

水田风送施肥参数检测试验台设计与试验

李立伟^{1,2} 武广伟^{1,2} 付卫强^{1,2} 安晓飞^{1,2} 孟志军^{1,2} 王培^{1,2}

(1.北京农业智能装备技术研究中心,北京 100097; 2.国家农业智能装备工程技术研究中心,北京 100097)

摘要: 水田侧深施肥田间试验受插秧作业季短、作业性能不稳定等多种因素影响,而传统室内土槽无法进行风送式水田施肥试验,设计了一种可进行风送水田施肥排肥参数检测的试验台。试验台主要由机械部分、测控部分、风送排肥部分和软件部分组成。综合采用自动控制技术、多传感器技术和液压传动技术模拟水田工况,实现风送排肥过程中风压、风速等参数实时采集和显示,可灵活控制排肥轮转速和转停频率。试验台性能验证试验表明,试验台行进速度可在 0~1.62 m/s 内调节,误差 1.5%;输肥气流速度在 0~30 m/s 之间,满足风送排肥需求;排肥系统最大排肥变异系数为 5.79%,施肥效果良好。对该试验台进行侧深施肥系统测试,结果表明,对施肥均匀性变异系数的影响因素由大到小依次为:排肥轮转速、台车前进速度、风机风速。试验台能够在实验室环境进行风送式水田施肥机构参数检测,缩短了水田风送施肥关键部件的研发周期,为实现水田施肥智能控制打下基础。

关键词: 水田土槽试验台; 风送水田施肥; 排肥参数; 施肥均匀性; 施肥稳定性

中图分类号: S224.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0186-09

Design and Verification of Test Bed for Testing Parameters of Wind Assisted Fertilization in Paddy Field

LI Liwei^{1,2} WU Guangwei^{1,2} FU Weiqiang^{1,2} AN Xiaofei^{1,2} MENG Zhijun^{1,2} WANG Pei^{1,2}

(1. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China

2. National Research Center for Intelligent Agriculture Equipment, Beijing 100097, China)

Abstract: In view of the field experiment of deep fertilization in paddy field affected by various factors such as short planting season and unstable operation performance, the traditional indoor soil tank could not carry out the experiment of deep fertilization in paddy field by air delivery, a test bench was designed independently to detect the parameters of deep fertilization and fertilizer discharge in paddy field by air delivery. The test bed was mainly composed of the mechanical part, the control part, the fertilization by wind and the software part. The automatic control technology, multi-sensor technology and hydraulic transmission technology were adopted comprehensively to simulate the working conditions of paddy fields, realize the real-time collection and display of wind pressure, wind speed and other parameters during the process of wind feeding and discharging fertilizer, and flexibly control the speed and turn off frequency of the fertilizer discharging wheel. The performance verification test showed that the traveling speed of the test bed can be adjusted within 0~1.62 m/s with an error of 1.5%. The fan provides air velocity of 0~30 m/s to meet the demand of air feeding and discharging fertilizer. The maximum coefficient of variation was 5.79%, which met the requirements of fertilization. Based on the test-bed, the results showed that the influencing factors of fertilizer uniformity, fertilizer amount variation coefficient were as follows: fertilizer wheel speed, trolley forward speed, wind speed. The test-bed can test the parameters of the side deep fertilizer in the laboratory environment. The research and development cycle of key components of side deep fertilization in paddy field was shortened. This study laid a foundation for the realization of intelligent control of side deep fertilization in paddy field.

Key words: soil tank test bench; pneumatic side deep fertilization; fertilizer parameters; uniformity of fertilization; fertilization stability

收稿日期: 2020-08-08 修回日期: 2020-09-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700205-3)

作者简介: 李立伟(1987—),男,高级工程师,主要从事现代农业装备技术与测控研究,E-mail: lilw@nercita.org.cn

通信作者: 王培(1983—),男,助理研究员,主要从事农机智能装备研究,E-mail: wangp@nercita.org.cn

0 前言

我国水稻生产过程中施肥环节一直沿用人工手撒施肥方式。这种方法施肥量大,且肥料在田间分布不均匀,水稻秧苗吸肥量不一致,造成水稻长势、高矮、结穗大小差异很大,直接影响水稻产量^[1-2]。理想的施肥方式为风送式水田侧深施肥。日本一些公司已经将侧深施肥装置整合到插秧机上形成产品,但该项技术在国内依然处于起步阶段,缺乏对风送式侧深施肥工作机理的研究^[3-7]。因此,风送式水田施肥过程中相关的技术参数只能通过试验识别。但是存在以下问题:田间试验时间受限,常常因为水稻栽培情况和天气情况而被迫中断;在一块水田里获得的试验数据很难和另外一块水田里的数据进行对比,试验可重复性差。气动参数与施肥量的关系也取决于土壤含水率,水稻耕作历史、种植历史等;在同一块水田里,土壤特性也有很大差异,很难找到一块可做重复试验的地块;田间土壤含水率很难控制,而水田泥浆含水率对于空气动力吹肥及肥槽开沟有很大的影响;水田的不平整度也会对试验数据产生影响。使田间试验受到限制。室内土槽试验台很好地克服了以上难点。陈建能等^[8]设计了旋转式圆形土槽试验台,该土槽运行平稳,可配合移栽机构进行移栽试验。李军等^[9]设计了多功能土槽试验台,采用测功机和电动机双向加载控制方式,实现了行走速度、牵引力、滑转率等动力学试验参数的控制研究,具有良好的通用性和实用性。李艳洁等^[10]研制了微型土壤动力学试验土槽装置,该土槽利用 PLC 控制步进电机推动台车实现正反转,可精确采集土壤正面阻力和侧面土壤阻力等数据。

本文在已有土槽试验台的基础上,参照国家相关标准中的施肥机械试验方法 GB/T 20346.1—2006,设计一种适用于风送式水田施肥的试验台。

1 总体设计

用于研究水田施肥试验的室内土槽有别于常规土槽。土槽试验台的设计应考虑到高含水率的土壤基的制备、调整和控制要求,包括土壤结构状态、土壤干密度、土壤含水率等^[11]。旱田土槽及土壤的制备相对简单,包括覆土、加水、压实。水田土壤基制备的关键在于对土壤含水率的控制。

