

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.06.001

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): 01-07

Bai Xupu, Wang Zhenhua, Zhai Gaixia, et al. Design of multifunctional furrow opening device based on discrete element method [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(6): 01-07

基于离散元法的多功能集成式开沟装置设计*

白旭普¹, 王振华², 翟改霞², 吴海华¹, 周海燕³, 杨葆华¹

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京市, 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院有限公司, 呼和浩特市, 010010; 3. 土壤植物机械系统技术国家重点实验室, 北京市, 100083)

摘要:针对牧草免耕播种机进行退化草原补播作业时存在土壤扰动明显、播种深度不均匀、种沟保墒能力差等问题,设计一款集切根、开沟、回土功能于一体的多功能集成式开沟装置。该装置采用平面圆盘破土切根,随后采用倒“T”型开沟器形成结构稳定的种沟并清理种子周围土壤内的根茎,最后由回土机构将开沟过程中被挤压至地表的土壤回填至种沟内对种子进行掩埋。采用离散元法辅助开沟装置设计,选用 Hertz-Mindlin with JKR 接触模型创建土壤离散元模型。通过离散元仿真试验确定开沟器连接柄与地面夹角为 90°时作业效果最佳。通过分析回土机构工作过程受力情况,确定仿形机构弹簧刚度系数为 0.6 N/mm,弹簧初始压力为 60 N。开展田间试验与离散元仿真试验检验多功能集成式开沟装置作业效果,试验结果表明该装置最佳作业速度范围为 0.8~1.2 m/s;作业过程土壤扰动较小,侧垄宽不超过 50 mm;开沟深度稳定可控,种沟深度波动不超过 5 mm;回土机构作业效果良好,有助于改善种沟保墒能力。

关键词:开沟装置;离散元法;草原补播;开沟器;回土机构

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 2095-5553 (2024) 06-0001-07

Design of multifunctional furrow opening device based on discrete element method

Bai Xupu¹, Wang Zhenhua², Zhai Gaixia², Wu Haihua¹, Zhou Haiyan³, Yang Baohua¹

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing, 100083, China;

2. Hohhot Branch of Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Co., Ltd., Hohhot, 010010, China;

3. State Key Laboratory of Soil Plant Machinery System Technology, Beijing, 100083, China)

Abstract: In view of the problems such as obvious soil disturbance, undulation of seeding depth and poor moisture retention capacity of furrow when no-tillage seeder is applied to reseeding of degraded grassland, a multifunctional furrow opening device is designed, which integrates functions of cutting roots, opening furrows and returning soil. A flat disc is used to break the soil and cut the roots. Then an inverted T-furrow opener is applied to form a stable furrow and clean the roots around the seeds. In the final stage, the soil-returning mechanism is applied to bury the seeds with the soil that has been squeezed out of the ground during the furrow opening process. The discrete element method was used to assist the design of the multifunctional furrow opening device. Hertz-Mindlin with JKR contact model was applied to create a discrete element soil model. The results of discrete element method simulation showed that the best operation effect of inverted T-furrow opener was achieved when the connecting shank was vertical. Analyzing the force of the soil-returning mechanism, the stiffness coefficient of the spring was determined to be 0.6 N/mm, and the initial pressure of the spring was determined to be 60 N. Field experiment and discrete element simulation test were carried out to verify the operation effect of the multifunctional integrated trenching device. The test results show that the optimal operating speed range of the device is 0.8-1.2 m/s. The soil disturbance was small and the side ridge width was not more than 50 mm. The grooving depth is stable and controllable, and the fluctuation of the grooving depth does not exceed 5 mm. The operation effect of soil return mechanism is good, which is helpful to improve the soil moisture retention ability of planting ditch.

