

支持种肥监测的变量施肥系统设计与试验

杨 硕^{1,2} 王 秀^{2,3} 翟长远⁴ 窦汉杰² 高原源^{1,2} 赵春江^{1,3}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097; 3. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097; 4. 俄克拉荷马州立大学生物系统与农业工程系, 斯蒂尔沃特 74078)

摘要: 目前国内变量施肥控制系统与排肥监测系统集成化程度低,电动机驱动变量施肥系统动态响应研究不够深入。为此设计了基于电动机驱动、支持多路播种施肥监测的变量施肥控制系统,主要包括触摸屏、中央控制器和数据采集器。控制器以 MCU 为核心,读取 GPS 测速模块获取的机具行进速度,监测排肥电动机实时转速,与数据采集器通讯获取多路排种或施肥状态,与触摸屏通讯设置作业参数和监测作业状态。搭建试验平台,测得排肥轴转速范围为 12.5 ~ 125 r/min、监测灵敏度为 3 s 时,系统监测可靠性为 100%。进行了系统排肥量变化响应时间试验,室内试验结果表明在 0 ~ 11 500 g/min 的排肥量变化范围内,系统响应时间最大为 0.75 s。系统整机试验中,75 ~ 450 kg/hm² 的施肥量变化区间,公差以 75 kg/hm² 递增,行进速度平均为 3.79 km/h 时,系统响应时间平均为 1.08 s;在设定施肥量 450、600、750 kg/hm² 下,改变不同行进速度的过程中,排肥量准确率平均值分别为 95.92%、95.24% 和 98.26%,方差分别为 3.01%、1.39% 和 1.36%。田间试验表明,施肥量分别为 450、600、750 kg/hm² 时,系统排肥量准确率平均值为 94.69%,方差为 2.23%,多路排种、排肥监测故障报警准确率为 100%。

关键词: 变量施肥; 播种施肥机; 播种监测; 可视化; 多路监测

中图分类号: S147.2; TP277 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)10-0145-09

Design and Test on Variable Rate Fertilization System Supporting Seeding and Fertilizing Monitoring

YANG Shuo^{1,2} WANG Xiu^{2,3} ZHAI Changyuan⁴ DOU Hanjie² GAO Yuanyuan^{1,2} ZHAO Chunjiang^{1,3}

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

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

3. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China

4. Department of Biosystems and Agricultural Engineering, Oklahoma State University, Stillwater OK 74078, USA)

Abstract: The current domestic integration of a variable rate fertilization system and a fertilizer feeder fault alarming system has a low level, and there is less research on dynamic response of a motor driving fertilization system. A variable rate fertilizing control system supporting seeding and fertilizing monitoring was designed based on a motor driving method. The system mainly included a touch screen, a central controller and a data collector. The central controller was designed based on an MCU, which monitored both the vehicle speed by using a GPS module and the fertilization motor speed in real time. The touch screen was used to set or read the operation parameters by communicating with the controller. The data collector monitored the working status of the multiple seed metering or fertilizer feeder. An experimental platform was built to evaluate the monitoring accuracy. When the sowing axle speed was 12.5 ~ 125 r/min and the monitoring sensitivity was set to 3 s, the accuracy of the fault alarming system was 100%. A test was conducted to find the system response time with different fertilization rates, the test results showed that the maximum system response time was 0.75 s when fertilization rate was from 0 g/min to 11 500 g/min. The prototype machine test result showed that when the fertilization rate was from 75 kg/hm² to 450 kg/hm² with an increment of 75 kg/hm², the average system response time was 1.08 s. When the fertilization rates were 450 kg/hm², 600 kg/hm² and 750 kg/hm² with different vehicle speeds, the average

收稿日期: 2018-05-31 修回日期: 2018-08-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200600-2016YFD0200608、2017YFD0700500-2017YFD0700502)

作者简介: 杨硕(1990—),男,博士生,主要从事播种施肥智能装备研究,E-mail: yangshuosjz@163.com

通信作者: 赵春江(1964—),男,研究员,中国工程院院士,主要从事农业信息化研究,E-mail: zhaojcj@nrcita.org.cn

accuracies of fertilizer ejecting were 95.92% , 95.24% and 98.26% , and the variances were 3.01% , 1.39% and 1.36% , respectively. The field test results showed that when the fertilization rates were set to 450 kg/hm² , 600 kg/hm² and 750 kg/hm² , the average accuracies of fertilizer ejecting was 94.69% with variance of 2.23% , and the accuracy of the fault alarm for multiple feeders was 100% .

Key words: variable-rate fertilization; fertilizing planter; sowing monitoring; visualization; multichannel monitoring

