

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.02.003

施肥播种机肥料流量分段式PID控制系统设计与试验

王辉^{1,2} 刘艺豪^{1,2} 周利明^{1,2} 周海燕^{1,2} 牛康^{1,2} 徐名汉^{1,2}

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 2. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 施肥稳定性是评价变量施肥系统性能的重要指标,针对常规外槽轮式排肥器排肥时脉动性明显导致排肥均匀性差的问题,提出了基于肥料流量反馈的分段式PID控制方法,并设计了施肥播种机高精度肥料流量控制系统,系统采用肥料流量检测模块获取实时肥料流量并作为反馈输入,结合目标肥料流量,根据分段式PID控制算法得到控制输出量,驱动施肥电机,实现肥料流量的准确控制。搭建了施肥试验台,进行了肥料流量变化阶跃响应与施肥精度的台架试验,结果表明,肥料流量控制系统的阶跃响应时间最大值为1.42 s,均值为0.98 s,超调量最大值为3.49%,均值为2.82%,稳态误差最大值为0.89%,均值为0.64%,施肥量控制精度最小值为97.83%,均值为98.14%。在不同试验条件下,肥料流量控制系统的肥料流量控制精度与施肥精度均优于恒定转速系统。田间试验表明,当车速为4、6、8 km/h时,肥料流量控制系统的施肥量控制精度分别为97.84%、97.78%和97.82%,施肥量控制精度平均值为97.81%,标准偏差为0.28%,能够满足高精度施肥需求。

关键词: 变量施肥; 控制系统; 肥料流量负反馈; 肥料流量检测模块; 分段式PID算法

中图分类号: S147.2; TP273+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)02-0032-09

OSID:



Design and Test of Fertilizer Flow Piecewise PID Control System of Fertilizer Planter

WANG Hui^{1,2} LIU Yihao^{1,2} ZHOU Liming^{1,2} ZHOU Haiyan^{1,2} NIU Kang^{1,2} XU Minghan^{1,2}

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China

2. National Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Fertilization stability is an important index to evaluate the performance of variable rate fertilization system. In order to solve the problem that the precision of fertilization is reduced due to obvious fluctuation during fertilizer discharge with external trough wheel type fertilizer drainer. A piecewise PID control method using fertilizer flow rate as feedback value was proposed. And a high-precision fertilizer flow control system of fertilizer planter was designed. The system regarded the real-time fertilizer flow value collected by the fertilizer flow detection module as the feedback value of the fertilizer flow controller in the vehicle terminal. Controller calculated output based on target and real-time fertilizer flow, and sent to fertilizer motor through USB to CAN module. Accurate control of fertilizer flow rate was realized. Fertilizer application test stand was built. Mathematical model between fertilizer and accumulative value of capacitance was established and validated. The results showed that the maximum measurement error of sensor was 1.20% when using this model, which met the requirement of fertilizer flow detection. Indoor bench test on response of fertilizer flow rate change and fertilization accuracy was carried out. The results showed that the response time of the fertilizer flow control system was 1.42 s, mean value was 0.98 s, maximum overshoot value was 3.49%, mean value was 2.82%, maximum steady-state error was 0.89%, mean value was 0.64%, minimum fertilization accuracy was 97.83%, and mean value was 98.14%. Under different test conditions, the accuracy of fertilizer flow control and fertilization of fertilizer flow control system was better than that of constant speed system. Field tests showed that at vehicle speeds of 4 km/h, 6 km/h and 8 km/h, the accuracy of fertilizer application rate

收稿日期: 2022-04-06 修回日期: 2022-05-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB1312302)

作者简介: 王辉(1980—),男,研究员,博士,主要从事农业电气化与自动化技术在农业中的应用研究,E-mail: huicaams@163.com

通信作者: 周利明(1982—),男,研究员,博士,主要从事精准农业测控技术研究,E-mail: haibo1129@163.com

of fertilizer flow control system was 97.84%, 97.78% and 97.82% respectively, and the average accuracy of fertilizer application rate was 97.81%, and the standard deviation was 0.28%, which met the requirements of fertilizer application accuracy of fertilizer system.

Key words: variable rate fertilization; control system; negative feedback of fertilizer flow rate; fertilizer flow detection module; piecewise PID algorithm

0 引言

变量施肥是精准农业中的重要一环。变量施肥不仅节省种植成本,而且能够改善土壤。变量施肥精准施入土壤,能够提高施肥效率,改善人工施肥不均匀性^[1-4]。实施变量施肥,对施肥控制方法提出了更高的要求,研究更优的施肥控制方法是实现变量施肥的重要途径^[5-6]。故国内外学者针对变量施肥装置研制了多种变量施肥系统,在排肥方式、排肥监测以及排肥控制方法等方面进行了深入研究。

我国施肥机多采用外槽轮式排肥器^[7],其主要通过控制排肥轴转速来控制施肥量^[8]。张继成等^[9]设计了多种固体肥精确施肥控制系统,调节电机转速,可实现多种固体肥料的实时自动配比。杨硕等^[10]研究的施肥系统可监测多路施肥电机转速,实时监测施肥状态。这种转速控制方式结构简单,被广泛应用。但该控制方式施肥量调节范围小,且排肥器排肥时脉动性明显,排肥均匀性差,从而影响施肥精度^[11]。为了克服这些困难,国内外学者在双变量施肥控制系统的设计方面做了大量研究^[12-15],如张季琴等^[16]设计了一种排肥口开度、排肥轴转速都可调的双变量施肥控制系统,增加了施肥变量控制的灵活性。赵学观等^[17]研究了排肥轮充肥性能的影响因素,并提出了利用排肥口开度分段控制施肥量的方法,得到了较好的控制精度。ALAMEEN等^[18]对播种机的手动机械施肥量调节系统进行了改造,并将其改造为实时自动控制系统,可实现肥箱开口度和排肥轴转速的双变量调节。SU等^[19]通过对气吸式点播机的改造,实现了控制外槽轮的有效工作长度,提高了变量施肥的灵活性。但当控制量增多时,系统鲁棒性会下降。还有一些学者在排肥监测方面进行了研究,如采用光谱探测^[20]、多传感器信息融合^[21]及红外光电传感器^[22]等,进而实现变量施肥。以上方法虽然能够实现变量施肥,但受限于未获得实时肥料流量,从而未调节实时肥料流量,因此施肥系统精准性仍有待提高。

