

三轮高架作业车玉米变量施肥系统设计与试验

袁玲合^{1,2} 古冬冬^{1,2} 王万章^{1,2} 种东风^{1,2} 王淼森^{1,2} 陈 蒋^{1,2}

(1. 河南农业大学机电工程学院, 郑州 450002; 2. 河南粮食作物协同创新中心, 郑州 450002)

摘要: 针对玉米追施肥机械田间作业通过性及施肥量精确控制问题, 设计了一种三轮高架作业车变量施肥系统, 该系统由机械排肥系统、液压传动系统和电控调速系统 3 部分组成。电控调速系统采用闭环控制, 以 STM32F103R8T6 微处理器为控制核心, 结合设置的施肥参数和检测到的速度信号, 采用增量式 PID 算法控制施压系统中的电液比例流量阀来调节排肥轴的转速, 实现对施肥量的控制, 并显示施肥参数、作业车前进速度和排肥轴转速。室内试验表明, 排肥槽工作长度为 30 mm, 排肥量平均变异系数最小, 确定了该工作长度下排肥量和排肥轴转速的拟合方程; 整定 PID 控制参数, 确定了 K_p 为 1.2, K_i 为 0.02, K_d 为 0.4。田间试验表明, 施肥量平均偏差为 0.84%, 平均变异系数为 1.852%, 实现了对玉米机械化精确追肥。

关键词: 玉米; 高架作业车; 变量施肥; 电控调速系统; PID 控制

中图分类号: S224.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)S0-0170-06

Design and Experiment of Variable Rate Fertilization System of Tri-wheel High Frame Operation Vehicle

Yuan Linghe^{1,2} Gu Dongdong^{1,2} Wang Wanzhang^{1,2} Chong Dongfeng^{1,2} Wang Miaosen^{1,2} Chen Jiang^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

2. Collaborative Innovation Center of Henan Grain Crops, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In view of the problems of traffic ability and the precise control of fertilizer application of the additional fertilizer machinery, the variable rate fertilization system of tri-wheel high frame operation vehicle was designed. It was composed of mechanical fertilization system, hydraulic system and electronic speed control system. Its trafficable height was 1.2 m, and could apply fertilizer to four lines of corn at the same time. During operation, the hydraulic system powered hydraulic motor to drive the outer groove wheel type fertilizers. The control of fertilizer application was realized by electronic speed control system adjusting the rotational speed of fertilizer shaft, using closed-loop control and the microprocessor STM32F103R8T6 core, combining the setting parameters such as dose rate and the speed signals being detected to calculate the advancing velocity of high frame operation vehicle and the theoretical rotational speed rotational and the actual rotational speed of fertilizer shaft and displaying them, adopting the incremental PID algorithm to control electro-hydraulic proportional flow valve. The laboratory test showed that average coefficient of variation of the fertilizer amount was minimum when fertilizer trough work length was 30 mm. The fitting equation of fertilizing amount and rotational speed was determined. PID parameters was set as proportional coefficient of 1.2, the integral coefficient of 0.02, and the differential coefficient of 0.4. The field experiment showed that the average deviation of fertilizer application was 0.84%, the average coefficient of variation was 1.852%, realizing mechanized and precise additional fertilizer for corn.

Key words: corn; high frame operation vehicle; variable rate fertilization; electronic speed control system; PID control

收稿日期: 2016-07-10 修回日期: 2016-08-20

基金项目: 河南省现代农业产业技术体系玉米全程机械化岗位专项(S10-02-G07/2016)

作者简介: 袁玲合(1990—),男,硕士生,主要从事智能农业装备研究,E-mail: linghe_y@126.com

通信作者: 王万章(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事农业工程装备、机电一体化研究,E-mail: wangwz@126.com

引言

黄淮海地区多为冬小麦、夏玉米两作生产,麦收后时间紧,玉米多采用机械免耕,播种同时施一定数量种肥^[1],因不施基肥,不能满足玉米在不同生育期对养分的需求,因此追肥对提高玉米产量有重要作用。但由于追肥期玉米茎秆高,缺少玉米专用的精确追肥机械,已成为玉米机械化生产的技术瓶颈。