本施肥试验台主要是对水田风送施肥作业进行模拟,土槽内土壤为流变态。水田土槽试验台与普通旱田土槽的主要区别在于排水沟设计、过滤层添加和土壤颗粒直径范围选择等方面。设计重点是控制流变态土壤含水率,实现风送施肥及监控气动参

数。基于以上要求,设计的直轨土槽内填铺经过过滤筛选的土壤模拟水田环境,土壤分层铺设,下部为过滤层,土槽底部设计为具有一定角度的倾斜面,并在斜面最低一侧挖有排水沟。试验台车主要完成行走与风送施肥功能,并搭载测控系统进行作业参数实时监控。

土槽台车整体结构简图如图 1 所示。主要由土槽、轨道、轨道调节架、台车、PXI 测控系统、泵站、马达、阀组构成。台车置于土槽轨道上方,可在轨道上以给定速度移动,并完成施肥作业。在试验过程中通过 LabVIEW 软件程序采集数据,将施肥气动参数变化直观显示在程序面板上,并在面板上控制台车前进速度、施肥速率等。

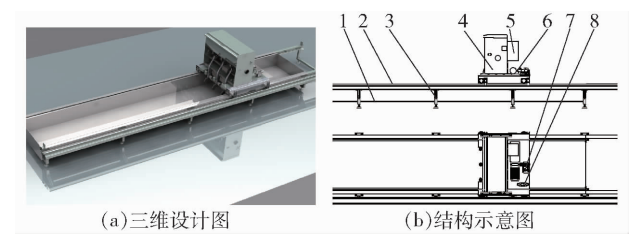


图 1 水田风送施肥排肥参数检测试验台总体结构
Fig. 1 General structure of test bed for testing parameters of paddy field wind assisted fertilization
1. 土槽 2. 轨道 3. 轨道调节架 4. 台车 5. PXI 测控系统 6. 泵站 7. 马达 8. 阀组

2 关键部件设计

2.1 试验土槽及轨道

土槽设计以适应对水田施肥环境的模拟为前提,以土槽和台车上安装的测控仪器稳定工作为设计依据。土槽长度根据台车工作过程中的加速段、测试段、制动段长度,最终确定为 12 m,其中加速段、制动段各 1.5 m,测试段 9 m。土槽两侧的轨道两端设置有双重位置感应传感器(图 2),台车在进入制动段后会自动触发第 1 位置传感器,利用液压油路液体阻尼系统实现减速。台车触发第 2 位置感应器后,液压油路锁死驱动轮,台车实现制动。为了减小土槽边缘效应对试验数据的影响,土槽宽度确定为 1.2 m(工作宽度为 0.6 m)。根据土槽内土层填装厚度,土槽高度设计为 0.7 m,其中土层厚度为 0.48 m。土槽断面如图 3 所示。

土槽内土壤分为水层、耕作层、硬底层和砾石排水层,土壤进入土槽前需进行专门处理^[11]。耕作层和硬底层采自种植历史悠久的水稻田,采回的土壤需经过晒干、捣碎及筛分等工序,将颗粒直径在 0.01 ~ 5 mm 范围内的土壤填埋入土槽,其下部为硬底层。砾石和沙组成的排水层形成过滤网,土槽最底部设有具有一定角度的斜面,便于调节土壤含水

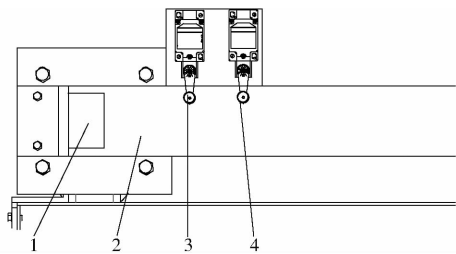


图2 位置感应传感器

Fig.2 Position sensor

1. 防撞阻尼 2. 轨道 3. 第2位置感应器 4. 第1位置感应器

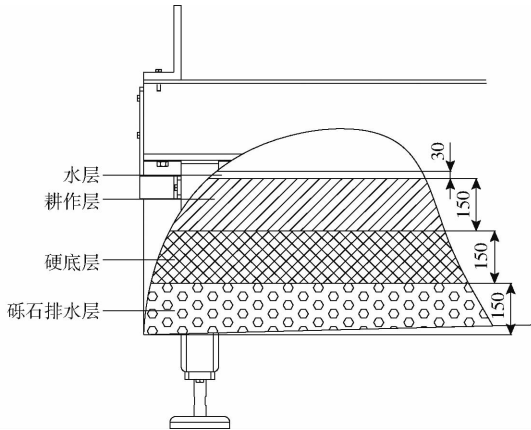


图3 土层断面图

Fig.3 Soil profile

率。填入的土壤经过平整,尽量使耕作层上表面在同一水平面上。关闭排水阀,向土槽内均匀洒水直到水面没过耕作层 30 mm。土槽田块平整、田面光洁、细而不胡、上烂下实。耕作层含水率为 35% ~ 45%,水深 10 ~ 30 mm 之间。

土槽轨道的布置一般分为 3 类,第 1 类在土槽的正上方安装单根轨道,台车采用吊装的方式固定。第 2 类两根轨道垂直上下分布,安装在台车的一侧。第 3 类在土槽两侧安装轨道,这种安装形式台车的结构较简单、刚度好,因此选用第 3 类结构^[12]。

2.2 台车牵引系统

水田风送施肥试验土槽台车结构如图 4 所示,主要包括主牵引驱动系统与风送排肥装置。主牵引系统提供台车在轨道上行走所需要的动力,由液压泵站、伺服控制阀组、液压马达、链传动系统、行走轮等组成。

