

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.010

基于增量式PID算法的多种固体肥精确施控系统研究

张继成<sup>1</sup> 严士超<sup>1</sup> 纪文义<sup>2</sup> 朱宝国<sup>3</sup> 郑萍<sup>1</sup>

(1. 东北农业大学电气与信息学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030;  
3. 黑龙江农业科学研究院佳木斯分院, 佳木斯 154007)

**摘要:** 为了实现变量施肥过程中多种固体肥的实时自动配比、提高施肥控制系统的排肥量控制准确率,采用增量式PID闭环控制算法设计基于测土配方的多种固体肥精确施肥控制系统及与之配套的施肥装置,实现了氮、磷、钾3种固体肥的适时快速响应和实时精量施入。施肥控制系统主要包括主-从控制器模块、处方图模块、北斗卫星定位模块、测速模块、人机交互模块、施控电机模块和施肥量监测模块等。主控制器主要完成人机交互指令接收、北斗卫星定位信息获取、处方图施肥量查询、车速和施控电机的工作状态监测、从控制器工作指令下达等任务,人机交互模块实现主控制器和手机APP的通信;从控制器主要实现主控制器指令接收和施控电机工作控制。根据播种环节普遍采用中小型播种机的实际情况,模拟播种施肥机具行进速度为3.5~6.5 km/h,进行了实验室单一肥料排肥试验,试验表明,控制系统最大响应时间1.85 s,平均响应时间1.45 s。在设定施肥量50、100、200、300 kg/hm<sup>2</sup>下,模拟行进速度为4、5、6 km/h时,控制系统的排肥量准确率达97.16%,监测准确率98.56%。进行了田间试验,制作了哈尔滨市双城区东海村测土配方施肥的处方图,在车速为4、5、6 km/h时,尿素、磷酸二铵、硫酸钾的排肥量准确率分别达97.22%、98.60%和97.73%,满足精确施肥系统的施肥精度要求。

**关键词:** 变量施肥; 施肥控制系统; 人机交互APP; 增量式PID控制算法

中图分类号: S147.2; TP273      文献标识码: A      文章编号: 1000-1298(2021)03-0099-08      OSID: 

Precision Fertilization Control System Research for Solid Fertilizers  
Based on Incremental PID Control Algorithm

ZHANG Jicheng<sup>1</sup> YAN Shichao<sup>1</sup> JI Wenyi<sup>2</sup> ZHU Baoguo<sup>3</sup> ZHENG Ping<sup>1</sup>  
(1. College of Electrical and Information, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China  
2. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China  
3. Jiamusi Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Jiamusi 154007, China)

**Abstract:** Aiming to realize the real-time automatic proportioning of various solid fertilizers in the process of variable rate fertilization and improve the accuracy of the fertilization control system, a variable solid-fertilizer closed-loop fertilization control system and corresponding fertilizer apparatus based on the prescription map was designed for nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) fertilizers by using increment PID control algorithm. The system mainly included master-slave controllers, prescription map, Beidou positioning module, speed measuring module, human-machinery interface, electric fertilization motors and fertilization monitoring modules. The function of master controller was as follows: receiving the instructions from human-machinery interface, positioning data acquiring from Beidou module, measuring vehicle speed by Hall sensor module, reading theoretical fertilization amount from prescription map, monitoring the working status of electric fertilization motors, and sending the fertilization instructions to slave controller. Human-machinery interface was used to set or read the operation parameters between master controller and mobile APP. The slave controller received and delivered fertilization motors instructions. According to the fact that small and medium-sized seeders were widely used in field production in China, the laboratory experiments were carried out with the speeds of

收稿日期: 2020-11-04 修回日期: 2020-12-10  
基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(LH2020E002)、黑龙江省博士后基金项目(LBH-Q18013)和国家重点研发计划项目(2018YFD0201001)  
作者简介: 张继成(1980—),男,高级工程师,博士,主要从事农用装备自动化控制技术研究,E-mail: zhangjicheng@neau.edu.cn  
通信作者: 郑萍(1980—),女,副教授,博士,主要从事农业电气化与自动化研究,E-mail: zhengping@neau.edu.cn

fertilization applicator setting in the range of 3.5 km/h to 6.5 km/h, and the maximum and the mean response time of the control system was obtained of 1.85 s and 1.45 s, respectively. When the fertilization rates were set as 50 kg/hm<sup>2</sup>, 100 kg/hm<sup>2</sup>, 200 kg/hm<sup>2</sup> and 300 kg/hm<sup>2</sup> at vehicle speeds of 4 km/h, 5 km/h, and 6 km/h, the accuracy of control and monitoring were more than 97.16% and 98.56%, respectively. In the field experiment in Donghai Village, Shuangcheng District, Harbin, China, with vehicle speeds of 4 km/h, 5 km/h, 6 km/h, the application accuracy of urea, diammonium phosphate and potassium chloride based on a soil prescription map were more than 97.22%, 98.60% and 97.73%, respectively, which met the requirement of precision fertilization system.

