

冷浸田起垄平整装置设计与试验

张青松^{1,2} 蔡家顺¹ 于良航¹ 方震¹ 廖庆喜^{1,2} 边祺旺¹ 陈志凌¹

(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)

摘要: 针对冷浸田终年积水、水土温度低及排水不良,需进行垄作栽培水稻的生产要求及目前缺乏相关机具的生产现状,设计了一种适宜于冷浸田作业的起垄平整装置,该装置主要由起垄辊、微垄开沟器及平整部件组成,实现大垄排水、微垄蓄水作业,利于冷浸田排水及水稻种子生长发育。根据《冷浸田机械起垄水稻栽培技术规程》,对起垄辊、微垄开沟器及平整部件关键参数进行了设计,确定起垄辊回转半径为 560 mm、锥形面倒角为 28°,微垄开沟器宽度为 50 mm、高度为 40 mm 及平整部件可调节角度为 5°。基于 DEM-FEM 耦合仿真分析确定了装置较优运行参数,当机具前进速度为 0.6 m/s、旋耕刀辊转速为 230 r/min、起垄辊转速为 120 r/min 时,土壤回流率为 3.51%,并进行了起垄辊应力应变分析。田间试验结果表明,平均垄沟深为 160.03 mm、沟顶宽为 174.84 mm,平均垄顶宽为 1 888.89 mm,平均厢面平整度为 11.26 mm,平均微垄沟宽为 60.16 mm、沟深为 36.48 mm,各项指标均满足冷浸田机械化起垄作业要求。

关键词: 冷浸田; 种床制备; 开沟起垄; 仿形平整; DEM-FEM 仿真

中图分类号: S232.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2024)02-0050-10

OSID:



Design and Experiment of Ridging Leveling Device for Cold Waterlogged Paddy Field

ZHANG Qingsong^{1,2} CAI Jiashun¹ YU Lianghang¹ FANG Zhen¹ LIAO Qingxi^{1,2} BIAN Qiwan¹ CHEN Zhiling¹

(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)

Abstract: In view of the production requirements of ridge cultivation of rice and lack of related machinery and equipment in cold waterlogged paddy fields, low water and soil temperature and poor drainage, a ridging and leveling device suitable for cold waterlogged paddy field was developed. The device was mainly composed of a ridging roller, a micro-ridge opener and a leveling component to achieve large ridge drainage and micro-ridge water storage operations, which was conducive to cold waterlogged paddy field drainage and rice seed growth and development. According to the technical regulations of mechanical ridging rice cultivation in cold waterlogged paddy field, the key parameters of ridging roller, micro-ridge opener and leveling parts were designed. The radius of rotation of ridging roller was 560 mm, the chamfer of conical surface was 28°, the width of micro-ridge opener was 50 mm, the height was 40 mm and the adjustable angle of leveling parts was 5°. Based on the DEM-FEM coupling simulation analysis, the optimal operating parameters of the device were determined. When the forward speed of the machine was 0.6 m/s, the rotation speed of the rotary blade roller was 230 r/min, and the rotation speed of the ridge roller was 120 r/min, the soil backflow rate was 3.51%, and the stress and strain of the ridge roller were analyzed. The results of the field experiment showed that the average furrow depth was 160.03 mm, the width of top of furrow was 174.84 mm, the average width of top of ridge was 1 888.89 mm, the average flatness of box was 11.26 mm, the average width of micro-ridge was 60.16 mm, and the depth of furrow was 36.48 mm. All indicators met the requirements of mechanized ridge operation in cold-waterlogged fields. The research can provide a reference for the design of ridge leveling machine in cold waterlogged paddy field.

Key words: cold waterlogged paddy field; seedbed preparation; rolling trenching; profiling leveling; DEM-FEM simulation

收稿日期: 2023-06-19 修回日期: 2023-07-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1901204)和国家自然科学基金项目(32001427)

作者简介: 张青松(1987—),男,副教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: qszhang@mail.hzau.edu.cn

0 引言

冷浸田广泛分布于山丘谷地、丘陵低洼地段,终年积水,水土温度低及排水不良^[1]。土壤受水浸渍后导致还原性增强,通气性变差,易造成水稻根系发育不良、产量降低,国内现有冷浸田约 $3.46 \times 10^{10} \text{ hm}^2$,占低产稻田面积的 44.2%,湖北省冷浸田面积占全国冷浸田面积的 8.7%^[2]。采用垄作栽培模式可大幅增加土壤与空气的接触面积,提升土壤和作物的透光性和透气性,提高土壤温度,利于提高冷浸田水稻产量^[3-6]。目前采用人工开沟起垄作业方式,劳动强度大、效率低,且存在沟型稳定性差和厢面平整度低等问题。

国内外针对起垄机具进行了诸多研究,意大利 HORTECH 公司研制的 PERFECTA 型机具,作业时镇压辊旋转均匀压实垄面,可完成碎土、平整、起垄定型等多项作业,且具备垄高调节功能;日本 YANMAR 公司研制的 BS142CHN 型机具通过上整形板和侧整形板的集成,较好地形成适宜蔬菜移栽的种床,土壤回流量少。王金峰等^[7-8]设计了一种水田双向筑埂机,偏牵引悬挂仿形调节系统可实现集土深度和筑埂强度的调节,旋耕部件和镇压部件提高了机具作业稳定性和质量;刘海等^[9]提出犁耕开沟、旋耕碎土和主动辊压式起垄与平整结合的联合耕整作业方案,根据土壤挤压和垄体曲面成型原理,设计了一种犁旋辊压驳岸型种床成型装置;史宇亮等^[10]研制了一种犁铧式开沟起垄装置,作业时先细碎聚拢土壤,再送土开沟,最后通过镇压形成稳固的垄体;杜文斌等^[11]设计了可调式苗床起垄铺膜机,可实现旋耕、深施肥、起垄、铺膜和膜边覆土的一体化作业,结合起垄成形原理及垄形要求,进行了整形镇压辊结构设计及力学分析。目前国内外起垄机具多适应于沙壤土及早地作业,且以被动式起垄方式为主,适用于冷浸田等土壤含水率较高的起垄装置研究较少。

