

基于模糊控制的车速跟随变量喷雾系统设计与试验

王润涛¹ 刘 瑶¹ 王树文¹ 李 明¹ 孙文峰² 薛 忠³

(1. 岭南师范学院电子与电气工程学院, 湛江 524048; 2. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030;
3. 中国热带农业科学院南亚热带作物研究所, 湛江 524091)

摘要: 针对目前大田宽幅机械变量喷雾精准化程度低、农机车速变化对喷雾效果影响考虑不充分的问题,为了提高精准施药、施肥能效,基于3WF-1000型喷杆式喷雾机,设计了一种自适应跟随车速的变量喷雾系统。该系统采用传感器实时采集农机行进速度、出水管流量与压力、药箱液位高度等信息,运用Bisector模糊控制算法优化控制策略,实现了比例阀阀门变化角度的动态控制,达到了对出水管流量精准调控的目标。为验证Bisector模糊控制算法应用于本系统的优越性,利用Matlab构建仿真模型,与PID算法、Centroid算法对比分析,Bisector模糊控制算法在调节时间、超调量、稳态误差方面均表现优越。田间试验过程中,进行了非行走设定车速、恒定车速跟随、动态车速跟随以及单位面积喷雾量试验,结果表明,3种车速运行状态,变量喷雾系统适应扰动达到稳定运行的调节耗时分别为13.4、27.6、17 s,单位面积喷雾量的最大绝对误差比率分别为1.20%、2.27%、2.87%,能够满足大田精准施药的精度要求。

关键词: 精准施药; 变量喷雾; 模糊控制; 车速跟随

中图分类号: S49 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)06-0110-08 OSID: 

Design and Experiment of Speed-following Variable Spray System
Based on Fuzzy Control

WANG Runtao¹ LIU Yao¹ WANG Shuwen¹ LI Ming¹ SUN Wenfeng² XUE Zhong³

(1. College of Electronics and Electrical Engineering, Lingnan Normal University, Zhanjiang 524048, China

2. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

3. South Subtropical Crops Research Institute, China Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang 524091, China)

Abstract: Aiming at the problems of low accuracy of variable spray in wide field and insufficient consideration of the influence of agricultural machinery speed changes on the spray effect, a variable spray system with adaptive following speed was designed based on 3WF-1000 sprayer, which could improve the efficiency of accurate application of pesticides and fertilizers. The system consisted of four parts: early warning monitoring, speed monitoring, core control and execution agencies. Based on the multi-sensor real-time monitoring of speed, flow rate, pressure and liquid level height, the system used Bisector fuzzy control algorithm to optimize the system control. It realized the dynamic control of the change angle of the proportional valve and achieved the goal of accurate control of outlet pipe flow. In order to verify the superiority of the system algorithm in accurate variable application, the PID, Bisector fuzzy and Centroid fuzzy control modes were modeled and simulated under the Matlab platform. Through comparison, it could be seen that the Bisector fuzzy control was superior to the other two control modes in terms of adjusting time, overshoot and steady-state error. Field trials were carried out, such as non-travel fixed speed, fixed speed following, dynamic speed following and spray volume per unit area. In three speed states, the variable spray system adjustment times to stable operation were 13.4 s, 27.6 s and 17 s, respectively, the maximum absolute error ratios of unit area spray volumes were 1.20%, 2.27%

收稿日期: 2022-02-07 修回日期: 2022-03-30
基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD020100408、2020YFD1000604)、广东省普通高校特色创新项目(2020KTSCX074)、广东省自然科学基金项目(2021A1515012440)、国家自然科学基金项目(62005109)和湛江市科技计划项目(2020A04004)
作者简介: 王润涛(1983—),男,副教授,主要从事农业自动化技术与装备研究,E-mail: wangruntao@neau.edu.cn
通信作者: 孙文峰(1973—),男,研究员,主要从事高效植保机械研究,E-mail: swf_neau@163.com

and 2.87%, respectively, which showed that the control system could meet the accuracy requirements of field accuracy application.

Key words: accurate pesticide application; variable spraying; fuzzy control; speed following

0 引言

精准施药技术可有效提高农药、水肥利用率,降低环境污染程度,促进有机绿色农业发展。变量喷雾是精准施药技术的重要手段之一,通过探测技术感知环境信息作为依据,利用控制技术驱动施药装备实施变量喷雾^[1-2]。实际田间作业过程中,地貌的变化对农机车体速度影响较大,如果采用恒量喷雾,车体非匀速运动状态会造成重喷、漏喷现象。

欧美国家在变量喷雾研究领域进行了大量研究,已取得重大突破^[3-5],其成果基本满足了精准施药的要求。近年,国内专家学者对变量喷雾技术从不同角度展开深入的研究^[6-10],主要侧重于以作物信息检测为依据的对靶式变量喷雾和以喷雾设备运行状态为依据的校正式变量喷雾。对靶式变量喷雾适用于果园类小区块作业,通过获取果树位置作为标靶、获取冠层面积作为喷雾流量调节依据^[11]。闫成功等^[12]利用双目视觉技术探测葡萄叶幕深度并结合施药机前进速度计算冠层体积从而实现变量喷雾,但研究中未考虑车速对喷雾量的直接影响。在大田宽幅喷雾作业中,研究者多侧重考虑喷雾机自身校正式变量喷雾。王相等^[13]设计了多回流式变量喷雾控制系统,根据施药机行驶速度建立 PID 控制模型调节比例控制阀,通过改变回流口的开口度来改变喷雾流量;孙睿等^[14]设计了一种基于 PID 模糊控制理论的压力调控变量喷雾系统,建立了以载体农机动态速度为输入变量、控制阀驱动电压为输出变量的模糊控制规则,但系统稳定性较低;孙文峰等^[15]依据监测车速、流量等信息,利用神经网络修正 PID 控制参数,提高了大田单位面积内恒定施药量精度。上述研究为变量喷雾提供了新思路,但在抑制农机扰动、系统延时响应、稳态跟踪效果等方面有待改进。