机械行走机构安装示意图如图 5 所示。主要由从动轴、行走轮、限位轮、导轨、轨道压板、轴承和主动轴等组成。为了准确测量台车直线行走位移,马达输出轴上安装有测速码盘,再经过传动比换算得到行走轮的转速以及线位移。台车由液压马达带动的 4 个行走轮驱动,车体上方为水田风送施肥系统,台车前后有 4 个水平布置的限位轮接触到“工”字钢轨道的竖直筋板上,用以保障台车在轨道上直线

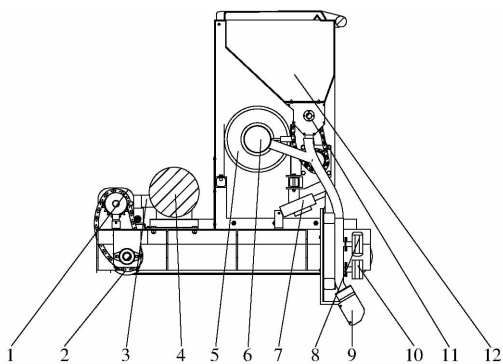


图4 台车结构图

Fig.4 Trolley structure

1. 液压马达 2. 行走轮 3. 伺服阀组 4. 液压泵站 5. 压力可调风机 6. 主风管 7. 排肥口升降器 8. 风压传感器 9. 排肥口 10. 风速传感器 11. 排肥器 12. 肥箱

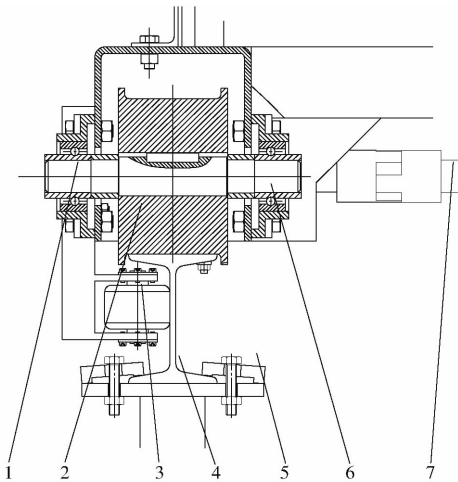


图5 机械行走机构安装示意图

Fig.5 Installation diagram of mechanical traveling mechanism

1. 从动轴 2. 行走轮 3. 限位轮 4. 导轨 5. 轨道压板 6. 轴承 7. 主动轴

行驶^[13]。
工作过程中,泵站作为动力装置向系统提供压力油液,比例换向阀接收控制系统的电信号对管路中的液压油流向及流量进行调节,从而控制液压马达的转向和转速。进而通过传动链带动主动轴转动。这种运动控制能迅速、准确地实现工作循环,调速范围大,并且可以实现无级调速。

2.3 台车风送施肥装置

2.3.1 基本结构和工作原理

台车风送施肥装置主要由肥箱、风机、主风管、风送排肥器、风速传感器、风压传感器等组成(图 4)。肥箱盖与肥箱之间通过橡胶层密封,起到保持排肥管中风压的作用。施肥装置采用步进电机驱动排肥、风力强制送肥的工作方式。施肥作业时,控制终端设定台车前进速度、条施肥量、定点施肥间距及施肥量等参数。通过调节脉冲频率及脉冲组频

率来控制步进电机的转速和转停频率。风速传感器和风压传感器设置在输肥管路上。深度调节通过排肥口升降器完成。排肥口升降器安装有角度传感器,通过推杆的角度判断排肥口入土深度。土槽试验作业时,排肥口在土槽深度 5 cm 处划一道矩形沟槽,排肥器排出的肥料在重力和气流双重作用下,经风送输肥管、排肥口,下落至沟槽底部。

2.3.2 主要参数

风送输送系统主要参数包括肥料-气体质量比、气流压力、气流速度、管径等^[14-15]。

台车风送施肥系统主要模拟水田插秧同步侧深施肥装置的工作状态。因此风力参数、施肥用量、台车前进速度等应与实际施肥作业过程一致。施肥机安装在高速插秧机上,以 6 行施肥装置为例,高速插秧机前进速度为 0.5 ~ 1.62 m/s,作业幅宽为 1.8 m,因此作业效率 0.324 ~ 1.05 hm²/h,按照最大作业效率 1.05 hm²/h,肥料施用量为 300 kg/hm²,可知施肥装置的肥料输送效率为 315 kg/h。

肥料-气体质量比是气力输肥系统的重要参数,计算公式为

$$\psi = \frac{G_p}{G_g} \tag{1}$$

式中 ψ ——肥料-气体质量比
 G_p ——肥料颗粒质量流量
 G_g ——气体质量流量

肥料-气体质量比越大,单位气体质量输送的肥料越多,输送效率越高。但是随着肥料-气体质量比的增加,输肥管越容易产生肥料堵塞现象,系统压力损失越大,此时需风机提供更高的风压和更快的气流来疏通肥管。因此需根据肥料颗粒的物理特性、输送方式、输送条件等情况选定合适的肥料-气体质量比^[14-15]。

水田施肥机受插秧机电池容量和发电机发电功率限制,风机的功率受限,风机气源压力较低,送风装置输送率较小,因此试验台风送装置肥料-气体质量比取 0.8 ~ 1.5 之间。

输送气流速度为

$$v = Kv_L \tag{2}$$

式中 v_L ——肥料颗粒的悬浮速度, m/s
 K ——速度系数(一般在 1.5 ~ 2.5 之间,与肥料-气体质量比相关)

风送肥料的气流速度越大,肥料颗粒在输肥管路内的分布越均匀,肥料颗粒输送越顺利,但是风机的功率消耗会增大,由于排肥口距离秧苗仅 3 cm,较大的气流从排肥口吹出,气流吹动秧苗易产生倒伏。当气流速度较低时,肥料颗粒会沿着排肥管道

底部移动,与排肥管内壁摩擦,产生肥料堆积甚至堵塞排肥管,从而影响肥料颗粒的正常排出^[16]。因此,需要合适的气流速度。试验得到肥料颗粒的悬浮速度为 8.4 m/s。由于水田肥料颗粒较大,风送排肥管采用具有塑料骨架的软管,输肥管路内壁呈高低起伏的曲面,加之水田环境潮湿,因此选取速度系数 K 为 1.5 ~ 3.5^[17-19]。由式(2)可得到风送试验台模拟的气流速度为 12.6 ~ 30 m/s,可通过调节试验台风机转速得到相应的管道气流速度。

