

基于 Smith-模糊 PID 控制的变量喷药系统设计及试验

郭娜^{1,2,3}, 胡静涛^{1,2,3*}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院网络化控制系统重点实验室, 沈阳 110016)

摘要:为实现精准变量喷药技术, 该文设计了旁路节流式变量喷药控制系统用于变量喷药和幅宽调节控制, 运用流体网络理论建立系统的数学模型, 将模糊 PID 控制与基于喷药流体网络模型的 Smith 预估控制结合起来喷药量的调节, 并对国产 3W-250 型喷杆喷雾机进行改造并构建喷药试验平台。试验结果表明, 基于喷药流体网络模型的 Smith-模糊 PID 控制算法的动态响应更快, 降低了变量喷药系统滞后性和非线性不利影响, 超调量小于 13.1%, 稳态误差小于 3.52%, 且具有较好的适应能力和鲁棒性, 为精准变量喷药控制提供一种实现方法。

关键词:农业机械; 喷药; 模糊控制; Smith 预估控制; 流体网络

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.08.007

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-08-0056-09

郭娜, 胡静涛. 基于 Smith-模糊 PID 控制的变量喷药系统设计及试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 56—64.

Guo Na, Hu Jingtao. Design and experiment of variable rate spaying system on Smith-Fuzzy PID control[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(8): 56—64. (in Chinese with English abstract)

0 引言

精准农业变量喷药技术根据农田内每个区域的具体病虫害情况按需投入, 精细准确地调整农药的施用量, 最大限度地发挥了农药的利用率, 避免农田环境破坏, 提高了农产品的安全性, 实现了农业的可持续发展, 已成为当前农业领域的重要研究内容。国外发达国家变量喷药系统已经进入实际应用阶段, 并已有相应产品出售, 但价格昂贵, 难以在中国进行推广。因此, 研制适合中国农业发展国情的变量喷药系统, 已成为中国实现农业可持续发展的迫切需求。

中国许多学者对压力式^[1-2]、脉宽调制 (pulse width modulation, PWM) 式^[3-5]、药液注入式^[6-7]等流量控制方式、各种喷药系统建模和控制算法进行了较为深入的研究。虽然压力式变量喷雾的喷药量调节范围小、雾化特性随喷头压力变化较大^[8], 但是其原理简单、构建成本较低, 因此在许多变量喷药系统中仍采用了该方法。陈树人等设计了基于 PWM 的变量喷施控制系统^[4]和基于自适应神经模糊推理的双入单出的控制器, 并进行了仿真^[9]。史

岩等利用压力式变量喷头构建了压力式变量喷药系统, 建立了其机理模型^[10], 并进行了仿真, 但模型过于复杂, 未知参数过多, 无法应用于控制算法设计。魏新华等设计了一套 PWM 间歇喷雾式变量喷施系统, 忽略 PWM 频率的影响, 采用单因素线性拟合法建立占空比与不同频率所对应的喷头喷雾流量的平均值之间的模型, 并用于变量作业控制^[11]。翟长远等利用二次回归正交试验建立的 3 个不同型号喷头的流量与喷雾压力、PWM 频率和占空比的喷头流量模型, 上述基于试验的拟合模型只针对同型号的喷头适用, 具有一定的局限性^[12]。黄胜等分别对施药量的比例积分微分 (proportion integration differentiation, PID) 控制和模糊控制进行了仿真^[13]。宋乐鹏等构建了由小型针阀、直流电动机及减速器构成的机电流量控制阀的传递函数模型, 设计了变论域自适应模糊 PID 控制算法, 并进行了仿真, 验证了上述算法的优越性^[14]。刘志壮等构建了机电流量控制阀传递函数的数学模型, 设计了模糊控制算法, 并进行了仿真^[15]。袁炜锋等利用电动控制阀直接调节喷药主管路流量, 将系统用一阶延时环节描述, 采用 PID 控制在线调整流量, 并进行了 simulink 仿真^[16]。综上所述, 变量喷药系统控制算法较为简单, 未考虑对于变量喷药系统固有的非线性以及滞后性对于控制效果的影响。

为改善变量喷药控制的效果, 本文设计用于变量喷药和幅宽调节控制的旁路节流式变量喷药控制系统, 运用流体网络理论建立喷药网络的数学模型, 将模糊 PID 控制与基于喷药网络模型的 Smith

收稿日期: 2014-01-07 修订日期: 2014-03-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2013AA040403)

作者简介: 郭娜 (1983—), 女, 河北保定人, 博士生, 主要从事精准农业变量控制的研究。沈阳 中国科学院沈阳自动化研究所, 110016。

Email: guona_stacy@163.com

*通信作者: 胡静涛 (1963—), 男, 辽宁沈阳人, 研究员, 博士生导师, 主要从事精准农业的研究。沈阳 中国科学院沈阳自动化研究所, 110016。Email: hujingtao@sia.cn

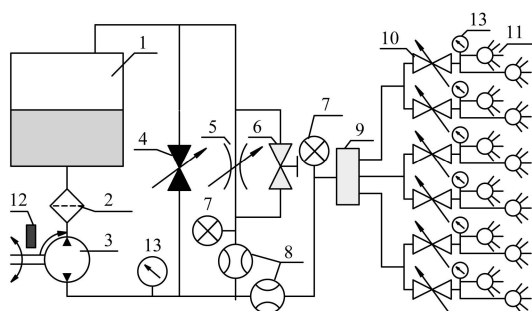
预估控制结合起来,以期降低变量喷药系统滞后性和非线性的不利影响,并对国产 3W-250 型喷杆喷雾机进行改造,用于验证所设计系统的可行性和 Smith-模糊 PID 控制算法的有效性和优越性。