针对冷浸田终年积水、水土温度低及排水不良,需进行垄作栽培水稻的生产要求及目前缺乏相关机具的生产现状,根据《冷浸田机械起垄水稻栽培技术规程》,设计一种适宜于冷浸田作业的起垄平整装置,主要由起垄辊、微垄开沟器及平整部件组成,以实现大垄排水、微垄蓄水作业,确定关键部件的结构及运行参数,并开展 DEM-FEM 耦合仿真及田间试验,以期冷浸田起垄平整机具设计提供参考。

1 整体结构与工作原理

1.1 整体结构

冷浸田起垄平整装置主要由起垄辊、微垄开沟器及平整部件组成,实现大垄排水、微垄蓄水作业。根据《冷浸田机械起垄水稻栽培技术规程》,可以起单垄作业或起双垄作业,装置结构示意图如图 1 所示。起垄辊安装于开沟前犁正后方,布置于播种机两侧。如起双垄作业,在机具作业幅宽正中间增加一个起垄辊。平整部件安装于旋耕部件正后方,微垄开沟器安装于平整部件底部。肥箱安装于机具上方,水稻排种器安装于平整部件后方。

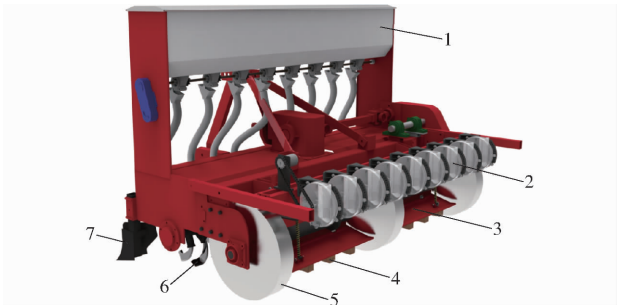


图 1 起垄平整装置结构示意图
Fig. 1 Structure diagram of furrowing and ridging leveling device

1. 肥箱 2. 水稻排种器 3. 平整部件 4. 微垄开沟器 5. 起垄辊 6. 旋耕部件 7. 开沟前犁

1.2 工作原理

机具作业时,由拖拉机 PTO 提供动力实现往前作业,肥料经肥管落于装置前方,旋耕部件碎土埋茬混施肥料;开沟前犁破土翻垡形成初步垄沟,起垄辊主动旋转滚压沟壁及沟底,形成稳固垄体,实现大垄排水;经旋耕部件作业后的松软泥土在平整部件作业下,实现垄面平整;安装于平整部件底部的微垄开沟器在平整部件工作时同步开出微垄沟,实现微垄蓄水;水稻种子经排种器落于微垄垄面实现水稻直播,工作原理如图 2 所示。

2 关键部件设计与分析

2.1 起垄辊设计

2.1.1 起垄辊结构参数设计

起垄辊主动旋转滚压垄沟壁及垄沟底,在开沟前犁作业后的基础上稳固沟型,起垄平整装置作业后垄体稳定,基于挤压滚压所设计的主动式起垄辊作业后垄体断面呈梯形,垄体形状由起垄辊工作曲面参数所决定。为保证装置设计满足单次作业行程后可开单垄或双垄且能使垄体压实成型,起垄辊工作曲面与垄体形状保持一致,图 3 为起垄辊作业示意图。

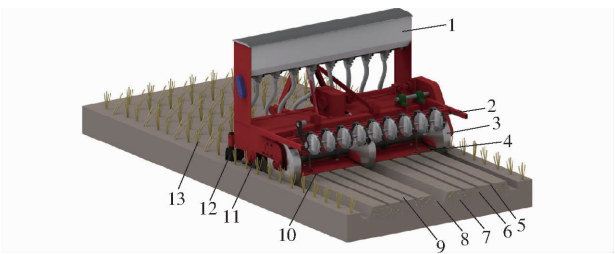


图2 起垄平整装置工作原理图

Fig.2 Working principle diagram of furrow ridging leveling device

1. 施肥系统 2. 播种系统 3. 起垄辊 4. 平整部件 5. 微垄沟
6. 埋覆秸秆 7. 肥料 8. 垄沟 9. 穴播种子 10. 微垄开沟器
11. 旋耕部件 12. 开沟前犁 13. 地表秸秆

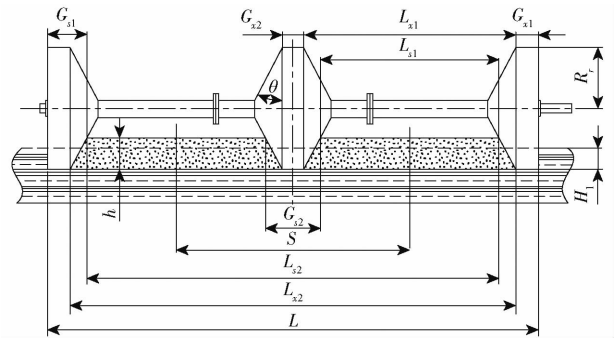


图3 起垄辊作业示意图

Fig.3 Trenching roller shaping structure diagram

起垄平整装置中起垄辊结构决定垄体尺寸及开沟性能,根据装置作业幅宽及水稻直播农艺要求,起垄辊作业时需满足

$$\begin{cases} S=L_{x1}+G_{x2} \\ L=2L_x+G_{x2}+2G_{x1} \\ L_s=S-G_{s2} \\ L_x=L_s+G_{x2}-G_{x1} \end{cases} \quad (1)$$

式中 L ——工作幅宽,mm

S ——相邻两垄间中心距离,mm

L_{x1} ——起双垄时垄底宽,mm

G_{x1} ——侧边沟底宽,mm

G_{s1} ——侧边沟顶宽,mm

G_{x2} ——中间沟底宽,mm

G_{s2} ——中间沟顶宽,mm

根据《冷浸田机械起垄水稻栽培技术规程》要求,将作业幅宽 $L=2\,200\text{ mm}$ 、垄间距 $S=1\,050\text{ mm}$ 、垄顶宽 $L_{s1}=800\text{ mm}$ 、垄底宽 $L_{x1}=950\text{ mm}$ 代入式(1)可得中间沟顶宽 G_{s2} 为 250 mm ,中间沟底宽 G_{x2} 为 100 mm ,侧边沟顶宽 G_{s1} 为 180 mm ,侧边沟底宽 G_{x1} 为 100 mm ,由此确定起垄辊圆柱面宽度即沟底宽度 G_{x2} 为 100 mm ,锥形面倒角 θ 为 28° 。起垄辊回转半径 R_i 设计为 560 mm ,传动轴之间通过法兰盘固定连接,通过更换中间传动轴实现一次作业起单垄

