

变量喷雾流量阀的变论域自适应模糊 PID 控制

宋乐鹏¹, 董志明¹, 向李娟², 型思远¹

(1. 重庆科技学院电气与信息工程学院, 重庆 401331; 2. 重庆科技学院图书馆, 重庆 401331)

摘要: 为解决变量喷雾过程中实时混药时农药微小流量的控制问题, 采用小型针阀、直流电动机及减速器设计了机电流量控制阀。构建了机电流量控制阀传递函数的数学模型, 并为之设计了变论域自适应模糊 PID 控制算法。对该流量控制阀进行了变论域自适应模糊 PID 控制和 PID 控制的 MATLAB 仿真, 比较结果表明: PID 控制的响应时间为 3.5 s, 最大超调量约为 39.0%, 变论域自适应模糊 PID 的响应时间为 0.93 s, 超调量最大不超过 2.9%。系统稳定性, 准确性和快速性等指标完全满足农业技术要求。

关键词: 阀, 模糊控制, 计算机仿真, PID 控制, 变量喷雾

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.11.020

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-11-0114-05

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 CSAE, 2010, 26(11): 114—118. (in Chinese with English abstract)

0 引言

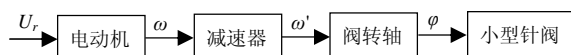
随着国内外现代农业装备的发展, 植保机械及施药技术有了长足的发展, 喷药方法由传统的常量喷雾发展为变量喷雾^[1-2]。然而, 微小流量检测与控制的问题还没有得到很好解决, 目前国内变量喷雾主要采用预混药式, 药液浓度不变, 通过改变施药量得以实现^[3-5]。其中, 主要手段有改变压力式^[3]、脉宽调制 (PWM) 式等^[4]。以上方式通常使喷雾效果 (雾滴大小、飘移性和分布均匀性) 受到一定的影响。虽然实时混药变量喷雾也已有研究成果, 但农药流量计量和控制问题仍没有得到完全解决。流量控制可采用电磁比例阀和伺服阀来实现, 但这 2 种阀成本极高, 不便于在农用机械上推广使用; 此外, 比例阀的行程误差较大, 控制的稳定速度较慢和稳定性较差^[5]。为此, 本文主要对机电流量控制阀进行数学建模、模糊控制算法设计和 MATLAB 仿真, 为变量喷雾控制提供一种技术方法。

1 机电流量阀的设计及传递函数模型构建

1.1 机电流量阀的结

以机电流量阀作为车载式风送喷雾机农药流量控制阀, 其流量控制范围为 0.33~3.30 mL/s。流量控制阀由

小型针阀、连轴器、电动机及减速器组成, 如图 1 所示。针阀具有一个输入口和一个输出口用于连接输液管, 电动机接上一个微控制器, 微控制器使用变论域自适应模糊 PID (比例积分微分) 控制算法实现控制功能。通过微控制器来控制电动机正反转, 经减速器和连轴器后带动针阀旋转, 从而控制阀的开闭, 进而控制液体的流量。



注: U_r 为电动机工作电压; ω 为电机转速; ω' 为减速后转速; ϕ 为流量控制阀打开角

图 1 流量控制阀结构示意图

Fig.1 Structural diagram of flow control valve

1.2 机电流量阀的传递函数模型构建

直流电动机转轴经减速器与针阀的转轴相连, 电动机转速为 ω , 减速后转速为 ω' 。不考虑电磁惯性和机械惯性, 假设初始状态为零, 则由电动机转速 $\omega=k_1 U_r$, 减速输出 $\omega'=k_2 \omega$, 可得

$$\omega' = k_1 k_2 U_r \quad (1)$$

式中, k_1 为转换系数; k_2 为减速比; U_r 为电动机的工作电压。

当流量控制阀在一定的液压条件下, 流量值只与阀转轴旋转的角度有关, 流量与阀的旋转角度成一 Γ 型曲线^[6]。试验表明, 当液压为 11.77 kPa, 流量为 0.1~3.5 mL/s 时, 流量与打开角几乎成线性关系: $Q \approx 0.155\phi$, 其中 ϕ 为打开角。当流量大于 3.5 mL/s 时, 系数小于 0.155, 调节灵敏度下降, 控制响应时间将增长。又因为 $\omega' = d\phi/dt$, 并令 $k=k_1 k_2$, 等式 (1) 可表达为