基于上述研究现状,为提高变量喷雾系统的抗扰性与实用性,拟设计一种能够适应农机行进速度变化的变量喷雾系统,以农机实时速度为自变量、比例阀驱动电压为控制变量、阀门变化角度为调控对象,构建车速、流量、电压的非线性模糊控制模型,降低系统的滞后性影响,从而实现出水管流量的动态实时调节,并进行田间试验,验证喷雾系统有效性和稳定性。

1 系统整体设计

1.1 系统结构设计

喷雾系统结构如图 1 所示,速度传感器设置于载体农机的车轮主轴外侧,流量传感器与压力传感器均安装于出水管主管路,液位传感器设置在药箱底部,控制器安装于载体农机的中控台。

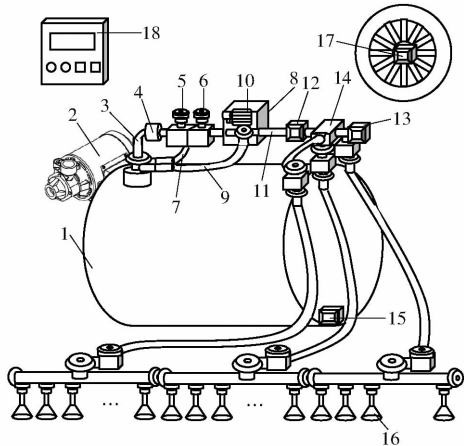


图 1 喷雾系统结构示意图

Fig.1 Schematic of spray system structure

- 1. 药箱 2. 隔膜泵 3. 进水管 4. 过滤器 5. 主阀 6. 溢流阀 7. 回流管 A 8. 比例阀 9. 回流管 B 10. 直流电机 11. 出水管 12. 流量传感器 13. 压力传感器 14. 分水阀 15. 液位传感器 16. 喷嘴 17. 速度传感器 18. 控制器

喷雾系统工作过程为:连接动力输出轴与隔膜泵,启动农机,打开控制器开关,药液由隔膜泵抽送至进水管,经过过滤器滤除杂质,管路压力过大时溢流阀开启,通过回流管 A 使部分药液回流至药箱,防止水管破裂。比例阀是系统实现变量喷雾的关键部件,控制器依据传感器实时获取的车轮速度、出水管流量与压力、药箱液位数据,动态控制比例阀内置直流电机的电压,从而驱动阀门动作,改变阀门角度,由回流管 B 卸荷,间接调节出水管压力与流量,再经分水阀分配至各个支路。

1.2 控制系统设计

车速跟随变量喷雾系统电控部分由预警监测、变速监测、核心控制、执行模块 4 部分组成,如图 2 所示。

大田里坑洼地、田埂、坡起、明暗障碍物等随机存在,使得农机无法实现匀速前行,喷雾效果与农机车速具有显著相关性。变速监测模块包括 2 个传感器单元,采用 NPN 三线常开型 SC12-20K-L 齿轮转速传感器实时监测农机车轮的实际行进速度、

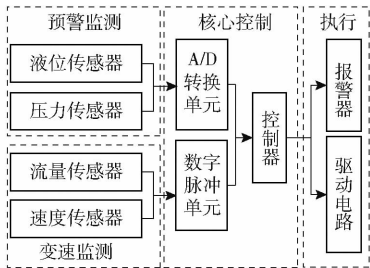


图 2 喷雾系统电控原理框图

Fig. 2 Block diagram of electrical control principle of spray system

LWGY-10 型涡轮流量传感器获取管路动态流量,速度与流量信息作为调压控制的基础输入变量。

喷雾作业过程中,如果药箱内液位过低,会导致隔膜泵空抽现象,造成漏喷,为保证喷雾质量,设计预警监测模块,采用 0.25 级精度 MIK-P310 型压力传感器监测出水管压力、投入式 ELE-803 型液位传感器监测药箱内液位高度。设置出水管压力与药箱内液位的约束条件,如超出限定范围则通过执行模块的报警单元实现预警,并关闭比例阀阀门。

核心控制模块采用 STC8A8K64S4 型单片机实现数据转换、模型运算和控制命令输出。传感器获取的液位和压力信号为模拟量,经 A/D 转换单元传递给控制处理器,流量和车速信号为数字量,经数字脉冲单元传递给控制处理器,控制处理器进行运算,发出控制指令。通过改变 H 桥驱动电路开关的脉宽占空比,实现电压调节,进而调控比例阀阀门的运动位移,间接调控管路流量,完成一次调控过程。