1 旁路节流式变量喷药系统设计

旁路节流式变量喷药系统采用压力式控制方式,在喷药管路旁并联一路回流管路,通过调节阀改变回流药箱的流量,进而调整喷药管路的压力来改变系统的喷药量,同时可根据处方图的要求改变喷药作业幅宽。本文对国产的 3W-250 型喷杆喷雾机进行了管路改造,设计了旁路节流式变量喷药系统,该系统主要包括喷药管路、检测与执行机构和变量喷药控制 3 部分。

1.1 喷药管路

喷药管路部分由药箱、活塞式隔膜泵、过滤器、分水器、防滴喷头、安全阀、管道等组成,如图 1 所示。喷药作业前,先在药箱中将农药与水混合均匀,配置成一定浓度的药液,拖拉机动力输出轴驱动活塞式隔膜泵将药液经过滤器送入管道中。隔膜泵输出的药液分成 3 路,一路作为安全回路,当管道内的压力升高超过安全值时自动开启,向药箱中排放药液来保证系统的安全性;一路为回流管路,通过调节阀调节回流到药箱中流量实现喷药量调节;一路为喷药管路,经过分水器将一路分成 3 路,在喷药支架处又分成 2 路,每个分支安装 2 个防滴喷头,以降低管路多口出流的沿程压力损失的影响^[17-18],减少喷头之间的喷药差异性。本文选用了 TEEJET 公司所生产的 XR 系列的 XR11002 和 XR11003 扁平扇形喷嘴,喷药量的调节范围由喷头的型号所决定,当喷药量超出喷头正常工作范围后更换喷嘴型号来进一步调节喷药范围。



1. 药箱 2. 过滤器 3. 隔膜泵 4. 安全阀 5. 电动调节阀 6. 手动球阀 7. 压力传感器 8. 流量传感器 9. 分水器 10. 电磁阀 11. 防滴喷头 12. 转速传感器 13. 压力表
1. Tank 2. Filter 3. Diaphragm pump 4. Safety valve 5. Electrical regulating valve (ERV) 6. Manual ball valve 7. Pressure sensors 8. Flow meters 9. Flow divider 10. Solenoid valves 11. Drip-free nozzles 12. Rotational speed sensor 13. Pressure gauges

图 1 旁路节流式变量喷药管路图

Fig.1 Pipeline diagram of variable rate spraying system

1.2 检测与执行机构

在喷药管路中加装相应传感器和执行机构实现喷药流体网络模型参数辨识以及喷药量和作业幅宽的调节,主要由泵轴转速传感器、流量传感器、压力传感器、电动调节阀、电磁阀组成,如图 1 所示。

霍尔式转速传感器 (STA610) 安装于隔膜泵驱动轴处用于测量隔膜泵的实际转速;涡轮式流量传感器 (Burkert 8030) 分别安装在回流管路和喷药管路用于测量回流流量和喷药总流量,两者之和即可得到隔膜泵的流量,喷药管路流量作为反馈用于变量喷药控制;在电动调节阀前、喷药主管路以及喷药管路的末端留有多个取压口,根据模型参数辨识过程的需求采用扩散硅压阻式压力传感器 (P31) 进行测量;电动 V 型调节球阀 (GRAT EV-20PCUN16RPS) 安装在回流管路中,并与之并联一个球阀,可实现自动或手动的调节回流量。6 个喷药分支的入水口处分别安装开关电磁阀 (Burkert 6213),实现喷药幅宽的控制。

1.3 变量喷药控制

变量喷药控制部分利用安装的传感器实时测量系统的工作状态,并利用电动调节阀和电磁阀调节喷药量和作业幅宽,由农机行驶速度传感器、GPS 接收机以及自主研发的变量作业控制器和田间计算机^[19-21]构成,如图 2 所示。

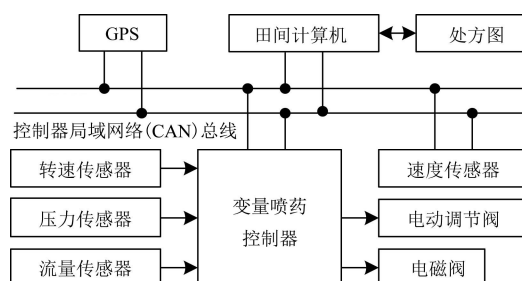


图 2 变量喷药控制框图

Fig.2 Block diagram of variable rate spraying control section

变量作业控制器可根据喷药机的行驶速度、GPS 位置、作业处方信息和农机行驶速度计算得到目标喷药量,通过调节旁路回流管路上的电动调节阀来控制喷药量,同时当喷药机行驶在地块边界或跨越灌溉渠道时,调整喷药作业宽度,可减少农药对农田环境的污染。本文选用了加拿大 NovAtel 公司的 OEMV RTK-GPS 板卡与基准站接收机 ProPak-V3、数字链路一起构成 RTK-GPS 系统用于提供农机的田间位置^[22]。田间计算机主要负责人机交互,配置喷药机具结构参数,实时显示农机 GPS 位置、行驶速度、喷药量等变量作业状态信息,并通过控制器局域网网络(controller area network, CAN)

总线将处方图下载到变量作业控制器中。雷达速度传感器 (DICKEY-john RVSHI) 安装与拖拉机的前配重块上, 用于车辆行驶速度的实时测量。

1.4 变量作业控制器设计

变量作业控制器是基于 NXP 公司 ARM9 处理器 LPC3250 设计^[23], 可实现气吸式播种、外槽轮式施肥、喷杆式喷药的变量作业控制以及轮式农机行驶速度控制。针对变量喷药控制功能, 其主要应用到功能电路有 ARM (advanced RISC machine) 控制器最小系统, CAN 收发电路, 电压输出电路, 电压测量电路, 电磁阀控制电路, 脉冲信号调理电路, 电流测量电路。ARM 控制器最小系统, CAN 收发电路详细介绍见参考文献^[23]。