$$d\phi = k U_r dt \quad (2)$$

在实际系统中, U_r 是一个常量 (为 12 V), 对上式积分可得

收稿日期: 2010-02-20 修订日期: 2010-05-01

基金项目: 国家自然科学基金项目支持 (10903033); 重庆市科技攻关项目 (2009AC6090); 重庆科技学院大学生科技创新计划资助

作者简介: 宋乐鹏 (1976—), 男, 陕西耀县人, 副教授。主要从事自动控制、模糊控制方面研究。重庆, 重庆科技学院电气与信息工程学院, 401331。Email: slphq@163.com

通信作者: 董志明 (1974—), 男, 江苏南通人, 副教授。主要从事自动控制、鲁棒控制方面研究。重庆, 重庆科技学院电气与信息工程学院, 401331。Email: zhmdong@yahoo.cn

$$\phi = kU_r(t - t_0) \quad (3)$$

式中, t_0 为电磁惯性和机械惯性, 对式 (3) 进行拉氏变换可得控制器的传递函数^[6]

$$G(s) = \Phi(s) = \frac{kU_r}{s^2} - \frac{t_0}{s} = \frac{-t_0 s + kU_r}{s^2} \quad (4)$$

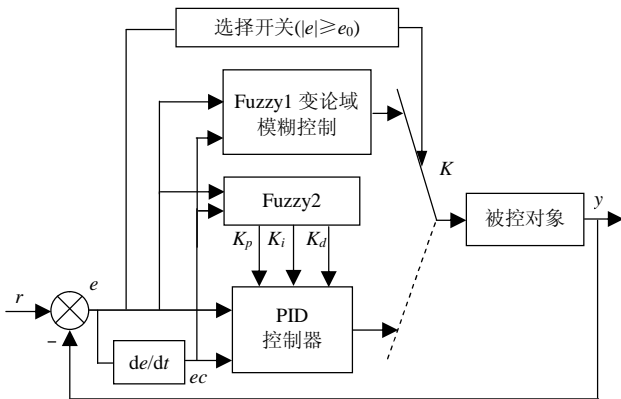
当 $U_r=12\text{ V}$ 时, 经测试 $\omega'=16.6\text{ r/min}=1.738\text{ rad/s}$, 即 $kU_r=1.738$; 电机起动延时为 $0.005\sim 0.01\text{ s}$, 这里取 $t_0=0.01\text{ s}$, 所以传递函数具体化为

$$G(s) = \frac{-0.01s + 1.738}{s^2} \quad (5)$$

2 模糊控制算法及模糊控制系统的生成

2.1 设计思想

变论域自适应模糊 PID 控制器结构对于流量阀这样一个具有较大滞后性、非线性的时变系统, 要想从根本上解决动态品质和稳定精度的矛盾, 单纯采用 PID (比例积分微分) 控制和模糊控制都不会取得较好的控制效果, 而采用变论域自适应模糊 PID 控制方式来控制不失为一种比较好的控制方法。它既具有模糊控制灵活而适应性强的优点, 又具有 PID 控制精度高的特点。结合自适应模糊系统控制器与 PID 控制器构成的一种变论域自适应模糊 PID 控制器, 如图 2 所示, 其中 K 为控制开关。



注: r 为参数自整定模糊 PID 控制器的输入量; y 为参数自整定模糊 PID 控制器的输出量; $e=r-y$ (e 称为系统误差), 下同; $ec=de/dt$ (ec 称为系统偏差变化率), 下同; K_p 为比例增益; K_i 为积分系数; K_d 为微分系数; e_0 为系统误差给定值; K 为转换开关

图 2 参数自整定模糊 PID 控制结构图

Fig.2 Structure chart of fuzzy PID controller with slfe-tuning

实际流量在大误差时 (即 $|e| \geq e_0$), 控制开关 K 选择变论域模糊控制器 Fuzzy1 控制的输出作为控制量 u_1 (开关 K 打到实线位置), 小误差时 (即 $|e| \leq e_0$) 则选择模糊 PID 控制器输出作为控制量 u_2 (开关 K 打到虚线位置), PID 控制器的参数 K_p 、 K_i 、 K_d 由 Fuzzy2 控制 (模糊增益自调整控制器) 进行在线修改, 实现 PID 控制器的参数在线自整定, 进一步改善 PID 控制器性能, 以适应控制系统的参数变化和工作条件的变化^[5]。