2 车速跟随控制策略

实际喷雾作业时,由于传感器响应速度、管道阻力等因素制约,变量喷雾控制是时变、滞后的多变量耦合非线性系统,简单的控制算法难以满足调节精度要求。

2.1 基本参数计算

设 t 时刻,出水管理想的需求流量为 $q(t)$,通过

速度传感器获取的实时车速计算需求流量,计算式为

$$q(t) = m \frac{Qv'(t)W}{60\,000}$$

式中 Q ——单位面积喷雾量, L/hm^2
 $v'(t)$ —— t 时刻车速, km/h
 W ——喷嘴间距, cm
 m ——喷头数量

设 t 时刻,通过流量传感器测得出水管当前流量为 $q'(t)$, $q'(t)$ 由比例阀阀门开启角和速度决定,通过控制比例阀内置电机的驱动电压调节其转速,进而控制阀门角度变化,单位时间阀门变化角度为

$$\Delta\alpha(t) = 2\pi\Delta nk$$

其中
$$n = \frac{U}{C_e\phi_n} - \frac{R}{C_eC_T\phi_n^2}T$$

式中 n ——电机转速, r/min
 U ——电机电压, V
 C_e ——电动势常数
 C_T ——转矩常数
 ϕ_n ——额定磁通量, Wb
 T ——转矩, $N\cdot m$ R ——电枢内阻, Ω
 Δn ——单位时间电机转速变化量
 k ——比例阀齿轮比

解决控制系统响应滞后问题,即通过调节 $\Delta\alpha(t)$,使 $q(t)$ 与 $q'(t)$ 的偏差减小。

2.2 系统控制策略

变量喷雾系统中,比例阀输出流量具有振荡特性,基于 PID 的控制算法,难以实现根据受控对象的变化对参数进行准确调整,模糊控制模拟人类思维的模糊推理,不依赖于调节参数,可通过改变模糊控制规则调节系统特性,减少处理器的运算负荷,能够适应嵌入式实时系统的非线性控制问题^[16-19]。本文采用模糊控制算法建立变量喷雾控制策略,如图 3 所示。

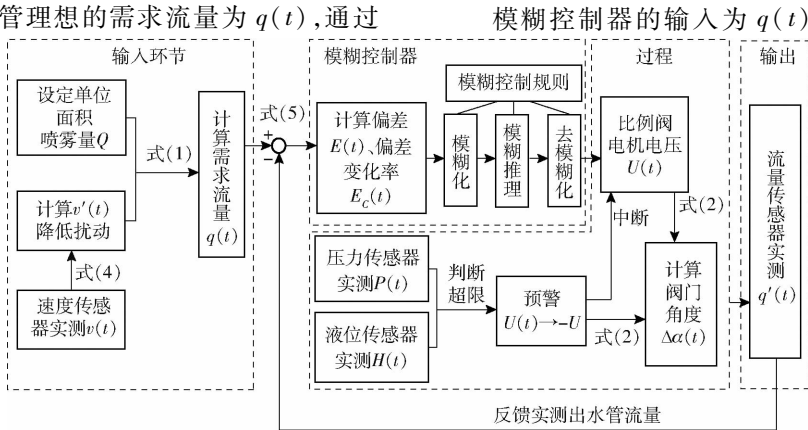


图 3 变量喷雾控制策略

Fig. 3 Control theory of variable spray

时刻的车速 $v'(t)$ 进行运算得出。

由于地貌等因素干扰导致速度传感器实测的 $v(t)$ 具有不确定性,如直接运算难以满足调节精度。为降低机械及传输滞后对控制参数的影响,首先对 $v(t)$ 进行一阶微分与加权求和运算

$$v'(t) = v(t) + a(v(t) - v(t - 1)) \tag{4}$$

式中 a ——加权系数

将 $v'(t)$ 代入式(1),计算得出 $q(t)$,与流量传感器采集的 $q'(t)$ 进行偏差运算

$$\begin{cases} E(t) = q(t) - q'(t) \\ E_c(t) = (E(t) - E(t - 1))/t \end{cases} \tag{5}$$

式中 $E(t)$ ——偏差, L/min

$E_c(t)$ ——偏差变化率, L/min²

如果 $E(t) = 0$ 、 $E_c(t) = 0$,即农机实际行进速度无变化,不启动控制模块。如果 $E(t)$ 与 $E_c(t)$ 不为 0,进行模糊运算,得出比例阀电机驱动电压 $U(t)$,由式(2)计算得出 $\Delta\alpha(t)$,调节后出水管流量发生改变, $q'(t)$ 作为输出,并反馈至输入端与 $q(t)$ 进行

比较运算。控制过程中,另设并行支路实现出水管压力与药箱液位的超限预警。预警约束条件为 $P(t) > 0.2 \text{ MPa}$, $H(t) > 30 \text{ mm}$ 。 $P(t)$ 为 t 时刻出水管压力, $H(t)$ 为 t 时刻药箱液位高度。

如果信号不满足约束条件,启动报警器报警,同时 $U(t)$ 反向增大至比例阀阀门关闭,切断出水管药液供给。

3 模糊控制模型

3.1 模糊控制算法实现

系统的受控对象为比例阀阀门开度,其控制响应存在滞后性,传递函数采用一阶惯性加纯滞后函数,依据系统辨识理论中的近似法结合试验分析^[20],估测传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{8.3s + 1} e^{-0.2s} \tag{6}$$

