

变量喷淋水田双侧筑埂机设计与试验

王金峰¹ 许朝阳¹ 杨春祥¹ 吕振阳² 杨淳贺¹

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学电气与信息学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为减轻人工筑埂作业劳动强度,提高筑埂机作业效率和质量,解决因土壤含水率不适宜而筑埂无法成形的问题,设计了一种带有变量喷淋系统的水田双侧筑埂机。阐释了变量喷淋系统的硬件构成及控制策略,实现手动与自动两种流量调节方式,可以将土壤含水率精准调控至 26% ~ 28% 的最适范围。并利用 EDEM 仿真软件对机具触土部件的旋耕集土过程进行模拟,以前进速度、工作转速、取土深度为试验因素,以集土率和集土均匀性变异系数为评价指标进行正交试验并建立回归模型,优化得到最优工作参数组合,为后期田间试验奠定基础。试验结果表明:在最适筑埂含水率下,筑埂机以最佳工作参数组合:前进速度 0.8 km/h、工作转速 415 r/min、取土深度 150 mm 作业,所筑田埂坚实度平均值随时间间隔的增加而增大,坚实度变异系数则逐渐减小,风干 24 h 后趋于稳定。埂顶各测量位置坚实度平均值不小于 1 538 kPa,埂侧各测量位置坚实度平均值不小于 2 612 kPa,均符合农艺要求。这有利于推进高标准农田建设,加快水稻全程机械化进程。

关键词: 水田双侧筑埂机; 变量喷淋系统; 离散元法; 田间试验

中图分类号: S222.53

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)11-0197-12

OSID:



Design and Experiment of Variable Spraying Paddy Field Double-side Ridger Building Machine

WANG Jinfeng¹ XU Zhaoyang¹ YANG Chunxiang¹ LÜ Zhenyang² YANG Chunhe¹

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. College of Electrical and Information, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Aiming to address the challenges of high labor intensity, low efficiency, and poor quality in manual ridge construction caused by unsuitable soil moisture content, a bilateral paddy field ridger building machine equipped with a variable spray system was designed. It was elaborated on the hardware composition and control strategy of the variable spray system, which enabled manual and automatic flow adjustment to precisely regulate soil moisture content within the optimal range of 26% ~ 28%. Using EDEM simulation software, the soil-engaging components rotary tillage and soil collection processes were simulated. An orthogonal experiment was conducted with forward speed, working speed, and soil-taking depth as test factors, and soil collection rate and coefficient of variation of soil collection uniformity as evaluation indicators. A regression model was established to optimize the best working parameter combination, laying the foundation for subsequent field experiments. The results showed that under the optimal ridge-building moisture content, the ridger operated at the best parameter combination: forward speed of 0.8 km/h, working speed of 415 r/min, and soil-taking depth of 150 mm. The average firmness of the constructed ridges was increased with time, while the coefficient of variation of firmness was gradually decreased, and stabilized after 24 h of air-drying. The average firmness at various measurement points on the ridge top was no less than 1 538 kPa, and on the ridge side, no less than 2 612 kPa, both meeting agronomic requirements. The research result can contribute to advancing high-standard farmland construction and accelerating the full mechanization of rice cultivation.

Key words: double-side ridge building machine for paddy fields; variable spraying system; discrete element method; field experiment

收稿日期: 2025-11-24 修回日期: 2025-12-24

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(ZL2024E001)和国家重点研发计划项目(2024YFD2001103)

作者简介: 王金峰(1981—),男,教授,博士,主要从事智能水田农业装备研究,E-mail: jinfeng_w@126.com

0 引言

我国是水稻种植大国,水稻全程机械化生产对保障国家粮食安全具有至关重要的战略意义^[1-4]。田埂作为稻田灌溉系统不可或缺的组成部分,其主要功能在于蓄水保墒、分隔田块、便于田间管理^[4]。因此坚固密实的田埂不但是高标准农田建设的基础而且是蓄水漫灌的关键。

在筑埂机械研发方面,国外起步较早,已形成各自的特色技术。日本由于其水稻种植模式,对水田筑埂机研究较为深入,如松山有限公司 DZR300EJ 型、小桥工业 XRV872 型和久保田 ASK850M 型等代表性单侧筑埂机^[5-6]。这些机型所筑田埂坚实度高、平整度好,但结构较为复杂,造价昂贵且维修不便,更重要的是难以实现原地起埂与一次成形,不完全适用于我国的水田作业环境。欧美国家的筑埂机械多服务于旱作农业,侧重于大型、高效的垄作技术,常与激光平地技术结合,实现高精度作业,但其技术路线和装备结构与水田筑埂的农艺要求存在显著差异。

目前国内的水田筑埂作业仍高度依赖人工,不但劳动强度较大、效率低下,且筑埂质量参差不齐,易出现坍塌、渗漏等问题,导致水资源浪费并影响水稻正常生长。国内一些科研院所及中小企业也研制出一些筑埂机型,主要分为单侧和双侧两种筑埂形式^[7-9]。王金峰等^[10]开发设计出一种翻转 180°后通过拖拉机倒行实现田埂拐角处连续筑埂作业的筑埂机;刘明勇等^[11]设计一种偏心振动压实式的水田筑埂机;禹鸣机械厂生产了一种利用两个斜置对称安装的犁板进行取土与聚土作业的双侧筑埂机。但上述筑埂机均存在一定局限性,整机繁重,结构复杂,动力消耗大,不能在含水率较低的地块原地起埂。

随着城镇化进程的加快和农业劳动力的持续转移,农业生产中的“用工难、用工贵”问题日益凸显。为降低人工成本、减轻劳动强度、提高作业效率、适应不同土壤含水率,本文结合水田筑埂农艺要求,设计一种带有变量喷淋系统的水田双侧筑埂机,该系统的核心目的在于主动将土壤含水率调控至最适范围,从根本上解决因含水率不适导致成形难的问题。本文将从整机结构设计和工作原理阐释入手,对触土部件进行力学分析,并利用 EDEM 离散元仿真软件进行旋切集土过程的虚拟仿真试验,确定机具最优工作参数,最终通过田间试验检测筑埂机的实际作业性能。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构与主要参数

水田双侧筑埂机整机结构如图 1 所示,主要由机架、传动系统、三点悬挂装置、纵切式旋耕集土装置、镇压成形装置、变量喷淋系统等组成。

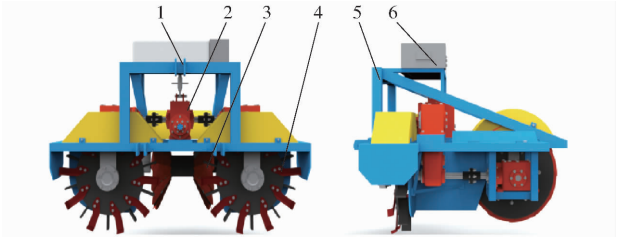


图 1 水田双侧筑埂机结构图
Fig. 1 Structural diagram of paddy field double-side ridge building machine
1. 三点悬挂装置 2. 传动系统 3. 镇压成形装置 4. 纵切式旋耕集土装置 5. 机架 6. 变量喷淋系统

水田双侧筑埂机主要通过纵切集土、振动压实和羽片叠压等方式完成水田标准化筑埂作业,其整机结构紧凑,采用结构钢机架设计,取土弯刀采用刀盘式螺栓连接,箱体类部件通过组装方式连接。筑埂机通过三点悬挂装置与拖拉机挂接,拖拉机动力输出轴经万向节联轴器与筑埂机变速箱上的动力输入轴连接,变速箱的动力输出轴通过筑埂机两侧的换向齿轮箱将动力传递给两侧的纵切刀盘和镇压辊。整机主要技术参数如表 1 所示。

表 1 水田双侧筑埂机主要技术参数
Tab. 1 Main technical parameters of double-side ridging building machine for paddy fields

