动路径,减少了压缩与剪切变形。综上所述,相较于传统楔形成形块,仿生成形块在提高开沟效率及减小作业阻力方面均具有明显优势。

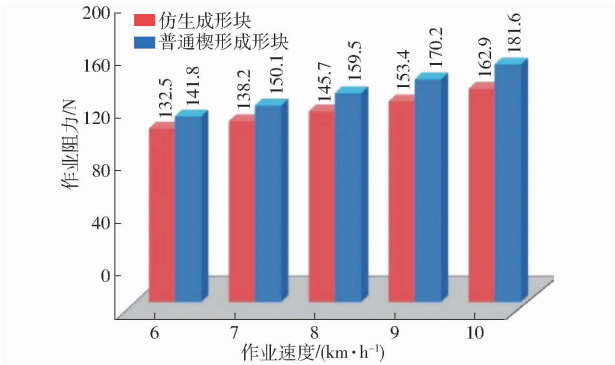


图 17 土槽试验阻力对比

Fig. 17 Comparison of resistance in soil channel tests

4.2 田间验证试验

为验证滑刃式倒 T 型开沟器在草原土壤环境下的作业效果,于 2025 年 4 月在内蒙古自治区通辽市扎鲁特旗查布嘎图苏木(120°56'E,44°55'N)开展田间试验,土壤类型为砂壤土,试验选用的牧草品种为苜蓿。测得试验前田块平均土壤含水率为 11.74%、平均土壤坚实度为 1.48 MPa。

4.2.1 田间试验设计

以拖拉机为动力,通过调整限深轮高度,设置开沟器作业深度 40.00 mm,通过设置拖拉机挡位和油门将机组作业速度范围控制在 6 ~ 10 km/h。回土深度测量:首先测量回土顶端距离水平地面的高度,然后将种子回流土壤去除,测量其距离水平地面的距离,二者差值为回土深度。开沟深度测量:随机选择 10 个开沟测量点,测量苜蓿种子距离水平面的距离,如图 18 所示。



图 18 田间试验

Fig. 18 Field experiment

4.2.2 田间试验结果与分析

在不同作业速度情况下,滑刃式倒 T 型开沟器回土深度及开沟深度稳定系数变化如图 19 所示。由结果可知,随着作业速度的增加,回土深度和开沟深度稳定系数均呈现下降趋势,之所以造成这一现

象,一方面是因为随着速度的增加,开沟器对土壤扰动更为剧烈,造成开沟器的动态负载波动,使得回土深度不稳定;另一方面是因为速度的提高导致更多的土壤向种沟两侧抛掷,降低了土壤回流。总体而言,虚拟仿真结果与田间试验结果基本一致,滑刃式倒 T 型开沟器在速度 6 ~ 10 km/h 范围内,开沟深度稳定系数均高于 80.86%,回土深度均匀小于 26.00 mm,满足牧草播种要求^[26],在草原土壤环境中性能表现良好。

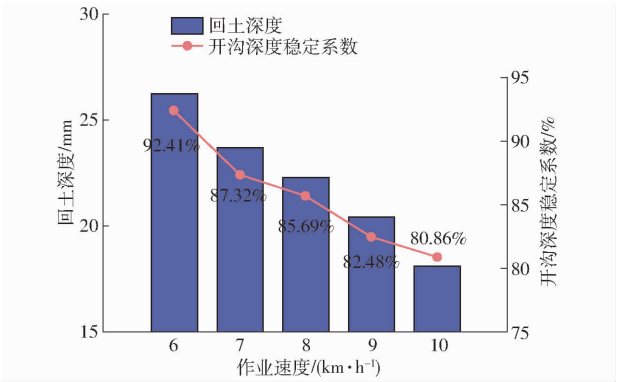


图 19 田间试验数据变化曲线

Fig. 19 Curve of changes in field experiment data

5 结论

- (1) 针对牧草免耕播种机开沟器在草原土壤环境中存在播种深度不均匀、土壤回填过多等问题,设计了一种滑刃式倒 T 型开沟器。通过对开沟器作业过程的力学分析和土壤颗粒的质点动力学分析,确定了影响开沟器回土深度及开沟深度稳定系数的主要因素,根据沙蟒头部对倒 T 型成形块外轮廓进行优化设计,离散元对比仿真表明,与普通楔形倒 T 型成形块相比,最高土壤流速平均提升幅度为 5.48%,仿生倒 T 型成形块作业阻力平均降低 15.88%。
- (2) 基于离散元法建立开沟器仿真模型,通过单因素试验和三因素五水平正交旋转组合试验优化关键参数。优化后参数组合为:滑切角度 40.24°、作业速度 7.60 km/h、上倾角度 12.43°,此时开沟深度稳定系数为 88.64%,回土深度为 19.43 mm。
- (3) 土槽试验表明,在开沟器最优参数组合下开沟深度稳定系数为 87.21%、回土深度为 22.00 mm,与仿真预测值相符;仿生滑刃式开沟器相比传统楔形滑刃式开沟器平均能够降低 8.66% 的阻力。田间试验结果表明,作业速度 6 ~ 10 km/h 范围内,开沟深度稳定系数均高于 80.86%,回土深度均小于 26.00 mm,在草原土壤环境具有良好的开沟性能。

