

基于处方图的水稻侧深变量施肥控制系统设计与试验

王金峰 吕振阳 赵敏义 王震涛

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要:为解决水稻侧深施肥过程中由于缺乏科学处方与智能决策而造成的肥料资源浪费、无法实现空间差异化肥力补给的问题,本文设计了一种基于处方图的水稻侧深变量施肥控制系统。结合排肥理论分析得出变量施肥作业中影响排肥量的可控因素(排肥轴转速、外槽轮工作长度、机组前进速度),探究施肥控制策略,构建并训练基于神经网络的智能决策模型;利用土壤养分平衡法结合克里金空间插值法在 ArcGIS 中生成施肥处方图;最后设计水稻侧深变量施肥控制系统并集成到水稻插秧机上,开展性能测试试验。双变量控制模型肥量控制精度试验结果表明,最大排肥误差为 3.27%,最小误差为 0.06%,总平均误差为 1.23%。目标施肥量播量准确性试验结果表明,尿素、磷酸二胺、硫酸钾、掺混复合肥平均播量误差分别为 4.60%、4.41%、4.18% 和 3.66%,平均剂量误差分别为 5.04%、4.83%、3.81% 和 4.84%。基于电子处方图的田间试验中系统获取有效定位信息 54 867 个,定位错误点数 6 个,均发生在田块边界附近,分区定点变量施肥平均播量误差为 4.23%。结果表明集成创制的水稻插秧侧深变量施肥一体机具有较高的播量精度和稳定性,控制系统具有较高的肥量控制精度,利用电子处方图指导施肥作业切实可靠,可实现插秧智能变量施肥一体化作业。

关键词: 水稻;侧深变量施肥;处方图;双变量控制;智能决策

中图分类号: S224.21

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)09-0151-12

OSID:



Design and Experiment of Rice Side-deep Variable Rate Fertilization Control System Based on Prescription Diagrams

WANG Jinfeng LÜ Zhenyang ZHAO Minyi WANG Zhentao

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: To address the issues of fertilizer resource wastage and the inability to achieve spatially differentiated nutrient supply in rice side-deep fertilization due to the lack of scientific prescriptions and intelligent decision-making, a prescription map-based variable-rate fertilization control system for rice side-deep fertilization was designed. Combining fertilizer application theory analysis, controllable factors influencing the fertilizer application rate in variable rate fertilization operations, including fertilizer shaft rotation speed, external groove wheel working length, and machine forward speed were identified to explore fertilization control strategies and construct and train an intelligent decision-making model based on neural networks. Using the soil nutrient balance method combined with the Kriging spatial interpolation method in ArcGIS, a fertilization prescription map was generated. Subsequently, the hardware and software for the rice side-deep variable rate fertilization control system were designed and integrated into a rice transplanter for performance testing. The precision test of the bivariate control model for fertilizer amount showed a maximum application error of 3.27%, a minimum error of 0.06%, and an overall average error of 1.23%. Results from the target fertilization amount accuracy test indicated that the average application rate errors for urea, diammonium phosphate, potassium sulfate, and blended compound fertilizer were 4.60%, 4.41%, 4.18%, and 3.66%, respectively, with average dosage errors of 5.04%, 4.83%, 3.81%, and 4.84%. In field tests guided by electronic prescription maps, the system obtained 54 867 valid positioning points with six positioning errors, all occurring near field boundaries, the average broadcasting amount error for partitioned and fixed-point variable fertilization was 4.23%. The results demonstrated that the integrated rice transplanter with side-deep variable rate

收稿日期: 2024-05-14 修回日期: 2024-07-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD200060502)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系岗位科学家项目(CARS-01-44)

作者简介: 王金峰(1981—),男,教授,博士生导师,主要从事水田智能农业装备研究,E-mail: jinfeng_w@126.com

fertilization capabilities had high application rate accuracy and stability, and the control system exhibited high precision in fertilizer amount control. Using electronic prescription maps to guide fertilization operations was practical and reliable, enabling integrated intelligent variable-rate fertilization during rice transplanting.

Key words: rice; side-deep variable rate fertilization; prescription diagram; bivariate control; intelligent decision-making

0 引言

水稻在全球粮食安全中扮演着重要角色,广泛种植于中国、印度、印度尼西亚、孟加拉国、越南、泰国等国家^[1]。施肥是提高水稻产量的重要手段,传统的施肥作业通常采用人工或撒肥机抛撒的方式将肥料撒施于地表^[2]。然而,这种方式增加了生产成本,肥料利用率低,无法实现空间差异化的肥力补给。不合理的施肥方式不仅导致环境污染,还影响作物产量和质量^[3]。水稻侧深精准变量施肥是可持续精准农业体系不可或缺的一环^[4-7],可根据土壤养分和作物生长状况进行精确施肥。在提高肥料利用率和产量的同时,降低施用量,缓解过度施肥所带来的环境压力^[8-11]。

变量控制系统作为水稻侧深变量施肥技术的核心,对施肥作业效果起着决定性作用。文献[12-13]针对外槽轮单变量施肥方式进行研究,其肥量调节通过改变排肥轴转速来实现。然而,单变量排肥方式的施肥量调节范围有限、低速排肥时脉动明显、均匀性差^[14]。为了克服这些问题,有研究者开展双变量排肥控制系统研究。ALAMEEN等^[15]建立了一个双变量施肥试验台,利用气缸调节所有排肥器开度,结果表明该试验台性能良好。吴金林^[16]通过在排肥主轴两侧安装主轴马达和开口马达,实现对转速和开度的双变量调节。戚武振等^[17-18]设计了一种丝杠排肥轴连接机构,以步进电机带动排肥轴进行轴向移动,实现开度调节。上述研究虽然在肥量控制方面进行了优化,但作业过程缺乏科学处方,无法按照土壤养分空间差异性实时在线调节。为了实现精细化作业,一些研究者在施肥处方决策和变量控制算法等方面进行了深入探索。LIDA等^[19]研制了基于地图的水稻变量施肥机,实现按图作业。TOLA等^[20]研制了基于实时排肥传感器的施肥控制系统,降低了施肥误差。BU等^[21]提出基于差分进化算法优化施肥控制序列模型以实现肥量在线调节,提高施肥性能。梁春英等^[22]对变量施肥控制系统运用遗传算法对PID参数进行改良优化,提高施肥精度。目前变量施肥系统研究已取得了一些进展,但在水稻变量施肥方面,仍缺乏将智能处方决策嵌入变量施肥控制系统的研究和应用实例。

本文面向水稻侧深施肥设计一种基于处方图的智能变量施肥控制系统。该系统通过处方图指导施肥作业,智能双变量模型实时在线决策,对控制系统软硬件进行设计与选型后,创制集成到水稻插秧机上形成实时一定点水稻机械插秧同步侧深变量施肥一体机。开展相关性能测试试验,验证变量控制实际效果,以期为可持续精准农业与智能变量施肥系统设计提供参考。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

以久保田水稻插秧机为主体,对水稻机械插秧同步侧深施肥一体机进行改进,整机构成如图1所示,其关键技术参数见表1。在完整保留水稻插秧施肥一体机全部功能的基础上,改进侧深施肥装置驱动方式和外槽轮变量排肥装置,将驱动方式从传统的机械链式驱动转变为高效的电机驱动,实现排肥轴转速无级调节,采用丝杠滑轨驱动移动挡板改

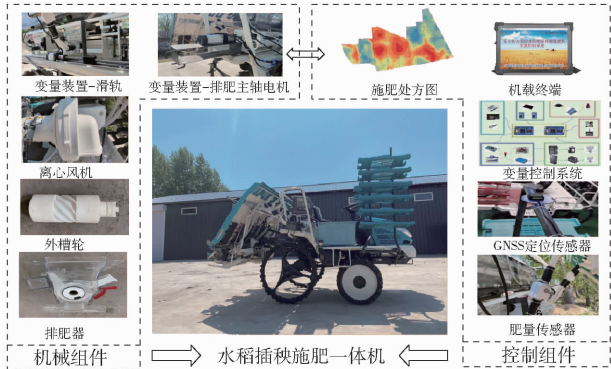


图1 水稻侧深变量施肥机构成图

Fig. 1 Diagram of components of rice side-deep variable rate fertilizer applicator

