

甄文斌, 王聪, 杨秀丽, 等. 水稻液体肥变量施用调节系统设计与试验 [J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(4): 577-584.
ZHEN Wenbin, WANG Cong, YANG Xiuli, et al. Design and experiment on the variable application regulation system of liquid fertilizer in rice [J]. Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(4): 577-584.

水稻液体肥变量施用调节系统设计与试验

甄文斌[✉], 王聪, 杨秀丽, 邢航, 姚志强, 齐龙[✉]

(华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】设计一种机电式流量调节阀, 与已研制的气力引射式施肥器集成构建液体肥变量施用调节系统, 实现水稻近根部微小流量液体肥精准施用。【方法】通过试验标定了系统质量流率理论模型, 建立控制系统传递函数模型, 设计了基于模糊推理的 PID 控制器结构、规则和初始参数; 通过仿真试验, 分析了 PID 和模糊 PID 控制的调控响应能力。【结果】仿真试验结果表明, 模糊 PID 控制阶跃信号响应超调量、调节时间和稳态误差分别为 0.12%、2.51 s 和 0.007, 与 PID 控制的对应值 42.90%、4.44 s 和 0.010 相比均较低, 表明模糊 PID 控制动态调节和稳定性更好; 在幅值为 0.5、持续时间为 0.1 s 的脉冲信号干扰下, 模糊 PID 控制的调节时间为 0.61 s, 比 PID 控制 (1.67 s) 更短, 具有更强的抗干扰能力。性能试验结果表明, 10 种目标质量流率条件下, 模糊 PID 控制的质量流率绝对误差均低于 PID 控制, 控制精度为 93.93%~96.88%, 高于 PID 控制 (90.00%~95.21%); 在施肥量变化时, 模糊 PID 控制的超调量为 12.2%, 上升时间、调节时间和峰值时间分别为 1.5、10.7 和 1.7 s, 均低于 PID 控制的 17.4%、2.1 s、13.3 s 和 2.3 s。【结论】基于模糊 PID 控制的水稻液体肥变量施用调节系统具有较高的质量流率控制精度和跟踪性能, 为研制水稻田液体肥变量施肥装备奠定了基础。

关键词: 水稻; 液体肥; 变量施用; 模糊 PID 控制; 精准施肥; 质量流率

中图分类号: S224; S511; TP273

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2023)04-0577-08

Design and experiment on the variable application regulation system of liquid fertilizer in rice

ZHEN Wenbin[✉], WANG Cong, YANG Xiuli, XING Hang, YAO Zhiqiang, QI Long[✉]

(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】 In order to achieve accurate application of micro flow liquid fertilizer near rice root, an electromechanical flow regulating valve was designed and integrated with the developed pneumatic ejector fertilizer applicator to construct a variable application regulation system of liquid fertilizer. 【Method】 The theoretical model of system mass flow rate was calibrated through experiments, and the transfer function model of control system was established. The structure, rules and initial parameters of the PID controller based on fuzzy reasoning (fuzzy PID control) were designed. The regulatory response capabilities of PID control and fuzzy PID control were compared through simulation experiment. 【Result】 The simulation experimental results showed that the overshoot, adjustment time, and steady-state error of step signal response for fuzzy PID

收稿日期: 2023-03-29 网络首发时间: 2023-05-24 15:54:10

首发网址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/44.1110.S.20230523.1531.002.html>

作者简介: 甄文斌, 高级实验师, 硕士, 主要从事现代农业技术装备研究, E-mail: wenbinzhen@scau.edu.cn; 通信作者: 齐龙, 研究员, 博士, 主要从事现代农业技术与智能装备研究, E-mail: qilong@scau.edu.cn

基金项目: 国家水稻产业技术体系 (CARS-01-47); 国家自然科学基金 (51875217); 岭南现代农业科学与技术广东省实验室资助项目 (NT2021009)

control were 0.12%, 2.51 s, and 0.007 respectively, which were lower than 42.9%, 4.44 s, and 0.010 of PID control, and suggested fuzzy PID control had better dynamic adjustment and stability. Under interference of pulse signal with amplitude of 0.5 and duration of 0.1 s, the adjustment time of fuzzy PID control was 0.61 s, which was less than 1.67 s of PID control, and had stronger anti-interference ability. The performance test showed that under ten-target mass flow rate condition, the absolute error of mass flow rate of fuzzy PID control was lower than that of PID control, with a control accuracy of 93.93% to 96.88%, which was higher than 90.00% to 95.21% accuracy of PID control. When the fertilizer amount changed, the average overshoot was 12.2%, and rise time, adjustment time and peak time of fuzzy PID control were 1.5, 10.7 and 1.7 s respectively, which were lower than 17.4%, 2.1 s, 13.3 s and 2.3 s of PID control. 【Conclusion】 The variable rate application and regulation system for liquid fertilizer in rice based on fuzzy PID control has higher quality flow rate control accuracy and tracking performance, laying a foundation for the development of variable rate fertilizer equipment for liquid fertilizer in rice field.

