

## 气动位置伺服系统的非对称模糊 PID 控制

薛 阳, 彭光正, 贺保国, 伍清河

(北京理工大学 自动控制系 SMC 技术中心, 北京 100081)

**摘要:** 对于有杆气缸的非对称物理及摩擦力特性, 提出了采用非对称模糊策略的模糊 PID 控制算法, 较好地解决了有杆气缸由于左右两腔物理结构和摩擦力特性的不对称而造成运动过程中压力变化复杂的问题, 改善了系统的动态响应性能. 实验证明, 采用非对称模糊策略的模糊 PID 控制可以明显地提高气动位置伺服系统的动态响应性能, 系统具有较小的超调量和过渡过程时间, 并获得了满意的重复稳态精度.

**关键词:** 气动位置伺服系统; 非对称模糊策略; 模糊 PID 控制

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Asymmetric fuzzy PID control for pneumatic position control system

XUE Yang, PENG Guang-zheng, HE Bao-guo, WU Qing-he

(Department of Automatic Control, SMC-BIT Pneumatics Center, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** For asymmetric physical structure and friction characteristic of single rod cylinder, a new fuzzy PID algorithm of asymmetric fuzzy strategy for pneumatic position control system was presented. It could effectively solve the difficult problems, which were mainly caused by asymmetric structure and different friction characteristics in two directions. The experimental results proved that, with this strategy, the dynamic performance of the system could be much improved. The system obtained desired percentage overshoot and repeatability in both transient and steady-state responses.

**Key words:** pneumatic position system; asymmetric fuzzy strategy; fuzzy PID control

### 1 引言 (Introduction)

近年来, 气动技术得到了飞速的发展. 气动系统具有节能、无污染、低成本和结构简单的优点, 在工业上有了越来越广泛的应用, 尤其是在一些轻载高速的工作场合, 所以对于气动伺服系统特别是气动位置伺服系统的研究越来越深入. 然而由于空气的可压缩性高, 气缸活塞的摩擦力变化复杂及气缸两腔压力作用面积不一致等特点, 使得气动位置伺服系统是一个具有时滞带死区的强非线性系统, 使用传统的线性控制理论与方法很难获得满意的动态响应性能和稳态精度.

在先前的一些气动位置伺服系统的研究中, 所用的气缸往往是无杆气缸或双出杆对称气缸<sup>[1,2]</sup>, 这样的系统其摩擦力特性以及运动过程中两腔压力的变化特性等在气缸来回运动过程中基本上是对称的. 但在实际工业应用中常采用的是非对称的有杆气缸, 所以本文是以非对称有杆低摩擦气缸为研究

对象, 其特点是在活塞伸出和缩进的过程中只有单向是低摩擦的, 且气缸两腔压力作用面积不相同, 这样更增加了控制对象运动过程中摩擦力和两腔压力变化的复杂性.

本文是以两个电-气比例压力阀作为电-气控制元件构成新颖的气动位置伺服系统, 通过对气缸两腔压力的实时控制, 实现气缸活塞位置的高精度控制. 针对有杆低摩擦气缸结构及摩擦力特性上的非对称性, 提出采用非对称模糊策略的模糊控制方法来补偿摩擦力及压力变化的影响, 并在此基础上引入传统的 PID 控制来提高系统的稳态精度.

### 2 系统描述 (System description)

#### 2.1 实验系统 (Experiment system)

本系统主要由控制部分、传感器、控制对象及电-气转换部分组成, 整个实验系统结构如图 1 所示. 其中控制部分为工控机, 相应的数据采集卡和端子板分别为 PCLD-812 和 PCLD-780; 传感器为一个位



表 2 误差变化率  $EC$  的隶属度函数赋值表

Table 1 Membership function values of error gradient  $EC$

$EC$	$ec$													
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	
PB										0.1	0.4	0.8	1.0	
PM									0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	
PS								0.9	1.0	0.7	0.2			
ZO						0.5	1.0	0.5						
NS			0.2	0.7	1.0	0.9								
NM	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2									
NB	1.0	0.8	0.4	0.1										

表 3 控制量  $U$  的隶属度函数赋值表

Table 3 Membership function values of controller output  $U$

$U$	$u$															
	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	
PB												0.1	0.4	0.8	1.0	
PM										0.2	0.7	1.0	0.7	0.2		
PS								0.4	1.0	0.8	0.4	0.1				
ZO							0.5	1.0	0.5							
NS				0.1	0.4	0.8	1.0	0.4								
NM		0.2	0.7	1.0	0.7	0.2										
NB	1.0	0.8	0.4	0.1												

应用常规的模糊条件和模糊关系“IF  $A$  and  $B$  THEN  $C$ ”形式来建立模糊规则,见表 4 所示.

表 4 对称结构的模糊控制规则表

Table 4 Fuzzy control rule table of symmetric structure

$EC$	$E$							
	PB	PM	PS	PZ	NZ	NS	NM	NB
PB	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS	NM
PM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NM	NM
PS	PB	PB	PS	PS	PS	NS	NM	NB
ZO	PB	PM	PS	ZO	ZO	NS	NM	NB
NS	PB	PM	PS	NS	NS	NS	NB	NB
NM	PM	PM	ZO	NS	NS	NM	NB	NB
NB	PM	PS	ZO	NS	NS	NM	NB	NB

误差  $E$  的基本论域为  $[-100, +100]$  mm,即  $[-0.1, +0.1]$  m; 误差变化率  $EC$  的基本论域为  $[-100, +100]$  mm/ms,即  $[-10, +10]$  m/s. 通过计算上述 2 个输入模糊化的量化因子分别为  $K_1 = 60$ ,  $K_2 = 0.6$ , 计算公式为  $y = \frac{12[x - (a + b)/2]}{(b - a)}$ , 其中  $a$  与  $b$  分别为精确量的最小值与最大值. 同理可得, 控制量  $U$  的基本论域为  $[-5, +5]$  V, 解模糊的比例因子为  $K_0 = 5/7$ . 在经过模糊化处理及模糊推

理之后, 采用系数加权平均法对推理结果进行解模

糊  $u^* = \left| \frac{\sum x_i u(x_i)}{\sum u(x_i)} \right|$ , 其中  $u(x_i)$  为  $x_i$  相对应的隶属度函数值. 由这样的模糊控制器得到的控制响应曲线如图 2 所示.

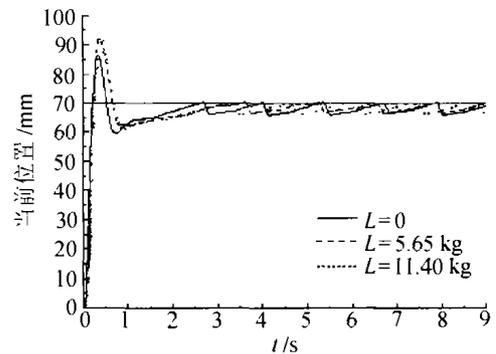


图 2 常规纯模糊控制响应实验曲线

Fig. 2 Dynamic response curves of symmetric fuzzy control

### 3.2 非对称模糊策略的模糊控制 (Asymmetric fuzzy control)

由图 2 可以看出, 响应曲线有较短的上升时间, 但是总体的动态特性比较差. 细致地分析在不同负载下得到的曲线可以得出结论, 正是由于低摩擦有杆气缸物理结构及摩擦力特性的非对称性, 使得控

制作用在期望值的附近有截然不同的效果:在活塞位移超出期望值时,模糊控制的作用立即将其推回到期望值,且控制作用比较大,活塞退回的幅度及速度都远远超过活塞未到期望值时的控制作用.虽然整个模糊控制规则表是对称的,但由于气缸特性的非对称性使得模糊控制作用并没有达到预想的效果.为了解决这个问题,提出将气缸超出期望值并退回的控制决策修改为保守策略,这可以通过构造非对称的隶属度函数以及模糊规则表来实现.非对称模糊规则表如表 5 所示,可以看到在误差为负值时,控制的语言值比较保守,模糊规则的建立主要是依据气缸能否快速稳定地到达目标位置,并且没有稳态误差.

表 5 非对称结构的模糊控制规则表

Table 5 Fuzzy control rule table of asymmetric structure

EC	E							
	PB	PM	PS	PZ	NZ	NS	NM	NB
PB	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS	NS
PM	PB	PB	PM	PS	ZO	ZO	NS	NS
PS	PB	PB	PS	PS	ZO	ZO	NS	NM
ZO	PB	PM	PS	ZO	ZO	NS	NM	NM
NS	PB	PM	PS	NS	ZO	NS	NM	NB
NM	PM	PM	ZO	NS	ZO	NS	NM	NB
NB	PM	PS	ZO	NS	NS	NS	NM	NB

应用非对称模糊策略的模糊控制器得到的在不同惯性负载下的控制响应曲线如图 3 所示.

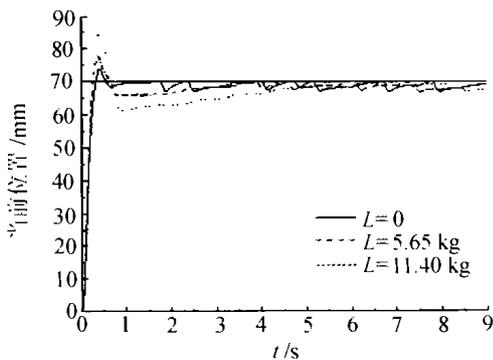


图 3 采用非对称策略的纯模糊控制响应实验曲线

Fig. 3 Dynamic response curves of asymmetric fuzzy control

从图 3 中可以看出,经过修改模糊规则表和隶属度函数使其非对称之后,模糊控制较大地改善了系统的动态响应性能,不仅使得超调量有很大的减少,而且其稳态精度大大地提高了.

### 3.3 模糊 PID 控制(Fuzzy PID control)

虽然非对称纯模糊控制在一定程度上已经改善了系统的控制指标,但对活塞在期望值附近的振荡无能为力.所以在此引进传统的 PID 控制来消除振

荡问题.模糊 PID 系统的控制原理<sup>[3]</sup>见图 4,其中在预先设定的误差带内控制器的输出交由 PID 算法来处理.PID 控制用来在很小的误差带内对系统精调,所以取为 5 mm(经实验验证).采用纯 PID 算法进行控制时,被控对象的非对称特性使得同一组 PID 参数是不可能适应气缸来回运动的两个方向.

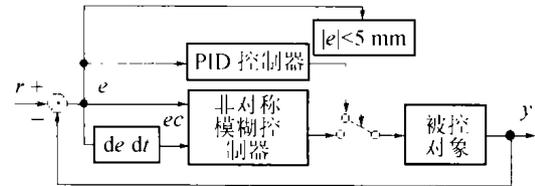


图 4 模糊 PID 控制原理图

Fig. 4 Fuzzy PID control for pneumatic position system

## 4 实验研究(Experiment research)

气动位置伺服系统要求能够快速、准确并稳定地复现输入指令位置.本实验研究了在不同惯性负载的情况下系统对于期望位置的响应特性,其中采样周期为 0.01 s,气源压力设定为常值 0.7 MPa,惯性负载分别为空载、5.65 kg 和 11.40 kg,期望位置为 70 mm.在每种负载情况下调整  $K_p$ 、 $T_i$ 、 $T_d$  三个 PID 参数以得到动态响应不同的三条曲线,负载为 5.65 kg 时的实验结果如图 5.

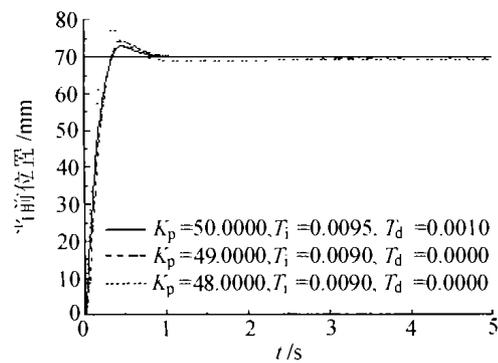


图 5 惯性负载  $m = 5.65$  kg 的响应实验曲线

Fig. 5 Dynamic response curves as load mass is 5.65 kg

由以上响应曲线可以分析得出,采用非对称模糊策略的模糊 PID 控制算法较好地克服了低摩擦有杆气缸因物理结构及摩擦力特性的不对称而引起的左右两腔特性不同的困难.同时在具体实验过程中,对于气源压力变化和运动过程中摩擦力的变化也有一定的适应性.所以此控制算法具有实时跟踪系统动态特性的能力和强的鲁棒性,因此极大地改善了气动位置伺服系统过渡过程性能,提高了系统的重复稳态控制精度.

## 5 结论(Conclusion)

气动位置伺服系统先前的研究基本上局限于无

杆气缸或双出杆对称气缸,这样,以前的控制算法基本上没有考虑到有杆气缸本身物理上的非对称结构.本文针对工业中大量应用的有杆气缸,提出了非对称模糊策略的模糊控制算法,获得了较好的控制效果,并与传统 PID 控制相结合,克服了气缸两腔压力作用面积不一致和气缸活塞摩擦力单向性等因素对系统控制性能的影响,明显地改善了阀控缸气动位置伺服系统的动态响应性能,减少了系统的超调和振荡次数,使气动位置伺服系统具有良好的抗参数扰动的鲁棒性.实验证明,应用这种新型的控制算法系统的最小超调为 2.40%,最小重复稳态精度可达  $\pm 0.10$  mm.此技术为在关节型多自由度气动机械手<sup>[4,5]</sup>上的研究打下了良好的基础.

### 参考文献(References):

- [1] 李宝仁,朱玉泉,许耀铭.气动位置伺服系统的自适应控制研究[J].中国机械工程,1998,9(3):4-8.  
(LI Baoren, ZHU Yuquan, XU Yaoming. Self-adaptive control on pneumatic position servo system [J]. *Chinese Mechanical Engineering*, 1998, 9(3): 4-8.)
- [2] 李玉翔,李修仁,李学贵.气动位置伺服的自适应模糊控制[J].天津纺织工学院学报,2000,19(4):21-24.

(LI Yuxiang, LI Xiuren, LI Xuegui. Self-adaptive fuzzy control on pneumatic position servo system [J]. *J of Tianjin Polytechnic University*, 2000, 19(4): 21-24.)

- [3] 陶永华,尹怡欣,葛芦生.新型 PID 控制及其应用[M].北京:机械出版社,1998.  
(TAO Yonghua, YIN Yixin, GE Lusheng. *New PID Control and Application* [M]. Beijing: China Machine Press, 1998.)
- [4] 蔡自兴.机器人学[M].北京:清华大学出版社,2000.  
(CAI Zixing. *Robotics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.)
- [5] WANG Qi, TAN Qian, HOU Linqi, et al. On-line learning neural network controller for pneumatic robot position control [C]// *Proc of IEEE Int Conf on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC)*. San Diego: IEEE Systems, Man & Cybernet Society, 1998: 3436-3441.

### 作者简介:

薛 阳 (1976—),男,北京理工大学自动控制系博士生.研究领域为模糊控制,神经网络控制,机器人. E-mail: xueyangsohu@sohu.com;

彭光正 (1964—),男,北京理工大学自动控制系教授,博士生导师.研究领域为气动机器人,智能控制. E-mail: smcpeng@bit.edu.cn;

贺保国 (1978—),男,北京理工大学自动控制系硕士生.研究领域为模糊控制,气动机器人. E-mail: pecv@sohu.com;

伍清河 (1955—),男,北京理工大学自动控制系教授,博士生导师.研究领域为系统辨识,鲁棒控制. E-mail: wuqinghe@bit.edu.cn.