PID 控制算法 (Proportion integral differential, PID) 被广泛应用于变量施肥控制中^[23-26],液态肥料在变量施肥时,常将肥料流量作为反馈输入^[27-28],而固体颗粒肥料在变量施肥时将肥料流量

作为反馈输入未见报道。

本文拟基于分段式 PID 控制方法设计施肥播种机高精度肥料流量控制系统,为提高排肥稳定性,将固体颗粒肥料流量值作为控制系统反馈值进行施肥电机转速调节,进而实时调节肥料流量,以保证施肥稳定性与施肥量的准确性。

1 系统结构与原理

1.1 系统结构

施肥播种机高精度肥料流量控制系统,主要由车载终端、霍尔测速模块、施肥电机与 4 组肥料流量检测模块组成,如图 1 所示。其中车载终端为 IKARPC-07A-BT 平板电脑 (iEi 威强电公司),采用基于 X86 架构的 Atom 主板作为核心,集成了肥料流量控制器程序,可实现肥料流量的控制并实时显示系统各作业模块的状态信息;通用串行总线 (Universal serial bus, USB) 转控制器局域网 (Controller area network, CAN) 模块为 GY8507 总线适配器 (武汉吉阳光电科技有限公司),可实现数据采集与命令下发;霍尔测速模块为 NJK-5002C 霍尔传感器 (浙江欧迪龙电子科技有限公司),安装在地轮旁,可实时采集并计算机具的前进速度,并将机具的前进速度通过数据传输线传输至 USB 转 CAN 模块;施肥电机为 BG45X30SI 型伺服电机 (德国 Dunkermotoren 公司,额定输出功率为 80 W,电压 12~24 V),施肥电机通过链轮与排肥轴相连,驱动外槽轮式排肥装置实现排肥;肥料流量检测模块实时采集肥料的流量信息,并通过数据传输线将肥料流量信息传输至 USB 转 CAN 模块;CAN 模拟量输出模块为 C-3402 多功能混合采集模块 (泉州市凌力电子科技有限公司,4

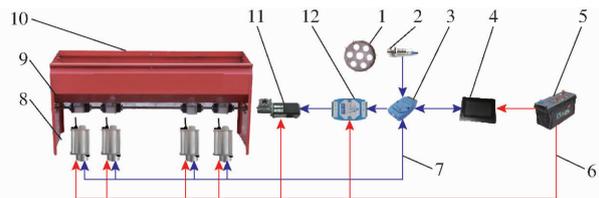


图 1 系统总体结构图

Fig. 1 Structure diagram of system

1. 地轮 2. 霍尔测速模块 3. USB 转 CAN 模块 4. 车载终端
5. 拖拉机蓄电池 6. 电源线 7. 数据传输线 8. 肥料流量检测模块
9. 排肥轴 10. 肥箱 11. 施肥电机 12. CAN 模拟量输出模块

路差分输入和8路单端输入,电压输出:0~10V),CAN模拟量输出模块接收电机转速模拟量信息,并转换为电压值传输至施肥电机。

1.2 肥料流量控制原理

肥料流量控制原理如图2所示,首先在车载终端输入当前地块目标施肥量,然后由安装在机具从动轮旁的霍尔测速模块获取机具实时行进速度。肥料流量控制系统将机具实时行进速度与当前地块目标施肥量作为输入量,计算出目标肥料流量,检测模块采集肥料的实时流量信息。肥料流量控制器结合目标肥料流量值与实时肥料流量值计算模拟量输出值。模拟量输出值通过USB转CAN模块发送至CAN模拟量输出模块,模块将模拟量转换为电压值发送至施肥电机。施肥电机根据输入电压值调节施肥电机转速,进而实现肥料流量的实时控制。

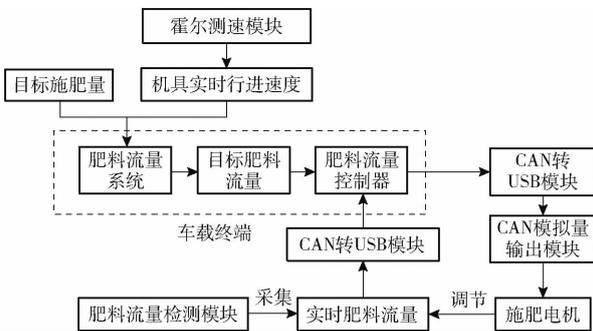


图2 肥料流量控制原理图

Fig.2 Fertilizer flow control schematic

2 肥料流量控制关键技术

2.1 肥料流量控制系统建模

肥料流量控制系统控制模型由霍尔测速传感器采集的实时车速作为输入,控制器经过计算后将电信号发送给施肥机构,施肥机构调节转速控制肥料流量,最后系统输出量为肥料流量。肥料流量通过图3所示控制系统框图中肥料流量检测模块反馈到控制器,通过控制器进行闭环负反馈控制。

