

【自动化技术】

压力仿真系统模糊自适应 PID 控制^{*}

胡 浩, 黄文玲

(海军工程大学 兵器工程系, 武汉 430033)

摘要:针对压力仿真系统实时、高精度的要求,提出了将模糊控制理论和 PID 控制结合起来构成模糊自适应 PID 控制器的方法。利用模糊控制规则在线对该控制器 PID 参数进行了整定,增强了 PID 控制器的调节控制能力。并在基于 MATLAB/Simulink 的仿真环境下,对模糊自适应 PID 控制器进行了验证。结果表明,与传统 PID 控制器相比,该控制器可有效提高系统的动态响应性能,具有很好的稳定性。

关键词:压力仿真系统;模糊自适应 PID

中图分类号:TP273

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2010)07-0112-03

水下航行器压力仿真系统的主要功能是在计算机控制下,以一定精度实时产生所要求的压力输出,用以模拟水下航行器在不同深度下的海水压力,从而构成其不同深度的压力环境。该航行器系统与有关模块相配合,可直接在实验室条件下对水下航行器深度控制系统的各种性能和参数进行测试。

传统的 PID 控制由于结构简单,稳态无静差,故被广泛应用于反馈控制系统中。然而, PID 控制器本质上是一种线性控制器,难以在较大深度范围内同时获得很好的稳态精度和动态性能;同时其参数整定比较困难,得依赖于操作人员的工作经验^[1],且操作者的经验又不易精确描述。而模糊控制则可以很好地将专家知识和操作人员的经验转换成模糊化后的语言规则,并通过模糊推理与模糊决策,实现对非线性对象的控制。为此,本文中基于 PID 控制和模糊控制各自的优点,利用模糊控制规则实时调整 PID 参数,建立模糊自适应 PID 控制器来实现对压力仿真系统的输出控制。

1 系统

1.1 系统组成

水下航行器压力仿真系统主要由计算机控制部分和液压部分组成。控制部分主要包括综合比较器、模糊自适应 PID 控制器和 D/A、A/D 接口板卡等;液压部分则包括液压油源、电液伺服阀、高/低压力传感器等。其系统组成如图 1 所示。

计算机控制部分接受压力指令和压力传感器反馈的实际压力值,通过控制器解算出控制量,控制电液伺服阀的阀芯位移,使其产生期望的压力输出。油源用于给电液伺服阀提供压力稳定的系统油液,主要包括电机、油泵、滤

油器、油箱等。高/低压力传感器包括设置在反馈通道上的大、小量程不同的 2 个压力传感器,采用反馈压力数字平滑滤波技术实现量程的平稳切换^[2],使系统能在大深度范围内对水下航行器进行压力模拟,在小深度时也具有较高的精度。

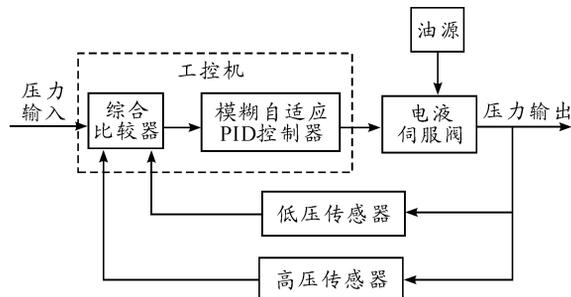


图 1 水下航行器压力仿真系统

1.2 被控对象建模

压力仿真系统采用电液伺服阀作为执行元件,来实现压力的输出控制。现作如下假定:① 滑阀无泄漏,喷嘴挡板作小信号线性处理;② 工作油液不可压缩;③ 忽略阀芯的质量、液动力和阻尼力。则电液伺服阀的传递函数可以表示为^[3]

$$G(s) = \frac{K_{ef}}{s \left(\frac{s^2}{\omega_{mf}^2} + \frac{2\zeta_{mf}}{\omega_{mf}} s + 1 \right)} \quad (1)$$

式中: K_{ef} 为伺服阀的速度常数; ω_{mf} 为力矩马达的固有频率; ζ_{mf} 为伺服阀等效相对阻尼系数。

某类国产电液伺服阀主要参数为:供油压力 $P_s = 21$ MPa,综合刚度 $K_{am} = 178.63 \text{ N} \cdot \text{cm}/\text{rad}$,伺服阀等效相对阻尼系数 $\zeta_{mf} = 0.35$,力矩马达固有频率 $\omega_{mf} = 480 \text{ Hz}$,反馈

* 收稿日期:2010-04-27

作者简介:胡浩(1985—),男,硕士研究生,主要从事制导与控制技术研究。

杆刚度 $K_f = 44.28 \text{ N/cm}$, 喷嘴挡板流量增益 $K_q = 1\ 220 \text{ cm}^2/\text{s}$ 。将数据代入式(1)可得

$$G(s) = \frac{230\ 400}{s(s^2 + 336s + 230\ 400)} \quad (2)$$

2 模糊自适应PID控制器设计

2.1 系统结构

模糊自适应PID控制器系统结构主要由参数可调的PID控制器和模糊控制器2部分构成,其结构如图2所示。采用模糊推理方法对PID参数进行在线整定^[4],以满足不同的误差 e 和误差变化率 ec 对控制器参数的不同要求。

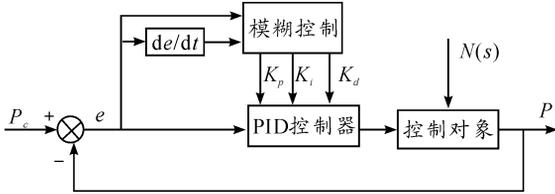


图2 模糊自适应PID控制器结构

模糊控制器以控制压力误差 e 和误差变化率 ec 作为输入,修正参数 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 为输出。则PID控制器输出的参数 K_p, K_i, K_d 如下:

$$\begin{aligned} K_p &= K'_p + \Delta K_p \\ K_i &= K'_i + \Delta K_i \\ K_d &= K'_d + \Delta K_d \end{aligned}$$

其中: K'_p, K'_i, K'_d 为预整定值。

2.2 模糊语言变量确定

该控制器采用2输入3输出的形式,输入语言变量 e 和 ec 的论域均为: $e, ec = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$,其模糊集为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$,子集中元素分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中和正大。输出语言变量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 的论域为: $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d = \{-0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3\}$,其模糊集为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。

2.3 隶属度函数建立

在模糊控制系统中,模糊化的过程是通过隶属度函数完成的。隶属度函数的形式有多种,本文采用Z形、三角形和S形相结合的形式。 $e, ec, \Delta K_p, \Delta K_i$ 和 ΔK_d 的隶属度函数如图3、图4所示。

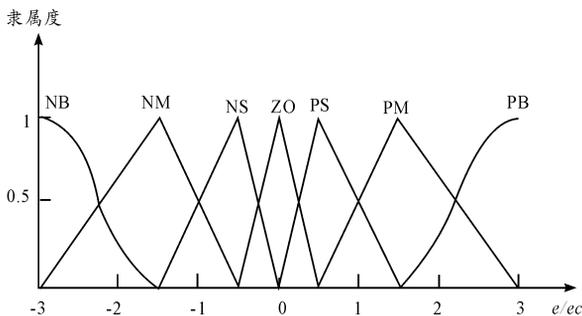


图3 输入 e/ec 隶属函数曲线

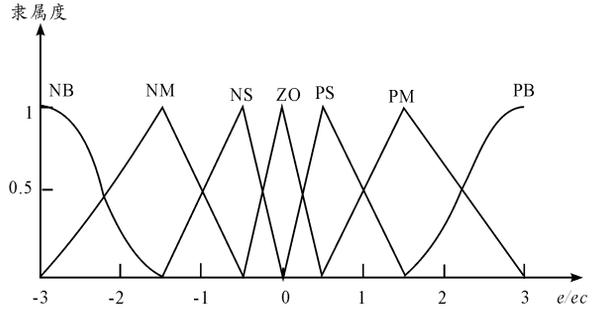


图4 输出 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 隶属函数曲线

2.4 模糊控制器规则设计

根据参数 K_p, K_i, K_d 对系统输出特性的影响情况^[5],可归纳出系统在被控过程中对于不同的偏差和偏差变化率,参数 K_p, K_i, K_d 的自整定原则。

1) 当偏差较大时,为了加快系统的响应速度,并防止因开始时偏差的瞬间变大可能引起的微分过饱和而使控制作用超出许可范围,应取较大的 K_p 和较小的 K_d 。另外,为防止积分饱和,避免系统响应出现较大的超调, K_i 值要小,通常取 $K_i = 0$ 。

2) 当偏差和变化率为中等大小时,为了使系统响应的超调量减小和保证一定的响应速度, K_p 应取小一些。在这种情况下, K_d 的取值对系统影响很大,应取小一些, K_i 的取值要适当。

3) 当偏差较小时,为了使系统具有较好的稳态性能,应增大 K_p, K_i 值;同时,为避免输出响应在设定值附近振荡,以及考虑系统的抗干扰能力,应适当选取 K_d 。其原则是:当偏差变化率较小时, K_d 取大一些;当偏差变化率较大时, K_d 取较小的值,通常 K_d 为中等大小。

根据以上分析,可以得到输出变量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 的控制规则,如表1~表3所示。

表1 ΔK_p 模糊控制表

ec	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZO
NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NM
ZO	PM	PS	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	ZO	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	NS	NS	NM	NM	NB	NB

表2 ΔK_i 模糊控制表

ec	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NM	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
PM	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZO	NS	PS	PM	PB	PB	PB