国外变量施肥技术发展比较早,美国 Case 公司种肥同施播种机采用电控液压马达作为变量播种施肥执行机构;美国 John Deer 等种肥同施播种机普遍采用电控机械无级变速器变量施肥执行机构^[2]。国内变量施肥驱动控制方法主要有:步进电机驱动、液压马达驱动、电控无级变速器驱动、改变排肥槽工作长度实现变量施肥以及液压马达驱动与改变排肥槽工作长度相结合,实现双变量施肥^[3-10]。但是我国应用变量施肥技术的玉米追肥机械比较少,针对上述问题,本文设计一种三轮高架作业车变量施肥系统,实现动力机械行走速度变化时,实时调节施肥量。

1 结构组成与工作原理

变量施肥系统由机械排肥系统、液压系统和电控调速系统 3 部分组成,如图 1 所示。三轮高架作业车采用电驱动,发动机驱动发电机,为驱动前轮和后轮的电动机供电;通过高度为 1.2 m,后轮轮距为 2.4 m,施肥作业时,前后轮行驶在宽度 0.6 m 玉米行距间,可同时对 4 行玉米进行追肥,肥料距离玉米植株行 0.1 m,施肥深度为 0.1 m。机械排肥系统主要由肥箱、外槽轮排肥器、排肥轴和链传动等组成,液压传动系统中的液压马达通过链传动驱动排肥器,将肥箱内的肥料排出,经排肥管和施肥铲落入沟内,覆土轮进行覆土;作业车到达地头时,提升液压缸通过连杆机构将机械排肥系统、施肥铲和覆土轮提升,待作业车完成转弯,施肥铲下降,强压入土。电控调速系统通过控制液压传动系统中的电液比例流量阀来调节液压马达转速,实现对施肥量的控制。

2 液压传动系统设计

液压传动系统由油箱、液压泵、电动机、比例流量阀、液压马达、溢流阀和冷却器等组成,液压传动系统原理图如图 2 所示。依据外槽轮排肥器的性能选择液压元件^[11],液压泵(CBK-F6 型齿轮泵)和液压油箱(25 L)固装在高架作业车机架上;液压马达(BMR-50 型摆线马达)固定安装提升支撑架上,通过链传动与排肥轴连接,将动力传递给 4 个排肥

器。比例流量阀选用配置有集成比例放大器的 BQC-AE02-12/12/I-80 型直动式比例流量阀,其工作电压 24 V,控制信号为 4~20 mA 电流信号。

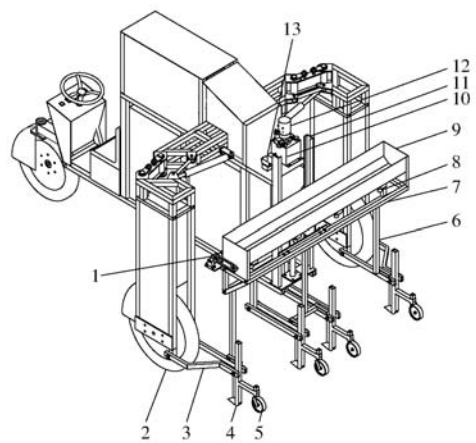


图 1 三轮高架作业车变量施肥系统结构图

Fig. 1 Structure of tri-wheel high frame operation vehicle

1. 液压马达 2. 作业车后轮 3. 牵引拉杆 4. 施肥铲 5. 覆土轮 6. 提升拉杆 7. 提升支撑架 8. 排肥器 9. 肥箱 10. 液压油箱 11. 提升导轨 12. 电动机 13. 电液比例流量阀

