

基于PID算法的高频间歇供肥系统设计与试验

于畅畅^{1,2} 李洪文^{1,2} 何进^{1,2} 陈桂斌^{1,2} 卢彩云^{1,2} 王庆杰^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 在液态肥寻种对靶点施系统中, 液态肥需满足在高频间歇喷施时压力波动较小且在间歇喷射频率发生变化时仍能保证压力稳定的要求, 为此设计了基于PID算法的高频间歇供肥系统。设计了供肥系统硬件电路和软件程序, 对管路压力进行采集与控制, 并设计了可方便设置作业参数和显示实时作业状况的人机交互界面。采用临界比例度法对PID算法进行参数整定, 经实际试验调整后确定PID算法的比例系数、积分系数和微分系数分别为4、0.079和0.012, 对采用和不采用PID算法的供肥系统压力变化情况进行了对比试验, 结果表明, 采用PID算法的供肥系统压力更加稳定。为评价基于PID算法的供肥系统在不同作业速度和压力设定值下的压力稳定性能, 选取管路压力的最大误差、平均误差和标准差为试验指标, 进行了台架试验。结果表明, 供肥系统压力的最大误差、平均误差和标准差分别不大于6.49%、1.54%和0.40 MPa, 满足液态肥寻种对靶点施系统对于管路压力稳定性的要求。

关键词: 液态肥; 供肥系统; PID算法; 参数整定

中图分类号: S224.21

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)11-0045-09

OSID:



Design and Experiment of High-frequency Intermittent Fertilizer Supply System Based on PID Algorithm

YU Changchang^{1,2} LI Hongwen^{1,2} HE Jin^{1,2} CHEN Guibin^{1,2} LU Caiyun^{1,2} WANG Qingjie^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

2. Beijing Key Laboratory of Design and Optimization in Modern Agricultural Equipment, Beijing 100083, China)

Abstract: Liquid fertilizer has the advantages of easy absorption, high efficiency and low environmental pollution compared with granular fertilizer. To achieve precise application of liquid fertilizer, a detecting seeds and target-spot application system of liquid fertilizer was proposed. The system needed liquid fertilizer to meet the requirements of small pressure fluctuations during high-frequency intermittent spraying, and ensure pressure stability when the intermittent spraying frequency was changed. Thus, a high-frequency intermittent fertilizer supply system was designed based on PID algorithm. Through the study of the hardware circuit and software program of the fertilizer supply system, the collection and control of the pressure for the fertilizer supply system was realized. And the interactive interface was designed to facilitate the setting of operating parameters and the display of real-time operating conditions. In order to get the best parameters of the PID algorithm, the critical proportion method for parameters tuning was used. After actual experimental adjustment, the proportional, integral and differential coefficients of the PID algorithm were determined to be 4, 0.079 and 0.012. A comparative test was implemented to compare the pressure change of the fertilizer supply system with and without the PID algorithm. The results showed that the pressure of the fertilizer supply system with the PID algorithm was more stable. To evaluate the stability of the fertilizer supply system based on PID algorithm at the operating speeds of 3 km/h, 4 km/h and 5 km/h and the setting pressure of 0.10 MPa, 0.15 MPa, 0.20 MPa, 0.25 MPa and 0.30 MPa, a bench test was carried out. The test indicators were maximum deviation, average deviation and standard deviation of the pressure for the fertilizer supply system pressure. The test results indicated that the maximum deviation, average deviation and standard deviation were not more than 6.49%, 1.54% and 0.40 MPa, which satisfied the requirements of detecting seeds and target-spot application system of liquid fertilizer for pressure stability.

Key words: liquid fertilizer; fertilizer supply system; PID algorithm; parameter tuning

收稿日期: 2020-02-04 修回日期: 2020-06-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200600)

作者简介: 于畅畅(1994—), 男, 博士生, 主要从事保护性耕作与智能农业装备研究, E-mail: yuchang@cau.edu.cn

通信作者: 王庆杰(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事保护性耕作与智能农业装备研究, E-mail: wangqingjie@cau.edu.cn

0 引言

液态肥因具有肥效利用率高、环境污染小等特点在国内外得到广泛应用^[1-2]。种肥能促进玉米种子发芽和幼苗根部的生长,具有增产效果^[3-4]。为实现液态种肥的精准施用,文献[5]提出了液态肥的寻种对靶点施方法(在播下的种子附近施用一定量的液态肥),并设计了液态肥对靶点施系统,主要包含测控系统、供肥系统和开沟施肥系统。提供稳定持续压力的液态肥是保证液态肥寻种对靶点施的关键,因此研究稳定可靠的供肥系统很有必要。

目前,关于液体恒压系统方面的研究主要集中在生活和工业生产的供水系统中^[6-7]。为解决传统供肥系统中采用水塔等设备经济成本高、能量消耗大等问题,基于 PLC、STM32 等控制器与变频器的恒压供水系统成为近年的研究热点^[8-10]。恒压供水系统能使管路压力保持恒定,对改善居民生活水平、提高工业生产效率具有重要意义^[11]。为进一步减小恒压供水系统中电机启动对电网的冲击、保证供水压力更加稳定,基于 PID 算法、PID 模糊控制、模糊控制等电机恒压变频调速系统^[12-16]提高了对外界干扰的适应性。上述提到的恒压供水系统主要针对大容量供水系统,且压力调控的滞后时间较长,在管路流失液体较少时,供水系统并不能及时补充水压。而液态肥寻种对靶点施系统中由于两粒种子下落的时间间隔小,液态肥喷施频率高,要求供肥系统根据管路压力的变化能及时作出响应,并补充液态肥,现有研究无法满足液态肥寻种对靶点施系统对供肥系统的要求。

针对现有研究无法满足液态肥寻种对靶点施系统中液态肥在高频间歇喷施时压力波动较小且在间歇喷射频率发生变化时仍能保证压力稳定的问题,本文设计一种基于 PID 算法的高频间歇供肥系统,通过对供肥系统硬件和软件的研究,实现为液态肥寻种对靶点施系统提供具有稳定压力的液态肥。

1 系统组成与工作原理

液态肥寻种对靶点施系统中的供肥系统主要由 STM32 单片机、触摸屏、肥箱、泵驱动器、隔膜泵、压力传感器、压力缓冲罐、固态继电器、电磁阀、肥管和电源等组成,如图 1 所示。其中 STM32F103 单片机主要由复位电路、晶振电路、电源转化电路、主芯片 STM32F103ZET6 等组成,是供肥系统运算和信号处理的核心单元;触摸屏用于实现人机交互,根据实际需求可方便快捷地设置作业参数并实时显示运行状

