

高速水稻插秧机仿形系统控制方法

张秀芝, 贾全, 尚涛, 袁瑞强

(吉林大学机械科学与工程学院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 研究了一种高速水稻插秧机电液控制仿形系统. 对于仿形过程的升降和中立两个阶段, 提出将力位切换的控制方式运用到插秧机仿形系统的设计上来. 根据仿形系统在不同阶段的性能要求, 分别运用 Matlab/Simulink 软件建立了仿形系统在升降阶段的力反馈式控制模型和中立阶段的力反馈式控制模型以及二者切换时的力位切换控制模型. 并且, 为了提高仿形系统的控制性能, 采用模糊 PID 算法来对系统进行控制. 仿真研究表明, 仿形系统采用模糊 PID 控制可以显著地提高其不同工作阶段的控制性能.

关键词: 高速水稻插秧机; 仿形系统; 电液控制; 力位切换; 模糊 PID

中图分类号: S 223.9 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)09-1288-05

Control Method of High-Speed Rice Transplanter's Profiling System

ZHANG Xiu-zhi, JIA Quan, SHANG Tao, YUAN Rui-qiang

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China. Corresponding author: SHANG Tao, E-mail: shangtao@jlu.edu.cn)

Abstract: A kind of high-speed rice transplanter's electro-hydraulic control profiling system was designed and researched. In consideration of the lifting and neutral stages of the profiling system for high-speed rice transplanters, a pressure-position switch control method was applied in rice transplanters' profiling system design. According to the performance requirements of rice transplanters at different stages, the models of position-feedback control at the lifting stage and power-feedback control at the neutral stage, as well as the model of power-position switch control were respectively established by using the Matlab/Simulink software platform. Moreover, in order to improve the control performance of the system, the fuzzy PID algorithm was adopted to control the system. The results showed that the fuzzy PID control can greatly promote the control performance of the system compared with the traditional PID control at different stages.

Key words: high-speed rice transplanter; profiling system; electro-hydraulic control; force-position switch; fuzzy PID

在水稻种植技术中, 秧苗的栽插深度对插秧机有很高的要求, 直接决定着秧苗的成活率及分蘖效果. 液压仿形系统是插秧机插植部的升降装置, 它可以有效控制秧苗的入土深度、减小浮板的壅泥壅水现象, 是影响插秧机工作性能的重要环节^[1-2]. 因此, 本文设计并研究了一种高速水稻插秧机电液仿形控制系统.

1 仿形系统的工作原理

插秧机液压仿形系统的工作原理按照机架与浮板的连接方式可以分为铰接式连接和整体式连接两种^[3]. 其中, 铰接式连接属于位置控制系统, 整体式连接属于力反馈控制系统, 二者作用原理相同, 只是反馈的物理量不同. 以整体式连接为例, 图1为碧浪2ZG-630四轮驱动高速插秧机

的液压仿形系统^[4]。

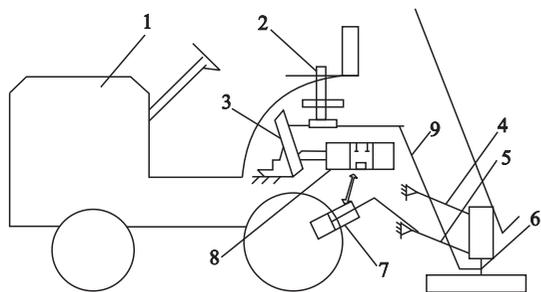


图 1 高速插秧机仿形系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of high-speed rice transplanter's profiling system

1—机体；2—油压敏感度调节手柄；3—摇杆；4—上拉杆；5—下拉杆；6—机械式传感器；7—液压缸；8—仿形滑阀；9—仿形钢丝绳。

当高速插秧机在水田中作业时，仿形滑阀由机械式传感器控制。插秧机走在水田硬底层的下坡时，插植部与泥水表面的相对距离较小，使得浮板受到泥水的浮力增大。安装在浮板上的压力传感器通过仿形钢丝绳和调节手柄将浮板的压力变化传递给仿形系统的仿形滑阀，使滑阀的阀芯运动，从而控制插秧机的液压升降机构使插植部上升，直到浮板的受力状态恢复到初始值^[5]。