2.4 数据采集及排肥控制系统

水田风送施肥试验台数据采集装置采用 PXI 总线技术,如图 6 所示。包括风速传感器、压力传感器、信号处理电路、数模转换电路和步进电机控制电路等。

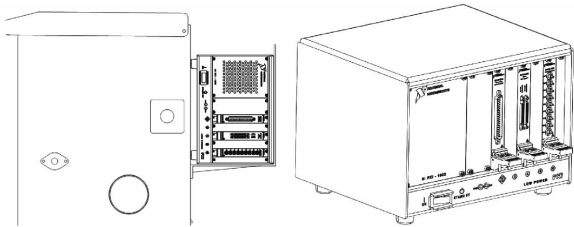


图 6 PXI 数据采集与运动控制系统
Fig. 6 PXI data acquisition and motion control system

由于肥管中存在肥料颗粒,对于测量肥管中风速及风压数据,传统的机械式风速仪不能满足测量精度和功能要求。三路风速传感器基于热扩散原理设计,以 Flow Sens FS5 为感应元件,将其接入传感器电路之中,通过模拟采集电路转换为电压信号。传感器量程为 0 ~ 50 m/s。

测试点的风压力可以通过该点的压差得到。风压传感器选取霍尼韦尔公司的传感器。压力量程为 0 ~ 1 000 Pa,供电电源:0 ~ 12 V DC。

如图 7 所示,风压传感器由 4 个检测电阻组成,连接为惠斯通电桥形式。 V_0 为检测的风压转换后的电压信号,假设 4 个电阻的阻值均为 R ,当风压作用产生应力后,其中 2 个电阻的阻值增加 ΔR ,另外 2 个电阻阻值减小 ΔR 。温度对阻值会产生影响,每个电阻都有 ΔR_t 的变化。测量时传感器进风口对准风向,感应风的总压力。

3 路风速和 3 路风压传感器采集 6 路模拟信号,角度传感器采集 1 路模拟信号,安装在马达输出

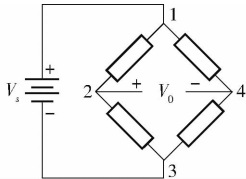


图 7 风压传感器原理图
Fig. 7 Schematic of wind pressure sensor

轴上的测速码盘采集 1 路数字信号。根据实际安装布置情况,角度传感器输出信号在 0~5 V 之间,风速和风压传感器输出信号在 0~10 V 之间。为了保证数据采集的准确性,须要求 8 路信号同步采集。采用美国国家仪器公司基于 PXI 总线技术的硬件设备作为土槽试验台控制、采集模块。由传感器采集到的数据进入 PXI 系统,再由基于 LabVIEW 软件开发的测试控制系统转换为风压、风速、施肥深度,以数据和曲线的形式呈现在显示器上。

3 检测软件设计

数据采集程序基于 LabVIEW 开发,程序使用 PXI 模拟量、数字量采集及控制器对风压、风速及台车前进速度等数据进行实时可视化显示和存储,其界面如图 8 所示。采集程序使用一层循环,基于数据流的顺序执行结构。循环内部设置有数据记录模块,对示波器显示数据进行跟踪记录,所有数据以电子表格形式存储在指定文件夹中。

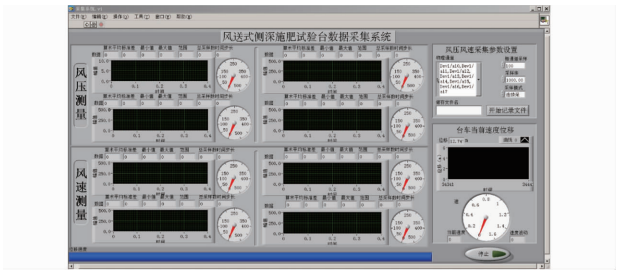


图 8 数据采集系统界面
Fig. 8 Data acquisition system program

开始采集数据之前需对采集模块进行相应的参数设置,包括串口号、采集频率、数据位和停止位设置等。经过风压传感器、风速传感器将气吹反作用力转换为模拟电压,通过模拟信号采集模块对信号进行放大、隔离、滤波、同步采样等处理,利用 LabVIEW 的 VISA Read 和 VISA Write 函数实现气动参数的采集。将传感器输出的信号通过采集模块的 A/D 功能完成数字信号的转换。上位机得到一串字符串,通过一系列的字符串函数、数值转换函数等将得到的字符串中有用的信号截取并转换成电压,通过波形函数进行实时显示。

试验台控制系统程序主要控制台车运动速度、排肥轮转速,程序界面和程序框图如图 9、10 所示。程序通过图 10b 所示的步进电机控制程序将一定占空比的脉冲信号发送给驱动器,从而可以任意控制步进电机的转速,通过控制发送脉冲的间隔时间及持续发送时间,可控制排肥轮按照一定的频率转停,从而完成更复杂的施肥量部署,实现智能施肥。