况;肥箱用于存放液态肥;泵驱动器用于控制隔膜泵电机的工作功率,从而控制泵的流量;压力传感器实时采集管路压力;压力缓冲罐用于减少管路压力和流量的波动,提高喷肥装置喷出液态肥的稳定性;固态继电器用于单片机的小电流信号控制电磁阀等大电流负载;电源为供肥系统中的各电子器件提供电能。

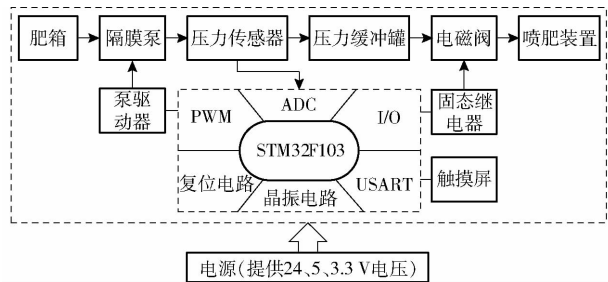


图 1 供肥系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of fertilizer supply system

工作时,根据前期研究所获得的液态肥施用效果较佳时的工作压力,首先通过触摸屏的人机交互界面设置工作压力,并采用串口通信协议传输到 STM32 单片机,同时压力传感器实时检测当前管路液态肥的压力,并采用 STM32 单片机自带的模数转换模块(Analog to digital converter, ADC)将压力传感器获取的压力模拟量信号转换为单片机能处理的数字量信号,经 STM32 单片机内部程序运算处理后得到当前压力,通过 PID 算法计算后得到泵驱动器所需占空比,控制隔膜泵按不同的功率进行工作,从而使管路压力保持在设定值。通过隔膜泵、STM32 单片机、压力传感器所组成的压力闭环控制系统,实现供肥系统管路压力稳定,从而达到液态肥寻种对靶点施的目的。人机交互界面方便操作人员改变预设压力,并可实时显示当前管路的实际压力。

2 系统硬件设计与关键部件选型

2.1 控制系统总体设计

供肥系统以单片机 STM32 为处理核心,串口通信协议为数据传输方式,触摸屏为人机交互界面终端,压力传感器为管路压力数据采集方式,达到为液态肥寻种对靶点施系统提供压力稳定液态肥的目的。供肥系统关键硬件电路如图 2 所示。

2.2 STM32 最小系统

STM32 最小系统是供肥控制系统的信号处理核心,主要完成对触摸屏指令信息的接收与应答、对压力传感器信号的采集和对隔膜泵、电磁阀的控制等功能。单片机主芯片采用 STM32F103ZET6,主频最高达 72 MHz,有 8 个定时器、5 路串口和 3 个 12 位 ADC,满足供肥系统的要求。

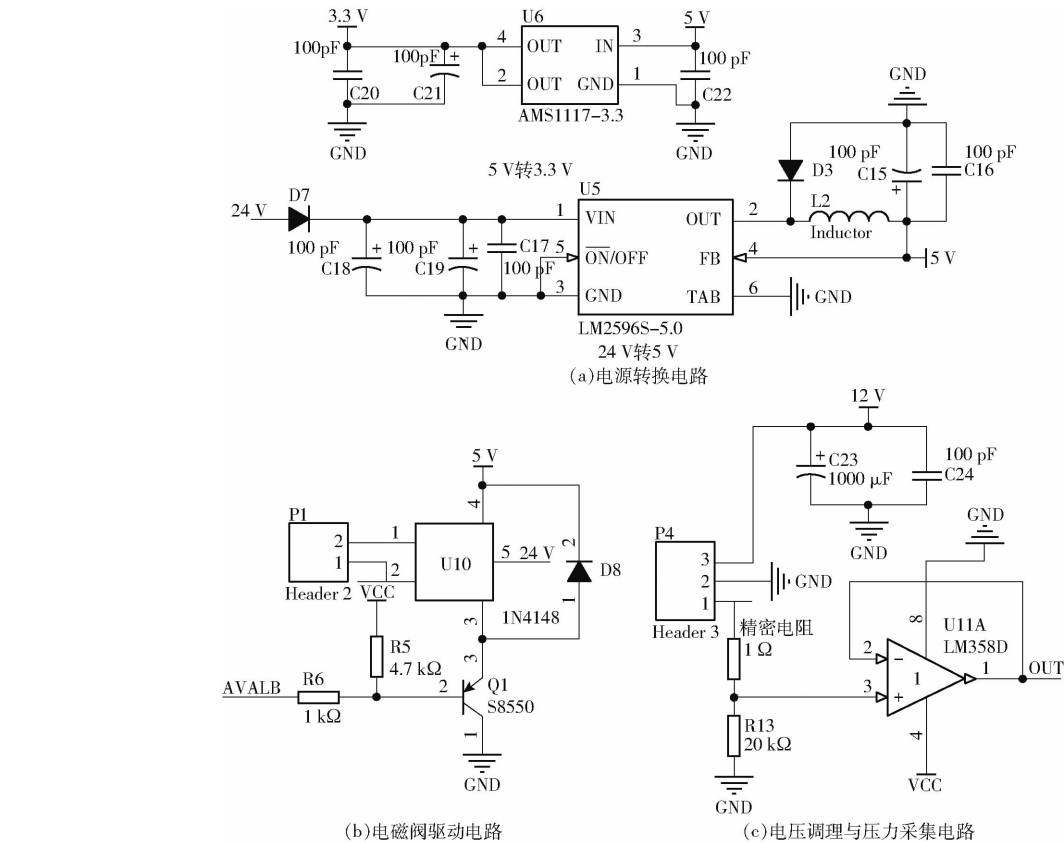


图 2 控制系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of control system

2.3 电源电路设计

电源为供肥系统中各部件的正常工作提供电能。供肥系统中各部件所需要的电源电压分别为 24、5、3.3 V。24 V 电压由开关电源提供,根据所选隔膜泵功率,选择台湾明玮开关电源,功率为 180 W。为获得 5 V 与 3.3 V 电压,分别对 24 V 电压进行两次降压处理,如图 2 中的 24 V 转 5 V 部分和 5 V 转 3.3 V 部分。