利用 Matlab 仿真软件建立算法仿真模型,如图 4 所示。

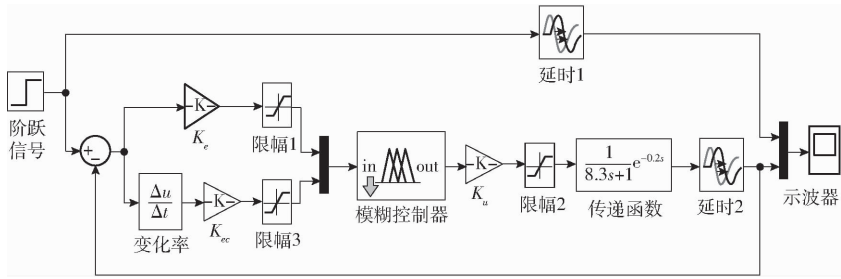


图 4 控制算法仿真模型

Fig. 4 Simulation model of control algorithm

图 4 中, K_u 为模糊控制器输出的比例因子、 K_e 为 $E(t)$ 的量化因子; K_{ec} 为 $E_c(t)$ 的量化因子,通过设定限幅使输入与输出稳定在允许范围内。为简化运算,用“模糊数”替代“模糊子集”,采用 7 个模糊数 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$, 分别表示 $\{\text{负大、负中、负小、零、正小、正中、正大}\}$ 。 $U(t)$ 的输出规则计算公式为

$$U(t) = \beta E(t) + (1 - \beta) E_c(t) \quad (\beta \in [0, 1]) \tag{7}$$

式中 β —— $E(t)$ 模糊数的权重

只考虑模糊控制器的输出对系统的影响,设 K_u 、 K_e 、 K_{ec} 的值为 1, $E(t)$ 、 $E_c(t)$ 和 $U(t)$ 所有模糊子集采用等腰三角形函数,均分在对应的论域。采用 Bisector 去模糊化算法,模糊逻辑与运算、蕴涵运算取最小值,或运算、综合运算取最大值。通过设置 β 的不同取值,寻求最优规则。设 β 以 0.1 为步长,从 0.2 递增至 0.8,阶跃响应仿真曲线如图 5 所示。

由图 5 可知,7 种模糊规则中, $\beta = 0.7$ 、 $\beta = 0.8$ 响应曲线呈现较为显著的收敛趋势,当输入信号发

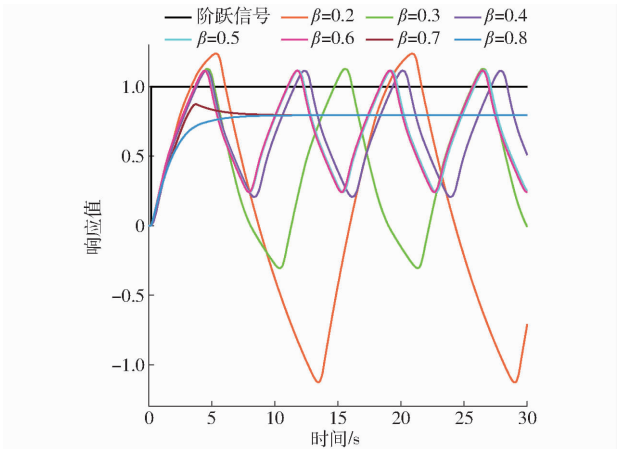


图 5 阶跃响应曲线

Fig. 5 Curves of step response

生跃变时, $\beta = 0.7$ 响应速度最快,且能够快速恢复至稳定状态。取 $\beta = 0.7$ 建立模糊规则,对应模糊数见表 1。

图 5 中 $\beta = 0.7$ 响应曲线虽然相对优越,但其稳态误差较大。为进一步优化该模型的性能指标,经过反复试验,选取 $K_u = 1.3$ 、 $K_e = 1.8$ 、 $K_{ec} = 0.5$,调节

表 1 模糊控制规则
Tab.1 Fuzzy control rule

E_c	E						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
3	-3	-2	-2	-1	0	1	1
2	-3	-2	-1	-1	0	1	2
1	-2	-2	-1	0	0	1	2
0	-2	-1	-1	0	1	1	2
-1	-2	-1	0	0	1	2	2
-2	-2	-1	0	1	1	2	3
-3	-1	-1	0	1	2	2	3

$E(t)$ 模糊子集取值范围,结果见表2。

表 2 $E(t)$ 模糊子集最优取值

Tab.2 Optimal value of $E(t)$ fuzzy subset

模糊子集(模糊数)	取值范围
负大(-3)	$\{-1.333,-1,-0.6665\}$
负中(-2)	$\{-1,-0.4,-0.05\}$
负小(-1)	$\{-0.6665,-0.01,0\}$
零(0)	$\{-0.05,0,0.05\}$
正小(1)	$\{0,0.01,0.6665\}$
正中(2)	$\{0.05,0.4,1\}$
正大(3)	$\{0.6665,1,1.334\}$

3.2 控制算法分析

为验证上述 Bisector 模糊控制算法应用于变量喷雾系统的鲁棒性与优越性,与 PID 控制算法、Centroid 模糊控制算法进行仿真对比试验^[21-22]。

传递函数采用式(6),依据 Ziegler-Nichols(Z-N)参数整定方法,PID 控制器的 K_p 、 K_i 、 K_d 分别取值 3.8、3.2、0.76。Centroid 模糊控制算法采用 3.1 节得出的模糊规则与最优参数取值。阶跃响应曲线对比如图 6 所示,性能指标对比见表 3。