PID 控制是应用最广泛的一种控制规律之一, 在常规控制系统中, PID 控制作用的一般形式为

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}]$$

$$u(k) = K_p[e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^k e(i) + T_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T}] \quad (6)$$

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{i=0}^k e(i) + K_d [e(k) - e(k-1)]$$

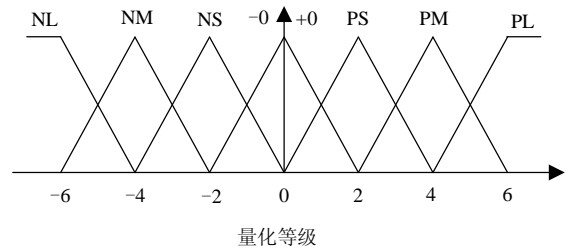
式中, $u(k)$ 、 $e(k)$ 分别为第 k 次采样时刻控制器的输出 (控制量) 和输入量 (误差); K_p 称为比例增益; T_i 、 T_d 分别为积分、微分时间常数; T 为采样周期; $K_i = K_p T / T_i$ 称为积分系数; $K_d = K_p T_d / T$ 称为微分系数。

这种 PID 控制器存在参数修改不方便, 不能进行自整定等缺点, 当应用到时变系统时, 系统的性能会变差, 甚至不稳定。因此本文采用 Fuzzy2 模糊控制器对 PID 参数进行在线自整定^[7-8]。

2.2 模糊控制器的结构

2.2.1 Fuzzy1 控制器的设计

根据实际控制要求, 本模糊控制器目标流量与实际流量的误差 E 的语言变量值取 (负大、负中、负小、零、正小、正中、正大), 误差的变化率 EC 及电压增量 ΔU 的语言变量值取 (负大、负中、负小、零、正小、正中、正大), 量化等级都取 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6\}$ 。各模糊子集的隶属函数取三角型函数, 如图 3 所示。



注: NL、NM、NS、PS、PM、PL 分别为负大、负中、负小、零、正小、正中、正大, 下同

图 3 隶属函数

Fig.3 Membership function

由于在不同的流量下, 系统要求的工作状态是不同的, 对误差及误差变化率的加权值应有所不同, 当系统误差较大时, 控制器的主要任务是快速消除误差, 因此, 应取较大的 a (模糊变量的修正因子, 下同) 值, 即加强误差的权值, 以加速系统的快速响应。反之, 当系统误差较小时, 控制器的主要任务是使系统尽快趋于稳定, 因此, 应取较小的 a 值, 即加强误差变化率的权值, 以提高系统的稳定性。为了满足系统在不同状态下对修正因子的不同要求, 引入 2 个修正因子。其解析表达式如下

$$\Delta U = \begin{cases} - < a_1 E + (1 - a_1) EC >, E = \pm 1, 0 \\ - < a_3 E + (1 - a_2) EC >, E = \pm 2, \pm 3 \end{cases}$$

式中 a_1 、 a_2 为 0 到 1 之间的实数且 $a_1 < a_2$ 。

一般情况下, 选取 $a_1 \leq 0.5$ 和 $a_2 \geq 0.5$ 。本控制系统中取 $a_1=0.4$ 和 $a_2=0.6$ 建立模糊控制查询表如表 1。

表 1 模糊控制查询表
Table 1 Fuzzy controlling inquiry

流量阀电压增量		流量阀流量增加模糊变量						
		-3	-2	-1	0	1	2	3
流量阀 流量与 设定值的 模糊 变量	-3	3	3	2	2	1	1	1
	-2	2	2	2	1	1	0	0
	-1	2	2	1	0	0	-1	-1
	0	2	1	1	0	-1	-1	-2
	1	1	1	0	0	-1	-2	-2
	2	0	0	-1	-1	-2	-2	-2
	3	-1	-1	-1	-2	-2	-3	-3

2.2.2 Fuzzy2 模糊控制器的设计

模糊自整定 PID 控制器是在 PID 算法的基础上,通

表 2 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 模糊控制规则表
Table 2 ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d Fuzzy control rules