2.4 驱动电路设计

电磁阀均采用 24 V 电压供电,而 STM32 单片机 I/O 口电压为 3.3 V,无法直接控制电磁阀。继电器是常用的小电流信号控制大电流负载的电子元件,通过单片机高低电平控制电磁阀的开合,见图 2。隔膜泵额定电压为 24 V,无法直接通过单片机 I/O 口驱动。本文选用双 MOS 开关管对隔膜泵进行驱动并设计了驱动电路,通过 STM32 单片机设置不同占空比的 PWM 信号控制泵驱动器输出不同电压,从而驱动隔膜泵在不同功率下工作。

2.5 压力采集电路设计

本研究选用的压力传感器电压输出范围为 0 ~ 5 V,而 STM32 单片机内部 ADC 所能采集的电压范围为 0 ~ 3.3 V,因此设计了电压调理电路,见图 2。通过两个精密电阻串联进行分压,从而将压力传感器的输出电压与单片机 ADC 能采集的电压范围相

匹配。另外,采用运算放大器 LM358 设计了电压跟随电路,提高压力采集电路负载能力。

2.6 关键部件选型

根据前期研究^[3],为满足液态肥的施肥量要求,选用上海新西山实业有限公司的 DP-150 型隔膜泵,最大流量 5.3 L/min,最高压力 1.0 MPa。触摸屏选用广州大彩光电科技有限公司的 DC10600F070 型触摸屏。压力缓冲罐体积为 5 L,预冲压力为 0.2 MPa,最大压力为 1 MPa,满足供肥系统减少水压冲击、保证水压持续稳定的要求。

3 系统软件设计

3.1 控制系统流程

根据实际作业环境和施肥量要求,确定株距、工作压力和前进速度等参数并通过触摸屏输入到 STM32 单片机,STM32 单片机接收到触摸屏所设置的作业参数信号后,经运算解析后获得相应的控制指令,控制隔膜泵工作,并通过 PID 控制算法使管路压力维持在设定值附近,进而实现液态肥的寻种对靶点施,具体控制系统工作流程如图 3 所示。

3.2 PID 算法与参数整定

3.2.1 PID 算法

PID 算法是经典控制理论中最早发展起来的控

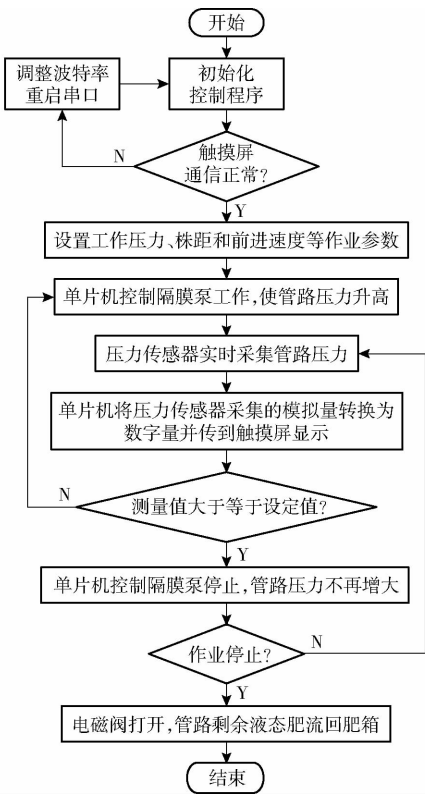


图3 控制流程图

Fig. 3 Flowchart of controller

制策略之一,其具有算法简单、鲁棒性好和可靠性高等特点,至今仍广泛应用于工程控制中^[17-22]。为实现在高频率间断性喷施时管路液态肥压力的稳定,本文设计了闭环PID控制系统以保证压力维持在设定值,PID控制原理如图4所示。

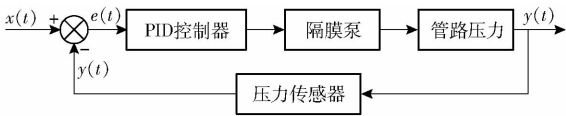


图4 PID控制原理图

Fig. 4 Schematic diagram of PID control principle

在压力闭环控制系统中,将 t 时刻压力传感器测得的管路压力实际值($y(t)$)与设定值($x(t)$)之间的误差($e(t)$)输入到PID控制器中,根据PID控制策略调整PWM信号占空比来控制隔膜泵电机的转速,进而调整隔膜泵的供给压力,使管路压力维持在设定值附近。时间连续变化的PID控制算法公式为

$$P(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

式中 $P(t)$ —— t 时刻PWM信号占空比

K_p ——比例系数

K_i ——积分系数

K_d ——微分系数

由于单片机控制器无法处理时间连续变化的函数,因此在实际应用过程中需要将上述公式进行离

散化。离散化的PID算法主要有增量式PID和位置式PID,由于位置式PID每次均需对误差进行累加,计算量大,本文选用增量式PID控制算法,具体公式为

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

式中 $P(k)$ —— k 采样点PWM信号占空比

k ——当前采样点序号

3.2.2 PID参数整定

PID参数整定效果直接决定系统是否能正常运行及运行的可靠性。常用的PID参数整定方法主要分为两大类:通过求得的控制系统的数学模型仿真得到系统的响应曲线,从而整定得到比例系数、积分系数和微分系数,主要有Ziegler-Nichols整定法、内模整定法等;一些实际工程中无法得到准确数学模型的控制系统的,常采用试验与经验公式相结合的方法进行参数整定,常用的有临界比例度法和衰减曲线法等^[23-26]。由于供肥系统中的液态肥始终处于高频率间歇性喷施状态,实际无法得到准确的数学模型,并且管路压力控制系统会频繁受到间歇性喷施的干扰,不易得到衰减曲线。因此,本文选定临界比例度法进行PID的参数整定。

采用临界比例度法进行参数整定时,首先将积分时间设置为最大,微分时间设置为零,即积分和微分环节均无作用,供肥系统只受比例环节作用。在外界干扰的作用下,观察管路压力的振荡情况,不断地增大比例系数,直至测量值按恒定幅度和周期持续4次或5次等幅振荡,此时的比例系数就是临界比例度 δ_k ,等幅振荡的周期为临界周期 T_k 。临界比例度法PID参数整定的经验公式:比例系数 $K_p = 1.7\delta_k$,积分时间 $T_i = 0.5T_k$,微分时间 $T_d = 0.125T_k$ 。