表1 水稻侧深变量施肥机基本技术参数

Tab.1 Basic technical parameters of rice side-deep variable rate fertilizer applicator

参数	数值/类型
外形尺寸(长×宽×高)/ (mm×mm×mm)	3 235×2 830×2 580
插秧机标定功率/kW	15.9
载肥量/L	74
结构质量/kg	875
施肥方式	侧行开沟施肥、强行埋设
变速方式	液压式变速

变外槽轮工作长度。

搭载处方图技术的水稻机械式插秧同步侧深施肥一体机主要由久保田乘坐式插秧机、定位系统、供电系统、控制系统、外槽轮式变量排肥装置、风送式输肥装置、肥量监测系统、输肥管、施肥靴等多个组件构成。其中,定位系统包含天线和接收机;控制系统包括机载终端、决策系统、施肥控制系统、伺服电机及其驱动器、减速器、步进电机及其驱动器;外槽轮式变量排肥装置由肥箱、壳体、外槽轮排肥装置、

丝杠滑轨、槽轮移动挡板和排肥管等组成;风送式输肥装置包含大功率直流离心风机、风送管、文丘里管和输肥管等。

1.2 工作原理

本文设计了电驱型双变量施肥控制系统。该系统由上位机载终端、下位决策与施肥控制系统、施肥处方模块、无线蓝牙通信模块、速度采集模块、GNSS 模块、肥量监测模块、编码器反馈模块、紧急制动模块、故障报警模块等组成,如图 2 所示。

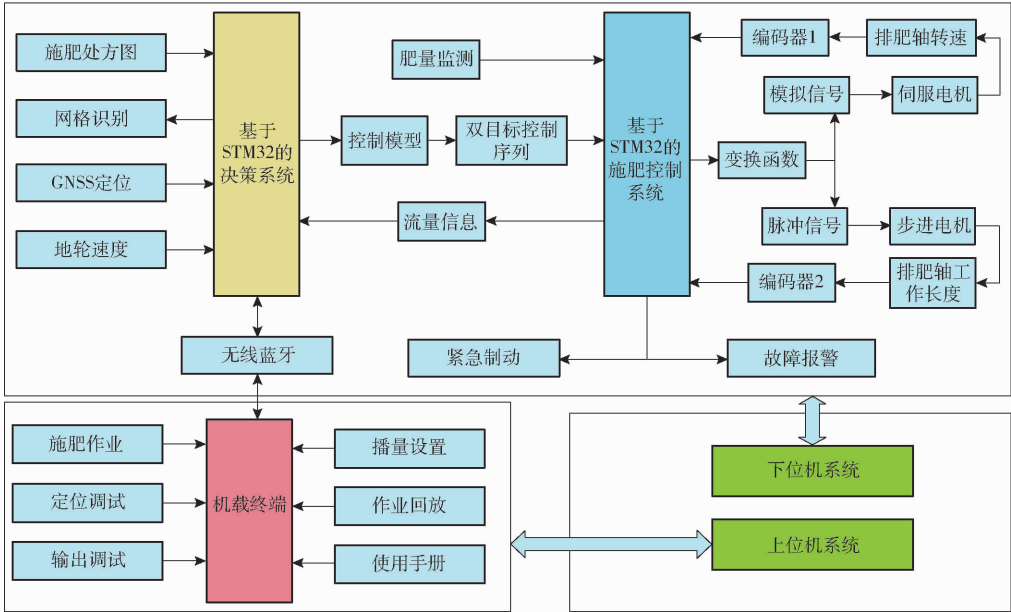


图 2 系统控制原理图

Fig. 2 Control system schematic diagram

首先采用标准五点采样法获取试验农田养分数据,并利用地理信息统计技术生成施肥处方图,将其导入水稻侧深变量施肥机决策系统,为后续施肥过程提供精准指导。车载 GNSS 系统被用来获取水稻侧深变量施肥机地理位置坐标信息,以便根据处方图确定当前位置所需的目标施肥量。结合机具作业速度,通过训练后的双变量控制模型进行预测,得到排肥轴转速和外槽轮工作长度的双目标控制序列。施肥控制系统接收决策系统发送的目标控制量,通过运动控制算法,精确地控制排肥主轴转速与槽轮工作长度移动挡板,实现在线调节排肥量。肥料流量传感器实时监测肥料流量流速、编码器监测排肥轴转速、工作长度等信息,并将其反馈给上位机进行控制序列优化与机载终端的显示。当监测到系统故障时,施肥控制系统制动报警。

系统功能设置在机载终端,主要包含施肥作业、定位调试、输出调试、播量设置、作业回放和使用手册等选项卡。通过对机载终端作业参数的设置,实现系统科学化管控。这一过程确保水稻在不同地块和生长阶段都能获得恰当的养分供应,从而提高肥

料利用率和农田生产效率。

1.3 排肥理论分析与双目标决策模型建立

为实现变量施肥精细化控制,需要通过排肥理论分析变量施肥过程中影响排肥量的可控因素,根据可控因素建立变量控制模型,通过仿真试验建立数据集并进行模型训练,将训练后的模型嵌入施肥控制系统,实现在线决策并优化双目标控制序列,以满足变量施肥的实际作业需求。

1.3.1 排肥理论分析

根据外槽轮排肥器工作原理,对变量系统中的可控因素进行分析。假设水稻变量侧深施肥机每公顷施肥量^[23]为

$$Q = \frac{0.6q}{VBN} \tag{1}$$

式中 Q ——目标施肥量,kg/hm²
 q ——单个排肥器单位时间排肥量,g/min
 V ——机组前进速度,km/h
 B ——作业行距,m
 N ——排肥器数量

由于该控制系统以 3 个排肥器为控制单元,即

$N=3$, 则式(1)可简化为

$$Q=\frac{0.2q}{VB}\tag{2}$$

由式(2)可知,影响目标施肥量 Q 主要因素为单位时间排肥量 q 和机组前进速度 V ,其中作业行距 B 在作业过程中固定不变,机组前进速度 V 通过插秧机前进挡位进行调节,变量施肥系统中可控的因素为单位时间排肥量 q ,计算式为

$$q=q_1n_n\tag{3}$$

式中 q_1 ——槽轮单圈施肥量, g/r
 n_n ——排肥器主轴转速, r/min

排肥器工作时,肥料首先依靠重力充入槽轮凹槽,进而在齿脊拨动下随槽轮旋转,被强制排出,研究所依托的排肥器(图3)通过毛刷强制去除肥料填充槽轮凹槽后形成的圆柱体外围肥料,并不存在由摩擦力带动排出的肥料,因此槽轮旋转一周肥料排出量计算式为^[24]

$$q_1=\frac{\rho\delta SLZ}{1\,000}\tag{4}$$

式中 ρ ——颗粒密度, g/cm^3
 δ ——槽内颗粒填充系数
 S ——单个槽截面积, mm^2
 L ——槽轮螺旋有效工作长度, mm
 Z ——槽数

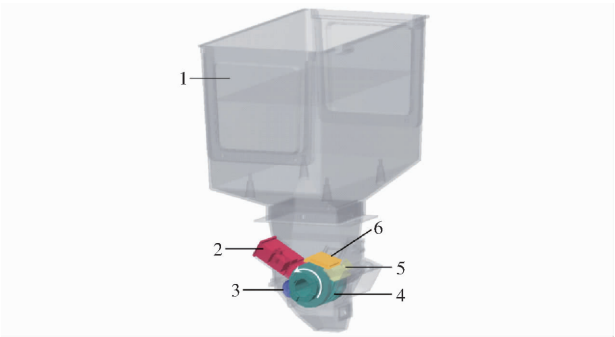


图3 排肥器结构图

Fig.3 Structure diagram of fertilizer applicator
1. 肥箱 2. 毛刷 3. 排肥区 4. 外槽轮 5. 挡片 6. 移动挡板