Key words: Rice; Liquid fertilizer; Variable application; Fuzzy PID control; Precision fertilization; Mass flow rate

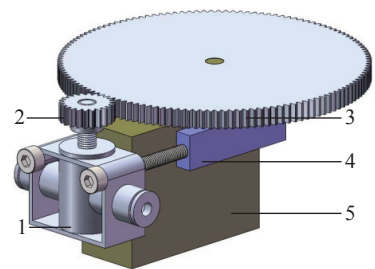
水稻 *Oryza sativa* L. 是我国主要粮食作物, 种植过程中应适时精量施肥, 以促进其长势良好, 实现优质高产^[1-5]。研究表明, 在土壤中施入固体肥被作物吸收利用率仅为 30%, 施入液体肥被作物吸收利用率可达 80% 以上^[6]。液体肥具有施肥量易于调控、排肥口堵塞率低、肥效好等优势^[7], 且可利用变量施肥技术提高精量施用水平。依据作物长势和土壤肥分变量调控施用液体肥, 有助于节约生产成本、提升肥料利用率、减少种植环境污染^[8]。在液体肥变量施用系统研究方面, 目前主要基于模糊控制、PID 控制等理论, 采用单片机或 PLC 调控电磁比例调节阀的开度, 实现肥料精准施用。郎春玲等^[9] 研制了单片机控制的深施型液体肥变量施用系统, 基于处方图对电磁比例调节阀开度进行调节, 室内试验的施肥精度大于 95%, 施肥最小误差每次为 0.2 mL。田敏等^[10] 研制了水肥一体牵引液肥机变量施肥系统, 构建了流量实时采集反馈模型, 基于遗传算法对模糊控制规则进行了优化, 提高了施肥精度。洪延宏^[11] 基于神经网络的 PID 变量控制算法研制了大田液肥变量喷施系统。采用电磁比例调节阀的施肥系统成本高, 液肥中含有的杂质易使阀芯运动阻塞或喘动, 导致系统工作不稳定^[12]。刘志壮等^[13] 设计了由直流电机、减速器及针阀等组成的机电式流量系统, 采用模糊 PID 控制算法, 解决了变量喷雾农药流量控制问题。李加念等^[14-15] 改进了文丘里变量施肥装置, 利用电导电极实时反馈液浓度, 采用模糊 PID 算法细调电磁阀的 PWM 占空比, 使混肥器的吸肥浓度达到目标值。李翠锦等^[16] 针对农田喷雾需求, 采用永磁直流电动机为执行器, 通过自适应模糊 PID 算法控制施肥量。

现有液体肥变量施用系统研究主要应用于滴灌施肥^[17-18] 和叶面喷肥^[17,19-21], 适用于水稻种植的液体肥变量施用系统的研究鲜见报道。本文基于水稻水田机械深施肥技术要求, 设计一种机电式液体肥微小流量调控系统, 并将该系统应用于团队已研制的水田液体肥气力引射式施肥器^[22], 构建水稻液体肥变量施用系统; 通过仿真试验分析系统的精度和响应性能, 以期为近水稻根部的小流量、低成本施肥及水稻田间液体肥变量施用技术的推广应用提供装备支持。

1 液体肥变量施用系统

1.1 机电式流量调节阀

机电式流量调节阀是实现微小流量调控的关键执行部件, 由出入口直径均为 10 mm 的流量调节阀、从动齿轮、主动齿轮、U 型架和 MG995 型电动舵机组成, 结构简图如图 1 所示。MG995 型电动舵机的转角范围为 0~270°, 工作扭矩为 1.3 N·m, 响应转速为 53~62 r/min, 脉冲信号宽度为 0.5~2.5 ms。



1: 流量调节阀; 2: 从动齿轮; 3: 主动齿轮; 4: U 型架; 5: 电动舵机
1: Flow regulating valve; 2: Driven gear; 3: Driving gear; 4: U-shaped frame; 5: Electric steering gear

图 1 机电式流量调节阀

Fig. 1 Electromechanical flow regulating valve

主动齿轮的齿数为 132, 安装在电动舵机的输出轴末端; 从动齿轮的齿数为 22, 安装于流量调节阀的阀芯末端; 主动齿轮和从动齿轮的模数均为 0.5 mm, 通过齿数差实现速比为 6 的增速传动。

1.2 流量调节控制系统

基于机电式流量阀的流量调节控制系统结构如图 2 所示, 由单片机处理模块、变量控制模块、检测模块、液晶显示模块、键盘输入模块和报警指示

模块等组成。STC89C52 型单片机输出端通过舵机驱动电路与电动舵机连接, 通过光耦隔离继电器与电磁阀连接; 单片机输入端通过 A/D 转换芯片与 E6B2-CWZ5B 型速度传感器连接, 通过 I/O 与 MJ-HZ41C 型涡轮流量计 (流量范围 0.15~1.50 L/min 或 1.92~19.20 g/s) 连接。用于预设流量的键盘输入模块采用 4×4 矩阵键盘, 由蜂鸣器和发光二极管组成的报警指示模块实现缺肥和吸肥异常报警。