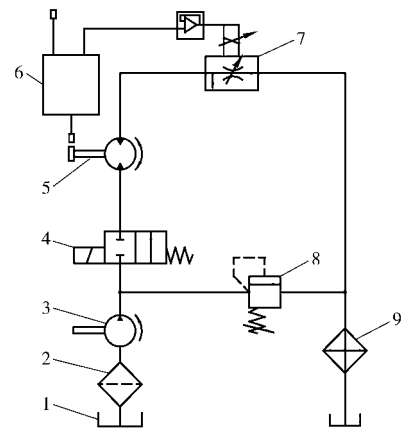


图 2 液压传动系统原理图

Fig. 2 Schematic of the hydraulic drive system

1. 油箱 2. 过滤器 3. 液压泵 4. 两位两通电磁阀 5. 液压马达 6. 微处理器 7. 电液比例流量阀 8. 溢流阀 9. 冷却器

在工作过程中,电控调速系统输出的模拟电流信号经比例放大器放大后,为流量阀的比例电磁铁提供驱动电流,通过比例电磁铁驱动阀芯使阀芯与阀体之间形成节流窗口,改变液压马达输入流量,从而控制排肥轴的转速。比例流量阀内设一个机械式压力补偿器,让节流窗口两侧的压力差保持恒定,使流量不受负载变化的影响,保证液压系统的稳定性。比例流量阀自带故障报警输出,正常工作时输出 24 V 电压,故障时输出 0 V 电压。

3 电控调速系统设计

电控调速系统通过人机交互界面设定待施肥地块的施肥量、作业车后轮直径和有效幅宽,速度传感

器检测作业车后轮和排肥轴转速,并将信号传输至微处理器;微处理器结合输入的参数,计算出作业车前进速度和排肥轴的理论转速,与反馈至微处理器的排肥轴实际转速结合,通过 PID 控制算法控制输入电液比例流量阀的电流大小,改变液压马达输入流量,实现对排肥轴转速的控制,使实际施肥量与设定值一致,并显示施肥参数、作业车前进速度和排肥轴实际转速。系统通过控制排肥轴转速来调节排肥量,使单位面积的施肥量不受作业车前进速度和液压马达转速差异的影响,从而实现整个地块均匀施肥^[12]。电控调速系统结构框图如图 3 所示。

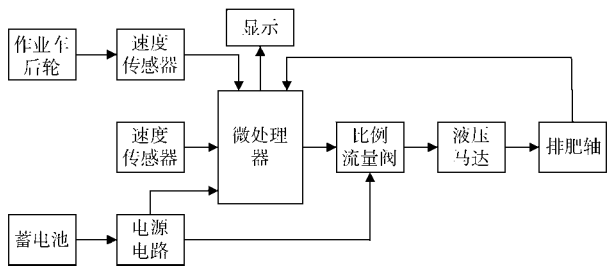


图 3 电控调速系统结构框图

Fig. 3 Electronic speed control system block-diagram

3.1 硬件设计

电控调速系统硬件由 STM32F103R8T6 微处理器、速度传感器与测速齿盘、电压转换电流模块、人机交互界面 (LCD 显示屏和键盘)、电源模块等组成。其中 STM32F103R8T6 微处理器使用高性能的 ARM Cortex-M3 32 位的 RISC 内核,工作频率为 72 MHz^[13],内置高速存储器 (64 KB 的闪存和 20 KB 的 SRAM)。速度传感器选用 WSC-12N 型单通道齿轮传感器,作业车后轮测速齿盘齿数为 60,排肥轴测速齿盘齿数为 30;安装速度传感器时,使速度传感器与齿面垂直,且距离齿面 1~3 mm,保证速度传感器感应测速齿盘上的齿顶或齿根,发出脉冲信号。利用电压转电流模块将 0~5 V 电压转换为 4~20 mA 电流,电流输出端接上负载后,模块指示灯为红色。

3.2 软件设计

软件是电控调速系统的核心,设计过程中通过 Keil uVision 4 集成开发环境进行软件开发。程序流程图如图 4 所示。

系统上电复位完成初始化,读取设定的施肥参数,之后单片机开始采集速度信号,计算排肥轴理论转速与实际转速。经过试验确定转速控制周期为 1 s,系统每间隔 1 s 进行 PID 控制运算,调节控制信号,并显示排肥轴转速和作业车前进速度^[14]。在工作过程中比例流量阀出现故障,则电控系统关闭输出并停机报警。