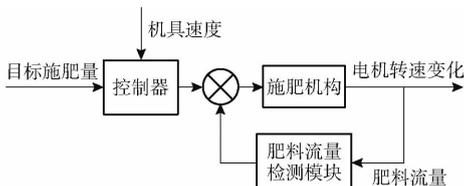


图3 肥料流量控制系统框图

Fig.3 Block diagram of fertilizer flow control system

根据控制系统框图的输入输出关系,得到系统的输入输出关系为

$$Q = 0.1MDv \quad (1)$$

式中 Q ——目标肥料流量, g/s

M ——地块目标施肥量, kg/hm^2

D ——施肥机具作业幅宽, m

v ——机具实时行进速度, m/s

根据图3可知,系统反馈通道的输入量为肥料流量检测模块读取的实时流量,反馈通道输出到控制器的信号为模拟量信号,控制器将信号与输入系统的车速以及目标施肥量进行对比调整,实现控制系统的负反馈控制。

控制模型中反馈环节函数可表示为

$$H(s) = \frac{v(s)}{Q(s)} = \frac{10}{MD} \quad (2)$$

式中 s ——传递函数拉普拉斯变换后的复变量

H ——传递函数负反馈环节

根据肥料流量控制系统控制要求,施肥机构为主要控制对象,其信号控制框图如图4所示。

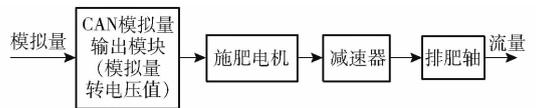


图4 施肥机构控制系统框图

Fig.4 Block diagram of fertilization mechanism control system

根据图4,CAN模拟量输出模块的输入输出分别为模拟量和电压信号,传递函数为比例环节,其关系式为

$$G_1(s) = \frac{X_{out}}{X_{in}} = K_m \quad (3)$$

式中 K_m ——模块模拟量与电压信号转换系数

X_{out} ——模块输出

X_{in} ——模块输入

$G_1(s)$ ——模块传递函数

施肥电机选用德国Dunkermotoren公司的BG45X30SI型直流伺服电机,在忽略微小电感的情况下,直流伺服电机可以看成是一个典型的一阶系统,其传递函数是一个典型的惯性环节和积分环节串联^[12],用拉普拉斯变换来表示施肥电机的输入和输出,则施肥电机传递函数可写为

$$G_2(s) = \frac{1}{2\pi K_e} \frac{1}{s \left(\frac{J_a R_a}{K_e K_e} s + 1 \right)} \quad (4)$$

式中 $G_2(s)$ ——施肥电机传递函数

K_e ——电机电势常数, $V/(kr \cdot \min)$

K_e ——电机磁力矩常数, $N \cdot m/A$

R_a ——电机电阻, Ω

J_a ——电机转子转动惯量, $kg \cdot cm^2$

采用的BG45X30SI型直流伺服电机主要参数有电势常数7.1 $V/(kr \cdot \min)$,电阻0.100 Ω ,电磁力矩常数0.033 $N \cdot m/A$,转动惯量0.44 $kg \cdot cm^2$,代

入公式(4)后得

$$G_2 = \frac{22.416}{s(0.188s + 1)} \quad (5)$$

施肥电机输出轴的转速经过减速器后作为排肥轴的转速输出,减速器输入与输出转速比为 50:1。减速器输入输出信号传递关系主要由转速比体现,控制过程为比例控制,传递函数表示为

$$G_3(s) = \frac{\theta_{out}}{\theta_{in}} = \frac{1}{50} = 0.02 \quad (6)$$

式中 $G_3(s)$ ——减速器传递函数

θ_{out} ——减速器输出

θ_{in} ——减速器输入

系统排肥轴转速与肥料流量呈线性关系,关系式为

$$G_4(s) = \frac{Q(s)}{\theta(s)} = K_q \quad (7)$$

式中 $G_4(s)$ ——排肥轴传递函数

$\theta(s)$ ——排肥轴转速的拉普拉斯变换函数

$Q(s)$ ——肥料流量的拉普拉斯变换函数

K_q ——排肥轴转速与肥料流量转换系数

根据图 4 可知,施肥机构传递函数 $G(s)$ 为

$$G(s) = G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s) \quad (8)$$

公式(2)中 D 为 3 m, M 通常取 200 kg/hm²,公式(3)中 K_m 取 0.1,公式(7)中 K_q 取 10。根据图 3 和公式(2)~(7)可知,肥料流量控制系统的闭环反馈控制传递函数 $G_z(s)$ 表示为

$$G_z(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} = \frac{268.992}{112.8s^2 + 600s + 4.4832} \quad (9)$$

2.2 肥料流量检测模块

电容式流量传感器^[29]是肥料流量控制系统中的关键部分,其性能直接影响控制效果。为提高肥料流量传感器的检测效果,降低电磁环境对检测结果的影响,传感器上下端盖与壳体均采用金属材料,通过金属螺栓连接成一体,并与地线相连。

选用电容数字转换芯片 AD7746 和微控制器 STM32F103C8T6 等构建微电容信号测量电路。传感器开机后空载一段时间,STM32F103C8T6 将 AD7746 采集的 200 个电容值求平均,记为初始电容。当有肥料经过导肥管时,传感器电容会发生改变,STM32F103C8T6 记录并计算 1 s 内实时电容与初始电容的差值累加值,根据电容与肥料质量关系计算 1 s 内经过导肥管的肥料质量,记为肥料流量

$$P = k_{EQ} \sum_{k=1}^{1/T} (C_k - C_l) + b_{EQ} \quad (10)$$

式中 P ——实时肥料流量,g/s

k_{EQ} ——电容与肥料质量关系系数

T ——传感器电容采集周期,s

C_k ——传感器采集的实时电容,pF

C_l ——初始电容,pF

b_{EQ} ——电容与肥料质量关系截距

由 STM32F103C8T6 内置的 CAN 总线控制器通过 SN65HVD230 收发器进行 CAN 信息的发送,从而实现肥料实时流量的采集。

2.3 肥料流量控制器设计

控制系统在工作状态时,目标肥料流量与实时肥料流量构成的控制偏差为

$$e = Q - P \quad (11)$$

式中 e ——控制偏差,g/s

Q ——目标肥料流量,g/s

在数字化控制中,常规增量式 PID 控制表达式为

$$\Delta u(k) = K_p(e(k) - e(k-1)) + K_i(e(k)) + K_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (12)$$