由式(2)~(4)联立求得目标施肥量 Q 为

$$Q=\frac{\rho\delta SLn_nZ}{5\,000VB}\tag{5}$$

在式(5)中,颗粒密度 ρ 、槽内颗粒填充系数 δ 、单个槽截面积 S 、槽数 Z 、作业行距 B 在施肥过程中是固定值,因此在变量施肥系统中,影响目标施肥量 Q 的可控因素为槽轮螺旋有效工作长度 L 、排肥器主轴转速 n_n 以及机组前进速度 V 。

1.3.2 双目标决策模型建立

变量施肥控制系统旨在根据农田的不同需求,精确地调整施肥设备以实现施肥量控制。基于排肥

理论分析,主要问题为:

输入:系统需要获取当前机组前进速度和目标施肥量作为输入。

输出:系统需要根据输入来决定排肥器主轴转速和外槽轮工作长度,以使实际施肥量达到目标施肥量。

目标:系统最终目标是使实际施肥量与目标施肥量误差最小,提高施肥精度。

为实现变量施肥控制系统中的模式识别功能,选择神经网络模型为解决方案。具体实现步骤为:

(1)神经网络结构确定。采用多层感知器(MLP)作为神经网络模型(图4)。该模型由输入层、隐藏层和输出层组成。输入层接收机组前进速度和目标施肥量,隐藏层对输入进行处理并提取特征,输出层输出排肥器主轴转速和外槽轮工作长度。

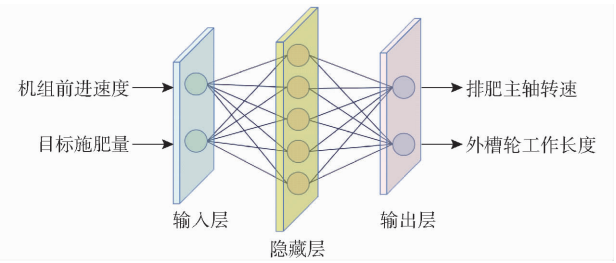


图4 模型结构图

Fig.4 Model structure diagram

(2)数据集建立。在神经网络中,数据集用来训练和验证模型,合适的数据集能够提高模型泛化能力和性能。为了获取有效数据对神经网络模型进行训练、验证以及参数调优,采用仿真试验方法获取数据,考虑到排肥是集群小颗粒动态变化的过程,选择 EDEM 软件进行排肥仿真,仿真时颗粒间、颗粒与几何体之间均采用 Hertz - Mindlin 无滑移接触模型。相关研究表明^[25],材料属性对仿真精度影响很大,排肥器中与肥料接触的槽轮、肥盒均为 PLA 材料,而毛刷材料为尼龙。基于前期研究及文献[26],得到 DEM 中使用材料物理特性参数如表2所示,其他相关接触参数设置如表3所示。仿真试验如图5所示,根据前期研究及文献[25,27],将外槽轮转速设定为 25~65 r/min ,以 1 r/min 为步长;将工作长度设置为 8~40 mm ,以 1 mm 为步长;将传送带速度设置为 0.2~1.8 m/s ,以 0.1 m/s 为步长;3 个因素每个梯度构成一个处理进行多因素交互试验,生成样本数据 23 000 个,其中 17 250 个用作训练集,2 875 个用作验证集,2 875 个用作测试集。

表 2 DEM 中使用的材料物理特性参数
Tab.2 Material parameters used in DEM

材料	泊松比	剪切模量/GPa	密度/(g·cm ⁻³)
速效肥	0.25	0.27	1.571
PLA 塑料	0.29	0.22	1.110
尼龙	0.31	0.05	1.220

表 3 各种材料之间的接触参数

Tab.3 Contact parameters between various materials

接触材料	恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
速效肥-速效肥	0.28	0.42	0.13
速效肥- PLA 塑料	0.29	0.30	0.09
速效肥-尼龙	0.35	0.35	0.08

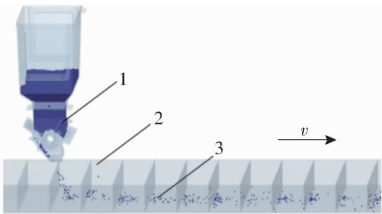


图 5 仿真试验

Fig.5 Simulation experiment

1. 排肥器 2. 肥料收集袋 3. 肥料

(3) 训练过程。在 Matlab 2016 中使用训练数据集对神经网络模型进行训练,训练过程分为向前传播和反向传播两个阶段。在向前传播阶段,输入数据经过神经网络得到预测结果;在反向传播阶段,通过计算预测结果与目标值之间的差异,并利用梯度下降算法更新神经网络权重来优化模型。训练后模型采用均方根误差(RMSE)和决定系数(R^2)作为评价标准^[28],利用验证集进行多次验证,双目标决策模型 R^2 为 0.96, RMSE 为 0.045 r/min,可满足在线双目标决策的实际要求。

(4) 预测过程。当系统输入机组前进速度和目标施肥量时,训练好的模型可用于预测排肥器主轴转速和外槽轮工作长度双目标控制序列,指导施肥作业。

2 变量施肥控制系统关键技术

2.1 施肥处方图生成

处方图是科学指导变量施肥作业的关键,精准施肥过程中,首先建立土壤养分数据集以了解土壤基础肥力。选择位于黑龙江省哈尔滨市方正县的试验地块(图 6)作为研究对象。采用五点法(图 7)进行 449 组土壤样品采集,采集深度为 20 cm 左右,采样时记录坐标点信息,为生成施肥处方图提供数据基础。采样点位分布及试验地块分布如图 8a 所示,采样区总面积达 27 hm²。考虑到养分空间分布差异性,在采样区左、中、右选择 3 个试验地块,为后续处方施肥试验做准备。其中试验地块 A、B、C 的面积

分别为 1.07、0.97、1.18 hm²。采集的土样存放在密封袋中,以保持样品原样性。随后用元素分析仪对土样中的氮素(全氮)含量进行分析。

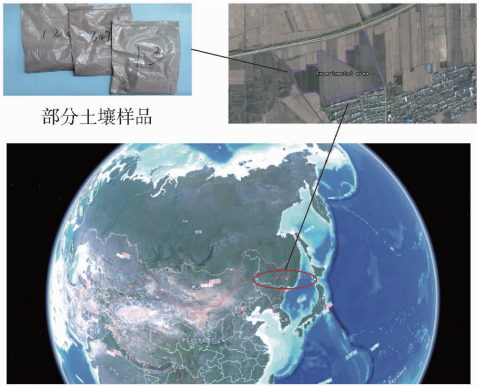


图 6 采样区域

Fig.6 Sampling area

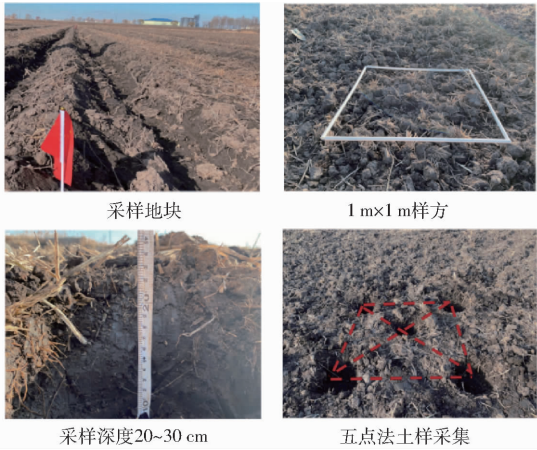


图 7 五点采样

Fig.7 Five-point sampling

采用经典克里金(Kriging)插值法进行土壤养分空间分布图的生成。为了实现变量施肥,还需要合理的施肥决策生成处方图指导水稻侧深变量施肥作业。选取以养分归还学说为依据的养分平衡法确定水稻施肥量,养分平衡法计算式为

$$Y = \frac{w\mu - 2.25k\theta}{\varphi}$$

(6)

