

冷浸田种床制备起微垄装置设计与试验

蔡家顺¹ 张青松^{1,2} 廖庆喜^{1,2} 燕 桓¹ 肖瀚林¹ 苏仁忠³

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070;
3. 湖北省农业机械化技术推广总站, 武汉 430017)

摘要: 针对因冷浸田水量多、通气性差的特性,导致冷浸田种床制备时厢面易积水,影响水稻生长的问题,设计了一种用于冷浸田种床制备的起微垄装置,主要由滑推式开沟器和压实平整部件组成,可实现起微垄排水、厢面平整作业及侧深施肥功能。基于滑切原理设计了滑推式开沟器推压破土面,其曲面轮廓线起始滑切角 θ_A 为 10° 、终止滑切角 θ_B 为 55° ;根据作业需求确定了滑推式开沟器长度 L_0 为150 mm,压实平整部件仿形调节角度 $\Delta\lambda$ 为 7° 。通过DEM-MBD耦合仿真试验确定了滑推式开沟器宽度为50 mm,压实平整部件仿形弹簧刚度为41.42 N/mm。田间试验结果表明:厢面平整度11.01 mm,微垄沟平均沟深53.25 mm,沟宽48.11 mm,沟深稳定性系数89.56%,沟宽稳定性系数90.64%,研究可为冷浸田种床制备机具设计提供参考。

关键词: 冷浸田种床制备; 起微垄装置; DEM-MBD 仿真; 田间试验

中图分类号: S223.2*3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)11-0176-10 OSID: 

Design and Experiment of Micro-ridge Forming Device for Seedbed Preparation in Cold Waterlogged Paddy Field

CAI Jiashun¹ ZHANG Qingsong^{1,2} LIAO Qingxi^{1,2} YAN Huan¹ XIAO Hanlin¹ SU Renzhong³

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China

3. Hubei Agricultural Mechanization Technology Promotion Station, Wuhan 430017, China)

Abstract: Aiming at the prominent problems that cold waterlogged paddy fields are featured by excessive soil water content and poor aeration performance, which easily lead to surface water accumulation during seedbed preparation operations, further affecting seed germination and restricting the healthy growth of rice seedlings in the later period, a micro-ridging component dedicated to seedbed preparation in cold waterlogged paddy fields was independently developed. The developed component was mainly composed of a sliding-pushing furrow opener and a compacting and leveling part, which can synchronously realize three key functions including micro-ridging and drainage, seedbed surface leveling, as well as side deep fertilization, effectively solving the core technical bottleneck of seedbed preparation in cold waterlogged areas. Based on the sliding cutting principle, the pushing and soil-breaking surface of the sliding-pushing furrow opener was rationally designed, and through theoretical analysis and parameter optimization, the initial sliding cutting angle θ_A and the final sliding cutting angle θ_B of the curved contour were determined to be 10° and 55° , respectively. According to the actual agronomic operation requirements of cold waterlogged paddy fields, the length L_0 of the sliding-pushing furrow opener was set as 150 mm, and the profiling adjustment angle $\Delta\lambda$ of the compacting and leveling part was set to 7° to ensure operational stability. Through DEM-MBD coupled simulation experiments, the optimal width of the sliding-pushing furrow opener was determined as 50 mm, and the stiffness of the profiling spring for the compacting and leveling part was calculated to be 41.42 N/mm. Field experiment results showed that the bed surface

收稿日期: 2026-03-20 修回日期: 2026-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(32572225)、湖北省自然科学基金项目(2025AFB596)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-12)

作者简介: 蔡家顺(2001—),男,博士生,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: 1755278751@qq.com

通信作者: 张青松(1987—),男,教授,博士生导师,主要从事油菜等大田作物机械化生产技术与装备研究,E-mail: qszhang@mail.hzau.edu.cn

evenness reached 11.01 mm, the average depth and width of the micro-ridge ditch were 53.25 mm and 48.11 mm, respectively, and the stability coefficients of ditch depth and width were 89.56% and 90.64%, which all met the agronomic and operational requirements of mechanized ridging in cold waterlogged paddy fields. The research result can provide important technical support and theoretical reference for the design and optimization of seedbed preparation machinery in cold waterlogged paddy fields.

Key words: cold waterlogged paddy field seedbed preparation; microridging device; DEM – MBD simulation; field experiment

0 引言

冷浸田由于长期受水浸渍,其土壤潜育化明显,有着冷、烂、毒、瘦等主要特性^[1]。由于排水不良、土壤温度低、土壤通气性差的问题,导致水稻根系发育不良、分蘖减少、养分吸收差,造成产量低下^[2]。减少种床表面(厢面)积水、增大土壤与空气的接触面积,可加速土壤有机质分解与养分释放,改善种床理化性状,为水稻根系生长与苗期发育提供适宜条件^[3-4]。目前采用传统人工或简易机具作业模式,存在劳动强度大、作业效率低下,且厢面平整度不足、厢面排水效果差等问题。

国内外对种床制备装置和冷浸田增产技术进行了诸多研究。文献[5]开展了水田打浆平地机工作参数优化研究,分析影响规律并获得了最优参数组合。NIPLO 公司研制的 HR30 型机具配备了土壤侧刮板,有效消除拖拉机轮胎压痕从而提高平整精度,通过加压装置与耕深自动调节装置提高了机具适用性;德国雷肯 Karat 系列采用复式作业模式,通过高精度激光调平系统保证厢面平整度误差在 2 cm 以内^[6]。文献[7]开发了一款无需驱动的自动调平水田整地机,可实现土壤细碎处理与秸秆覆盖埋入;文献[8]研发了三悬挂 1PJ-4.0 型水田激光平地机,该机具可通过液压系统控制平地铲显著改善田面平整情况;文献[9]研究试验表明,起垄在短期内会提高土壤还原性物质总量,增施钾肥、锌肥和硅肥会降低土壤还原性物质总量;文献[10]研究表明,冷浸田开沟排渍可降低还原性物质含量,结合优化施肥对提高水稻产量效果明显。目前国内外对冷浸田种床制备研究较少,开发的机具起垄排水能力有待提高。

针对冷浸田终年积水、土壤温度低及排水不良,需要进行起垄排水的生产要求及目前缺乏相关机具的生产现状,本文设计一种适宜于冷浸田作业的种床制备起微垄装置,实现起微垄排水、厢面平整作业同时兼顾侧深施肥功能,确定起微垄装置关键结构参数,开展 DEM – MBD 耦合仿真及田间试验研究,以为冷浸田种床制备机具设计提供参考。