式中 $\Delta u(k)$ ——控制增量

K_p 、 K_i 、 K_d ——比例、积分与微分常数

在常规增量式 PID 控制中比例常数、积分常数与微分常数为固定值,当偏差较大时,系统响应时间长,以及造成较大的系统超调,这对肥料流量控制精度的影响很大。在分段式 PID 控制算法中,当目标值与实际反馈值的偏差达到切换阈值时,系统从现行的 PID 控制参数(K_p 、 K_i 、 K_d)跳转到另外一组更合适的 PID 参数,使控制系统更加精确可靠,控制器框图如图 5 所示。

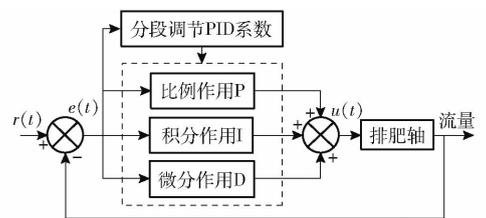


图 5 控制器系统框图

Fig. 5 Controller system framework

以肥料流量偏差 $e(k)$ 作为分段 PID 控制的输入变量,并按其值的域值范围将 PID 控制分为以下几段:

(1) $|e(k)| < e_1$ 时,肥料流量偏差很小,使用 PID 控制,公式(12)中 K_i 取大一些, K_p 取到最小,可以及时消除静态误差,提高控制系统的控制精度。

(2) $e_1 \leq |e(k)| < e_2$ 时,肥料流量偏差较小,仍使用 PID 控制,公式(12)中 K_i 取小一些, K_p 取较小值,可以及时预防系统超调。

(3) $|e(k)| \geq e_2$ 时,肥料流量偏差较大,使用 PD 控制,即公式(12)中 K_i 取 0, K_p 取最大,可以防

止系统超调且使系统快速响应,达到目标肥料流量。

分段式 PID 可用公式表示为

$$\begin{cases} K_P = K_{P1} \\ K_I = K_{I1} \end{cases} \quad (|e(k)| < e_1) \\ \begin{cases} K_P = K_{P2} \\ K_I = K_{I2} \end{cases} \quad (e_1 \leq |e(k)| < e_2) \quad (13) \\ \begin{cases} K_P = K_{P3} \\ K_I = 0 \end{cases} \quad (|e(k)| \geq e_2)$$

其中 $K_{P1} < K_{P2} < K_{P3}, K_{I2} < K_{I1}$ 。

结合控制系统的传递函数,运用 Matlab 的 Simulink 建立仿真模型,如图 6 所示。

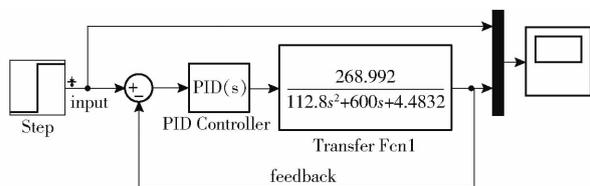


图 6 控制系统 Simulink 仿真模块

Fig. 6 Simulink simulation module of control system

运用 Simulink 中的 Control System Tuner, 根据不同误差进行控制器参数的优化。优化后 $K_{P1} = 0.038, K_{P2} = 2.089, K_{P3} = 212.016, K_{I1} = 0.167, K_{I2} = 0.015, K_D = 1.317$ 。优化后各组参数的阶跃响应曲线如图 7 所示。

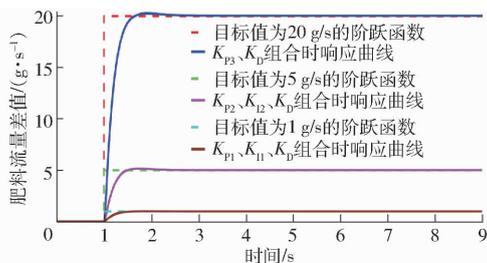


图 7 各组参数的阶跃响应曲线

Fig. 7 Step response curves of each group of parameters

肥料流量控制器加入了对偏差的选择判断。积分作用 I 与比例作用 P 在不同的肥料流量偏差 $e(t)$ 下设定为不同的积分系数与比例系数。使控制系统具有更好的适应性。

3 软件设计

肥料流量控制系统软件开发环境为 NI 公司推出的基于 ANSI C 的集成开发环境 Labwindows/CVI。肥料流量控制系统软件主要实现参数设置、数据采集、控制量计算、数据处理及数据储存等功能,软件界面如图 8 所示。

系统先读取当前地块目标施肥量,将施肥量存储在缓冲区。并获取霍尔测速模块提供的机具实时行进速度,通过计算得出目标肥料流量。同时通过

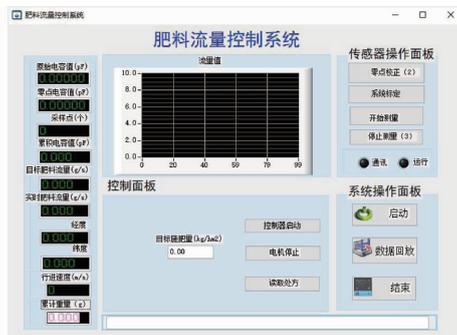


图 8 肥料流量控制系统软件界面

Fig. 8 Software interface of fertilizer flow control system

USB 转 CAN 模块接收到由肥料流量检测模块发送的实时数据后,得到实时肥料流量。根据目标肥料流量与实时肥料流量计算出肥料流量控制器输出量,并将输出量通过 USB 转 CAN 模块发送至 CAN 模拟量输出模块形成施肥电机控制电压。为保证控制系统实时性,采用多线程方法进行数据采集、数据显示及控制量计算。软件系统流程如图 9 所示。