式中 Y ——施肥量,kg/hm²
 w ——目标产量,kg/hm²
 μ ——单位产量需要养分量,kg
 k ——肥料有效利用率
 θ ——土壤养分含量,mg/kg
 φ ——作物对肥料养分的当季利用率

2.25 为每公顷 20 cm 耕层 2.25 × 10⁶ kg 土壤计算时,将土测值换算为 kg/hm² 的平均乘数;对于复合肥施用量,则取单养分施用量最大值,即

$$\Phi = \max \left\{ \frac{Y_1}{\theta_1}, \frac{Y_2}{\theta_2}, \dots, \frac{Y_n}{\theta_n} \right\}$$

(7)

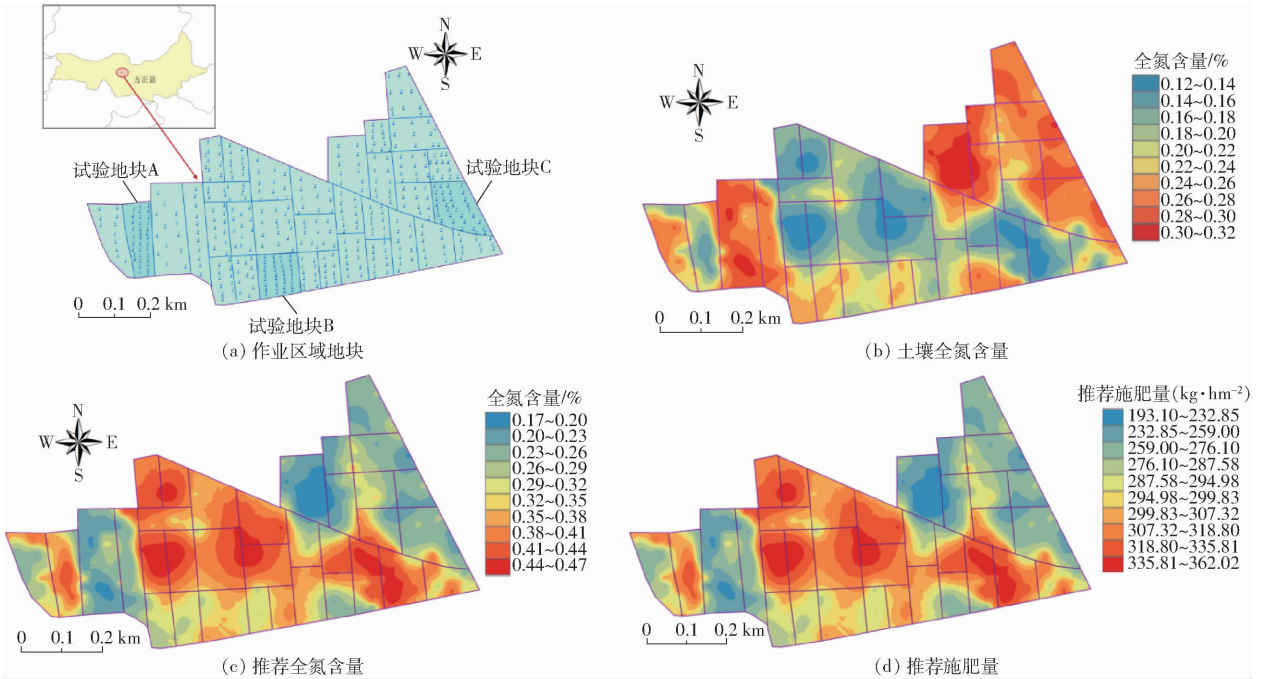


图 8 处方分布图生成

Fig. 8 Prescription distribution map generation

式中 Φ ——复合肥施用量, kg/hm^2
 Y_n ——某种单一养分施用量, kg/hm^2
 θ_n ——单一养分在复合肥中占比

在 ArcGIS 中生成处方图时将相近的施肥量合并,输出 SHP 格式的矢量图,其主要包含 3 层信息:①栅格信息。按照作业幅宽 2 m 及机组行进方向 10 m 设置栅格。②处方信息。不同颜色下对应不同目标施肥量。③地理位置信息。主要为栅格单元的行列经纬度。水稻侧深施肥处方图生成过程如图 8 所示。以土壤全氮含量为例,利用定点监测数据(实测值)可得到土壤全氮含量分布图(图 8b);利用土壤养分含量-目标产量施肥模型生成土壤推荐全氮含量图(图 8c);根据肥料养分含量、肥料利用率、土壤全氮中速效氮含量等可利用氮比例等信息生成目标肥料推荐施肥量(图 8d)。可直接用作水稻侧深变量施肥处方图指导实际田间作业。

2.2 硬件组成与电路设计

基于系统复杂性以及高速运算需求,采用分布式设计,施肥决策系统负责处方图处理、定位定速解析、双目标控制序列生成、远程通讯、无线交互等功能;排肥控制系统负责肥量感知、动作执行、动作反馈、制动报警和通讯等功能;通过分布式设计,减轻单个控制单元计算量,提高系统整体运行速率。选择 STM32F103ZET6 最小系统作为主控单元^[29](正点原子公司,32 位)。控制系统硬件组成如图 9 所示,电路原理如图 10 所示。硬件系统主要由供电单元、动力单元、主控单元、信息反馈单元、信息感知单元、

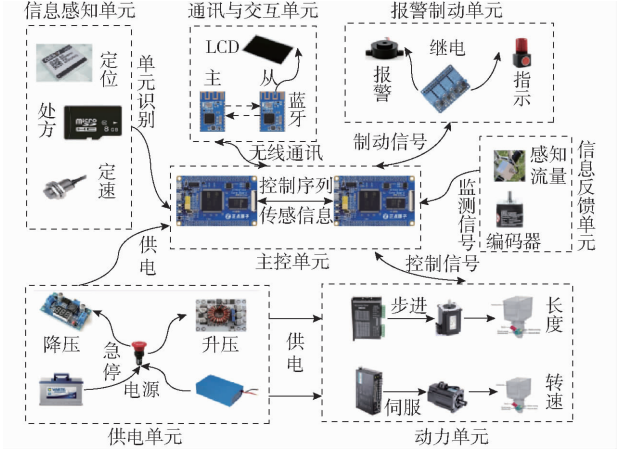


图 9 控制系统硬件实物图

Fig. 9 Physical diagram of control system hardware

通讯与交互单元、报警制动单元等组成。
硬件系统工作原理:12 V 铅酸电池和 48 V 锂电池经过变压系统处理后为其他单元提供能量来源。M629-INS 型高精度 GNSS/INS 定位模块(上海华测公司)提供高精度定位信息,施肥决策系统读取 SD 存储卡中的处方图,根据定位信息进行坐标转换,转换结束后在处方图中进行寻址,当识别到目标处方单元后解译出处方肥量信息,嵌入式双变量决策模型将磁阻式霍尔传感器测得的机组行进速度与目标施肥量输入决策系统,输出双目标控制序列(外槽轮工作长度和排肥器主轴转速)。排肥控制器接收到双目标控制序列后经过变换函数计算出调节量(排肥主轴速度增量和外槽轮移动挡板的进给量),将模拟调节信号发送给伺服驱动改变伺服