0 引言

施肥播种作业过程中出现施用量精度低、漏播和重播等问题时,将对作物产量造成损失,且污染环境,制约着智能化播种施肥机作业高效发挥。学者在保证种子、肥料的精准化、高效施用方面做了大量的研究,主要集中在精准施肥技术和施肥播种作业状态监控两方面^[1-4]。精准施肥技术根据目标作物的需肥种类及用量,将肥料施到作物所需的最佳位置。宽幅施肥机多采用液压马达驱动控制,适应我国华北等地区的小地块施肥机多采用电动机驱动方案。文献[5-7]研究了采用光谱探测、图像处理及土壤传感器等实时获取施肥决策的方法,控制施肥机进行施肥;文献[2-3,8-14]报道了采用模糊控制、PID 控制等多种变量技术来保证肥料用量的精确,并进行了系统的试验研究;文献[15-16]在施肥播种关键机构方面进行了研究,以保证施肥播种的精度实施。精准施肥技术依据施肥处方图指导作业,施肥处方图网格划分方法对准确施肥至关重要,学者普遍采用垂直或任意角度的均等网格划分,在网格横向长度上依据机具作业幅宽或者方形网格,纵向长度上反映的准确度受变量施肥装备位置滞后及系统反应时间的影响^[17-18]。在施肥播种作业状态的监控方面,通过监控播种、施肥过程中作业参数的变化,对异常故障进行处置。Precision Planting 公司生产的 20/20 SeedSense 系统可以实现多路玉米播种漏播、重播等状态的监测和机具实时工作地图的显示。文献[19-20]通过研制施肥播种监测传感器,获取排种、排肥状态信息。卢彩云等^[4]对施肥播种作业监控系统进行了研究,对小麦播种进行实时监控。文献[1,21-24]针对连续和间断播种两种不同的播种类型进行了研究,并在试验样机中对系统进行验证。DICKEY-john 公司生产的智能农业设备通过 CAN 接口单元的扩展可以实现对播种、施肥的控制和监测。国内学者大多针对单方面进行研究,造成在施肥机工作过程中,为达到施肥状态监测和变量施肥实施,需同时安装两套控制系统,操作复杂,成本增加。为此,研究一种集成多路施肥作业监测和变量施肥控制的系统迫在眉睫。

针对以上问题,本文拟设计一种实现多路施肥

播种作业状态监测和施肥参数监控的集成系统,旨在解决连续型播种施肥一体机主要作业参数的控制和监测提供一种方法。

1 系统设计

1.1 系统总体设计

设计的支持多路排肥监测的电动施肥控制系统如图 1 所示。控制系统主要由控制器、触摸屏、数据采集器、排肥电动机、GPS 测速模块、机具起降传感器和种肥监测传感器组成。其中,排肥电动机通过链轮连接排肥轴,用于排肥控制;种肥监测传感器安装于排种器或排肥器出口位置,用于监测连续型排种或肥料下落;机具起降传感器安装于机具起降悬挂轴位置,用于监测机具升降;GPS 测速模块接收器安装于拖拉机顶端高处,用于获取机具行进速度。

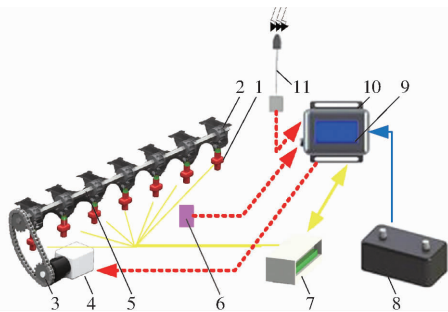


图 1 控制系统结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of control system

1. 种肥监测传感器 2. 排肥器 3. 链轮 4. 排肥电动机 5. 排肥轴 6. 机具起降传感器 7. 数据采集器 8. 车载蓄电池 9. 触摸屏 10. 控制器 11. GPS 测速模块

工作时,拖拉机带动播种施肥机前进,控制器根据触摸屏设置参数,整合机具作业速度和机具起降信息,控制排肥电动机转速,带动排肥轴转动,实现精量排肥。数据采集器采集种肥监测传感器状态,接收控制器指令,将信息反馈给控制器。

控制器利用应用协议解析反馈指令,获得各路排种或排肥状态,将数据传送至触摸屏实时显示,发生故障时,启动蜂鸣器进行报警,实现多路排种或排肥作业状态监测和精量排肥的集成控制。

1.2 硬件设计

控制器以 STC12C5A60S2 为核心,控制系统硬件框图如图 2 所示。MCU 内置双串口资源,通过

UART0 与 DC48270B043_06WK_RTC 型触摸屏通讯,通过 UART1 与 JY - DAM - 3280D 型数据采集器通讯。该触摸屏支持 RS232 串口通讯,可满足对施肥播种作业系统排肥量等参数的设置与监控以及各路排种、排肥状态图形化监测的要求。数据采集器具有 32 路开关量输入和 8 路模拟量输出的功能,支持标准 Modbus RTU 通讯协议,满足最多 32 路种肥监测传感器的信号读取的要求。种肥监测传感器(保定联宇电子科技有限公司)采用光电对管探测原理,常态为低电平,触发后为高电平,触发脉冲延时 3.5 s 自动复位,可重复触发,该传感器可满足对连续播种、施肥进行监测的要求。机具起降传感器选用 LIS331 型倾斜开关传感器。GPS 测速模块(北京农业信息技术研究中心)能够将速度信号转换为频率信号输出,测速范围为 1.8 ~ 130 km/h,采集速度每增加 1 km/h,输出频率信号增加 36.1 Hz。GPS 测速模块输出信号经频率脉冲隔离模块传输至 MCU I/O 监测口。

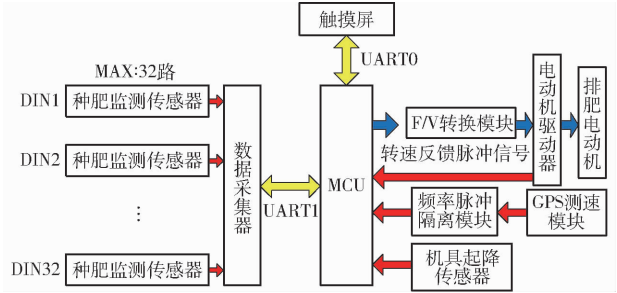


图 2 控制系统硬件框图

Fig. 2 Hardware block diagram of control system

本试验样机中排肥电动机采用 D5BLD200 - 24V - 30S 型电动机,由 DMKE D750 - BLD 型电动机驱动器驱动,另配有 PLF090 - L2 - 20 - S2 - P2 - T 型减速器。MCU 通过改变频率,经 FVS - 200HZ5V 型 F/V 转换模块,转换为电压模拟量控制电动机驱动器,对电动机转速进行控制,同时监测电动机反馈转速,实现精量排肥的控制和监测。