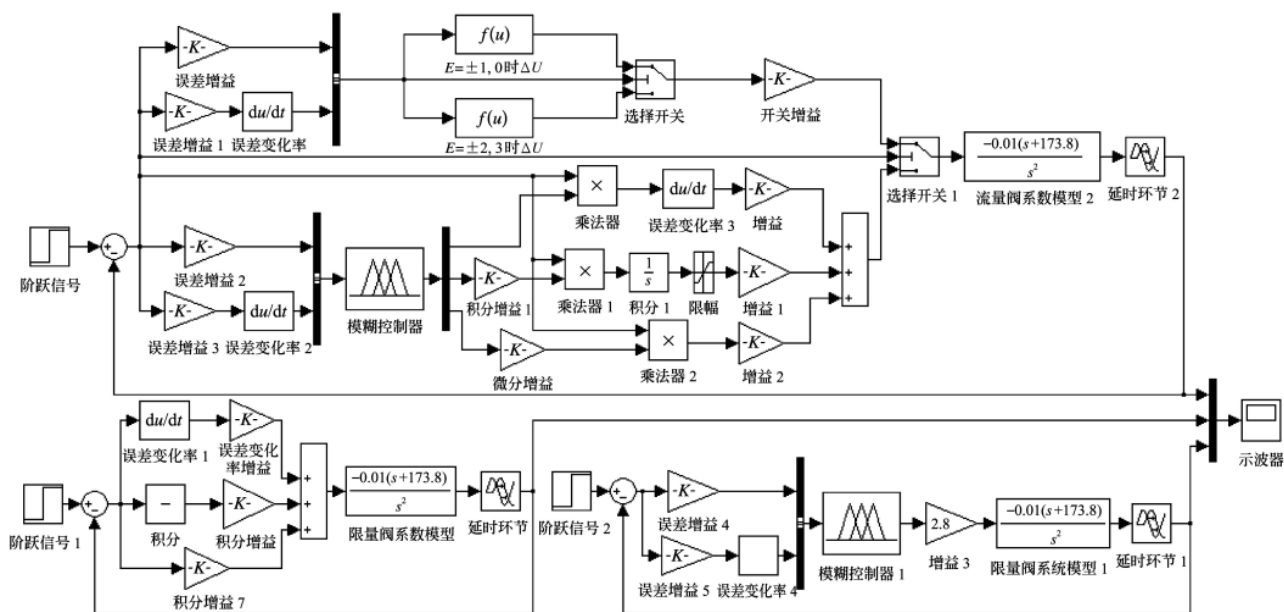
e	ΔK_p							ΔK_i							ΔK_d						
	ec							ec							ec						
	NB	NM	NS	0	PS	PM	PB	NB	NM	NS	0	PS	PM	PB	NB	NM	NS	0	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	0	0	NB	NB	NM	NM	NS	0	0	PS	NS	NB	NB	NB	NM	0PS
NM	PB	PB	PM	PS	PS	0	NS	NB	NB	NM	NS	NS	0	0	NS	NS	NB	NM	NM	NS	0
NS	PM	PM	PM	PS	0	NS	NS	NB	NM	NS	NS	0	PS	PS	0	NS	NM	NM	NS	NS	0
0	PM	PM	PS	0	NS	NM	NM	NM	NM	NS	0	PS	PM	PM	0	NS	NS	NS	NS	NS	0
PS	PS	PS	0	NS	NS	NM	NM	NM	NS	0	PS	PS	PM	PB	0	0	0	0	0	0	0
PM	PS	0	NS	NM	NM	NM	NB	0	0	PS	PS	PM	PB	PB	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	0	0	NM	NM	NM	NB	NB	0	0	PS	PM	PM	PB	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

注: e 为当前系统误差; ec 为当前系统误差的变化率,下同。

模糊控制器采用重心法 (COG) 对模糊子集反模糊化。反模糊化采用加权平均求得反模糊化后输出的 3 个 PID 整定参数的精确的值。PID 控制器根据实时整定输出的 3 个参数 (ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d), 输出精确值信号给电机, 由电机电压控制流量阀的实际流量。