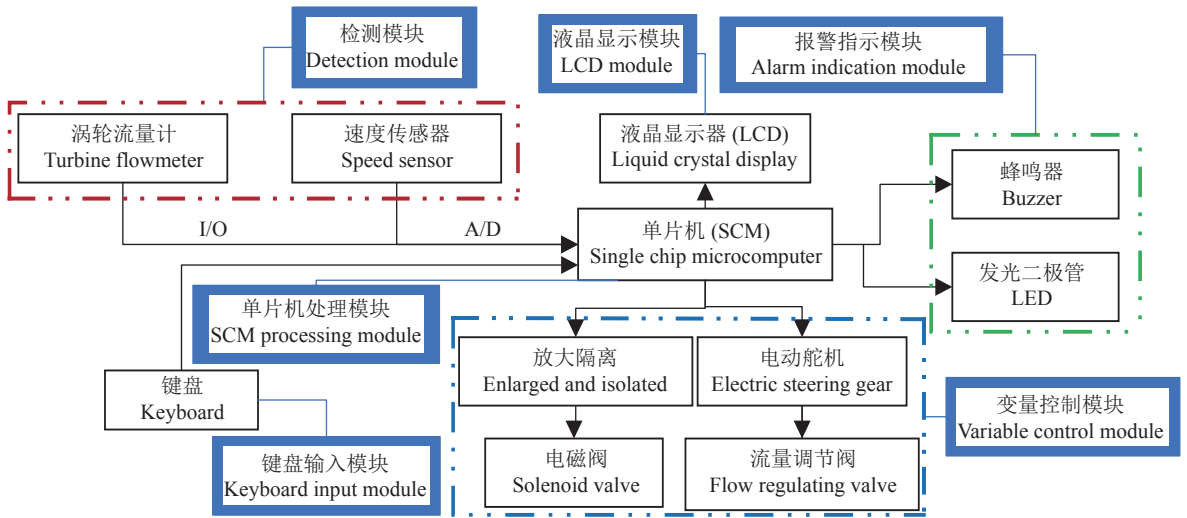


图 2 流量调节控制系统结构框图

Fig. 2 The structure block diagram of flow regulation control system

1.3 液体肥变量施用系统

气力引射式施肥器可将压缩气体和液体肥进行混合, 在出口形成液肥雾化射流, 增大肥料与土壤的接触面积, 提高土壤蓄肥能力, 延缓肥料的流失速度, 增加作物根系对养分的吸收利用时间, 进一步提高肥料利用率, 有效解决现有水田深施肥机具的堵塞问题^[23]。将设计的机电式流量阀控制系统应用到气力引射式施肥器, 搭建的液体肥变量施用系统样机如图 3 所示。压缩气体经气源处理元件清除杂质后沿输气管进入气力引射式施肥器, 通过键盘将目标施肥量输入单片机, 速度传感器和涡流流量计将检测的机具行进速度和吸肥管路液肥的实时流量反馈给单片机, 单片机对数据进行处理, 实时调整机电式流量调节阀开度和电磁阀开闭, 形成闭环反馈控制, 使液肥以一定的流速进入气力引射式施肥器并与压缩气体混合, 最后在施肥器出口形成雾化射流, 喷施到水稻根区附近土壤, 实现恒量、恒深施肥作业。

1.4 液体肥质量流率理论模型与试验结果

液体肥质量流率定义为单位时间内液体肥变量施用系统的吸肥口所卷吸的液体肥质量, 是评价



1: 气力引射式施肥器; 2: 机电式流量调节阀; 3: 速度传感器; 4: 电磁阀; 5: 涡轮流量计; 6: 单片机; 7: 电源

1: Pneumatic injection fertilizer applicator; 2: Electromechanical flow regulating valve; 3: Speed sensor; 4: Solenoid valve; 5: Turbine flowmeter; 6: Single chip microcomputer; 7: Power supply

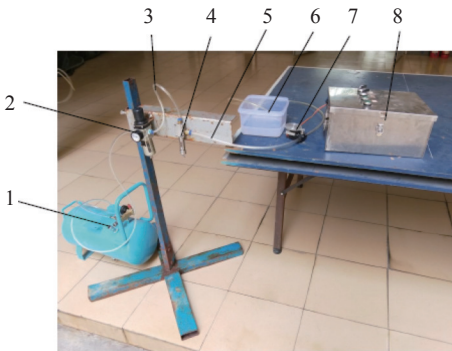
图 3 液体肥变量施用调节系统

Fig. 3 The adjustment system for liquid fertilizer variable fertilization

液体肥施用效率的重要指标。为明确机电流量调节阀开口大小对液体肥质量流率的影响,设定系统工作压力为 0.3 MPa 进行标定试验,试验平台如图 4 所示。采用电子天平(精度 0.1 g)称量并记录装有液体肥肥箱的起始质量;启动恒压供气系统,当压力稳定后,将吸肥管一端插入肥箱中同时用秒表开始计时;计时结束时取出吸肥管,称量并记录肥箱的最终质量,按式(1)计算液体肥质量流率(q):

$$q = \frac{m_1 - m_2}{t}, \quad (1)$$

式中, m_1 为液体肥肥箱的起始质量, g; m_2 为肥箱的最终质量, g; t 为计时时间, s。



1: 储气罐; 2: 过滤减压阀; 3: 输气管; 4: 施肥器; 5: 吸肥管; 6: 液体肥肥箱; 7: 机电流量调节阀; 8: 电控箱

1: Air receiver; 2: Pressure reducing valve; 3: Gas transmission pipe; 4: Fertilizer applicator; 5: Fertilizer suction pipe; 6: Liquid fertilizer tank; 7: Electromechanical flow regulating valve; 8: Electric cabinet