1.3 触摸屏界面设计

触摸屏界面实现施肥量的设置及监控、多路施肥播种作业状态参数设置及监测(图 3)。设置主界面包括施肥量相关参数设置和播种施肥作业状态监测设置。施肥量相关参数的设置包括每公顷施肥量、作业幅宽和施肥量及排肥器个数。多路施肥播种作业状态的设置包括监测工作行号设置和监测灵敏度设置。

其中,施肥量设置为每公顷所需肥量;作业幅宽设置为机具作业幅宽;每转肥量设置为单排肥器每转排肥量;排肥器个数设置为实际工作排肥器个数;监测灵敏度设置为控制器对种肥监测传感器信号脉

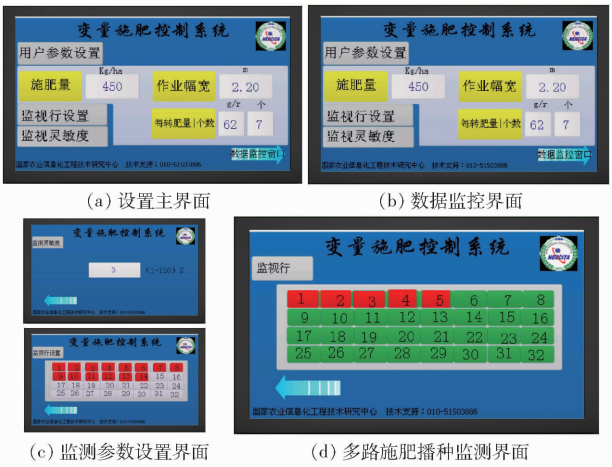


图 3 触摸屏界面

Fig. 3 Interface of touch screen

冲的扫描间隔时间;工作行设置为对应工作行号。数据监控界面可对实时施肥量、总施肥量和作业面积进行实时监测。多路施肥播种监测界面可实现工作行数中各路工作状态监测,正常状态显示为绿色,否则为红色。

1.4 控制算法设计

播种施肥机通过 GPS 测速模块获得机具行进速度,速度脉冲频率每增加 36.1 Hz,则说明机具行进速度增加 1 km/h,控制器取 3 次行进速度的平均值作为输出值,则播种施肥机速度为

v = f / 129.96 (1)

式中 v——播种施肥机行进速度,m/s

f——GPS 测速模块信号频率,Hz

排肥电动机与排肥轴传动比为 1:1,则排肥电动机输出转速为

n = 6vwq / pm (2)

式中 n——排肥电动机输出转速,r/min

w——机具作业幅宽,m

q——施肥量设定值,kg/hm²

p——单排肥器每转排肥量,g/r

m——工作排肥器个数,个

MCU 通过输出频率,经 F/V 转换模块,由电动机驱动器控制电动机转速输出。播种施肥机作业面积通过单位时间内的工作面积累加获得,作业面积为

S = vwt / 10 000 (3)

式中 S——作业面积,hm²

t——工作时间,s

排肥轴转速监测通过电动机转速反馈频率确定,则排肥轴转速为

$$n_b = \frac{20f_b}{IP_b} \tag{4}$$

式中 n_b ——排肥轴转速, r/min

f_b ——电动机转速反馈频率, Hz

P_b ——排肥电动机极对数, 为 4

I ——减速器减速比, 为 20

系统由电动机转速反馈频率获取排肥电动机转速实际值, 单位时间内的排肥电动机转速实际值累加, 获得排肥轴转动圈数的累加值, 则总施肥量为

$$Q = \frac{tpmn_b}{60\,000} \tag{5}$$

式中 Q ——总施肥量, kg

控制系统流程如图 4 所示。程序初始化参数后, 通过 UART0 与触摸屏通讯, 发送读取触摸屏控件初值的指令。触摸屏接收到读取指令, 向外发送对应控件参数指令, MCU 通过对应协议解析获得各变量值。GPS 模块冷启动结束后, 向外发送测速脉冲, MCU 通过外部中断 0 接收该脉冲信号, 并对脉

冲信号进行测频计数。速度脉冲频率每 1 s 更新, 根据公式(1)计算出机具行进速度, 并将单位时间速度脉冲计数值清零; 分别利用公式(4)、(3)、(5)计算反馈转速、作业面积和总施肥量。接收到机具下降传感器信号后, MCU 根据公式(2)计算排肥电动机输出转速, 通过电动机转速控制曲线获得输出频率值, 启动 PWM 输出。排肥电动机运转后, MCU 通过外部中断 1 接收排肥电动机反馈转速脉冲。

每隔 1 s, 通过 UART0 向触摸屏发送数据更新指令。每隔 100 ms, MCU 通过 UART1 向数据采集器发送读取 32 路开关量采集口状态指令, 将返回数据存入数组 hex[j], 对接收到的数据和 D_3208_m (初值 0x01) 进行按位与运算, 每进行一次, D_3208_m 左移 1 位, 令 $D_3208_z = D_3208_m \& hex[j]$, 若 $D_3208_z = D_3208_m$, 则说明该位监测到了种肥监测传感器信号, 将该路报警监测标志位置 0。