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 673×2 114×1 250
整机质量/kg	450
配套功率/kW	≥60
旋耕刀数量/把	20
工作效率/(km·h ⁻¹)	1.5~2.0
筑埂高度/mm	290~300
筑埂顶宽/mm	260~270
筑埂底宽/mm	450~460

1.2 传动系统与工作原理

水田双侧筑埂机传动系统如图 2 所示,筑埂机的动力由拖拉机后方的动力输出轴通过万向节连接至动力输入轴来提供,通过主变速箱变速后传递至两侧副变速箱,由两侧副变速箱驱动旋耕部件进行作业,其中左侧副变速箱还需将动力传递至筑埂变速箱上驱动镇压部件进行作业,旋耕部件和动力输入轴转速比为 1:1,主、副变速箱传动比为 1:1,旋耕部件和镇压部件转速比为 3:2。

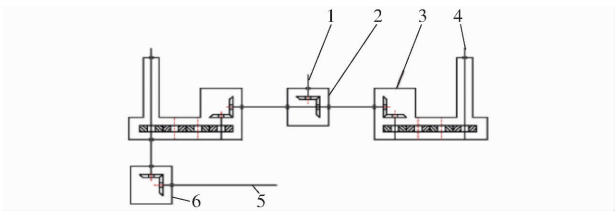


图 2 水田双侧筑埂机传动系统示意图

Fig. 2 Schematic of transmission system for double-side paddy field ridger building machine

1. 动力输入轴 2. 主变速箱 3. 旋耕部件变速箱 4. 旋耕部件动力输入轴 5. 镇压部件动力输入轴 6. 镇压部件变速箱

工作时,依据水田原地起埂要求,调节筑埂机至理想作业位置。拖拉机行驶过程中,两个前置纵切旋耕集土刀盘相对旋转,带动旋耕刀对土壤进行切削并抛送至机具中央区域,再由刀盘后的集土拨片将土壤向中心线方向聚集,通过两侧聚土挡板使土壤局部堆积在筑埂工作区域,并通过变量喷淋系统调节土壤含水率至适宜范围,经羽片叠加式镇压辊旋转和弹性变形,对堆积土壤反复拍打、振动、压实,使土壤中颗粒的相对位置发生变化并进行相互填充。小颗粒填充大颗粒之间的空隙,水分填充小颗粒之间的空隙。随着被压实土壤颗粒之间的空隙减小,土壤中的含气量也逐渐减小,土壤更加密实,其硬度也逐渐增加,形成密实光滑的田埂^[11-14],原理如图 3 所示。

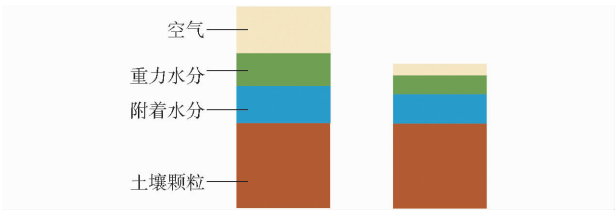


图 3 羽片叠加式镇压辊筑埂原理图

Fig. 3 Principle diagram of blade superimposed type pressure roller for embankment construction

2 触土部件设计及受力分析

2.1 旋耕集土部件设计

触土部件主要由旋耕集土部件和镇压部件组成。筑埂机工作时,旋耕集土部件负责对土壤的切削和抛送,镇压部件负责对汇聚土壤的镇压。两种部件协同配合,使田埂镇压成形。

旋耕集土部件由旋耕刀盘、取土弯刀和集土拨片组成,结构如图 4 所示。通过对用土量的计算,确定刀盘直径为 600 mm,左右两侧对称布置。在刀盘正面均匀安装取土弯刀,在刀盘背面均匀安装集土拨片,集土拨片与取土弯刀交错排列,一次完成取土、抛土、集土功能,使旋耕过程连贯,减小前进阻力对机具作业的影响,提高旋耕集土效率,为后续筑埂

作业提供充足集土量。刀盘、旋耕刀、取土拨片材料选取 65Mn 钢,保证其有良好的耐磨性和较高的疲劳强度^[15-16]。

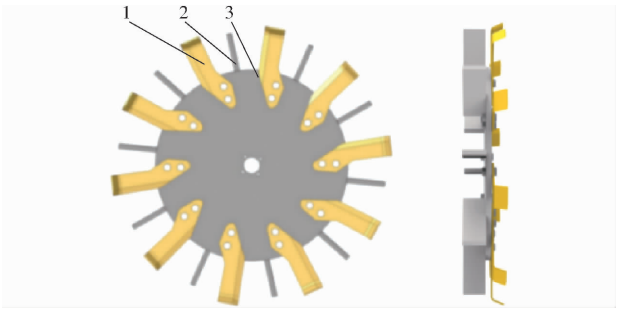


图 4 旋耕集土部件结构示意图

Fig. 4 Schematic of rotary tillage and soil gathering component structure

1. 取土弯刀 2. 集土拨片 3. 旋耕刀盘

2.2 镇压部件设计及受力分析

2.2.1 镇压部件设计

镇压部件由镇压辊和叠加式羽片组成。各羽片依次使用螺栓与镇压辊两侧圆盘连接,参考镇压辊回转方向,呈前低后高的倾斜,倾斜角度约为 20°。相邻羽片按照与土壤接触的有效区域可划分为接触面区域和非接触面区域^[17-18],结构如图 5 所示。工作过程中,镇压辊和叠压式羽片相结合实现静压塑型和振动压实,同时对埂顶和埂侧进行拍打、振动、压实,筑埂成形。

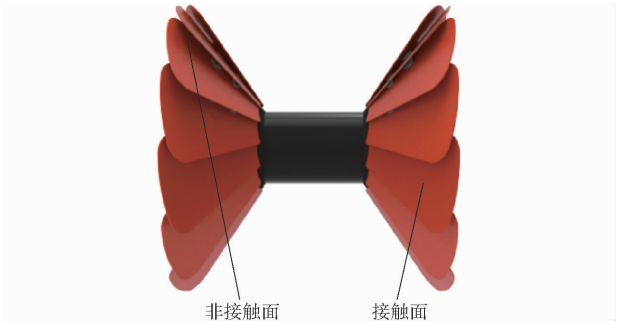


图 5 羽片叠加式镇压辊结构示意图

Fig. 5 Schematic of feather-plate superimposed pressure roller structure

2.2.2 镇压部件受力分析

为研究镇压装置作业规律,对镇压装置进行力学分析,以镇压辊回转中心为坐标原点,建立空间直角坐标系,设定镇压装置进行匀速前进作业,其受力情况如图 6 所示。

当镇压装置做匀速圆周运动时,在 XOY 平面可得到平衡方程

$$\sum F_x = R_1 + R_2 - T = 0 \quad (1)$$

$$\sum F_y = N_1 + (N_{21} - N_{22}) \sin \theta - W_1 - W_{21} - W_{22} = 0 \quad (2)$$