1 总体结构与工作原理

冷浸田水稻起垄联合直播机主要由开沟前犁、旋耕装置、起垄辊、排种装置和施肥装置及冷浸田种床制备起微垄装置组成,其中冷浸田种床制备起微垄装置由滑推式开沟器和压实平整部件组成,其作业质量决定了冷浸田水稻直播种床排水效果。

冷浸田水稻起垄联合直播机作业时,由拖拉机提供动力,开沟前犁破土作业出初步垄沟,旋耕装置细碎种床土壤及埋覆厢面秸秆,起垄辊旋转压实开沟前犁作业出的垄沟沟壁,形成最终垄沟。冷浸田种床制备起微垄装置对旋耕装置作业后的厢面进行处理,滑推式开沟器通过滑切推压松碎土壤作业出厢面的微垄,并同步将颗粒肥料施入微垄的垄沟土壤层内,压实平整部件与滑推式开沟器配合作业,同步对厢面进行压实平整,形成水稻种子着床的平整微垄种床。最后,由排种装置排出的水稻种子落入整理制备好的微垄厢面,完成冷浸田水稻起垄联合直播作业整个过程。冷浸田水稻起垄联合直播机结构组成和工作原理如图 1 所示,主要技术参数如

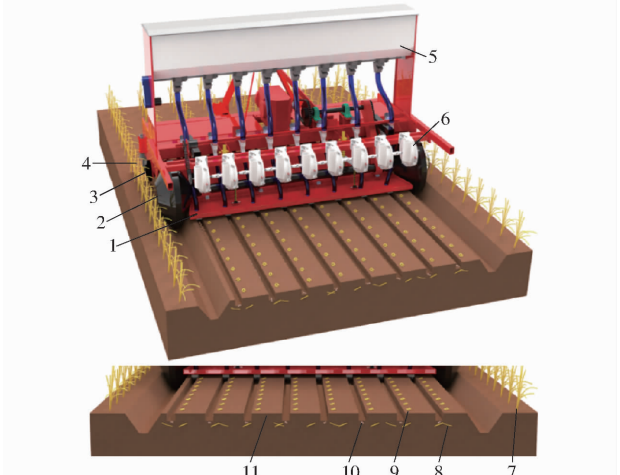


图 1 冷浸田水稻起垄联合直播机结构图

Fig.1 Structural composition of combined ridge-making and direct-seeding machine for cold-irrigated paddy fields

1. 冷浸田种床制备起微垄装置 2. 起垄辊 3. 旋耕装置 4. 开沟前犁 5. 肥箱 6. 排种器 7. 地表留存秸秆 8. 埋覆入土的秸秆 9. 播入微垄厢面的水稻种子 10. 施入微垄沟里的肥料颗粒 11. 微垄垄体

表 1 所示。

表 1 主要技术参数
Tab.1 Main technical parameters

参数	数值
整机外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 350×2 400×1 050
工作幅宽/mm	2 400
作业速度/(km·h ⁻¹)	2~5
旋耕装置转速/(r·min ⁻¹)	220~300
起垄辊转速/(r·min ⁻¹)	120~160

2 关键部件设计与分析

2.1 滑推式开沟器设计

冷浸田种床制备起微垄装置中滑推式开沟器结构决定了微垄沟成型,其结构如图 2(L_0 表示滑推式开沟器长度; L_1 表示滑推式开沟器宽度; L_2 表示滑切整形面工作宽度; D_0 表示进肥口直径; h 表示滑推式开沟器作业深度)所示,主要由推压破土面、滑切整形面和定型面组成,同时滑推式开沟器设有肥料流通通道,作业出微垄沟同时实现肥料深施功能。滑推式开沟器推压破土面和滑切整形面采用滑切原理设计^[11],作业时,推压破土面首先与土壤接触,推压细碎松软土壤至滑推式开沟器两侧,滑切整形面对流动至滑推式开沟器两侧的土壤进行挤压,作业出初步微垄垄沟,最后定型面对微垄沟沟壁进行定型,形成最终稳定的微垄垄沟。滑推式开沟器作业过程中,颗粒肥料经过滑推式开沟器进肥口和出肥口到达微垄垄沟底部土壤层内,实现侧深施肥。

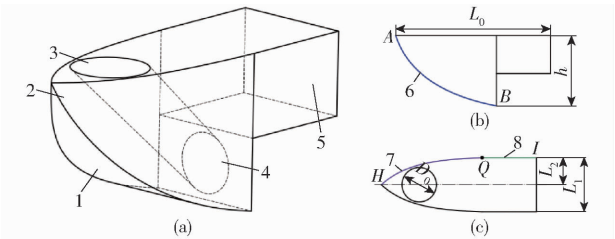


图 2 滑推式开沟器结构示意图

Fig.2 Slope push type furrow maker structure diagrams
1. 推压破土面 2. 滑切整形面 3. 进肥口 4. 出肥口 5. 定型面 6. 推压破土面曲面轮廓线 AB 7. 滑切整形面曲面轮廓线 HQ 8. 定型面曲面轮廓线 QI

2.1.1 推压破土面曲面轮廓线设计

滑推式开沟器推压破土面采用滑切原理设计,其曲面轮廓线采用指数曲线^[12-13],以滑推式开沟器作业前进方向为 x 轴正方向建立坐标系,如图 3 所示。

推压破土面曲面轮廓线 AB 满足方程

$$y = e^{(\cot\theta_B - \cot\theta_A)x/h}$$
 (1)

式中 θ_A ——起始滑切角, (°)

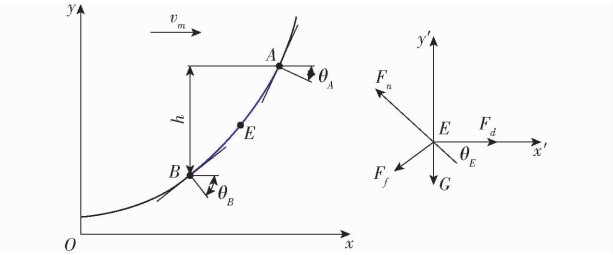


图 3 推压破土面曲面轮廓线分析

Fig.3 Analysis of contour line of soil-breaking surface profile under pressure

θ_B ——终止滑切角, (°)

滑推式开沟器作业深度 h 影响作业后微垄沟沟深和施肥深度。根据农艺要求肥料侧深施深度为 50 mm,考虑到土壤回流和微垄沟排水效果,滑推式开沟器作业深度应大于施肥深度^[14],因此确定滑推式开沟器作业深度 h 为 65 mm。由式(1)可知,推压破土面曲面轮廓线由起始滑切角 θ_A 和终止滑切角 θ_B 确定。