若该位未监测到种肥监测传感器信号, 判断是否到达监测灵敏度设定时间, 若超过设定时间, 判定

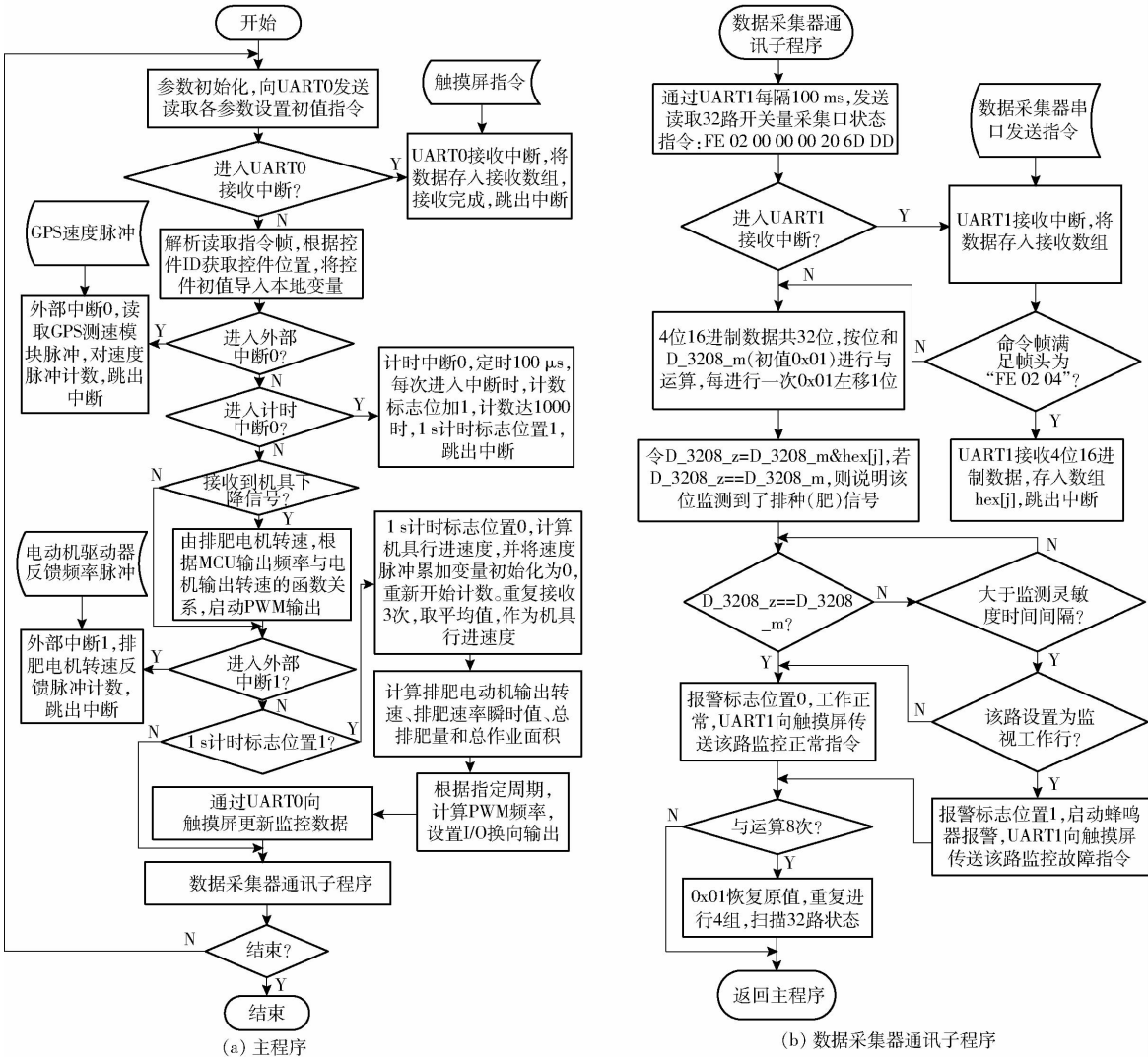


图 4 控制系统流程图
Fig. 4 Flow charts of control system

该路是否设定为工作状态,若为工作状态,则启动蜂鸣器报警,通过 UART1 向触摸屏发送该路故障指令。

2 试验平台搭建

2.1 施肥播种监测性能试验台

搭建施肥播种监测性能试验台,对系统监测性能进行试验,如图 5 所示。

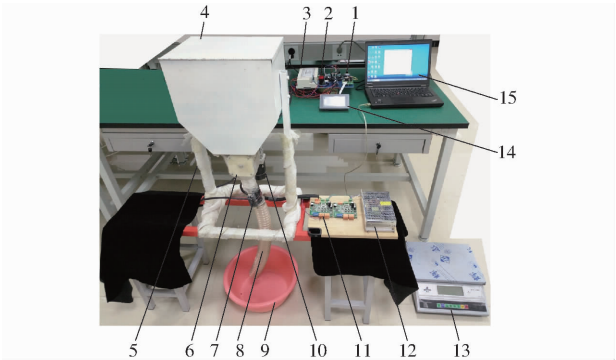


图 5 施肥播种监测试验台
Fig. 5 Diagram of test platform

1. 控制器 2. 报警灯 3. 数据采集器 4. 箱体 5. 支架 6. 外槽轮排种器(或排肥器) 7. 种肥监测传感器 8. 导管 9. 塑料容器 10. 电动机 11. 电动机驱动器 12. 开关电源 13. 称重仪 14. 触摸屏 15. PC 机

试验台利用开关电源(AC220V – DC12V)供电,由 PC 机 AQMDBLS 控制软件控制 AQMD3608BLS 型驱动器驱动电动机,从而实现外槽轮排种器或排肥器的转速控制。触摸屏用于参数设置和数据读取;系统控制器进行数据处理;报警灯用于工作状态报警;数据采集器用于采集种肥监测传感器的信号。种肥监测传感器安装于排种器或排肥器出口位置,下端连接直径为 44 mm 的导种管。直径为 0.3 m,高 0.15 m 的塑料容器用于收集从导管下落的物料。BT418/15B 型称重仪(2.5 g ~ 15 kg,精度 0.5 g)对下落的物料进行称量。