**Key words:** variable rate fertilization; fertilization control system; human-machinery interface APP; incremental PID control algorithm

## 0 引言

精准施肥是精准农业体系的重要组成部分,是解决化肥投入不合理、肥料平均利用率低和农业生态环境污染的有效途径之一<sup>[1-4]</sup>。精准施肥技术又称自动变量施肥技术,即根据目标作物的需肥种类及用量,综合运用全球定位技术、地理信息技术、遥感技术、自动化控制技术等,实现在每一操作单元上因土因作物而全面平衡施肥,从而合理使用化肥,降低生产成本,减少环境污染,提高肥料利用率和施肥经济效益<sup>[5-6]</sup>。

近年来,国内学者研发了多种变量施肥装备及变量施肥控制系统,在排肥方式、处方图读取、排肥监测、控制器管理模式等方面进行了深入探索<sup>[7-8]</sup>。

我国施肥机一般采用外槽轮式排肥器,主要有单变量排肥、双变量排肥<sup>[9-10]</sup>以及氮、磷、钾肥料混配排肥<sup>[7]</sup>方式。其中,单变量施肥方式(即通过控制排肥轴转速来控制排肥量)结构简单、控制容易,已被广泛使用。文献[11]研究的系统采用一个排肥电动机带动多路排肥器转动,无法分别调节每个排肥器的排肥速度,排肥可调度小。同时,这种变量施肥装备和施肥控制系统只能在一个区域施用单质肥料或是复合肥料<sup>[11]</sup>。双变量施肥控制系统是一种通过调节排肥口开度和施肥轴转速来控制施肥量的解决方案,如刘成良等<sup>[12]</sup>开发的基于 ARM 和 DSP 的双变量施肥控制系统,增加了变量控制的灵活性和扩展性,但也存在只能施入单一肥料和复合肥的局限性。氮、磷、钾 3 种肥料电动配比的变量施肥控制系统是利用全球定位技术、测速技术等,依据处方图施肥量,采用独立电机代替地轮链传动控制排肥器工作,以氮、磷、钾肥为对象进行自动配比,从而达到精确施肥的目的。文献[9, 13-14]在多种肥料的控制系统和排肥结构等方面进行了试验和研究,改变了传统不合理的均匀施肥或单一施肥方式,实现了多种化肥的不同比例混配,具有较强的实用性和推广价值。

处方图是保证施肥机按需施肥的关键。孟志军等<sup>[15-16]</sup>和张继成<sup>[7]</sup>分别设计了固态肥和液态肥的变量施肥控制系统。还有一些学者研究了采用光谱探测<sup>[17]</sup>、图像处理<sup>[18]</sup>及土壤传感器<sup>[19]</sup>等实时获取施肥决策的方法<sup>[20]</sup>,从而控制施肥机进行施肥。排肥精度是检验变量施肥机工作性能的重要指标,一般采用闭环 PID 控制算法进行施肥量调节。文献[21-23]在施肥控制系统中采用 PID 控制算法,提高了施肥精度和施肥均匀性,取得了良好的调控效果。

针对以上研究现状和存在问题,本文设计一种基于处方图读取的变量施肥控制和监测系统,该系统采用增量式 PID 闭环控制算法进行施肥电机调节,提高氮、磷、钾 3 种肥料的快速自动配比和实时混合施入水平,以保证施肥量的准确性。

## 1 系统设计

### 1.1 系统总体设计

基于处方图的固体肥精确施用控制系统(以下简称施控系统),主要由施肥控制器、处方图存储器、3 组施控电机、外槽轮式排肥器、测速模块、北斗卫星定位模块<sup>[24]</sup>、人机交互模块和排肥量监测模块组成,如图 1 所示。其中,施肥控制器实现精确施肥和排肥作业监测等功能的集成控制;人机交互模块可设定播种作物种类、行间距、施肥量等作业参数,并实时显示系统各作业模块的状态信息;处方图存储器存储作业地块坐标数据和相应的理论施肥量;北斗卫星定位模块安装于施肥机顶端,实时获取机具所在的地理坐标;测速传感器安装在机具从动轮上,实时获得机具行进的移动数据信息;3 组施控电机通过链轮分别连接氮、磷、钾肥 3 个肥箱的排肥轴,驱动排肥装置运行实现排肥;排肥量监测传感器安装在驱动电机主轴上,通过监测电机主轴转速,计算排肥速度和排肥量。

随着作业机具前进,施肥控制器根据人机交互界面设置的作业信息、处方图数据和机具行进速度,

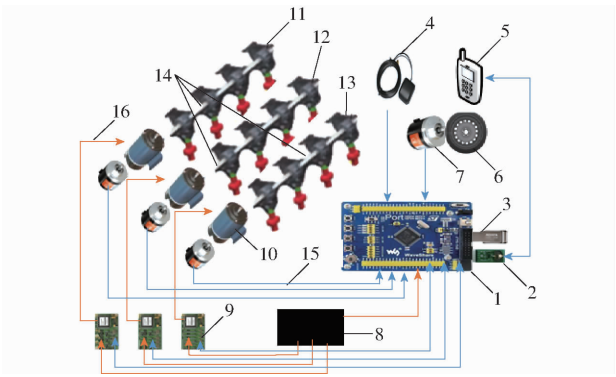


图 1 系统结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of control system

1. 主控制器 2. 蓝牙模块 3. 处方图存储器 4. 北斗卫星模块  
5. 手机 APP 6. 车轮 7. 测速传感器 8. 车载蓄电池 9. 从控制器 10. 施控电机 11. 氮肥肥箱 12. 磷肥肥箱 13. 钾肥肥箱 14. 排肥轴 15. 数据传输线 16. 电源线