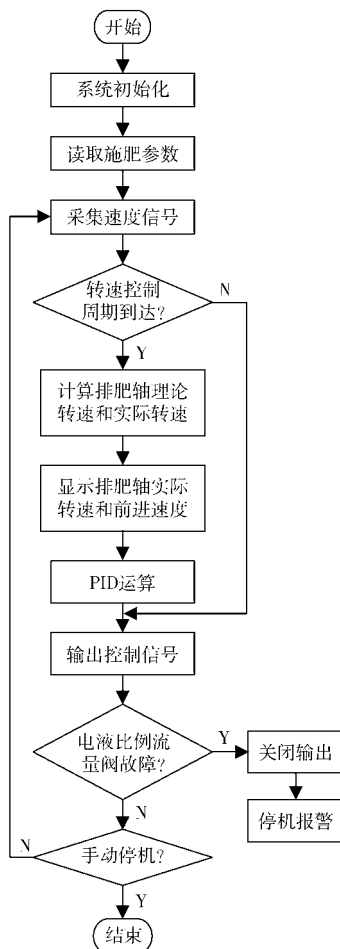


图 4 程序流程图

Fig. 4 Program flow chart

3.2.1 速度计算

作业车前进速度、排肥轴实际转速与传感器输出的脉冲数成正比,测量出单位时间内的脉冲数,即可测算出作业车前进速度和排肥轴实际转速。排肥轴实际转速为

$$n = \frac{60N_1}{z_1 t} \quad (1)$$

式中 N_1 ——马达速度传感器单位时间内脉冲数
 z_1 ——马达测速齿盘转一周发出的脉冲数
 t ——单位时间, min

高架作业车前进速度计算式为

$$v = \frac{216\pi DN_2}{z_2 t} \quad (2)$$

式中 D ——后轮直径, m
 N_2 ——后轮速度传感器单位时间内脉冲数
 z_2 ——后轮测速齿盘转一周发出的脉冲数

在变量施肥过程中,排肥轴转速受单位面积施肥量、作业车行驶速度和排肥器工作长度的影响。在某一确定工作开度下,排肥器的排肥量与转速呈线性关系^[15],即

$$q = kn + b \quad (3)$$

式中 q ——转速 n 下 个排肥器的排肥量, g/min
 k, b ——常数
单位面积施肥量 Q 为

$$Q = \frac{0.6qN}{vB} \tag{4}$$

式中 N ——排肥器个数
 B ——有效幅宽, m
将数值代入式(2)~(4)求得排肥轴理论转速
$$n' = \frac{9.94752QN_2 - b}{kt} \tag{5}$$

3.2.2 PID 控制

PID 控制策略已经广泛应用电液比例控制技术中,使控制系统具有稳态精度高、动态响应快、超调小、抗负载干扰能力强等性能。为了提高系统的排肥性能,采用 PID 控制算法对液压马达转速进行调节以实现精确施肥,液压马达速度闭环控制原理如图 5 所示。PID 控制规律的表达式为

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \tag{6}$$

式中 $e(t)$ ——控制偏差,作为 PID 控制器的输入
 $u(t)$ ——PID 控制器的输出
 K_p ——比例系数
 T_i ——积分时间常数
 T_d ——微分时间常数

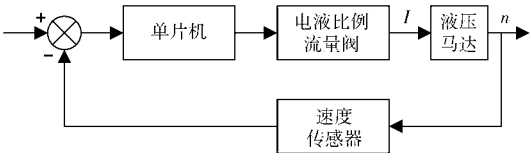


图 5 液压马达速度闭环控制原理图

Fig. 5 Closed-loop control principle diagram of the speed of hydraulic motor

控制器的输入量为传感器检测到的排肥轴实际转速与理论速度的偏差信号,输出量为控制液压马达转速的电流信号。在实际使用过程中,必须将控制规律进行离散化^[16]。离散化后的增量 PID 算法为

$$\Delta u(t) = u(m) - u(m-1) = K_p(e(m) - e(m-1)) + K_i e(m) + K_d(e(m) - 2e(m-1) + e(m-2)) \tag{7}$$