2.2 排肥量变化响应时间性能试验台

搭建排肥量变化响应时间性能试验台,如图 6 所示。将排肥箱升高,下侧布置传送带,排肥器排肥口距离传送带的高度为 0.5 m。排肥口处连接导肥管,导肥管出口处紧贴传送带表面。在导肥管出口位置设置长度约 0.3 m 的挡板,防止肥料外溅出传送带。传送带宽度为 0.15 m,总长度 4 m,可通过电动机驱动器进行转速的调节,传送带末端转轴上安装有转速码盘,通过 GS08A3 – 2 – Z/BX 型齿轮测速传感器进行测速。

控制器接收转速传感器信号并计算传送带转速,接收触摸屏指令获得设置排肥量,驱动电动机排

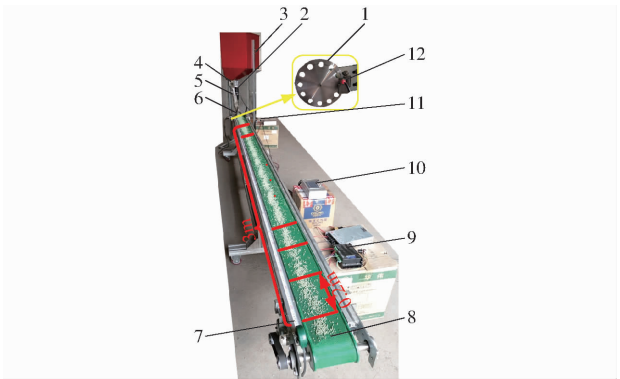


图 6 排肥量变化响应时间性能试验台
Fig. 6 Test platform of response time with different fertilizer rates

1. 测速码盘 2. 无刷电动机 3. 肥箱 4. 排肥器 5. 导肥管 6. 挡板 7. 测量尺 8. 传送带 9. 传送带电动机驱动器 10. 控制器 11. 排肥电动机驱动板 12. 齿轮测速传感器

肥。试验台通过控制器改变排肥量,利用传送带与排肥器的相对速度,模拟施肥机行进排肥过程。试验时,采集传送带上 3 m 范围内 0.2 m 间隔的肥量,记录传送带转动速度,计算排肥量变化随时间的响应关系。

3 试验与结果分析

3.1 监测灵敏度试验

监测灵敏度设置的时间长短直接影响排种、排肥监测的可靠性,时间过长,导致报警不及时,时间过短,导致误报警次数的增加。为了避免在特定落料流速下,因扫描周期短而导致误报警情况的发生,同时获得最短的响应时间,进行了系统监测灵敏度试验。

试验分别利用磷酸二胺颗粒肥(容积密度为 980 g/L)和小麦(容积密度为 796 g/L)在不同流速下进行试验,得出排肥速率为 10 686 g/min(转速 100 r/min)时,种肥监测传感器反馈频率最低,平均值为 2.5 Hz,方差为 1.4 Hz;排种速率为 6 087 g/min(转速 75 r/min)时,监测反馈频率最低,平均值为 2.4 Hz,方差为 1.7 Hz。为了避免误报警,同时获取最高的监测灵敏度,选择种肥监测传感器监测反馈频率最低时的槽轮转速作为试验设定转速,排肥时选定槽轮转速为 100 r/min,排种时选定排肥转速为 75 r/min,设定脉冲监测阈值为 1。通过触摸屏设定监测灵敏度时间,范围为 1 ~ 5 s,设定间隔 1 s,每组试验采样 100 次。对系统误报警次数进行记录,结果如表 1 所示。

由试验结果可得,监测灵敏度设定为 3 s 时,系统监测排肥的准确率达到 100%,监测排种的准确率为 99%。因此,设定脉冲监测阈值 1、监测灵敏度

表 1 监测灵敏度试验结果

Tab.1 Experiment results of monitoring sensitivity					
监测 灵敏度/s	采样数/ 次	肥料		小麦	
		误报警 数/次	准确 率/%	误报警 数/次	准确 率/%
1	100	2	98	19	81
2	100	1	99	6	94
3	100	0	100	1	99
4	100	0	100	0	100
5	100	0	100	0	100

3 s 为系统对排种、排肥可靠监测的设置参数。

3.2 单排肥器排肥量变化响应时间试验

排肥量变化响应时间直接影响精准变量施肥处方边界变化时变量实施效果,为了获得系统排肥量变化的响应时间关系,利用排肥量变化响应时间试验台(图 6)进行试验。试验时,传送带的行进速度设定为 2.88 km/h,通过控制器改变排肥量,在 0 ~ 11 500 g/min 范围内,以 575 g/min 为间隔依次进行试验,采集 3 m 内间隔 20 cm 的排肥量,则每次肥量收集的时间间隔为 0.25 s,记录各肥量及时间点,获得肥量变化随响应时间的结果,如图 7 所示。试验结果表明,在 0 ~ 11 500 g/min 的排肥量变化范围内,系统响应时间最大为 0.75 s,平均为 0.56 s,标准差为 0.18 s。

