

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2012.02.015

# 大型钢管水压试验机系统中的模糊控制应用

叶玮琼<sup>1</sup>, 邓彬<sup>2</sup>

(1. 湖南工业大学 计算机与通信学院, 湖南 株洲 412007; 2. 湖南工业大学 期刊社, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 分析了项目改造中钢管水压试验机的工作原理。在控制系统改造过程中, 根据实际工业过程对鲁棒性的要求, 利用模糊控制不需系统精确数学模型且具有较强鲁棒性等优势, 改进了PID控制对液压非线性系统控制的一些不足, 在实际生产中取得了较好效果。同时, 简要介绍了模糊控制中常用的二输入单输出的设计思想及方法。

**关键词:** 模糊控制; PID; 水压机; 液压伺服系统

**中图分类号:** TP273+.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2012)02-0069-05

## The Application of Fuzzy Control in Large Steel Pipe Hydraulic Test Machine

Ye Weiqiong<sup>1</sup>, Deng Bin<sup>2</sup>

(1. School of Computer & Communication, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Editorial Department of Journal, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** Analyzes the working principle of large steel pipe hydraulic test machine in the changes of project. According to the robustness requirement of the practical work process, takes the advantages of fuzzy control to improve the PID control on the non-linear hydraulic servo system, which doesn't need accurate mathematics model of control object and has good robust, and achieves good effect in production. Meanwhile introduces the design idea and method for two-input and one-output fuzzy control system.

**Keywords:** fuzzy control; PID; water press test machine; hydraulic servo system

## 0 前言

目前, 在工业控制领域中, PID控制器以其结构清晰、参数可调、可根据实际调节参数等特点, 在各控制场合广泛使用。但PID控制器存在着参数调节需一定过程、最优参数选取有一定难度等缺点, 且对于存在时滞、非线性等因素的系统更难确定最优参数, 调试过程中经常出现超调、振荡等影响系统正常运行的现象。而依据模糊控制理论设计的模糊

控制器来对工业过程进行控制, 具有不依赖控制对象精确的数学模型、减弱超调、防止振荡等优点<sup>[1-12]</sup>。随着模糊控制系统的应用发展, 其在控制领域显示出广阔的前景, 已成为智能控制的重要组成部分。

对于工业控制中的液压控制系统, 普遍存在参数变化较大、外负载干扰以及交联耦合的影响; 频宽和动、静态精度要求较高; 非线性, 特别是电液伺服阀节流特性和流量饱和作用引起的非线性影响大, 使得基于传统的离散系统理论的稳定性判据和

收稿日期: 2012-01-20

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(05001801)

作者简介: 叶玮琼(1975-), 男, 湖南湘潭人, 湖南工业大学讲师, 博士, 主要研究方向为智能控制与信息处理技术, 嵌入式智能系统, E-mail: 165562430@qq.com

控制器设计方法难于奏效,因此液压伺服控制策略应满足系统动、静态精度要求,能使系统做到快速反应而无超调;对于由于参数变化、外负载干扰和交联耦合以及非线性因素引起的不确定性呈现较强的鲁棒性;控制律、控制算法简单可行,实时性强;同时,控制策略还应具有较强的智能,能使系统有较高的效率。模糊控制是液压控制领域中能够实现以上要求的一种重要方法<sup>[13]</sup>。

在大型的水压试验机控制系统中,由于其大惯性和“水锤”上冲效应,以及环境等各环节的非线性特性,采用PID控制很难获得其最优参数。本研究将模糊控制和PID控制思想相结合并应用到水压试验机控制系统之中,取得了满意的控制效果。

## 1 钢管水压试验机的控制系统原理

### 1.1 钢管水压试验机基本工作过程

本项目为对中山某钢管厂一德国大型钢管水压试验机进行改造。系统对200~240 mm钢管进行的水压测试表明,最大压力可达20 MPa。工作时,油压伺服系统使挡板从两端夹住钢管并密封钢管,向钢管内注入低压水,待管内空气排出后,改由高压泵对钢管内的水进行加压。同时,挡板油压伺服系统开启高压油泵跟随水压并夹紧钢管,防止钢管两端漏水以保持水压,达到测试水压后保持一段时间,以此来检测钢管是否合格。