式中 m ——采样序号 T ——采样周期
 K_i ——积分系数,等于 $\frac{T}{T_i}$
 K_d ——微分系数,等于 $\frac{T_d}{T}$

4 试验

为了使变量施肥系统正常工作,前期利用液压

工作站为液压马达提供动力(液压泵型号:PV2R1-10-F-R),对排肥轴转速与排肥量的关系进行标定,并整定 PID 控制参数。试验现场如图 6 所示。

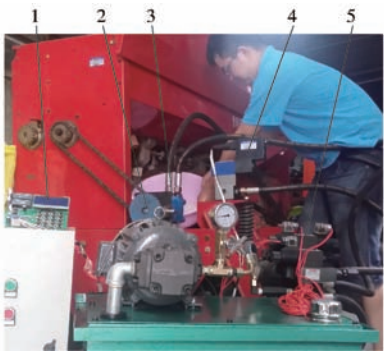


图 6 变量施肥试验

Fig. 6 Variable rate fertilization test

1. 电控调速系统 2. 速度传感器及齿盘 3. 液压马达 4. 电液比例流量阀 5. 液压站

4.1 排肥量与排肥轴转速标定

编写程序使电控调速系统输出电流在 6~14 mA 范围内以 1 mA 为梯度变化,通过键盘调节输出电流大小,对空载时液压马达转速与电流的关系进行标定,如表 1。

表 1 空载下液压马达转速与电流的关系
Tab. 1 Hydraulic motor speed and current under no-load running

电流/mA	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
转速/(r·min ⁻¹)	10	22	44	68	86	102	114	126	134	134

由表 1 可知输出电流在 6~13 mA 范围内变化时,起到调节液压马达转速的作用,超过 13 mA,受液压系统流量的影响液压马达转速不再发生变化。

考虑到排肥槽工作长度对排肥量的影响,分别对 20、30、40、50 mm 工作长度下排肥量与转速之间关系进行标定。试验肥料选用尿素(总氮含量大于 46%,颗粒直径范围:0.85~2.8 mm,含水率小于 12%)。所选用排肥器为 7 槽外槽轮排肥器,外端直径为 68 mm,最大工作长度为 50 mm。

待排量稳定后测量,记录确定排肥槽工作长度下转速和排肥量数据,每组进行 5 次重复试验。不同排肥槽工作长度时转速与排肥量之间拟合关系如图 7 所示。不同工作长度排肥量变异系数与转速之间的关系如图 8 所示。

由图 7 可知,排肥槽工作长度在 20、30、40、50 mm 状态下,排肥量与转速之间均呈线性关系;由图 8 可知,排肥槽工作长度为 30 mm 时,其平均变异系数最小,为 0.564%,故选定排肥槽工作长度为 30 mm,该工作长度下排肥量与转速之间拟合关系式为

$$q = 38.292n - 41.971 \tag{8}$$

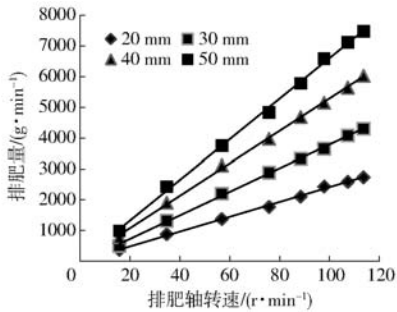


图7 不同排肥槽工作长度时转速与排肥量之间拟合关系

Fig.7 Fitting relations of fertilizing amount and speed of different fertilizer trough work length