或双垄,装置起单垄时垄顶宽 L_{s2} 为 $1\,860\text{ mm}$,垄底宽 L_{x2} 为 $2\,230\text{ mm}$,垄高 h 为 160 mm ,两侧沟顶宽 G_{s1} 为 180 mm ,沟底宽 G_{x1} 为 100 mm ,作业垄数可根据实际作业工况进行调节。

2.1.2 起垄辊安装位置及转速匹配分析

旋耕部件和起垄辊为主要触土部件,其相对位置关系影响装置的实际作业效果。机具作业时,开沟前犁破土翻土形成初步垄沟,旋耕刀辊碎土埋茬细碎土壤,再经起垄辊进一步滚压沟型,平整部件进一步托平垄面,完成开沟起垄平整厢面,装置关键触土部件相对位置关系如图4所示。

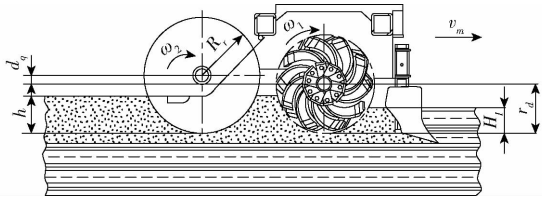


图4 关键触土部件相对位置关系

Fig.4 Relative position relationship of key earth-touching components

起垄辊与旋耕部件回转中心高度差 d_q 可表示为

$$d_q=r_d+h-H_1-R_i \quad (2)$$

式中 H_1 ——旋耕深度,mm

r_d ——旋耕刀回转半径,mm

装置起垄前土壤先经旋耕部件疏松,在起垄辊和平整部件的挤压作用下土壤之间的空隙及相对位置发生变化,根据图3作业前后垄体截面满足

$$\begin{cases} A_1=LH_1 \\ A_2=(L_{x1}+L_{s1})h \end{cases} \quad (3)$$

式中 A_1 ——旋耕取土断面面积,mm²

A_2 ——垄体断面面积,mm²

装置作业过程中考虑到土壤坚实度系数与土壤孔隙度系数,得断面面积关系为

$$A_1=k_a k_b A_2 \quad (4)$$

式中 k_a ——土壤孔隙度系数

k_b ——土壤坚实度系数

整理式(3)、(4)可得,旋耕深度 H_1 应满足

$$H_1=(L_{x1}+L_{s1})k_a k_b h/L \quad (5)$$

土壤孔隙度系数 k_a 与旋耕作业前后土壤容重 G_r 有关,常取 $1.2 \sim 1.3$,土壤坚实度系数 k_b 与土壤特性有关,常取 $0.8 \sim 1.0$ ^[9-12],将装置作业幅宽 L 、垄顶宽 L_{s1} 、垄底宽 L_{x1} 、垄高 h 等参数代入式(5),求得旋耕深度 H_1 范围为 $115 \sim 155\text{ mm}$ 。为适应冷浸田土壤松软含水率较高的作业环境,选用ⅡT245型旋耕刀^[13]。根据旋耕深度 H_1 、起垄高度 h 以及装置结构参数,求得起垄辊与旋耕刀辊回转中心高度

差 d_q 为 55 mm。

机具前进速度 v_m 、旋耕刀辊转速 N_1 和起垄辊转速 N_2 的匹配关系直接影响装置作业效果。旋耕刀旋耕速比越大,切削效果越好,旋耕刀切土节距 S_1 直接影响碎土质量,计算式为

$$S_1 = \frac{60v_m}{ZN_1} \quad (6)$$

式中 Z ——旋耕刀辊切削小区内刀片数量

切土节距取值与土壤类型相关,土壤黏性大、含水率较高时切土节距应取较大值^[12],结合冷浸田长期浸水土壤含水率高且土质疏松多孔的特性,切土节距 S_1 取 100 ~ 140 mm。

起垄辊工作面由圆锥面和圆柱面组成,其与沟壁和沟底接触时沿水平方向分速度不同,为保证起垄辊正常工作,起垄辊上与各点沿水平方向分速度应大于机具前进速度,起垄辊转速应满足

$$N_2 \geq \frac{60v_m}{2\pi(r_q - h)} \quad (7)$$

为确定旋耕刀辊转速和起垄辊转速,以起垄高度 h 为 160 mm、装置前进速度 v_m 为 0.6 ~ 1.2 m/s 进行计算,结合式(6)、(7)求得旋耕刀辊转速 N_1 为 130 ~ 250 r/min、起垄辊转速 N_2 为 90 ~ 170 r/min。

2.2 微垄开沟器设计

结合冷浸田地表长期浸水的土壤特性,起垄平整装置作业时,采用微垄开沟器,设计矩形微垄沟宽度为 50 mm、宽度为 40 mm,为达到较好的开沟起垄效果,微垄开沟器应满足作业效果好、不缠草无壅泥等特点^[12],微垄开沟器结构示意图如图 5 所示,其中微垄开沟器高度 m_1 为 40 mm、宽度 m_2 为 50 mm。

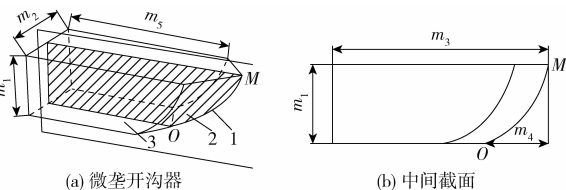


图 5 微垄开沟器结构示意图

Fig. 5 Structure diagrams of ship type trench opener

1. 破土刃 OM 2. 破土面 3. 整形面

为减少作业时秸秆缠绕微垄开沟器及降低其工作阻力,微垄开沟器破土刃采用圆弧曲线设计,两侧破土面均采用流线型曲面设计,破土刃曲线如图 6 所示。

为保证微垄开沟器作业时有较好的滑切效果,刃口曲线 OM 采用抛物线设计,图中点 M 坐标为 (m_4, m_1) ,抛物线方程为

$$y = ax^2 + bx \quad (8)$$

式中 a 、 b 为常数,根据图中几何关系可知

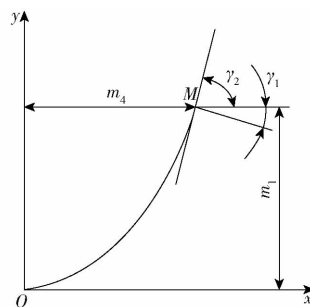


图 6 破土刃口曲线示意图

Fig. 6 Diagram of soil breaking surface edge curve

$$\begin{cases} m_1 = am_4^2 + bm_4 \\ \tan\gamma_2 = 2am_4 + b \\ \gamma_2 + \gamma_1 = \pi/2 \end{cases} \quad (9)$$