3 模糊控制仿真及参数调整

图 4 中 PID 参数基值 K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 是采用最优 PID 参数整定方法 (IST2E 准则) 整定后^[8], 再经仿真调试略加修改后所得: $K_{p0}=2.013$ 、 $K_{i0}=0.0713$ 、 $K_{d0}=4.6092$ 。根



注: $du/dt=de/dt$; $f(u)=\Delta U$

图 4 变论域自适应模糊 PID/模糊/PID 控制系统

Fig.4 Variable universe adaptive fuzzy PID/Fuzzy/PID control system

据图 4 仿真模型, 在单位阶跃信号作用下, 研究了基于变论域自适应模糊 PID 控制系统的基本动态响应特性、抗干扰特性和鲁棒特性, 并与传统 PID 控制、传统模糊 (fuzzy) 控制方案进行了比较 (PID 参数是采用最优 PID 参数整定方法—IST2E 准则)。从仿真曲线来看 (如图 5), 变论域自适应模糊 PID 的超调量较小, 最大不超过 2.9%, 稳态误差为 $\pm 0.495\%$, 响应时间为 0.93 s。模糊控制的超调量最大不超过 19.2%, 稳态误差为 $\pm 0.98\%$ 。PID 控制的响应时间为 3.5 s, 最大超调量约为 39.0%, 稳态误差为 $\pm 1.97\%$ 。比较模糊控制与 PID 控制的性能, 对本流量控制阀而言变论域自适应模糊 PID 控制性能优于 PID 控制和模糊控制。

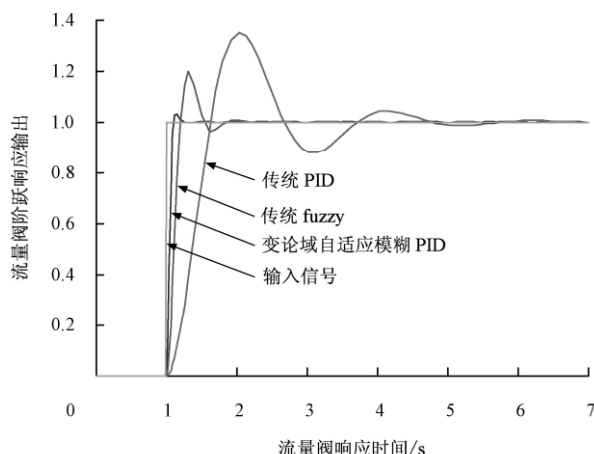


图 5 流量阀系统阶跃响应曲线

Fig.5 Step response curve flow valve system

4 结 论

本论文为变量喷雾设计了机电流量控制阀, 并建立了流量控制阀的传递函数模型; 为流量阀设计了变论域自适应模糊 PID 控制算法, 并应用 MATLAB 软件对阀进行了变论域自适应模糊 PID 控制的 MATLAB 仿真。

仿真结果表明: 变论域自适应模糊 PID 的超调量最大不超过 2.9%, 稳态误差为 $\pm 0.495\%$, 响应时间为 0.93 s。模糊控制的超调量最为 19.2%, 稳态误差为 $\pm 0.98\%$ 。PID 控制的响应时间为 3.5 s, 最大超调量约为 39.0%, 稳态误差为 $\pm 1.97\%$ 。比较以上 3 种算法可知, 变论域自适应模糊 PID 控制响应速度快、调节时间短、超调量小, 选择变论域自适应模糊 PID 控制算法来控制机电流量控制阀具有优势。