电压输出采用数字电位器 AD5259 实现输出 0~5 V 连续可变电压, 用于调节电动阀的开度; 电压测量电路将来自电动阀的阀门开度电压信号通过运算放大器 AD8565 将电压调整到 LPC3250 的电压测量范围内, 由其内部的模数转换器测量; 电磁阀控制电路通过模拟开关芯片 MAX4515 分别控制各路电磁阀的通断, 并采用了达林顿晶体管阵列 ULN2003A 来增加信号驱动能力用于驱动固态继电器实现电磁阀的通断控制; 脉冲信号调理电路通过光电耦合器 TLP521 将来自涡轮式流量传感器的脉冲信号进行隔离和电压调整后, 送至 LPC3250 定时计数器的捕获输入端口进行测量; 电流测量电路采用精密电阻将来自压力传感器的 4~20 mA 的电流信号转换为 LPC3250 的电压测量范围内电压信号, 由其内部的模数转换器测量。

变量作业控制器的软件部分是基于 $\mu\text{C}/\text{OS}$ 实时操作系统开发的, 在参考文献^[23]的基础上增加了变量喷药任务, 根据主管道的流量来调节电动阀的开度进而控制喷药量, 同时根据处方图的要求, 通过电磁阀控制喷药作业幅宽。

2 变量喷药系统模型建立

变量喷药系统模型由调节阀电动执行机构模型和喷药流体网络模型 2 部分组成。喷药流体网络模型用于描述在电动调节阀不同开度下各个管路的流量分配情况。调节阀电动执行机构描述了电动阀在给定控制信号下的动态响应情况。

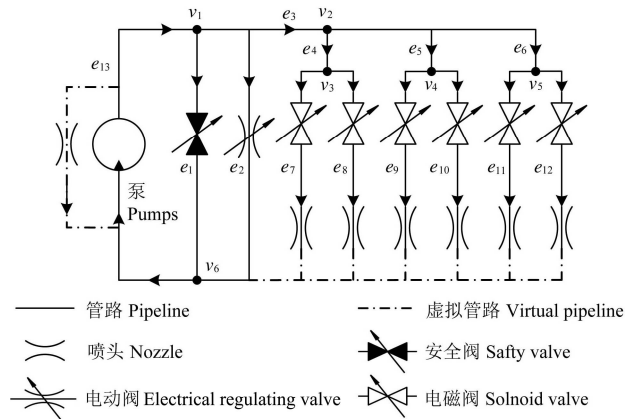
2.1 变量喷药流体网络模型

旁路节流式变量喷药系统用流体网络表示, 如图 3 所示, 喷药网络表示如下:

$$\mathbf{G} = (\mathbf{V}, \mathbf{E})$$

式中: $\mathbf{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 为节点的集合, $m=6$;

$\mathbf{E} = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 为支路的集合, $n=13$ 。



注: $v_1 \sim v_5$ 为管路的各个连接点; v_6 为增加的虚拟节点, 其代表外界大气压力; $e_1 \sim e_{13}$ 为连接各个节点之间的喷药实际或虚拟管路。

Note: Nodes $v_1 \sim v_5$ are the junctions of the pipeline, v_6 is the virtual node that represents the atmospheric pressure, edges $e_1 \sim e_{13}$ are the actual or virtual pipelines that connect the nodes.

图 3 旁路节流式变量喷药流体网络图

Fig.3 Fluid network diagram of variable rate spraying system

为降低喷药网络的复杂度, 对于较短的管路忽略其流体阻力, 并对其中一些节点进行了合并, 同时增加了虚拟节点 v_6 (代表外界大气压力)。喷头简化为一个具有固定流阻的局部阻力件, 并通过虚拟管路 with 节点 v_6 相连, 虚拟管路阻力为 0。6 个喷药分支上的 2 个喷头并联作为一个分支进行计算。

分支 e_{13} 中的活塞式隔膜泵为往复式泵, 其理论平均流量只与泵轴的转速有关, 由于泵构件间存在泄漏, 泵内泄漏与其出入口之间的压力有关, 将内泄漏等效为具有固定液阻的分支, 分支的实际流量为理论平均流量与泄漏流量之差。

根据流体网络的节点流量守恒定律和回路能量守恒定律^[24]可建立变量喷药系统的流体网络模型:

$$\begin{cases} \mathbf{A} \cdot \mathbf{Q} = 0 \\ \mathbf{B} \cdot \Delta \mathbf{H} = 0 \\ \Delta \mathbf{H} = \mathbf{H} + \mathbf{Z} - \mathbf{DH} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{Q} = [q_1, \dots, q_j, \dots, q_{13}]^T$ 为流体网络各分支的流量矩阵; \mathbf{A} 为基于节点 v_6 的 $m-1$ 行 n 列的基本关联矩阵, 描述了喷药网络图 G 中节点与分支连接的情况; \mathbf{B} 为 $n-m+1$ 行 n 列基本回路矩阵, 描述各个分支与回路之间的关系。 $\Delta \mathbf{H} = (h_1, h_2, \dots, h_n)^T$ 为各个分支的变化阻力之和; $\mathbf{H} = (h_1, h_2, \dots, h_n)^T$ 为各个分支阻力损失; $\mathbf{Z} = (z_1, z_2, \dots, z_n)^T$ 为各个分支的附加阻力, 变量喷药系统中附加阻力主要是由各个分支入口和出口的高度差所引起; \mathbf{DH} 为各个分支流体机械的动力, 变量喷药系统中只有分支 e_{13} 存在隔膜泵所提供的动力, 其余为 0。

流体网络中各个分支的阻力为沿程阻力和局部阻力之和。沿程阻力与管路中流体的流动状态有关, 对于变量喷药网络中, 大多数分支的流动状态处在层流到紊流的过渡状态或者紊流状态, 为简化计算, 本文以紊流状态计算各个分支的沿程阻力为:

$$h_p = s_p q^2 \quad (2)$$

式中: h_p 为分支的沿程阻力, Pa; q 为管路的流量, m^3/h ; s_p 为管路的沿程阻力系数, 即流阻, $(\text{N}\cdot\text{s}^2)/\text{m}^5$, 主要与管路的长度、直径和管壁的粗糙程度有关, 因此当管路固定后, 各个分支的流阻也是确定的, 可通过试验的方法测量分支流量与压降之间的关系来计算。