式中 γ_1 ——抛物线在点 M 的滑切角, ($^\circ$)

γ_2 ——抛物线在点 M 切线与 x 轴夹角, ($^\circ$)

m_4 ——微垄开沟器破土刃长度, mm

联立式(8)、(9)可求出抛物线 OM 方程为

$$y = \left(\frac{1}{m_4 \tan\gamma_1} - \frac{m_1}{m_4^2} \right) x^2 + \left(\frac{2m_1}{m_4} - \frac{1}{\tan\gamma_1} \right) x \quad (10)$$

根据式(10)可知,刃口曲线形状与点 M 滑切角及坐标有关,微垄开沟器设计的开沟深度为 40 mm,土壤从点 M 运动到点 O 阻力逐渐减小,为保证破土面与整形面光滑过渡,点 O 滑切角为 90° 。查阅文献后取土壤摩擦角为 23° ^[13]。当点 M 滑切角大于摩擦角时,刃口阻力较小,因此取点 M 滑切角 γ_1 为 25° ^[14-16]。由于整形面与土壤接触时间越长,整形效果越好,微垄开沟器破土刃长度 m_4 取 35 mm,微垄开沟器长度 m_3 取 140 mm,微垄开沟器整形面上端宽度 m_5 取 110 mm,代入式(9)即可求出 a 为 28.62, b 为 0.14,得出微垄开沟器刃口曲线抛物线方程为 $y = 28.62x^2 + 0.14x$ 。

2.3 平整部件设计

平整部件由挡土板、平整板和仿形机构组成,如图 7 所示,平整部件是垄面平整的关键部件,平整板形状与弹簧预紧力直接影响装置作业后垄面平整度,平整板采用躺板式结构,仿形机构同时连接机架、挡土板和平整板,作业时实现仿形平整功能。

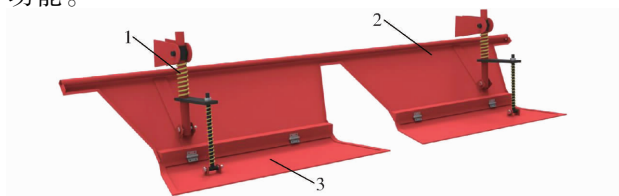


图 7 平整部件结构示意图

Fig. 7 Structure diagram of flat parts

1. 仿形机构 2. 挡土板 3. 平整板

2.3.1 平整板形状确定

平整板结构示意图如图 8a 所示,平整板由前端面和后端面组成,其中平整板后端面为平面,后端面宽度 l_{op} 设计为 180 mm,作业时压实平整厢面泥土。由于平整板前端面需要连接挡土板及平整板后端面,作业时需要推压土壤,便于泥土进入平整板后端面作业区,进而压实平整厢面泥土,平整板前端面截面形状由直线段 QW 和圆弧段 OQ 组成,如图 8b 所示,且圆弧段点 O 与平整板后端面直线段 OP 相切。建立坐标系如图 8b 所示,令圆弧段 OQ 半径为 r_1 ,直线段 QW 长度为 d ,圆弧曲线方程可表示为

$$\begin{cases} f(x) = \sqrt{r_1^2 - x^2} + r_1 \\ f'(x)_Q = -\frac{x}{\sqrt{r_1^2 - x^2}} = \tan\alpha \\ \alpha + \beta = 90^\circ \end{cases} \quad (11)$$

式中 α ——圆弧段点 Q 与 x 轴夹角, ($^\circ$)
 β ——圆弧段点 Q 处对应推压角, ($^\circ$)

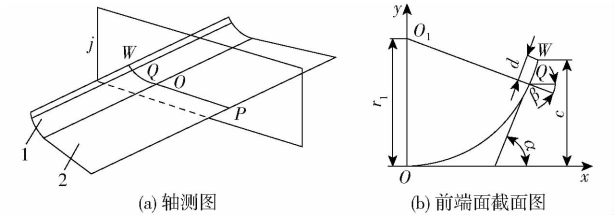


图 8 平整板结构示意图
Fig. 8 Structure diagrams of flat plate
1. 平整板前端面 2. 平整板后端面

则圆弧段 OQ 曲线方程可表示为

$$\begin{cases} f(x) = \sqrt{r_1^2 - x^2} + r_1 \\ r_1 = \frac{2(c - d\cos\beta) + \sqrt{4(c - d\cos\beta)^2 + 1}}{\cot^2\beta/(1 + \cot^2\beta)} \end{cases} \quad (12)$$

式中 c ——平整板高度, mm

根据式(12)可知,圆弧段 OQ 形状由推压角 β 、平整板前端直线长度(活页安装长度) d 、平整板高度 c 共同决定。根据推压原理,推压角大于拖土板摩擦角时,土壤-秸秆混合物能沿圆弧面向下运动,避免挡土板与平整板之间壅土堵塞,顺利完成垄面平整作业。平整板材料摩擦角约为 23° ,则推压角范围为 $23^\circ < \beta < 67^\circ$,考虑土壤含水率波动,推压角 β 取 35° [15-17]。平整板前端面直线段 QW 长度与铰链安装尺寸相关,则其直线长度 d 设计为 30 mm。冷浸田由于长期浸水,装置作业前厢面有积水,为保证平整板高度大于泥浆堆积高度,避免被水淹而影响平整质量,设计平整板高度 c 为 140 mm。将以上数据代入式(12)得圆弧段 OQ 半径 r_1 为 368 mm。