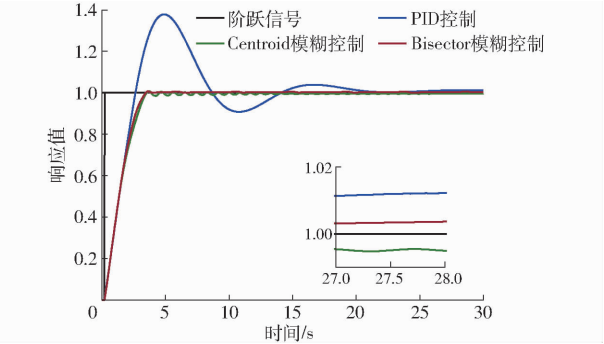


图 6 阶跃响应对比曲线

Fig.6 Curves of step response comparison

由图 6 与表 3 可知,Bisector 模糊控制算法在上升时间、调节时间、超调量与稳态误差方面均优于 Centroid 模糊控制算法。PID 控制算法的上升时间最短,但超调量与稳态误差较大。考虑 Bisector 模糊控制算法虽然上升时间比 PID 控制算法滞后 0.75 s,但 PID 超调过大,需要 20.74 s 调节至稳态,

表 3 阶跃响应性能指标

Tab.3 Performance index of step response

算法	上升	调节	超调	稳态
	时间 t_r /s	时间 t_s /s	量/%	误差/%
PID 控制	2.63	20.74	37.80	1.36
Centroid 模糊控制	3.53	15.05	1.42	-0.62
Bisector 模糊控制	3.38	3.94	0.73	0.28

导致系统跟随响应滞后。本文的变量喷雾系统为非线性、时变系统,传递函数无法进行准确预测,而 PID 控制算法的性能依赖于传递函数准确性。模糊控制算法的鲁棒性强,干扰和参数变化对其控制效果影响小。综合考虑,Bisector 模糊控制算法能够更好地满足本系统快速响应、动态跟踪、稳定输出的要求。

4 试验

4.1 试验条件

于东北农业大学大豆实验基地进行大田试验,选择大豆生长 1~3 片复叶、杂草 2~5 叶期进行苗后除草,进行非行走设定车速、恒定车速跟随、动态车速跟随 3 种试验。喷雾装置采用 3WF-1000 型喷杆式喷雾机,配置 ÖNALLAR C-96 型隔膜泵、AIXR11003 型喷头(数量 36、间距 0.5 m)、幅宽 18 m 桁架、容量 200 L 药箱。载体机具采用纽荷兰 110-90 型拖拉机,喷雾介质为精喹禾灵水溶液。

自主设计的变量喷雾系统阀体部分与控制器如图 7 所示。

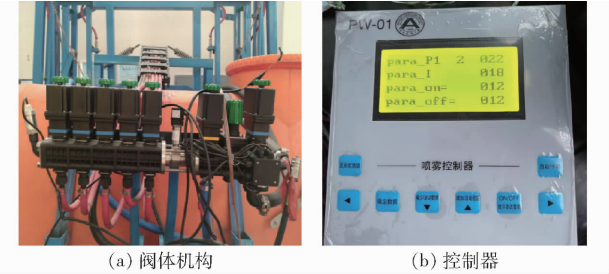


图 7 变量喷雾系统控制主体

Fig.7 Control core of variable spray system

4.2 非行走设定车速试验

为分析农机动力因素对控制系统响应速度与稳定性的影响,设置 Q 为 150 L/hm²,保持农机怠速状态,屏蔽速度传感器,设定速度 10 km/h 直接输入控制系统,管路流量响应曲线如图 8 所示。

$v(t)$ 为 10 km/h 恒速时,由式(1)计算得 $q(t)$ 为 45 L/min。 $t>0$ 时,为使喷头达到雾化效果,需满足 $q'(t)>18$ L/min; $t<6.7$ s 时, $q'(t)$ 从 18 L/min 至 45 L/min 呈线性上升趋势,由于 $q'(t)$ 与 $q(t)$ 初始差值较大,模糊控制规则输出取正大, $q'(t)$ 以最

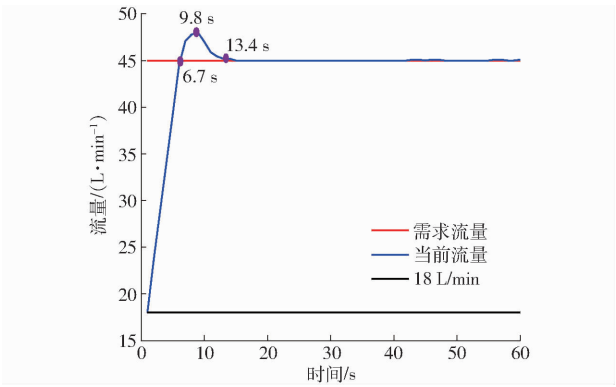


图 8 非行走设定车速试验流量响应曲线
Fig. 8 Flow response curves of non-travel fixed speed test

大速率上升,逼近 $q(t)$; $6.7\text{ s} \leq t < 9.8\text{ s}$ 时,由于机械惯性的作用, $q'(t)$ 从 45 L/min 至 48 L/min 仍缓慢上升,大于 $q(t)$,出现超调,模糊控制规则输出取负中; $9.8\text{ s} \leq t < 13.4\text{ s}$ 时, $q'(t)$ 从 48 L/min 至 45 L/min 呈下降状态,通过模糊控制模型进行偏差调节,稳定输出量; $t \geq 13.4\text{ s}$ 时, $q'(t)$ 以 45 L/min 稳定输出。非行走设定车速试验实测单位面积喷雾量约为 151.6 L/hm^2 ,与设定值相差 1.1% 。

4.3 恒定车速跟随试验

为验证农机从启动至行进过程中,喷雾系统适应扰动、跟随车速的效果,选择平坦试验区域,启动速度传感器,驾驶员控制农机以速度 10 km/h 匀速行驶,控制系统依据实时车速进行动态调节。实时车速曲线如图 9 所示。