收稿日期: 2022 年 9 月 8 日 修回日期: 2023 年 2 月 10 日

* 基金项目: 国有资本经营预算项目(GZ202006)

第一作者: 白旭普, 男, 1998 年生, 河北邯郸人, 硕士研究生; 研究方向为农牧业机械化工程。E-mail: xzcf201608@163.com

通讯作者: 王振华, 男, 1975 年生, 内蒙古通辽人, 博士, 研究员, 硕导; 研究方向为农牧业机械。E-mail: wzhh2008@yeah.net

Keywords: furrow opening device; discrete element method; prairie reseeding; furrow opener; soil-returning mechanism

0 引言

近年来,由于气候变暖、病虫害、超载放牧等原因,草原退化现象日益严重,改良退化草原已成为当前一项亟待解决的任务^[1]。使用免耕播种机开展补播作业是目前最常用的退化草原改良手段之一^[2]。播种机开沟效果对种子成活率影响显著。为改善开沟效果,研究人员对开沟部件进行深入研究,发明铲式^[3]、凿式^[4]、芯铤式^[5,6]、滑刀式^[7]、弯柄式^[8]、双圆盘式^[9]等多种开沟器,并通过大量试验对各类开沟器的作业特点和作业参数进行分析^[10,11]。虚拟仿真技术和参数化设计的应用使开沟装置整体结构与局部曲线更加符合力学原理^[12]。近年来,研究人员将仿生学应用于开沟装置结构与优化,在减小开沟阻力、增强入土能力等方面取得较大进展^[13-16]。退化草地土壤表层较硬,土壤肥力下降,保墒能力差,且内含大量杂乱分布的植物根茎。现有开沟装置多针对农田作业环境设计,应用于退化草原补播作业时会出现土壤扰动明显、播种深度不均匀、种沟保墒能力差等问题,不利于牧草种子发芽生长。

针对上述问题,本文采用理论分析、离散元仿真、试验验证相结合的方法,研发一款具备切根、开沟、回土三项功能的多功能集成式开沟装置,以期改善草原补播作业效果,减小开沟作业对草原土壤环境的破坏。

1 整体结构与工作原理

草原免耕补播机多功能集成式开沟装置由切根圆盘、倒“T”型开沟器、回土机构、排种管及安装架组成,结构如图1所示。

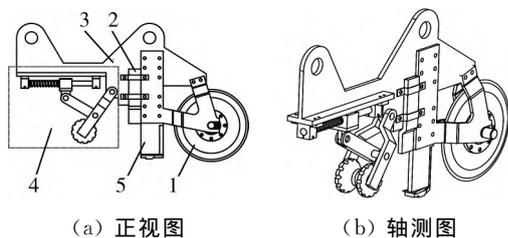


图1 多功能集成式开沟装置结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multifunctional furrow opening device

1.切根圆盘 2.排种管 3.安装架 4.回土机构 5.倒“T”型开沟器

切根圆盘置于开沟装置前端,对开沟路径上的植被及其根茎进行纵向切除,同时在土壤中形成一道较窄的沟壑,可避免开沟器缠草,减小开沟器前进阻力。倒“T”型开沟器沿切根圆盘形成的沟壑进行二次开沟,形成结构稳定的种沟,有助于控制播种深度,降低晾籽率。切根圆盘与开沟器之间距离极短,切根与开沟衔接流畅,

作业轨迹重合度高,有助于降低作业阻力^[17]。种子经位于开沟器后方的排种管排出落入种沟。回土机构前进过程中下压被开沟器抬升的土壤,同时将被开沟器挤压出地面的细碎土壤回填至种沟内对种子进行掩埋,以改善镇压效果,提高种沟保墒能力。

2 土壤离散元仿真模型的创建

2.1 接触模型的选取

本文在离散元分析软件 EDEM 环境下创建虚拟土槽对开沟装置作业过程进行仿真,以分析开沟装置作业特点,优化设计方案。草原土壤土质紧实,具有一定黏性,可表现出显著的塑性行为。根据草原土壤特点,参考软件内置 NonCompressible Sticky Material 材料模型,本文土壤颗粒选用单圆球模型,并选用 Hertz-Mindlin with JKR 接触模型创建土壤离散元模型。Hertz-Mindlin with JKR 模型强调颗粒表面能的作用,可对颗粒黏连、团聚情况进行仿真,能够真实反映退化草原土壤特点^[18]。

为减小土壤容器对仿真过程的影响,土壤容器材质与土壤颗粒材质保持一致,容器与土壤颗粒间接触模型与土壤模型内部颗粒间接触模型保持一致。本文选用 65 Mn 作为机具材料,并采用 Hertz-Mindlin with JKR 模型作为机具与土壤间接触模型以反映土壤黏性对开沟过程的影响。