积分系数为

$$K_i = K_p \frac{T}{T_i} \quad (3)$$

式中 T ——PID控制采样周期,s

微分系数为

$$K_d = K_p \frac{T_d}{T} \quad (4)$$

根据研究,在进行玉米播种时,两粒种子下落时间间隔为

$$t_1 = \frac{3.6d}{v} \quad (5)$$

式中 t_1 ——两粒种子下落时间间隔,ms

d ——玉米种子株距,mm

v ——作业速度, km/h

当玉米株距为 200 ~ 300 mm, 作业速度为 3 ~ 5 km/h 时, 计算得两粒种子下落时间间隔为 144 ~ 360 ms。本文采用单片机定时器 Timer5 作为电磁阀开合的定时器, 其中定时器 Timer5 的定时周期设置为 200 ms, 用于模拟实际播种作业时两粒种子的下落时间间隔, 每个周期内电磁阀打开时间为 60 ms, 代表实际的喷肥时长。

为了获得供肥系统的实时压力, 选用美国国家仪器有限公司 USB6002 型数据采集卡进行采集。USB6002 型数据采集卡具有 16 位 ADC 分辨率, 最大采样率为 50 kS/s, 4 路差分通道, 具有较高的采样精度, 满足管路压力采集要求, 且可与 LabVIEW 的 NI-DAQmx 模块配套使用, 操作界面设计容易, 实际操作效率高, 具体连接方式如图 5 所示。

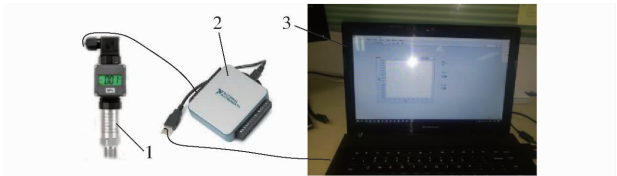


图 5 压力采集系统连接图

Fig. 5 Connection diagram of pressure acquisition system
1. 压力传感器 2. USB6002 型数据采集卡 3. LabVIEW 操作界面

在电磁阀周期性开合模拟实际播种作业情况下, 使用 USB6002 型数据采集卡实时采集管路压力, 采用临界比例度法对供肥系统进行参数整定, 管路压力设定值为 0.20 MPa, 从小到大依次增加比例系数, 直至出现压力传感器所采集的管路压力出现 4 次或 5 次等幅振荡, 如图 6 所示。

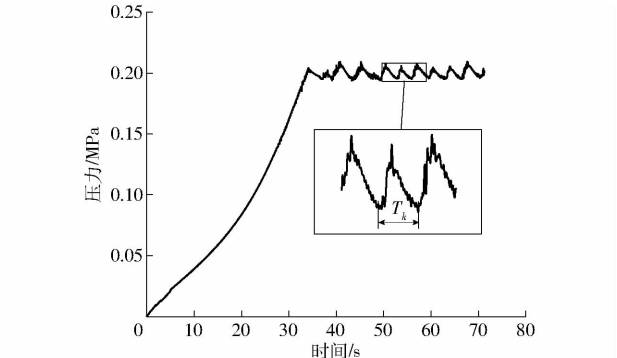


图 6 临界比例度法参数整定响应结果

Fig. 6 Response results for tuning of critical proportion method

得到图 6 等幅振荡曲线的临界比例度 δ_k 为 2.35, 对等幅振荡曲线进行处理得到临界周期 T_k 约为 3.41 s。可得比例系数 K_p 、积分系数 K_i 和微分系数 K_d 分别为 4、0.079 和 144.8。将临界比例度法整定得到的比例系数 K_p 、积分系数 K_i 和微分系数 K_d 代入增量式 PID 控制算法(式(2))中, 在进行实际试

验时发现系统极不稳定, 无论压力设定值为多少, 隔膜泵都会一直工作, 直至使管路压力达到隔膜泵的最大额定压力。经分析, 造成系统不稳定的原因主要是微分环节的加入, 微分环节在 PID 控制时起到提高系统响应速度、减小响应时间的作用, 但易造成系统振荡甚至发散。在实际试验时发现, 增大微分环节并不能减少管路压力从 0 到设定值的时间, 原因是这段时间内隔膜泵已工作在最大功率, 即使改变算法, 对实际系统的反应速度提升也不大, 因此, 本系统中的微分系数应尽量小。经实际试验的调整, 最终确定比例系数 K_p 、积分系数 K_i 和微分系数 K_d 分别为 4、0.079 和 0.012。

根据前期研究结果可知^[3], 当管路压力为 0.10 ~ 0.30 MPa 时, 液态肥能顺利喷施到土壤中。为评价 PID 算法的作业效果, 当管路压力设定值分别为 0.10、0.15、0.20、0.25、0.30 MPa 时, 得到采用 PID 算法和无 PID 算法(当压力测量值小于设定值时隔膜泵工作, 否则隔膜泵不工作)的供肥系统压力变化情况, 如图 7 所示。

为评价供肥系统管路压力的稳定性, 分别计算采用 PID 算法和无 PID 算法达到压力设定值 5 s 后的管路压力实际值相对于设定值的最大误差 e_m 、平均误差 e_a 和标准差 s 。最大误差、平均误差和标准差的计算公式分别为

$$e_m = \frac{|p_m - p_s|}{p_s} \times 100\% \tag{6}$$

$$e_a = \frac{\sum_{i=1}^n |p_i - p_s|}{np_s} \times 100\% \tag{7}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2}{n}} \tag{8}$$

式中 p_i ——压力采集值, MPa
 p_m ——压力最大值, MPa
 p_s ——压力设定值, MPa
 $\bar{p}$ ——压力平均值, MPa
 n ——采集数据总数

根据图 7, 分别计算最大误差、平均误差和标准差, 结果如表 1 所示。

由表 1 可知, 在达到压力设定值 5 s 后, 即供肥系统处于正常作业状态下, 采用 PID 算法与无 PID 算法的管路压力实际值相对于设定值的最大误差平均值分别为 5.90% 与 14.39%, 平均误差平均值分别为 1.89% 与 5.18%, 标准差平均值分别为 0.31 MPa 与 0.62 MPa, PID 算法最大误差、平均误差和标准差的平均值远远小于无 PID 算法; 压力设定