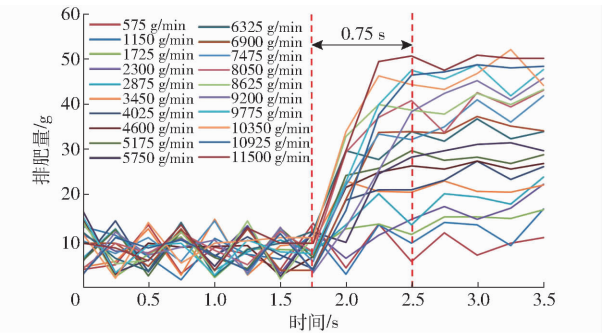


图 7 排肥量变化响应时间试验结果

Fig.7 Results of response times with different fertilizer rates

3.3 排肥量控制精度试验

为了验证系统的排肥量控制精度,以试验样机为平台,进行了排肥量控制精度试验。试验样机以 2BMGF-7/14 型免耕播种施肥机为平台,幅宽 220 cm,选用的 N-P₂O₅-K₂O 符合肥料容积密度为 920.3 g/L,单排肥器每转排肥量为 62.9 g/r。试验时,控制器设定施肥量范围为 450 ~ 750 kg/hm²,试验样机在 4 ~ 6 km/h 范围内匀速或随机速度行驶,于排肥铲出口处设置塑料袋收集肥料、称量,采样距离为 30 m,单次试验采样作业面积为 67.2 m²。

3.3.1 电动机转速控制曲线

电动机转速精度直接影响排肥量的控制精度。

电动机驱动器具有模拟量驱动和频率驱动两种方式,经试验测得,模拟量驱动方式具有更好的转速控制稳定性和线性度。由于 STC12C5A60S2 单片机无模拟量输出功能,系统采取改变控制器输出频率的方式,经 F/V 转换模块,控制电动机驱动器。为了获得电动机转速与频率的关系曲线,设置输出频率范围为 0 ~ 160 Hz,间隔 10 Hz,采集电动机输出转速,试验结果如图 8 所示。

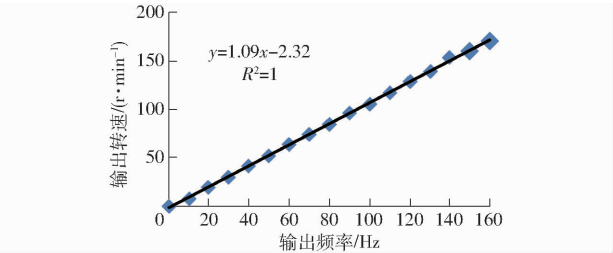


图 8 电动机转速控制曲线

Fig.8 Control curve of motor rotation speed

由试验可得,采用最小二乘法直线拟合, $R^2 = 1$,输出频率与转速具有良好的线性关系,确定了电动机输出转速与系统输出频率的计算关系。

3.3.2 测速标定试验

机具行进速度的获取精度对于系统排肥量控制精度影响较大。于河北省赵县农村合作社对 GPS 测速模块进行了测速标定试验,在机具行进速度 2.35 ~ 6.75 km/h 范围内,行进 30 m 过程的试验数据如表 2 所示。系统监测速度为 GPS 测速模块输出频率增加 36.1 Hz 时,机具行进速度增加 1 km/h 计算的速度;实际速度为机具行进 30 m 过程中的速度平均值;速度线性系数为实际速度与系统监测速度的比值。结果表明 GPS 测速线性系数平均值为 1.20,方差为 0.02,最终确定测速模块的线性系数为 1.20。

表 2 GPS 模块测速标定试验结果

Tab.2 Calibration experiment results of GPS speed module		
系统监测速度/ (km·h ⁻¹)	实际速度/ (km·h ⁻¹)	速度线性系数
2.00	2.35	1.17
1.72	2.08	1.21
3.87	4.70	1.21
5.62	6.75	1.20

3.3.3 排肥量控制精度试验

试验结果如表 3 所示,可得在设定施肥量为 450、600、750 kg/hm² 范围,4 ~ 6 km/h 匀速下,排肥量准确率平均值分别为 96.90%、94.72% 和 97.76%,方差分别为 2.79%、1.13% 和 1.14%。变车速下的排肥量准确率分别为 92.95%、96.79% 和

99.75%。系统在变行进速度的过程中,排肥量准确率平均值分别为 95.92%、95.24% 和 98.26%,方差分别为 3.01%、1.39% 和 1.36%。施肥量设定范围为 450~750 kg/hm²,总体排肥量准确率平均值为 96.47%,肥量控制效果较好,排肥量准确率大于 93%。在设定 600、750 kg/hm²的排肥量准确率中,变行进速度的准确率高于匀速时,可能是由于 GPS 测速模块在低速和较高速度下测量误差相互补偿造成的。

表 3 排肥量控制精度试验结果

Tab.3 Experiment results of accuracy of fertilization				
设定 施肥量/ (kg·hm ⁻²)	行进速度/ (km·h ⁻¹)	排肥量/ g	实际排肥 速率/ (kg·hm ⁻²)	排肥量 准确率/ %
450	4	14 670.0	466.8	96.27
	5	18 652.5	474.8	94.49
	6	21 223.5	450.2	99.95
	3.04~5.20	6 812.5	481.7	92.95
600	4	19 695.0	626.7	95.55
	5	24 705.0	628.9	95.19
	6	30 142.5	639.4	93.43
	2.88~6.95	8 757.5	619.2	96.79
750	4	24 367.5	775.4	96.62
	5	30 120.0	766.7	97.77
	6	35 745.0	758.3	98.90
	3.08~6.09	10 580.0	748.1	99.75

3.4 系统施肥量变化响应时间试验

以试验样机为平台,施肥量变化值为 75、150、225、300、375、450 kg/hm²,依次在播种施肥机行驶过程中进行手动施肥量输入,使施肥量变化差值依次等于上述施肥量变化值,依次分成 6 组进行试验,记录行进距离 30 m,采样间隔为 1 m,如图 9 所示。