2.2 土壤模型关键参数设置

结合文献资料与土壤样本试验测试数据初步确定离散元仿真参数,在此基础上通过土壤堆积角试验检验土壤模型仿真程度并优化模型参数,使土壤模型的力学特性更加接近真实土壤,以保证仿真结果的可靠性。

从田间采集 0~100 mm 深度范围内土壤样本开展研究。采样地土壤较为紧实,土壤样本中含有较小团块及少量细碎植物根茎。采用烘干法测定土壤含水率,共进行 10 组试验。按照干基含水率公式计算土壤水分含量,测得土壤样本含水率平均值为 13.3%,平行测定结果相差不超过 0.3%。开展土壤堆积角试验,将土壤样本存放于圆柱体容器内,缓慢抬升容器使土壤由容器底部自然下落,待土壤堆积稳定后测量土壤堆积角。共进行平行试验 10 次,计算土壤样本堆积角平均值为 30.7°,标准差为 3.1°。

通过查阅资料^[19-21],结合土壤样本试验数据初步确定仿真参数。参照土壤堆积角试验创建试验装置模型并开展仿真试验,如图 2(a)、图 2(b)所示。将土壤

模型堆积角与现实土壤进行对比,根据对比结果对仿真参数进行调整,记录最佳参数组合。经调整的土壤模型堆积角为 28.3° ,与现实土壤堆积角相差仅 2.4° ,如图 2(c)、图 2(d)所示。最终确定的各项仿真参数如表 1 所示。

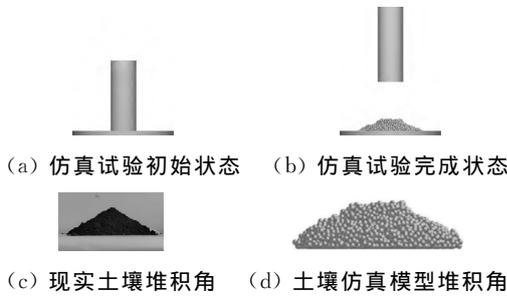


图 2 土壤堆积角试验
Fig. 2 Experiments of angle of repose of soil

表 1 离散元仿真参数设置

Tab. 1 Parameters of discrete element method simulation

参数	数值
土壤泊松比 ν_1	0.4
土壤密度 $\rho_1 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 600
土壤剪切模量 G_1 / Pa	1×10^6
土壤颗粒半径 r / mm	4
65Mn 泊松比 ν_2	0.29
65Mn 密度 $\rho_2 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 861
65Mn 剪切模量 G_2 / Pa	7.9×10^{10}
土壤—土壤恢复系数	0.55
土壤—土壤静摩擦系数	0.3
土壤—土壤滚动摩擦系数	0.1
土壤—65Mn 恢复系数	0.6
土壤—65Mn 静摩擦系数	0.5
土壤—65Mn 滚动摩擦系数	0.05
土壤—土壤表面能 $/(\text{J} \cdot \text{m}^{-2})$	10
土壤—65Mn 表面能 $/(\text{J} \cdot \text{m}^{-2})$	3

2.3 创建虚拟土槽

根据播种深度、种沟间距、机具尺寸确定土壤模型尺寸(长×宽×高)为 $1\ 200\ \text{mm} \times 300\ \text{mm} \times 120\ \text{mm}$ 。在软件环境中创建 $1\ 200\ \text{mm} \times 300\ \text{mm} \times 200\ \text{mm}$ 的无盖几何体作为土壤容器。在几何体顶部创建 $1\ 200\ \text{mm} \times 300\ \text{mm}$ 矩形颗粒工厂生成土壤颗粒。颗粒生成完毕后,经平整形成 $1\ 200\ \text{mm} \times 300\ \text{mm} \times 120\ \text{mm}$ 土壤颗粒结合体。至此,虚拟土槽创建完成,如图 3 所示。



图 3 虚拟土槽
Fig. 3 Virtual soil bin

3 关键部件设计

3.1 切根圆盘设计

常见切根圆盘有缺口圆盘、波纹圆盘、平面圆盘、凹面圆盘等。本文选用受力平稳的平面圆盘开展切根作业。切根圆盘如图 4 所示,直径 $300\ \text{mm}$,切根深度可达 $100\ \text{mm}$,圆盘两面为光滑平面,最大程度降低工作阻力,减小土壤扰动。圆盘边缘采用内凹形曲线设计,以保证刃口锋利,增强破土能力和切割能力。