对推压破土面曲面轮廓线 AB 上任意点 E 进行受力分析,建立坐标系,可得

$$\begin{cases} F_n \cos\theta_E + F_f \sin\theta_E = F_d \\ F_n \sin\theta_E = G + F_f \cos\theta_E \end{cases}$$
 (2)

其中 $F_f = \mu F_n$ (3)

由式(2)、(3)解得

$$\theta_E = \arcsin \frac{G + \mu F_d}{(1 + \mu^2) F_n}$$
 (4)

式中 F_n ——土壤对推压破土面的法向力, N
 F_f ——土壤与推压破土面间的摩擦力, N
 F_d ——机具对滑推式开沟器的拉力, N
 G ——滑推式开沟器重力, N
 θ_E ——滑切角, (°)

μ ——土壤与滑推式开沟器的摩擦因数

根据《农业机械设计手册》及文献[15]可知,起始滑切角 θ_A 需大于滑推式开沟器与水田土壤之间的摩擦角 φ ,因此本文起始滑切角 θ_A 取值为 10°。由图 3 可知,从推压破土面轮廓线起始点 A 开始,刃口曲线 AB 上各点的滑切角逐渐增加,由式(4)可知,当 $\theta_E < 90^\circ$ 时,滑切角越大,土壤阻力越小,越有利于破土成形。有研究表明,切割阻力随着滑切角的增大而减小,滑推式开沟器刃口曲线终止滑切角 $\theta_B < 55^\circ$ 时,滑推式开沟器入土阻力最小^[16]。综合考虑,本文确定终止滑切角 θ_B 取值为 55°。

2.1.2 滑推式开沟器长度和宽度确定

土壤颗粒运动至滑推式开沟器两侧区域时,受滑切整形面的挤压作用初步形成微垄沟,然后在定型面约束下成形为微垄沟沟壁。土壤颗粒在滑切整形面和定型面上的运动状态直接决定微垄沟的成型

质量。将土壤颗粒视为散粒体,对其进行分析,假设在开沟过程中开沟器运动速度为匀速运动,耕深保持稳定^[17]。分析土壤颗粒在滑切整形面曲面轮廓线上点 P 以及刚进入定型面曲面轮廓线点 Q 处运动状态,如图 4(F_0 表示土壤颗粒受到滑切整形面摩擦力; F_{N1} 表示压力在接触面方向的分力; F_{N2} 表示压力在作业速度方向的分力)所示。

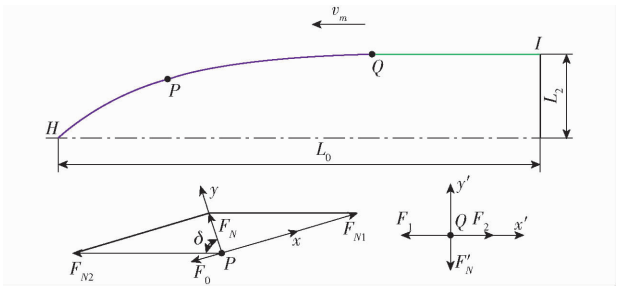


图 4 土壤颗粒在滑切整形面和定型面曲面轮廓线上运动分析

Fig. 4 Analysis of movement of soil particles along contour lines of sliding cutting shaping surface and shaping surface of profile

土壤颗粒在滑切整形面轮廓线上任意点 P 运动时,以作业速度方向切线和法线建立坐标系,其运动状态为

$$\begin{cases} ma_x = F_N (\tan \delta - \tan \varphi) \\ F_N = \frac{mg}{2 \tan \alpha} \end{cases} \quad (5)$$

式中 a_x ——土壤颗粒在滑切整形面轮廓线上 x 方向运动加速度, m/s^2

F_N ——土壤颗粒受到的压力, N

δ ——作业速度方向与法线夹角, $(^\circ)$

mg ——土壤颗粒所受到的重力, N

α ——土壤自然休止角, $(^\circ)$

根据运动学定律,得出土壤颗粒在滑切整形面上的速度 v_x 与位移 x 为

$$\begin{cases} v_x = \frac{gt \tan \delta - \tan \varphi}{2 \tan \alpha} \\ x = \frac{gt^2 \tan \delta - \tan \varphi}{4 \tan \alpha} \end{cases} \quad (6)$$

当土壤颗粒运动到滑切整形面边缘后,会沿着定型面进行运动,此时受到定型面对其的压力 F'_N 、定型面对其的摩擦力 F_1 和边缘土层对其的阻力 F_2 ,以作业速度方向切线和法线建立坐标系,其运动状态为

$$ma'_x = F_N (\tan \varphi_1 - \tan \varphi) \quad (7)$$

式中 a'_x ——土壤颗粒在定型面轮廓线上 x 方向运动加速度, m/s^2

φ_1 ——土壤颗粒之间的摩擦角, $(^\circ)$

将土壤颗粒脱离滑切整形面的最终状态作为土壤颗粒进入定型面的初始状态,求得土壤脱离滑推式开沟器瞬间具有的速度

$$v_x = \sqrt{\frac{L_0 g (\tan \varphi_1 - \tan \varphi) (1 + \sin \delta)}{\tan \alpha}} \quad (8)$$

滑推式开沟器长度影响土壤颗粒速度,也影响着微垄成型质量。长度过大会使得土壤颗粒速度过大,容易从微垄沟壁上滑落导致回流严重;长度过小会使得滑推式开沟器与土壤接触时间过短,不利于微垄沟定型,无法形成稳定微垄沟沟壁。综合考虑确定滑推式开沟器长度 L_0 为 150 mm。

滑推式开沟器的滑切整形面曲面轮廓线按照滑切原理进行曲面设计,其整形面由两组对称曲面构成,故滑推式开沟器宽度 L_1 为单组滑切整形面工作宽度 L_2 的 2 倍。开沟器宽度是影响微垄成型质量的关键参数。滑推式开沟器宽度过大时,微垄宽度过小会影响水稻种子的着床面积;滑推式开沟器宽度过小时,微垄沟沟宽过小影响排水效果。设计滑推式开沟器进肥口直径 D_0 为 30 mm,并参考相关文献中滑推式开沟器宽度与垄距比应小于 1:3 的设计准则^[11],确定滑推式开沟器宽度取值范围为 40 ~ 60 mm。