2 仿形系统的控制方法

插秧机仿形系统的控制一般与拖拉机耕深系统类似。控制方法主要有位移反馈式调节控制、压力反馈式调节控制以及二者的综合调节控制^[6-10]。

本文将力位切换的控制方式引用到插秧机仿形系统的上升和下降阶段，系统根据水田沟底的起伏变化进行位置跟随控制，在中立范围时，仿形系统的液压系统进行压力保持。其切换调节原理如图 2 所示。

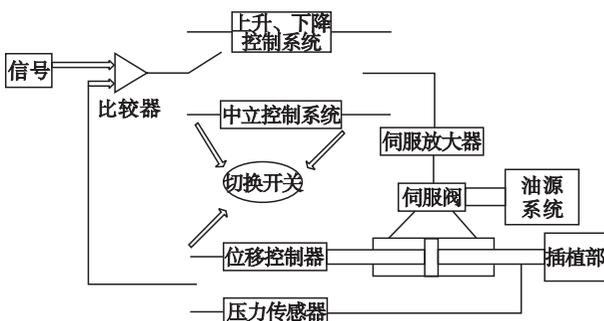


图 2 仿形系统力位切换原理图

Fig. 2 Force-position switch principle diagram of the profiling system

3 仿形系统的数学模型

当插秧机发生侧倾时，控制器根据升降机构动作所需的位移或力，计算出仿形滑阀阀芯所需的运动位移 x_v ，从而控制升降液压缸动作。

通过分析得出，仿形系统在升降阶段的位调节系统的传递函数为

$$G_1(s) = \frac{k_a k_v k_q k_f / A}{s \left(\frac{s^2}{\omega_v^2} + \frac{2\xi_v}{\omega_v} s + 1 \right) \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (1)$$

仿形系统中立阶段力调节系统的传递函数为

$$G_2(s) = \frac{\frac{k_a k_v k_q k_f}{K_{ce} i} \left(\frac{s^2}{\omega_m^2} + \frac{2\xi_m}{\omega_m} s + 1 \right)}{\left(\frac{s}{\omega_r} + 1 \right) \left(\frac{s^2}{\omega_0^2} + \frac{2\xi_0}{\omega_0} s + 1 \right) \left(\frac{s^2}{\omega_v^2} + \frac{2\xi_v}{\omega_v} s + 1 \right)} \quad (2)$$

通过计算得出仿形系统上升、下降时的位调节系统的传递函数为

$$G_3(s) = \frac{60 \times \left(\frac{s^2}{58^2} + \frac{2 \times 0.14}{58} s + 1 \right)}{\left(\frac{s}{0.3} + 1 \right) \left(\frac{s^2}{680^2} + \frac{2 \times 0.7}{680} s + 1 \right) \left(\frac{s^2}{331^2} + \frac{2 \times 0.027}{331} s + 1 \right)} \quad (3)$$

经过在 Matlab 中的仿真分析可以得到仿形系统升降阶段校正前的开环伯德图，如图 3 所示。仿形系统在校正前的幅值裕量、相位裕量、穿越频率分别为 $G_m = 18 \text{ dB}$ ， $P_m = 88^\circ$ ， $\omega_c = 2 \text{ rad/s}$ ，系统稳定。

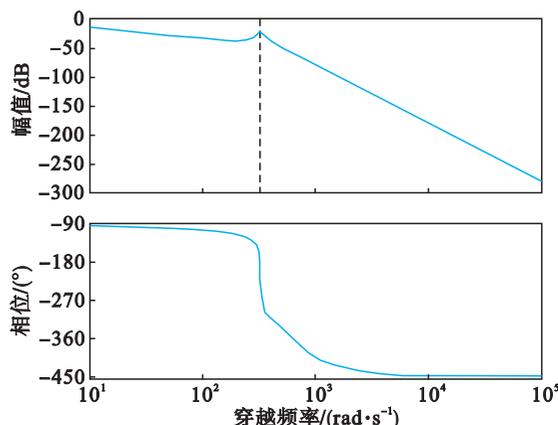


图 3 升降阶段开环未校正伯德图

Fig. 3 Open-loop non-corrected Bode diagram on the lifting stage

仿形系统的开环伯德图和单位阶跃响应曲线图如图 4 和图 5 所示。系统升降阶段的阶跃响应

校正前的曲线如图 5 红线所示. 由图可知系统的阶跃响应较慢, 因此需要进行校正以提高响应速度. 对于升降阶段的位反馈调节系统, 采用常用的 PID 算法进行校正, 经过计算得出校正环节为 $G_1(s) = 3 + \frac{1.5}{s} + 0.0006s$. 校正后仿形系统的幅值裕量、相位裕量、穿越频率分别为 $G_m = 11 \text{ dB}$, $P_m = 83^\circ$, $\omega_c = 6.7 \text{ rad/s}$, 系统在满足稳定性要求的前提下提高了穿越频率. 从系统的阶跃响应曲线可以看出, 响应速度明显变快.