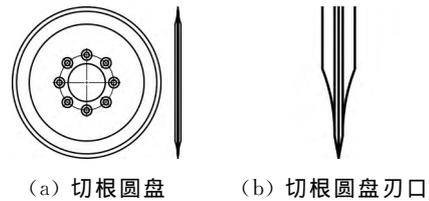


图 4 切根圆盘结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of root-cutting disk

3.2 倒“T”型开沟器设计

3.2.1 倒“T”型开沟器结构及工作原理

倒“T”型开沟器由连接柄、切根刀片及成型块三部分组成,装配后三者前端 45° 刃口重合,开沟器整体为对称结构,形如倒立字母“T”,如图 5 所示。开沟深度可达 $100\ \text{mm}$ 。

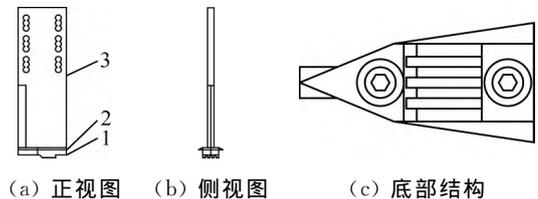


图 5 倒“T”型开沟器结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of inverted T-furrow opener
1.成型块 2.切根刀片 3.连接柄

连接柄挤压前进路径上的土壤形成种沟。成型块位于开沟器底部,能够将种沟侧壁土壤向两侧挤压,清除种子周围的植物根茎,降低种子生存压力。成型块底部的条纹设计可以起到破碎土块,压实种沟的功能。切根刀片位于连接柄和成型块之间,两侧刀刃部分超出成型块边缘,前进过程中可以对成型块挤压的根茎进行切除。成型块对切根刀片具有固定支撑的作用,能够增强刀片的抗弯折能力,延长刀片使用寿命。

3.2.2 倒“T”型开沟器连接柄倾角的选取

开沟器连接柄与地面的夹角对开沟作业效果具有显著影响。为确定连接柄最佳安装倾角,本文对不同倾角连接柄作业过程中的受力情况与土壤扰动情况进行离散元仿真。连接柄与开沟器前进方向的夹角包括锐角、直角、钝角三种情况,与之对应建立 60° 、 90° 、 120° 三种夹角的连接柄模型,如图 6 所示。将模型导

入离散元软件,在虚拟土槽中进行仿真试验,开沟深度为 60 mm,前进速度为 1 m/s,连接柄刀刃于 Y-Z 平面内平移,前进方向为 Y 轴正方向。定时采集连接柄模型运动过程的受力情况,计算得到模型稳定运动过程受力平均值如表 2 所示。开沟过程土壤扰动情况如图 7 所示。

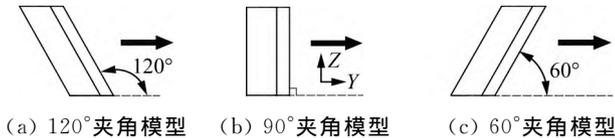


图 6 连接柄仿真模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of connecting shank simulation models

表 2 连接柄开沟过程受力分析

Tab. 2 Force of connecting shanks during furrow opening

连接柄 夹角/(°)	X 方向 分力/N	Y 方向 分力/N	Z 方向 分力/N	合力 /N
120	0.26	-74.30	19.07	77.05
90	-1.11	-82.84	31.27	88.76
60	-0.30	-94.79	51.46	108.25

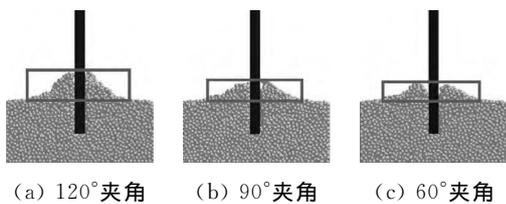


图 7 连接柄土壤扰动情况对比

Fig. 7 Comparison of soil disturbance between different connecting shanks

仿真结果表明,连接柄与前进方向夹角为 120°时工作阻力最小,60°时工作阻力最大。120°夹角连接柄工作过程土壤扰动最大,易造成明显翻土。90°与 60°夹角连接柄对土壤的抬升较小,可有效避免翻土。综合对比三种连接柄受力情况与土壤扰动情况,最终采用连接柄与开沟器前进方向夹角为 90°的设计方案。