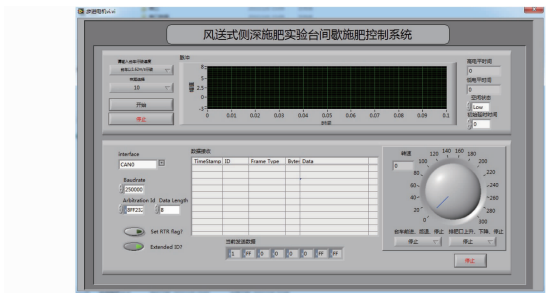


图 9 试验台控制系统界面
Fig. 9 Test bed control system program

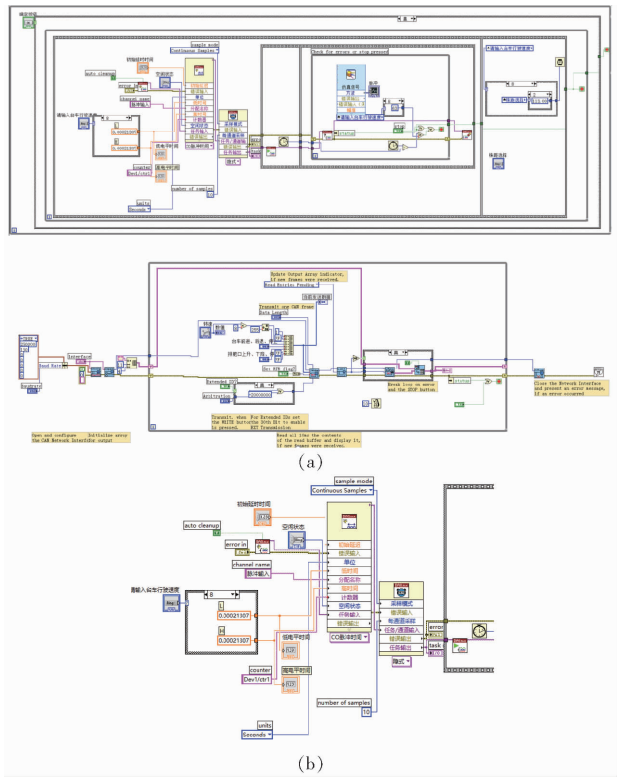


图 10 台车控制程序框图
Fig. 10 Block diagram of trolley control program

4 水田风送施肥试验台性能验证试验

4.1 风送系统性能验证试验

为了验证水田风送施肥参数检测试验台的输肥管道风速是否满足试验要求且在试验过程中实时监控风速,需在输肥管靠近排肥口一端安装热式高精度风速传感器,如图 11 所示。

风机从启动到稳定运转至最大转速,试验台 3 个排肥管内风速如图 12 所示,可以看出风速调节范围为 0~30 m/s,调节区间覆盖理论合理风速区间 12.6~30 m/s。3 个排肥管内风速在风机启动 37 s 后速度趋于一致,稳定在 30 m/s 左右。风送系统能满足风送施肥试验要求。

4.2 台车行进速度验证试验

如图 13 所示,台车驱动系统的液压马达转轴上安装有测速码盘,通过采集马达的转速信息得到当

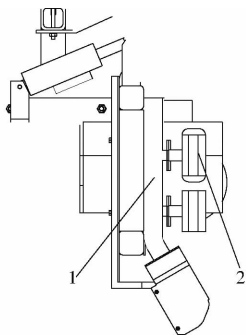


图 11 风速传感器
Fig. 11 Wind speed sensor
1. 输肥管 2. 风速传感器

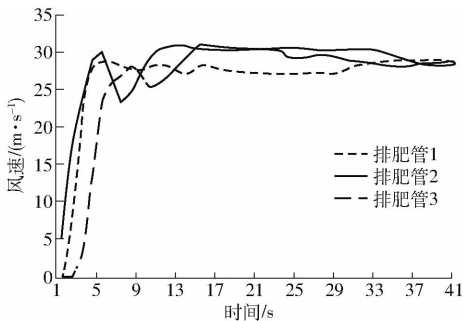


图 12 试验台排肥管内风速对比
Fig. 12 Comparison of wind speed in fertilizer discharge pipe of test bed

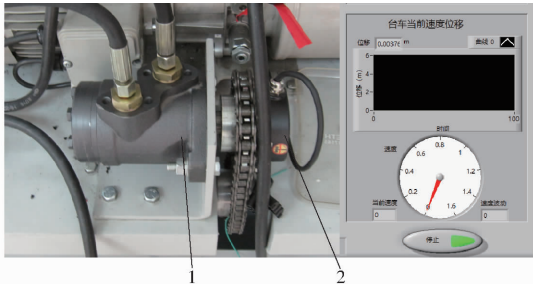


图 13 台车前进驱动系统
Fig. 13 Trolley drive system
1. 液压马达 2. 测速码盘

前台车的前进速度,并将当前速度数据传递给控制器,调整液压比例阀开度,从而实现速度的闭环控制。但是实际台车轮在轨道上运行既有滚动,又有相对滑动,因此台车实际运行速度应比设定速度略小。试验测得台车行驶速度误差在 1.5% 以内,控制精度明显优于实际水田试验中动力机械的速度控制精度。

4.3 台车排肥装置性能验证试验

根据 NY/T 1993—2006《施肥机械质量评价技术规范》,施肥试验台施肥装置性能验证试验为静态试验,不考虑台车前进速度,分析单位时间内台车风送施肥装置不同排肥轮转速下排肥量的变化规律^[20-21]。

台车施肥装置的排肥性能测定是测量一定时间

内,排肥器排出肥料质量变化。质量变化越大表明排肥装置排肥性能越差。试验时肥箱为装满肥料的状态。分别测定排肥驱动电机转速为 10、20、30、40、50、60、70、80 r/min 情况下的排肥量标准差和变异系数,每次测定时间 1 min,每个排肥口重复试验 5 次。试验后将 3 个排肥口的肥料进行称量,统计结果如表 1 所示。

表 1 不同排肥轮转速下施肥均匀性
Tab.1 Fertilization stability at different rows of fertilizer wheel speed

排肥器转速/(r·min ⁻¹)	施肥量均值/g	变异系数/%
10	200.40	5.43
20	297.30	5.79
30	425.66	3.32
40	530.45	2.53
50	635.98	4.25
60	730.50	1.63
70	833.27	0.90
80	931.48	1.28

试验结果表明,排肥轮转速对施肥稳定性施肥均值和变异系数影响显著,拟合得到排肥轮转速 x 影响施肥量均值 y_1 和变异系数 y_2 的回归方程为

$$y_1 = 10.497x + 100.77 \tag{3}$$

$$y_2 = 0.0003x^2 - 0.094x + 6.6252 \tag{4}$$

由式(3)可以看出,随着转速的增加,施肥量均值呈线性增加趋势。但是施肥量均值变异系数会随着转速的增加而降低。这是由于外槽轮排肥器排肥脉动造成的,转速增加会降低排肥轮脉动对施肥量的影响。排肥变异系数最大为 5.79%,满足《施肥机械质量评价技术规范》要求的施肥稳定性变异系数小于 7.8% 的要求,水田土槽试验台施肥装置性能良好。