图 4 液体肥质量流率标定试验平台

Fig. 4 The test platform of liquid fertilizer mass flow rate calibration

将电动舵机转角划分为 10 等分,通过键盘输入目标角度,每组试验控制电动舵机驱动流量调节阀运行 1 个等分(即舵机转动 27°),分别记录各位置施肥量,每组试验计时 3 min,重复 3 次,计算各组液体肥 q 平均值。

试验结果如图 5 所示,施肥器的液体肥 q 随电动舵机转动角度的增大呈线性递增,拟合度为 0.987 8,在电动舵机转动范围内,液体肥 q 的可调节范围为 2.36~6.75 g/s。

我国水稻田氮肥(纯氮)施用量平均为 180 kg/hm²,液体肥施用的 q 应与拖拉机的前进速度相匹配,拖拉机作业速度、水稻纯氮施用量与施肥器 q 之间的关系如下式:

$$q = \frac{LvQ}{10w}, \quad (2)$$

式中, L 为施肥器作业行距(一般为 0.3 m), m ; v 为水田拖拉机的作业速度, m/s; Q 为水稻纯氮施用量, kg/hm²; w 为液体氮肥的氮素质量分数(本研究

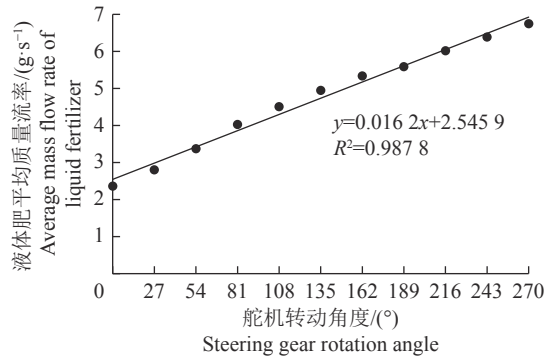


图 5 舵机转动角度与液体肥平均质量流率关系图

Fig. 5 Relationship between steering gear rotation angle and average mass flow rate of liquid fertilizer

氮素质量分数为 32%)。

2 控制器设计与仿真试验

2.1 控制系统模型

设电动舵机转速为 ω , 流量调节阀阀芯转角为 φ , 转速为 ω' , 电动舵机的工作电压为 U_r , 不考虑电磁惯性和机械惯性, 假设初始状态为 0, 则有^[24]:

$$\omega = k_1 U_r, \quad (3)$$

$$\omega' = k_2 \omega = k_1 k_2 U_r = d\varphi/dt, \quad (4)$$

式中, k_1 为转换系数, k_2 为传动比。

取 $k = k_1 k_2$, 对式(4)进行积分, 可得:

$$\varphi = k U_r t - t_0, \quad (5)$$

式中, t_0 为电磁惯性和机械惯性。

对式(5)进行拉普拉斯变换, 得到控制系统的传递函数为:

$$G(s) = \frac{k U_r}{s^2} - \frac{t_0}{s} = \frac{-t_0 s + k U_r}{s^2}, \quad (6)$$

实际系统中, $U_r = 6$ V, 测得 $\omega' = 69.89$ r/min = 7.28 rad/s, 电机启动延时为 0.005~0.010 s, $t_0 = 0.010$ s, 则传递函数简化为:

$$G(s) = \frac{-0.010s + 7.28}{s^2}. \quad (7)$$

2.2 模糊 PID 控制器设计

为使流量调节系统具备较强的抗外界干扰能力,基于模糊 PID 算法建立控制器结构如图 6 所示。模糊 PID 控制器实时监测并获取施肥器的施肥量,将其与目标施肥量比较,得到施肥量偏差(e)和偏差变化率(e_c),依据模糊推理调节器实时调整 PID 的比例系数(k_{p1})、积分系数(k_{i1})和微分系数(k_{d1}),得到模糊 PID 调节器的输出量 [$U_1(t)$], 调控机电式流量调节阀的开度,实现液体肥变量施用控制系统参数的自适应调节^[25]。