3.2.3 切根刀片设计

草原退化过程中草层结构发生变化,优质牧草逐渐被杂草替代。根茎型及根茎疏丛型植物的增多使土壤中根茎数量大增,导致土壤更加紧实,进一步加快草原退化进程。

本文在开沟器中加入切根刀片,开沟同时对种沟两侧的根茎进行横切,以减小种子周围杂草过度生长对种子发芽产生的抑制作用。切根刀片结构如图 8 所示,切根刀片前端为 45°尖角,边缘不开刃,装配后与成型块前端重合。刀身后半部分采用渐宽式设计,边缘开刃,可对种沟两侧根茎进行切除。刀刃与刀片前进方向夹角仅 8.5°,以降低刀片前进阻力,增强刀片

滑切效果,便于切割柔韧性较强的根茎。刀身最宽部分仅 46 mm,将横切范围限定于种子周围的小片区域,以避免大面积翻土。

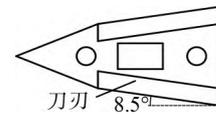


图 8 切根刀片结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of root-cutting blade

3.3 回土机构设计

3.3.1 回土机构组成及工作原理

回土机构由回土辊及仿形机构组成,结构如图 9 所示。

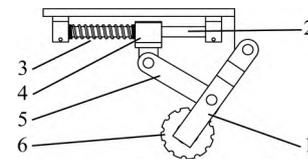
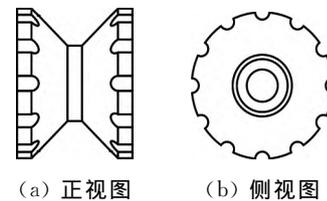


图 9 回土机构示意图

Fig. 9 Schematic diagram of soil-returning mechanism

1. 摇杆 2. 滑轨 3. 弹簧 4. 滑块 5. 连杆 6. 回土辊

回土辊整体呈沙漏型,圆辊边缘分布凹槽以加强滚动效果,如图 10 所示。回土辊滚动前进过程中可以下压开沟作业抬升的土壤,并将种沟两侧被开沟器挤压出地面的土壤汇聚至种沟内对种子进行掩埋,进而改善镇压效果,提高种沟保墒能力。



(a) 正视图 (b) 侧视图

图 10 回土辊结构示意图

Fig. 10 Schematic diagram of soil-returning roller

仿形机构采用摇杆滑块原理,由摇杆、连杆、滑块、滑轨、弹簧等部件组成,仿形高度范围达 100 mm,可使回土机构适应不同播种深度,保持回土辊压紧地面,避免地形变化与作业过程中的障碍物对机具造成损伤。

3.3.2 确定回土机构关键参数

为保证回土机构作业效果,需要弹簧具有一定的初始压力并且达到一定劲度系数。通过离散元仿真试验模拟回土辊工作过程,测得回土辊受土壤作用力的水平方向最大分量为 10.5 N,竖直方向最大分量为 31.1 N。为保证回土效果,将仿真数据扩大 50%作为设计标准,要求回土机构正常工作状态下,回土辊对土壤竖直压力至少为 46.65 N,水平推力至少为 15.75 N,据此确定弹簧劲度系数与初始压力,保证回土辊贴紧土壤并能够推动土壤运动。回土机构作业过程中仿形机构的受力情况如图 11 所示。

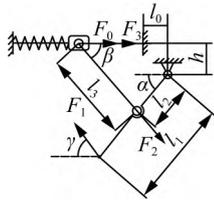


图 11 仿形机构受力分析图

Fig. 11 Force analysis diagram of profiling mechanism

仿形机构的结构尺寸满足

$$l_3 \cdot \sin\beta = l_2 \cdot \sin\alpha + h \quad (1)$$

式中： l_2 ——连杆摇杆铰接处与摇杆转轴间距离，mm；

l_3 ——连杆长度，mm；

h ——摇杆转轴与滑块初始位置竖直距离，mm；

α ——摇杆与水平面夹角，(°)；

β ——连杆与水平面夹角，(°)。

由力的传递过程可得

$$F_2 = F \cdot \cos\beta = (F_3 + F_0) \cdot \cos\beta \quad (2)$$

式中： F_2 ——连杆对摇杆作用力，N；

F_3 ——摇杆摆动导致的弹簧对滑块压力增长量，N；

F_0 ——弹簧对滑块的初始压力，N；

F ——弹簧压力，N。

由胡克定律可得

$$F_3 = k \cdot d = k \cdot (l_2 \cdot \cos\alpha + l_3 \cdot \cos\beta - l_0) \quad (3)$$