在实际变量喷雾过程中, 实际的响应时间必须通过实测响应曲线的方法来获得, 并由响应时间和行走速度及树冠的位置来确定变量喷雾控制超前时间, 以达到精准控制的目的。

参 考 文 献

- [1] 陈勇, 郑加强. 精确施药可变量喷雾控制系统研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 69—72.
Chen Yong, Zheng Jiaqiang. Control system for precision pesticide application based on variable rate technology[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(5): 69—72. (in Chinese with English abstract)
- [2] 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 CSAE, 2004, 20(5): 118—121. (in Chinese with English abstract)
- [3] Dickinson Aaron R, Johnson Donald M, Wardlow Georgew. A compact variable rate sprayer for teaching precision agriculture[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2007, 23(3): 267—272, 2007.
- [4] 焦俊生, 张伟. 脉宽调制型变量喷雾控制 ECU 设计与分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(1): 123—126.
Jiao Junsheng, Zhang Wei. Design and analysis of the ECU for PWM spraying[J]. Transactions of the CSAM, 2007, 38(1): 123—126. (in Chinese with English abstract)
- [5] Coelho J P, Moura Oliveira P B, et al. Greenhouse air temperature predictive control using the particle swarm optimisation algorithm[J]. Comput Electron Agric, 2005, 49, 330—344.
- [6] 李祖欣. MATLAB 在模糊控制系统设计和仿真的应用[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(1): 132—134.
Li Zuxin. Application of MATLAB in the design and simulation of fuzzy control system[J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2003, 15(1): 132—134. (in Chinese with English abstract).
- [7] Liu D X. PID control and program realizing method[J]. Chinese Journal of Neijiang Teacher's College, 2005, 20(6): 12—14.
- [8] Gang Feng. A survey on analysis and design of model-based fuzzy control systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2007, 14(5): 676—697.
- [9] Monroe G E, Taylor J H. Traffic lanes for controlled traffic cropping system[J]. Agr Eng Res, 1989, 44(1): 23—31.
- [10] 余泳昌, 胡建东, 毛鹏军. 现代化温室环境参数的模糊控制[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 72—75.
Yu Yongchang, Hu Jiandong, Mao Pengjun. Fuzzy control forenvironment parameters in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2): 72—75. (in Chinese with English abstract)
- [11] 葛建坤, 罗金耀, 李小平, 等. 基于 ANFIS 的温室气温模糊控制仿真[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 216—221.
Ge Jiankui, Luo Jinyao, Li Xiaoping, et al. Simulation of fuzzy control for greenhouse temperature based on ANFIS[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 216—221. (in Chinese with English abstract)
- [12] 于蓉蓉, 魏学业, 覃庆努, 等. 基于 Takagi-Sugeno 模糊模型的电流跟踪型光伏并网逆变器[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 240—245.
Yu Rongrong, Wei Xueye, Tan Qingnu, et al. Photovoltaic grid-connected inverter with current tracking control[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(5): 240—245. (in Chinese with English abstract)

- [13] 倪军, 毛罕平, 程秀花. 脱粒滚筒自调整模糊控制及 VLSI 实现技术[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 134—138.
Ni Jun, Mao Hanping, Cheng Xiuhua. Self-adjustment fuzzy control for threshing cylinder and its VLSI implementation [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(4): 134—138. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张伟, 何勇, 裘正军, 等. 基于无线传感网络与模糊控制的精细灌溉系统设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(13): 7—12.
Zhang Wei, He Yong, Qiu Zhengjun, et al.; Design of precision irrigation system based on wireless sensor network and fuzzy control[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(13): 7—12. (in Chinese with English abstract)
- [15] 任文涛, 杨懿, 张本华, 等. 温室节点式渗灌自动控制系统设计与实现[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 59—63.
Ren Wentao, Yang Yi, Zhang Benhua, et al. Design and implementation of automatic control system for sectional type subsurface drip irrigation in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 59—63. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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. Design of precision irrigation system based on wireless sensor network and fuzzy control[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 83—86. (in Chinese with English abstract)

Variable universe adaptive fuzzy PID control of spray flow valve

Song Lepeng¹, Dong Zhiming¹, Xiang Lijuan², Xing Siyuan¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China;

2. Library, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: To solve the control problem of micro-flow or low flow on real-time mixing of pesticides in the course of variable rate spraying, an electromechanical flow control valve was developed with a miniature pin valve, a direct current (DC) motor, and a gear set. Mathematical model of Electromechanical flow control valve was constructed, and variable universe adaptive fuzzy PID control algorithm was designed. The simulations with software MATLAB for the variable universe adaptive fuzzy PID controller and a PID controller of the electromechanical flow control valve were carried out. Results showed that the response time of PID control was 3.5 s, the maximum overshoot was about 39.0%, and the response time of variable universe adaptive fuzzy PID was 0.93 s, and the maximum overshoot didn't exceed 2.9%. The system is of good stability, accuracy and rapidity and able to satisfy the agriculture technical requirements.

Key words: valves, fuzzy control, computer simulation, PID control, variable rate spraying