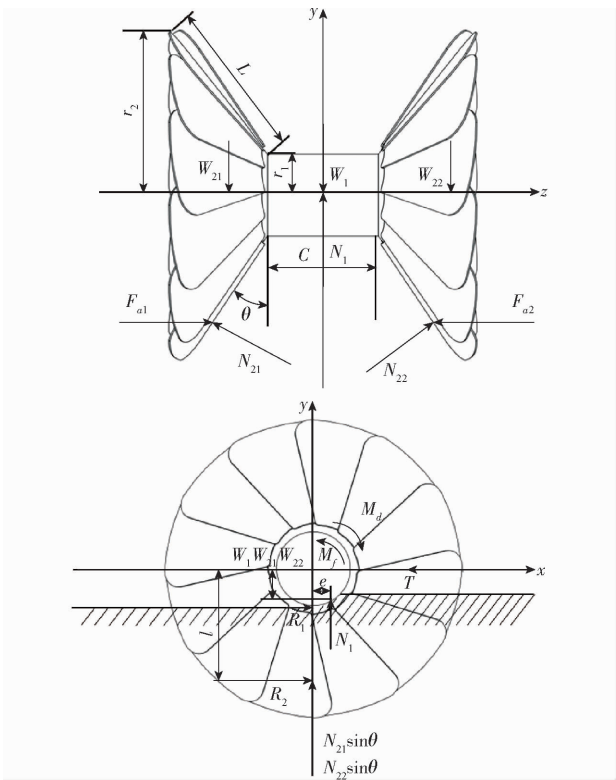


图6 镇压筑埂部件受力分析

Fig.6 Analysis of force on repressive embankment component

$$\sum M_{xoy} = M_d - N_1 e - R_1 h - R_{21} l - R_{22} l - M_f = 0 \tag{3}$$

其中 $R_1 = \mu_1 N_1$ (4)

$$R_{21} = \mu_1 N_{21} \sin \theta \tag{5}$$

$$R_{22} = \mu_2 N_{21} \sin \theta \tag{6}$$

式中 M_d ——拖拉机提供的主动力矩, N·m

T ——机具对镇压装置的主动力, N

M_f ——支撑轴承产生的摩擦力矩, N·m

R_1 ——镇压辊筒工作时与土壤接触产生的摩擦力, N

R_2 ——土壤对镇压辊羽片的摩擦力, N

$F_x、F_y$ ——x、y 方向的受力, N

M_{xoy} ——绕点 o 产生的扭矩, N·m

$N_{21}、N_{22}$ ——土壤对羽片的正压力, N

$W_1、W_{21}、W_{22}$ ——镇压辊筒与双侧羽片重力, N

$R_{21}、R_{22}$ ——土壤对双侧羽片的摩擦力, N

l ——回转力臂, m

N_1 ——土壤对镇压辊筒的正压力, N

e —— N_{21} 到 y 轴的距离, m

h —— N_{21} 到 x 轴的距离, m

μ_1 ——镇压辊与土壤接触的摩擦因数

μ_2 ——羽片与土壤接触的摩擦因数

θ ——镇压辊筒与羽片锥片安装角度, (°)

M_d 的值与 $R_1、R_{21}、R_{22}、e、h、T$ 均有相关性,且不同型号拖拉机的 M_d 不同,所以存在极值。当 $N_1、N_{21}、N_{22}$ 在不变的情况下, $R_{21}、R_{22}$ 的大小与镇压辊和羽片锥片对土壤接触的摩擦因数 $\mu_1、\mu_2$ 有关,一般情况下,摩擦力越大镇压装置对土壤的压力越大,所筑田埂坚实度越高。锥片和羽片结合的镇压装置,能够增大田埂侧边土壤的法向接触面积,使镇压装置与土壤产生更大的摩擦力,进而提高镇压装置对土壤的压力。

设镇压辊筒重力为 W_1 , 两侧圆盘锥片重力为 W_2 , 有

$$W_1 = 2\pi r_1 C s g \tag{7}$$

$$W_2 = 2\pi [r_1^2 + r_2^2 + (r_1 + r_2) L] s g \tag{8}$$

式中 r_1 ——镇压辊筒回转半径, m

r_2 ——镇压辊羽片外端点绕 z 轴转动的最大半径, m

C ——镇压辊筒长度, m

L ——羽片长度, m

s ——镇压辊截面积, m^2

g ——重力加速度, m/s^2

镇压装置工作时只有滚动没有滑动的条件为

$$M_d \geq N_1 e + R_1 h + R_{21} l + R_{22} l + M_f \tag{9}$$

$$R_1 + R_{21} + R_{22} \geq T \tag{10}$$

设计时 $R_1、R_{21}、R_{22}$ 取最大值时可确定镇压装置的驱动力矩, 通过此数据确定镇压辊筒的直径, 可设 $N_1 = W_1, N_{21} = W_{21} \sin \theta, N_{22} = W_{22} \sin \theta, \mu_1 = \mu_2 = 1$, 则

$$R_{1\max} = N_1 = W_1 \tag{11}$$

$$R_{21\max} = \mu_1 N_{21} \sin \theta = W_{21} \tag{12}$$

$$R_{22\max} = \mu_2 N_{22} \sin \theta = W_{22} \tag{13}$$

$$l_{\max} = r_2 \tag{14}$$

由式(9)~(14)得

$$M_d \geq 2\pi r_1 C s g (e + h) +$$

$$2\pi [r_1^2 + r_2^2 + (r_1 + r_2) L] s g r_2 + M_f \tag{15}$$

$$T \leq 2\pi r_1 C s g + 2\pi [r_1^2 + r_2^2 + (r_1 + r_2) L] s g \tag{16}$$

以上对水田双侧筑埂机镇压装置的受力分析, 可根据不同地区水田种植时对田埂的农艺要求确定技术参数。

3 控制系统设计

3.1 硬件组成与电路设计

现阶段水田筑埂效果受地块含水率影响显著^[19]: 含水率过低时土壤难以成形, 过高时又易粘附镇压装置, 导致田埂表面光滑度和坚实度下降。为此, 设计了一套变量喷淋系统, 在筑埂过程中对集土区和镇压装置表面实施精准喷水调控, 既调节土壤含水率以优化成型, 又在镇压辊表面形成水膜以

防止黏土附着。与传统控制系统相比变量喷淋系统具有显著优势:其可以实现对水泵流速的精准、连续变量控制,而非简单的开/关控制;并且提供了自动和手动两种控制模式,集成了无线蓝牙模块和手机交互终端,实现了作业参数的远程设置与工作状态的实时监控。控制系统硬件实物图如图 7 所示,其主要包含供电单元、主控单元、运动单元、反馈单元与通信交互单元等。

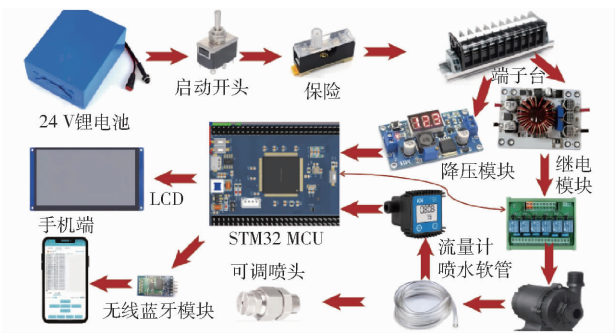


图 7 变量喷淋系统硬件实物图

Fig. 7 Hardware physical diagram of variable spray system

其中供电单元以 24 V 锂电池为能源,配备总开关、保险、端子台及双降压模块,分别输出 12 V 供继电器模块和流量传感器使用、5 V 供主控和 LCD 使用,保障系统稳定可靠。主控单元以 STM32F103ZET6

为核心,负责系统协调与信号处理;运动单元由继电器模块、直流水泵、喷水软管及可调喷头组成,实现变量喷淋控制;反馈单元采用高精度液体流量计实时监测流量、流速及累计流量;通信交互单元包含 LCD、无线蓝牙模块与手机端,用于工作状态显示与远程控制。

变量喷淋系统电路如图 8 所示,该系统以 STM32F103ZET6 为核心,集成供电、驱动、检测与通信模块。系统在作业前由土壤水分检测仪采集筑埂路径含水率数据并上传至主控,主控根据湿度-流速数学模型计算目标流速。当接收到手机端启动指令后,主控输出控制信号驱动继电器与 BLDC 驱动器,使水泵按 PWM 占空比实现变速喷淋。流量计实时反馈脉冲信号至主控进行流量换算与监测;当接收到停止指令时,主控关闭驱动信号,水泵停止工作,实现喷淋过程的自动控制与流量闭环调节。

3.2 软件设计

为保证变量喷淋系统的稳定工作,在设计可靠硬件系统的基础上,为其设计控制软件。软件采用 C 语言进行程序编写,开发环境为 Keil uVision5,并且采用 UCOSIII 操作系统,以保证系统实时性多任务执行的需求。此外,在软件开发中,变量喷淋系统