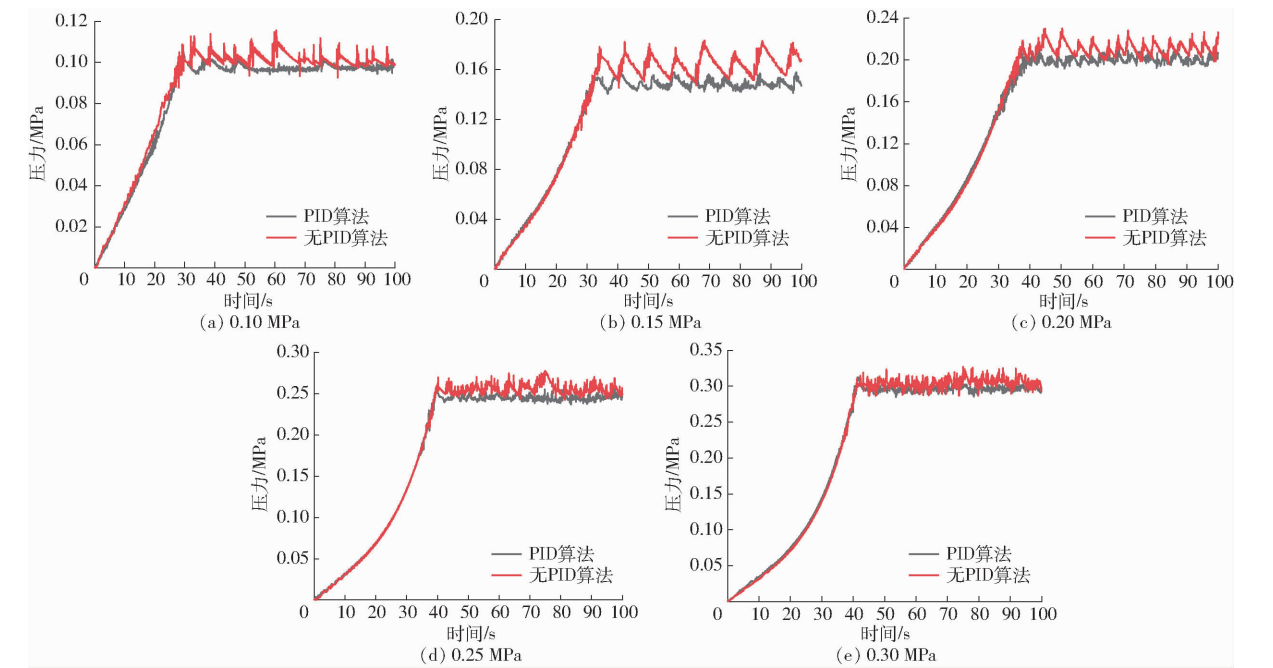


图7 不同压力设定值下PID算法与无PID算法压力变化曲线

Fig.7 Pressure changing curves for PID and non-PID algorithm at different setting pressures

表1 不同压力设定值下PID与无PID算法试验结果
Tab.1 Test results of PID and non-PID algorithm at different setting pressures

算法	压力设定值 p_s/MPa	最大误差 $e_m/\%$	平均误差 $e_a/\%$	标准差 s/MPa
PID	0.10	5.77	2.56	0.16
	0.15	6.57	2.09	0.34
	0.20	6.83	1.42	0.35
	0.25	5.21	2.03	0.35
	0.30	5.13	1.31	0.36
无PID	0.10	15.67	6.46	0.45
	0.15	22.03	9.27	0.77
	0.20	14.12	5.42	0.57
	0.25	11.13	2.74	0.64
	0.30	9.01	2.01	0.66

值相同时,应用PID算法与无PID算法的最大误差、平均误差和标准差的最大差值分别为15.46%、7.18%和0.43 MPa,最小差值分别为3.88%、0.70%和0.22 MPa,PID算法相比无PID算法更加不会出现极端的压力偏差,整体压力偏差值更小且更加稳定。产生上述结果的主要原因是采用无PID算法时,隔膜泵始终处于最大功率工作,在采样周期不够小的情况下,会出现隔膜泵供给的液态肥过多使压力急剧增大或供给液态肥过少使压力急剧下降,而PID算法通过设置PWM信号不同占空比使隔膜泵工作功率处于0和最大工作功率之间,使管路压力不会剧烈变化,并且在每个采样周期内,PID算法根据压力采集值与设定值之间的偏差又重新设置新的PWM信号占空比,实时更改隔膜泵的工作

功率,使管路压力更加稳定,另外PID算法的积分环节能有效减少稳态误差。

3.3 人机交互界面设计

人机交互界面采用广州大彩光电科技有限公司的VisualTFT软件进行开发,设置触摸屏的通信参数为:波特率9 600 b/s,8位数据,无校验。界面主要分为设置区和显示区两部分,设置区主要设置实际的作业参数,如株距、管路压力和作业速度等,株距主要与排种器挡位相匹配,管路压力根据目标施肥量进行设置,作业速度用于模拟实际播种时的速度;显示区主要显示实际作业时的实时参数,包括管路压力、作业速度和施肥量等参数,如图8所示,其中管路压力由压力传感器测得,作业速度由光电编码器采集并计算得到,施肥量由LWYC型流量传感器测得。实际作业时,根据大田土壤状况和种植区域特征设定适合的株距、管路压力和作业速度等,如图8所示。另外,为应对田间作业时的突发情况,设计有紧急停止按钮。

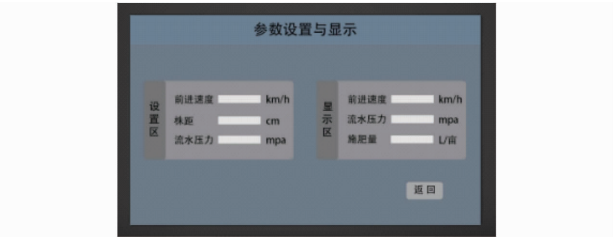


图8 触摸屏人机交互界面

Fig.8 Interactive interface of touch screen

4 台架试验

为验证基于PID算法的液态肥供肥系统在不同

前进速度、不同压力下的可靠性与稳定性,进行了室内台架试验。为了更准确地模拟实际作业状况,设计了电驱式排种系统,用于模拟不同作业速度和株距下玉米精量播种机的播种效果;并且在排种管处安装了光电传感器,用于种子检测。试验台可实现已提出的液态肥寻种对靶点施系统功能^[3],即每播下一粒种子,安装在排种管上的光电传感器将检测到种子并控制喷肥装置喷施一定量的液态肥在种子附近。