2.2 压实平整部件设计与分析

压实平整部件由挡土板、仿形弹簧组和耢平板组成,如图 5 所示。挡土板通过铰接方式安装于机具侧板上,耢平板通过合页固定于挡土板后方,仿形弹簧组连接挡土板与耢平板。挡土板和耢平板配合,在仿形弹簧组作用下镇压、平整厢面。

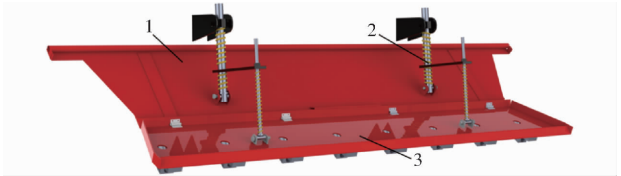


图 5 压实平整部件结构示意图

Fig. 5 Illustration of compacted and leveled component structure

1. 挡土板 2. 仿形弹簧组 3. 耢平板

2.2.1 耢平板设计

耢平板由弯曲面 1 和镇压面 2 组成,如图 6 所示,通过采用两侧安装挡板并焊接加强筋使耢平板高度为 80 mm,确保其几何高度超过最大预期泥浆堆积高度,从而防止耢平板被泥浆淹没而影响作业质量。耢平板对泥浆的作用力斜向下,与土壤作用时间更长对土壤有一定的压平作用,能较好地平整垄面^[18]。耢平板弯曲面 MN 采用渐开线作为弧面设计曲线。

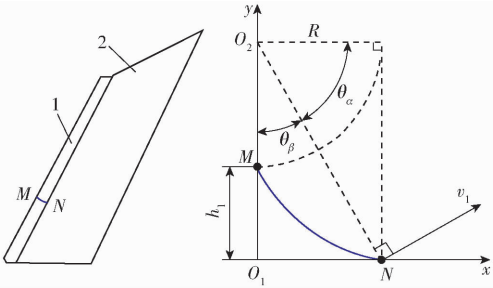


图 6 耢平板及其弯曲面设计

Fig. 6 Flat plate and its curved surface design

1. 弯曲面 2. 镇压面

弯曲面的渐开线主要参数有展开角 θ_β 、压力角 θ_α 、渐开线基圆半径 R 、弯曲面高度 h_1 ，如图 6 所示，形成的曲线弧长对应的基圆圆心 O_2 坐标为 $(0, h_1 + R)$ ，渐开曲线段的端点 M 坐标为 $(0, h_1)$ ， N 坐标为 $(R, h_1 + R - \pi R/2)$ 。分析可得到渐开线段轨迹方程为

$$\begin{cases} x = R(\sin\theta_\beta - \theta_\beta \cos\theta_\beta) \\ y = h_1 + R - R(\cos\theta_\beta + \theta_\beta \sin\theta_\beta) \end{cases} \quad (9)$$

考虑实际作业情况，弯曲面高度 h_1 取值为 60 mm。根据推压理论^[11,14]，当耢平板作业面压力角大于临界摩擦角时，土壤-秸秆混合物将沿曲面结构发生定向移动，防止平整过程土壤与秸秆堆积壅堵。耢平板摩擦角约为 23° ，渐开线压力角最小处位于点 M ，则 $23^\circ < \theta_\alpha < 67^\circ$ ，考虑水田土壤特性， θ_β 取 36° 。

2.2.2 仿形调节角度确定

为适配不同作业环境下的平整作业需求，提升镇压平整部件对复杂地表的自适应作业能力，需确定仿形调节角度。作业过程中，当土壤堆积于挡土板前侧时，仿形弹簧受挤压产生形变，带动挡土板向上转动，仿形调节运动分析如图 7 所示。

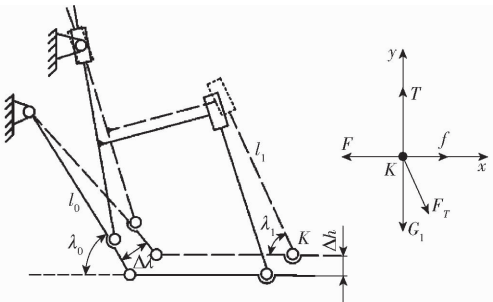


图 7 仿形调节运动分析

Fig. 7 Form-following adjustment motion analysis

压实平整部件可根据土壤堆积量、土壤坚实度的动态变化实现自适应上下浮动，从而完成厢面平整作业。压实平整部件的高度可调性是保障装置作业适应性的关键，通过分析压实平整部件的初始与工作状态，可推导其仿形调节角度公

式为

$$\Delta h = l_0 \sin\lambda_0 - l_0 \sin(\lambda_0 + \Delta\lambda) \quad (10)$$

式中 Δh ——仿形可调节高度，mm

l_0 ——挡土板长度，mm

λ_0 ——挡土板最低点与水平面夹角， $(^\circ)$

$\Delta\lambda$ ——仿形调节角度， $(^\circ)$

仿形可调节高度与以上参数相关，结合整机结构尺寸及运动简图，设计 Δh 为 50 ~ 80 mm、挡土板长度 l_0 为 350 mm、挡土板最低点与水平面夹角 λ_0 为 55° ，代入式(10)得到仿形调节角度 $\Delta\lambda$ 为 7° 。

2.2.3 仿形弹簧参数分析

当机具作业向后抛撒细碎土壤颗粒至耢平板时，耢平板连接仿形弹簧组提供压力对厢面镇压，实现平整作业。为了更好地实现耢平板连接机构仿形功能，仿形弹簧在初始安装时需要有一定的预紧力，以施加一定的压力使耢平板能够有效平整厢面^[19]。取耢平板平整作业时的状态，对仿形弹簧与耢平板连接点 N 进行受力分析。

要使压实平整部件能够稳定对厢面镇压、平整，可得

$$\begin{cases} F_T \sin\lambda_1 + G_1 \geq T \\ F_T = kl_1 \sin(\Delta\lambda) \\ T = pS \end{cases} \quad (11)$$

式中 F_T ——仿形弹簧对耢平板作用力，N

λ_1 ——仿形弹簧与水平面夹角， $(^\circ)$

G_1 ——耢平板重力，N

T ——土壤对耢平板的支撑力，N

k ——仿形弹簧刚度，N/m

l_1 ——仿形弹簧杆长度，m

p ——土壤压强，kPa

S ——耢平板与土壤接触面积， m^2

水田土壤对耢平板的作用力受土壤含水率、作业深度、板体结构等因素影响，考虑简化模型且冷浸田地表高含水率，土壤压强 p 为 5 ~ 20 kPa。前文确定仿形调节角度 $\Delta\lambda$ 为 7° ，所设计耢平板与土壤接触面积 S 为 $0.7 m^2$ ，可知弹簧在极限作业位置下作用力范围为 2 925 ~ 11 700 N，考虑到实际安装尺寸和安全范围，可得弹簧刚度为 12 ~ 60 N/mm。