系统中,伺服阀控制的油压、水压的压差是一个关键控制量,压差过大可能造成钢管弯曲甚至伤亡事故;压差过小,会造成漏水,达不到检测目的。而钢管的承压能力、试验压力与管径、壁厚以及材料有关,不同种类的钢管试验时所采用的油、水压差别很大,在升压超过8 MPa之后,升压速率很快,参数设置不当或者控制反应过慢都可能造成较大事故。伺服阀的控制主要通过信号采集板反馈实际油压、水压,计算得出期望伺服阀位置,再与实际位置相比较,并利用其偏差信号来控制伺服阀位置,从而控制油泵和水泵的启停,以调整油压和水压的大小。

### 1.2 钢管水压试验机基本原理及数学模型

该水压机电液伺服控制系统执行时,建模包括水阀、油压阀流量及之间的压力关系<sup>[14]</sup>。油缸的有效面积即为活塞杆的面积,而水管横截面积即为水压作用于挡板的有效面积。

阀的流量方程为

$$Q_L = K_q X_V - K_C P_L, \quad (1)$$

式中:  $Q_L$  为负载流量;

$K_q$  为阀的流量增益系数;

$X_V$  为阀芯的位移;

$K_C$  为阀的流量—压力系数;

$P_L$  为负载压力。

液压缸流量连续性方程为

$$q_L = \frac{V_s}{4\beta_e} \dot{p}_L + A_L \dot{X}_P + C_P P_L, \quad (2)$$

式中:  $V_s$  为总压缩容积;

$\beta_e$  为有效体积弹性模量;

$A_L$  为柱塞杆面积;

$\dot{X}_P$  为柱塞杆位移;

$C_P$  为外泄漏系数。

液压缸与负载的力平衡方程为

$$A_L P_L = M_1 \ddot{X}_P + B_P \dot{X}_P + F_L, \quad (3)$$

式中:  $M_1$  为活塞及负载折算到活塞上的总质量;

$B_P$  为活塞及负载的粘性阻尼系数;

$F_L$  为作用在活塞上的任意外负载力。

将上述方程进行拉氏变换并消去中间变量,忽略弹性模量和粘性阻尼。由于伺服阀实际系统频带只有10~20 Hz,因此伺服阀可看成一个放大环节。由此,可近似为振荡环节组成的系统,并可得出液压传递函数为二阶振荡环节:

$$G_s = \frac{K}{\left( \frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{2\xi_s}{\omega_s} s + 1 \right)}, \quad (4)$$

式中:  $K$  为比例系数,与流量阀流量与额定输入电压之比,以及液压缸的有效工作面积比例系数有关。

液压系统控制模型如图1所示,其中,  $K_h$  为角度检测的增益。

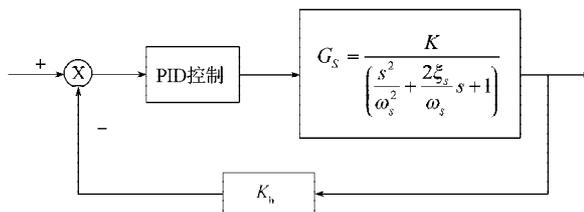


图1 液压系统控制模型图

Fig. 1 Model of hydraulic control system

### 1.3 控制系统模型

当测试钢管口径较小时,原系统PID控制器的水压超调现象明显,导致水压过冲甚至达到钢管所能承受的临界值。经分析发现,关闭水泵后,由于“水锤”效应,水压值还有一定的上升惯性。而由于液压系统本身非线性特性明显,通过上述参数模型得到的PID控制参数难以得到较优控制,从而造成了潜在危险。在改造中,运用模糊控制技术,以提高系

统的控制品质。

在本系统中,对于小于500 mm的钢管,当水压超过预定值的70%时,在原控制算法基础上加入模糊控制模块,把采集到的当前水压值与测试值的偏差 $e$ 、偏差的变化率 $\Delta e$ 进行模糊化后,再由模糊控制算法进行模糊推理判断,根据判断结果发出一定宽度的脉冲信号去控制水阀,从而使超调控制在理想范围之内。核工业部控制结构如图2所示。

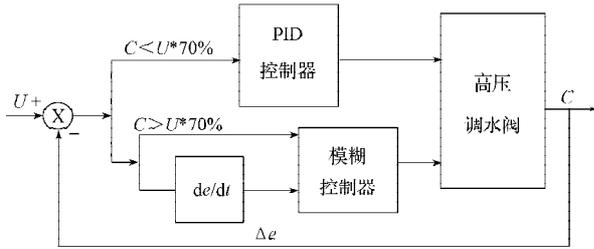


图2 模糊闭环控制结构图

Fig. 2 The structural diagram of close-loop fuzzy control

## 2 模糊控制器的分析与设计

根据系统中水压机的实验特性,对于模糊控制器的输入变量,文献[15]采用不均匀、全交迭、三角形的隶属度函数,根据已有的PI/PD控制器件设计相应的模糊控制器参数;文献[3]指出该方法设计的控制器类似于一类变参数的非线性PI控制,在工况发生变化时相当于能够自调整PI的参数,从而实现水压机的非线性控制。由于水压机在高压状态下对控制时间的敏感性,实现模糊控制时对算法有较高的实时性要求,因此本研究采用模糊控制系统的CRI (compositional rule of inference) 推理查表法。