生成控制电压传送至施控电机，施控电机控制氮、磷、钾 3 组施肥装置转动排肥，排肥量监测模块实时采集各个排肥轴的转动信息，并将采集到的数据实时反馈给施肥控制器，施肥控制器通过增量式 PID 闭环控制算法，适时调整传送给施控电机的控制电压，实现精确控制施肥量。

1.2 硬件设计

设计的施控系统结构框图如图 2 所示。主控制器以 STM32F407 为核心，采用 CAN 总线通讯协议，建立施控平台；作业地块的坐标数据和相对应的理论施肥量信息存储在移动存储器中；人机交互采用 ATK-HC05-V13 (ALIENTEK) 蓝牙模块和手机配套 APP 交互软件，建立主施控系统 with 手机 APP 交互软件，通过手机 APP 端在作业前设定播种的种类、间距、施肥量等信息，同时施肥作业状态信息通过蓝牙通讯实时显示在 APP 上；定位模块采用带差分的、追踪灵敏度高达 -165 dBm 的 ATK-

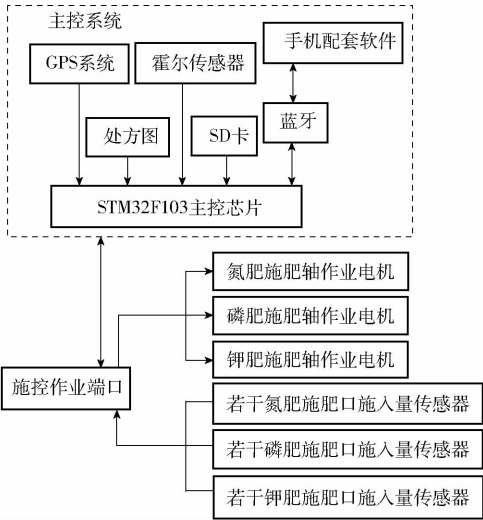


图 2 施控系统结构框图

Fig. 2 Structural diagram of control system

S1216F8-BD GPS/北斗模块 (ALIENTEK)，其测量输出频率最高可达 20 Hz，安装于施肥机顶端；通过安装在施肥机从动轮上和各行排肥器转轴上的霍尔测速传感器和编码器 E38S6G5-100B-G24N (壹贰 (捌) 电子科技有限公司) 实现对施肥机行进速度、实时施肥量的检测；通过在排肥口处安装光电对管实现对施肥状态的监测 (堵塞、排空)；从控制器以 STM32F103 为核心，通过 CAN 总线接收主控制器指令，通过调节 PWM 占空比来调节 12-100-45R 型 (Mitsubishi) 施控电机的转速。

1.3 测速模块

机具的作业速度是影响施肥精度的一个重要因素。霍尔传感器在保证测量精度的同时，具有较强的抗干扰性，工作性能稳定可靠，受温度、灰尘等环境因素影响较小<sup>[25]</sup>，作业时，霍尔传感器产生的脉冲信号会传输至主控制器，主控制器计算出机具的行进速度

$$v = \frac{N}{Z} \frac{\pi D(1 + \sigma)}{T} \quad (1)$$

- 式中  $v$ ——机具行进速度，m/s  
 $Z$ ——霍尔传感器每圈测速脉冲信号数量  
 $T$ ——测速周期，s  
 $N$ —— $T$  时间内的脉冲数  
 $D$ ——测速轮直径，m  
 $\sigma$ ——滑移率，一般情况下取 0.05 ~ 0.12

1.4 施控机构驱动系统设计

步进电机、电控液压马达和直流电机是电控精量施肥采用的驱动方式。步进电机具有控制精度高、转速调节速度快等优点，但控制器设计相对复杂，成本高；电控液压马达系统结构复杂，是电子控制技术、机械技术、液压技术三者相结合的控制技术，造价高，需要作业机具具有独立的液压系统；直流电机结构简单、供电电压可以与机车蓄电池直接匹配，而且具有控制方式简单、体积小、功耗低等优点；结合本研究的精量施固体肥的施肥特点及应用成本，选用直流有刷电机作为施控电机，驱动排肥器实现排肥作业。

排肥系统闭环控制系统是由排肥控制器、排肥电机驱动器、排肥电机及电机减速机、排肥轴、排肥器、转速传感器组成，如图 3 所示。

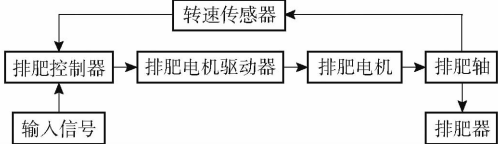


图 3 排肥系统闭环控制系统

Fig. 3 Close-loop control system of fertilization system

施控机构驱动系统工作原理如下：在施肥作业

时,主控制器根据北斗卫星定位系统所确定的经纬度坐标查询处方图,将得到的地块施肥量信息与实时车速信息、实际排肥量检测信息等数据进行运算,计算出施控电机所应达到的施肥转速数据,下传至从控制器,从控制器接收主控制器的施控电机转速数据后,将电机转速数据转化为相应控制电机转速的 PWM 占空比电压,从而调节排肥电机转速,控制施肥量<sup>[26]</sup>。