式中： l_0 ——摇杆转轴与滑块初始位置水平距离，mm；

k ——弹簧劲度系数，N/mm；

d ——滑块位移，mm。

为维持摇杆稳定，需要摇杆所受转矩平衡

$$F_2 \cdot l_2 \cdot \sin(\alpha + \beta) = F_1 \cdot l_1 \cdot \sin[180^\circ - (\alpha + \gamma)] \quad (4)$$

式中： l_1 ——摇杆长度，mm；

γ ——回土辊对摇杆作用力与水平面夹角，(°)；

F_1 ——回土辊对摇杆作用力，N。

正常作业状态下，摇杆与水平面夹角处于 $30^\circ \sim 90^\circ$ 。仿形机构各部件的受力情况随摇杆角度变化而发生非线性变化。利用 Matlab 对摇杆处于不同位置时回土作业所需弹簧压力及理论弹簧劲度系数进行计算。不同摇杆倾角下回土作业所需弹簧压力如图 12 所示，弹簧压力最小为 49.41 N，最大可达 120.44 N，对弹簧压力需求最小的位置为摇杆竖直状态，此时滑块位移为零，因此弹簧至少需要 49.41 N 的初始压力。在为弹簧施加 50 N 初始压力的情况下计算摇杆处于不同倾角时回土作业对弹簧劲度系数的理论需求值，避免出现弹簧劲度系数需求值无限大的计算结果。不同摇杆倾角下回土作业对弹簧劲度系数的理论需求值如图 13 所示，对弹簧劲度系数要求最高的位置为摇杆接近竖直状态

时，理论弹簧劲度系数需求值为 0.52 N/mm。由于弹簧初始压力 50 N 足以满足摇杆与水平面夹角接近 90° 时回土作业对弹簧压力的需求，因此曲线末尾部分出现理论弹簧劲度系数骤降的情况。

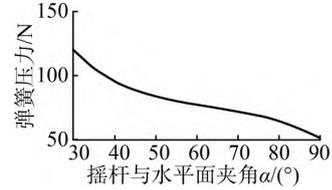


图 12 不同摇杆倾角下回土作业所需弹簧压力

Fig. 12 Demand for spring pressure at different rocker tilt angles

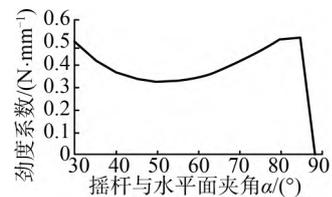


图 13 不同摇杆倾角下回土作业所需弹簧劲度系数

Fig. 13 Demand for stiffness coefficient of the spring at different rocker tilt angles

基于理论计算结果，最终确定弹簧劲度系数为 0.6 N/mm，弹簧初始压力为 60 N，弹簧初始压缩量为 100 mm，以保证摇杆处于正常工作范围内任何位置时，回土辊都能对土壤产生足够的压力与推动力。

4 试验测试

4.1 离散元仿真试验

将多功能集成式开沟装置装配模型导入离散元仿真软件，设定机具前进速度为 1 m/s，开沟深度为 60 mm。在排种管内添加颗粒工厂生成初始下落速度为 1 m/s 的颗粒，模拟气力式排种过程。观察开沟装置的开沟效果、埋种效果以及土壤扰动情况。开沟装置作业过程如图 14 所示，作业效果如图 15 所示。

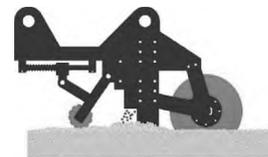
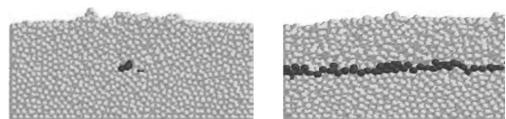


图 14 多功能集成式开沟装置作业过程仿真
Fig. 14 Discrete element method simulation of multifunctional furrow opening device in operation