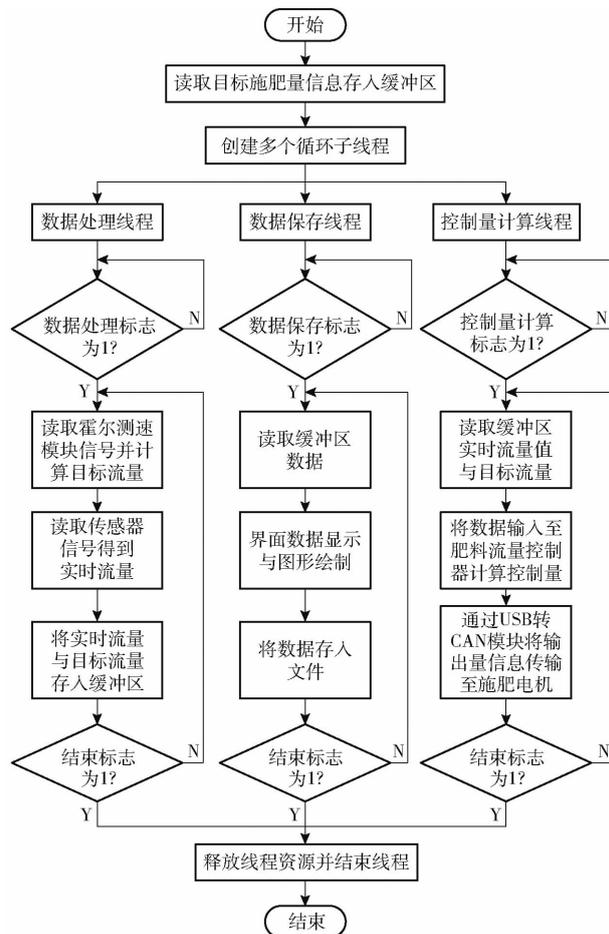


图 9 控制软件程序流程图

Fig. 9 Flow chart of control software program

4 试验与结果分析

4.1 电容式流量传感器标定与验证试验

实时肥料流量值的采集是肥料流量控制中重要

一环,而电容式流量传感器的测量精度又决定了实时肥料流量值的采集精度,因此,先进行电容式流量传感器标定试验。试验选用复合型颗粒状肥料(史丹利农业集团股份有限公司),氮磷钾质量比例为23:4:6,肥料颗粒均匀且无结块。

在施肥试验台上进行传感器的标定试验。试验台主要由肥箱、排肥轴、伺服电机(德国Dunkermotoren公司,额定输出功率为80W,电压12~24V)及减速机、排肥管等组成。将电容式流量传感器安装于排肥口下方,并在传感器的肥料出口放置一个接料盒,采用称量法进行传感器标定,如图10所示。

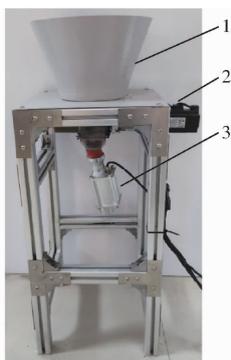


图10 施肥试验台

Fig.10 Fertilization test bench

1. 肥箱 2. 施肥电机 3. 电容式流量传感器

设定排肥轴转速为25 r/min,通过肥料流量控制系统分别控制排肥轴转动时间,根据转动时间的差别实现排肥质量差异。待每次排肥结束后,采用电子秤(安衡衡器电子有限公司,(5000±0.01)g)称取接料盒内的肥料质量,同时记录每次传感器电容变化量的累积值。对标定试验数据进行处理,得到电容差值与肥料质量的关系曲线如图11所示。

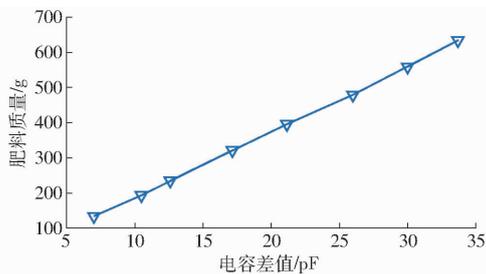


图11 电容差值与肥料质量关系曲线

Fig.11 Relationship curve between capacitance difference and fertilizer quality

由图11可以看出,电容差值与肥料质量呈线性关系,且经Matlab拟合出电容差值与肥料质量的关系模型为

$$m = 18.655C + 0.4053 \quad (14)$$

式中 m ——肥料质量,g

C ——传感器电容与传感器参考电容差值,pF

该关系模型决定系数 R^2 为0.9996,说明电容差值与肥料质量关系显著。

为验证此关系模型的可靠性以及电容式流量传感器的测量精度,在施肥试验台上进行了测量精度的验证试验。试验通过肥料流量控制系统控制排肥轴以不同转速转动,并在排肥口下方放置接料盒,将通过拟合关系模型计算得到的肥料测量值与接料盒内肥料称量值对比,结果如表1所示。

表1 肥料流量传感器测量精度验证结果

Tab.1 Verification results of measurement accuracy of fertilizer flow sensor

排肥轴转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	肥料测量值/ g	肥料称量值/ g	误差/%
5	136.651	137.90	0.91
10	211.655	213.76	0.98
15	264.162	267.37	1.20
20	339.290	341.40	0.62
25	395.375	399.27	0.98
30	411.906	411.26	0.16
35	443.421	445.49	0.46
40	550.455	546.95	0.64