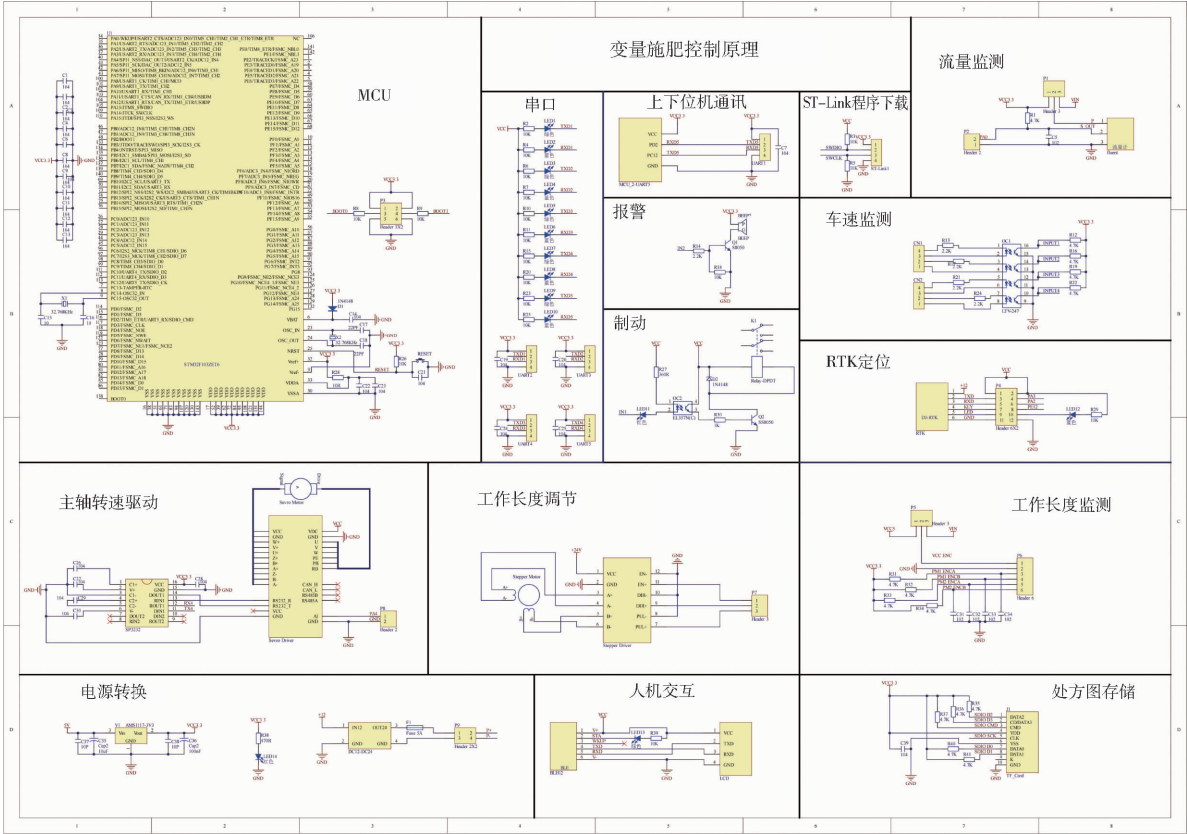


图 10 变量施肥控制原理图

Fig. 10 Variable fertilization control schematic

电机转速,伺服输出轴经减速器减速后将动力输出给排肥轴;将数字脉冲调节信号发送给步进电机改变步进电机转角,经丝杠滑轨将进给量输出给移动挡板改变外槽轮工作长度。光电式流量传感器在排肥时,将单位时间的流量信号变化反馈给施肥控制系统。编码器将施肥系统调节误差同步上报。当监测到卡肥、堵肥时,继电模块动作,动力单元紧急制动,报警指示模块进行声光报警。施肥控制系统将流量信息、误差信息、故障信息等上报施肥决策系统,施肥决策系统将信息显示在机载终端,并根据误差优化运动进给量,实现在线动态调整施肥系统。施肥系统与机载终端通过蓝牙模块实现远程控制指令下发和统计信息上报。

2.3 施肥决策与控制软件设计

为实现水稻侧深变量施肥装置自动控制、施肥作业数字化、信息化,设计了双目标变量施肥控制软件。软件开发利用 C 语言在 keil uVision5 开发环境中完成。针对决策系统主要开发的功能包括:处方图识别与加载、处方信息读取、定位信息实时在线解析、机组前进速度在线监测、双目标控制序列决策、无线通讯信号发送与接收、机载终端界面显示与交互信号处理等。施肥控制系统主要功能有:控制排肥主轴电机转速并实时在线调节、主轴电机转速实时监测与反馈;控制外槽轮工作长度电机调整移动

挡板位置,编码器监测工作位置反馈给施肥控制系统进行长度调节;与决策系统进行通讯、肥料流量信息实时在线感知、报警制动等。针对双目标变量施肥控制系统的复杂功能,设计中嵌入 UCOSIII 实时操作系统,通过设置任务优先级、消息传递、中断管理、事件标志组等方法实现多任务在线协调运行,保证系统的实时性。为了方便控制信号下发与作业信息显示,设计便捷交互界面,实现在定位信号接入条件下,调用施肥处方图,根据特定位置的目标施肥量与机具的定位定速信息指导外槽轮变量施肥装置进行水稻侧深双变量施肥作业。

主控流程如图 11 所示。作业时,首先启动系统,进行 GNSS 设备和上位机控制面板的通信连接,包括对通信端口及其参数的配置。然后进行系统作业参数设置,完成参数设置后进入作业控制界面,根据实际作业需要选择手动或自动控制模式。在手动模式下,用户可以根据实际情况选中待作业外槽轮排肥器,然后设置排肥轴转速和外槽轮工作长度,并设置作业时间,启动开始按钮作业,待满足预定时间后,变量施肥装置自动停止作业。在自动模式下,系统通过解析 GNSS 定位信号,获取水稻变量施肥装置的实时坐标位置与作业速度等信息,并根据施肥处方图获取当前节点的目标施肥量信息,通过双变量控制决策模型生成双目标控制序列,形成控制指

令发送给施肥控制系统,自动调节排肥轴转速和外槽轮工作长度,进行变量施肥作业,作业过程中肥量监测任务实时监测流量信息,并通过施肥控制系统反馈给决策系统,对双目标运动控制量进行优化,实现系统负反馈调节。当排肥堵塞时,制动任务进行紧急制动,排肥任务挂起,同时报警任务响应,故障信息报送机载终端,声光报警系统动作。系统正常工作时,当决策系统识别到作业单元已作业完毕,系统停止作业,保存本次作业日志。

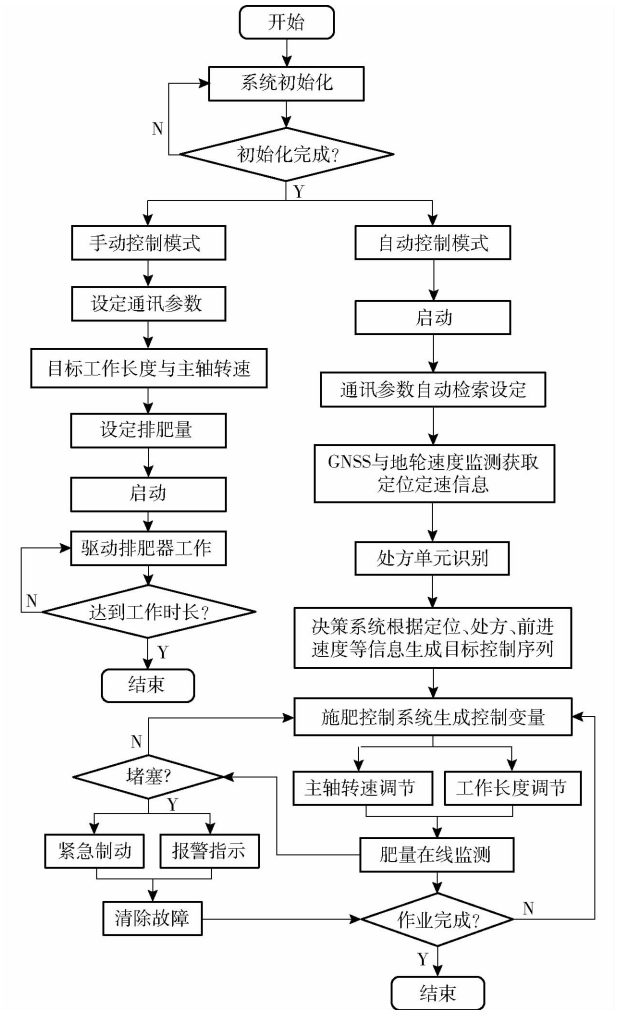


图 11 主控流程图

Fig. 11 Main control flow chart

2.4 机载终端交互界面设计

创制集成的水稻侧深变量施肥作业软件具备以下基本功能:①串口通讯。②GNSS 定位信息接收与解析。③施肥处方图加载与读取。④机具物理信息状态显示(包括施肥量,排肥轴转速、外槽轮工作长度、机组前进速度、排肥堵塞等信息)。⑤侧深变量施肥机参数设置。⑥操作控件指令下发。⑦故障状态指示。