一段时间内,同种肥料的排肥总量计算公式为

$$Q = 0.06pt \sum_{i=1}^m n_i = 0.36vwqt \quad (2)$$

式中  $Q$ ——排肥总量,kg

$t$ ——施肥机工作时间,h

$n_i$ ——每个排肥电机输出转速,r/min

$w$ ——机具作业幅宽,m

$q$ ——施肥量设定值,kg/hm<sup>2</sup>

$p$ ——排肥器每转排肥量,g/r

$m$ ——工作的同种肥料排肥器个数,个

### 1.5 增量式 PID 闭环控制算法

为了提高变量施肥控制系统的排肥精度,在电机上加装转速传感器,实时监测电机转速,运用增量式 PID 闭环控制算法实现施控装置的闭环控制。某地块某时刻理论排肥量和实际排肥量构成了控制偏差,即

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (3)$$

式中  $r(t)$ ——理论排肥量,kg

$y(t)$ ——实际排肥量,kg

$e(t)$ ——控制偏差,kg

$e(t)$ 作为 PID 控制器的输入, $u(t)$ 作为 PID 控制器的输出和被控对象的输入信号。模拟 PID 控制器的控制规律为

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) + u_0 \quad (4)$$

式中  $K_p$ ——比例系数

$T_i$ ——积分时间常数

$T_d$ ——微分时间常数

$u_0$ ——控制常量

增量式 PID 控制算法,需要计算控制量的增量  $\Delta u_k$ 。由

$$u_k = K_p \left[ e_k + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e_j + \frac{T_d}{T} (e_k - e_{k-1}) \right] + u_0 \quad (5)$$

可得控制器在第  $k-1$  个采样时刻的输出值为

$$u_{k-1} = K_p \left[ e_{k-1} + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^{k-1} e_j + \frac{T_d}{T} (e_{k-1} - e_{k-2}) \right] + u_0 \quad (6)$$

得到增量式 PID 控制算法公式为

$$\begin{aligned} \Delta u_k &= u_k - u_{k-1} = \\ K_p \left[ e_k - e_{k-1} + \frac{T}{T_i} e_k + \frac{T_d}{T} (e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}) \right] &= \\ K_p \left( 1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right) e_k - K_p \left( 1 + \frac{2T_d}{T} \right) e_{k-1} + K_p \frac{2T_d}{T} e_{k-2} &= \\ Ae_k + Be_{k-1} + Ce_{k-2} \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可以看出,控制系统如果采用恒定的采样周期  $T$ ,一旦确定系数  $A$ 、 $B$ 、 $C$ ,只要用前后 3 次测量值的偏差,就可以求出控制增量。增量式 PID 控制算法流程图如图 4 所示(图中  $\varepsilon$  为误差阈值)。

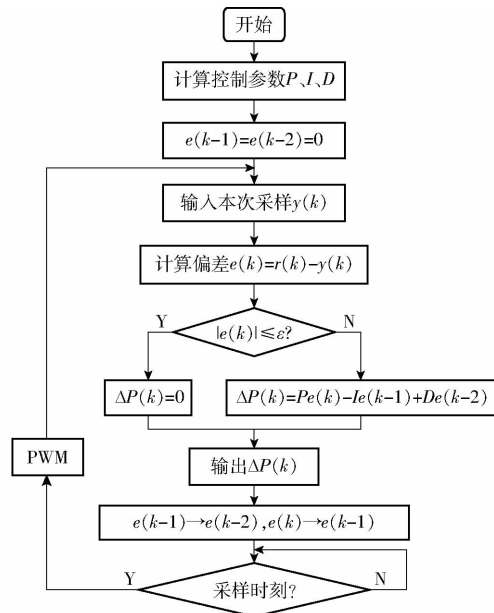


图 4 增量式 PID 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of incremental PID algorithm

### 1.6 施控系统工作流程

系统启动后,程序初始化参数,主控芯片与人机交互模块通讯,读取初始控制指令,并通过对应的协议解析获得各个施控参数值;定位模块加电启动,将作业机具的实时位置数据传输至主控制器;霍尔传感器将检测到的车轮转动脉冲信号传输至主控制器,主控制器计算作业机具行进车速(式(1));主控制器通过接收到的定位信息查询处方图中的施肥量,并结合接收到的作业机具行进速度和实实施肥量反馈数据计算此时施控电机的理论转速数据(式(2))下传给从控制器,从控制器根据指令调节 PWM 占空比调整施控电机的转速,实现精量施肥作业,如此往复进行。控制系统流程如图 5 所示。