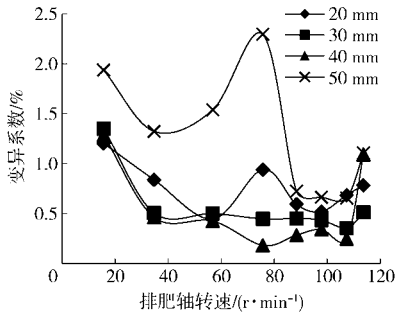


图8 不同排肥槽工作长度时排肥量变异系数与转速之间关系曲线

Fig.8 Relations of C. V. and speed of different fertilizer trough work length

4.2 PID 参数整定

应用PID控制的关键在于调整参数 K_p 、 K_i 、 K_d 。比例系数 K_p 太小,系统调节量不够,输出量变化缓慢,调节时间过长;比例系数 K_p 过大造成排肥轴转速忽高忽低,来回振荡,适当的比例系数 K_p 使系统反应灵敏,减小稳态误差。合理的积分参数 K_i 和微分参数 K_d 能消除稳态误差,提高控制精度,增强系统稳定性^[17]。经过反复调试确定: $K_p=1.2$, $K_i=0.02$, $K_d=0.4$ 。PID控制的转速跟随曲线如图9所示。

由图9可知,PID控制的排肥轴转速变化响应快,稳定后实际转速在目标转速上下小范围波动,幅度不超过1 r/min,在控制误差范围内,满足要求。

4.3 田间作业试验

在河南粮食作物协同创新中心进行追施肥试验,参照JB/T 7864—2013《中耕追肥机》试验方法,测试施肥量偏差和变异系数。设置施肥量:150~750 kg/hm²,试验肥料选用尿素。施肥量如表2所示。

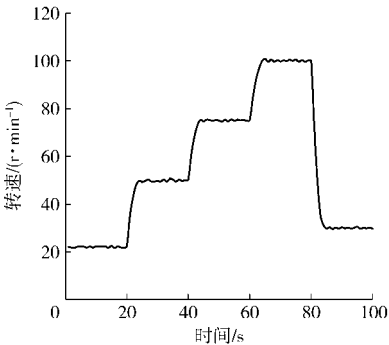


图9 PID控制的转速跟随曲线

Fig.9 Speed following curve under PID control

表2 施肥量测定结果

Tab.2 Experiment result of fertilizer application						
设定施肥量/ (kg·hm ⁻²)	实际施肥量					变异系数/%
	最大值/ (kg·hm ⁻²)	最小值/ (kg·hm ⁻²)	平均值/ (kg·hm ⁻²)	偏差/ %		
150	155.6	144.8	151.6	1.1		3.92
300	305.7	297.7	302.4	0.8		1.38
450	460.4	445.0	453.2	0.7		1.71
600	610.5	601.8	595.8	0.8		1.33
750	765.1	744.2	756.0	0.8		1.42

由表2可知三轮高架作业车变量施肥系统的施肥量平均偏差为0.84%,平均变异系数为1.952%;设置施肥量为150 kg/hm²时,排肥轴转速过低,排肥性能不稳定,导致实际施肥量变异系数变大。

5 结论

(1)针对玉米追施肥机械田间作业通过性及施肥量精确控制问题,设计了一种三轮高架作业车变量施肥系统,田间作业试验表明,追施肥量控制范围为150~750 kg/hm²,施肥量平均偏差为0.84%,平均变异系数为1.952%,实现了玉米的机械化精准变量追肥。

(2)本系统采用了电液比例控制技术,利用闭环控制系统和增量式PID算法调节排肥轴转速,实现了对排肥量的控制,并确定了比例系数 K_p 为1.2,积分系数 K_i 为0.02,微分系数 K_d 为0.4;试验结果显示,变量施肥系统响应快速。

(3)在试验过程中,PID控制排肥轴转速稳定以后出现小范围波动,虽然幅度不超过1 r/min,在控制误差范围内,但今后仍需改进控制算法,提高施肥精度。

参 考 文 献

1 冉云亮,李连合,王万章,等.小麦玉米两用免耕施肥播种机的设计研究[J].河南农业大学学报,2015,49(5):666-670.
RAN Yunliang, LI Lianhe, WANG Wanzhang, et al. Design of wheat and corn dual-purpose no tillage fertilizing and seeding machine[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2015,49(5):666-670. (in Chinese)