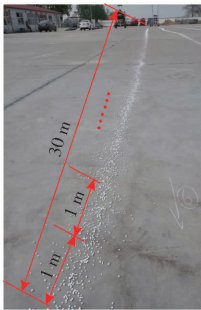


图 9 系统排肥量变化响应时间试验

Fig.9 Experiment of system response time with different fertilizer rates

通过采样间隔除以速度得到采样时间,由采样间隔内肥量变化分析得出施肥量变化过程中系统响应时间。对每个施肥量变化值重复记录 2 或 3 次响应时间,取平均值,试验结果如表 4 所示。

各施肥量变化值下,6 组总平均响应时间为

表 4 系统施肥量变化响应时间试验结果

Tab.4 Experiment results of system response time with different fertilizer rates

序号	施肥量的 变化量/ (kg·hm ⁻²)	平均响应 时间/s	平均速度/ (km·h ⁻¹)	平均反应 距离/m
1	75	0.96	3.75	1.00
2	150	1.26	3.80	1.34
3	225	0.95	3.80	1.00
4	300	0.95	3.80	1.00
5	375	0.96	3.75	1.00
6	450	1.42	3.80	1.51

1.08 s,标准差为 0.21 s;平均速度为 3.79 km/h 时,平均反应距离为 1.14 m,标准差为 0.22 m。结果表明施肥量变化与响应时间不存在明显的正相关性,说明电动机驱动变量排肥控制具有较稳定的响应时间。

3.5 田间试验

利用试验样机,于河北省赵县光辉农业机械服务专业合作社进行了大田试验(图 10)。设定施肥量为 450、600、750 kg/hm²,采集播种施肥机行进 30 m 内的排肥量,利用施肥总量减去剩余总量获得排肥量,测得排肥量准确率分别为 94.41%、92.61% 和 97.05%,系统排肥量准确率平均值为 94.69%,方差为 2.23%。表明系统在大田工作环境,仍能保持良好的排肥控制精度。进行了系统监测可靠性验证,设定监测灵敏度为 3 s,脉冲监测阈值为 1,系统采集 14 路排种、排肥过程中,人为堵塞任意 1 路,采样 100 次的试验中,系统报警准确率为 100%。

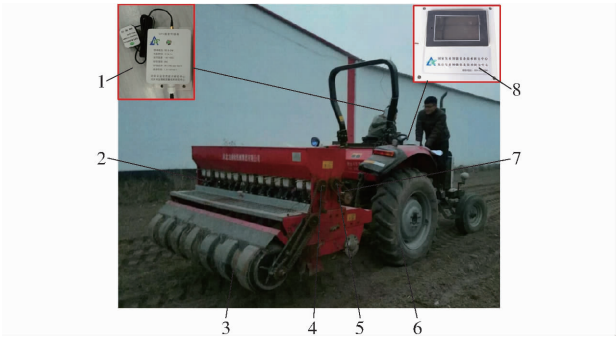


图 10 田间试验

Fig.10 Field experiment

1. GPS 测速模块 2. 种肥监测传感器 3. 压实轮 4. 排种轴
5. 排肥轴 6. 拖拉机 7. 排肥电动机 8. 控制器

4 结论

(1)设计了一种支持多路施肥播种状态监测的变量施肥机集成控制系统,该系统能够完成设定排肥量,根据机具行进速度改变排肥电动机转速,达到精量排肥;对多路施肥播种作业状态进行可视化监

测,并进行故障报警的功能。该系统能够满足对小麦播种施肥机、玉米追肥机等连续型播种监测、施肥监测和排肥量控制的要求。

(2)确定了单排肥器和整机两种情况下,采用电动机驱动排肥控制的系统肥量变化响应时间。试验结果表明,单排肥器排肥量变化 $0 \sim 11\,500\text{ g/min}$ 的范围内,系统响应时间最大为 0.75 s ,平均为 0.56 s ,标准差为 0.18 s ;在整机试验中,设定排肥量变化范围为 $75 \sim 450\text{ kg/hm}^2$,以 75 kg/hm^2 递增,平均响应时间最大为 1.42 s ,平均反应距离最大为 1.51 m (行

进速度 3.80 km/h)。

(3)试验结果表明,系统解决了多路连续性排种、施肥监测与精量排肥控制集成的问题。在改变行进速度的过程中,施肥量设定范围为 $450 \sim 750\text{ kg/hm}^2$,整机试验得系统总体排肥量准确率平均值为 96.47% ;田间试验得排肥量准确率平均值为 94.69% ,方差为 2.23% ,系统能够满足施肥精度要求;采用数据采集器对最多 32 路排肥监测,设定监测灵敏度为 3 s 时,小麦排种和施肥监测报警准确率达到 100% 。