## 2 试验与结果分析

### 2.1 单一排肥器排肥速率测量试验

于 2019 年 3 月 2 日在东北农业大学工程研究中心进行排肥器排肥速率测量试验。试验选用的

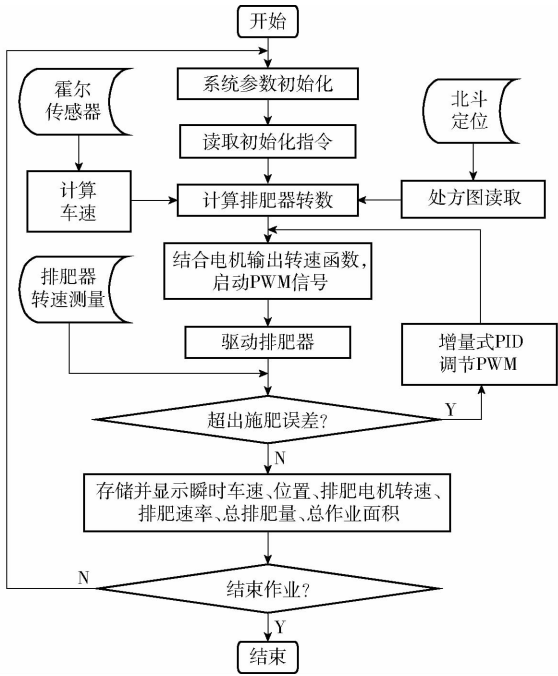


图 5 控制系统流程图

Fig.5 Flow chart of control system

氮、磷、钾肥料分别为中国石油天然气股份有限公司昆仑牌尿素、中海石油化学股份有限公司翔燕牌锌腐酸磷酸二铵、米高化工(长春)有限公司布兰德农业用硫酸钾。试验通过控制器控制排肥器排肥轴转动,以排肥轴转动 50 圈排出的肥料量除以检测脉冲数作为排肥速率,重复 3 次,取平均值。测得试验用外槽轮式排肥器在全开情况下,尿素、磷酸二铵、硫酸钾 3 种固体肥的排肥速率分别为 31.82、40.76、73.89 g/r(如图 6 所示)。



图 6 单一排肥器排肥量监测试验

Fig.6 Monitoring test of single fertilization amount

在实验室,搭建单一固体肥料的施肥控制和监测系统试验台,对系统排肥精度和响应时间等性能进行试验(图 7、8)。

2.2 试验准备

在田间试验前,由黑龙江省农业科学院佳木斯分院的工作人员完成测土工作,于 2019 年 4 月对黑龙江省哈尔滨市双城区东海村的 8 个地块进行土壤采样,土壤样本送检至河南广电计量检测有限公司,取得土壤检测报告后,以大豆产量 3 000 kg/hm<sup>2</sup> 为

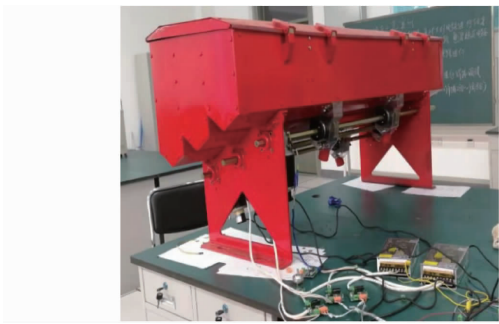


图 7 肥箱实物图

Fig.7 Photo of fertilizer box

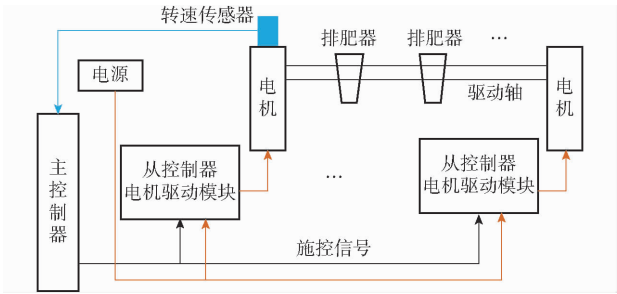


图 8 单一肥多电机同轴驱动多排肥器结构示意图

Fig.8 Schematic of system of multi-motor coaxial control multi-fertilizer apparatus for single fertilizer

目标,应用黑龙江省农业科学院佳木斯分院自主开发的测土配方施肥系统 TRPFV1.0(软件登记号:2014SR030165)对土壤基础肥力数据进行优化施肥分析,并出具测土配方指导施肥量报告,尿素、磷酸二铵、硫酸钾的指导施肥量数据如表 1 所示。图 9 为固体肥精量施控系统样机,图 10 为施控系统主、从控制器实物图。

表 1 测土配方施肥量

Tab.1 Soil testing and recommendation fertilizer

| 地块标识 | amount |      |     | kg/hm <sup>2</sup> |
|------|--------|------|-----|--------------------|
|      | 尿素     | 磷酸二铵 | 硫酸钾 |                    |
| 1    | 40     | 140  | 70  |                    |
| 2    | 30     | 142  | 84  |                    |
| 3    | 35     | 137  | 86  |                    |
| 4    | 25     | 160  | 85  |                    |
| 5    | 31     | 160  | 88  |                    |
| 6    | 30     | 158  | 70  |                    |
| 7    | 31     | 165  | 87  |                    |
| 8    | 30     | 162  | 87  |                    |