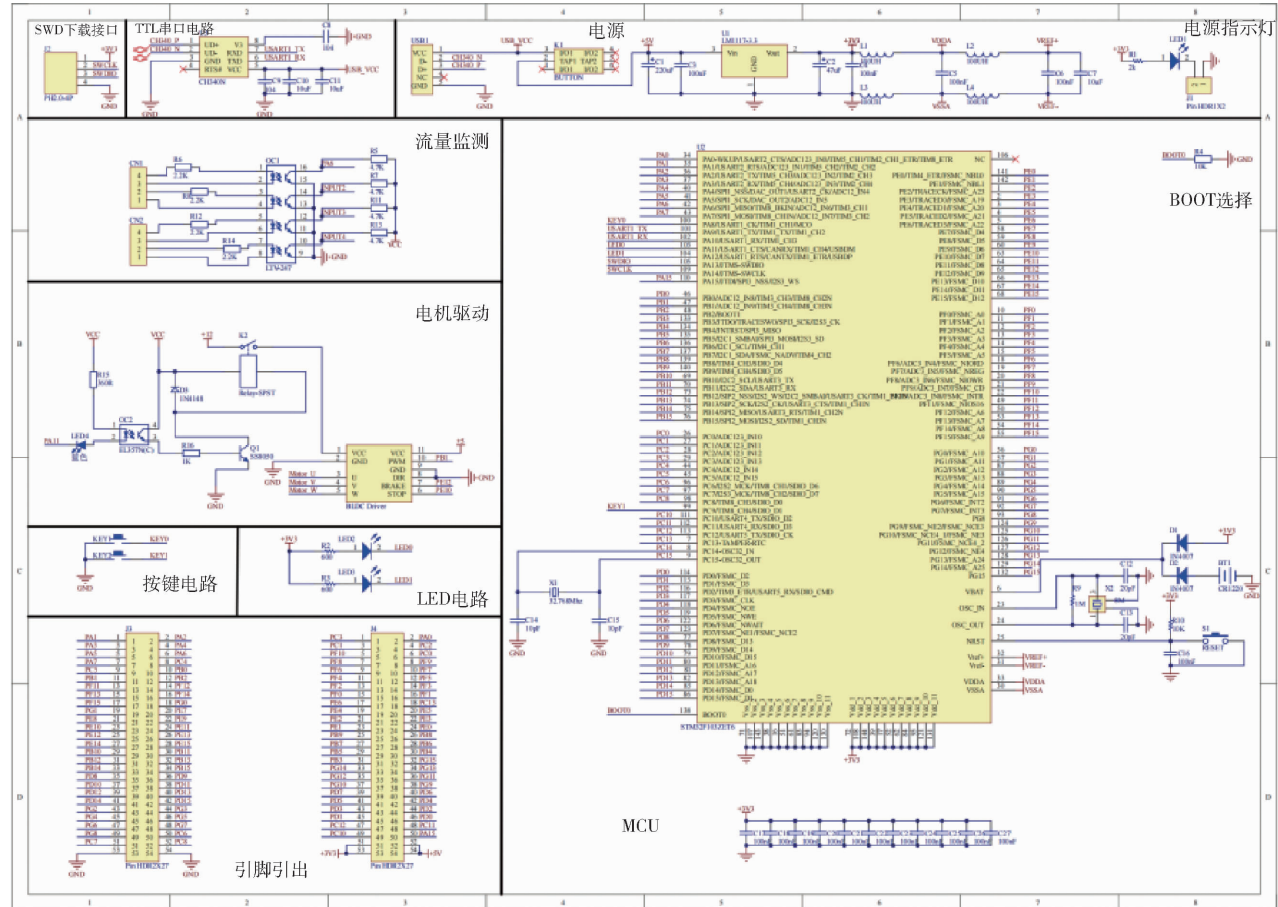


图 8 变量喷淋系统电路原理图

Fig. 8 Variable spray system circuit schematic

主要功能有:含水率信息接收、变量喷淋、流量流速监测、无线通信与工作信息显示,以确保及时获取土壤含水率信息,精准调节系统流量。

软件工作流程如图 9 所示,其工作原理为:系统初始化完成后在手机端进行控制模式选择,当选择手动模式时,设定通信参数并对流速进行手动配置,主控根据预定流速进行 PWM 占空比换算,进而改变 TIM3_CH4 的装载值并控制水泵流速,水泵工作完成后结束本次喷淋工作;当选择自动模式时,手机端下发开始指令后,通信参数自动检索设定,主控内部的流速模型依据回传的含水率进行流速换算,完成旧装载值的替换,更新后的 PWM 波驱动水泵进行流速自动控制。同时流量传感器回传的脉冲信号通过 TIM3_CH1 进行定时计数,经过换算得到流量流速。工作信息同步显示在 LCD 与手机交互端,当变量喷淋系统监测到含水率不当时,反馈给主控,主控进行流速整定,实现系统的负反馈调节。

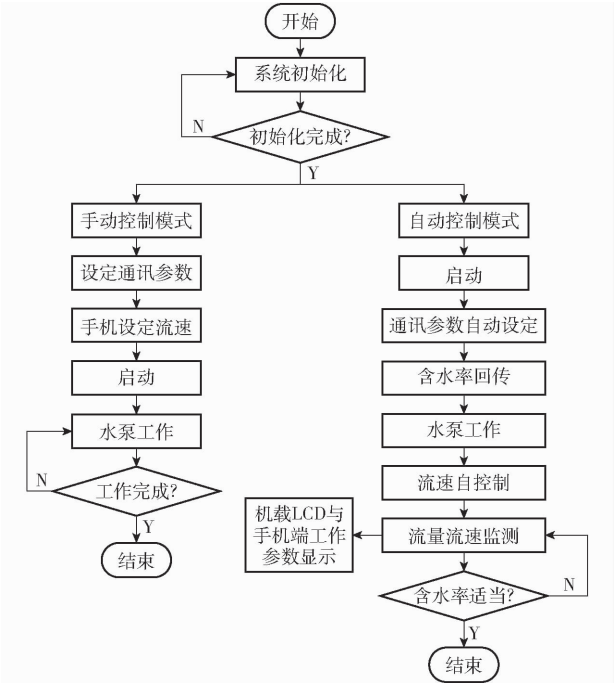


图 9 软件工作流程图

Fig. 9 Software workflow diagram

4 仿真分析

4.1 离散元模型建立

为检验水田双侧筑埂机的集土性能,采用离散元分析软件 EDEM 对集土部件工作过程进行虚拟仿真试验^[20-21]。通过建立仿真土壤模型,结合单因素试验进行仿真,分析水田双侧筑埂机集土部件作业过程中工作转速、前进速度、取土深度 3 个试验因素对集土率、集土均匀性变异系数评价指标的影响。

4.1.1 土壤模型建立

机械旋耕集土部件作业质量与土壤物理性质密切相关,所以在模拟土壤时选用 Hertz - Mindlin with Bonding 接触模型,此模型可有效模拟土壤颗粒与旋切集土部件的粘结、摩擦、破碎状态^[22]。为模拟旋切集土部件田间真实的工作状态,在 EDEM 仿真软件中建立虚拟土槽,设置长×宽×高为 5 000 mm×3 000 mm×300 mm,并对土槽进行分层处理以保证试验准确性,其中 0~150 mm 为土壤耕作层,150~300 mm 为土壤底层。本研究结合前期测定参数及文献[23],对土壤离散元颗粒进行参数设置,具体仿真参数见表 2。

表 2 土壤离散元模型接触参数

Tab. 2 Contact parameters of soil discrete element model

土壤类型	参数	数值
耕作层土壤	泊松比	0.38
	密度/(kg·m ⁻³)	1 280
	剪切模量/Pa	6×10 ⁷
	粘结半径/mm	5.51
底层土壤	泊松比	0.3
	密度/(kg·m ⁻³)	1 500
	剪切模量/Pa	1×10 ⁸
	粘结半径/mm	5.56