2 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)
- 3 张书慧, 齐江涛, 廖宗建, 等. 基于 CPLD 的变量施肥控制系统开发与应用[J]. 农业工程学报, 2010,26(8):200–204. ZHANG Shuhui, QI Jiangtao, LIAO Zongjian, et al. Research and application of control system for variable rate fertilizer applicator based on CPLD [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8):200–204. (in Chinese)
- 4 刘阳春, 张小超, 伟利国, 等. 一种变量施肥技术的实现及其台架试验[J]. 农业机械学报, 2010,41(9):159–162. LIU Yangchun, ZHANG Xiaochao, WEI Liguoguo, et al. Design and experiment of a variable rate fertilization control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(9):159–162. (in Chinese)
- 5 怀宝付, 梁春英, 王熙, 等. 变量施肥控制系统设计[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2011,34(4):68–71. HUAI Baofu, LIANG Chunying, WANG Xi, et al. Design of control system of variable rate fertilization [J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2011,34(4):68–71. (in Chinese)
- 6 李爱传, 王熙, 李琳, 等. 电控液压马达驱动控制器的研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2009,21(1):66–68. LI Aichuan, WANG Xi, LI Lin, et al. Study on the electronically controlled hydraulic motor drive controller [J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 2009, 21(1):66–68. (in Chinese)
- 7 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)
- 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 吴金林, 张立新, 喻俊志, 等. 双变量施肥液压调速系统的设计及仿真[J]. 机床与液压, 2014,42(5):80–85. WU Jinlin, ZHANG Lixin, YU Junzhi, et al. Design and simulation for hydraulic sleepless speed regulation system of bivarible fertilizing application[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2014,42(5):80–85. (in Chinese)
- 11 刘文浩, 王熙. 变量施肥液压驱动控制系统硬件设计[J]. 农机化研究, 2015,37(10):235–238. LIU Wenhao, WANG Xi. Variable rate fertilization hydraulic drive control system design and control system [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(10):235–238. (in Chinese)
- 12 陈广大, 王悦刚, 陈思睿, 等. 基于 ARM 的精确变量施肥控制系统的设计[J]. 中国农机化学报, 2013,34(4):130–133. CHEN Guangda, WANG Yuegang, CHEN Sirui, et al. The design of precise variable rate fertilizer control system based on ARM [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013,34(4):130–133. (in Chinese)
- 13 廖懿华, 张铁民, 廖贻泳. 基于模糊-比例积分偏差修正的多旋翼飞行器姿态测算系统[J]. 农业工程学报, 2014,30(20):19–27. LIAO Yihua, ZHANG Tiemin, LIAO Yiyong. Multi-rotor aircraft attitude detection system based on fuzzy-proportion integration deviation correction [J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(20):19–27. (in Chinese)
- 14 陈广大, 夏凯, 陈思睿, 等. 基于单片机的电动变量施肥装置控制系统设计[J]. 农机化研究, 2012,34(4):106–109. CHEN Guangda, XIA Kai, CHEN Sirui, et al. The design of controlling system for variable rate fertilizer applicator based on microcontroller [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012,34(4):106–109. (in Chinese)
- 15 张书慧, 马成林, 杜巧玲, 等. 精确农业自动变量施肥机控制系统设计与实现[J]. 农业工程学报, 2004,20(1):113–116. ZHANG Shuhui, MA Chenglin, DU Qiaoling, et al. Design of control system of variable rate fertilizer applicator in precision agriculture [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1):113–116. (in Chinese)
- 16 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):101–105. 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):101–105. (in Chinese)
- 17 AHN K K, TRUONG D Q. Online tuning fuzzy PID controller using robust extended Kalman filter [J]. Journal of Process Control, 2009,19(6): 1011–1023.