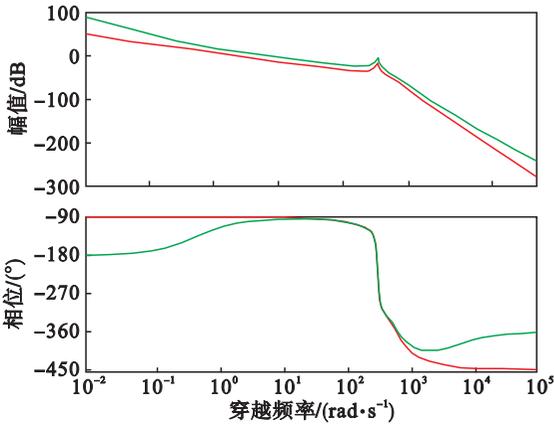


图 4 升降阶段开环校正前后伯德图对比
Fig. 4 Bode diagram contrast of before and after open-loop correction on the lifting stage

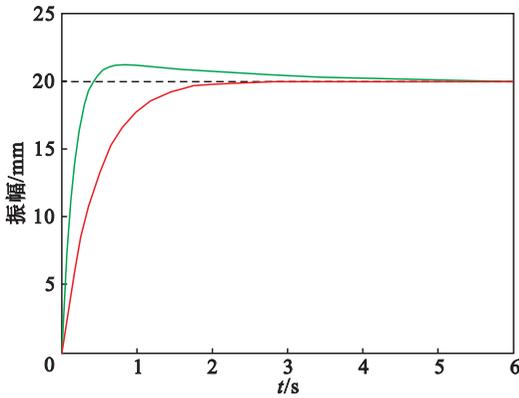


图 5 升降阶段开环校正前后阶跃响应对比
Fig. 5 Step response contrast of before and after open-loop correction on the lifting stage

根据确定的仿形系统参数, 得出仿形系统在中立范围时力反馈调节时的传递函数为

$$G_2(s) = \frac{60 \times \left(\frac{s^2}{58^2} + \frac{2 \times 0.14}{58}s + 1 \right)}{\left(\frac{s}{0.3} + 1 \right) \left(\frac{s^2}{680^2} + \frac{2 \times 0.7}{680}s + 1 \right) \left(\frac{s^2}{331^2} + \frac{2 \times 0.027}{331}s + 1 \right)} \quad (4)$$

仿形系统中立阶段校正前后的开环伯德图如图 6 所示. 校正前的幅值裕量、相位裕量、穿越频率分别为: $G_m = 0.2 \text{ dB}$, $P_m = 93^\circ$, $\omega_c = 16 \text{ rad/s}$. 这表明系统不稳定, 所以必须对其进行校正. 仿形系统经 PID 校正后, $G_m = 9.8 \text{ dB}$, $P_m = 67^\circ$, $\omega_c = 9.8 \text{ rad/s}$. 中立阶段力调节时仿形系统的阶跃响应如图 7 所示.

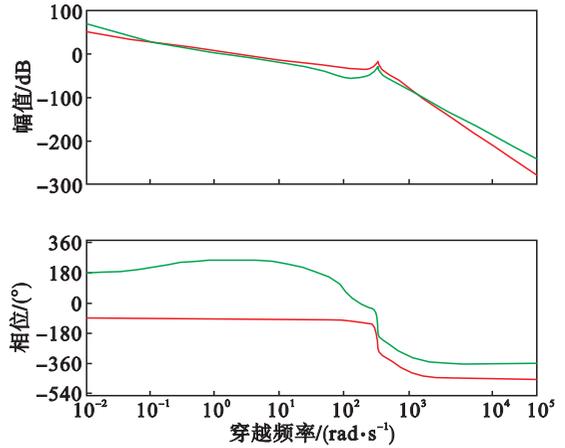


图 6 中立阶段开环校正前后伯德图对比
Fig. 6 Bode diagram contrast of before and after open-loop correction on the neutral stage