4.1.2 旋切集土部件模型建立

应用三维建模软件 Creo9.0 等比例绘制旋切集土部件几何模型,由于罩壳和聚土挡板会影响土壤流动路径,因此将其加入模型中。为保证仿真模拟与计算的合理性与有效性,对旋切集土部件以及挡土罩壳进行简化处理,将与土壤颗粒模型运动过程接触中不影响作业效果的部件去除。将模型导入 EDEM 中,将模型设置为一个整体,仿真模型如图 10 所示。设置旋耕刀材料为 65Mn 钢,泊松比为 0.35,剪切模量为 7.8×10¹⁰ Pa,密度为 7 850 kg/m³^[24]。

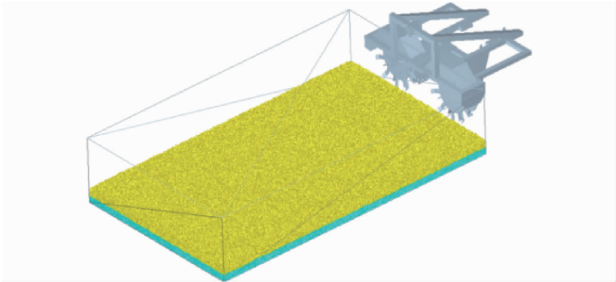


图 10 整体仿真模型

Fig. 10 Overall simulation model

4.1.3 仿真过程

根据理论分析和实际作业要求,仿真前设置旋耕集土部件前进速度为 0.8 km/h,转速为 500 r/min,取

土深度为 150 mm, 网格单元尺寸为 5 mm, 仿真时间共 15 s。仿真试验开始后, 每 0.01 s 保存一次数据, 以便后续数据分析。

4.2 试验设计与评价指标

4.2.1 试验设计

为探究旋耕集土部件最佳工作参数组合, 采用三因素三水平正交试验方案, 基于理论分析和田间作业实际要求, 选定前进速度为 0.6 ~ 1.0 km/h, 旋耕集土部件工作转速为 400 ~ 500 r/min, 取土深度为 140 ~ 160 mm。试验因素编码如表 3 所示。

4.2.2 评价指标

集土率与集土均匀性变异系数是衡量水田双侧筑埂机筑埂效果的重要指标^[25-26], 其间接决定了田埂的完整性和坚实度。集土率与集土均匀性的测量

方式如下:

(1) 集土率

集土率指取样体积范围内, 落在镇压区域范围内的土壤颗粒总数 A_3 与双侧取样体积范围内所取土壤颗粒总数 ($A_1 + A_2$) 的比值, 具体操作过程如图 11 所示。

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

编码	因素		
	工作转速 $x_1 / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	前进速度 $x_2 / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	取土深度 x_3 / mm
-1	400	0.6	140
0	450	0.8	150
1	500	1.0	160

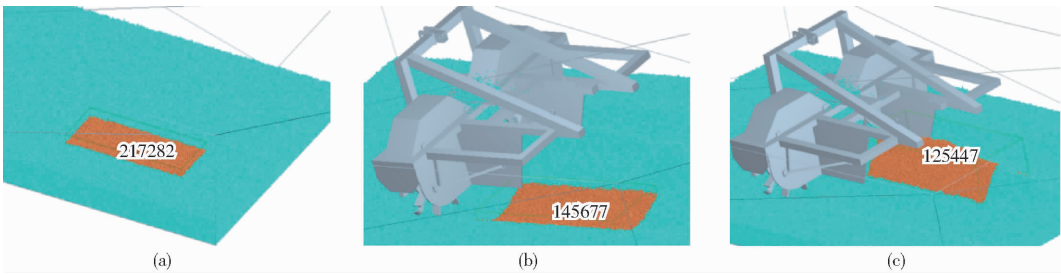


图 11 集土率计算方法原理图

Fig. 11 Schematics of calculation method for soil compaction rate

集土率 Q 计算公式为

$$Q = \frac{A_3}{2(A_1 + A_2)} \times 100\% \tag{17}$$

式中 A_1 ——单侧取样体积范围内土壤颗粒总数, 个
 A_2 ——单侧取样体积范围内剩余土壤颗粒总数, 个

(2) 集土均匀性变异系数

在集土区域选取 1.5 m 长的所取土壤标记为橙色, 利用 EDEM 后处理模块, 划分为 10 个同等大小的网格, 网格尺寸(长 × 宽 × 高)为 150 mm × 600 mm × 300 mm, 并提取每个网格内的颗粒总数, 如图 12 所示。

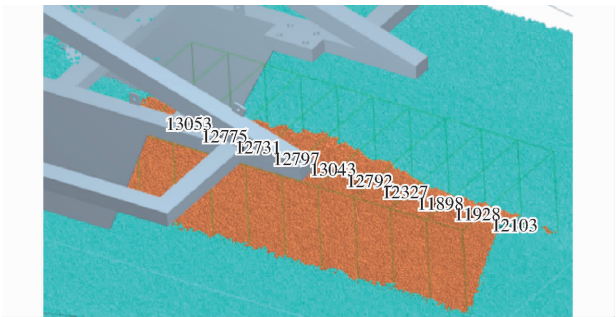


图 12 镇压区域土壤网格划分

Fig. 12 Territorial soil grid division for suppression

集土均匀性变异系数 S_i 计算公式为

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (h_i - h_0)^2}{n - 1}} \times 100\% \tag{18}$$

式中 h_0 ——全部网格土壤颗粒平均数, 个
 h_i ——第 i 个网格土壤颗粒数, 个
 n ——集土均匀性测量次数

4.3 仿真结果与分析

4.3.1 试验结果

在虚拟仿真试验过程中, 根据试验因素编码表进行正交响应面分析试验, 具体试验方案及结果如表 4 所示, 表中 X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

借助数据处理软件 Design-Expert 13.0 对集土率和集土均匀性变异系数进行方差分析, 分析结果如表 5 所示。根据表 5 可得出集土率和集土均匀性变异系数的回归方程为

$$\begin{aligned} Y_1 &= 85.90 - 6.43X_1 + 4.49X_2 + 3.56X_3 - \\ &\quad 3.40X_1X_2 - 2.32X_2X_3 - 3.00X_1^2 \tag{19} \\ Y_2 &= 3.53 + 0.38X_1 - 0.2075X_2 - 0.5175X_3 - \\ &\quad 0.4375X_1X_2 - 0.6875X_1X_3 + 0.5908X_2^2 + 0.9408X_3^2 \tag{20} \end{aligned}$$

通过表 5 中各因素对旋切集土部件集土率和集土均匀性变异系数方差分析, 各因素对集土率和集

表 4 响应面分析结果

Tab. 4 Results of response surface analysis					
试验号	因素			集土率	集土均匀性变
	X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	异系数 $Y_2/\%$
1	0	-1	1	86.9	4.37
2	0	0	0	85.7	3.13
3	0	1	-1	87.3	5.24
4	-1	1	0	96.1	3.80
5	1	1	0	77.6	4.00
6	0	0	0	87.0	3.04
7	1	0	-1	72.8	6.08
8	-1	-1	0	80.6	3.66
9	0	0	0	85.3	3.58
10	0	0	0	87.7	3.40
11	-1	0	-1	88.4	4.26
12	0	-1	-1	73.4	5.54
13	1	-1	0	75.7	5.61
14	0	0	0	88.3	3.88
15	-1	0	1	92.2	4.53
16	0	1	1	91.5	4.48
17	1	0	1	79.8	3.60