5 试验

根据 NY/T 1993—2006《施肥机械质量评价技术规范》,运用试验设计和分析的方法对水田气送施肥试验土槽的施肥均匀性进行研究。运用单因素试验方法分别测得排肥轮转速、台车前进速度、风机风速的取值范围。采用二次正交旋转组合试验分析各个影响因素与施肥量均值及施肥均匀性变异系数之间的关系^[20]。

5.1 试验方法

试验地点选在北京小汤山国家精准农业研究示范基地精施农业实验室,环境温度 25℃,试验肥料为黑龙江农垦水稻种植区侧深施肥专用缓释肥,其颗粒直径为 3~5 mm,容重为 1 500 kg/m³,含水率 18.8%。

施肥均匀性测试为动态试验,假设台车以没有打滑的理论前进速度前行,为便于测量每固定距离的施肥量,肥料不采用深施方式,将肥料施于土壤表面,并且沿台车前进方向每 100 mm 长度为测量单位,收集落入每小段的肥料颗粒并称量。施肥均匀性由施肥量均值、标准差及变异系数评定。

试验时,将 9 m 的土槽测试段分成每段 100 mm 长度,将肥料收集器放置于土槽之上用于收集下落的肥料颗粒,利用无级调速旋钮调节风机转子转速,从而控制风机输出的气流速度。通过液压驱动装置调节台车前进速度及往复运动方向来模拟插秧机搭载施肥装置运动,试验台如图 14 所示。



图 14 水田风送施肥试验台

Fig. 14 Test bed of paddy field fertilization by air

5.2 试验结果及分析

5.2.1 施肥量均值

通过分析台车施肥装置排肥轮转速、台车前进速度、输肥管内风速来得到各因素对施肥装置施肥量均值的影响,预试验得到各因素的合理变化范围为:排肥轮转速 20 ~ 60 r/min,台车前进速度 0.5 ~ 1.6 m/s,输肥管内风速 20 ~ 38 m/s。在此基础上开展正交试验。试验结果如表 2 所示。

运用 Matlab 软件对上述试验数据进行多元线性回归分析,得到

$$y_1 = 0.9427 + 0.0189x_1 - 0.8165x_2 - 0.0039x_3$$

(5)

施肥量均值回归模型计算结果如表 3 所示。

根据式(5)回归方程,利用 Matlab 软件绘制排肥轮转速、台车前进速度对施肥量均值影响的响应曲面,如图 15 所示。

当风机风速为 27 m/s 时,施肥量均值随着排肥轮转速的增加线性增加,随着台车前进速度的减小而增加。排肥轮转动一周的排肥量为固定值,当台车前进速度为定值时,随着排肥轮转速的增加,单位时间内的施肥量增加,施肥量均值会相应增加。当排肥轮转速不变时,单位时间内排出的肥料量不变,随着台车前进速度的增加,排肥口通过每一小段的时间减小,下落到每段的肥料量相应减小,从而使得

表 2 试验设计与试验结果

Tab.2 Test design and test results

序号	排肥轮 转速 x_1 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	台车前进 速度 x_2 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	风机风速 x_3 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	施肥量 均值 y_1 /g	施肥均匀 性变异系数 y_2 /%
1	30	0.7	23	0.76	5.30
2	50	0.7	23	1.30	4.61
3	30	1.3	23	0.40	7.33
4	50	1.3	23	0.67	6.50
5	30	0.7	32	0.74	5.53
6	50	0.7	32	1.28	3.48
7	30	1.3	32	0.42	8.28
8	50	1.3	32	0.66	6.10
9	20	1.0	27	0.35	8.46
10	60	1.0	27	1.07	5.32
11	40	0.5	27	1.41	3.90
12	40	1.6	27	0.46	6.90
13	40	1.0	20	0.71	5.90
14	40	1.0	38	0.66	5.33
15	40	1.0	27	0.67	5.45
16	40	1.0	27	0.69	5.45
17	40	1.0	27	0.67	5.10
18	40	1.0	27	0.70	4.75
19	40	1.0	27	0.72	4.91
20	40	1.0	27	0.71	5.26
21	40	1.0	27	0.68	4.46
22	40	1.0	27	0.71	4.74
23	40	1.0	27	0.70	4.55

表 3 施肥量均值回归模型回归系数

Tab.3 Regression coefficient of regression model
of fertilization uniformity

回归系数	回归系数估计值	回归系数置信区间
β_0	0.9427	[0.3864, 1.4991]
β_1	0.0189	[0.0124, 0.0255]
β_2	-0.8165	[-1.0448, -0.5881]
β_3	-0.0039	[-0.0193, 0.0115]
$R^2 = 0.9019$	$F = 34.1046$	$p < 0.0000$ $S^2 = 0.0143$

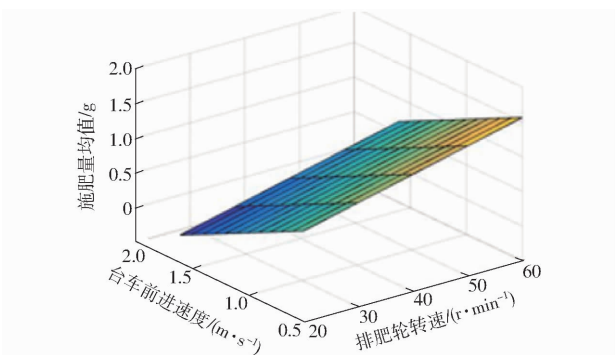


图 15 施肥量均值响应曲面

Fig. 15 Corresponding surface of average fertilization amount

施肥量均值减小。从回归方程各变量的系数来看,对施肥量均值影响贡献率从大到小依次为:台车前

进速度、排肥轮转速、风机风速。

5.2.2 施肥均匀性变异系数

通过对试验数据进行多项式回归,拟合得到各因素对施肥均匀性变异系数 y_2 方程为

$$y_2 = 3.4025 - 0.1014x_1 + 3.2477x_2 + 0.2019x_3 - 0.0113x_1x_2 - 0.0074x_1x_3 + 0.1445x_2x_3 + 0.003x_1^2 - 1.6566x_2^2 - 0.0012x_3^2 \quad (6)$$