当流体通过管路中弯头、阀门、流量计等局部障碍时, 流体的流动状态或流速发生变化, 产生局部阻力为:

$$h_e = r_e q^2 \quad (3)$$

式中: h_e 为分支的局部阻力, Pa; r_e 为管路的局部流阻。

因此, 变量喷药系统的各个分支的阻力损失为:

$$\mathbf{H} = \mathbf{R} \cdot |\mathbf{Q}| \cdot \mathbf{Q} \quad (4)$$

式中: \mathbf{R} 为各个分支的流阻矩阵; $|\mathbf{Q}|$ 为各个分支流量的对角矩阵。

变量喷药网路图 3 中, 除回流支路 e_2 外均为固定流阻。电动调节阀开度变化引起回流支路 e_2 的流阻改变, 从而改变回流分支和喷药分支的分流流量。变量喷药网络分支流量矩阵 \mathbf{Q} 由 n 个未知流量组成, 基本关联矩阵 \mathbf{A} 的秩为 $m-1$, 通过节点质量守恒定律可以构造 $m-1$ 个独立的方程组, 基本回路矩阵的秩为 $n-m+1$, 通过回路能量守恒定律可以构造 $n-m+1$ 个独立的方程组, 2 个方程组联立共 n 个方程组, 即可求得各个分支流量的唯一解。因此, 变量喷药网络模型中分支的流阻 \mathbf{R} 确定后, 则可以计算得到分支的流量 \mathbf{Q} 。变量喷药网络中各个分支的流阻可通过试验的方法进行辨识^[25]。

2.2 调节阀电动执行机构模型

电动调节阀的开度与来自变量作业控制器的电压控制信号成比例, 实际开度由线性位置传感器反馈到差动放大器, 与控制电压信号进行比较, 当两者不相等时驱动直流电动机推动齿轮组和丝杠带动阀芯转动, 改变管路的流通截面积。不考虑电动机的电磁惯性和机械惯性, 直流电动机的转速与给定电压成正比, 电动执行机构中直流电动机供电电压一定, 其转速固定, 因此当控制信号改变时, 阀门的动态响应过程可以近似用积分环节和延迟

环节表示:

$$G_e(s) = \frac{K}{T_e s} e^{-\tau s} \quad (5)$$

式中: $G_e(s)$ 为电动调节阀执行机构传递函数; T_e 为积分时间常数, s; K 为增益。 $e^{-\tau s}$ 为喷药系统的延迟环节, τ 为总延迟时间, s; 经过多次测量, 从控制信号的给出到系统流量变化开始延迟大约在 2 s 左右。

3 Smith-模糊 PID 控制器设计

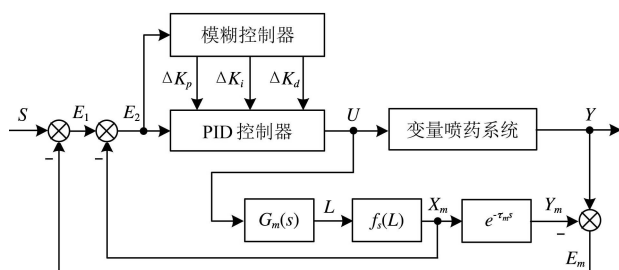
在田间作业过程中, 变量喷药系统根据农机的行驶速度, 机具的位置及该位置的处方信息实时调整喷头设定喷药量和作业幅宽, 变量作业控制器需对喷药量的调整响应迅速, 避免超调, 并在作业幅宽发生变化时, 保证喷头喷药量保持在设定值。

变量喷药过程中喷头的压力与流量的平方成正比, 且存在很大的滞后, 如电动调节阀响应延时, 涡轮流量计在小流量测量时的延时, 以及变量喷药流量稳定相对于压力稳定的延时等, 使得使传统 PID 控制的动态响应品质差且容易出现较大超调。模糊 PID 控制算法根据偏差的变化利用模糊控制原理对 PID 参数进行在线修正, 构成了鲁棒性强的自适应模糊 PID 控制器, 该算法对非线性系统控制的动态特性好, 抗干扰能力强。Smith 预估控制算法利用被控对象模型与 PID 控制器并联, 构成一个滞后补偿环节^[26-27], 使被延迟的被控量提前反馈到控制器, 改善系统响应速度和稳定性, 但该算法对于被控对象模型精度要求较高。

本文将模糊 PID 控制与 Smith 预估控制算法结合起来用于实现变量喷药系统控制, 设计了 Smith-模糊 PID 控制器, 结构如图 4 所示, 即克服了 PID 算法对于非线性系统精度不高及其鲁棒性差的缺点, 又减少了 Smith 控制算法对于模型误差的敏感性^[28-29]。由图 4 可知, 如果变量喷药系统的模型是完全精确的, 则实际喷药量 Y 与模型输出 Y_m 的偏差 $E_m = Y - Y_m = 0$, 系统的偏差 $E_2 = E_1 = S - X_m$, 即模糊 PID 控制器以不带延迟的变量喷药模型输出 X_m 作为反馈进行控制, 将滞后环节移到了控制回路的外面, 消除了系统滞后的影响。当变量喷药系统模型精度较低时, 由于不依赖模糊控制的存在, 变量喷药控制仍能取得较好的控制效果。

模糊控制器输入为实时喷药量的偏差 E 以及偏差变化率 EC , 其初始论域由变量喷药的调整范围所决定; 输出为 PID 参数的修正值 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d , 其初始论域可根据一组整定好的 PID 参数确定。输

入输出变量的模糊论域均设为 $[-6, 6]$, 模糊子集为{负大(NB), 负中(NM), 负小(NS), 零(ZO), 正小(PS), 正中(PM), 正大(PB)}。输入输出变量的隶属度函数均选用三角函数。模糊控制规则是总结PID参数整定过程中工程设计人员的技术知识和实际操作经验制定的^[30-31], 详细介绍参考文献[30]所示。