土均匀性变异系数的回归模型 $P < 0.05$, 表明回归模型显著; 失拟项 $P > 0.05$, 失拟不显著, 说明模型所拟合出的二次回归方程可以正确反映出集土率和集土均匀性变异系数与前进速度、工作转速、取土深度三者之间的关系, 回归模型可以对试验结果进行预测。对目标函数 Y_1 , 因素 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1X_2 、 X_1^2 影响极显著, X_2X_3 影响显著, 其余各因素均不显著。对目标函数 Y_2 , 因素 X_3 、 X_1X_3 、 X_3^2 影响极显著, X_1 、 X_1X_2 、 X_2^2 影响显著, 其余各因素均不显著。

4.3.2 响应曲面法分析

运用 Design-Expert 13.0 软件得到各因素对筑埂机集土率响应曲面, 如图 13 所示。

由图 13a 可知, 当前进速度固定时, 集土率随工作转速的增加呈先增大后减小的趋势; 当工作转速固定时, 集土率随前进速度的增加仍呈先增大后减小的趋势。由图 13b 可知, 当取土深度固定时, 集土

表 5 回归方程方差分析

Tab. 5 Variance analysis of regression equation						
试验指标	变异来源	平均和	自由度	均方	F	P
集土率	模型	698.86	6	116.48	41.22	<0.0001**
	X_1	330.25	1	330.25	116.86	<0.0001**
	X_2	161.1	1	161.1	57.01	<0.0001**
	X_3	101.53	1	101.53	35.93	0.0001**
	X_1X_2	46.24	1	46.24	16.36	0.0023**
	X_2X_3	21.62	1	21.62	7.65	0.0199*
	X_1^2	38.12	1	38.12	13.49	0.0043**
	残差	28.26	10	2.83		
	失拟项	21.7	6	3.62	2.21	0.232
	误差	6.56	4	1.64		
	总和	727.12	16			
集土均匀性变异系数	模型	11.79	7	1.68	11.99	0.0006**
	X_1	1.16	1	1.16	8.23	0.0185*
	X_2	0.3444	1	0.3444	2.45	0.1518
	X_3	2.14	1	2.14	15.25	0.0036**
	X_1X_2	0.7656	1	0.7656	5.45	0.0444*
	X_1X_3	1.89	1	1.89	13.46	0.0052**
	X_2^2	1.47	1	1.47	10.49	0.0102*
	X_3^2	3.74	1	3.74	26.61	0.0006**
	残差	1.26	9	0.1404		
	失拟项	0.7989	5	0.1598	1.37	0.3903
	误差	0.4651	4	0.1163		
	总和	13.05	16			

注: ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$); * 表示差异显著 ($0.01 \leq P < 0.05$)。

率随工作转速的增加而减小; 当工作转速固定时, 集土率随取土深度的增加而增大。由图 13c 可知, 当取土深度固定时, 集土率随前进速度的增加呈先增加后减小的趋势; 当前进速度固定时, 集土率随取土深度的增加而增大。

根据仿真过程分析, 前进速度过快会导致旋耕不充分进而出现雍土现象导致集土率变大。随着取土深度的增加, 取土量增加进而集土率增大, 但深度过大会影响后续种植工作。随着工作转速的增加, 旋切后被抛送的土壤线速度和抛送距离增加, 因此集土率增大。工作转速过大时, 土壤被抛出集土区

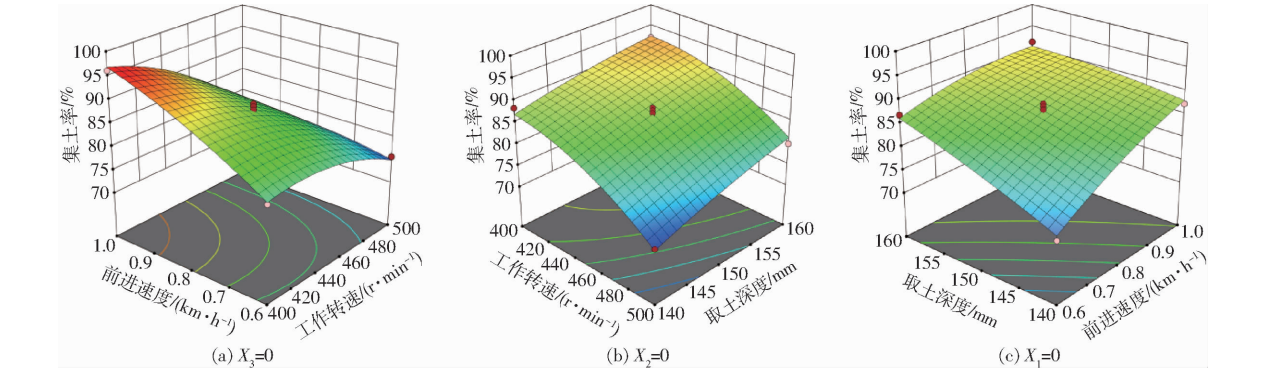


图 13 各因素对集土率影响的响应曲面

Fig. 13 Response surfaces of influence of each factor on soil compaction rate

域从而导致集土率降低。

运用 Design-Expert 13.0 软件得到各因素对筑

埂机集土均匀性变异系数影响的响应曲面,如图 14 所示。

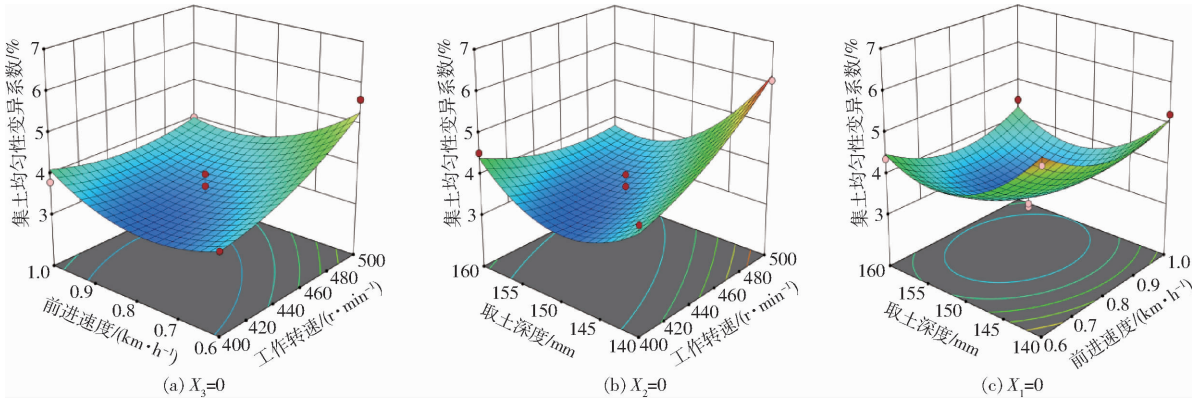


图 14 各因素对集土均匀性变异系数影响的响应曲面

Fig. 14 Response surfaces of influence of each factor on coefficient of variation of soil homogeneity

由图 14a 可知,当前进速度固定时,集土均匀性变异系数随工作转速的增大而增大;当工作转速固定时,集土均匀性变异系数随前进速度的增加呈先减小后增大的趋势。由图 14b 可知,当取土深度固定时,集土均匀性变异系数随工作转速的增加而增大;当工作转速固定时,集土均匀性变异系数随取土深度的增加呈先减小后增大的趋势。由图 14c 可知,当取土深度固定时,集土均匀性变异系数随前进速度的增加呈先减小后增大的趋势;当前进速度固定时,集土均匀性变异系数随取土深度的增加仍呈先减小后增大的趋势。

4.3.3 参数优化

为提升双侧筑埂机作业性能,根据多因素试验研究结果,利用 Design-Expert 13.0 进行优化求解,以集土率取最大值、集土均匀性变异系数取最小值为优化指标,建立非线性规划参数模型

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (21)$$

得到最优参数组合为:工作转速 415 r/min、前进速度 0.8 km/h、取土深度 150 mm,此时旋切集土部件工作性能最佳、作业质量最优,其集土率为 89.34%,集土均匀性变异系数为 3.275%。