为了适应系统功能需要,系统采用在同一窗体中多选项卡式的设计,当需要某项功能时,直接点击其功能控件,即可打开相对应的选项卡。机载终端

控制系统主界面见图 12,功能控件选项卡如图 13 所示,主要包含:施肥作业、定位调试、输出调试、播量设置、作业回放和使用手册等。



图 12 控制系统主界面

Fig. 12 Main interface of control system



图 13 功能界面

Fig. 13 Function interface

机载终端工作流程:标准施肥作业时,首先检查系统各项功能是否正常,点击定位调试控件设定通讯参数后启动定位信息接收,观察定位状态;点击输出调试控件对系统动力单元运动能力进行检查;点击播量设置控件对施肥量范围、作业幅宽、平均施肥量、变量范围等参数进行设置。在施肥作业界面进行目标作业地块处方图选择,点击启动作业按钮,系统开始自动施肥作业,通过观察窗体可了解到实时经纬度、速度、流量、作业面积等信息;作业结束后可点击作业回放控件对作业记录进行查看;当遇到故障时,可参考使用手册进行故障诊断。

3 试验

3.1 双变量控制模型肥量控制精度试验

为验证双变量控制模型在实际施肥中的预测精度,对控制决策系统展开台架验证试验,搭建了双变量控制系统试验台架(图 14),试验时,将侧深施肥

装置固定安装在试验台上,采用前文所研制的侧深施肥双变量控制系统对排肥主轴转速和外槽轮工作长度进行在线双目标控制序列生成,以传送料带速度模拟田间机组前进速度,在施肥决策系统输入目标施肥量,系统将前进速度和目标施肥量作为决策模型输入,通过排肥控制器自动调节转速和工作长度实现自主排肥。

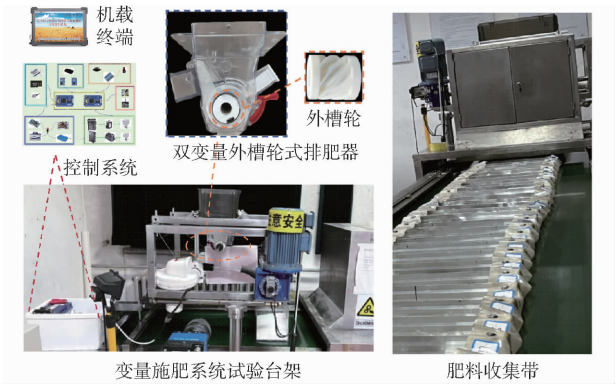


图 14 试验台架
Fig. 14 Test platform

将目标施肥量设为 1 200、1 500、1 800、2 100、2 400 kg/hm² 5 个梯度,将机组前进速度设为 0.8、

1.0、1.2、1.4、1.6、1.8 m/s 等 6 个梯度,目标施肥量和机组前进速度每个梯度组合构成一个试验处理,共 30 组,考虑到传送带长度的限制,每个处理进行 10 s,试验结束收集料带中的肥料,采用 MTB1000D – B 型高精度电子天平进行称量,每个处理重复 3 次,取 3 次结果均值与目标施肥量误差作为评价指标。试验结果如表 4 所示,目标施肥量为 1 200 kg/hm² 时,误差为 0.15% ~ 2.35%;目标施肥量为 1 500 kg/hm² 时,误差为 0.58% ~ 3.03%;目标施肥量为 1 800 kg/hm² 时,误差为 0.64% ~ 3.27%;目标施肥量为 2 100 kg/hm² 时,误差为 0.06% ~ 1.74%;目标施肥量为 2 400 kg/hm² 时,误差为 0.25% ~ 2.53%;误差最大值 3.27%,误差最小值 0.06%,总平均误差 1.23%。施肥量-前进速度分布图(图 15)中,直线表示系统运行 10 s 的理论施肥量,离散点表示各组处理实际施肥量,图中显示各处理采集结果均分布在目标施肥量附近,偏差程度较小。试验结果表明双变量控制系统的肥量在线调节精度高,经过训练的识别模型能够很好地满足实际应用需求,可嵌入系统中实时指导施肥作业,实现决策功能。

表 4 排肥量控制精度试验结果

Tab. 4 Fertilizer application rate control accuracy test results

速度/ (m·s ⁻¹)	1 200 kg/hm ²			1 500 kg/hm ²			1 800 kg/hm ²			2 100 kg/hm ²			2 400 kg/hm ²		
	实际施 肥量/g	均值/ g	误差/ %	实际施 肥量/g	均值/ g	误差/ %	实际施 肥量/g	均值/ g	误差/ %	实际施 肥量/g	均值/ g	误差/ %	实际施 肥量/g	均值/ g	误差/ %
8.0	77.84			103.28			113.78			147.86			159.24		
	80.23	79.06	1.18	96.73	99.19	0.81	117.23	117.49	2.09	137.29	139.91	0.06	158.36	160.43	0.27
	79.11			97.55			121.45			134.57			163.70		
1.0	81.56			99.14			122.91			140.92			160.89		
	83.72	80.52	0.65	101.92	100.58	0.58	114.67	121.82	1.52	132.45	138.37	1.17	167.02	160.56	0.35
	76.29			100.67			127.89			141.73			153.77		
1.2	82.95			109.02			128.12			146.21			160.06		
	78.07	81.88	2.35	93.81	101.73	1.73	115.55	121.33	1.11	145.08	141.35	0.96	161.11	159.60	0.25
	84.63			102.36			120.33			132.76			157.63		
1.4	75.45			104.89			119.01			139.18			168.43		
	80.91	80.12	0.15	108.47	102.30	2.30	126.78	119.24	0.64	139.54	142.44	1.74	155.52	160.63	0.39
	85.00			94.55			111.92			148.60			157.93		
1.6	79.76			110.00			129.37			133.79			166.26		
	76.88	79.66	0.41	100.33	103.03	3.03	118.64	123.92	3.27	147.02	141.72	1.23	160.71	164.05	2.53
	82.36			98.76			123.76			144.36			165.19		
1.8	81.17			91.99			112.88			137.84			163.55		
	75.99	80.48	0.60	95.45	98.08	1.92	125.20	122.69	2.24	131.97	138.48	1.09	159.08	160.51	0.32
	84.28			106.81			130.00			145.62			158.90		

3.2 目标施肥量播量准确性试验

为了测试水稻变量侧深施肥机播量准确性与稳定性,进行了目标施肥量播量准确性试验(图 16)。选用中国石油天然气股份有限公司按照国标 GB/T 2440—2001 生产的优等品尿素,其总氮含量大于等

于 46.4%,粒径为 0.85 ~ 2.80 mm。中化化肥有限公司按照国标 GB/T 10205—2009 传统法生产的优等品磷酸二胺,总养分含量大于等于 64.0%。史丹利农业集团股份有限公司参照 GB/T 20406—2017 利用曼海姆工艺生产的硫酸钾肥料,其水溶性氧化