2.3 试验结果

2.3.1 排肥精度试验

2.3.1.1 单排肥器排肥量变化响应试验

排肥量变化响应时间直接影响到施肥机启动和施肥量发生改变时的施肥效果。为了获得系统排肥量变化响应时间关系,利用试验台进行室内排肥量



图 9 试验样机  
Fig. 9 Test prototype



图 10 主、从控制系统实物图  
Fig. 10 Photo of master-slave control system

变化试验。试验时,以排肥量监测值作为实际排肥量,以 1 000 g/min 递增进行试验,在 0 ~ 5 000 g/min (0 ~ 83.3 g/s) 范围内,记录各阶段肥量,获得的肥量变化如图 11 所示。试验表明,系统响应时间最大为 1.85 s,平均为 1.45 s。以播种施肥机具行进速度范围为 3.5 ~ 6.5 km/h 计算,在系统响应时间内的机具平均行进距离为 1.41 ~ 2.62 m。

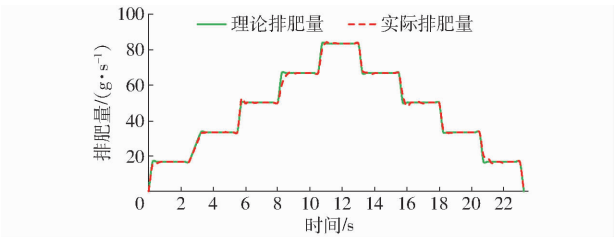


图 11 控制系统响应图  
Fig. 11 Response diagram of control system

2.3.1.2 单排肥器排肥精度试验

实验室单一排肥试验使用氯化钾,设定施肥量为 50、100、200、300 kg/hm<sup>2</sup>,模拟机具在 4、5、6 km/h 下匀速行驶。设计利用施肥总量减去剩余总量获得排肥量,计算排肥量准确率;利用传感器转速和单转排肥量,计算监测排肥速率,从而验证监测系统准确率。排肥精度和监测准确率试验结果如表 2 所示。由试验结果可得,随着机具行进速度的提高,施肥控制系统的排肥量精确度和监测准确率无明显波动,排肥量准确率达 97.16%,监测准确率为 98.56%。

表 2 排肥精度和监测准确率试验结果

Tab. 2 Experiment results of accuracy of fertilization

| 设定<br>施肥量/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 行进<br>速度/<br>(km·h <sup>-1</sup> ) | 实际排肥<br>量/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 排肥量<br>准确率/<br>% | 监测排肥<br>量/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 监测<br>准确率/<br>% |
|--------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------|--------------------------------------|-----------------|
| 50                                   | 4                                  | 51.42                                | 97.16            | 50.68                                | 98.56           |
|                                      | 5                                  | 51.49                                | 97.02            | 51.03                                | 99.11           |
|                                      | 6                                  | 51.45                                | 97.10            | 50.88                                | 98.89           |
| 100                                  | 4                                  | 102.11                               | 97.89            | 100.09                               | 98.02           |
|                                      | 5                                  | 102.19                               | 97.81            | 101.89                               | 99.71           |
|                                      | 6                                  | 102.21                               | 97.79            | 101.82                               | 99.62           |
| 200                                  | 4                                  | 202.14                               | 98.93            | 200.27                               | 99.07           |
|                                      | 5                                  | 203.78                               | 98.11            | 200.85                               | 98.56           |
|                                      | 6                                  | 202.75                               | 98.63            | 200.89                               | 99.08           |
| 300                                  | 4                                  | 304.19                               | 98.60            | 301.93                               | 99.26           |
|                                      | 5                                  | 305.56                               | 98.15            | 302.42                               | 98.97           |
|                                      | 6                                  | 305.91                               | 98.03            | 302.12                               | 98.76           |

2.3.2 田间试验

2.3.2.1 定位精度试验

为了测试定位系统在施肥机行进过程中的精度和稳定性,在农场内画半径为 5 m 的圆,施肥机分别以速度 4、5、6 km/h 沿着圆匀速运动,每个速度重复试验 3 次,并记录定位数据。表 3 为定位测试数据计算的平均半径与真实半径的误差。表明定位系统精度能够达到亚米级,动态符合程度高,可以为施肥机械提供高精度定位数据。

表 3 定位精度试验结果

Tab. 3 Experimental results of positioning module

| 行进速度/<br>(km·h <sup>-1</sup> ) | 最大半径/<br>m | 最小半径/<br>m | 平均半径/<br>m | 误差/<br>m |
|--------------------------------|------------|------------|------------|----------|
| 4                              | 5.20       | 4.85       | 5.10       | 0.10     |
| 5                              | 5.24       | 4.84       | 5.12       | 0.12     |
| 6                              | 5.25       | 4.80       | 5.15       | 0.15     |

2.3.2.2 测速试验

施肥机精准测速,关系到施控系统排肥量计算和控制精度。测速试验在双城区东海村的大豆试验田中进行,施肥机在 3.5 ~ 6.5 km/h 范围内保持匀速行驶,记录施肥机通过标定区间(100 m)的行驶时间。以行驶距离与行驶时间的比值作为实际速度,并通过式(1)计算滑移率。经过反复试验,研究选取施肥机行进速度的 5% 作为机具行进的滑移率;试验过程中通过式(1)计算监测速度,结果如表 4 所示。试验中测速精度都在 98% 以上,使用霍尔传感器能够满足变量施肥试验的工作需求。