2.3.2 仿形结构调节角确定

仿形机构由套筒、卡套、弹簧、连接板、T 形螺纹杆、垫片等组成,结构如图 9a 所示。在起垄平整作业过程中,为提高装置作业适用性,设计了预紧力可调节的仿形机构。

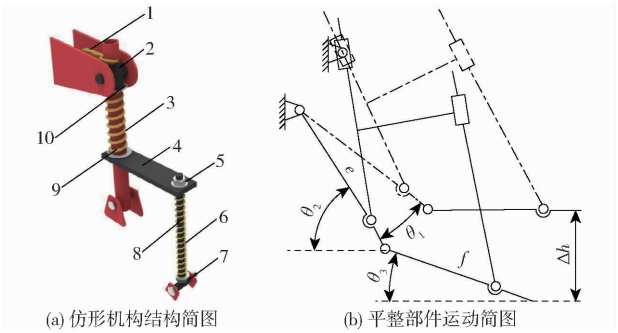


图 9 平整部件运动简图与仿形机构结构示意图
Fig. 9 Motion diagram of profiling leveling mechanism and structure diagram of profiling parts
1. 开口销 2. 卡套 3. 弹簧 1 4. 连接板 5. 螺母 1 6. T 形螺纹杆 7. 螺母 2 8. 弹簧 2 9. 套筒 10. 垫片

仿形机构分别与机架横梁、挡土板和平整板相连接。根据土壤坚实度变化,带动挡土板和平整板移动,实现平整部件的仿形功能;根据起垄高度要求,调节螺母 1 改变平整板高度,实现起垄高度的调节;调节螺母 2 改变弹簧 2 的预紧力,实现平整板对土壤推压力的调节。仿形机构运动简图如图 9b 所示。

为使仿形机构能按照一定的要求进行运动,仿形部件自由度应与主动件数目保持一致,根据图 9b 计算仿形部件自由度 F 为

$$F = 3n - (2p_l + p_h) \quad (13)$$

式中 n ——仿形机构中活动构件数目
 p_l ——仿形机构中低副数目
 p_h ——仿形机构中高副数目

由图 9b 可知, p_l 、 p_h 、 n 为 7、0、5,代入式(13)求得仿形机构自由度 F 为 1,由此确定仿形机构具有固定的运动轨迹,装置作业时挡土板随前方壅土量上下浮动,平整板也随作业深度和土壤坚实度的变化而上下浮动实现仿形平整功能。

平整部件可调节高度为

$$\Delta h = e\sin\theta_2 + f\sin\theta_3 + e\sin(\theta_1 - \theta_2) \quad (14)$$

式中 Δh ——平整板可调节高度, mm
 e ——挡土板长度, mm
 f ——平整板长度, mm
 θ_1 ——挡土板调节角, ($^\circ$)
 θ_2 ——挡土板最低点与水平面夹角, ($^\circ$)
 θ_3 ——平整板最低点与水平面夹角, ($^\circ$)
平整板可调节高度与以上参数相关,结合整机

结构尺寸及装置开沟起垄深度范围且拖土板处于上极限位置时平行于水平面,设计开沟深度调节高度 Δh 为 50 mm、挡土板长度 e 为 350 mm、挡土板最低点与水平面夹角 θ_2 为 55° 、拖土板最低点与水平面夹角 θ_3 为 10° ,代入式(14)得到挡土板调节角 θ_1 约为 5° 。

3 仿真试验

3.1 耦合仿真模型构建

开展装置 DEM – FEM 耦合仿真分析^[18-19],分别在 Solidworks 软件和 EDEM 软件中建立起垄平整装置模型和土壤–秸秆模型,冷浸田由于长期浸水表层土壤发生粘结和团聚且流动性较强,因此在 EDEM 中采用 Hertz – Mindlin with JKR 模型模拟土壤之间的相互作用,采用 Hertz – Mindlin (no slip) 接触模型模拟土壤和土壤工作部件的接触作用^[20-21],冷浸田表层土壤和底层土壤密度、容重和坚实度有较为明显的差异,因此土壤模型建立分为 0 ~ 5 cm 上层土壤和 5 ~ 40 cm 底层土壤,根据冷浸田地表秸秆量测量结果,于表层土壤上方设置秸秆颗粒并设立 bonding 键与土壤颗粒连接;在 ANSYS 中定义起垄辊工作面材料为 304 不锈钢,起垄辊传动轴材料为 45 钢,为保证计算精度及效率,起垄辊工作曲面网格尺寸设为 6 mm,传动轴网格设为 20 mm。耦合仿真模型见图 10,主要仿真模型材料参数见表 1,仿真模型接触参数参考文献[22 – 24]。

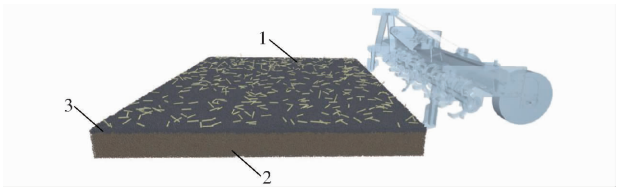


图 10 仿真模型构建
Fig. 10 Simulation model construction
1. 秸秆 2. 底层土壤 3. 上层土壤

表 1 仿真模型材料参数

Tab.1 Contact parameters of simulation model			
类型	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	剪切模量/Pa
上层土壤	1 789	0. 42	$4. 0 \times 10^5$
底层土壤	2 024	0. 40	$1. 0 \times 10^8$
材料	8 000	0. 29	$7. 5 \times 10^{10}$

3.2 装置运行参数优化

3.2.1 试验因素

起垄平整装置运行参数对装置作业质量影响显著,选取旋耕刀辊转速 N_1 、起垄辊转速 N_2 和机具前进速度 v_m 为试验因素,以垄沟沟顶宽稳定性系数 U 和土壤回流率 W 为评价指标,设置起垄高度为

160 mm,取旋耕刀辊转速 N_1 为 130 ~ 250 r/min、起垄辊转速 N_2 为 90 ~ 170 r/min、机具前进速度 v_m 为 0.6 ~ 1.2 m/s,开展仿真试验,因素编码如表 2 所示。

表 2 因素编码
Tab.2 Horizontal coding

编码	因素		
	旋耕刀辊转速 $N_1/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	起垄辊转速 $N_2/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	机具前进速度 $v_m/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
-1	130	90	0. 6
0	190	130	0. 9
1	250	170	1. 2