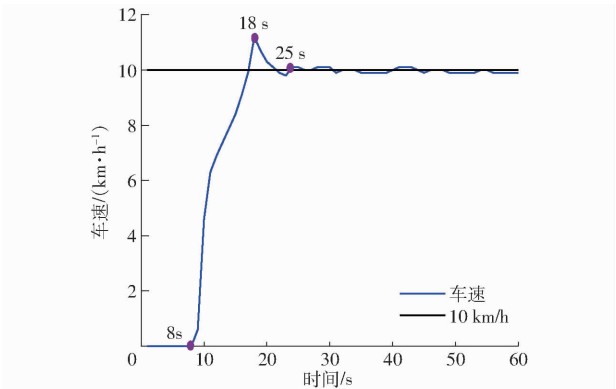


图 9 恒定车速跟随试验车速变化曲线
Fig. 9 Speed curve of fixed speed following test

试验过程中,由于农机启动系统、驾驶员主观操作因素的影响,行进速度不能保持恒定。 $5\text{ s} \leq t < 8\text{ s}$ 时,由于农机自身启动延时, $v(t)$ 为 0; $8\text{ s} \leq t < 18\text{ s}$ 时, $v(t)$ 迅速增大至 11.2 km/h ,由于惯性出现超调现象; $t \geq 25\text{ s}$ 时, $v(t)$ 趋于稳定。农机从启动到稳定行驶耗时 25 s 。

管路流量跟随车速的变化曲线如图 10 所示。由图 10 可知, $5\text{ s} \leq t < 8\text{ s}$ 时, $q(t)$ 由 $v(t)$ 计算出为 0,驾驶员启动农机瞬间,轴动力输出减小,造成隔膜

泵动能降低,使得 $q'(t)$ 减小,启动控制系统调节; $8\text{ s} \leq t < 16.5\text{ s}$ 时, $q(t)$ 随 $v(t)$ 增大, $q'(t)$ 也随之递增至 45 L/min ; $16.5\text{ s} \leq t < 18.8\text{ s}$ 时, $q(t)$ 与 $q'(t)$ 出现超调现象;经系统调节后, $t \geq 27.6\text{ s}$,系统基本达到稳定状态, $q'(t)$ 曲线与 $q(t)$ 曲线逼近。恒定车速跟随试验实测单位面积喷雾量为 153.2 L/hm^2 ,与理论值相差 2.1% 。

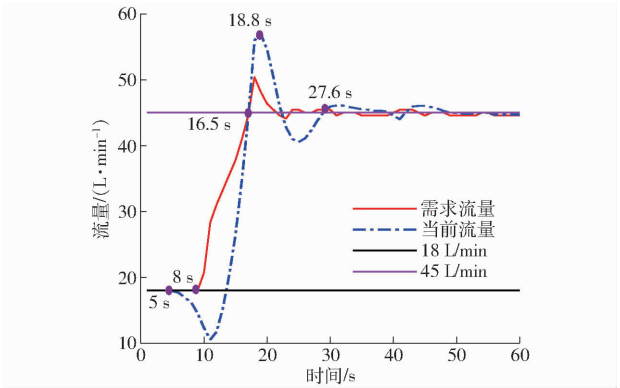


图 10 恒定车速跟随试验流量响应曲线
Fig. 10 Flow response curves of fixed speed following test

4.4 动态车速跟随试验

大田作业环境,农机行进过程中遇到坑洼、土坡等会造成车速波动。为进一步验证喷雾系统的准确性与鲁棒性,选择大豆垄田试验区域,由驾驶员根据实际情况动态控制车速。动态变化车速曲线如图 11 所示。

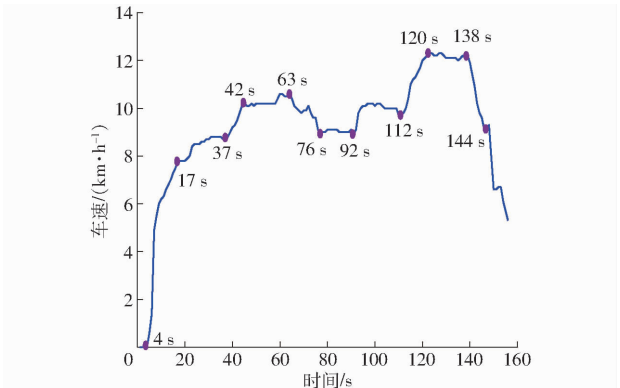


图 11 动态车速跟随试验车速变化曲线
Fig. 11 Speed curve of dynamic speed following test

$4\text{ s} \leq t < 17\text{ s}$,为农机系统启动耗时; $t = 37\text{ s}$ 、 $t = 92\text{ s}$ 、 $t = 112\text{ s}$ 时加速行进, $t = 63\text{ s}$ 、 $t = 138\text{ s}$ 时减速行进。

管路流量跟随车速的动态变化曲线如图 12 所示。 $4\text{ s} \leq t < 17\text{ s}$,农机系统启动、喷雾系统进行相应调节, $q(t)$ 与 $q'(t)$ 变化趋势与恒定车速跟随试验一致; $t \geq 17\text{ s}$ 时,随着车速动态变化,无论加速点还是减速点,当前流量与需求流量的曲线均能较好的拟合,说明经过控制系统的调节, $q'(t)$ 能够跟随 $q(t)$ 的动态变化而变化,并且保持较小的偏差,实现动态