为验证优化后参数的准确性,利用 EDEM 软件进行 3 次重复试验,得到集土率和集土均匀性变异系数的平均值为 91.17% 和 3.184%。重复试验数据与模型优化值相对误差小于 5%,优化结果可靠。

5 田间试验

5.1 变量喷淋系统的流量标定

为检测变量喷淋系统对土壤含水率造成的影

响,对变量喷淋系统进行预试验。标定喷淋系统的流速流量变化范围和使土壤含水率升高 2% 所需要的流量值。依据所需的流量值,将水泵流速设置为 5 个等级,则土壤含水率的变化范围为 0 ~ 10%。

5.2 试验设备与条件

根据仿真优化结果和田间实际工作要求,确定最佳工作参数组合为:工作转速 415 r/min、前进速度 0.8 km/h、取土深度 150 mm,并研制出水田双侧筑埂机样机。为对水田双侧筑埂机的实际工作性能进行检验,2025 年 4 月在东北农业大学农学院水稻试验田开展田间试验。试验田前茬作物为水稻,土壤类型为典型黑土,质地为黏壤土。试验在休耕期进行,田块已初步平整。试验期间天气晴朗,环境温度 为 8 ~ 15℃,无降水,风力小于 3 级。配套功率选用约翰迪尔 904 型拖拉机。在试验前,对田内多个点位的土壤进行基础参数测定:土壤坚实度为 240 ~ 260 kPa,土壤含水率在 14% ~ 25% 之间呈现不均匀分布。这种初始含水率的广泛波动,为验证变量喷淋系统的调控能力提供了典型的田间工况。

5.3 试验方法

田埂坚实度是影响水田蓄水能力的关键,其间直接影响到水稻的整体产量。因此,本试验选取田埂坚实度平均值和坚实度变异系数作为检验机具性能的评价指标。本研究利用数字式土壤坚实度测量仪进行测量。该仪器通过测量一个标准锥头以恒定速率压入土壤特定深度时所受到的阻力来表征坚实度,其测量值在农业工程研究与实践中被广泛用于评估土壤的压实情况和承载能力^[12]。测量方法遵循 GB/T 5262—2008《农业机械试验条件测定方法的一般规定》,以确保数据的可靠性和可比性。田埂坚实度平均值和坚实度变异系数计算公式为

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} P_i}{n_0}$$

(22)

$$V = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_0} (P_i - \bar{P})^2}{n_0 - 1}} \times 100\%$$

(23)

式中 $\bar{P}$ ——田埂坚实度平均值,kPa
 P_i ——第*i*点坚实度测量值,kPa
 n_0 ——田埂坚实度测量次数
 V ——田埂坚实度变异系数, %

本研究进行台架试验以探究筑埂所需含水率条件。当土壤含水率过低时,土壤流动性强,无法汇聚;当土壤含水率过高时,土壤团粒黏重,易被甩出或粘附于镇压辊。水田双侧筑埂机在不同含水率下的作业效果如图 15 所示。



图 15 不同含水率下作业效果
Fig. 15 Operation effect diagrams under different moisture contents

研究结果发现,土壤含水率在 26% ~ 28% 范围内筑埂效果最好。因此,在田间筑埂作业前,对筑埂区域土壤含水率进行前期检测,每 1 m 取 5 个采样点计算平均含水率。在筑埂作业时,将平均含水率数值通过蓝牙模块传输给变量喷淋控制系统,系统自主决策调节喷淋流量以改变土壤含水率至 26% ~ 28% 范围内。作业效果如图 16 所示。



图 16 田间作业效果
Fig. 16 Field operation effect diagram

筑埂完成后,沿筑埂方向每间隔 2 m 选取一个采样断面,在采样点的同一截面内,利用土壤坚实度测量仪分别测量埂顶和埂两侧(距顶缘 2/3 高度

处)的田埂坚实度,测量深度统一为 50 mm,测量位置如图 17 所示,每次选取 5 个采样断面,共测量 15 个点,为确保田埂内部有足够时间风干,之后每间隔 6 h 测量一次,共测量 8 次,观察田埂坚实度的变化情况。

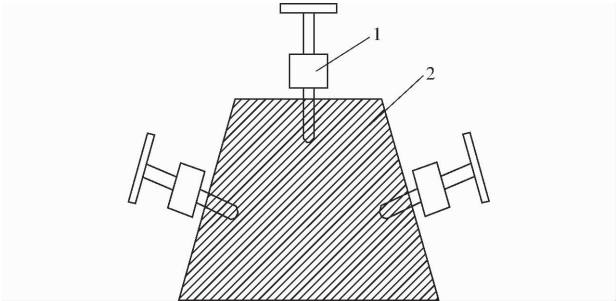


图 17 测量位置示意图
Fig. 17 Diagram of surveying position
1. 坚实度测量仪 2. 田埂

5.4 试验结果与分析

按式(22)、(23)计算出不同时间间隔下的田埂坚实度平均值和田埂坚实度变异系数,结果如表 6 所示。

表 6 水田双侧筑埂机田间作业坚实度检测结果
Tab.6 Field operation firmness test results for double-side ridging machines in paddy fields

间隔 时间/h	测量位置					
	埂左侧		埂顶		埂右侧	
	平均值/ kPa	变异 系数/%	平均值/ kPa	变异 系数/%	平均值/ kPa	变异 系数/%
6	805	8.48	576	8.25	846	8.54
12	1 217	7.21	794	7.14	1 225	7.32
18	1 585	6.35	948	6.28	1 550	6.26
24	1 914	5.43	1 187	5.22	1 894	5.14
30	2 386	4.12	1 305	4.16	2 414	4.20
36	2 631	3.66	1 538	3.64	2 623	3.72
42	2 612	3.78	1 577	3.52	2 638	3.68
48	2 669	3.58	1 592	3.44	2 677	3.47

根据表中的测试结果,可以得到田埂坚实度平均值和田埂坚实度变异系数与间隔时间之间的关系,如图 18 所示。

由图 18 可知,田埂坚实度平均值随间隔时间的增加而增大,田埂坚实度变异系数随间隔时间的增加而减小,二者均在筑埂 24 h 后趋于稳定。由于镇压装置为羽片叠加式,埂侧土壤会受到弹性羽片连续地拍打、振动、压实,所以埂侧的田埂坚实度较埂顶的田埂坚实度更大。最终埂顶各测量位置坚实度平均值不小于 1 538 kPa,埂侧各测量位置坚实度平均值不小于 2 612 kPa。埂顶宽 260 ~ 270 mm,埂底宽 450 ~ 460 mm,埂高 290 ~ 300 mm,均满足筑埂农艺要求。

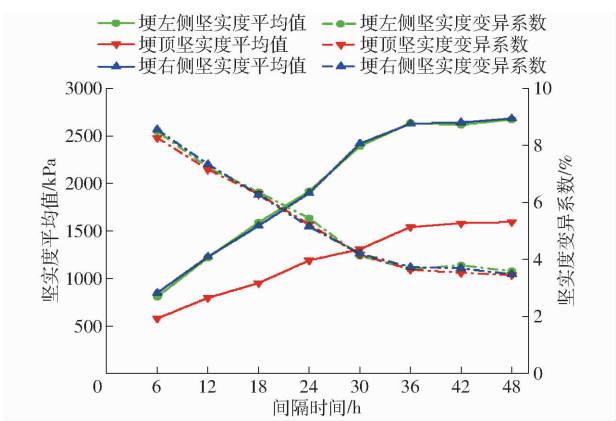


图 18 田埂坚实度平均值、坚实度变异系数与间隔时间关系曲线

Fig. 18 Relationship curves of mean firmness, coefficient of variation of firmness, and time interval on field bunds