表3 ΔK_d 模糊控制表

ec	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	PS	ZO	ZO	ZO	PB	PB
NM	NS	NS	NS	NS	ZO	NS	PM
NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	NM
ZO	NB	NM	NM	NS	ZO	PS	PM
PS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
PM	NM	NS	NS	NS	ZO	PS	PS
PB	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	PB	PB

2.5 清晰化

清晰化方法有许多种,常用的有面积平分法、面积中心法和最大隶属度法。由于最大隶属度法具有直观合理和计算方便的优点,因此本文中采用最大隶属度平均值法解模糊化。设 $A(u_j) = \max(A(u))$, $j = 1, 2, \dots, n$, 有 n 个点的隶属度都取最大值,则取^[6]

$$u_{mom} = \frac{\sum_{j=1}^n u_j}{n} \quad (3)$$

在线运行过程中,控制系统通过对模糊规则的结果处理、查表和运算,即可完成对 PID 参数的在线自调整。

3 仿真分析

在 MATLAB 命令窗口运行 Fuzzy 函数进入模糊逻辑编辑器,根据以上分析建立 FIS 文件并保存,然后将该 FIS 文件与 Simulink 连接,在 MATLAB/Simulink 环境下仿真。模糊自适应 PID 仿真模型如图 5 所示。

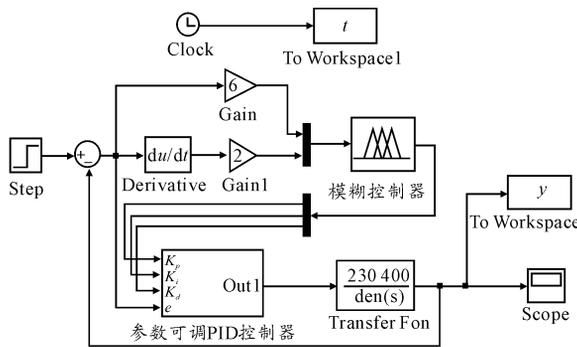


图5 模糊自适应 PID 仿真模型

对系统输入 0~4 MPa 的阶跃信号进行仿真,仿真结果如图 6 所示。将图 6 中的模糊自适应 PID 控制阶跃响应曲线与传统 PID 控制的曲线进行了比较。其中 PID 参数预整定值 $K'_p = 2.5, K'_i = 0.5, K'_d = 0.01$ 。

为验证模糊自适应 PID 控制器的抗干扰能力,在 $t = 6$ s 时突加一瞬时扰动,其仿真结果如图 7 所示。

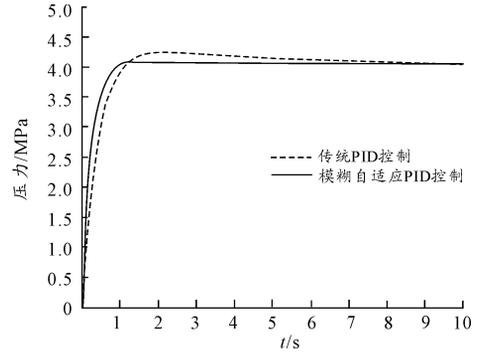


图6 压力仿真系统阶跃响应曲线

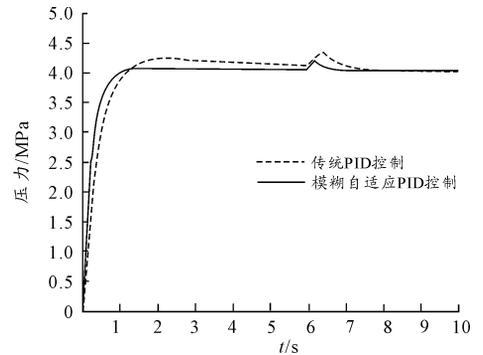


图7 干扰作用下的系统阶跃响应曲线

4 结论

模糊自适应 PID 控制器结合了 PID 控制与模糊控制的优点,能在水下航行器压力仿真系统中得到成功应用。仿真结果表明,在阶跃响应下,模糊自适应 PID 控制与传统 PID 控制相比,减少了系统的调节时间,很好地控制了系统的超调,提高了系统的动静态性能,并且抗干扰能力强,满足水下航行器压力仿真系统实时、高精度的要求。

参考文献:

[1] 万亚民,王孙安.一种高性能水压仿真器的研究[J].机床与液压,2003(4):92-94.
 [2] 康风举.一种提高水压仿真器精度的新方法[J].系统仿真学报,1995,7(4):60-64.
 [3] 田源道.电液伺服阀技术[M].北京:航空工业出版社,2008.
 [4] Visioli A. Tuning of PID controllers with fuzzy logic[J]. IEEE proc. online,2001,148(1):1-8.
 [5] Leonid Reznika, Omar Ghanayemb, Anna Bourmistrov. PID plus fuzzy controller structures as a design base for industrial applications[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence,2000(13):419-430.
 [6] 石辛民,郝整清.模糊控制及其 MATLAB 仿真[M].北京:清华大学出版社,2008.