3 仿真试验

为确定滑推式开沟器宽度，以及研究仿形弹簧刚度系数和作业速度对冷浸田种床制备起微垄装置作业效果的影响，运用 DEM-MBD 耦合方法开展仿真试验。

3.1 DEM-MBD 耦合仿真模型构建

冷浸田种床制备起微垄装置与土壤颗粒发生相

互作用时,EDEM 实时传递颗粒运动轨迹、接触力等离散元数据,RecurDyn 同步反馈部件动力学响应信号(位移、速度、载荷)^[20-21],耦合仿真模型与原理如图 8 所示。

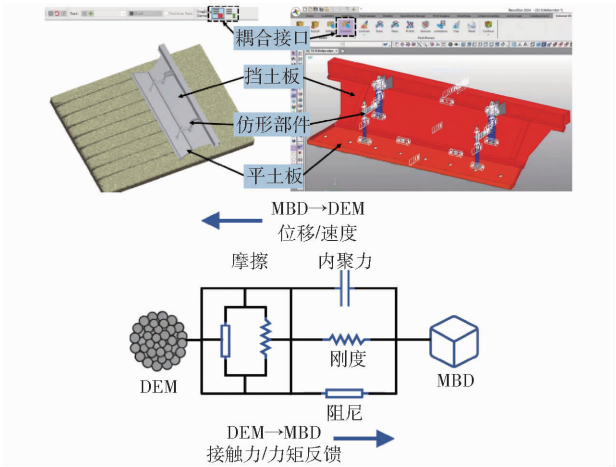


图 8 平整起微垄过程耦合仿真模型和原理图
Fig. 8 Coupled simulation model and principle for leveling and creating micro ridge process

3.1.1 离散元模型

冷浸田由于长期浸水,土壤含水率高、颗粒之间粘结性高且流动性强,故选用 Hertz - Mindlin with JKR 模型模拟冷浸田土壤模型^[22]。建立分层土壤模型模拟实际冷浸田土壤分布情况,通过改变土壤颗粒特性参数来模拟分层土壤不同的含水率、容重和坚实度。0 ~ 5 cm 为上层,5 ~ 25 cm 为下层,上层、下层土壤分别采用半径 1.5 mm 和 2.5 mm 单球形颗粒,以随机分布方式,颗粒尺寸为基准尺寸的 0.8 ~ 1.2 倍,设置仿真时间 1.5 s,建立土壤模型并沉淀颗粒。上层和下层土壤 JKR 表面能分别为 2.5 J/m²和 7 J/m²,生成的土壤颗粒床尺寸(长 × 宽 × 高)为 3 000 mm × 2 600 mm × 400 mm。基本参数和接触参数如表 2 所示^[23-24]。

3.1.2 多体动力学模型

将冷浸田种床制备起微垄装置模型导入 RecurDyn 内,RecurDyn 与 EDEM 设置相同材料参数。在 RecurDyn 中建立约束条件、设置运动副和添加运动等。机架横梁相对地面运动控制方程为 step(time,0,0,0.2 s,850 mm),为避免土壤冲击载荷过大,设置 0 ~ 0.2 s 为线性增速阶段,0.2 s 后进入稳定作业状态。

3.2 试验方案及评价指标

3.2.1 试验方案

为研究滑推式开沟器作业宽度对微垄沟作业质量影响,以滑推式开沟器宽度为试验因素,土壤扰动宽度 M 和土壤扰动比 η 为评价指标,开展单因素试

表 2 仿真模型材料参数

Tab.2 Contact parameters of simulation model

参数	数值	
	上层土壤	下层土壤
密度/(kg·m ⁻³)	1 737	1 860
泊松比	0.327	0.4
剪切模量/Pa	5.62 × 10 ⁵	1.01 × 10 ⁶
土壤恢复系数	0.65	0.66
土壤间静摩擦因数	0.6	0.83
土壤间动摩擦因数	0.25	0.25
钢材-土壤静摩擦因数	0.6	0.6
钢材-土壤动摩擦因数	0.08	0.05
钢材-土壤恢复系数	0.01	0.6

验,滑推式开沟器宽度因素水平值为 40 ~ 60 mm,增量为 5 mm。

为研究压实平整部件对微垄沟作业质量影响,采用中心复合设计(Central composite design, CCD)安排二因素五水平回归旋转组合试验,以构建因素与响应值之间的二次多项式模型,并探究因素间的交互作用。以弹簧刚度和作业速度为试验因素,以厢面平整度、沟宽稳定性系数和沟深稳定性系数为评价指标,应用 Design-Expert 软件生成的水平编码如表 3 所示。

表 3 水平编码

Tab.3 Horizontal encoding

编码	因素	
	弹簧刚度/(N·mm ⁻¹)	作业速度/(m·s ⁻¹)
-1.414	23.03	0.48
-1	28.00	0.60
0	40.00	0.90
1	52.00	1.20
1.414	56.97	1.32

3.2.2 试验评价指标

依据冷浸田土壤特性,结合种床制备要求,选取土壤扰动宽度和土壤扰动比为单因素试验评价指标,选取厢面平整度、微垄沟沟宽稳定性系数和微垄沟沟深稳定性系数作为多因素试验评价指标。

(1)土壤扰动比

在 EDEM 后处理中对仿真试验中稳定工作段进行数据测量,以土壤扰动宽度 M 和土壤扰动比 η 为评价指标,以确定滑推式开沟器宽度。土壤扰动宽度测量方法如图 9 所示。

土壤扰动比计算式为

$$\eta = \frac{M_i - L_2}{L_2} \times 100\%$$

(12)