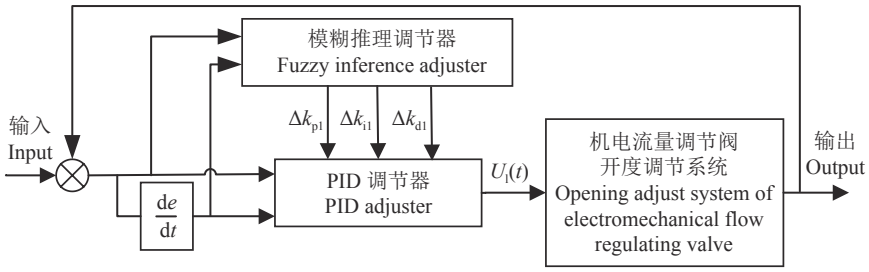


图 6 模糊 PID 控制器结构框图

Fig. 6 The structure block diagram of fuzzy PID controller

依据模糊控制理论和预试验中积累的经验^[15-16,25-27], 制定控制器规则(表 1)。当 e 较大时, 为保证系统具有良好的跟踪性能, 选择较大的 k_{p1} 和较小的 k_{d1} , 同时为了防止系统出现较大的超调量和

限制积分作用, 取较小的 k_{i1} 值; 当 e 较小时, 为了使系统具有快速响应能力和较小的超调量, 选择较小的 k_{p1} 以及适当的 k_{i1} 和 k_{d1} ^[16,26-27]。

表 1 模糊控制规则表

Table 1 Rules table of fuzzy control

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PB	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/PS	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PB	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NS	PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PM/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS

1) e : 施肥量偏差; e_c : 施肥量偏差变化率

1) e : Deviation of fertilization amount; e_c : Deviation change rate of fertilization amount

$$k_{p1} = k'_{p1} + \Delta k_{p1}, \quad (8)$$

$$k_{i1} = k'_{i1} + \Delta k_{i1}, \quad (9)$$

$$k_{d1} = k'_{d1} + \Delta k_{d1}, \quad (10)$$

$$K_I = \frac{K_P T}{T_I}, \quad (14)$$

$$K_D = \frac{K_P T_D}{T}, \quad (15)$$

式中, k'_{p1} 、 k'_{i1} 和 k'_{d1} 分别为 PID 调节器各参数的初始值, Δk_{p1} 、 Δk_{i1} 和 Δk_{d1} 分别为模糊推理调节器的 3 个输出。

采用临界比例度法获得临界比例度 (δ_K) 和临界振荡周期 (T_K), 按照以下 PID 控制参数经验公式, 得到 PID 控制器的比例系数初始值 (K_P)、积分系数初始值 (K_I) 和微分系数初始值 (K_D) 等参数^[28]。

$$K_P = \frac{1}{1.7\delta_K}, \quad (11)$$

$$T_I = 0.5T_K, \quad (12)$$

$$T_D = 0.125T_K, \quad (13)$$

式中, T 为采样时间, T_I 为积分时间, T_D 为微分时间。按式 (11)~(15) 计算, 得到 PID 控制器参数为: $K_P=0.44$, $K_I=0.0097$, $K_D=0.3$, 由此确定模糊 PID 控制器各参数初始值为: $k'_{p1}=0.44$, $k'_{i1}=0.0097$, $k'_{d1}=0.3$ 。

2.3 仿真试验与结果

仿真试验采用 Matlab 软件 (2021b 版) 的 Simulink 仿真模块构建控制器仿真模型, 如图 7 所示。控制系统的单位阶跃响应仿真结果如图 8A 所示。PID 控制器的响应曲线超调量为 42.90%, 调节时间为 4.44 s, 稳态误差为 0.010; 模糊 PID 控制器的响应曲线超调量为 0.12%, 调节时间为 2.51 s, 稳态误差为 0.007。表明模糊 PID 控制能获得更优的动态调节和稳定性。