3.2.2 评价指标与测量方法

为保证数据测量的准确性,在装置稳定作业区域截取长度 1 000 mm 的土槽模型,进行垄沟沟顶宽和土壤回流流量测量。垄沟沟顶宽稳定性系数和土壤回流率照以下方法进行计算。

仿真试验后运用 EDEM 软件后处理中的切片功能,在作业稳定区域段每间隔 200 mm 截取厚度为 60 mm 的土槽模型如图 11 所示,将图像导入至 CAD 软件中设定与图像相同的尺寸比例,进行垄沟沟顶宽测量,测量完成后垄沟沟顶宽稳定性系数计算式为

$$U = \left(1 - \frac{\sigma}{\bar{W}} \right) \times 100\% \tag{15}$$

其中
$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N (W_i - \bar{W})^2 / (N - 1)}$$

式中 W_i ——第 i 组沟顶宽,mm
 N ——沟型沟顶宽测量点数量
 σ ——沟顶宽标准差,mm
 $\bar{W}$ ——沟型沟顶宽平均值,mm

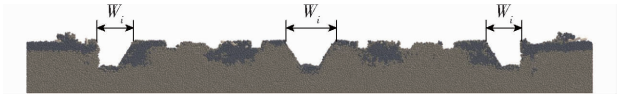


图 11 垄沟沟顶宽测量土槽模型
Fig. 11 Soil bin model of ridge furrow width measurement

仿真作业后沟型稳定性系数,通过统计沟内土壤体积进行计算,首先利用 Solidworks 软件建立沟型三维模型长度为 1 000 mm,利用 EDEM 软件后处理中的 Setup Selections 模块导入沟型三维模型,截取装置作业后的稳定区域段 1 000 mm,统计作业后沟型模型内颗粒体积,仿真试验后土壤颗粒回流体积统计如图 12 所示,沟内土壤回流率计算式为

$$W = \frac{V_R}{V_s} \times 100\% \tag{16}$$

式中 V_R ——沟型三维模型内回流土壤颗粒总体积, m^3

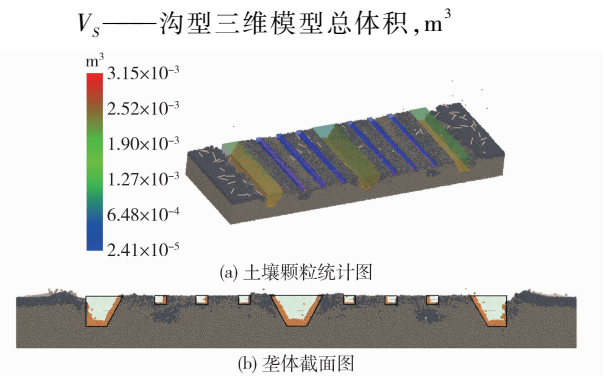


图 12 仿真试验后土壤回流示意图

Fig. 12 Soil reflux diagram after simulation

3.2.3 结果分析

仿真试验结果如表 3 所示(A 、 B 、 C 为编码值), 表明起垄平整装置作业后垄沟沟顶宽范围为 160.55 ~ 174.19 mm, 沟型稳定性系数变化较小, 为 86.32% ~ 93.65%, 垄沟沟顶宽稳定性满足作业要求, 而土壤回流率为 3.41% ~ 32.14%, 且随试验因素的变化有明显变化趋势, 选定土壤回流率作为评价指标, 对试验因素进行分析。

表 3 仿真试验结果

Tab. 3 Simulation test results

试验 编号	因素			垄沟沟顶 宽稳定性 系数 $U/\%$	土壤回流 率 $W/\%$
	旋耕刀辊 转速 A	起垄辊 转速 B	机具前进 速度 C		
1	-1	-1	0	92.14	13.14
2	1	-1	0	91.36	15.15
3	-1	1	0	86.32	32.14
4	1	1	0	93.36	13.83
5	-1	0	-1	92.52	3.41
6	1	0	-1	91.36	8.12
7	-1	0	1	87.32	28.31
8	1	0	1	90.64	13.26
9	0	-1	-1	92.36	10.24
10	0	1	-1	90.65	15.62
11	0	-1	1	89.32	14.14
12	0	1	1	86.91	23.13
13	0	0	0	90.45	8.60
14	0	0	0	93.65	4.18
15	0	0	0	90.23	12.34
16	0	0	0	92.35	5.62
17	0	0	0	91.68	5.23

将试验结果进行回归方程显著性分析和方差分析(表 4), 得出各因素对土壤回流率影响显著性由大到小依次为机具前进速度 v_m 、起垄辊转速 N_2 、旋耕刀辊转速 N_1 。

建立土壤回流率 W 对旋耕刀辊转速 N_1 、起垄辊转速 N_2 、机具前进速度 v_m 的二次多项式回归模型为

表 4 模型方差分析

Tab. 4 Analysis of model variance

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	957.92	9	106.44	8.01	0.006 **
A	88.71	1	88.71	6.67	0.036 3 *
B	128.4	1	128.4	9.66	0.017 1 *
C	214.76	1	214.76	16.15	0.005 1 **
AB	103.23	1	103.23	7.76	0.027 1 *
AC	97.61	1	97.61	7.34	0.030 2 *
BC	3.26	1	3.26	0.245	0.635 7
A^2	82.7	1	82.7	6.22	0.041 4 *
B^2	202.75	1	202.75	15.25	0.005 9 **
C^2	11.45	1	11.45	0.861 4	0.384 2
残余项	93.07	7	13.3		
失拟项	49.19	3	16.4	1.49	0.344
误差	43.88	4	10.97		
总和	1050.99	16			

注: * 表示显著($P < 0.05$), ** 表示极显著($P < 0.01$)。

$$\begin{aligned} W = & 7.19 - 3.33A + 4.01B + 5.18C - \\ & 5.08AB - 4.94AC + 0.9025BC + \\ & 4.43A^2 + 6.94B^2 + 1.65C^2 \end{aligned} \quad (17)$$

根据上述分析可知, 机具前进速度越小土壤回流率越低, 以土壤回流率最小为目标, 利用式(17)求解最优运行参数组合, 最终确定装置较优运行参数为: 机具前进速度 0.6 m/s、旋耕刀辊转速 230 r/min、起垄辊转速 120 r/min, 此时土壤回流率为 2.78%。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, 得出土壤回流率为 3.51%。