注: S 为设定喷药量, 是设定喷头喷药量与工作喷头个数的乘积; Y 为实际喷药总量; U 为变量作业控制器输出的控制电压; L 为阀门开度; E_1 和 E_2 为偏差; $f_s(L)$ 为变量喷药系统的流图网络模型; $G_m(s)$ 为不包含滞后环节的调节阀电动执行机构模型; $e^{-\tau_{ms}}$ 为变量喷药系统中的所有滞后环节总和; X_m 是不包含延迟环节的系统模型输出; Y_m 是包含延迟环节的系统模型输出; E_m 是模型输出与实际喷药量的偏差; ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d 是PID参数的修正值。

Note: S is the desired spray rate which is the product of desired nozzle spray rate and opened nozzle number; Y is the actual spray rate; U is the control voltage that from the variable rate controller; L is the valve opening percentage; E_1 and E_2 are errors; $f_s(L)$ is the fluid network model of variable spray rate system; $G_m(s)$ is the model of electric regulating actuator; $e^{-\tau_{ms}}$ is the sum of lag component; X_m is the system model output without the lag component; Y_m is the system model output without the lag component; E_m is the error of model output and actual spray rate; ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d are the modified value of PID parameters.

图4 变量喷药 Smith-模糊PID控制器

Fig.4 Smith-fuzzy PID controller of variable rate spraying

PID 参数 K_p 、 K_i 、 K_d 可通过式(6)在线计算得到^[21]。

$$K_j(t) = \frac{\sum_{l=1}^{49} y_j^l \mu_{A^l}(e(t)) \mu_{B^l}(ec(t))}{\sum_{l=1}^{49} \mu_{A^l}(e(t)) \mu_{B^l}(ec(t))} \times K_{Kj} + K_{j0} \quad (6)$$

式中: $j = p, i, d$, y_j^l 为第 l 条模糊规则中模糊输出语言值的隶属度函数中心点; $\mu_{A^l}(e(t))$ 和 $\mu_{B^l}(ec(t))$ 为输入变量 e 和 ec 在第 l 条模糊规则中其模糊语言值的隶属度; K_{Kj} 为各个输出变量的比例因子; K_{j0} 为PID控制各参数初值。

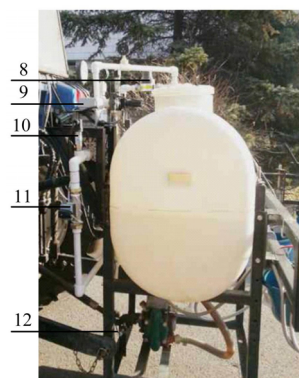
4 试验验证

为验证基于喷药流体网络模型的 Smith-模糊PID控制算法对于旁流式变量喷药控制系统的有效性和优越性, 本文对改造的 3W-250 型喷杆喷雾机

以3点悬挂的方式挂接到雷沃 TA800 拖拉机上, 隔膜泵动力由拖拉机后传动轴提供, 构成了变量喷药试验平台, 如图5所示。



a. 后视图
a. Back view



b. 侧视图
b. Side View

1. GPS 天线 2. 变量作业控制器 3. 田间计算机 4. 压力表 5. 流量传感器 6. 雷达速度传感器 7. 电磁阀 8. 安全阀 9. 电动调节阀 10. 压力传感器 11. 流量传感器 12. 转速传感器
1. GPS antenna 2. Variable rate controller 3. Field computer 4. Pressure gauge 5. Flow meter 6. Radar speed sensor 7. Solenoid valve 8. Safety valve 9. ERV 10. Pressure sensor 11. Flow meter 12. Rotational speed sensor

图5 变量喷药试验平台

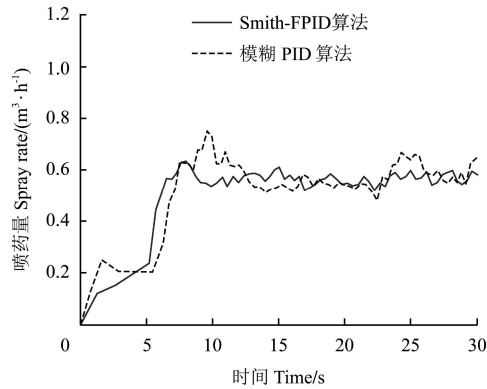
Fig.5 Variable rate spraying experiment platform

4.1 变量喷药试验

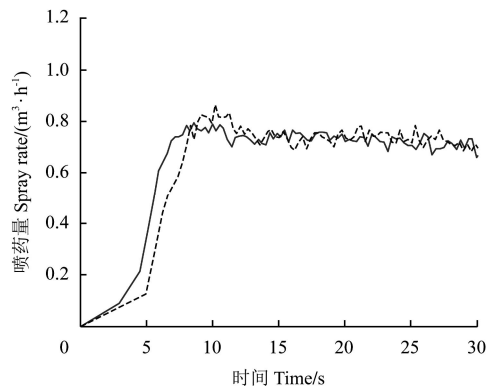
拖拉机油门松开且行走在怠速, 设定每个喷头的喷药量为 $0.048, 0.06, 0.072 \text{ m}^3/\text{h}$, 12 个喷头同时工作, 分别采用模糊PID控制和 Smith-模糊PID控制算法实现喷药量的调节, 2 种控制算法选用相同的控制参数, 喷药总量由主喷药管路的流量传感器测量, 通过 CAN 总线记录到电脑中, 试验结果如图6所示。

由图6和表1可知, 对于3个设定喷药量, 2种控制算法的超调量都随着设定值的增加而逐渐减小。当设定值为 $0.576 \text{ m}^3/\text{h}$, 模糊PID控制算法和 Smith-模糊PID控制算法的超调量最大, 分别占设定喷药量的 30.2%和 13.1%, 稳态绝对值平均误差最大, 分别占设定喷药量的 4.77%和 3.52%。当