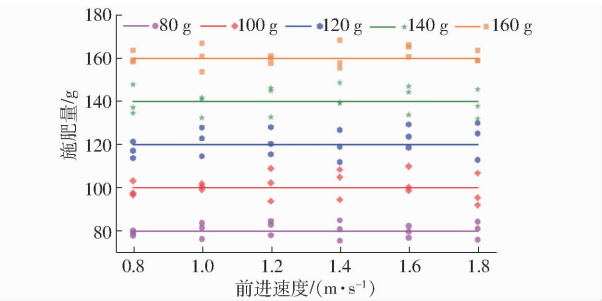


图 15 施肥量-前进速度分布

Fig. 15 Fertilizer application rate – speed distribution graph

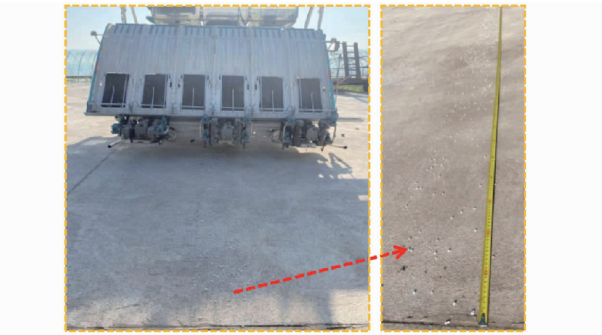


图 16 水稻侧深变量施肥机目标施肥量播量准确性试验

Fig. 16 Experiment on accuracy of target fertilization of rice variable fertilization machine

钾含量大于等于 52.0%。中化集团有限公司生产的水稻侧深施肥专用肥,该肥料是由 92% 的速效性肥料(QAF)和 8% 的缓释肥料(SRF)组成的掺混肥。掺混肥中速效肥密度为 1.57 g/cm³,而缓释肥密度为 1.32 g/cm³。

以尿素、磷酸二胺、硫酸钾、掺混复合肥设定 3 组目标施肥量,在施肥机作业速度为 0.2 ~ 1.8 km/h 无级变速情况下重复 5 次试验。试验时,水稻侧深变量施肥机行驶在水泥地,施肥机按照规定参数每行走 30 m,视为完成 1 次测试,并记录每次测试的实际播量。采用播量误差(E_s)和示量误差(E_c)评价系统累积播量精度,计算式为

$$E_s = \frac{|M_r - M_0|}{M_0} \times 100\% \tag{8}$$

$$E_c = \frac{|M_r - M_c|}{M_r} \times 100\% \tag{9}$$

式中 M_r ——完成 1 次测试时的实际播量,g
 M_0 ——完成 1 次测试时的设定目标播量,g
 M_c ——完成 1 次测试时控制系统根据双目标控制序列模型换算的播量示值,g

2023 年 5 月,对集成创制的水稻变量施肥机开展了目标施肥量播量准确性试验,试验时,通过收集水泥地面化肥,以获取实际播量,并记录累积播量,试验结果如表 5 所示。

测试过程中,当水稻插秧侧深变量施肥一体机

表 5 目标施肥量播量准确性试验结果

Tab.5 Accuracy test result of target fertilization amount

目标播量/g	物料	播量误差/%	示量误差/%
275	尿素	4.86	5.64
220	尿素	4.39	5.21
260	尿素	4.55	4.28
245	磷酸二胺	3.98	4.62
285	磷酸二胺	4.37	5.06
210	磷酸二胺	4.89	4.83
275	硫酸钾	4.10	3.89
195	硫酸钾	3.81	3.58
245	硫酸钾	4.64	3.97
225	掺混复合肥	3.88	4.35
240	掺混复合肥	3.24	5.61
210	掺混复合肥	3.87	4.57

前进速度变化时,需要槽轮转速和槽轮工作长度能有效跟随变化,以保证目标施肥量准确性和稳定性。目标施肥量播量准确性试验测试结果表明:集成创制的水稻侧深变量施肥机在设定的目标播量下,尿素、磷酸二胺、硫酸钾、掺混复合肥最大播量误差分别为 4.86%、4.89%、4.64% 和 3.88%。平均播量误差分别为 4.60%、4.41%、4.18% 和 3.66%。最大示量误差分别为 5.64%、5.06%、3.97% 和 5.61%,平均示量误差分别为 5.04%、4.83%、3.81% 和 4.84%。集成创制的水稻插秧侧深变量施肥一体机整体具有较高的播量精度和播量稳定性,控制系统具有较高的示量精度,说明水稻侧深变量施肥机具有较好的田间作业精度和稳定性。

3.3 基于电子处方图的田间试验

目标施肥量播量准确性试验后,开展了基于测土配方推荐处方施肥量的田间施肥试验,于 2023 年 5 月在田间进行基于电子处方图系统的试验,作业过程采用中化集团有限公司生产的水稻侧深施肥专用肥,作业测试现场如图 17 所示。试验时,由电子处方图与定位系统自动识别作业机具所在的田块,自动给出所在田块的目标施肥量,以单个自然田块为 1 个测试单元,主要测试控制系统定位性能和利

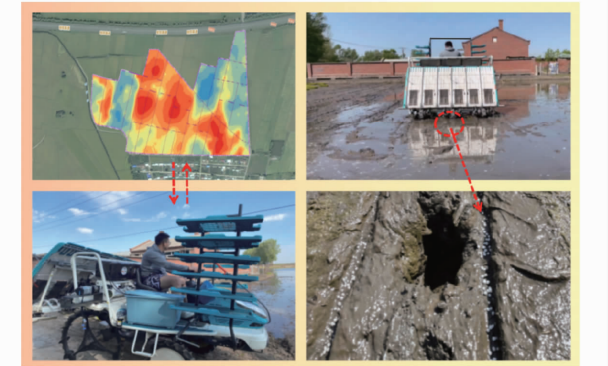


图 17 田间试验现场

Fig. 17 Field test site

用电子处方图作业的可靠性。

作业过程中,定位天线安装点位于水稻插秧侧深变量施肥一体机天线吸盘上,电子处方图系统获取有效定位信息 54 867 个,作业田块定位信息错误点数 6 个,错误点全部发生在田块边界附近。试验地块 A、B、C 总目标施肥量分别为 2 125.31、1 821.6、2 051.4 kg。根据反馈结果:试验地块 A、B、C 实际总施肥量分别为 2 046.71、1 734.2、1 965.2 kg,误差分别为 3.7%、4.8%、4.2%。

试验结果表明:基于上海华测公司 M620 核心板卡开发的定位模块水平定位精度达到 ± 0.02 m,分区定点变量施肥时,3 个试验地块平均播量误差为 4.23%,可满足基于测土配方的定点-变量水稻插秧侧深施一体机的使用要求。当侧深变量施肥机作业时,无论在田间还是地头,田块均能被完美识别,并能够依据施肥处方图作业信息自动获取目标播量,调控变量施肥系统实现田块内定点-变量施肥。

4 结论

(1)利用养分反演技术生成水稻施肥处方图,

构建并训练双变量控制模型,设计变量施肥软硬件系统,将处方决策功能嵌入水稻侧深变量施肥控制系统,实现自主决策、精准控制施肥量。

(2)通过施肥试验台验证双变量控制模型在实际施肥中的预测精度,试验结果表明,双变量控制模型排肥量控制误差为 0.06%~3.27%,平均排肥误差为 1.23%,基于神经网络结构的双变量控制模型对于双目标控制序列的预测能力较好,可嵌入系统中实时指导施肥作业。

(3)水稻侧深变量施肥控制系统对于市面上常见的肥料如尿素、磷酸二胺、硫酸钾、掺混复合肥的平均播量误差分别为 4.60%、4.41%、4.18% 和 3.66%。平均示量误差分别为 5.04%、4.83%、3.81% 和 4.84%。具有较高的播量精度和播量稳定性,控制系统具有较高的示量精度。

(4)搭载了侧深变量施肥控制系统的水稻插秧机田间试验结果表明,分区定点变量施肥平均播量误差为 4.23%,变量控制系统定位性能强劲精准,利用电子处方图指导施肥作业切实可靠。

参 考 文 献

[1] 毛祥东,宁筱嘉,张莉侠. 世界稻米生产市场形势分析及未来展望[J]. 农业展望, 2023,19(2):14-20.
MAO Xiangdong, NING Youjia, ZHANG Lixia. Analysis and future prospects of world rice production market situation[J]. Agricultural Outlook, 2023, 19(2): 14-20. (in Chinese)

[2] WANG J F, WANG Z T, WENG W X, et al. Development status and trends in side-deep fertilization of rice[J]. Renewable Agriculture and Food Systems, 2022, 37(5): 550-575.