3.3 起垄辊应力和应变分析

在耦合仿真模型中, 对具有较优运行参数的装置进行起垄辊应力应变分析, 如图 13 所示。起垄辊等效应力云图如图 13a 所示, 由于起垄辊材料为 304 不锈钢, 材料屈服极限为 205 MPa, 安全系数取 2 ~ 2.5, 起垄辊许用应力为 82 ~ 102.5 MPa, 如图 13a 所示, 起垄辊最大应力为 49.551 MPa, 满足设计要求。

起垄辊总应变云图如图 13b 所示, 起垄辊最大变形位于起垄辊侧边中间部分, 主要原因是装置作业时, 起垄辊侧面受土壤挤压及起垄辊传动轴扭矩, 致起垄辊侧面发生变形, 最大变形量为 0.194 52 mm, 远小于起垄辊结构尺寸, 满足设计要求。

4 田间试验

4.1 试验条件与方法

为检验装置田间作业效果, 在湖北省黄石市阳新县选取土壤特性差异较大的 2 种作业工况, 开展田间试验。试验前对作业工况土壤物理机械特性进

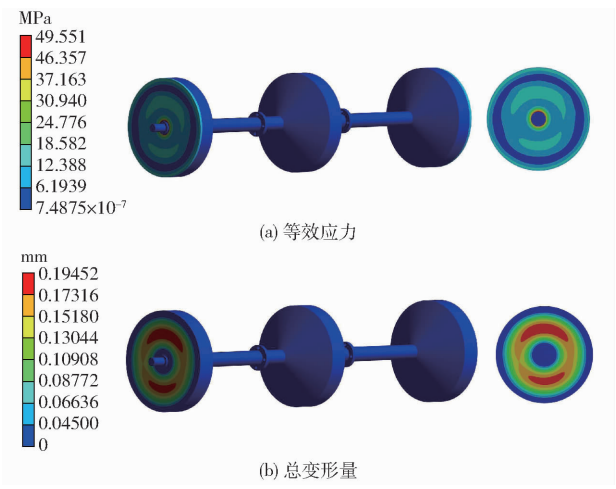


图 13 起垄辊等效应力与总变形量

Fig. 13 Equivalent stress and total deformation nephograms of ridge roller

行测定,测定结果如表 5 所示。

表 5 土壤物理特性参数
Tab. 5 Soil physical parameters

土层深度/cm	工况 1			工况 2		
	含水率/%	容重/(g·cm ⁻³)	坚实度/kPa	含水率/%	容重/(g·cm ⁻³)	坚实度/kPa
0 ~ 5	74.55	0.88	29.31	40.09	1.38	44.84
5 ~ 10	59.78	1.07	42.36	38.05	1.41	72.08
10 ~ 15	55.56	1.09	65.54	36.38	1.43	109.32
15 ~ 20	48.91	1.14	90.35	27.39	1.61	201.87
20 ~ 25	31.51	1.52	142.32	23.83	1.69	365.36
25 ~ 30	28.36	1.58	198.5	21.79	1.78	415.32

装置作业时拖拉机挂慢 2 挡,作业时保证机具直线方向前进,作业后取中间行程 30 m 进行相关数据测量,试验指标包括厢面平整度、微垄沟沟深、微垄沟沟宽、垄沟沟深和垄沟沟顶宽。

4.2 试验结果分析

起垄平整装置田间试验效果如图 14 所示,试验结果如表 6 所示,装置在 2 种工况作业,平均垄沟沟深为 160.03 mm、沟顶宽为 174.84 mm,平均垄顶宽为 1 888.89 mm,平均厢面平整度为 11.26 mm,平均微垄沟沟宽为 60.16 mm、沟深为 36.48 mm,平均垄沟和微垄沟稳定性系数分别为 89.01% 和 87.47%。各项指标均满足冷浸田机械化起垄作业要求。

5 结论

(1) 根据《冷浸田机械起垄水稻栽培技术规程》

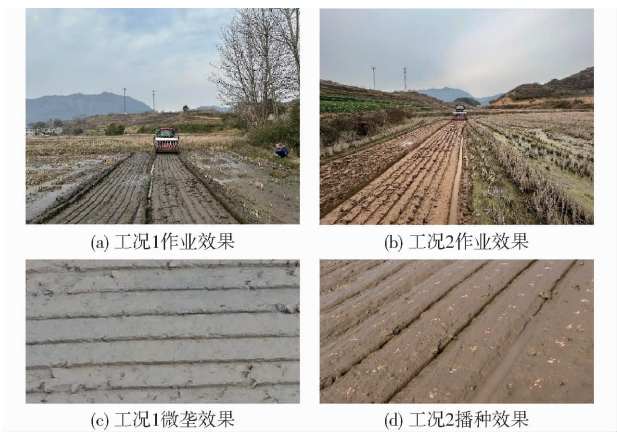


图 14 田间试验效果

Fig. 14 Field experiment effects

表 6 田间试验结果
Tab. 6 Field test results

试验指标	均值/mm		稳定性系数/%	
	工况 1	工况 2	工况 1	工况 2
垄沟沟顶宽	169.32	180.36		
垄沟沟深	154.69	165.36	85.39	92.62
垄顶宽	1 884.13	1 893.65		
厢面平整度	8.95	13.56		
微垄沟沟宽	57.95	62.36	91.32	83.62
微垄沟沟深	35.75	37.21		

和冷浸田土壤物理机械特性,设计了冷浸田起垄平整装置,该装置主要由起垄辊、微垄开沟器及平整部件组成,通过旋耕埋茬、起垄、平整和厢面起微垄一体化作业,实现大垄排水、微垄蓄水作业,利于冷浸田排水及水稻种子生长发育。

(2) 对起垄辊、微垄开沟器及平整部件关键参数进行了设计,确定了起垄辊回转半径为 560 mm、锥形面倒角为 28°,微垄开沟器宽度为 50 mm、高度为 40 mm 及平整部件可调节角度为 5°。基于 DEM - FEM 耦合仿真分析,确定了装置较优运行参数为:机具前进速度 0.6 m/s、旋耕刀辊转速 230 r/min、起垄辊转速 120 r/min,此时土壤回流率为 3.51%,并进行了起垄辊应力和应变分析,起垄辊最大应力为 49.551 MPa,最大变形量为 0.194 52 mm,满足设计要求。

(3) 开展了 2 种作业工况田间试验,结果表明:平均垄沟沟深为 160.03 mm、沟顶宽为 174.84 mm,平均垄顶宽为 1 888.89 mm,平均厢面平整度为 11.26 mm,平均微垄沟沟宽为 60.16 mm、沟深为 36.48 mm,平均垄沟和微垄沟稳定性系数分别为 89.01% 和 87.47%。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,曹湊贵,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] 陈建民, 王慧荣, 谢小聪, 等. 肥料配施对冷浸田单季稻产量及肥料效率的影响[J]. 浙江农业科学, 2022, 63(6): 1211 – 1214.
- CHEN Jianmin, WANG Huirong, XIE Xiaocong, et al. Effect of combined application of different fertilizers on single cropping rice yield and fertilizer efficiency in cold waterlogged paddy field[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2022, 63(6): 1211 – 1214. (in Chinese)
- [4] 陈丽明, 王文霞, 熊若愚, 等. 同步开沟起垄精量穴直播对南方双季籼稻产量和稻米品质的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 28 – 35.
- CHEN Liming, WANG Wenxia, XIONG Ruoyu, et al. Effects of simultaneous furrow ridging and precision hill-direct-seeding on grain yield and quality of double-cropping indica rice in South China[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(1): 28 – 35. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 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 degleyfication characteristics of cold-waterlog paddy soil and rice yield[J]. Soils, 2016, 48(6): 1151 – 1158. (in Chinese)
- [7] 王金峰, 翁武雄, 刘俊麟, 等. 水田双向修筑埂机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 40 – 48.
- WANG Jinfeng, WENG Wuxiong, LIU Junlin, et al. Design and experiment of bi-directional ridger for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 40 – 48. (in Chinese)
- [8] 王金峰, 翁武雄, 鞠金艳, 等. 水田双向修筑埂机回转调节自动锁定装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 57 – 67, 98.
- WANG Jinfeng, WENG Wuxiong, JU Jinyan, et al. Design and experiment of rotation adjustment and automatic locking device of bi-directional ridger for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 57 – 67, 98. (in Chinese)
- [9] 刘海, 张青松, 廖宜涛, 等. 小白菜复式播种机犁旋辊压驳岸型种床起垄装置研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 40 – 48, 77.
- LIU Hai, ZHANG Qingsong, LIAO Yitao, et al. Design of plow-rotary and roll-forming revetment style seed bed ridging device of combined precision seeder for *Brassica chinensis*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 40 – 48, 77. (in Chinese)
- [10] 史宇亮, 陈新予, 陈明东, 等. 甘薯起垄整形机犁铧式开沟起垄装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 16 – 25.
- SHI Yuliang, CHEN Xinyu, CHEN Mingdong, et al. Design and experiment on ploughshare furrowing ridging device of sweet potato ridging shaping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 16 – 25. (in Chinese)
- [11] 杜文斌, 杨春雷, 杨锦鹏, 等. 雪茄烟叶可调式苗床起垄铺膜机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 116 – 126, 295.
- DU Wenbin, YANG Chunlei, YANG Jinpeng, et al. Design and experiment of cigar tobacco adjustable seed-plot ridging and film spreading machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 116 – 126, 295. (in Chinese)
- [12] 张明华, 王在满, 罗锡文, 等. 水稻精量穴直播机开沟装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 10 – 15.
- ZHANG Minghua, WANG Zaiman, LUO Xiwen, et al. Design and experiment of furrowing device of precision hill-drop drilling machine for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 10 – 15. (in Chinese)
- [13] 王晓燕, 邓博, 谭丁杨, 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)
- [14] 丁启朔, 吕绪敏, 孙克润, 等. 基于逆向工程的搅浆刀作业性能界定与关键设计参数研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 68–74.
DING Qishuo, LÜ Xumin, SUN Kerun, et al. Performance and design parameter definition on puddling knife using reverse engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 68–74. (in Chinese)
- [15] 孙文峰, 付天鹏, 何跃, 等. 水田带状复式整地机关键部件设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 50–62.
SUN Wenfeng, FU Tianpeng, HE Yue, et al. Design and test on key components of strip compound ground preparation machine in paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 50–62. (in Chinese)
- [16] 周俊, 许建康, 王耀羲, 等. 基于 GNSS 的智能水田旋耕平地机研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 38–43.
ZHOU Jun, XU Jiankang, WANG Yaoli, et al. Development of paddy field rotary-leveling machine based on GNSS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 38–43. (in Chinese)
- [17] 赵宏波, 何进, 李洪文, 等. 条带式旋切后抛防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 65–75.
ZHAO Hongbo, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of strip rotary-cut-throw anti-blocking implement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 65–75. (in Chinese)
- [18] 权龙哲, 佟金, 曾百功, 等. 玉米根茬铲切刀具的滑切刃曲线优化设计[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 13–17.
QUAN Longzhe, TONG Jin, ZENG Baigong, et al. Optimization design of sliding cutting edge curve of corn rootstalk cutting tool[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 13–17. (in Chinese)
- [19] HADDAD H, GUESSASMA M, FORTIN J. A DEM–FEM coupling based approach simulating thermomechanical behaviour of frictional bodies with interface layer[J]. International Journal of Solids & Structures, 2016, 81: 203–218.
- [20] 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.
- [21] 方会敏, 姬长英, 张庆怡, 等. 基于离散元法的旋耕刀受力分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(21): 54–59.
FANG Huimin, JI Changying, ZHANG Qingyi, et al. Force analysis of rotary blade based on distinct element method[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(21): 54–59. (in Chinese)
- [22] 周浩. 激光控制水田精准平地打浆关键技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2019.
ZHOU Hao. Research on key technologies of laser-controlled precision flat ground beating in paddy fields[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [23] 毕秋实, 王国强, 黄婷婷, 等. 基于 DEM–FEM 耦合的双齿辊破碎机辊齿强度分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(6): 1770–1776.
BI Qiushi, WANG Guoqiang, HUANG Tingting, et al. Tooth strength analysis of mineral sizer by coupling discrete element method and finite element method[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 48(6): 1770–1776. (in Chinese)
- [24] 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)