4.1 试验设备与仪器

液态肥供肥系统台架试验于 2019 年 11 月在中国农业大学工学院保护性耕作研究中心实验室进行。试验设备和仪器主要包括喷肥装置、DP-150 型隔膜泵(上海新西山实业有限公司)、USB6002 型数据采集卡(美国国家仪器有限公司)、KL2231015 型电磁阀(宁波开灵气动元件制造有限公司)、联想 G410 型便携式计算机(联想控股股份有限公司)、压力传感器(杭州美控自动化技术有限公司,测量压力范围 0~1 MPa)、DC10600F070 型触摸屏(广州大彩光电科技有限公司)、电机及驱动器(北京时代超群电器科技有限公司)、勺轮排种器(河北农哈哈机械有限公司)和光电传感器(常州市怀玉电子有限公司)。试验台如图 9 所示。

4.2 试验方法与指标

供肥系统压力的稳定性主要受到作业速度和管路压力设定值的影响。当作业速度不同时,两粒种子下落的时间不同,使得喷施频率差异很大,喷肥频率不同对管路压力的干扰不同。当管路压力设定值不同时,管路压力抵御外界压力干扰的能力也不同。另外,勺轮排种器工作时会出现重播、漏播等现象,重播漏播现象导致喷施频率会不断变化,更加接近实际作业状况。

经前期研究和预试验,设置玉米株距为 280 mm,选取管路压力设定值分别为 0.10、0.15、0.20、0.25、0.30 MPa,作业速度分别为 3、4、5 km/h 进行试验。主要的试验指标是达到压力设定值 5 s

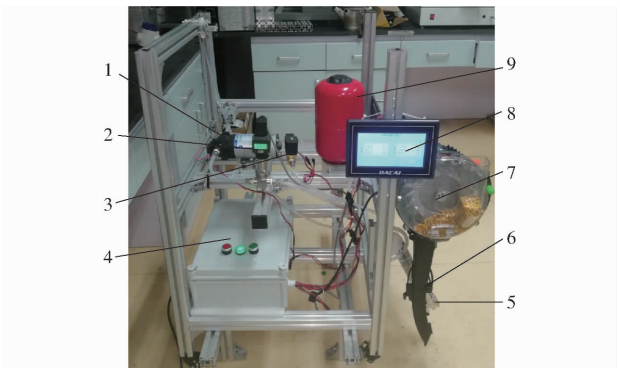


图 9 液态肥寻种对靶点施试验台

Fig.9 Test bench of detecting seeds and target-spot application of liquid fertilizer

- 1.隔膜泵 2.压力传感器 3.电磁阀 4.控制箱 5.喷肥装置
6.光电传感器 7.勺轮排种器 8.触摸屏 9.压力缓冲罐

后的管路压力实际值相对于设定值的最大误差 e_m 、平均误差 e_a 和标准差 s ,用来表征不同作业速度和管路压力设定值下供肥系统的稳定性和可靠性。

4.3 试验结果与分析

根据上述确定的作业速度与管路设定压力范围,每组试验进行 100 s,共 15 组,得到供肥系统压力变化结果(图 10)。

根据图 10 分别计算最大误差、平均误差和标准差,结果如表 2 所示。

由表 2 可知,在达到压力设定值 5 s 后,即供肥系统处于正常作业状态时,管路压力实际值相对于设定值的最大误差变化范围为 3.13%~6.49%。在作业速度分别为 3、4、5 km/h 时,最大误差值的平均值分别为 4.47%、4.72%、5.40%,可见,随着作业速度的增大,最大误差也随之增大,主要原因是随着前进速度的增大,相同株距下,会造成两粒种子之间的时间间隔变短,即喷施频率变大,而压力采集系统的采样时间是不变的,因此可能会造成管路实际压力变化但压力采集系统并没有及时反映出压力变化,使得管路实际压力过大或过小。在相同作业速度下,最大误差相差不大,说明影响最大误差的主要因素是作业速度。

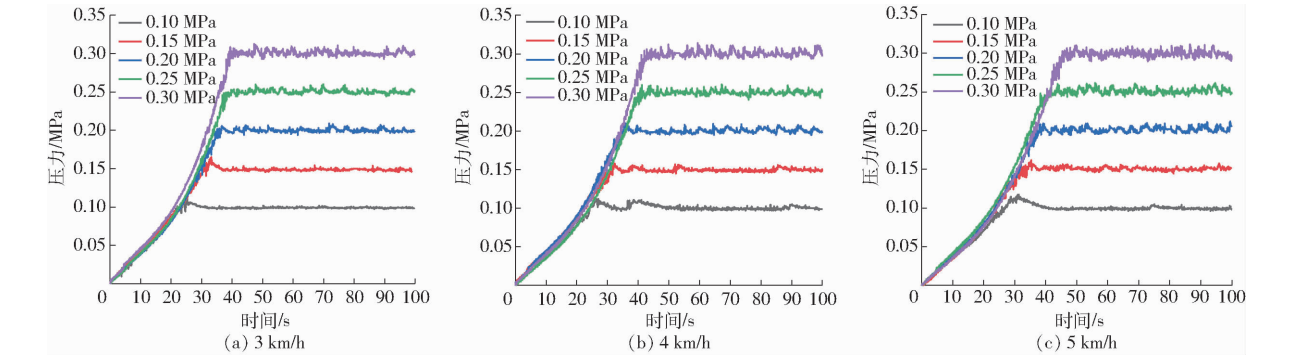


图 10 不同作业速度和压力设定值下供肥系统压力变化曲线

Fig.10 Pressure changing curves for fertilizer supply system at different operating speeds and setting pressures

表 2 不同作业速度和压力设定值下供肥系统试验结果

Tab.2 Test results of fertilizer supply system at different operating speeds and setting pressures

作业速度 $v/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	压力设定值 p_s/MPa	最大误差 $e_m/\%$	平均误差 $e_a/\%$	标准差 s/MPa
3	0.10	3.70	1.09	0.08
	0.15	3.13	1.01	0.12
	0.20	4.47	0.84	0.21
	0.25	4.18	0.78	0.26
	0.30	4.19	0.86	0.28
	0.10	5.74	1.54	0.18
4	0.15	4.37	1.31	0.20
	0.20	4.72	1.09	0.27
	0.25	4.09	0.84	0.27
	0.30	4.68	1.05	0.40
	0.10	6.49	1.24	0.15
5	0.15	5.12	1.10	0.21
	0.20	5.96	1.35	0.32
	0.25	4.64	1.15	0.36
	0.30	4.79	1.01	0.38