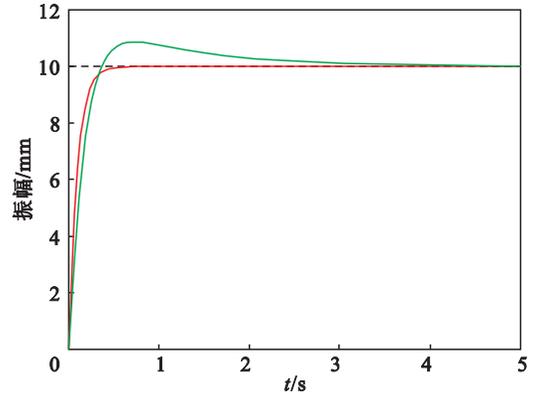


图 7 中立阶段开环校正前后阶跃响应对比
Fig. 7 Step response contrast of before and after open-loop correction on the neutral stage

4 仿形系统模糊 PID 控制仿真

本文运用模糊自整定 PID 控制算法对仿形系统进行控制. 模糊控制器的输入量为仿形系统液压升降机构中液压缸活塞杆的位移或力的误差和误差变化率, 输出为经模糊控制器整定后的 PID 三个参数的值.

根据仿形系统的控制方法, 在 Matlab 中建立的插秧机仿形系统升降阶段的位移反馈模型如图 8 所示. 其阶跃响应曲线如图 9 所示.

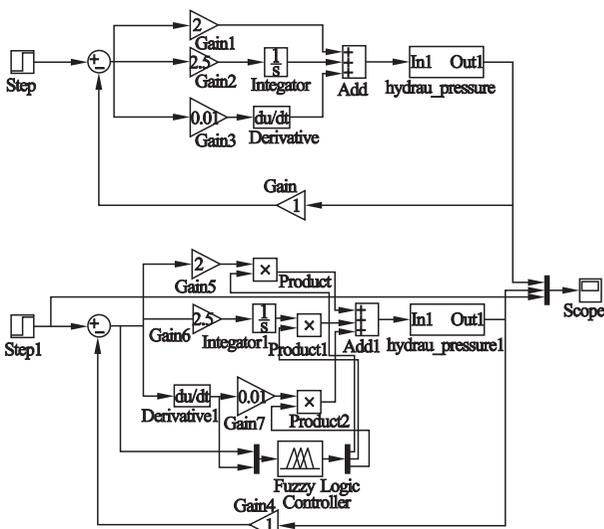


图 8 升降阶段位调节 PID 控制与模糊 PID 控制仿真模型

Fig. 8 Simulation model of position adjustment PID control and fuzzy PID control on the lifting stage

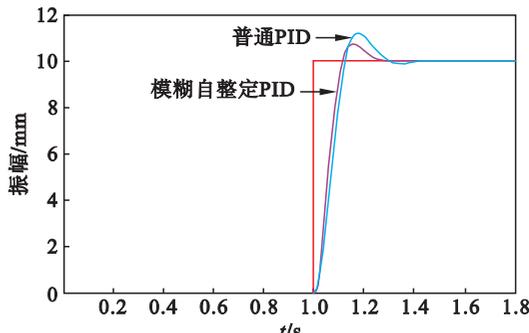


图 9 升降阶段位调节 PID 控制与模糊 PID 控制阶跃响应

Fig. 9 Step response of position adjustment PID control and fuzzy PID control on the lifting stage

表 1 升降阶段各类控制方法响应性能指标

Table 1 Response performance indexes of various control methods on the lifting stage

控制方法	上升时间/s	超调量/%
传统 PID	0.14	11.3
模糊 PID	0.12	7.6

设置仿真的总时间 $t=2\text{ s}$ 系统的给定信号为阶跃信号, PID 控制器的三个参数为: $P=2, I=2.5, D=0.01$. 升降阶段的响应性能指标如表 1 所示.

根据仿形系统的控制方法, 在 Matlab 中建立的插秧机仿形系统中立阶段时的力反馈调节系统模型如图 10 所示, 其阶跃响应如图 11 所示.