由表1可知,在不同排肥转速条件下,电容式流量传感器均能够实现施肥量的准确测量,最大测量误差为1.20%。故可采用电容式流量传感器实时检测肥料流量。

4.2 施肥试验台肥料流量变化阶跃响应试验

肥料流量控制精度直接影响施肥量与施肥精度。为了验证肥料流量控制系统的控制精度,在施肥试验台上进行了系统的肥料流量变化阶跃响应试验,试验条件同4.1节。试验时,通过系统设定目标肥料流量分别为23、34、44 g/s,同时记录实时肥料流量,肥料流量变化如图12所示。在肥料流量达到稳态时读取施肥电机转速,分别为12、21、32 r/min。

设定施肥电机转速分别为12、21、32 r/min,同时记录实时肥料流量。肥料流量变化如图12所示。

试验表明,3组恒定转速系统的超调量最小值为5.45%,超调量平均值为8.85%。3组肥料流量控制系统的超调量最大值为3.49%,超调量平均值为2.82%。3组恒定转速系统的稳态误差最小值为1.31%,稳态误差平均值为3.80%。3组肥料流量控制系统的稳态误差最大值为0.89%,稳态误差平均值为0.64%。肥料流量控制系统阶跃响应时间最大为1.42s,平均为0.98s。肥料流量控制系统将肥料流量作为控制目标,可以减小排肥器排肥时脉动性明显而产生的误差,故肥料流量控制系统控制精度更高。

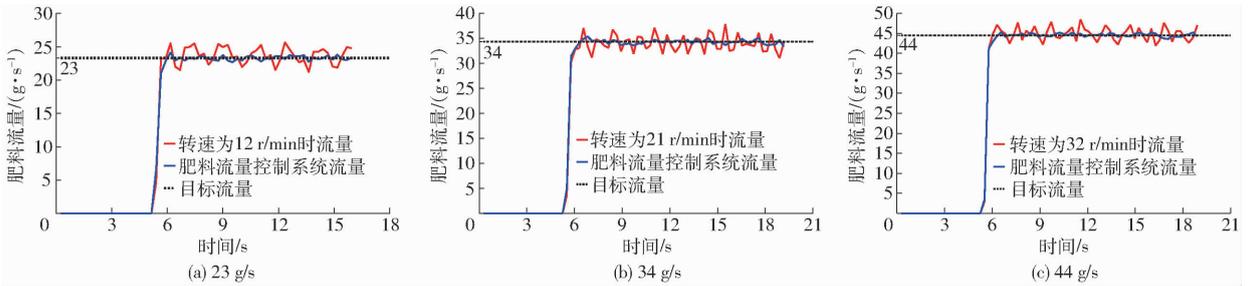


图 12 肥料流量变化曲线

Fig. 12 Change curves of fertilizer flow

4.3 施肥试验台施肥量控制精度试验

施肥量准确度代表了系统的排肥精度。为了验证肥料流量控制系统的施肥量控制精度,在施肥试验台上进行了系统的施肥量控制精度试验,试验条件同 4.2 节。试验时设定 3 种目标施肥量,分别为 1 150、1 700、2 200 g,恒定转速系统与肥料流量控制系统在每种目标施肥量下分别进行 3 次试验。恒定转速系统以恒定转速运行,肥料流量控制系统以恒定肥料流量运行,运行 50 s。在施肥管下方放置接料盒,对接料盒内肥料称量,将 3 次试验的称量值求平均,记为实际施肥量,计算施肥量控制精度为

$$\theta = \left(1 - \frac{|M_1 - M_2|}{M_1} \right) \times 100\% \quad (15)$$

式中 M_1 ——目标施肥量, g

M_2 ——实际施肥量, g

θ ——施肥量控制精度, %

结果如表 2 所示。

表 2 施肥试验台施肥量控制精度试验结果

Tab. 2 Test results of fertilization accuracy on fertilization test bench

目标施肥量/ g	系统类型	实际施肥量/ g	施肥量控制精度/ %
1 150	肥料流量控制系统	1 132.44	98.47
	恒定转速系统	1 101.01	95.74
1 700	肥料流量控制系统	1 663.11	97.83
	恒定转速系统	1 608.87	94.61
2 200	肥料流量控制系统	2 158.86	98.13
	恒定转速系统	2 089.12	94.96

试验表明,恒定转速系统的施肥量控制精度最大值为 95.74%,施肥量控制精度平均值为 95.10%。肥料流量控制系统的施肥量控制精度最小值为 97.83%,施肥量控制精度平均值为 98.14%。

4.4 田间试验

2021 年 10 月 17—18 日在河南省洛阳市一拖孟津试验场进行田间试验。试验地块长 180 m,宽

30 m。本文系统搭载在中农机 2BJ-470B 型玉米免耕精量播种施肥机上,如图 13 所示。试验前在四路排肥管下方套上接料袋,以便对施肥量进行测量。



图 13 系统安装图

Fig. 13 System installation drawing

1. 肥箱 2. 电容式流量传感器 3. 施肥电机

试验时先将肥料装入肥箱,肥料选用复合型颗粒状肥料(史丹利农业集团股份有限公司),氮磷钾含量比例为 23:4:6。设定试验地块目标施肥量为 200 kg/hm²,施肥播种机分别以速度 4、6、8 km/h 行驶 60 s,如图 14 所示。机具幅宽为 3 m。利用公式(1)可算出目标肥料流量 Q ,则目标施肥量为

$$M_1 = 60Q \quad (16)$$



图 14 田间试验

Fig. 14 Photos of field trials

1. 车载终端 2. 电容式流量传感器

采用电子秤(安衡衡器电子有限公司,(5 000 ± 0.01) g)称取接料袋内的肥料质量并求和获得实际施肥量 M_2 。每个车速下进行 3 组试验,根据公式(15)计算施肥量控制精度,结果如表 3 所示。