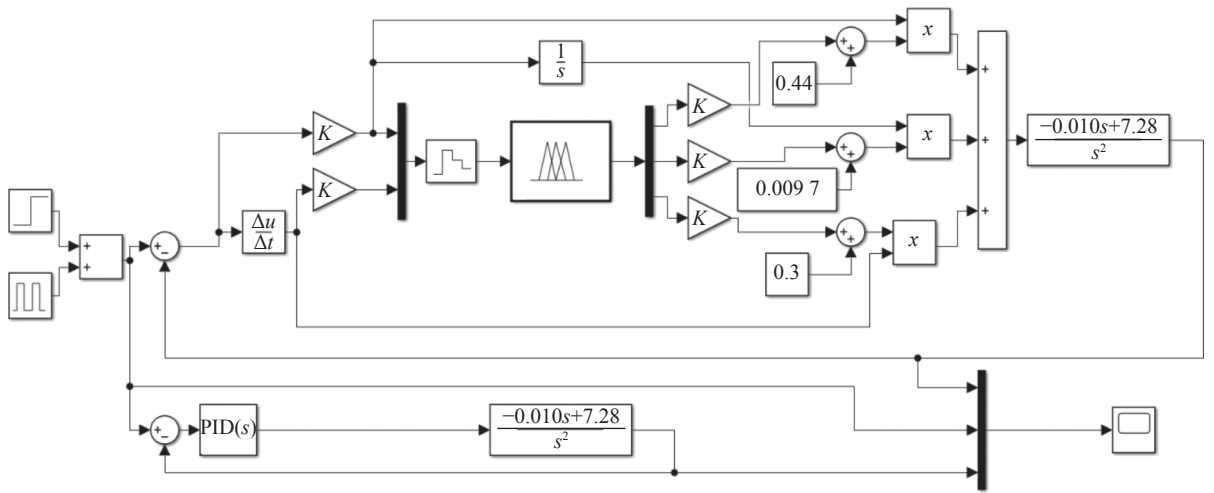


图 7 控制系统仿真模型

Fig. 7 The simulation model of control system

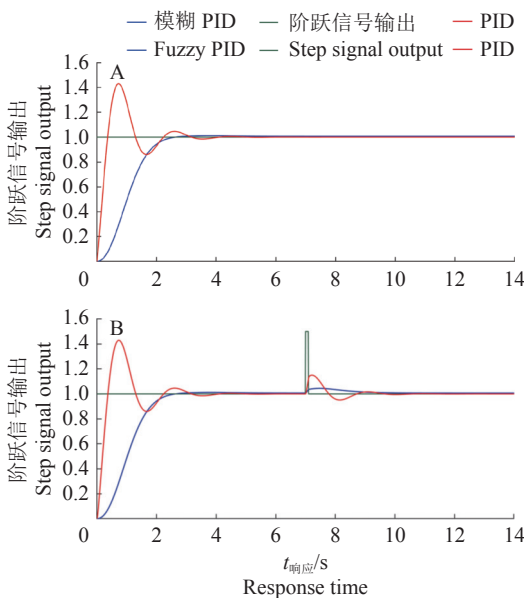


图 8 单位阶跃 (A) 和加干扰脉冲 (B) 的响应仿真图

Fig. 8 Simulation diagrams of unit step response(A) and impulse response with interference(B)

为模拟控制器受到的干扰情况,在实时流量稳定时段的 7 s 处添加 1 个幅值为 0.5,持续时间 0.1 s 的干扰脉冲,控制系统响应仿真结果如图 8B 所示。在加入脉冲信号之后,模糊 PID 控制系统与 PID 控制系统均发生了突变,PID 控制器的调节时间为 1.67 s,模糊 PID 控制器的调节时间为 0.61 s。表明模糊 PID 控制震荡延续时间短,能快速回归稳态,具有更强的抗干扰能力。

3 性能试验与结果

3.1 试验方法

搭建水稻液体肥变量施用试验平台(图 9)。将液体肥变量施用系统搭载在东风井关 PG6 乘坐

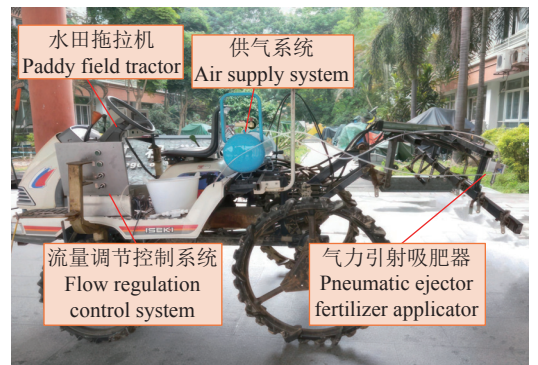


图 9 系统性能试验平台

Fig. 9 Experiment platform of system performance

式水田拖拉机上,流量调节控制系统置于拖拉机前端,气力引射式吸肥器安装在拖拉机尾部,供气系统由空压机、储气罐、气源处理元件、减压阀、压力表和输气管路等组成,其输出气管与气力引射吸肥器的入气口连接。选用广东绿兴生物科技有限公司生产的液态氮肥(氮质量分数为 32%),分别采用 PID 和模糊 PID 控制器对液体肥变量施用系统的质量流率控制精度和跟踪性能进行试验对比。

以标定试验确定的液体肥质量流率调节范围 2.36~6.75 g/s 为依据,设计质量流率控制精度试验。在水田拖拉机静止条件下调节试验平台吸肥管路压力为 0.3 MPa,在 2.8~5.0 g/s 范围内设置 10 种目标施肥质量流率,记录 3 min 内每种目标施肥质量流率条件下的实际施肥质量流率,每组试验重复 3 次。分别统计各种目标施肥质量流率重复试验中实测施肥质量流率(q_i)的平均值(q_m), q_m 相对目标施肥质量流率(q_b)的绝对误差(Δq_m),以及质量流率控制精度(P)。计算公式如下:

$$q_m = \sum_{i=1}^3 q_i, \tag{16}$$

$$\Delta q_m = |q_b - q_m|, \tag{17}$$

$$P = \frac{q_b - \Delta q_m}{q_b} \times 100\%. \tag{18}$$

液体肥质量流率在调节范围 2.36~6.75 g/s 内升高或降低, 以验证液体肥变量施用系统质量流率跟踪性能。具体方法为: 调节拖拉机作业速度为 0.6 m/s, 吸肥管路压力为 0.3 MPa, 调整机电流量调节阀的开度, 先将施肥质量流率从 0 升高至 3 g/s, 质量流率稳定后再从 3 g/s 升高至 5 g/s, 质量流率稳定后又从 5 g/s 降低至 4 g/s, 以 1 Hz 频率采集实时质量流率, 每组试验重复 3 次。以 3 次质量流率跟踪试