跟随目的。动态车速跟随试验实测单位面积喷雾量为 154.1 L/hm²,与理论值相差 2.7%。

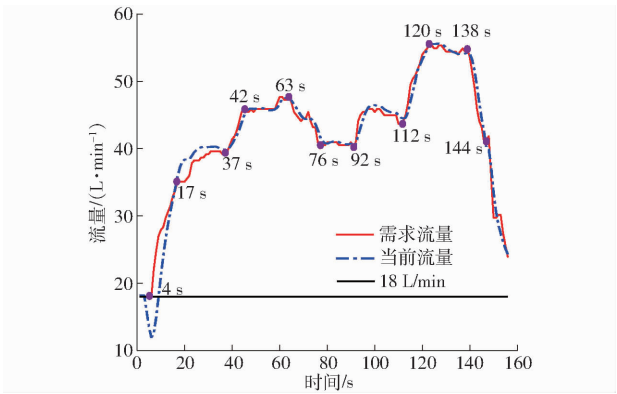


图 12 动态车速跟随试验流量响应曲线

Fig. 12 Flow response curves of dynamic speed following test

4.5 单位面积喷雾量误差分析

喷雾系统出水管总流量为各个支路的喷嘴喷雾量之和,试验前在每个喷嘴下方放置量筒,作为实测喷雾量的标定。非行走设定车速、恒定车速跟随、动态车速跟随 3 种车速状态,各进行 5 次试验。农机车速变化范围 4 ~ 12 km/h,误差数据见表 4。

表 4 中数据显示,不同车速状态下,非行走设定车速试验、恒定车速跟随试验、动态车速跟随试验,喷雾量实测值与设定值的最大绝对误差比率分别为 1.20%、2.27%、2.87%,满足实际生产需求。

5 结论

(1) 针对大田宽幅机械变量喷雾精准化程度低、车速影响考虑不充分的问题,设计了基于模糊控制的车速跟随变量喷雾系统,该系统能够依据农机车速变化实时调节出水管流量、依据出水管压力与药箱液位变化动态预警,系统运行稳定。

(2) 利用 Matlab 对 7 种模糊控制规则进行仿真分析,得出偏差的权重为 0.7 时,模糊控制模型响应速度最快,且能够快速恢复至稳定状态;对 3 种

表 4 单位面积喷雾量误差

Tab.4 Error of spray volume per unit area

试验类型	序号	车速/ (km·h ⁻¹)	设定 喷雾量/ (L·hm ⁻²)	实测 喷雾量/ (L·hm ⁻²)	绝对误差 比率/%
非行走设定车速	1	4	150	149.6	0.27
	2	6	150	150.5	0.33
	3	8	150	149.9	0.07
	4	10	150	151.6	1.07
	5	12	150	151.8	1.20
恒定车速跟随	1	4	150	152.8	1.87
	2	6	150	151.8	1.20
	3	8	150	153.1	2.07
	4	10	150	153.2	2.13
	5	12	150	153.4	2.27
动态车速跟随	1	4 ~ 12	150	153.6	2.40
	2	4 ~ 12	150	154.1	2.73
	3	4 ~ 12	150	152.7	1.80
	4	4 ~ 12	150	154.3	2.87
	5	4 ~ 12	150	153.3	2.20

控制算法进行了仿真对比,结果表明,Bisector 模糊控制算法的上升时间、调节时间、超调量、稳态误差分别为 3.38 s、3.94 s、0.73%、0.28%,综合性能较优。

(3) 车速跟随试验结果表明,非行走设定车速状态,屏蔽干扰,控制系统自身调节达到稳定,调节耗时 13.4 s;恒定车速状态,受农机动力系统启速过程扰动,控制系统调节至稳态耗时 27.6 s;动态车速状态,控制系统跟随农机车速实时调控,调节耗时 17 s。当前流量能够稳定跟随需求流量,速度变化点动态响应效果良好。

(4) 单位面积喷雾量试验结果表明,车速在 4 ~ 12 km/h 变化范围,非行走设定车速、恒定车速、动态车速 3 种状态,单位面积喷雾量最大绝对误差比率分别为 1.20%、2.27%、2.87%,实现了较高精度的变量喷雾目标。

参 考 文 献

[1] 邱白晶,闫润,马靖,等. 变量喷雾技术研究进展分析[J]. 农业机械学报,2015,46(3):59-72.
QIU Baijing, YAN Run, MA Jing, et al. Research progress analysis of variable rate sprayer technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(3):59-72. (in Chinese)

[2] 刘雪美,刘兴华,崔慧媛,等. 作物冠层雾滴沉积研究进展与展望[J]. 农业机械学报,2021,52(11):1-20.
LIU Xuemei, LIU Xinghua, CUI Huiyuan, et al. Research progress and trend analysis of crop canopy droplet deposition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(11):1-20. (in Chinese)

[3] HIROOKA T,ISHII H. Chemical control of plant diseases[J]. Journal of General Plant Pathology,2013,79(6):390-401.

[4] TACKENBERG M,VOLKMAR C,SCHIRRMANN M, et al. Impact of sensor-controller variable-rate fungicide application on yield, senescence and disease occurrence in winter wheat fields[J]. Pest Management Science,2018,74(6):1251-1258.

[5] TEWARI V K,KUMAR A A,NARE B, et al. Microcontroller based roller contact type herbicide applicator for weed control under row crops[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2014,104:40-45.