根据回归方程,利用 Matlab 软件绘制出台车前进速度在 1.3 m/s 时,台车排肥轮转速、排肥管内风速对施肥均匀性变异系数的影响曲面,如图 16a 所示。由图 16a 可看出,当风机风速低于 30 m/s 时,施肥均匀性变异系数随着排肥轮转速的减小先减小而后增加。风机风速高于 30 m/s 时,施肥均匀性变异系数随着排肥轮转速的减小而升高。

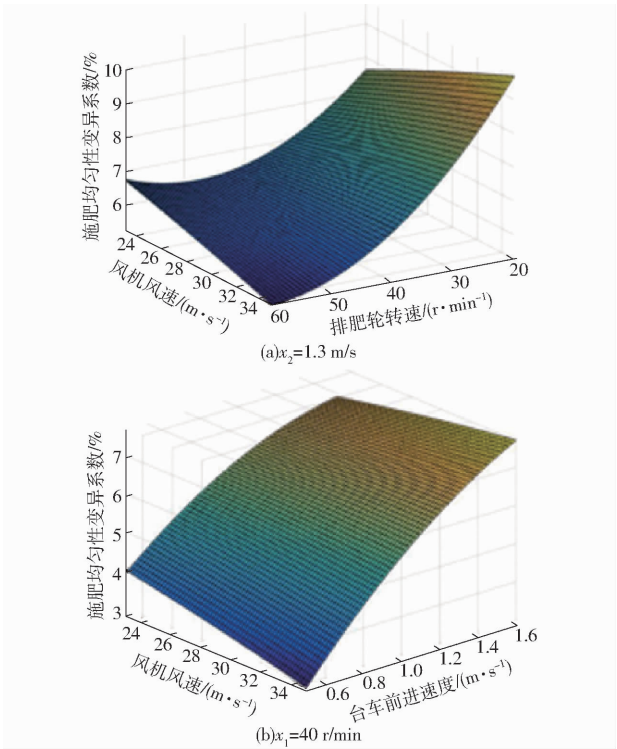


图 16 施肥均匀性变异系数响应曲面

Fig. 16 Response surface of variation coefficient of fertilization uniformity

当排肥轮转速低于 40 r/min 时,随着风速增高,施肥均匀性变异系数同时增高,这时提高风速不利于提升施肥均匀性。当排肥轮转速在 40 ~ 60 r/min 时,风速提高,施肥均匀性变异系数降低,并且排肥轮转速越高,风速对施肥均匀性影响越大。

肥料颗粒在管道中运动,颗粒运动状态随气流速度的变化而变化,气流速度越大则肥料颗粒在输

肥管中越接近于均匀分布。气流速度降低则肥料颗粒接近排肥管壁面运动,与壁面的摩擦会降低肥料运行速度。风速进一步降低会使得颗粒肥料堆积产生堵塞现象^[16]。排肥轮转速较低时,由于外槽轮式排肥轮的特性,排肥脉动现象较明显,因此施肥均匀性变异系数较大。排肥轮转速高时,排肥脉动现象减弱。但是由于高速排肥需要较大气流速度驱动颗粒肥料运动,较小的气流速度已经不能满足输送气流要求,加之肥料颗粒尺寸不一、质量不均,一些肥料颗粒会产生分级现象甚至堆叠现象,不能被及时输送走的颗粒导致高排肥转速、低风速下施肥均匀性较差。较低的排肥转速下,由于脉动现象明显,较高的气流速度对排肥脉动有一定的放大作用,因此低速排肥下使用高速气流输送也会造成排肥均匀性变差。

当排肥轮转速为 40 r/min 时,台车行走速度和风机风速对施肥均匀性变异系数的影响如图 16b 所示。由图可知,随着台车行走速度增大,施肥均匀性变异系数越大,施肥均匀性越差。台车行走速度处于低速时,施肥均匀性变异系数随风速的增加而减小,台车高速行走时,施肥均匀性变异系数随着风速的增加而变大。因此低速行走采用较高的风速,高速行走采用较低的风速有助于提高施肥均匀性。各因素对施肥均匀性变异系数的影响由大到小依次为:排肥轮转速、台车前进速度、风机风速。

6 结论

(1)设计了一种可进行风送水田侧深施肥排肥参数检测的试验台。实现了风送排肥过程中风压、风速等参数实时采集和显示,可灵活控制排肥轮转速和转停频率。试验台性能验证试验表明,试验台行进速度可在 0 ~ 1.62 m/s 内调节,误差 1.5%,风机提供风流速度在 0 ~ 30 m/s,满足风送排肥需求。

(2)用二次正交试验获取台车排肥轮转速、台车前进速度和风机风速对施肥稳定性和施肥均匀性的影响。得到低排肥轮转速下使用较高风速不利于施肥均匀性的提高,高排肥转速下需较大风速更有利于均匀施肥。各因素对施肥均匀性施肥量均值影响由大到小依次为:台车前进速度、排肥轮转速、风机风速。各因素对施肥均匀性变异系数的影响由大到小依次为:排肥轮转速、台车前进速度、风机风速。

参 考 文 献

[1] 马昕,杨艳明,刘智蕾,等. 机械侧深施控释掺混肥提高寒地水稻的产量和效益[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(4): 1095 - 1103.
MA Xin,YANG Yanming,LIU Zhilei,et al. Yield increasing effect of mechanical topdressing of polymer-coated urea mixed with