验的超调量、上升时间、调节时间、峰值时间的平均值作为质量流率跟踪性能的评价指标。

3.2 结果与分析

3.2.1 质量流率控制性能 质量流率控制性能试验结果如表 2 所示。在 10 种目标质量流率条件下, PID 控制的质量流率绝对误差范围为 0.20~0.35 g/s, 模糊 PID 控制的质量流率绝对误差范围为 0.15~0.19 g/s; 在各目标质量流率条件下, 采用模糊 PID 控制的质量流率绝对误差均低于 PID 控制。从控制精度角度比较, PID 控制精度最高为 95.21%、最低为 90.00%, 模糊 PID 控制精度最高为 96.88%、最低为 93.93%, 表明本文设计的模糊 PID 控制系统具有更高的质量流率控制精度, 能够更好地满足田间施肥作业精准性能要求。

表 2 模糊 PID 和 PID 控制系统的质量流率控制精度试验结果

Table 2 Experiment result of control accuracy of mass flow rate for fuzzy PID and PID controlling systems

目标质量流率 (q_b)/(g·s ⁻¹) Target mass flow rate	实测质量流率平均值(q_m)/(g·s ⁻¹) Average value of measured mass flow rate		绝对误差(Δq_m)/(g·s ⁻¹) Absolute error		控制精度(P)/% Control accuracy	
	PID	Fuzzy PID	PID	Fuzzy PID	PID	Fuzzy PID
	2.8	2.53	2.63	0.27	0.17	90.36
3.0	2.70	2.84	0.30	0.16	90.00	94.67
3.2	3.00	3.37	0.20	0.17	93.75	94.69
3.4	3.63	3.55	0.23	0.15	93.24	95.59
4.0	4.35	4.19	0.35	0.19	91.25	95.25
4.2	4.55	4.01	0.35	0.19	92.67	95.48
4.4	4.72	4.22	0.32	0.18	92.73	95.91
4.6	4.31	4.79	0.29	0.19	93.70	95.87
4.8	4.57	4.95	0.23	0.15	95.21	96.88
5.0	4.74	5.18	0.26	0.18	94.80	96.40
均值 Mean	3.84	3.97	0.28	0.17	92.77	95.47

3.2.2 质量流率跟踪性能 图 10 的结果表明, 当质量流率为 3 g/s 时, 模糊 PID 控制超调量为 16.6%, 比 PID 控制低 6.7%; 上升时间为 1.8 s, 比 PID 控制少 0.9 s; 调节时间为 12 s, 比 PID 控制少 2 s。当质量流率为 4 g/s 时, 模糊 PID 控制的超调量为 10.0%, 比 PID 控制低 5.0%; 调节时间为 9 s, 比 PID 控制少 5 s。当质量流率为 5 g/s 时, 模糊 PID 控制的超调量为 10.0%, 比 PID 控制低 4.0%; 上升时间为 1.8 s, 比 PID 控制少 0.9 s; 调节时间为 11 s, 比 PID 控制少 1 s。模糊 PID 控制的超调量平均值为 12.2%, 上升时间平均值为 1.5 s, 调节时间平均值为 10.7 s, 峰值时间平均值为 1.7 s; PID 控制的超调量平均值为 17.4%, 上升时间平均值为

2.1 s, 调节时间平均值为 13.3 s, 峰值时间的平均值为 2.3 s。表明在系统设定的施肥量发生连续变化

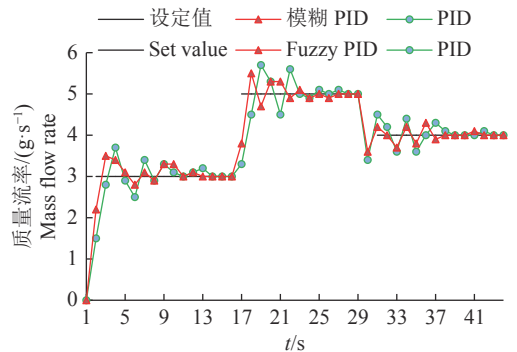


图 10 质量流率跟踪性能

Fig. 10 The tracking performance of mass flow rate

时,模糊 PID 控制具有更快的响应速度和更高的鲁棒性。

4 结论

1) 设计了一种基于单片机控制的机电式微小流量调节阀,应用于已研制的气力引射式施肥器,构建了水稻液体肥变量施用系统,在吸肥管路工作压力为 0.3 MPa 的条件下进行标定试验,确定液体肥质量流率的可调节范围为 2.36~6.75 g/s。

2) 设计了水稻液体肥变量施用模糊 PID 控制器,并与 PID 控制器的调控性能进行了仿真对比。结果表明,模糊 PID 控制器的阶跃信号响应超调量、调节时间和稳态误差分别为 0.12%、2.51 s 和 0.007, PID 控制器的阶跃信号响应结果分别为 42.90%、4.44 s 和 0.010,模糊 PID 控制器具有更好的动态调节和稳定性能;在流量稳定时段 7 s 处添加幅值为 0.5、持续时间为 0.1 s 的干扰脉冲时,模糊 PID 控制器调节时间为 0.61 s,相比 PID 控制器 1.67 s 的震荡时间更短,具有更强的抗干扰能力。