参 考 文 献

[1] 王德成,贺长彬,武红剑,等. 苜蓿生产全程机械化技术研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报,2017,48(8):1-25.
WANG Decheng, HE Changbin, WU Hongjian, et al. Review of alfalfa full-mechanized production technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8):1-25. (in Chinese)

[2] 赵小娜,王斌,王腾飞,等. 补播不同播量燕麦对退化苜蓿草地生产性能和营养品质的影响[J]. 中国草地学报,2024,46(12):67-74.
ZHAO Xiaona, WANG Bin, WANG Tengfei, et al. Effects of different seeding amounts of oat reseeded on production performance and nutritional quality of degraded alfalfa grassland[J]. Chinese Journal of Grassland Science,2024,46(12):67-74. (in Chinese)

[3] 岳丽楠,师尚礼,祁娟,等. 免耕补播对北方退化草地生产力及营养品质的影响[J]. 草地学报,2021,29(11):2583-2590.
YUE Linan, SHI Shangli, QI Juan, et al. Effects of no tillage reseeded on productivity and nutritional quality of degraded grassland in northern China[J]. Journal of Grassland Science,2021,29(11):2583-2590. (in Chinese)

[4] 王俊桦. 三七移栽开沟部件的优化设计与研究[D]. 昆明:云南农业大学,2023.
WANG Junhua. Optimized design and research of trenching components for *Panax notoginseng* transplanting[D]. Kunming: Yunnan Agricultural University,2023. (in Chinese)

[5] 张学宁,尤泳,王得伟,等. 板结羊草草地切根松土镇压机设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊1):135-146,164.
ZHANG Xuening, YOU Yong, WANG Dewei, et al. Design and experiment of root-cutting and subsoiler for compacted *Leymus chinensis* grassland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 1): 135-146,164. (in Chinese)

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

[7] AIKINS K A, BARR J, UCGUL M, et al. No-tillage furrow opener performance: a review of tool geometry, settings and interactions with soil and crop residue[J]. Soil Research, 2020,58:603-621.

[8] 吕杰,尤泳,王德成,等. 天然草地播种开沟器发展状况及展望[J]. 安徽农学通报,2020,26(19):116-118.
LÜ Jie, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Development status and prospects of natural grassland seeding openers[J]. Journal of Anhui Agriculture Bulletin, 2020, 26(19): 116-118. (in Chinese)

[9] 白旭普,王振华,翟改霞,等. 基于离散元法的多功能集成式开沟装置设计[J]. 中国农机化学报,2024,45(6):1-7.
BAI Xupu, WANG Zhenhua, ZHAI Gaixia, et al. Design of multifunctional furrow opening device based on discrete element method[J]. Chinese Journal of Agricultural Mechanization,2024,45(6):1-7. (in Chinese)

[10] 张英俊,周冀琼,杨高文,等. 退化草原植被免耕补播修复理论与实践[J]. 科学通报,2020,65(16):1546-1555.
ZHANG Yingjun, ZHOU Jiqiong, YANG Gaowen, et al. Theory and application of no-tillage reseeded in degraded grasslands [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(16): 1546-1555. (in Chinese)

[11] DU B, BEKELE A, MORRISON J E, et al. Drill furrow opener effects on wheat and sorghum 1028 establishment in no-till fields [J]. Applied Engineering in Agriculture,2004,20(2):179-185.

[12] TOW P, COOPER I, PARTRIDGE I, et al. Rainfed farming systems[M]. Dordrecht: Springer Netherlands,2011.

[13] ZHOU D Y, HOU P F, XIN Y L, et al. Resistance and consumption reduction mechanism of bionic vibration and verification of field subsoling experiment[J]. Applied Sciences, 2021,11(22):10480.