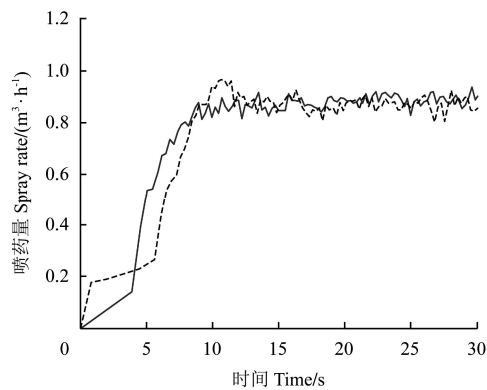
设定值增加为 $0.864 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 模糊 PID 控制算法下超调量减小到 11.8%, 稳态绝对值平均误差为 2.8%, 而 Smith-模糊 PID 控制算法不存在超调, 稳态绝对值最小为 2.35%。比较而言, 后者控制算法的动态响应较为迅速, 响应时间较短, 超调量更少, 稳定性更好。



a. 喷药设定值 $0.576 \text{ m}^3/\text{h}$
a. Desire spray rate $0.576 \text{ m}^3/\text{h}$



b. 喷药设定值 $0.72 \text{ m}^3/\text{h}$
b. Desire spray rate $0.72 \text{ m}^3/\text{h}$



c. 喷药设定值 $0.864 \text{ m}^3/\text{h}$
b. Desire spray rate $0.864 \text{ m}^3/\text{h}$

注: 每个喷头的喷药量依次为 0.048 、 0.06 、 $0.072 \text{ m}^3/\text{h}$, 共 12 个喷头。
Note: The spray rate of each nozzle is 0.048 、 0.06 、 $0.072 \text{ m}^3/\text{h}$ respectively, and there are totally 12 nozzles.

图 6 变量喷药试验响应曲线

Fig.6 Response curve of variable spraying rate

表 1 变量喷药误差分析
Table 1 Variable spray error analysis

设定喷雾量值 Desired spray rate	超调量 Overshoot		绝对值平均误差 Mean absolute error	
	Smith-模糊 PID 算法	模糊 PID 算法	Smith-模糊 PID 算法	模糊 PID 算法
0.576	0.0756	0.1739	0.0203	0.0275
0.720	0.0743	0.1434	0.0200	0.0228
0.864	--	0.1022	0.0203	0.0242

因此, 模糊 PID 控制算法不能很好地克服变量喷药系统滞后的影响, 产生了较大的超调量, Smith-模糊 PID 控制算法基于喷药流体网络模型对系统滞后环节进行补偿, 有效减少了变量喷药系统初始阶段的超调, 提高了变量喷药稳定性。

4.2 幅宽控制试验

当喷头设定喷药量 $0.06 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 当系统稳定在设定喷药量后 20 s, 关闭 2 组喷头, 调整喷药幅宽, 则喷药总量由 $0.72 \text{ m}^3/\text{h}$ 减少为 $0.48 \text{ m}^3/\text{h}$, Smith-模糊 PID 算法和 PID 算法均采用同一组参数, 观察并记录在 2 种算法控制下喷药总量的响应情况, 如图 7 所示。

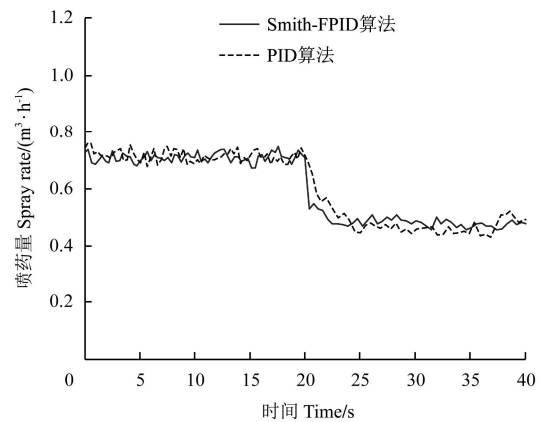


图 7 幅宽控制试验响应曲线

Fig.7 Response curve of swath control

由图 7 可知, 喷头幅宽改变后, 2 种控制算法均不存在超调, 传统的 PID 控制算法经过约 4 s 后重新稳定, 关闭 2 组喷头后, 稳态绝对值平均误差由 $0.0163 \text{ m}^3/\text{h}$ 变为 $0.0118 \text{ m}^3/\text{h}$, 而 Smith-模糊 PID 控制算法经过约 2 s 后重新稳定在设定值, 喷头关闭前后的稳态绝对值平均误差分别为 0.017 和 $0.0185 \text{ m}^3/\text{h}$ 。比较而言, 无论喷头关闭前后, 2 种控制算法的稳态误差相差并不大, 且均不存在超调, 但是后者动态响应更为迅速。

因此, Smith-模糊 PID 控制算法通过 PID 参数

的模糊自适应调节,加快了系统的响应速度,且具有较好地适应能力和鲁棒性。

5 结 论

本文构建了旁路节流式变量控制系统,运用流体网络理论建立了变量喷药系统的数学模型,将对被控对象参数变化不敏感的模糊 PID 控制和 Smith 预估控制算法结合起来,消除了系统存在的滞后性和非线性影响。试验结果表明,旁路节流式变量喷药控制方法是可行的,在不同的喷药设定值下,Smith-模糊 PID 控制算法超调量小于 13.1%,且随着设定值的增加到减小,稳态绝对值平均误差小于 3.52%,具有较好的适应能力和鲁棒性,且当喷头关闭时,响应时间较短。

关于变量喷药网络模型的建立以及流阻辨识将进行深入的研究。

[参 考 文 献]