肥料流量控制系统施肥量控制精度平均值为 97.81%,标准偏差为 0.28%。试验结果表明:肥料

表 3 田间施肥量控制精度试验结果

Tab.3 Test results of fertilization accuracy in field

行进速度/ (km·h ⁻¹)	目标施肥 量/g	系统类型	实际施肥 量/g	施肥量控制 精度/%
4	4 000	恒定转速 系统	3 778.52	94.46
			3 848.88	96.22
			3 718.52	92.96
		肥料流量 控制系统	3 921.68	98.04
			4 094.68	97.63
			4 085.92	97.85
6	6 000	恒定转速 系统	5 764.26	96.07
			6 286.02	95.23
			5 691.18	94.85
		肥料流量 控制系统	6 158.82	97.35
			5 872.32	97.87
			5 887.38	98.12
8	8 000	恒定转速 系统	8 537.44	93.28
			8 433.42	94.58
			7 706.64	96.33
		肥料流量 控制系统	8 187.12	97.66
			7 806.56	97.58
			7 857.84	98.22

流量控制系统在田间工作环境,仍能保持良好的施肥控制精度。由于电容式流量传感器在田间受噪声、震动等影响,肥料流量控制系统在田间工况下的施肥量控制精度比在施肥试验台工况下的施肥量控制精度略低。

5 结论

(1)提出了将肥料流量作为反馈值的分段式 PID 控制方法,基于分段式 PID 算法设计了高精度施肥播种机肥料流量控制系统,系统包括车载终端、霍尔测速模块、施肥电机、肥料流量检测模块与肥料流量控制器,系统可根据地块目标施肥量和播种施肥机行进速度调节施肥流量,实现了肥料流量的准确控制和肥料的精确施入。

(2)通过施肥试验台试验建立了肥料流量与电容累计值的线性拟合关系,经验证电容式流量传感器最大测量误差为 1.20%,满足肥料流量检测需求。进行了肥料流量变化阶跃响应与施肥精度的台架试验,试验结果表明,肥料流量控制系统阶跃响应时间最大值为 1.42 s,均值为 0.98 s;系统超调量最大值为 3.49%,均值为 2.82%;系统稳态误差最大值为 0.89%,均值为 0.64%;系统施肥量控制精度最小值为 97.83%,均值为 98.14%。在不同试验条件下,肥料流量控制系统的肥料流量控制精度与施肥精度均优于恒定转速系统。

(3)田间试验中,当车速为 4、6、8 km/h 时,肥料流量控制系统的施肥量控制精度分别达到 97.84%、97.78% 和 97.82%,系统施肥量控制精度平均值为 97.81%,标准偏差为 0.28%。满足施肥系统的施肥精度要求。

参 考 文 献

- [1] 姜佰文,许欣桐,张迪,等. 减量施肥条件下生物炭与耕作方式对玉米氮吸收及产量的影响[J]. 东北农业大学学报, 2019,50(10):23-31.
JIANG Baiwen, XU Xintong, ZHANG Di, et al. Effect of biochar and tillage on nitrogen absorption and yield of maize under reduced fertilizer[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2019, 50(10):23-31. (in Chinese)
- [2] COLACO A F, MOLIN J P. Variable rate fertilization in citrus: a long term study[J]. Precision Agriculture, 2017,18(2):169-191.
- [3] 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)
- [4] 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.
- [5] 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 counter measures of variable rate fertilization technology in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017,39(10):1-6. (in Chinese)
- [6] 白由路. 国内外施肥机械的发展概况及需求分析[J]. 中国土壤与肥料, 2016(3):1-4.
BAI Youlu. Analysis of the development and the demands of fertilization machinery[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2016(3):1-4. (in Chinese)
- [7] 孙春静,何箐民,滕文建,等. 小麦精准施肥播种装置现状研究[J]. 中国农机化学报, 2019,40(7):30-34.
SUN Chunjing, HE Qingmin, TENG Wenjian, et al. Research on present situation of precision fertilization and seeding device for wheat[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019,40(7):30-34. (in Chinese)
- [8] 张汉林. 电动变量施肥控制系统的设计与试验研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2017.
ZHANG Hanlin. Design and test of a electronic variate-rate fertilization control system [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [9] 张继成,严士超,纪文义,等. 基于增量式 PID 算法的多种固体肥精确施控系统研究[J]. 农业机械学报, 2021,52(3):99-106.