6 结论

(1) 本研究根据筑埂农艺要求,通过对触土部件的设计与分析、计算机虚拟仿真、台架试验、田间试验等方法,设计了一种带有变量喷淋系统的水田双侧筑埂机。

(2) 水田双侧筑埂机能够通过搭载的变量喷淋系统改变土壤含水率,使筑埂机在 26% ~ 28% 的最适土壤含水率范围内筑埂作业,确保原地起埂、一次

成形。

(3) 对水田双侧筑埂机的关键部件进行设计和分析,应用 EDEM 离散元仿真软件对集土部件进行仿真分析,结合响应曲面法进行三因素三水平正交试验,研究筑埂机前进速度、工作转速、取土深度对集土率和集土均匀性变异系数的影响,最终根据仿真优化结果和田间实际作业要求确定最佳工作参数组合为:工作转速 415 r/min、前进速度 0.8 km/h、取土深度 150 mm。

(4) 设计一套变量喷淋控制系统,完成了控制系统软硬件的选型与设计,采用 UCOSIII 操作系统明确了软件控制工作流程,实现变量喷淋系统流量的实时监测。该控制系统具有操作简便、控制灵敏等特点,实现了筑埂作业时调节土壤含水率达到 26% ~ 28% 的需求。

(5) 田间试验结果表明,在土壤含水率不适宜筑埂时,变量喷淋系统可以及时改变流量进行调节。所筑田埂坚实度平均值随间隔时间的增加而增大,坚实度变异系数随间隔时间的增加而减小,风干 24 h 后两指标均趋于稳定,且埂侧坚实度平均值高于埂顶。埂顶和埂侧各测量位置坚实度平均值不小于 1 538、2 612 kPa,均满足筑埂农艺要求。

参 考 文 献

[1] 卢森,张玮平,胡安瑞,等. 我国北方可降解膜水稻覆膜插秧机械研究进展[J]. 中国稻米,2025, 31(5):17-25.
LU Sen, ZANG Weiping, HU Anrui, et al. Research progress of degradable film rice transplanting machinery in north China [J]. China Rice, 2025, 31(5):17-25. (in Chinese)

[2] 和贤桃,王鑫鹏,文策昂,等. 基于实时肥量获取的玉米播种机施肥可视化系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2025, 56(9):52-64,152.
HE Xiantao, WANG Xinpeng, WEN Ceang, et al. Design and testing of visualization system for fertilizer application in corn seeders based on real-time fertilizer quantity acquisition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9):52-64,152. (in Chinese)

[3] 李泽华,马旭,李秀昊,等. 水稻栽植机械化技术研究进展[J]. 农业机械学报,2018, 49(5):1-20.
LI Zehua, MA Xu, LI Xiuhao, et al. Research progress of rice transplanting mechanization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5):1-20. (in Chinese)

[4] JU Jinyan, CHEN Guoqing, LV Zhenyang, et al. Design and experiment of an adaptive cruise weeding robot for paddy fields based on improved YOLOv5[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 219:108824.

[5] 库浩锋. 筑埂机的作业机理分析与试验研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2020.
KU Haofeng. Operation mechanism analysis and experimental research of ridger[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020. (in Chinese)

[6] 何新如. 水田整地筑埂联合作业机的研究[D]. 长春:吉林农业大学,2016.
HE Xinru. The study on rotary tillage and building ridger combined working machine for paddy field[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[7] 刘亚东. 筑埂机旋耕切削装置设计及性能研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2019.
LU Yadong. Design and performance research of rotary tillage cutting device for embankment builder[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2019. (in Chinese)

[8] 王金武,唐汉,王金峰,等. 1DSZ-350 型悬挂式水田单侧旋耕镇压修筑埂机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2017, 33(1):25-37.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng, et al. Design and experiment on 1DSZ-350 type hanging unilateral rotary tillage

compacting ridger for paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1):25 – 37. (in Chinese)

[9] 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)

[10] 王金峰,王金武,孔彦军,等. 悬挂式水田筑埂机及其关键部件研制与试验[J]. 农业工程学报,2013, 29(6):28 – 34.
WANG Jinfeng, WANG Jinwu, KONG Yanjun, et al. Development and experiment of suspension ridger and its key components for paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(6):28 – 34. (in Chinese)

[11] 刘明勇,蔡昊,胡成龙,等. 偏心振动压实式筑埂机的仿真分析及试验[J]. 农机化研究,2023, 45(2):21 – 28.
LIU Mingyong, CAI Hao, HU Chenglong, et al. Simulation analysis and experiment of eccentric vibration compaction ridge building machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(2): 21 – 28. (in Chinese)

[12] 贾铭钰. 免耕播种机镇压装置的试验研究及计算机辅助设计[D]. 北京:中国农业大学,2000.
JIA Mingyu. Study on press-device of no-tillage seeder and cad[D]. Beijing: China Agricultural University, 2000. (in Chinese)

[13] HAN Qinkai, CHU Fulei. Parametric instability of a rotating truncated conical shell subjected to periodic axial loads[J]. Mechanics Research Communications,2013,53:63 – 74.

[14] HAN Qinkai, CHU Fulei. Parametric resonance of truncated conical shells rotating at periodically varying angular speed[J]. Journal of Sound & Vibration,2014,333(13):2866 – 2884.

[15] HEYDARPOUR Y, AGHDAM M. Transient analysis of rotating functionally graded truncated conical shells based on the Lord-Shulman model[J]. Thin-Walled Structures,2016,104:168 – 184.

[16] 徐高明,张晓宇,谭伟超,等. 基于离散元法的仿生旋耕刀作业性能研究[J]. 中国农机化学报,2025, 46(10):82 – 90.
XU Gaoming, ZHANG Xiaoyu, TAN Weichao, et al. Experiment on tillage performance of bionic rotary blade based on discrete element method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(10): 82 – 90. (in Chinese)

[17] 闫景凤,任洪忱,陈爱慧,等. 秸秆粉碎集条沟埋机设计与试验[J]. 农机化研究,2025,48(1):33 – 40.
YAN Jingfeng, REN Hongchen, CHEN Aihui, et al. Design and experiment of straw crushing and collecting bars trench burying machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025,48(1):33 – 40. (in Chinese)

[18] 赵振家,邹猛,薛龙,等. 压实对土壤应力分布的影响仿真分析[J]. 农业机械学报,2012, 43(增刊1):311 – 313,338.
ZHAO Zhenjia, ZOU Meng, XUE Long, et al. Simulation analysis of effect of compaction on soil stress distribution[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.1):311 – 313,338. (in Chinese)

[19] 赵艺. 水田筑埂机构的机理分析与设计[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2015.
ZHAO Yi. Mechanism analysis and design of ridger for paddy field[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)

[20] MORRISON J E. Compatibility among three tillage systems and types of plant press wheels and furrow openers for vertisolclaysoils[J]. Applied Engineering in Agriculture,2002,18(3): 293 – 295.

[21] LENAERTS B, AERTSEN T, TIJSKES E, et al. Simulation of grian-straw separation by discrete element modeling with bendable straw particles[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2014,101:85 – 88.

[22] 丁启朔,任骏,BELAL Eisa Adam,等. 湿粘水稻土深松过程离散元分析[J]. 农业机械学报,2017, 48(3):38 – 48.
DING Qishuo, REN Jun, BELAL Eisa Adam, et al. DEM analysis of subsoiling process in wet clayey paddy soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3):38 – 48. (in Chinese)

[23] 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)

[24] 廖宜涛,高丽萍,廖庆喜,等. 油菜精量联合直播机深施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020, 51(2):65 – 75.
LIAO Yitao, GAO Liping, LIAO Qingxi, et al. Design and test of side deep fertilizing device of combined precision rapeseed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2):65 – 75. (in Chinese)

[25] 翁武雄. 标准水田机械筑埂关键技术及回转式单侧筑埂机研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2022.
WENG Wuxiong. Research on key technology of standard mechanical ridge building and rotary single side ridger in paddy field [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[26] 林南南. 水田筑埂部件的动力学参数测试与试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2017.
LIN Nannan. Test and experimental study on dynamic parameters of water-ridge building[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese)