电液伺服速度系统的模糊增益调度控制

马俊功 王世富 王占林

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

摘 要: 针对电液伺服速度系统的非线性和参数时变特性,提出了模糊增益调度控制方法.根据系统的输出误差和误差的一阶微分变化,利用模糊推理在线实时更改比例积分微分(PID,Proportion Integral Differential)控制器参数以适应工作点的变化,使系统控制参数达到全局优化,解决了一般增益调度中控制参数只是对于某一工作点局部优化的问题;在确定P和I隶属度函数时,引入指数函数保证了系统稳准前提下响应的快速性.试验研究表明,与单纯PID控制器相比,模糊增益调度缩短了动态响应时间、降低了超调、减小了负载扰动,说明该方法对非线性系统和未能精确建模系统大范围控制的有效性.

关 键 词: 电液伺服; 模糊控制; 增益调度

中图分类号: TH 137.5

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2007)03-0294-04

Fuzzy gain scheduling control for electro-hydraulic servo velocity system

Ma Jungong Wang Shifu Wang Zhanlin

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Considering the nonlinear and the parameters variability, which vary widely with the working condition in the electro-hydraulic servo velocity system, fuzzy gain scheduling controller was developed. Based on the change of output error and its differential, the PID(proportion integral differential)parameters of controller were changed online by fuzzy reasoning in order to adapt the variety of set point and this made the control parameters reach the global optimization, solved the local optimization problem in the common gain scheduling. In the course of determine membership function of P and I, exponential function was introduced and this ensured the fast response and stability of system. Test results indicate that comparing with PID, the method accelerates the dynamic response, reduces the overshoot and load turbulence effectively too. So it is very validity for nonlinear system and the mathematic prototype system that can't be built easily.

Key words: electro-hydraulic servo; fuzzy control; gain scheduling

由于伺服阀的磁滞、油液的可压缩性等因素的影响,电液伺服系统呈现很强的非线性特性[1-2],因此,采用一般的常规PID(Proportion Integral Differential)控制方法很难得到满意的控制性能,而模糊控制作为一种处理非线性系统的方法,在电液伺服系统中获得了广泛的应用[3].为提高控制精度,将模糊控制进行了很多改进[4-6],这使得控制器结构变得复杂,并使得控制系统实时性变差.

增益调度作为一种非线性控制方法,由于其简单适用也获得了广泛应用,但常规增益调度方法只是对不多的几个工作点的控制参数进行调度以改善性能,效果不是很好.将模糊控制和增益调度的思想相结合,提出模糊增益调度控制方法,即根据调度变量的变化,通过模糊推理在线实时调节控制参数,对于每一工作点都给出各自的控制参数即生成全局的补偿器,使系统控制参数达到全局优化,可解决一般增益调度中控制参数只是

收稿日期: 2006-04-25

作者简介: 马俊功(1969—),男,内蒙古武川人,讲师,jgma@buaa.edu.cn.

对于某一工作点局部优化的问题,改善系统性能,提高系统的实时性.试验也验证了该方法对非线性系统和未能精确建模系统大范围控制的有效性.

1　增益调度控制器结构

在系统运行时,根据调度变量通过调度控制器增益使系统在不同的区域运行不同的控制律,以处理系统的非线性问题,这就是增益调度.增益调度控制器结构如图 1,它由上、下两层构成,上层属于事件驱动层,完成模态调度及参数调整,系统的运行工况改变后,通过该层予以识别,进行模态切换;下层属于误差驱动层,由选定的模态直接实现控制作用.图中,$G_P(s)$、Y、R、u、F 分别表示被控过程、输出值、设定值、操纵变量及扰动,C_i,$u_i(i=1,2,\cdots,n)$为各模态的控制律及其输出值.一般情况下,为使控制律的设计简单,各模态的控制律均可用 PID 形式.但实际中,对于复杂系统可实施 PID 控制、模糊控制、预估补偿控制等多种控制策略联合使用的控制方式.

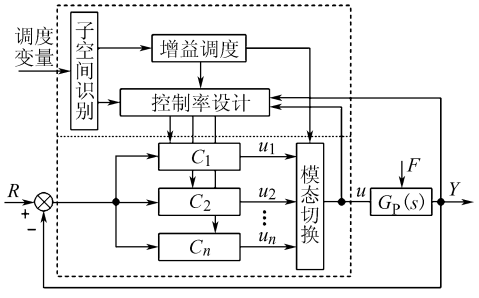


图 1　增益调度控制器结构

2　模糊增益调度控制器原理及实现

根据系统的输出误差和误差的一阶微分变化,利用模糊推理在线实时更改控制器的参数以使其适应工作点的变化,这就是模糊增益调度.由于传统的 PID 控制器具有结构简单的特点,将二者结合在一起,就可构成模糊增益调度 PID 控制器.该种实现方法与插值方法相比,不需要在现场整定很多系数,同时也不需要查表和进行插值计算,提高了效率.

为了提高实时性和简化控制器结构,采用模糊增益调度(FGSPI,Fuzzy Gain Scheduling Proportion Integral)控制器,其输出及结构如图 2,其中 PI 的表达式为

$$u(t)=K_P(t)\times e(t)+K_I(t)\int e(t)\mathrm{d}t \quad (1)$$

式中,$e(t)=\omega_{ref}(t)-\omega_o(t)$,并且比例系数 $K_P(t)$ 和积分系数 $K_I(t)$ 都是速度误差 $e(t)$ 的函数,它们是利用模糊规则经模糊推理确定的.

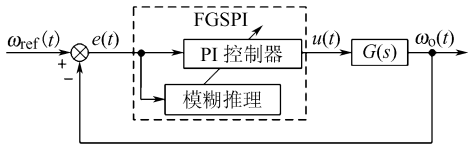


图 2　FGSPI 控制器

假定 K_P、K_I 在各自给定的范围$[K_{Pmin},K_{Pmax}]$和$[K_{Imin},K_{Imax}]$内变动.为研究方便,将 K_P 和 K_I 进行归一化处理,使它们分别在 0～1 之间变化,即

$$\left.\begin{aligned}K'_P&=(K_P-K_{Pmin})/(K_{Pmax}-K_{Pmin})\\K'_I&=(K_I-K_{Imin})/(K_{Imax}-K_{Imin})\end{aligned}\right\} \quad (2)$$

K_P 和 K_I 的变化范围由下列公式确定:

$$\left.\begin{aligned}K_{Pmin}&=0.32K_u\\K_{Pmax}&=0.6K_u\\K_{Imin}&=0.32K_u/T_u\\K_{Imax}&=0.6K_u/T_u\end{aligned}\right\} \quad (3)$$

式中,K_u 和 T_u 是 P 控制下等幅振荡的增益和周期.

增益调度的模糊规则采用"如果-则"形式:如果 $e(k)$ 是 A_i 且 $\Delta e(k)$ 是 B_i,则 K'_P 是 C_i,K'_I 是 D_i;$i=1,2,\cdots,m$. A_i,B_i,C_i 和 D_i 是相应的模糊集.$e(k)$ 和 $\Delta e(k)$ 的隶属度函数如图 3 所示,图中 N 表示负,P 表示正,ZO 表示近似为零,S 表示小,M 表示中,B 表示大.这样 NS 表示负小,PB 表示正大,其它类似.

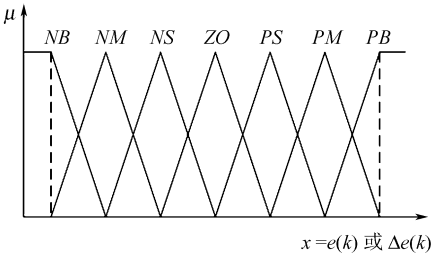


图 3　$e(k)$ 和 $\Delta e(k)$ 的隶属度函数

K'_P 和 K'_I 的隶属函数如图 4 所示,其中隶属度 μ 和变量 x(K'_P 或 K'_I)有如下的关系

对于小

$$\mu_{small}(x)=-\frac{1}{2.5}\ln x$$

或

$$x_{small}(\mu)=\mathrm{e}^{-2.5\mu}$$

对于大

$$\mu_{Big}(x)=-\frac{1}{2.5}\ln(1-x)$$

或

$$x_{Big}(\mu)=1-\mathrm{e}^{-2.5\mu}$$

前述的"如果-则"模糊规则可根据专家的经

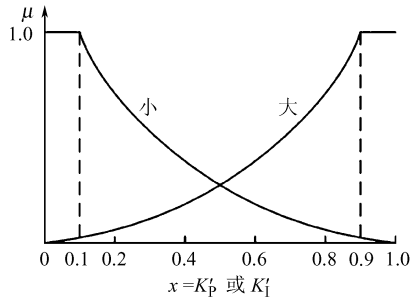


图 4 K'_P和 K'_I的隶属度函数

验或实验确定. 例如:在开始阶段,K'_P应该较大而K'_I较小以产生大的控制信号获得快的上升时间,这样 K'_P就应该由大的模糊集(大)决定,K'_I由小的模糊集(小)决定. 此时推理规则为:

如果 $e(k)$是 PB 且 $\Delta e(k)$ 是 ZO,则 K'_P是大,K'_I是小.

相似的,在到达设定点时,为了避免大的超调,采用如下的推理规则:

如果 $e(k)$是 ZO 且 $\Delta e(k)$ 是 NB,则 K'_P是小,K'_I是大.

应用相同的原理就可以得到一系列的推理规则. 表 1 和表 2 分别为调整 K'_P和 K'_I模糊推理规则,表中 B 表示大,S 表示小.

表 1 K'_P的模糊控制规则表

偏差变化率 $\Delta e(k)$	偏差 $e(k)$						
	NB	*NM*	*NS*	*ZO*	*PS*	*PM*	*PB*
NB	*B*	*S*	*S*	*S*	*S*	*S*	*B*
NM	*B*	*B*	*S*	*S*	*S*	*B*	*B*
NS	*B*	*B*	*B*	*S*	*B*	*B*	*B*
ZO	*B*	*B*	*B*	*B*	*B*	*B*	*B*
PS	*B*	*B*	*B*	*S*	*B*	*B*	*B*
PM	*B*	*B*	*S*	*S*	*S*	*B*	*B*
PB	*B*	*S*	*S*	*S*	*S*	*S*	*B*

表 2 K'_I的模糊控制规则表

偏差变化率 $\Delta e(k)$	偏差 $e(k)$						
	NB	*NM*	*NS*	*ZO*	*PS*	*PM*	*PB*
NB	*S*	*S*	*S*	*S*	*S*	*S*	*S*
NM	*S*	*S*	*S*	*B*	*S*	*S*	*S*
NS	*S*	*S*	*B*	*B*	*B*	*S*	*S*
ZO	*S*	*B*	*B*	*B*	*B*	*B*	*S*
PS	*S*	*S*	*B*	*B*	*B*	*S*	*S*
PM	*S*	*S*	*S*	*B*	*S*	*S*	*S*
PB	*S*	*S*	*S*	*S*	*S*	*S*	*S*

"如果-则"模糊规则中第 i 条规则的隶属度由因数集的乘积确定

$$\mu_i = \mu_{A_i}(e(k)) \cdot \mu_{B_i}(\Delta e(k)) \tag{4}$$

式中,μ_{A_i}是 $e(k)$的模糊子集 A_i的隶属度;μ_{B_i}是 $\Delta e(k)$的模糊子集 B_i的隶属度.

根据 μ_i,每条规则中的 K'_P和 K'_I由图 5 所示求得.

解模糊化采用如下形式:

$$K'_P = \sum_{i=1}^{m} \mu_i K'_{P,i} \tag{5}$$

$$K'_I = \sum_{i=1}^{m} \mu_i K'_{I,i} \tag{6}$$

式中,$K'_{P,i}$是第 i 条规则中隶属度 μ_i 对应的 K'_P值(见图 5),$K'_{I,i}$的含义与此相同.

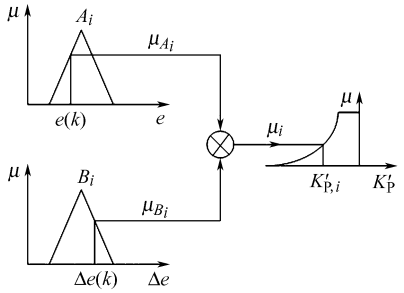


图 5 模糊规则的实现过程

得到 K'_P和 K'_I之后,就可以由下面的方程确定 PI 控制器的参数:

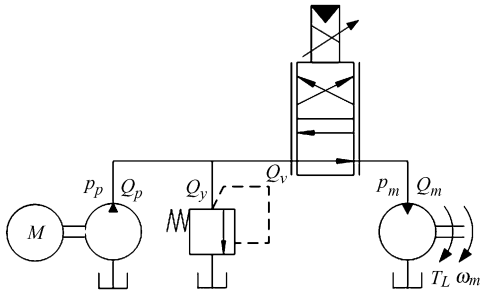
$$K_P = (K_{Pmax} - K_{Pmin})K'_P + K_{Pmin} \tag{7}$$

$$K_I = (K_{Imax} - K_{Imin})K'_I + K_{Imin} \tag{8}$$

系统误差较大时,K_P值达到它的最大值 K_{Pmax},K_I达到它的最小值 K_{Imin}. 相反,当系统误差较小时,K_P近似为最小值 K_{Pmin},而 K_I近似为最大值 K_{Imax}.

3 试验结果及分析

电液伺服系统的构成如图 6 所示,它是一阀控马达速度伺服系统,由伺服阀和液压马达构成速度调节单元,液压泵为系统提供能源,溢流阀则调节伺服阀的入口压力,通过调节伺服阀开度来调节液压马达的速度.



p_p—液压泵出口压力;p_m—液压马达入口压力;
Q_p—液压泵出口流量;Q_m—液压马达入口流量;
Q_y—溢流阀溢流流量;T_L—液压马达输出转矩;
Q_v—伺服阀通过流量;ω_m—液压马达输出转速.

图 6 阀控速度伺服系统原理图

1) 参考速度信号阶跃变化时速度响应

在负载压力保持常数 $p=7$ MPa、供油压力 $p_s=10$ MPa 和速度设定值 $v=1\,000$ r/min 的情况下,系统的速度阶跃响应、负载压力 p 和控制电压 u 随时间 t 的变化如图 7 所示.

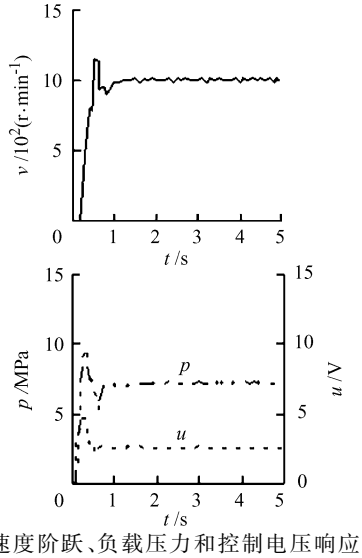


图 7　速度阶跃、负载压力和控制电压响应曲线

由图 7 可以看出系统的调整时间为 0.79 s,比 PID 控制时下降 64%,超调为 10%,几乎没有振荡,这是由于模糊增益调度 PI 控制器的增益在每个采样瞬间是变化的.

2) 负载压力阶跃变化时速度响应

在供油压力 $p_s=10$ MPa 和速度设定值 $v=1\,000$ r/min的情况下,负载压力 p 由 0～10 MPa 阶跃变化时,马达速度响应、负载压力 p 和控制电压 u 随时间 t 的变化见图 8.从图中可以看出,当负载压力由 0 增加到 10 MPa 时,马达速度下降幅度为 18%,但模糊增益调度 PI 控制器通过 1.29 s 使速度误差降为零,整个系统的动态响应比较令人满意,说明该调节方法有很强的鲁棒性.

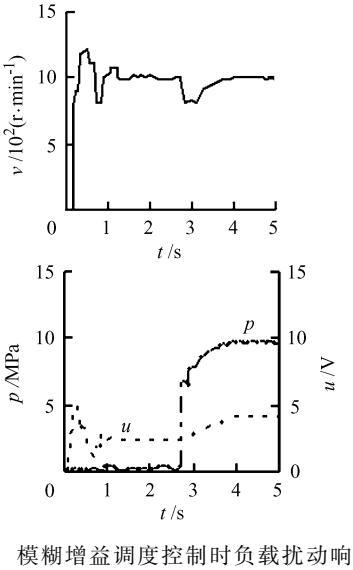


图 8　模糊增益调度控制时负载扰动响应

表 3 为模糊增益调度和 PID 的性能比较,可见模糊增益调度使系统性能有较大提高.

表 3　模糊增益调度和 PID 性能比较

条件	参数指标	PID	模糊 PI
阶跃响应	调整时间/s	2.2	0.79
$p=7$ MPa	超调量/%	15	10
负载扰动	回复时间/s	1.8	1.29
$v=1\,000$ r/min	速度下降量/%	19	18

4　结 束 语

从试验结果可以看出,采用模糊增益调度控制方式,无论速度响应还是抗负载扰动能力都比单纯 PID 控制方式有很大提高,说明了该方法对电液伺服速度系统应用的有效性.对于难以精确建模的系统如电液伺服位置系统和电液伺服力系统,及非线性系统如机器人系统等,应用该方法也可以解决大范围控制的有效性,提高系统的动态性能和鲁棒性.

参考文献 (References)

[1] 王占林. 液压伺服控制[M]. 北京:北京航空学院出版社,1987:389－400
Wang Zhanlin. Hydraulic severe control[M]. Beijing: Beijing Institute of Aeronautics and Astronautics Press, 1987: 389－400 (in Chinese)

[2] 蔡永强,裘丽华,王占林. 力伺服系统的模糊自适应控制[J]. 北京航空航天大学学报,1999,25(1):22－25
Cai Yongqiang, Qiu Lihua, Wang Zhanlin. Adaptive fuzzy control for loading servo system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999,25(1) :22－25(in Chinese)

[3] GündoğduÖ, Erentürk K. Fuzzy control of a dc motor driven four-bar mechanism[J]. Mechatronics, 2005, 15(4): 423－438

[4] Mahmoud M, Dutton K, Denman M. Design and simulation of a nonlinear fuzzy controller for a hydropower plant[J]. Electric Power Systems Research, 2005, 73(2): 87－99

[5] Paramasivam S, Arumugam R. Hybrid fuzzy controller for speed control of switched reluctance motor drives[J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(9): 1365－1378

[6] Tong Shaocheng, Li Hanxiong, Wang Wei. Observer-based adaptive fuzzy control for SISO nonlinear systems[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2004, 148(3): 355－376

(责任编辑:娄　嘉)