2.3.2.3 多排肥器排肥量控制准确率试验

在田间作业时,施肥机具分别在 3、4、5 号地内,以速度 4、5、6 km/h 行进,依据指导施肥量(表 1),

表 4 霍尔传感器测速试验结果

Tab.4 Speed test of Hall sensor

| 实际速度/(km·h <sup>-1</sup> ) | 监测速度/(km·h <sup>-1</sup> ) | 准确率/% |
|----------------------------|----------------------------|-------|
| 3.6                        | 3.64                       | 98.89 |
| 4.1                        | 4.15                       | 98.78 |
| 4.5                        | 4.59                       | 98.00 |
| 5.1                        | 5.02                       | 98.42 |
| 5.6                        | 5.71                       | 98.04 |
| 6.0                        | 5.92                       | 98.67 |
| 6.5                        | 6.43                       | 98.92 |

表 5 控制系统田间作业试验结果

Tab.5 Field experiment results of control system

| 行进速度/<br>(km·h <sup>-1</sup> ) | 尿素                     |                        |       | 磷酸二铵                   |                        |       | 硫酸钾                    |                        |       |
|--------------------------------|------------------------|------------------------|-------|------------------------|------------------------|-------|------------------------|------------------------|-------|
|                                | 理论值/                   | 监测值/                   | 准确率/  | 理论值/                   | 监测值/                   | 准确率/  | 理论值/                   | 监测值/                   | 准确率/  |
|                                | (kg·hm <sup>-2</sup> ) | (kg·hm <sup>-2</sup> ) | %     | (kg·hm <sup>-2</sup> ) | (kg·hm <sup>-2</sup> ) | %     | (kg·hm <sup>-2</sup> ) | (kg·hm <sup>-2</sup> ) | %     |
| 4                              | 19                     | 19.3                   | 98.42 | 159                    | 160.8                  | 98.87 | 89                     | 90.5                   | 98.31 |
| 5                              | 18                     | 18.3                   | 98.33 | 158                    | 159.8                  | 98.86 | 88                     | 89.6                   | 98.18 |
| 6                              | 18                     | 18.5                   | 97.22 | 158                    | 159.9                  | 98.80 | 84                     | 85.9                   | 97.73 |

3 结论

(1)采用增量式 PID 闭环控制算法设计了一种基于处方图读取的精量施肥控制系统,系统主要包括主-从控制器模块、处方图模块、北斗卫星定位模块、霍尔测速模块、人机交互模块、施控电机和施肥量监测模块,实现了氮、磷、钾 3 种固体肥料的适时快速配比和实时精量施入。

(2)在实验室单一肥料排肥试验中,模拟播种施肥机具行进速度在 3.5 ~ 6.5 km/h 范围内时,控

变量施入尿素、磷酸二铵和硫酸钾,施肥准确率分别达到 97.22%、98.80% 和 97.73% (表 5)。表明系统在大田工作环境仍能保持良好的排肥量准确率。需要指出由于施肥机具行进速度增加,在相同的控制系统响应时间下,施肥机具行进距离增加,导致排肥量准确率略有降低。

制系统最大响应时间 1.85 s,平均响应时间 1.45 s;在设定施肥量 50、100、200、300 kg/hm<sup>2</sup>下,模拟行进速度 4、5、6 km/h 时,控制系统的排肥量准确率达 97.16%,监测准确率为 98.56%。

(3)在田间试验中,制作了哈尔滨市双城区东海村测土配方施肥的处方图,在车速 4、5、6 km/h 时,尿素、磷酸二铵、硫酸钾的排肥量准确率分别达到 97.22%、98.60%、97.73%,满足精确施肥系统的施肥精度要求。

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. 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. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150708&journal\\_id=jcsam](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. (in Chinese)

[3] 卢彩云, 付卫强, 赵春江, 等. 小麦播种实时监控系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 40 – 48. 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): 40 – 48. (in Chinese)

[4] 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)

[5] 耿向宇, 李彦明, 苗玉彬, 等. 基于 GPRS 的变量施肥机系统研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 174 – 177. GENG Xiangyu, LI Yanming, MIAO Yubin, et al. Development of variable rate fertilizer applicator based on GPRS[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 174 – 177. (in Chinese)

[6] 苏伟, 聂宜民, 于振文, 等. 基于 GIS 的优质小麦变量施肥信息系统研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 94 – 98. SU Wei, NIE Yimin, YU Zhenwen, et al. GIS based high-quality wheat variable rate fertilizing information system[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(7): 94 – 98. (in Chinese)

[7] 张继成. 基于处方图的变量施肥系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013. ZHANG Jicheng. Research on key technologies of variable fertilizer system based on the prescription[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013. (in Chinese)

[8] 安晓飞, 付卫强, 王培, 等. 小麦种行肥行精准拟合变量施肥控制系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 96 – 101. AN Xiaofei, FU Weiqiang, WANG Pei, et al. Development of variable rate fertilization control system based on matching fertilizer line and seed line of wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 96 – 101. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=2019s016&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2019s016&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.016. (in Chinese)

[9] 李振, 张立新, 喻俊志, 等. 电控液压双变量施肥机排肥试验研究[J]. 农机化研究, 2015, 36(2): 195 – 198. LI Zhen, ZHANG Lixin, YU Junzhi, et al. Experimental study of fertilizer electronically controlled hydraulic dual variable