- ZHANG Jicheng, YAN Shichao, JI Wenyi, et al. Precision fertilization control system research for solid fertilizers based on incremental PID control algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 99–106. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] 张季琴, 刘刚, 胡号, 等. 双变量螺旋外槽轮排肥器控制序列对排肥性能的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 137–144.
ZHANG Jiqin, LIU Gang, HU Hao, et al. Influence of control sequence of spiral fluted roller fertilizer distributor on fertilization performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 137–144. (in Chinese)
- [12] 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]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 71–76.
CHEN Man, LU Wei, WANG Xiaochan, et al. Design and experiment of optimization control system for variable fertilization in winter wheat field based on fuzzy PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 71–76. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 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(Supp.): 233–238. (in Chinese)
- [15] 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, 50(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, 50(8): 72–79. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 赵学观, 何亚凯, 王松林, 等. 双变量排肥系统充肥性能分析与试验研究[J]. 农机化研究, 2020, 42(6): 104–110.
ZHAO Xueguan, HE Yakai, WANG Songlin, et al. Fertilization filling performance analysis and experimental study of bivariate fertilizer drainage system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(6): 104–110. (in Chinese)
- [18] ALAMEEN A, AL-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.
- [19] SU N, XU T, SONG L, et al. Variable rate fertilization system with adjustable active feed-roll length[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2015, 8(4): 19–26.
- [20] 李新伟, 田敏, 肖新. 基于小麦养分快速诊断的施肥决策与控制系统设计[J]. 东北农业科学, 2019, 44(2): 23–27.
LI Xinwei, TIAN Min, XIAO Xin. Design of wheat fertilization decision-making and control system based on quick diagnosis[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2019, 44(2): 23–27. (in Chinese)
- [21] 赵振宇. 基于多传感融合的水稻侧深变量施肥控制系统设计[D]. 南宁: 广西大学, 2021.
ZHAO Zhenyu. Development of rice side deep variable rate fertilization control system based on multi-sensor fusion[D]. Nanning: Guangxi University, 2021. (in Chinese)
- [22] 金鑫, 李倩文, 苑严伟, 等. 2BFJ-24 型小麦精量播种变量施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 84–92.
JIN Xin, LI Qianwen, YUAN Yanwei, et al. Design and test of 2BFJ-24 type variable fertilizer and wheat precision seed sowing machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 84–92. (in Chinese)
- [23] 安晓飞, 王晓鸥, 付卫强, 等. 四要素变量施肥机肥箱施肥量控制算法设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 149–154.
AN Xiaofei, WANG Xiaou, FU Weiqiang, et al. Design and experiment of fertilizer amount control algorithm in four factors variable rate fertilization system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 149–154. (in Chinese)
- [24] 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)
- [25] 袁全春, 徐丽明, 牛丛, 等. 果园有机肥深施肥分层变量排肥控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 195–202.
YUAN Quanchun, XU Liming, NIU Cong, et al. Design and test of layered variable rate fertilizer discharge control system for organic fertilizer deep applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 195–202. (in Chinese)

- tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 13-18. (in Chinese)
- [10] MATIN M A, FIELKE J M, DESBIOLLES J M A. Furrow parameters in rotary strip-tillage: effect of blade geometry and rotary speed[J]. Biosystems Engineering, 2014, 118: 7-15.
- [11] DU Jun, HENG Yifan, ZHENG Kan, et al. Investigation of the burial and mixing performance of a rotary tiller using discrete element method[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 220: 1-17.
- [12] 廖宜涛, 高丽萍, 廖庆喜, 等. 油菜精量联合直播机深施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 65-75.
LIAO Yitao, GAO Liping, LIAO Qingxi, et al. Design and test of side deep fertilizing device of combined precision rapeseed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 65-75. (in Chinese)
- [13] COUTO-VAZQUEZ A, GONZALE-PRIETO S J. Fate of N-15-fertilizers in the soil-plant system of a forage rotation under conservation and plough tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 161: 10-18.
- [14] 秦宽, 丁为民, 方志超, 等. 犁翻旋耕复式作业耕整机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 7-16.
QIN Kuan, DING Weimin, FANG Zhichao, et al. Design and experiment of plowing and rotary tillage combined machine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 7-16. (in Chinese)
- [15] 罗伟文, 顾峰玮, 吴峰, 等. 全秸硬茬地碎秸秆行间集覆小麦播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 42-52.
LUO Weiwen, GU Fengwei, WU Feng, et al. Design and experiment of wheat planter with straw crushing and inter-furrow collecting mulching under full amount of straw and root stubble cropland [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 42-52. (in Chinese)
- [16] 雷小龙, 李蒙良, 张黎骅, 等. 颗粒化肥水平气送式螺旋组合可调定量供肥装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 9-18.
LEI Xiaolong, LI Mengliang, ZHANG Lihua, et al. Design and experiment of horizontal pneumatic screw combination adjustable quantitative fertilizer feeding device for granular fertilizer[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(19): 9-18. (in Chinese)
- [17] 梁方, 王德成, 尤泳, 等. 草地破土切根刀具的刃口曲线设计与优化[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(6): 100-107.
LIANG Fang, WANG Decheng, YOU Yong, et al. Design and optimization of the edge curve of root-cutting blade in grassland [J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(6): 100-107. (in Chinese)
- [18] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 62-72.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Research on polyline soil breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 62-72. (in Chinese)
- [19] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modelling (DEM) of tillage: accounting for soil cohesion and adhesion[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 298-306.
- [20] 祝英豪, 夏俊芳, 曾荣, 等. 基于离散元的稻板田旋耕功耗预测模型研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 42-50.
ZHU Yinghao, XIA Junfang, ZENG Rong, et al. Prediction model of rotary tillage power consumption in paddy stubble field based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 42-50. (in Chinese)
- [21] 方会敏, 姬长英, AHMED Ali Tagar, 等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 60-67.
FANG Huimin, JI Changying, AHMED Ali Tagar, et al. Simulation analysis of straw movement in straw-soil-rotary blade system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 60-67. (in Chinese)

(上接第 40 页)

- [26] 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)
- [27] XUE Xiuyun, XU Xufeng, ZHANG Zelong, et al. Variable rate liquid fertilizer applicator for deep-fertilization in precision farming based on zigBee technology[J]. IFAC PapersOnLine, 2019, 52(30): 43-50.
- [28] 田敏, 白金斌, 李江全. 基于遗传算法的液肥变量施肥控制系统[J]. 农业工程学报, 2021, 37(17): 21-30.
TIAN Min, BAI Jinbin, LI Jiangquan. Variable rate fertilization control system for liquid fertilizer based on genetic algorithm [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(17): 21-30. (in Chinese)
- [29] 周利明, 马明, 苑严伟, 等. 基于电容法的施肥量检测系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 44-51.
ZHOU Liming, MA Ming, YUAN Yanwei, et al. Design and test of fertilizer mass monitoring system based on capacitance method[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 44-51. (in Chinese)