式中 M_i ——第 i 个测量值,mm

(2)厢面平整度

利用 EDEM 后处理功能在作业稳定段每隔

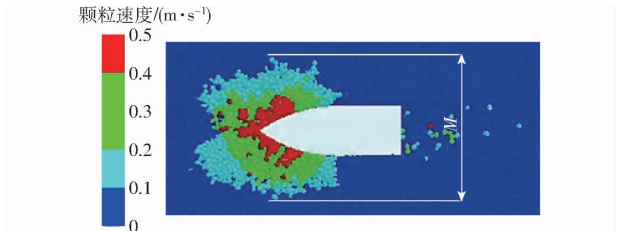


图9 土壤扰动宽度测量

Fig.9 Measurement of soil disturbance width

500 mm 进行取样。在测量区域上方设置参考线,随机选取厢面 10 个点位并测定至参考线的垂直距离,厢面平整度 X_i 采用标准差计算求得。

(3)微垄沟沟宽 W 及沟宽稳定性系数 U_w

在试验所截取的截面,随机对 4 个微垄沟沟型进行沟宽测量。将各截面切片导入 AutoCAD 进行实际比例缩放后,测量微垄沟沟宽数值并记录 W_i ,作业后微垄沟沟宽和沟宽稳定性系数计算公式为

$$\begin{cases} \overline{W} = \frac{\sum_{i=1}^{N_2} W_i}{N_2} \\ U_w = \left(1 - \frac{\sigma_2}{\overline{W}}\right) \times 100\% \end{cases} \quad (13)$$

式中 W_i ——第 i 组沟宽,mm

N_2 ——测量数量

$\overline{W}$ ——沟宽平均值,mm

σ_2 ——标准差

U_w ——沟宽稳定性系数, %

(4)微垄沟沟深 H 及沟深稳定性系数 U_H

参照微垄沟沟宽 W 及沟宽稳定性系数 U_w 测量与计算方法。

厢面平整度 X_i 、微垄沟沟宽 W_i 和微垄沟沟深 H_i 按照图 10 所示方法测量。

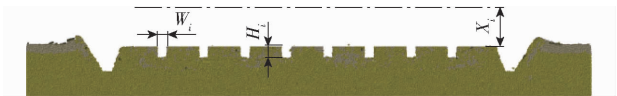


图10 厢面平整度、微垄沟沟宽和沟深测量

Fig.10 Measurement of flatness of box surface, width and depth of micro-hill furrows

3.3 试验结果分析

3.3.1 单因素试验结果分析

滑推式开沟器的推压破土面在工作过程中,通过挤压切削土壤,将土壤推至滑推式开沟器滑切整形面两侧和推压破土面下方,滑切整形面对土壤进一步向两侧挤压开出沟形并对沟壁起到塑形的效果,推压破土面下方的土壤进一步挤压形成沟底。滑切整形面宽度影响微垄沟沟型质量。滑推式开沟器仿真作业过程由图 11 所示,以土壤扰动宽度和土壤扰动比为评价指标来确定滑推式开沟

器宽度。

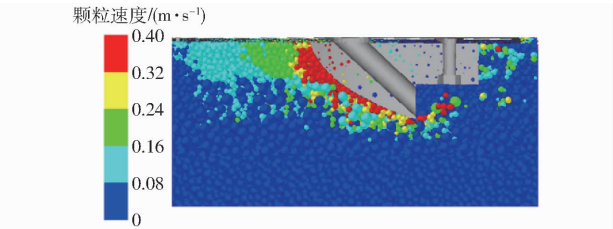


图11 滑推式开沟器仿真作业过程

Fig.11 Simulation of operation process of sliding-push type furrow opener

为探究不同宽度滑推式开沟器起微垄质量,选取宽度在 40 ~ 60 mm 之间,增量为 5 mm 的不同滑推式开沟器开展对比试验,结果如图 12 所示。

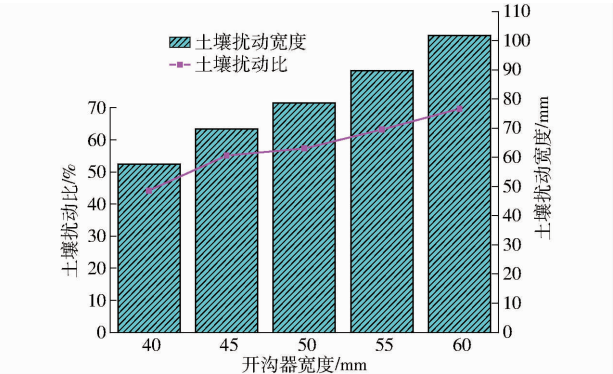


图12 不同宽度下滑推式开沟器土壤扰动情况对比

Fig.12 Comparison of soil disturbance caused by different widths of sliding push-type furrow openers

试验结果表明,滑推式开沟器宽度越小,土壤扰动宽度越小。考虑施肥与微垄沟排水需求,所设计进肥口直径 D_0 为 30 mm,得出滑推式开沟器宽度为 50 mm。

3.3.2 多因素试验结果分析

根据 Design-Expert 10 软件中的响应曲面法进行试验方案设计,试验方案与结果如表 4 所示, X_1 、

表4 试验方案与结果

Tab.4 Test scheme and results

序号	因素		A/mm	B/%	C/%
	X_1	X_2			
1	0	0	14.1	94.0	89.5
2	1.414	0	12.9	95.3	81.7
3	-1.414	0	18.3	90.3	93.8
4	-1	1	17.8	89.6	90.3
5	0	1.414	15.5	90.6	88.0
6	1.414	0	12.1	95.8	83.5
7	-1	-1	16.3	91.2	92.4
8	1	-1	13.7	95.7	82.3
9	0	0	13.5	94.4	90.3
10	0	0	13.8	93.6	90.4
11	0	0	14.3	92.8	91.2
12	0	-1.414	13.3	95.3	86.8
13	1	1	13.9	93.1	85.3

X_2 为弹簧刚度、作业速度因素编码值。

为得到各仿真试验因素、各自平方值以及互相之间作用对于厢面平整度 A 、沟深稳定性系数 B 和沟宽稳定性系数 C 的影响程度,将表 4 所得出试验结果导入软件分析,得到回归模型和显著性方差分析结果。

通过方差分析以及构建二元多项式回归数学模型,得到各评价指标对弹簧刚度和作业速度编码值回归方程

$$\begin{cases} A = 29.45 - 0.63X_1 - 2.35X_2 - 0.09X_1X_2 + \\ \quad 0.01X_1^2 + 4.41X_2^2 \\ B = 77.86 + 0.55X_1 + 8.53X_2 - 0.07X_1X_2 - \\ \quad 0.01X_1^2 - 5.71X_2^2 \\ C = 90.11 - 0.01X_1 + 13.92X_2 + 0.35X_1X_2 - \\ \quad 0.01X_1^2 - 15.01X_2^2 \end{cases}$$

(14)