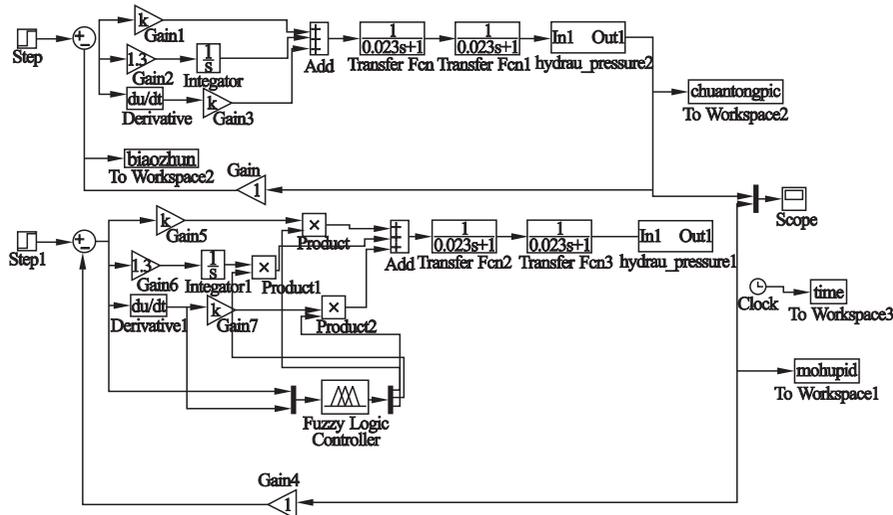


图 10 中立阶段力调节 PID 控制与模糊 PID 控制仿真模型

Fig. 10 Simulation model of force adjustment PID control and fuzzy PID control at the neutral stage

由图 11 可知, 仿形系统中立阶段各类控制方法响应性能指标如表 2 所示. 可见仿形系统中立阶段采用模糊 PID 控制大大缩短了调节时间, 提高了调节精度. 根据仿形系统的控制方法, 在 Matlab 中建立仿形系统力位切换时的模型如图 12 所示.

当所测得的位移信号在门限值内时, 系统采取力反馈调节. 当所测得的信号在此门限值外时,

仿形系统在切换开关的作用下自动切换到位反馈调节系统. 仿形系统在位反馈调节阶段主要考察其随水田地形起伏的跟随情况, 即要求跟随误差越小越好. 假设插秧机随水田沟底起伏的位移信号幅值是 $\pm 30\text{ mm}$ 的正弦信号, 则力位切换时的响应曲线如图 13 所示. 图中, 黄线代表仿形系统在模糊 PID 控制下的切换响应曲线, 蓝线代表系统在普通 PID 控制下的响应曲线. 结果表明: 仿

形系统采取模糊控制进行力位切换时,切换误差比采用传统 PID 控制时要小,并且切换到稳定状态的时间也较短.

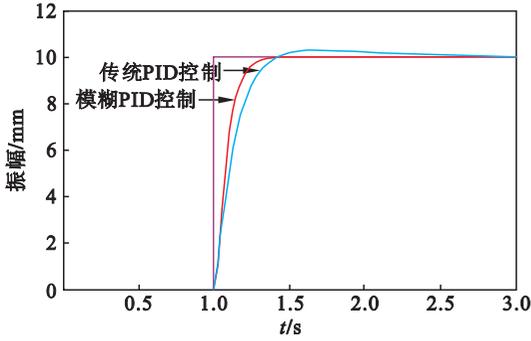


图 11 中立阶段力调节 PID 控制与模糊 PID 控制阶跃响应

Fig. 11 Step response of force adjustment PID control and fuzzy PID control at the neutral stage

表 2 中立阶段各类控制方法响应性能指标

Table 2 Response performance indexes of various control methods at the neutral stage