- [1] 王利霞,张书慧,马成林,等.基于 ARM 的变量喷药控制系统设计[J].农业工程学报,2010,26(4):113—118.
Wang Lixia, Zhang Shuhui, Ma Chenglin, et al. Design of variable spraying system based on ARM[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(4): 130—133. (in Chinese with English abstract)
- [2] 翟长远,朱瑞祥,随顺涛,等.车载式变量施药机控制系统设计与试验[J].农业工程学报,2009,25(8):105—109.
Zhai Changyuan, Zhu Ruixiang, Sui Shuntao, et al. Design and experiment of control system of variable pesticide application machine hauled by tractor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(8): 105—109. (in Chinese with English abstract)
- [3] 魏新华,蒋杉,孙宏伟,等.PWM 间歇喷雾式变量喷施控制器设计与测试[J].农业机械学报,2012,43(12):87—93.
Wei Xinhua, Jiang Shan, Sun Hongwei, et al. Design and test of variable rate application controller of intermittent spray based on PWM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 87—93. (in Chinese with English abstract)
- [4] 王浩,陈树人.基于 PWM 的变量喷施控制系统设计及实验研究[J].农机化研究,2012(12):159—161.
Wang Hao, Chen Shuren. The design and experimental research of variable spraying system based on PWM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012(12): 159—161. (in Chinese with English abstract)
- [5] 邓巍,丁为民,何雄奎.PWM 连续变量喷雾的雾滴速度和能量特性[J].农业工程学报,2009,25(增刊 2):66—69.
Deng Wei, Ding Weimin, He Xiongkui. Droplet velocity and energy characteristics of continuously variable spray based on pulse width modulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(Supp. 2): 66—69. (in Chinese with English abstract)
- [6] 张文昭,刘志壮.3WY-A3 型喷雾机变量喷雾实时混药控制试验[J].农业工程学报,2011,27(11):130—133.
Zhang Wenzhao, Liu Zhizhuang. Experiment on variable rate spray with real-time mixing pesticide of 3WY-A3 sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(11): 130—133. (in Chinese with English abstract)
- [7] 周舟,傅泽田,王秀,等.直接注入式喷药机延时性测试系统的研究[J].中国农业大学学报,2009,14(6):91—96.
Zhou Zhou, Fu Zetian, Wang Xiu, et al. A system for the lag time detection of a chemical direct injection applicator[J]. Journal of China Agricultural University, 2009, 14(6): 91—96. (in Chinese with English abstract)
- [8] 邓巍,丁为民,何雄奎.变量喷施技术及其雾化特性评价方法综述[J].中国农业大学学报,2009,14(3):94—102.
Deng Wei, Ding Weimin, He Xiongkui. Technologies and evaluation methodology of variable spray[J]. Journal of China Agricultural University, 2009, 14(3): 94—102. (in Chinese with English abstract)
- [9] 陈树人,尹东富,魏新华,等.变量喷药自适应神经模糊控制器设计与仿真[J].排灌机械工程学报,2011,29(3):272—276.
Chen Shuren, Yin Dongfu, Wei Xinhua, et al. Design and simulation of variable weed spraying controller based on adaptive neural fuzzy inference system[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(3): 272—276. (in Chinese with English abstract)
- [10] 史岩,祁力钧,傅泽田,等.压力式变量喷雾系统建模与仿真[J].农业工程学报,2004,20(5):118—121.
Shi Yan, Qi Lijun, Fu Zetian, et al. Model development and simulation of variable rate of pressure spray[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(5): 118—121. (in Chinese with English abstract)
- [11] 魏新华,蒋杉,张进敏,等.脉宽调制间歇喷雾变量喷施系统施药量控制[J].农业机械学报,2013,44(2):87—92.
Wei Xinhua, Jiang Shan, Zhang Jinmin, et al. Application rate control characteristics of blended pulse variable rate application system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 87—92. (in Chinese with English abstract)
- [12] 翟长远,王秀,密雅荣,等.PWM 变量喷雾喷头流量模型[J].农业机械学报,2012,43(4):40—44.
Zhai Changyuan, Wang Xiu, Mi Yaron, et al. Nozzle flow