弹簧刚度、机具作业速度对厢面平整度、沟深稳定性系数和沟宽稳定性系数响应面分析如图 13 所示。

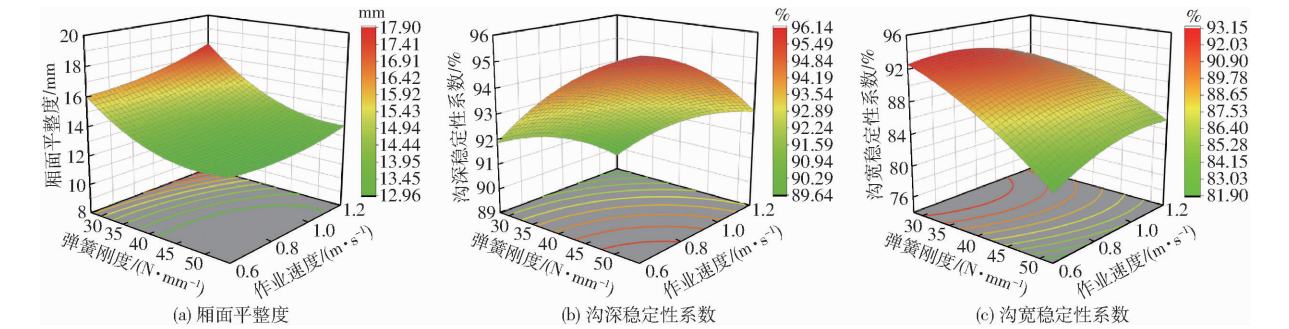


图 13 响应面分析

Fig. 13 Response surfaces analysis

根据公式(14)及图 13 可知:对于厢面平整度,当作业速度不变时,弹簧刚度变化对厢面平整度数值影响明显;当作业速度较大时,随着弹簧刚度的增加会显著提升厢面平整度;当弹簧刚度处于低水平时,作业速度对厢面平整度影响较小。对于沟深稳定性系数,当弹簧刚度处于高水平,作业速度处于低水平时沟深稳定性系数明显增加;当作业速度处于较高水平时,弹簧刚度对沟深稳定性系数的影响较小。对于沟宽稳定性系数,当弹簧刚度处于较低水平时,作业速度对沟宽稳定性系数的影响较小;当作业速度较小时,随着弹簧刚度的增加会显著降低沟宽稳定性作业效果。

对各个参数进行优化求解,确定平整起微垄装置的优化约束条件为

$$\begin{cases} \min A(X_1, X_2) \\ \max B(X_1, X_2) \\ \max C(X_1, X_2) \\ -1.414 \leq X_1 \leq 1.414 \\ -1.414 \leq X_2 \leq 1.414 \end{cases}$$

(15)

在 Design-Expert 软件 Optimization 模块中设定试验因素约束条件,并赋予评价指标相同重要等级,可得出模型参数优化计算结果:弹簧刚度为 41.42 N/mm,作业速度为 0.85 m/s。为验证优化结果准确性,以具有较优运行参数的装置进行仿真试验,得出厢面平整度为 14.17 mm,沟深稳定性系数为 93.52%,沟宽稳定性系数为 90.08%。

4 田间试验

4.1 试验条件与方法

为验证冷浸田种床制备起微垄装置田间作业效果,于 2025 年 6 月在湖北省荆州市丫角村冷浸田工况开展田间试验。试验前对作业工况的土壤物理机械特性进行测量,所用仪器与设备主要包括卷尺(量程 3 m,分度值 1 mm)、直尺(量程 500 mm,分度值 1 mm)、取土环刀(体积 100 cm³)、铝盒、TYD-2 型土壤硬度计(精度 ±0.5%)等。测量结果如表 5 所示。

表 5 土壤物理特性参数

Tab. 5 Soil physical parameters

土层深度/cm	土壤坚实度/ kPa	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	土壤含水率/ %
5	24.60	0.90	54.87
10	73.31	1.03	51.40
15	226.72	1.19	43.56
20	442.41	1.38	37.65
25	1 035.78	1.75	32.19

作业时以东方红 954 型拖拉机为配套动力,在拖拉机慢三挡位下保证机具直线方向前进,开展田间试验。作业后取稳定作业段 30 m 进行相关数据测量,试验指标包括厢面平整度、微垄沟深、微垄沟宽。

4.2 试验结果分析

冷浸田种床制备起微垄装置田间试验效果如图 14 所示。作业后测量厢面平整度 11.01 mm,微

垄沟平均沟深 53.25 mm,微垄沟平均沟宽 48.11 mm,沟深稳定性系数 89.56%,沟宽稳定性系数 90.64%。各项指标均满足冷浸田机械化起垄作业要求。

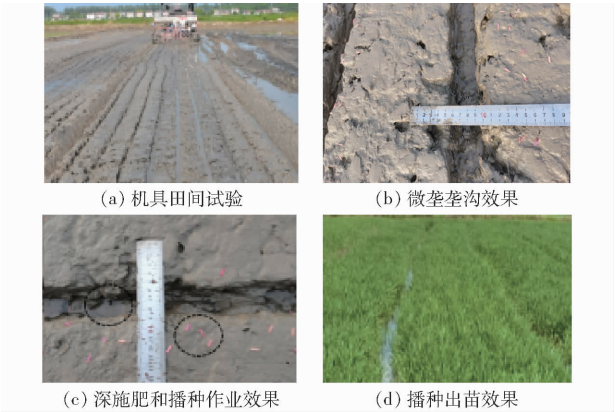


图 14 田间试验结果
Fig. 14 Field test results

5 结论

(1) 针对因冷浸田水量多、土壤通气性差,导致

冷浸田种床制备时厢面易积水,影响水稻生长的问题,结合冷浸田水稻垄作栽培与侧深施肥农艺要求,研制了一种冷浸田种床制备起微垄装置。该装置由滑推式开沟器和压实平整部件组成,可实现起微垄排水、厢面平整作业同时侧深施肥功能。

(2) 对滑推式开沟器和压实平整部件关键参数进行了设计,基于滑切原理设计了滑推式开沟器推压破土面,其曲面轮廓线起始滑切角 θ_A 为 10° 、终止滑切角 θ_B 为 55° ;根据作业需求确定了滑推式开沟器长度 L_0 为 150 mm,宽度 L_1 为 40 ~ 60 mm,镇压平整部件仿形调节角度 $\Delta\lambda$ 为 7° 。通过 DEM - MBD 耦合仿真试验确定了滑推式开沟器宽度为 50 mm,压实平整部件弹簧刚度为 41.42 N/mm。