(a) 种沟横向剖面 (b) 种沟纵向剖面

图 15 多功能集成式开沟装置作业效果

Fig. 15 Operation effect of multifunctional furrow opening device

仿真结果表明,该开沟装置能够形成结构稳定的种沟,有助于控制播种深度。播种连续性良好,晾籽率低。回土效果显著,土壤扰动较小。装置整体作业效果达到预期目标。

调整开沟装置前进速度重复开沟过程离散元仿真试验,探究机具速度对开沟效果的影响。装置速度变化范围为 0.6~1.4 m/s,每组试验速度相差 0.1 m/s。采集开沟过程中机具前进方向所受阻力,计算阻力平均值如表 3 所示。结果表明开沟装置前进速度越快,所受阻力越大。机具速度过快难以保证播种均匀性和连续性。综合考虑工作阻力、作业效果,作业效率等因素,开沟装置最佳作业速度范围为 0.8~1.2 m/s。

表 3 不同作业速度下开沟装置工作阻力

Tab. 3 Table of operating resistance varying with operating speed

开沟装置前进速度/(m·s ⁻¹)	阻力/N	开沟装置前进速度/(m·s ⁻¹)	阻力/N
0.6	126.54	1.1	137.34
0.7	128.38	1.2	139.40
0.8	130.09	1.3	142.28
0.9	132.29	1.4	145.33
1.0	136.18		

4.2 田间试验

试验于呼和浩特市樊家窑试验站开展,将多功能集成式开沟装置样机安装于试验播种机上,播种机前进速度控制在 3.6 km/h 左右。分别进行两组试验,第一组试验回土机构固定,不接触地面,以观察开沟效果;开沟作业完成后,随机选择 20 个取样点测量种沟深度和侧垄宽,分析种沟深度均匀性和机具作业过程土壤扰动。第二组试验回土机构接触地面,以观察回土效果。田间试验场景如图 16 所示。



图 16 田间试验

Fig. 16 Field test

试验数据如表 4 所示。计算种沟深度平均值为 59.8 mm,标准差为 1.36 mm,沟深波动不超过 5 mm。试验证明本文设计的多功能集成式开沟装置能够形成深度均匀的种沟。种沟侧垄宽可控制于 50 mm 以内,证明该装置开沟过程土壤扰动较小,不易造成明显翻土。观察开沟装置作业效果,结果表明倒“T”型开沟器能够精准切除种子周围土壤内植物根茎,同时可有效避免对土壤环境造成大面积破坏;回土

机构回土效果显著,能够起到填埋种沟的作用,有助于提高种沟保墒能力。

表 4 田间试验测量数据

Tab. 4 Data of field test

采集点编号	种沟深度	侧垄宽	采集点编号	种沟深度	侧垄宽
1	61	40	11	58	35
2	62	41	12	58	33
3	60	35	13	61	37
4	60	42	14	62	47
5	62	45	15	59	38
6	60	40	16	60	37
7	59	38	17	59	36
8	58	29	18	61	44
9	59	42	19	60	46
10	58	33	20	59	40

5 结论

1) 针对退化草原土壤环境,设计一款多功能集成式开沟装置,关键作业部件包括切根圆盘、倒“T”型开沟器和回土机构。该装置结构紧凑,可一次性完成切根、开沟、回土作业。

2) 创建土壤离散元模型,通过离散元仿真辅助开沟装置设计。综合运用理论分析、离散元仿真与 Matlab 编程计算等方法,确定开沟器连接柄与地面夹角为 90°,确定回土机构弹簧劲度系数为 0.6 N/mm,弹簧初始压力为 60 N。

3) 田间试验和离散元仿真试验结果表明,该装置最佳作业速度范围为 0.8~1.2 m/s;切根圆盘与倒“T”型开沟器的组合能够形成结构稳定、深度均匀的种沟,沟深波动不超过 5 mm;开沟过程对周边土壤扰动较小,侧垄宽不超过 50 mm;回土机构回土效果显著,有助于提高种沟保墒能力。试验证明该多功能集成式开沟装置整体作业效果良好,有助于改善草原补播作业效果,具有实际应用价值。

参 考 文 献

- [1] 潘庆民,薛建国,陶金,等. 中国北方草原退化现状与恢复技术[J]. 科学通报, 2018, 63(17): 1642-1650.
- [2] 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.
- [3] 刘瑞,李衍军,刘春晓,等. 铲式宽苗带燕麦播种开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 89-96.
Liu Rui, Li Yanjun, Liu Chunxiao, et al. Design and experiment of shovel type wide seedling belt oat seeding furrow opener [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 89-96.