- fertilization machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 36(2): 195 – 198. (in Chinese)
- [10] 李凯, 张立新, 张立萍, 等. 双变量施肥机的设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报, 2016, 51(4): 128 – 133.  
LI Kai, ZHANG Lixin, ZHANG Liping, et al. Design and experiment of bivariate fertilizer[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2016, 51(4): 128 – 133. (in Chinese)
- [11] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 145 – 153. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20181016&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181016&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.016. (in Chinese)
- [12] 刘成良, 苑进, 刘建政, 等. 基于 ARM 和 DSP 的双变量施肥控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): 233 – 238.  
LIU Chengliang, YUAN Jin, LIU Jianzheng, et al. ARM and DSP-based bivariable fertilizing control system design and implementation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Suppl.): 233 – 238. (in Chinese)
- [13] 乔璐, 姬长英, 任益敏. 基于 CAN 总线的混合变量施肥机信息通信系统的设计[J]. 中国农机化学报, 2013, 35(4): 240 – 244.  
QIAO Lu, JI Changying, REN Yimin. Based on CAN bus of electronic control system of mixed fertilizer applicator[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 35(4): 240 – 244. (in Chinese)
- [14] 张家华, 张立新, 李振, 等. 变量施肥机下位机控制系统的设计[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(4): 196 – 201.  
ZHANG Jiahua, ZHANG Lixin, LI Zhen, et al. Design on lower computer control system of variable rate fertilizer application[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(4): 196 – 201. (in Chinese)
- [15] 孟志军, 赵春江, 刘卉, 等. 基于处方图的变量施肥作业系统设计与实现[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2009, 30(4): 338 – 342.  
MENG Zhijun, ZHAO Chunjiang, LIU Hui, et al. Development and performance assessment of map-based variable rate granule application system[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2009, 30(4): 338 – 342. (in Chinese)
- [16] 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 lap calibration method for variable rate application of fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 204 – 209. (in Chinese)
- [17] 李林, 魏新华, 毛罕平, 等. 冬油菜田杂草探测光谱传感器设计与应用[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 127 – 133.  
LI Lin, WEI Xinhua, MAO Hanping, et al. Design and application of spectrum sensor for weed detection used in winter rape field[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(18): 127 – 133. (in Chinese)
- [18] 尹东富, 陈树人, 裴文超, 等. 基于处方图的室内变量喷药除草系统设计与实现[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 131 – 135.  
YIN Dongfu, CHEN Shuren, PEI Wenchao, et al. Design of map-based indoor variable weed spraying system[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 131 – 135. (in Chinese)
- [19] 张瑞瑞, 陈立平, 郭建华, 等. 农田土壤监测无线传感器网络通信平台[J]. 农业工程学报, 2008, 24(增刊2): 81 – 84.  
ZHANG Ruirui, CHEN Liping, GUO Jianhua, et al. Communication platform of wireless sensor network for farmland soil monitoring[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(Suppl. 2): 81 – 84. (in Chinese)
- [20] MALEKI M R. A study on the time response of a soil sensor-based variable rate granular fertiliser applicator[J]. Biosystems Engineering, 2008, 100(2): 160 – 166.
- [21] 陈满, 鲁伟, 汪小岳, 等. 基于模糊 PID 的冬小麦变量追肥优化控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 71 – 76.  
CHEN Man, LU Wei, WANG Xiaochan, et al. Design on optimization control system and experiment of variable nitrogen application in winter wheat based on fuzzy PID control[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 71 – 76. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160210&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160210&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.010. (in Chinese)
- [22] 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)
- [23] 陈立平, 黄文倩, 孟志军, 等. 基于 CAN 总线的变量施肥控制器设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(8): 101 – 104.  
CHEN Liping, HUANG Wenqian, MENG Zhijun, et al. Design of variable rate fertilization controller based on CAN bus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(8): 101 – 104. (in Chinese)
- [24] 张继成, 孟繁峰, 郑萍, 等. 基于电子控制单元的大豆液肥施肥机变量施控系统[J]. 大豆科学, 2019, 38(1): 119 – 125, 131.  
ZHANG Jicheng, MENG Fanfeng, ZHENG Ping, et al. Variable rate control and fertilization system of liquid fertilizer applicator based on electronic control unit[J]. Soybean Science, 2019, 38(1): 119 – 125, 131. (in Chinese)
- [25] 戈天剑, 赵斌, 衣淑娟, 等. 气吸式免耕播种机工况监测系统的研究与实验[J]. 农机化研究, 2017, 39(11): 76 – 80.  
GE Tianjian, ZHAO Bin, YI Shujuan, et al. Research and text on the monitoring system of suction no-tillage seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(11): 76 – 80. (in Chinese)
- [26] 刘大印, 王秀, 毛益进, 等. 基于单片机 PWM 变量农药喷洒控制系统的设计[J]. 农机化研究, 2011, 33(5): 105 – 109.  
LIU Dayin, WANG Xiu, MAO Yijin, et al. Study on PWM variable pesticide spraying control system based on MCU[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(5): 105 – 109. (in Chinese)