- model of PWM variable-rate spraying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 40—44. (in Chinese with English abstract)
- [13] 黄胜, 朱瑞祥, 王艳芳, 等. 变量施药机的恒压变量控制系统设计及算法[J]. 农机化研究, 2011(2): 19—22. Huang Sheng, Zhu Ruixiang, Wang Yanfang, et al. Design and algorithm of constant pressure and variable flow control system of variable pesticide application machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011(2): 19—22. (in Chinese with English abstract)
- [14] 宋乐鹏, 董志明, 向李娟, 等. 变量喷雾流量阀的变论域自适应模糊 PID 控制[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 114—118. Song Lepeng, Dong Zhiming, Xiang Lijuan, et al. Variable universe adaptive fuzzy PID control of spray flow valve[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(11): 114—118. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘志壮, 洪添胜, 李震, 等. 基于模糊控制的流量控制阀仿真[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 83—86. Liu Zhizhuang, Hong Tiansheng, Li Zhen, et al. Simulation of flow control valve based on fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(2): 83—86. (in Chinese with English abstract)
- [16] 袁炜锋, 苗玉彬. 水田宽幅喷雾机变量控制系统研究[J]. 农机化研究, 2010(7): 17—20. Yuan Weifeng, Miao Yubin. A research on variable rate spraying control system of paddy sprayer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010(7): 17—20. (in Chinese with English abstract)
- [17] 赵竞成, 任晓力. 喷灌工程技术[M]. 北京: 水利水电出版社, 2003.
- [18] 王俊, 祁力钧. 喷雾机喷杆压力损失及对喷雾质量的影响[J]. 农业机械学报, 2006, 37(3): 42—45. Wang Jun, Qi Lijun. Pressure drop on the boom sprayer and its effect on spraying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(3): 42—45. (in Chinese with English abstract)
- [19] Hu Jingtao, Gao Lei, Hu HeChun, et al. Design and development of an experiment platform for study on agricultural machinery navigation technology[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2011, 20(2): 30—35.
- [20] Liu Xiaoguang, Hu JingTao, Hu HeChun, et al. Design and implementation of visible human-machine interface for trajectory tracking in agriculture vehicle navigation[C]// Advanced Materials Research. Clausthal-zellerfeld, Germany: Trans Tech Publications, 2012: 631—635.
- [21] 李逃昌, 胡静涛, 高雷, 等. 基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 205—210.
- Li Taochang, Hu Jingtao, Gao Lei, et al. Agricultural machine path tracking method based on fuzzy adaptive pure pursuit model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 205—210. (in Chinese with English abstract)
- [22] 高雷, 胡静涛, 白晓平, 等. 面向精准农业应用的农机自动驾驶控制系统研究[Z]. 重庆, 2010.
- [23] 郭娜, 胡静涛, 王鹤. 基于 GPS 导航的插秧机作业控制系统[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 200—204. Guo Na, Hu Jingtao, Wang He. Intelligent operation control system for rice transplanter based on GPS navigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 200—204. (in Chinese with English abstract)
- [24] 刘剑, 贾进章, 郑丹. 流体网络理论[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2002.
- [25] 刘永鑫. 基于矩阵论的供热管网阻力系数辨识研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011. Liu Yongxin. Pipe Friction Parameters Identification of Heat-supply Networks Based on Matrix Theory[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [26] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 1—65.
- [27] 王彦, 刘宏立, 杨珂. 暖通空调控制系统 Smith 预估器自适应算法设计[J]. 信息与控制, 2011, 40(3): 408—412. Wang Yan, Liu Hongli, Yang Ke. Adaptive algorithm design of smith predictor in HVAC control system[J]. Information and Control, 2011, 40(3): 408—412. (in Chinese with English abstract)
- [28] 郑恩让, 王新民. 时滞系统的智能控制方法[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(12): 2947—2949. Zheng Enrang, Wang Xinmin. Intelligent control of time delayed system[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(12): 2947—2949. (in Chinese with English abstract)
- [29] 陈以, 杨启伟. 模糊 Smith 智能温度控制器的设计与仿真[J]. 控制工程, 2007, 14(4): 422—425. Chen Yi, Yang Qiwei. Design and simulation of fuzzy smith intelligent temperature controller[J]. Control Engineering of China, 2007, 14(4): 422—425. (in Chinese with English abstract)
- [30] 郭娜, 胡静涛. 插秧机行驶速度的变论域自适应模糊 PID 控制[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 245—251. Guo Na, Hu Jingtao. Variable universe adaptive fuzzy-PID control of traveling speed for rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 245—251. (in Chinese with English abstract)
- [31] 姜杉, 冯文浩, 杨志永, 等. 基于模糊 PID 调节的核磁兼容机器人气动控制技术[J]. 机器人, 2012, 34(5): 531—538.

Jiang Shan, Feng Wenhao, Yang Zhiyong, et al.
Pneumatic control technology based on fuzzy PID for

MRI compatible robots[J]. Robot, 2012, 34(5): 531—538.
(in Chinese with English abstract)

Design and experiment of variable rate spaying system on Smith-Fuzzy PID control

Guo Na^{1,2,3}, Hu Jingtao^{1,2,3*}

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Networked Control System, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: To achieve variable rate spraying, a pressure-based variable rate spaying system was designed to control the spray rate by adjusting the opening percentage of electrical regulating valve at the bypass pipeline. This returns excessive flow discharged by a piston diaphragm pump according to the flow rate of the spray pipeline, and adjusts the boom width by shutting ON or OFF selected solenoid valves at each section. The ARM9 based variable rate controller was designed to measure the system pressure and flow rate, and generate the control signal. A commercial 3W-250 boom sprayer with 12 flat fan spray nozzles was modified to a variable rate sprayer and mounted behind the LOVAL TA800 tractor. The 12 nozzles were divided to 6 boom sections and the pump was derived by the power take-off shaft of the tractor. The variable rate sprayer was represented by a directed graph of fluid network that consists of a set of junctions, called nodes, and certain lines joining a pair of nodes, called the edges. To reduce the complexity of the spray network, the fluid resistance of the short pipeline was ignored, some nodes were merged, one virtual node was increased to represent the external atmospheric pressure, and finally the graph of the variable rate spraying system involved 6 nodes and 12 edges. The flow rate and pressure distribution within the spray network under steady state conditions was described by the junction of continuity equations and the loop energy equations. The electrical regulating actuator was also modelled to describe the relationship between the voltage control signal and the valve opening percentage. The fuzzy-PID control algorithm was adopted for the nonlinear, time-varying variable rate spraying system to achieve better performance than with the conventional PID control algorithm. The fuzzy control algorithm was used for tuning the PID parameters online. The Smith predictor based on the system model was introduced to overcome the side effects of long time-lag that included the response delay of the flow meter at a low spray rate and the electrical regulating valve and to stabilize the delay of the spray rate. The variable rate spraying experiments were accomplished at 3 different desired nozzle spray rates which are 0.864, 0.72 and 0.576 m³/h for the Smith-Fuzzy PID control and the Fuzzy PID control algorithm without boom section control while the tractor was running at an idle speed of approximately 1 m/s. The results showed that the Smith-Fuzzy PID control algorithm has the better dynamic response and the higher application accuracy than the PID control algorithm, the overshoot and the steady mean absolute error of the former control algorithm were less than 13.1% and 3.52% respectively, and both decreased with the raise of the desired spray rate. The boom section control experiments were also conducted for the Smith-Fuzzy PID control and the PID control algorithm. Two boom sections were turned off at the same time while the spray rate stabilized at a desired spray rate for each nozzle is 0.06 m³/h. The results revealed that the dynamic response curve of the former algorithm had a shorter response time and no overshoot after the two boom sections shut off, and the mean absolute error was 0.017 m³/h and 0.0185 m³/h respectively.

Key words: agriculture machinery; spraying; fuzzy control; smith prediction control; fluid network

(责任编辑: 张俊芳)