3) 在 10 种目标质量流率条件下,模糊 PID 的质量流率绝对误差均低于 PID 控制, PID 的控制精度为 90.00%~95.21%,而模糊 PID 的控制精度为 93.93%~96.88%,具有更高的精准调控能力;在施肥量变化时,模糊 PID 控制的超调量、上升时间和调节时间均低于 PID 控制,模糊 PID 控制的超调量、上升时间、调节时间和峰值时间平均值分别为 12.2%、1.5 s、10.7 s 和 1.7 s, PID 控制相应的平均值分别为 17.4%、2.1 s、13.3 s 和 2.3 s,表明模糊 PID 控制具有更快的响应性和更高的鲁棒性。

参考文献:

[1] 孙浩燕,李小坤,任涛,等.浅层施肥对水稻苗期根系生长及分布的影响[J].*中国农业科学*,2014,47(12):2476-2484.

[2] 朱元宏,赵峥,张翰林,等.不同施肥方式对水稻农艺性状及产量的影响[J].*上海交通大学学报(农业科学版)*,2014,32(1):43-48.

[3] 杨亨东.基于精准农业设计的水稻施肥系统开发[J].*农机化研究*,2017,39(7):134-136.

[4] 孙芝文.水稻施肥技术对产量的影响[J].*河南农业*,2017(17):30-31.

[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.

[6] 黄燕,汪春,衣淑娟.液体肥料的应用现状与发展前景[J].*农机化研究*,2006,28(2):198-200.

[7] 冯金龙,周文琪,唐汉,等.液肥注射式变形齿轮扎穴机构设计与试验[J].*东北农业大学学报*,2017,48(2):90-96.

[8] 梁春英,衣淑娟.液体肥变量施用控制系统性能的试验研究[J].*农机化研究*,2010,32(8):117-120.

[9] 郎春玲,王金武,王金峰,等.深施型液态肥变量施肥控制系统[J].*农业机械学报*,2013,44(2):43-47.

[10] 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.

[11] 洪延宏.基于神经网络算法的液肥喷施变量控制系统研发与应用[D].石河子:石河子大学,2020.

[12] 杨旸.液压电磁比例调节阀常见故障处理[J].*设备管理与维修*,2010(1):31-32.

[13] 刘志壮,洪添胜,张文昭,等.机电式流量阀的模糊控制实现与测试[J].*农业工程学报*,2010,26(13):22-26.

[14] 李加念,洪添胜,冯瑞珏,等.基于脉宽调制的文丘里变量施肥装置设计与试验[J].*农业工程学报*,2012,28(8):105-110.

[15] 李加念,洪添胜,冯瑞珏,等.基于模糊控制的肥液自动混合装置设计与试验[J].*农业工程学报*,2013,29(16):22-30.

[16] 李翠锦,周树林,宋乐鹏.基于模糊 PID 的变量液体施肥控制系统[J].*农机化研究*,2019,41(3):244-249.

[17] 邓兰生,涂攀峰,叶倩倩,等.滴施液体肥对甜玉米生长、产量及品质的影响[J].*玉米科学*,2012,20(1):119-122.

[18] 杨军.滴灌变量精准控制施肥装置设计与实现[D].石河子:石河子大学,2016.

[19] BAI J, TIAN M, LI J. Control system of liquid fertilizer variable-rate fertilization based on beetle antennae search algorithm[J].*Processes*,2022,10(357):1-14.

[20] YAMIN M, ISMAIL W I B, AZIZ S A, et al. Design considerations of variable rate liquid fertilizer applicator for mature oil palm trees[J].*Precision Agriculture*,2022,23:1413-1448.

[21] FU J, CHEN C, ZHAO R Q, et al. Accurate variable control system for boom sprayer based on auxiliary antidrift system[J].*Journal of Sensors*,2020(8037046):1-8.

[22] 王聪.液体肥施肥器变量调节系统研究[D].广州:华南农业大学,2018.

[23] 陈彬.水田气力引射式液肥深施装置研究[D].广州:华南农业大学,2018.

[24] 李益华.自动控制原理[M].长沙:湖南大学出版社,2004:17-22.

[25] 高礼科,倪福生,蒋爽.基于模糊 PID 控制器的旋流泵调速控制[J].*自动化与仪表*,2020,35(12):72-76.

[26] 王健,谢南,黄春营.基于模糊控制理论的温室葡萄种植灌溉算法[J].*江苏农业科学*,2017,45(14):184-188.

[27] 苏兴华.基于模糊控制理论的 PID 控制器设计[J].*中国管理信息化*,2019,22(3):136-139.

[28] 王在英,刘魏霞,彭倩.过程控制系统与仪表[M].北京:机械工业出版社,2004:190-192.