- compound fertilizer in cold area rice[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer,2017,26(4):1095-1103. (in Chinese)
- [2] SHENG Z,SHO S,SHOHEI R, et al. Effect of infiltration rate on nitrogen dynamics in paddy soil after high-load nitrogen application containing ^{15}N tracer[J]. Ecological Engineering,2011,37(5):685-692.
- [3] PENG X L,YANG Y M,YU C L, et al. Crop management for increasing rice yield and nitrogen use efficiency in northeast China[J]. Agronomy Journal, 2015, 107(5):1682-1690.
- [4] 潘圣刚,莫钊文,罗锡文,等. 机械同步深施肥对水稻群体质量及产量的影响[J]. 华中农业大学学报,2013,32(2):1-5.
PAN Shenggang,MO Zhaowen,LUO Xiwen, et al. Effects of deeply mechanized fertilizer application on the quality and grain yield of direct seedling rice[J]. Journal of Huazhong Agricultural University,2013,32(2):1-5. (in Chinese)
- [5] 毕春辉,陈长海,李明金,等. 浅谈水稻侧深施肥技术[J]. 农业装备技术,2011,37(6):24-25.
BI Chunhui,CHEN Changhai,LI Mingjin, et al. Discussion on side deep fertilization technology of rice[J]. Agricultural Equipment Technology,2011,37(6):24-25. (in Chinese)
- [6] SHOJI S,DELGADO J,MOSIER A, et al. Use of controlled release fertilizers and nitrification inhibitors to increase nitrogen use efficiency and to conserve air and water quality[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis,2001,32(7-8):1051-1070.
- [7] BAUTISTA U,KOIKE M,SUMINISTRADO D C. PM-power and machinery: mechanical deep placement of nitrogen in wetland rice[J]. Journal of Agricultural Engineering Research,2001,78(4):333-346.
- [8] 陈建能,叶军,夏旭东,等. 轮胎摩擦驱动的旋转式圆形土槽试验台设计与应用[J]. 农业机械学报,2015,46(7):66-71.
CHEN Jianneng, YE Jun, XIA Xudong, et al. Design and application of rotary round soil-bin test bed driven by tyre friction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(7):66-71. (in Chinese)
- [9] 李军,金嗣淳. 多功能土槽试验台的结构方案设计[J]. 农业装备与车辆工程,2015,53(4):59-61.
LI Jun, JIN Sichun. Structural plan design for multifunctional soil bin[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2015,53(4):59-61. (in Chinese)
- [10] 李艳洁,徐泳,赵东,等. 微型土壤动力学试验土槽装置的研制[J]. 机械工程学报,2010,46(15):65-70.
LI Yanjie,XU Yong,ZHAO Dong, et al. Development and Manufacture of Mini-soil-bin Device for Soil Dynamics Experiments[J]. Journal of Mechanical Engineering,2010,46(15):65-70. (in Chinese)
- [11] 罗锡文,邵耀坚. 水田土槽设计和试验[J]. 华南农学院学报,1984,5(2):36-44.
LUO Xiwen,SHAO Yaojian. The design and tests of a paddy soil bin[J]. Journal of South China Agricultural University, 1984,5(2):36-44. (in Chinese)
- [12] 孙新城,叶军,严江军,等. 旋转式农机土槽试验台运行平稳性控制方法及试验验证[J]. 农业工程学报,2015,31(13):46-52.
SUN Xincheng, YE Jun, YAN Jiangjun, et al. Running stability control method and test verification of soil groove test rig for rotary agricultural machine[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(13):46-52. (in Chinese)
- [13] 耿言. 基于 Labview 的机车制动试验台检测系统设计[D]. 兰州:兰州交通大学,2014.
GENG Yan. The design of detection system about locomotive brake test-bench based on Labview[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [14] 胡克吉. 气力输送系统文丘里供料器的研究[D]. 青岛:青岛科技大学,2013.
HU Keji. The research on venturi feeder in pneumatic conveying system[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology,2013. (in Chinese)
- [15] 韩启彪,黄兴法,刘洪禄,等. 6种文丘里施肥器吸肥性能比较分析[J]. 农业机械学报,2013,44(4):113-117,136.
HAN Qibiao,HUANG Xingfa,LIU Honglu, et al. Comparative analysis on fertilization performance of six Venturi injectors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(4):113-117,136. (in Chinese)
- [16] 李立伟,孟志军,王晓鸥,等. 气送式水稻施肥机输肥装置气固两相流仿真分析[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊):171-180.
LI Liwei,MENG Zhijun,WANG Xiaou, et al. Simulation analysis of gas-solid two phase flow in pneumatic conveying fertilizer feeder of rice fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp.):171-180. (in Chinese)
- [17] 佟飞虎. 文丘里管、文丘里喷嘴流量计的参数化设计[D]. 沈阳:东北大学,2007.
TONG Feihu. The parametric design of Venturi tube and Venturi nozzle flowmeter[D]. Shenyang: Northeastern University, 2007. (in Chinese)
- [18] 刘凯,陆海峰,郭晓镭,等. 文丘里管结构对高浓度煤粉流动特征及压差特性的影响[J]. 化工学报,2015,66(5):1656-1666.
LIU Kai,LU Haifeng,GUO Xiaolei, et al. Influence of Venturi structures on flow characteristic and pressure drop of gas-coal mixture[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering,2015,66(5):1656-1666. (in Chinese)
- [19] KIM Y J, KIM H J, RYU K H, et al. Fertiliser application performance of a variable-rate pneumatic granular applicator for rice production[J]. Biosystems Engineering,2008,100(4):498-510.
- [20] 作兴建,武广伟,付卫强,等. 风送式水稻侧深精准施肥装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(3):14-21.
ZUO Xingjian,WU Guangwei,FU Weiqiang, et al. Design and experiment of wind driven rice side deep precision fertilization device[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(3):14-21. (in Chinese)
- [21] 齐兴源,周志艳,林蜀云,等. 稻田气力式变量施肥机肥料喷撒器设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊):164-170.
QI Xingyuan, ZHOU Zhiyan, LIN Shuyun, et al. Design of fertilizer spraying device of pneumatic variable-rate fertilizer applicator for rice production[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp.):164-170. (in Chinese)