控制方法	上升时间/s	超调量/%
传统 PID	0.4	2
模糊 PID	0.3	0.3

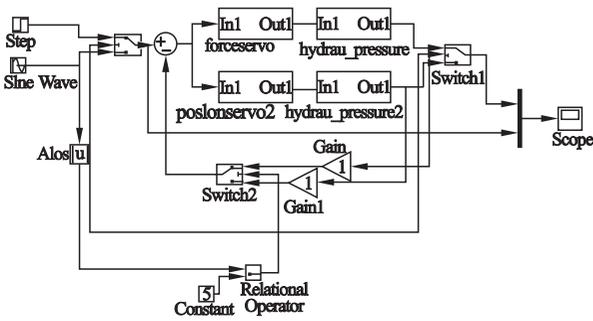


图 12 仿形系统力位切换模型

Fig. 12 Force-position switch model of the profiling system

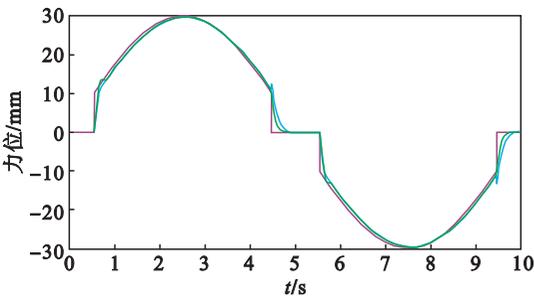


图 13 力位切换调节 PID 控制与模糊 PID 控制对比

Fig. 13 PID control and fuzzy PID control contrast with force-position switch

5 结 论

本文通过对插秧机液压仿形系统的研究得

知,仿形系统升降阶段主要跟随地形的起伏来控制插植部的升降,其实质是位置控制系统;在中立阶段,仿形系统升降机构的压力保持在一定的值,其实质是力调节控制. 本文将模糊控制的思想应用到插秧机仿形系统的设计上来,分别建立了仿形系统在各工作阶段的仿真模型. 仿真结果表明,相比于传统 PID 控制,模糊 PID 控制大大提高了仿形系统的控制性能.

参考文献:

[1] Thomas E V. Development of a mechanism for transplanting rice seedling[J]. *Mechanism and Machine Theory* 2002 37 (4) 395 - 410.

[2] 臧英,罗锡文,张国忠,等. 开沟起垄穴直播方式对水稻分蘖前期甲烷排放的影响[J]. *东南农业大学学报*, 2014, 35 (2) 96 - 100. (Zang Ying, Luo Xi-wen, Zhang Guo-zhong, et al. Effects on methane emission in the precision rice hill-drop drilled field during the early tillering stage[J]. *Journal of South China Agricultural University* 2014, 35(2) 96 - 100.)

[3] Li Y, Xu L, Xiang Z, et al. Research advances of rice planting mechanization in Japan[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 2005 21(11) : 182 - 185.

[4] Khan A S, Gunkel W W. Design and development of a 6-row Korean transplanter[J]. *Ama-agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America*, 1988, 19(1) 27 - 34.

[5] Sun J Y. The mechanization of rice transplanting cultivation technique for high yield[J]. *Applied Mechanics and Materials* 2013 416/417 : 1793 - 1797.

[6] 牛石从. 基于 Simulink 的高速插秧机液压仿形系统动态特性仿真研究[D]. 浙江: 浙江理工大学, 2011. (Niu Shi-cong. Simulation and analysis of dynamic characteristics of hydraulic profiling system of high-speed transplanter based on Simulink[D]. Zhejiang: Zhejiang Sci-Tech University 2011.)

[7] Zhu W, Zhao Q, Hu X. Simulation study on hydraulic control system of high-speed transplanter with SIMSAE[C]// 2012 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet 2012). Three Gorges 2012 2858 - 2860.

[8] 鲁植雄,郭兵,高强. 拖拉机耕深模糊自动控制方法与试验研究[J]. *农业工程学报* 2013 29(23) 23 - 29. (Lu Zhi-xiong, Guo Bing, Gao Qiang. Study on auto-control method and experiment for tractor depth based on fuzzy control [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 2013 29(23) 23 - 29.)

[9] 李丽娜,柳洪义,罗忠,等. 模糊 PID 复合控制算法改进及应用[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2009, 30(2) : 274 - 278. (Li Li-na, Liu Hong-yi, Luo Zhong, et al. Study on improved fuzzy-PID composite control arithmetics and its applications [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2009 30(2) 274 - 278.)

[10] 潘华彬. 模糊自整定 PID 控制在压注机电液控制系统中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011. (Pan Hua-bing. A study of fuzzy self-tuning PID control and its application in injection molding machine of electro-hydraulic systems [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology 2011.)