### 2.1 模糊定量

模糊控制器以偏差 $e$ 和偏差变化率 $\Delta e$ 作为模糊控制输入量,保证系统控制的稳定性,还可减少阀门开度的调节量和振荡现象,以高压水阀的开启度为模糊控制输出量 $U$ 。确定的模糊定量为: $e$ 为实际水压与设定水压偏差, $\Delta e$ 为水压力偏差变化率, $U$ 为高压水阀的开启度。

### 2.2 精确量的模糊化

取实际水压与设定水压偏差值 $e$ 、水压力偏差值的变化率 $\Delta e$ 作为模糊控制器的输入条件。此处:

$$e(k)=y(k)-U;$$

$$\Delta e(k)=e(k)-e(k-1)。$$

式中: $U$ 为水压设定值, $y(k)$ 为水压实测值。当实际水压为设定值的70%时,模糊控制启动。

具体的模糊化过程如下。

1) 离散化论域。把观测到的偏差或偏差的变化

率及输出的连续论域量化。如下:

$$e: \{-6, -5, \dots, 6\} \quad 13 \text{级}$$

$$\Delta e: \{-4, -3, \dots, 4\} \quad 9 \text{级}$$

$$u: \{-4, -3, \dots, 4\} \quad 9 \text{级}$$

2) 量化。将连续的精确量离散化成离散论域的值。对于偏差 $e$ ,若观测到的实际偏差范围为 $[a, b]$ ,可按公式

$$y=[12/(b-a)][x-(a+b)/2]$$

将 $[a, b]$ 间变化的连续变量转化为 $[-6, 6]$ 之间的离散变量。在系统中, $e$ 的实际偏差范围为 $[-40, 20]$ 。因此,通过上式,可得 $e$ 的量化公式为

$$y=(1/5)(x+10)。$$

同样,如果观测到的实际偏差变化率范围为 $[a, b]$ 可按式转化:

$$y=[8/(b-a)][x-(a+b)/2]。$$

系统中, $\Delta e$ 的实际偏差范围为 $[-4, 10]$ 。则可得 $\Delta e$ 的量化公式为

$$y=(4/7)(x-3)。$$

在量化过程中,出现取值超过边界情况时按边界取值。取整的方式为

$$y=\text{INT}[y+\text{SGN}(y) \times 0.4]。$$

3) 模糊化。即在给定的有限论域内确定模糊量的个数及隶属函数。

在本系统中,对于输入变量 $e$ ,其模糊集合记作 $T(e/\Delta e)=\{\text{NB}, \text{NS}, \text{O}, \text{PS}, \text{PB}\}$ 。输入变量 $e$ 及 $\Delta e$ 的隶属度如图3所示。

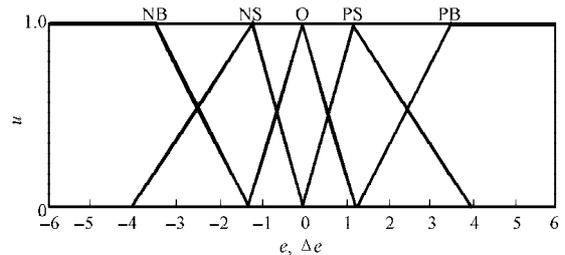


图3 输入变量 $e, \Delta e$ 的隶属度

Fig. 3 Membership degree of output variable  $e, \Delta e$

对输出变量 $U$ ,其模糊集合则记作: $T(u)=\{\text{NB}, \text{NS}, \text{O}, \text{PS}, \text{PB}\}$ ,其隶属度如图4所示。