管路压力实际值相对于设定值的平均误差变化范围为 0.78% ~ 1.54%, 整体上压力的偏差很小, 满足供肥系统的要求。

管路压力实际值相对于设定值的标准差变化范围为 0.08 ~ 0.40 MPa。在作业速度分别为 3、4、5 km/h 时, 标准差的平均值分别为 0.19、0.26、0.28 MPa, 随着作业速度的增大, 标准差随之增大, 主要原因是随着前进速度的增大, 喷施频率变大, 而压力采集系统的采样时间是不变的, 供肥系统无法及时针对管路压力变化做出响应, 使管路实际压力波动变大。在相同作业速度下, 随着压力设定值的增大, 标准差总体上也随之增大, 主要原因是喷肥装置在不同压力下所喷出液态肥的量不同, 管路压力越大, 单次喷出的液态肥的量越多, 从而造成管路压力的波动增大, 标准差也就变大。

总体结果表明, 在不同作业速度和压力设定值下, 供肥系统均能保持管路压力的基本稳定, 满足液态肥寻种对靶点施系统对于压力稳定性的要求。

在上述试验条件下, 得到不同作业速度和压力设定值下的施肥量。由于单次喷肥时间较短, 为减少试验误差, 在每个参数组合下连续测定 10 次取平均值, 结果如表 3 所示。由表 3 可知, 相同作业速度

表 3 不同作业速度和压力设定值下的施肥量

Tab.3 Test fertilization amount at different operating speeds and setting pressures

作业速度/ $(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	压力设定值/MPa	施肥量/mL
3	0.10	5.52
	0.15	6.04
	0.20	6.66
	0.25	7.18
	0.30	8.05
	0.10	5.48
4	0.15	6.01
	0.20	6.61
	0.25	7.13
	0.30	8.02
	0.10	5.41
5	0.15	5.96
	0.20	6.58
	0.25	7.10
	0.30	7.98

下, 施肥量随着管路压力设定值的增大而增大; 相同压力设定值下, 施肥量随着作业速度增大略微减小, 整体上变化不大。总体来说, 通过改变管道压力设定值可满足不同作业环境下对施肥量的要求。

5 结论

(1) 设计了基于 PID 算法的高频间歇供肥系统, 根据供肥系统需满足液态肥在高频间歇喷施时压力波动较小、且在间歇喷射频率发生变化时仍能保证压力稳定的要求, 设计了硬件电路和软件程序, 实现了管路压力的采集与控制, 并设计了可方便设置作业参数和实时显示作业状况的人机交互界面。

(2) 采用临界比例度法对 PID 算法进行了参数整定, 经实际试验调整后确定 PID 算法的比例系数、积分系数和微分系数分别为 4、0.079 和 0.012, 对采用和不采用 PID 算法的供肥系统压力变化情况进行了对比试验, 结果表明, 采用 PID 算法的供肥系统压力更加稳定。

(3) 台架试验表明, 在不同作业速度和压力设定值下, 供肥系统压力的最大误差、平均误差和标准差分别不大于 6.49%、1.54% 和 0.40 MPa, 能保证管路压力的基本稳定, 满足液态肥寻种对靶点施系统对于压力稳定性的要求。

参 考 文 献

[1] 黄燕,汪春,衣淑娟. 液体肥料施用装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2007,38(4):85-87,102.
HUANG Yan, WANG Chun, YI Shujuan. Manufacture and the test analysis on the device of liquid fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(4): 85-87, 102. (in Chinese)

[2] YU Changchang, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Research progress of liquid fertilizer application technology and machine [J]. International Agricultural Engineering Journal, 2019, 28(3): 86-97.