参 考 文 献

- 1 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)
- 2 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/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7):53–58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150708&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.008.
WANG Jinwu, PAN Zhenwei, ZHOU Wenqi, et al. Design and test of SYJ-2 type liquid variable fertilizer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 53–58. (in Chinese)
- 3 汪小岳,陈满,孙国祥,等. 冬小麦变量施肥机控制系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015,31(增刊2): 88–92.
WANG Xiaochan, CHEN Man, SUN Guoxiang, et al. Design and test of control system on variable fertilizer applicator for winter wheat[J]. Transactions of the CSAE,2015, 31(Supp.2): 88–92. (in Chinese)
- 4 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)
- 5 MALEKI M R, RAMON H, DE BAERDEMAEKER J, et al. Study on the time response of a soil sensor-based variable rate granular fertiliser applicator[J]. Biosystems Engineering, 2008, 100(2): 160–166.
- 6 BACK S W, YU S H, KIM Y J, et al. An image-based application rate measurement system for a granular fertilizer applicator[J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(2): 679–687.
- 7 陈满,施印炎,汪小岳,等. 基于光谱探测的小麦精准追肥机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015,46(5):26–32. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150505&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.005.
CHEN Man, SHI Yinyan, WANG Xiaochan, et al. Design and experiment of variable rate fertilizer applicator based on crop canopy spectral reflectance[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 26–32. (in Chinese)
- 8 张辉,李树君,张小超,等. 变量施肥电液比例控制系统的设计与实现[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊2): 218–222.
ZHANG Hui, LI Shujun, ZHANG Xiaochao, et al. Development and performance of electro-hydraulic proportion control system of variable rate fertilizer[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp.2): 218–222. (in Chinese)
- 9 古玉雪,苑进,刘成良. 基于模糊系统的开度转速双变量施肥控制序列生成方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 134–139.
GU Yuxue, YUAN Jin, LIU Chengliang. FIS-based method to generate bivariate control parameters regulation sequence for fertilization[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 134–139. (in Chinese)
- 10 郎春玲,王金武,王金峰,等. 深施型液态肥变量施肥控制系统[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 43–47,62. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130209&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.009.
LANG Chunling, WANG Jinwu, WANG Jinfeng, et al. Variable fertilizer control system for deep-fertilization liquid fertilizer applicator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 43–47,62. (in Chinese)
- 11 付威,罗锡文,曾山,等. 水稻精量旱穴播机穴距电液比例控制系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015,31(9): 25–31.
FU Wei, LUO Xiwen, ZENG Shan, et al. Design and experiment of electro-hydraulic proportional control hill distance system of precision rice hill-drop drilling machine for dry land[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 25–31. (in Chinese)
- 12 杨宇,韩晓雷. 基于模糊免疫 PID 算法的变量施肥技术研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(10): 203–207.
YANG Yu, HAN Xiaolei. A variable fertilization control system base on fuzzy immune PID control algorithm[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(10): 203–207. (in Chinese)

- 13 杨程,臧英,周志艳,等. 基于 PID 算法的气力式施肥机变量施肥控制系统设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(3): 320–327.
YANG Cheng, ZANG Ying, ZHOU Zhiyan, et al. Design and test of pneumatic fertilizer applicator variable ratio fertilization control system based on PID algorithm[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2017, 48(3): 320–327. (in Chinese)
- 14 李洋,尚书旗,高波,等. 具有电动变量施肥功能的马铃薯中耕机设计与试验[J]. 农业工程, 2017, 7(5): 109–112.
LI Yang, SHANG Shuqi, GAO Bo, et al. Design and experiment of potato cultivator with electrokinetic variable fertilization function[J]. Agricultural Engineering, 2017, 7(5): 109–112. (in Chinese)
- 15 齐兴源,周志艳,杨程,等. 稻田气力式变量施肥机关键部件的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 20–26,316.
QI Xingyuan, ZHOU Zhiyan, YANG Cheng, et al. Design and experiment of key parts of pneumatic variable-rate fertilizer applicator for rice production[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 20–26,316. (in Chinese)
- 16 颜丙新,张东兴,崔涛,等. 排种盘和负压腔室同步旋转气吸式玉米精量排种器设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 15–23.
YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, CUI Tao, et al. Design of pneumatic maize precision seed-metering device with synchronous rotating seed plate and vacuum chamber[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 15–23. (in Chinese)
- 17 孟志军,赵春江,付卫强,等. 变量施肥处方图识别与位置滞后修正方法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 204–209.
MENG Zhijun, ZHAO Chunjiang, FU Weiqiang, et al. Prescription map identification and position lag calibration method for variable rate application of fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 204–209. (in Chinese)
- 18 NORDMEYER H. Patchy weed distribution and site-specific weed control in winter cereals[J]. Precision Agriculture, 2006, 7(3): 219–231.
- 19 史智兴,高焕文. 排种监测传感器的试验研究[J]. 农业机械学报, 2002, 33(2): 41–43,52.
SHI Zhixing, GAO Huanwen. RLD optoelectronic sensor for seeding monitoring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(2): 41–43,52. (in Chinese)
- 20 黄东岩,贾洪雷,祁悦,等. 基于聚偏二氟乙烯压电薄膜的播种机排种监测系统[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 15–22.
HUANG Dongyan, JIA Honglei, QI Yue, et al. Seeding monitor system for planter based on polyvinylidene fluoride piezoelectric film[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(23): 15–22. (in Chinese)
- 21 苑严伟,张小超,吴才聪,等. 玉米免耕播种施肥机精准作业监控系统[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 222–226.
YUAN Yanwei, ZHANG Xiaochao, WU Caicong, et al. Precision control system of no-till corn planter[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 222–226. (in Chinese)
- 22 周利明,苑严伟,董鑫. 基于 RS485 总线的条播机种肥监测系统[J]. 农机化研究, 2014, 36(6): 189–192.
ZHOU Liming, YUAN Yanwei, DONG Xin. The monitoring system of the drill based on RS485 bus[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(6): 189–192. (in Chinese)
- 23 孙传祝,王法明,李学强,等. 马铃薯精密播种机智能控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 36–44.
SUN Chuazhu, WANG Faming, LI Xueqiang, et al. Design of intelligent control system of potato precision planter[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(18): 36–44. (in Chinese)
- 24 施印炎,陈满,汪小岳,等. 稻麦精准变量施肥机排肥性能分析与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 97–103.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170712&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.012.
SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Analysis and experiment of fertilizing performance for precision fertilizer applicator in rice and wheat fields[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 97–103. (in Chinese)