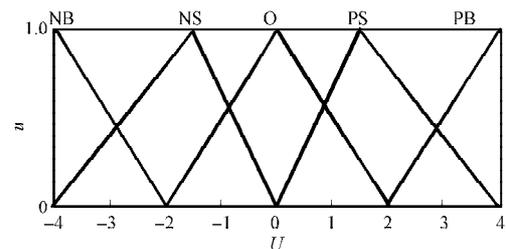


图4 输出变量 $U$ 的隶属度

Fig. 4 Membership degree of output variable  $U$

### 2.3 模糊规则及推理

系统中将二维模糊语句“IF  $e$  is  $T(e) \wedge \text{is } T(\Delta e)$  THEN  $u$  is  $T(u)$ ”作为模糊控制规则。根据高压水流量的参数特点和现场实际操作经验,总结出模糊控制规则表,如表1所示。

表1 模糊控制规则  
Table 1 Fuzzy control rule

$u$	$e$				
	NB	NS	O	PS	PB
NB	PB	PB	PS	PS	PS
NS	PB	PS	O	O	NS
$\Delta e$ O	PS	PS	O	NS	NS
PS	PS	O	NS	NS	NB
PB	NS	NS	NB	NB	NB

由表1所示的模糊控制规则,再根据 Mamdani 推理规则,可得出一个三元模糊关系  $R$ ,为

$$R = \bigvee (A_i \cdot B_i \cdot C_i), \quad i=1,2,\dots,n。$$

$A_i$ 为偏差论域  $e$ 上的模糊子集,  $B_i$ 为偏差变化率论域上的模糊子集,  $C_i$ 为输出控制量论域  $U$ 上的模糊子集。这样可得到模糊输出量  $U=(A \times B) \circ R$ 。再以重心法进行反模糊计算,求出输出控制的精确值。

因为系统对实时性要求较高,如果在运行过程中实时求控制量,将会降低系统的反应时间,所以系统采用了CRI推理的直接求取法来求取控制量,从而产生控制表。即对输入的  $e$  以及  $\Delta e$  进行量化后,对应论域中的某个元素。因此,把输入变量  $e$  的论域  $\{-6,-5,\dots,6\}$  和输入变量  $\Delta e$  的论域  $\{-4,-3,\dots,4\}$  的所有可能一一对应输入,再依据  $U=(A \times B) \circ R$  和作反模糊化运算求出全部相应的输出精确值,根据这些数据就可以做出输入输出的模糊控制查询表,并将此控制表存储在控制计算机中。在实际控制时,只要通过对输入量量化和查表两个步骤,就可得到控制值。控制计算机根据不同的控制值,输出不同宽度的脉冲信号,从而实现对高压水阀的控制。

### 3 控制结果对比

在实际生产过程中,直径在 500 mm 以上的钢管,使用PID控制和模糊控制的效果均比较理想。图5为一小口径石油管道(280 mm)进行12 MPa压力测试时,分别使用PID控制和模糊控制的水压力测试结果。在测试过程中,PID控制过冲幅度大,极易给人员及产品造成危害。使用模糊控制后,虽然水压较PID控制过程上升慢,但超调明显改善,这也是生产所允许的。

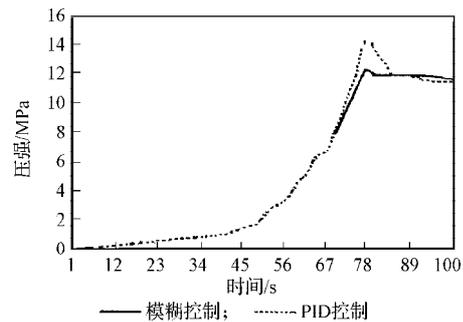


图5 控制结果对比图

Fig. 5 The contrast of control results

### 4 结语

本项目中的钢管水压试验机,一方面,测试的钢管型号非常多,难以统一最优的PID控制模式;另一方面,系统中各设备非线性特性明显,常规的PID调节器难以保证系统在任何工况下性能良好。通过对控制经验的总结,结合模糊控制理论,较好地实现了对系统的控制,不仅解决了超调问题,而且在测试压力段工作稳定性好,创造了安全的生产环境。

参考文献:

- [1] Ying H, Siler W, Buckley J J. Fuzzy Control Theory: A Nonlinear Case[J]. Automatica, 1990, 26 (3): 513-520.
- [2] Ying H. The Simplest Fuzzy Controllers Using Different Inference Methods Are Different Nonlinear Proportional-Integral Controllers with Variable Gains[J]. Automatica, 2006, 29(6): 1579-1589.
- [3] 胡慧琴,李少远.模糊控制系统的解析结构与鲁棒性分析[J].上海交通大学学报,2005,39(12): 2029-2033.  
Hu Huiqin, Li Shaoyuan. An Analytical Study on Structure and Robustness of Fuzzy Control Systems[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(12): 2029-2033.
- [4] 袁艳,张泰山.一种通用模糊控制器的研究与设计[J].计算技术与自动化,2003,22(2): 25-27.  
Yuan Yan, Zhang Taishan. Study and Design of a Universal Fuzzy Controller[J]. Computing Technology and Automation, 2003, 22(2): 25-27.
- [5] 王永红.基于自适应采样模糊控制技术的循环流化床锅炉负荷自动调节系统[J].制造业自动化,2011,33(1): 26-28.  
Wang Yonghong. Based on Auto-Adapted Sampling Fuzzy Control Technology Circulation Fluid Bed Boiler Load Regulator System[J]. Manufacturing Automation, 2011, 33(1): 26-28.
- [6] 王素娥.模糊自适应PID在陶瓷高温电加热炉中的实现[J].化工自动化及仪表,2011,38(6): 685-688.

- Wang Sue. Fuzzy Adaptive PID Control Implementation in Ceramic Electric Furnace[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2011, 38(6): 685-688.
- [7] 孟祥忠, 陈红涛, 孟祥亮. 井下供水管网压力模糊控制系统的开发与应用[J]. 中国煤炭, 2011, 37(1): 73-76.
- Meng Xiangzhong, Chen Hongtao, Meng Xiangliang. Development and Application of Underground Water Supply Pipeline Network Pressure Fuzzy Control System[J]. China Coal, 2011, 37(1): 73-76.
- [8] 李明辉, 管萍, 刘小河. 直接自适应模糊控制在电弧炉中的应用[J]. 北京信息科技大学学报: 自然科学版, 2011, 26(1): 73-77.
- Li Minghui, Guan Ping, Liu Xiaohu. Application of Direct Adaptive Fuzzy Control in Arc Furnace[J]. Journal of Beijing Information Science and Technology University: Natural Science Edition, 2011, 26(1): 73-77.
- [9] 戴圣伟, 王随平, 罗飞. 基于深海采矿车的避障规划模糊控制器的研究. 湖南工业大学学报, 2009, 23(1): 79-82.
- Dai Shengwei, Wang Suiping, Luo Fei. Research on Fuzzy Controller of Avoiding Obstacle Program Based on Deep Sea Mining Vehicle. Journal of Hunan University of Technology, 2009, 23(1): 79-82.
- [10] 肖爱武, 廖平, 罗智勇, 等. 模糊控制在矿井风机风量控制中的应用. 湖南工业大学学报, 2008, 22(1): 85-87.
- Xiao Aiwu, Liao Ping, Luo Zhiyong, et al. Application of Fuzzy Control in Mine Air Flowrate Control. Journal of Hunan University of Technology, 2008, 22(1): 85-87.
- [11] 丁永生, 应浩, 任立红, 等. 解析模糊控制理论: 模糊控制系统的结构和稳定性分析[J]. 控制与决策, 2000, 15(2): 129-135.
- Ding Yongsheng, Ying Hao, Ren Lihong, et al. Analytical Fuzzy Control Theory: Structure and Stability Analysis of Fuzzy Control Systems[J]. Control and Decision, 2000, 15(2): 129-135.
- [12] 左健民. 模糊控制及其在液压伺服系统中的应用[J]. 机床与液压, 1998(2): 9-11.
- Zuo Jianmin. Application of Adaptive Control Technique with Fuzzy Parameter to Hydraulic Speed Control System [J]. Machine Tool & Hydraulics, 1998(2): 9-11.
- [13] 余兵, 彭佑多. 模糊控制及其在液压伺服系统中的应用[J]. 液压与气动, 2006(10): 56-64.
- Yu Bing, Peng Youduo. Fuzzy Control and Its Application in the Hydraulic Servo System[J]. Hydraulic & Pneumatic, 2006(10): 56-64.
- [14] 姚静, 孔祥东, 单东升, 等. 50MN自由锻造水压机电液伺服控制系统负载特性分析[J]. 机床与液压, 2006(8): 101-103.
- Yao Jing, Kong Xiangdong, Shan Dongsheng, et al. The Electro-Hydraulic Servo Control System Load Characteristic Analysis of 50MN Water Press for Free Forging[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2006(8): 101-103.
- [15] 李少远, 田永青. 模糊控制器的结构化分析及系统化设计方法[J]. 控制与决策, 2001, 16(4): 435-438.
- Li Shaoyuan, Tian Yongqing. Structure Analysis and Systematic Design Method of Typical Fuzzy Controllers [J]. Control and Decision, 2001, 16(4): 435-438.

(责任编辑: 申剑)