- [3] JING J, RUI Y, ZHANG F, et al. Localized application of phosphorus and ammonium improves growth of maize seedlings by stimulating root proliferation and rhizosphere acidification[J]. *Field Crops Research*, 2010, 119(2-3): 355-364.
- [4] JING J, ZHANG F, RENGEL Z, et al. Localized fertilization with P plus N elicits an ammonium-dependent enhancement of maize root growth and nutrient uptake[J]. *Field Crops Research*, 2012, 133: 176-185.
- [5] 于畅畅, 王庆杰, 何进, 等. 播种期液态肥精量深施系统喷肥装置研制[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(16): 50-59.
YU Changchang, WANG Qingjie, HE Jin, et al. A spraying device of precise and deep application for liquid fertilizer during sowing[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(16): 50-59. (in Chinese)
- [6] 胡雪梅, 徐荣政. 变频恒压供水系统的设计与应用[J]. *电机与控制应用*, 2011, 38(8): 63-67.
HU Xuemei, XU Rongzheng. Design & application of variable frequency constant pressure technology in water supply system [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2011, 38(8): 63-67. (in Chinese)
- [7] 王轩, 王丙. 智能恒压供水系统的设计与节能分析[J]. *工业控制计算机*, 2019, 32(4): 23-25, 28.
WANG Xuan, WANG Bing. Intelligent constant pressure water-supply system and analysis of energy saving[J]. *Industrial Control Computer*, 2019, 32(4): 23-25, 28. (in Chinese)
- [8] 魏脐亮. 基于 STM32 的智能恒压供水及安全保护系统设计[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2018.
WEI Qiliang. Design of intelligent constant pressure water supply and safety protection system based on STM32[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [9] 张邦成, 王华振, 李森, 等. 基于 PLC 控制的恒压供水系统设计[J]. *计算机测量与控制*, 2013, 21(8): 2136-2138, 2145.
ZHANG Bangcheng, WANG Huazhen, LI Miao, et al. Based on PLC control of constant pressure water supply system design [J]. *Computer Measurement & Control*, 2013, 21(8): 2136-2138, 2145. (in Chinese)
- [10] 朱雪凌, 张娟, 许智勇, 等. 基于 PLC 的变频恒压供水系统的设计[J]. *华北水利水电学院学报*, 2013, 34(2): 87-90.
ZHU Xueling, ZHANG Juan, XU Zhiyong, et al. Design of water supplying system with variable frequency and constant pressure based on PLC[J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 2013, 34(2): 87-90. (in Chinese)
- [11] 白蕾, 孟娇娇, 辛旗. 基于 PLC 与变频器的恒压供水系统设计[J]. *电子测量技术*, 2018, 41(4): 61-65.
BAI Lei, MENG Jiaojiao, XIN Qi. Constant pressure water supply system based on PLC and frequency converter [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2018, 41(4): 61-65. (in Chinese)
- [12] 王丽丽, 王成荣. 基于模糊自适应 PID 的供水电机调速系统研究[J]. *电子测量技术*, 2019, 42(12): 60-65.
WANG Lili, WANG Chengrong. Research on speed control system of water supply motor based on fuzzy adaptive PID [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2019, 42(12): 60-65. (in Chinese)
- [13] 梁栋, 徐锦. 基于 PID 控制的变频恒压供水系统设计[J]. *电子测试*, 2016(16): 149-150.
LIANG Dong, XU Jin. Design of variable frequency constant pressure water supply system based on PID control [J]. *Electronic Test*, 2016(16): 149-150. (in Chinese)
- [14] 岳丽芳, 韩一杰. 基于模糊 PID 控制的变频恒压供水系统[J]. *冶金自动化*, 2017, 41(6): 17-21.
YUE Lifang, HAN Yijie. The various frequency constant pressure water supply system based on fuzzy PID control [J]. *Metallurgical Industry Automation*, 2017, 41(6): 17-21. (in Chinese)
- [15] 李福顺. 基于模糊-PID 控制策略的变频恒压供水系统的仿真研究[J]. *机械与电子*, 2016, 34(6): 52-55.
LI Fushun. Research on simulation of variable frequency and constant pressure supporting water system on the basis of Fuzzy-PID control strategy [J]. *Machinery & Electronics*, 2016, 34(6): 52-55. (in Chinese)
- [16] 杨柏松, 熊建斌, 李长庚. 基于变频器内置 PID 模块的恒压供水系统[J]. *电子设计工程*, 2015, 23(20): 161-165.
YANG Bosong, XIONG Jianbin, LI Changeng. Built-in PID module based inverter constant pressure water supply system [J]. *Electronic Design Engineering*, 2015, 23(20): 161-165. (in Chinese)
- [17] 梁春英, 衣淑娟, 王熙, 等. 变量施肥控制系统 PID 控制策略[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(7): 157-162.
LIANG Chunying, YI Shujuan, WANG Xi, et al. PID control strategy of the variable rate fertilization control system [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(7): 157-162. (in Chinese)
- [18] 冯慧敏, 高娜娜, 孟志军, 等. 基于自动导航的小麦精准对行深施追肥机设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(4): 60-67.
FENG Huimin, GAO Na'na, MENG Zhijun, et al. Design and experiment of deep fertilizer applicator based on autonomous navigation for precise row-following [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(4): 60-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180407&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.007. (in Chinese)
- [19] 高原源, 王秀, 杨硕, 等. 播种机气动式下压力控制系统设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(7): 19-29, 83.
GAO Yuanyuan, WANG Xiu, YANG Shuo, et al. Design and test of pneumatic downforce control system for planting [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(7): 19-29, 83. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190702&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.002. (in Chinese)
- [20] HE Xiantao, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Development of an electric-driven control system for a precision planter based on a closed-loop PID algorithm[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 136: 184-192.

Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47 (Supp.) : 163 – 169. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s025&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.025. (in Chinese)

[16] 邹忠君,孙艳华.玉米一次性分层缓释施肥技术试验研究[J].农学学报,2011,1(4):6-9.
ZOU Zhongjun, SUN Yanhua. A test on slow-release fertilizer one-time stratification application technique in maize [J]. Journal of Agriculture, 2011, 1(4): 6-9. (in Chinese)

[17] 王春虎,杨文平.不同施肥方式对夏玉米植株及产量性状的影响[J].中国农学通报,2011,27(9):305-308.
WANG Chunhu, YANG Wenping. Character studying in maize plants and yield impact about different fertilization methods [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(9): 305-308. (in Chinese)

[18] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册(上册)[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007.

[19] 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. Fertilizer filling performance analysis and experimental study of bivariate fertilizer drainage system [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020,42(6): 104-110. (in Chinese)

[20] 常金丽,张晓辉.2BQ-10型气流一阶集排式排种系统设计与试验[J].农业工程学报,2011,27(1):136-141.
CHANG Jinli, ZHANG Xiaohui. Design and test of one-step centralized type pneumatic seeding system [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 136-141. (in Chinese)

[21] 吴建章,李东森.通风除尘与气力输送[M].北京:中国轻工业出版社,2018.

[22] 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)

[23] 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)

[24] KUMAR P, SAN S M. CFD study of the effect of Venturi convergent and divergent angles on low pressure wet gas metering [J]. Journal of Applied Sciences, 2014, 14(22):3036-3045.

[25] 孟凡华.施肥穴植器:201620981376.X[P].2017-02-22.

(上接第 53 页)

[21] 杨硕,王秀,高原源,等.电动机驱动玉米气吸排种器总线控制系统设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(2):57-67.
YANG Shuo, WANG Xiu, GAO Yuanyuan, et al. Design and experiment of motor driving bus control system for corn vacuum seed meter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(2):57-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190207&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.007. (in Chinese)

[22] 张春岭,吴荣,陈黎卿.电控玉米排种系统设计与试验[J/OL].农业机械学报,2017,48(2):51-59.
ZHANG Chunling, WU Rong, CHEN Liqing. Design and test of electronic control seeding system for maize [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(2):51-59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170207&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.007. (in Chinese)

[23] 段力学.PID参数整定方法分类与概述[J].现代计算机(专业版),2012(7):23-26.
DUAN Lixue. Category and summarization of PID parameters tuning methods[J]. Modern Computer, 2012(7):23-26. (in Chinese)

[24] 叶政.PID控制器参数整定方法研究及其应用[D].北京:北京邮电大学,2016.
YE Zheng. PID controller parameter tuning method and application [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications,2016. (in Chinese)

[25] 刘霞,冯元,王亚云.基于衰减曲线法整定PID调节器参数仿真技术研究[J].国外电子测量技术,2019,38(8):101-104.
LIU Xia, FENG Yuan, WANG Yayun. Research on simulation technology of PID regulator parameters tuning based on attenuation curve method[J]. Foreign Electronic Measurement Technology,2019,38(8):101-104. (in Chinese)

[26] 孙跃光,林怀蔚,周华茂,等.基于临界比例度法整定PID控制器参数的仿真研究[J].现代电子技术,2012,35(8):192-194.
SUN Yueguang, LIN Huaiwei, ZHOU Huamao, et al. Simulation study on setting of PID controller parameters according to critical proportioning methods[J]. Modern Electronics Technique,2012,35(8):192-194. (in Chinese)