- [4] 王磊, 廖宜涛, 张青松, 等. 油麦兼用型精量宽幅免耕播种机仿形凿式开沟器研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 63-73.
Wang Lei, Liao Yitao, Zhang Qingsong, et al. Design on profiling chisel opener of precision broad width no-tillage planter for rapeseed and wheat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 63-73.
- [5] 贾洪雷, 孟凡豪, 刘立晶, 等. 芯铧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.
- [6] 郭颖杰, 操子夫, 姜姗姗. 基于离散元法芯铧式开沟器的试验研究[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(1): 6-10.
Guo Yingjie, Cao Zifu, Jiang Shanshan. Experimental research on the core ploughshare furrow opener based on the discrete element method [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(1): 6-10.
- [7] 贾洪雷, 郑嘉鑫, 袁洪方, 等. 仿形滑刀式开沟器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 16-24.
Jia Honglei, Zheng Jiabin, Yuan Hongfang, et al. Design and experiment of profiling sliding-knife opener [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(4): 16-24.
- [8] Barr J B, Desbiolles J M A, Fielke J M. Minimising soil disturbance and reaction forces for high speed sowing using bentleg furrow openers [J]. Biosystems Engineering, 2016, 151: 53-64.
- [9] 周训谦, 张建, 肖洁, 等. 基于 LS-dyna 的双圆盘开沟器切削过程的仿真[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(5): 288-291, 307.
Zhou Xunqian, Zhang Jian, Xiao Jie, et al. Simulation of cutting process with double-disc colter based on LS-dyna [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(5): 288-291, 307.
- [10] Singh S, Trpathi A, Singh A K. Effect of furrow opener design, furrow depth, operating speed on soil characteristics, draft and germination of sugarcane [J]. Sugar Tech, 2017, 19: 476-484.
- [11] Aikins K A, Barr J B, 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(7): 603-621.
- [12] 曾智伟, 马旭, 曹秀龙, 等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 1-20.
Zeng Zhiwei, Ma Xu, Cao Xiulong, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 1-20.
- [13] 赵淑红, 刘宏俊, 谭贺文, 等. 仿旗鱼头部曲线型开沟器设计与性能试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 32-39.
Zhao Shuhong, Liu Hongjun, Tan Hewen, et al. Design and performance experiment of opener based on bionic sailfish head curve [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(5): 32-39.
- [14] 马云海, 马圣胜, 贾洪雷, 等. 仿生波纹形开沟器减黏降阻性能测试与分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 36-41.
Ma Yunhai, Ma Shengsheng, Jia Honglei, et al. Measurement and analysis on reducing adhesion and resistance of bionic ripple opener [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(5): 36-41.
- [15] 贾洪雷, 郑健, 赵佳乐, 等. 仿蚯蚓运动多功能开沟器设计及参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 62-71.
Jia Honglei, Zheng Jian, Zhao Jiale, et al. Design and parameter optimization of earthworm-like multi-function opener [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(12): 62-71.
- [16] Wang Y, Xue W, Ma Y, et al. DEM and soil bin study on a biomimetic disc furrow opener [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 156: 209-216.
- [17] Francetto T R, Alono A, Becker R S, et al. Effect of the distance between the cutting disc and furrow openers employed in row crop planting on soil mobilization [J]. Engenharia Agricola, 2021, 41: 148-160.
- [18] 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.
- [19] 张喜瑞, 曾望强, 刘俊孝, 等. 基于离散元法的砖红壤斜柄折翼式深松铲设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 40-49.
Zhang Xirui, Zeng Wangqiang, Liu Junxiao, et al. Design and experiment of lateritic soil inclined handle folding wing subsoiling shovel based on discrete element method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 40-49.
- [20] Horabik J, Molenda M. Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: A review [J]. Biosystems Engineering, 2016, 147: 206-225.
- [21] Barr J B, Ucgul M, Desbiolles J, et al. Simulating the effect of rake angle on narrow opener performance with the discrete element method [J]. Biosystems Engineering, 2018, 171: 1-15.