[6] 袁琦堡,胡炼,罗锡文,等. 在线实时混药喷雾系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(增刊):176-181.
YUAN Qibao, HU Lian, LUO Xiwen, et al. Design and experiment of online mixing spraying system[J]. Transactions of the

- Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(Supp.):176-181. (in Chinese)
- [7] 蒋焕煜,张利君,刘光远,等.基于PWM变量喷雾的单喷头动态雾量分布均匀性实验[J].农业机械学报,2017,48(4):41-46.
JIANG Huanyu, ZHANG Lijun, LIU Guangyuan, et al. Experiment on dynamic spray deposition uniformity for PWM variable spray of single nozzle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(4):41-46. (in Chinese)
- [8] 李龙龙,何雄奎,宋坚利,等.基于高频电磁阀的脉宽调制变量喷头喷雾特性[J].农业工程学报,2016,32(1):97-103.
LI Longlong, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Spray characteristics on pulse-width modulation variable application based on high frequency electromagnetic valve[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(1):97-103. (in Chinese)
- [9] 冯耀宁,裴亮,李晔,等.喷杆喷雾机变量喷雾控制与测试试验台设计[J].中国农机化学报,2021,42(11):43-49.
FENG Yaoning, PEI Liang, LI Ye, et al. Design of variable spray control and test bench for boom sprayer[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2021,42(11):43-49. (in Chinese)
- [10] 印祥,安家豪,王显,等.高地隙施药机喷杆自动调平系统设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(2):98-105.
YIN Xiang, AN Jiahao, WANG Xian, et al. Design and test of automatic beam leveling system for high-clearance sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(2):98-105. (in Chinese)
- [11] 刘雪美,李扬,李明,等.喷杆喷雾机精确对靶施药系统设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(3):37-44.
LIU Xuemei, LI Yang, LI Ming, et al. Design and test of smart-targeting spraying system on boom sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(3):37-44. (in Chinese)
- [12] 闫成功,徐丽明,袁全春,等.基于双目视觉的葡萄园变量喷雾控制系统设计与试验[J].农业工程学报,2021,37(11):13-22.
YAN Chenggong, XU Liming, YUAN Quanchun, et al. Design and experiments of vineyard variable spraying control system based on binocular vision[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(11):13-22. (in Chinese)
- [13] 王相友,胡周勋,李学强,等.多回流式变量喷雾控制系统设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(2):123-131.
WANG Xiangyou, HU Zhouxun, LI Xueqiang, et al. Design and experiment of multi-reflux variable spraying control system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(2):123-131. (in Chinese)
- [14] 孙睿,欧阳斌林,孙文峰,等.专家模糊控制器在液肥流速控制中的应用[J].农机化研究,2016,38(5):242-245.
SUN Rui, OUYANG Binlin, SUN Wenfeng, et al. Expert fuzzy controller in fertilizer flow rate control [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2016,38(5):242-245. (in Chinese)
- [15] 孙文峰,刘海洋,王润涛,等.基于神经网络整定的PID控制变量施药系统设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(12):55-64.
SUN Wenfeng, LIU Haiyang, WANG Runtao, et al. Design and experiment of PID control variable application system based on neural network tuning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(12):55-64. (in Chinese)
- [16] 张伶俐,王润涛,张长利,等.基于调亏理论和模糊控制的寒地水稻智能灌溉策略[J].农业工程学报,2016,32(13):52-58.
ZHANG Lingyi, WANG Runtao, ZHANG Changli, et al. Intelligent irrigation strategy based on regulated deficit theory and fuzzy control for rice in cold region[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(13):52-58. (in Chinese)
- [17] 付强,肖圆圆,崔嵩,等.基于多目标模糊规划的灌区多水源优化配置[J].农业机械学报,2017,48(7):222-227.
FU Qiang, XIAO Yuanyuan, CUI Song, et al. Multi-water resources optimal allocation of irrigation district based on fuzzy multi-objective programming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(7):222-227. (in Chinese)
- [18] 苗中华,李闯,韩科立,等.基于模糊PID的采棉机作业速度最优控制算法与试验[J].农业机械学报,2015,46(4):9-14.
MIAO Zhonghua, LI Chuang, HAN Keli, et al. Optimal control algorithm and experiment of working speed of cotton-picking machine based on fuzzy PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(4):9-14. (in Chinese)
- [19] 杨福增,牛瀚麟,孙景彬,等.山地履带拖拉机与农具姿态协同控制系统设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(1):414-422.
YANG Fuzeng, NIU Hanlin, SUN Jingbin, et al. Design and experiment of attitude cooperative control system of mountain crawler tractor and farm tools[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(1):414-422. (in Chinese)
- [20] 刘峰,万雄波.系统辨识与建模[M].武汉:中国地质大学出版社,2019.
- [21] 岑振钊,岳学军,王林惠,等.基于神经网络PID的无人机自适应变量喷雾系统的设计与试验[J].华南农业大学学报,2019,40(4):100-108.
CEN Zhenzhao, YUE Xuejun, WANG Linhui, et al. Design and test of self-adaptive variable spray system of UAV based on neural network PID[J]. Journal of South China Agricultural University,2019,40(4):100-108. (in Chinese)
- [22] 朱德兰,阮汉铖,吴普特,等.水肥一体机液电导率远程模糊PID控制策略[J].农业机械学报,2022,53(1):186-191.
ZHU Delan, RUAN Hancheng, WU Pute, et al. Strategy on remote fuzzy PID control for fertilizer liquid conductivity of water fertilizer integrated machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(1):186-191. (in Chinese)