(3) 在湖北省荆州市丫角村冷浸田工况开展了田间试验,结果表明:厢面平整度 11.01 mm,微垄沟平均沟深 53.25 mm,微垄沟平均沟宽 48.11 mm,沟深稳定性系数 89.56%,沟宽稳定性系数 90.64%。各项指标均满足冷浸田机械化起垄作业要求。

参 考 文 献

[1] 王思潮,曹凑贵,李成芳,等. 耕作模式对冷浸田水稻产量和土壤特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(10): 1165 - 1173.
WANG Sichao, CAO Cougui, LI Chengfang, et al. Effects of cultivation patterns on rice yield and soil properties in cold waterlogged paddy fields[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(10): 1165 - 1173. (in Chinese)

[2] 熊又升,徐祥玉,张志毅,等. 垄作免耕影响冷浸田水稻产量及土壤温度和团聚体分布[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 157 - 164.
XIONG Yousheng, XU Xiangyu, ZHANG Zhiyi, et al. Influences of combing ridge and no-tillage on rice yield and soil temperature and distribution of aggregate in cold waterlogged field[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(15): 157 - 164. (in Chinese)

[3] 王秋菊,焦峰,韩东来,等. 机械化整地方式对低洼水田土壤理化性质及水稻产量影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 70 - 77.
WANG Qiuju, JIAO Feng, HAN Donglai, et al. Impact of different mechanical soil preparation methods on physical and chemical properties of soil in low-lying paddy fields and rice yield[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(18): 70 - 77. (in Chinese)

[4] 林诚,李清华,王飞,等. 长期深窄沟排水对冷浸田土壤脱潜特性及水稻产量的影响[J]. 土壤, 2016, 48(6): 1151 - 1158.
LIN Cheng, LI Qinghua, WANG Fei, et al. Effects of long-term deep-narrow drainage ditches on degley fication characteristics of cold-waterlog paddy soil and rice yield[J]. Soils, 2016, 48(6): 1151 - 1158. (in Chinese)

[5] XU C L, ZHANG C L, LI L H, et al. Optimization of working parameters for puddling and flatting machine in paddy field[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(3): 88 - 96.

[6] CHEN G, HU L, LUO X, et al. A review of global precision land-leveling technologies and implements: current status, challenges and future trends[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 220: 108 - 113.

[7] 王晓燕,邓博,谭丁炀,等. 无驱动式自动调平水田埋秆起浆整地机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 20 - 31.
WANG Xiaoyan, DENG Bo, TAN Dingyang, et al. Design and experiment of undriven soil puddling machine with improved auto-leveling and straw-burying design for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 20 - 31. (in Chinese)

[8] 胡炼,罗锡文,林潮兴,等. 1PJ-4.0 型水田激光平地机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 146 - 151.
HU Lian, LUO Xiwen, LIN Chaoxing, et al. Design and experiment of 1PJ-4.0 laser leveler for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 146 - 151. (in Chinese)

[9] 徐祥玉,张志毅,王娟,等. 起垄和施肥对冷浸田土壤氧化还原状况的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(6): 666 - 673.

- XU Xiangyu, ZHANG Zhiyi, WANG Juan, et al. Effects of ridging and fertilization on soil redox status of cold waterlogged paddy fields[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013,21(6):666–673. (in Chinese)
- [10] 王飞, 李清华, 余广兰, 等. 开沟排渍与优化施肥对冷浸田生产力的耦合效应[J]. 土壤通报, 2015, 46(3):703–708. WANG Fei, LI Qinghua, YU Guanglan, et al. Coupling effects of ditching and optimized fertilization on productivity of cold waterlogged paddy fields[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015,46(3):703–708. (in Chinese)
- [11] 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 sliding-pushing furrow opener [J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(19):26–34. (in Chinese)
- [12] 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 Jiaxin, YUAN Hongfang, et al. Design and experiment of profiling sliding-blade furrow opener [J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(4):16–24. (in Chinese)
- [13] 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-blade furrow opener[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(2):38–42. (in Chinese)
- [14] 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-band furrow opener for oat seeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(9):89–96. (in Chinese)
- [15] DAMORA D, PANDEY K P. Evaluation of performance of furrow openers of combined seed and fertilizer drills[J]. Soil and Tillage Research, 1995, 34(1):127–139.
- [16] 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. Optimal design and experiment of soil breaking and root-cutting blade for compacted grassland based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(11):176–187. (in Chinese)
- [17] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上册)[M]. 北京:机械工业出版社, 1988.
- [18] 万松, 陈子林, 展鹏程, 等. 基于传感技术的水田旋耕机平地系统的设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2016, 35(4):129–135. WAN Song, CHEN Zilin, ZHAN Pengcheng, et al. Design and experiment of leveling system for paddy field rotavator based on sensing technology[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2016,35(4):129–135. (in Chinese)
- [19] 张青松, 蔡家顺, 于良航, 等. 冷浸田起垄平整装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2):50–59. ZHANG Qingsong, CAI Jiashun, YU Lianghang, et al. Design and experiment of ridging and leveling device for cold waterlogged paddy field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(2):50–59. (in Chinese)
- [20] 魏松, 张驰海, 詹振宇, 等. 基于 DEM–MBD 耦合的棉花直播机仿形开沟过程机理仿真与优化试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2):275–289,341. WEI Song, ZHANG Chihai, ZHAN Zhenyu, et al. Mechanism simulation and optimization experiment of profiling ditching process of cotton direct seeder based on DEM–MBD coupling [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2):275–289,341. (in Chinese)
- [21] ZHOU H, ZHANG S, DAI F, et al. Simulation of water and fertiliser transport in mechanised fertilisation: DEM–MBD coupling approach for whole film-mulching and double ridge-furrow technologies[J]. Soil and Tillage Research, 2025, 254:106765.
- [22] HAN L, YUAN W, YU J, et al. Simulation and experiment of spiral soil separation mechanism of compound planter based on discrete element method (DEM) [J]. Agriculture,2022, 12(4):511.
- [23] 江应星, 赵子赋, 王景立. 基于 EDEM 的水田平地机打浆机构参数分析研究[J]. 江西农业大学学报, 2020, 42(3):608–618. JIANG Yingxing, ZHAO Zifu, WANG Jingli. Analysis on the parameters of the beating mechanism of paddy field staw dumping grader by EDEM discrete element[J]. Journal of Jiangxi Agricultural University,2020,42(3):608–618. (in Chinese)
- [24] LI J, ZHANG X, WANG Y, et al. Optimizing soil resistance and disturbance of bionic furrow opener for paddy field based on badger claw using the CFD–DEM method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 227:109549.