[3] QIAN L, LU H, GAO Q, et al. Household-owned farm machinery vs. outsourced machinery services: the impact of agricultural mechanization on the land leasing behavior of relatively large-scale farmers in China[J]. Land Use Policy, 2022, 115: 106008.

[4] 王沛东,孟志军,付卫强,等. 基于 CAN 总线的 24 行小麦播种监控系统的研制[J]. 农机化研究, 2014,36(1):112-116.
WANG Peidong, MENG Zhijun, FU Weiqiang, et al. Research and development of 24-line wheat sowing monitor system based on CAN bus[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(1): 112-116. (in Chinese)

[5] 王金武,潘振伟,周文琪,等. SYJ-2 型液肥变量施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(7): 53-58.
WANG Jinwu, PAN Zhenwei, ZHOU Wenqi, et al. Design and test of SYJ-2 type liquid variable fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 53-58. (in Chinese)

[6] 卢彩云,付卫强,赵春江,等. 小麦播种实时监控系统设计及试验[J]. 农业工程学报,2017,33(2):32-40.
LU Caiyun, FU Weiqiang, ZHAO Chunjiang, et al. Design and experiment on real-time monitoring system of wheat seeding [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(2): 32-40. (in Chinese)

[7] 陈金,赵斌,衣淑娟,等. 我国变量施肥技术研究现状与发展对策[J]. 农机化研究, 2017, 39(10):1-6.
CHEN Jin, ZHAO Bin, YI Shujuan, et al. Research on present situation and the development countermeasures of variable rate fertilization technology in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(10): 1-6. (in Chinese)

[8] 赵春江,薛绪掌,王秀,等. 精准农业技术体系的研究进展与展望[J]. 农业工程学报,2003,19(4):7-12.
ZHAO Chunjiang, XUE Xuzhang, WANG Xiu, et al. Advance and prospects of precision agriculture technology system[J]. Transactions of the CSAE, 2003,19(4): 7-12. (in Chinese)

[9] 陈静,吴永常,陈立平,等. 基于部分预算法的玉米大田变量施肥经济效益分析[J]. 农业工程学报,2017,33(19):141-146.
CHEN Jing, WU Yongchang, CHEN Liping, et al. Economic benefit analysis of variable-rate fertilization technology in maize (*Zea mays*) field based on partial budget analysis method[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19): 141-146. (in Chinese)

[10] 冯靖仪. 稻田作物生产的碳足迹及化肥减施的温室气体减排潜力研究[D]. 杭州:浙江大学,2020.
FENG Jingyi. Study on carbon footprint of crop and greenhouse gas emission reduction potential of chemical fertilizer reduction in rice field[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)

[11] BALAFOUTIS A, BECK B, FOUNTAS S, et al. Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics[J]. Sustainability, 2017, 9(8): 1339.

[12] YANG C, EVERITT J H, BRADFORD J M. Comparisons of uniform and variable rate nitrogen and phosphorus fertilizer applications for grain sorghum[J]. Transactions of the ASABE, 2001, 44(2): 201-209.

- [13] 杨硕,王秀,翟长远,等. 支持种肥监测的变量施肥系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(10):145–153.
YANG Shuo, WANG Xiu, ZHAI Changyuan, et al. Design and test on variable rate fertilization system supporting seeding and fertilizing monitoring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 145–153. (in Chinese)
- [14] 苑进,刘成良,古玉雪,等. 基于相关向量机的双变量施肥控制序列优化[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊):184–189,171.
YUAN Jin, LIU Chengliang, GU Yuxue, et al. Bivariate fertilization control sequence optimization based on relevance vector machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 184–189, 171. (in Chinese)
- [15] ALAMEEN A A, AI-GAADI K A, TOLA E. Development and performance evaluation of a control system for variable rate granular fertilizer application[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 160: 31–39.
- [16] 吴金林. 双变量施肥机结构及液压调控系统设计[D]. 石河子:石河子大学,2014.
WU Jinlin. Study on structure and hydraulic step-less speed control of the variable rate fertilizer applicator[D]. Shihezi: Shihezi University, 2014. (in Chinese)
- [17] 戚武振. 智能稻麦播种机变量施肥系统设计与研究[D]. 泰安:山东农业大学,2018.
QI Wuzhen. Design and research of variable rate fertilization system for intelligent rice and wheat seeder[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [18] 戚武振,王金星,刘双喜,等. 稻麦变量施肥机控制系统设计与试验[J]. 农机化研究,2019,41(8):72–79.
QI Wuzhen, WANG Jinxing, LIU Shuangxi, et al. Design and experiment of control system for rice and wheat variable rate fertilizer applicator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(8): 72–79. (in Chinese)
- [19] LIDA M, UMEDA M, RADITE P A S. Variable rate fertilizer applicator for paddy field[C]//Annual International Meeting of the American Society of Agricultural Engineers, 2001.
- [20] TOLA E, KATAOKA T, BURCE M, et al. Granular fertiliser application rate control system with integrated output volume measurement[J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(4): 411–416.
- [21] BU H R, YU S Y, DONG W C, et al. Analysis of the effect of bivariate fertilizer discharger control sequence on fertilizer discharge performance[J]. Agriculture, 2022, 12(11): 1927.
- [22] 梁春英,吕鹏,纪建伟,等. 基于遗传算法的电液变量施肥控制系统 PID 参数优化[J]. 农业机械学报,2013,44(增刊1):89–93,88.
LIANG Chunying, LÜ Peng, JI Jianwei, et al. Optimization of PID parameters for electro-hydraulic variable rate fertilization system based on genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.1): 89–93, 88. (in Chinese)
- [23] 张季琴,刘刚,胡号,等. 排肥单体独立控制的双变量施肥控制系统研制[J]. 农业工程学报,2021,37(10):38–45.
ZHANG Jiqin, LIU Gang, HU Hao, et al. Development of bivariate fertilizer control system via independent control of fertilizing unit[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(10): 38–45. (in Chinese)
- [24] BARRIOS G K P, DE CARVALHO R M, KWADÉ A, et al. Contact parameter estimation for DEM simulation of iron ore pellet handling[J]. Powder Technology, 2013, 248: 84–93.
- [25] WANG J F, FU Z D, JIANG R, et al. Influences of grooved wheel structural parameters on fertilizer discharge performance: optimization by simulation and experiment[J]. Powder Technology, 2023, 418: 118309.
- [26] 高观保. 风送式水稻侧深施肥装置关键部件设计与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2019.
GAO Guanbao. Design and experiment of key parts of side-depth fertilizer device with pneumatic conveying for paddy[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [27] WANG J F, WANG R D, JU J Y, et al. Study on the influence of grooved-wheel working parameters on fertilizer emission performance and parameter optimization[J]. Agronomy, 2023, 13(11): 2779.
- [28] 王辉,刘艺豪,周利明,等. 施肥播种机肥料流量分段式 PID 控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 32–40,94.
WANG Hui, LIU Yihao, ZHOU Liming, et al. Design and test of fertilizer flow piecewise PID control system of fertilizer planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 32–40, 94. (in Chinese)
- [29] 马旭,赵旭,刘赛赛,等. 水稻高速插秧机固体颗粒肥料变量施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 99–110.
MA Xu, ZHAO Xu, LIU Saisai, et al. Design and experiment of solid particle fertilizer variable rate fertilization device for high-speed rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 99–110. (in Chinese)