[14] 王成琳,赵则栋,李鹏飞,等. 低阻力三七挖掘复合仿生铲设计与试验[J]. 农业机械学报,2026,57(1):239-251.
WANG Chenglin, ZHAO Zedong, LI Pengfei, et al. Design and experiment of a low-resistance composite bionic digging shovel for *Panax notoginseng* [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(1): 239-251. (in Chinese)

[15] 赵淑红,顾志远,袁溢文,等. 马铃薯曲面式播种开沟器仿生设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(12):32-42,64.
ZHAO Shuhong, GU Zhiyuan, YUAN Yiwen, et al. Bionic design and experiment of potato curved surface sowing furrow opener [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(12):32-42,64. (in Chinese)

[16] 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)

[17] 张学宁,尤泳,王德成,等. 基于离散元法的板结草地破土切根刀优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(11):176-187.
ZHANG Xuening, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Design and experiment of soil-breaking and root-cutting cutter based on

discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 176 – 187. (in Chinese)

[18] 杨秀丽,陈彬,邢航,等. 滑刀开沟-气力引射式液肥雾化侧深施肥装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(16): 13 – 25.
YANG Xiuli, CHEN Bin, XING Hang, et al. Design and experiments of the side-deep fertilization device with sliding-knife furrow opener and pneumatic ejector for a liquid fertilizer atomizer[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(16): 13 – 25. (in Chinese)

[19] 赵淑红,刘佳明,赵国鹏,等. 侧深施肥直斜偏置式免耕播种开沟器设计与试验[J]. 农业工程学报,2024,40(11): 26 – 37.
ZHAO Shuhong, LIU Jiaming, ZHAO Guopeng, et al. Design and experiment of the straight oblique offset no-tillage sowing furrow opener with side deep fertilization[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(11): 26 – 37. (in Chinese)

[20] 赵淑红,赵国鹏,冷明新,等. 与深松铲互作锯齿式灭茬刀设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(4): 151 – 162.
ZHAO Shuhong, ZHAO Guopeng, LENG Mingxin, et al. Design and testing of serrated stubble-breaking blade with interaction type with subsoiler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 151 – 162. (in Chinese)

[21] 龚皓晖. 基于土壤力学模型的深松铲有限元分析与结构优化[D]. 成都:西华大学,2013.
GONG Haohui. Finite element analysis and structure optimization for subsoiling shovel based on soil mechanics model[D]. Chengdu: Xihua University, 2013. (in Chinese)

[22] 廖洋洋,尤泳,王德成,等. 燕麦和箭筈豌豆混合种子离散元模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(8): 14 – 22.
LIAO Yangyang, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Parameter calibration and experiment of discrete element model for mixed seeds of oat and arrow pea[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 14 – 22. (in Chinese)

[23] YANG Xiaolong, ZHENG Long, LI Da. The snake-inspired robots: a review[J]. Assembly Automation, 2022, 42(4): 567 – 583.

[24] 乔德金. 气吹式苜蓿种子排种系统关键装置设计与试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2024.
QIAO Dejin. Design and experimental study on the key device of alfalfa seed pneumatic metering system[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024. (in Chinese)

[25] 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]. Fujian: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019. (in Chinese)

[26] 中国农业机械学会. 牧草免耕播种机: T/NJ 1359—2023[S]. 北京:中国农业机械学会,2023.

(上接第 66 页)

[18] 王金峰,杨东泽,王震涛,等. 水稻秸秆双轴深埋还田机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(4): 21 – 30.
WANG Jinfeng, YANG Dongze, WANG Zhentao, et al. Design and experiment of rice straw biaxial deep-buried returning machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 21 – 30. (in Chinese)

[19] 郑侃,李宇飞,夏俊芳,等. 开沟旋耕机渐变螺旋升角轴向匀土刀辊设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(5): 63 – 73.
ZHENG Kan, LI Yufei, XIA Junfang, et al. Design and experiment of land leveling blade roller of ditching and rotary tiller with gradual spiral angle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 63 – 73. (in Chinese)

[20] 祝英豪,张居敏,曾荣,等. 人字型水旱两用旋埋刀辊设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(4): 49 – 57, 273.
ZHU Yinghao, ZHANG Jumin, ZENG Rong, et al. Design and experiment of herringbone type rotary blade roller for burying stubble in paddy field and dry land[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 49 – 57, 273. (in Chinese)

[21] 王金武,唐汉,王金峰,等. 悬挂式水田单侧修筑埂机数值模拟分析与性能优化[J]. 农业机械学报,2017,48(8): 72 – 80.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng, et al. Numerical analysis and performance optimization experiment on hanging unilateral ridger for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 72 – 80. (in Chinese)

[22] 夏进启,闫龙,詹华,等. 表面涂层厚度对旋耕刀功耗的影响及优化[J]. 农业工程学报,2025,41(8): 39 – 48.
XIA Jinqi, YAN Long, ZHAN Hua, et al. Influence and optimization of surface coating thickness on the power consumption of rotary blades[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(8): 39 – 48. (in Chinese)