

doi: 10.7690/bgzdh.2013.08.020

模糊自适应 PID 在气液增力缸压力控制中的应用

张向南, 周丽娟, 李全俊

(中国兵器工业第五八研究所弹药自动装药研究应用中心, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为提高气液增力缸的输出压力精度并增强系统的一致性和稳定性, 设计一种模糊自适应 PID 控制器。根据气动伺服系统的建模推导出比例阀控制气液增力缸伺服系统的数学模型, 并结合模糊自适应控制原理, 以离线生成控制查询表在线查询的方式, 实现实时自整定 PID 参数。通过建立系统仿真模型, 得到比常规 PID 控制更好的稳态和动态特性的控制系统。仿真结果证明, 该方法可以大大地提高气液增力缸在压力控制中的控制精度。

关键词: 气液增力缸; PID 控制器; 模糊自适应; 压力

中图分类号: TP273⁺.3 **文献标志码:** A

Application of Adaptive Fuzzy-PID for Controlling of Pressure in Pneumatic-Hydraulic Intensifier

Zhang Xiangnan, Zhou Lijuan, Li Quanjun

(Research & Application Center for Ammunition Automatic Charging & Assembly, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industries, Mianyang 621000, China)

Abstract: For improving accuracy of output pressure and enhancing the uniformity and stability of the pneumatic-hydraulic intensifying cylinder, design a controller of adaptive fuzzy PID. According to the model of the pneumatic servo system, derive to the mathematic model of proportional valve control pneumatic-hydraulic servo system. Combine with the theory of adaptive fuzzy PID, based on generating polling list off-line and on-line inquires, realize the real-time auto-setting PID parameter. Through establish system simulation model, compared with regular PID, achieve a better system with stationary state and dynamic response characteristic. The simulation results prove that the method can greatly improve control accuracy of pneumatic-hydraulic intensifying cylinder.

Key words: pneumatic-hydraulic intensifier; PID controller; fuzzy adaptive; pressure

0 引言

气液增力技术结合了液压和气动技术的优点, 在自动化领域得到广泛应用, 对气液增力装置进行输出压力控制的研究有重要的现实意义^[1]。目前我国对气液增力缸压力的控制大都采用开环、机械限位或定气压控制手段, 导致输出压力精度不高, 影响气液增力缸使用过程中的鲁棒性和稳定性^[2]。在工业生产中, 气液增力缸不同程度上存在纯滞后、非线性、参数不确定等特性, 传统的 PID 控制器采用实验加试凑的方法, 不仅需要熟练的技巧, 往往费时费力, 而且没有“自适应”能力, 只能依靠人工重新整定参数。有文献提出用 Smith 预估器补偿方法, 从理论上可以解决纯滞后问题, 但由于其对模型误差十分敏感, 对过程动态特性的精确度要求较高, 并不适合所有的实际生产情况, 因此在一定的条件下不采用补偿的方式反而控制效果更好。

基于此, 笔者采用自适应局部参数自调整方式, 并通过模糊控制来实现自调整。由于模糊控制

对非线性以及参数不确定的控制对象来说有较好的品质, 在线自动调整 PID 参数, 改善了系统的动态性能, 减少超调量和系统的调节时间^[3], 还可以根据不同用户的不同需求, 离线调整查询表值, 从而具有很好的推广应用价值^[3]。

1 系统建模

气液增力缸工作原理如图 1 所示。

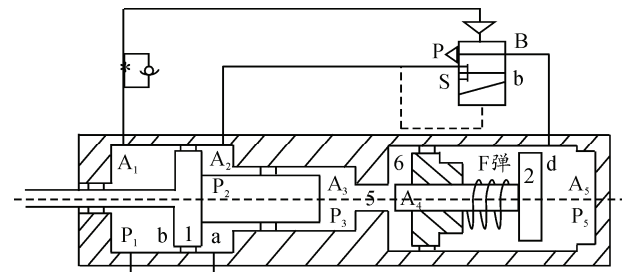


图 1 气液增力缸工作原理简图

根据典型的气动伺服系统的建模思想来推导比例阀控制气液增力缸伺服系统的数学模型^[4]。

收稿日期: 2013-02-25; 修回日期: 2012-03-12

作者简介: 张向南(1987—), 女, 吉林人, 从事计算机技术控制技术研究。

$$y(s) = \frac{K_v \omega_n^2 U(s)}{s(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_m^2)} \quad (1)$$

其中： ω_n 为固有频率； ξ 为等效阻尼系数； K_v 为速度增益^[5]； $U(s)$ 为给定压力值； $y(s)$ 为压力过程量。

根据实际生产中的经验，系统的传递函数为：

$$G(s) = \frac{1}{s(s^2 + 0.7s + 1)} e^{-1.5s} \quad (2)$$

2 控制算法实现

2.1 模糊自适应控制基本原理

针对复杂的非线性系统，想凭工程经验一次性构造满意的模糊控制规则表十分困难，在常规模糊控制系统中，附加性能量度和比较、控制校正量赋值构成模糊自适应控制系统^[6]。

1) 性能量度和比较。

将每次采样的实际响应通过检测 $e(kT)$ 和 $ec(kT)$ 得出， kT 为采样时刻， T 为采样周期。把实际响应与希望响应相比较，就可以度量控制器的性能，能大概表明需要校正的输出量。

2) 控制输入校正量的赋值。

把从性能量度判定表得到的需要校正的输出量变换为控制输入校正量。与非自适应控制不同，这里不需要建立精确对象模型，有一个增量模型就能满足要求。状态空间方程

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f(x_1, u_1, u_2) \\ \dot{x}_2 = g(x_2, u_1, u_2) \end{cases} \quad (3)$$

微小输入变化引起的输出导数的变化为

$$\begin{bmatrix} \delta \dot{x}_1 \\ \delta \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \delta u_1 \\ \delta u_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 \mathbf{J} 为系统 Jacobian 矩阵。

经历一个采样周期后，输入变化 Δu_1 和 Δu_2 引起的输出变化 Δx_1 和 Δx_2 ，近似表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} T\delta \dot{x}_1 \\ T\delta \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \end{bmatrix}, \text{ 式中对象的增量模型}$$

$\mathbf{M} = \mathbf{TJ}$ 。由此设 $\Delta x(kT)$ 为输出校正量， $\Delta u(kT)$ 为输入校正量，可导出：

$$\Delta u(kT) = \mathbf{M}^{-1} \Delta x(kT) \quad (5)$$

模糊自适应控制中，对 \mathbf{M} 的精确性要求不高，只要一开始有一个粗略的控制策略，便可通过在线学习得到改进^[7]。

常规 PID 算法，输入值偏差校正值为

$$\begin{aligned} \Delta u(kT) = & \Delta k_p \Delta e(kT) + \Delta k_i \sum_{i=0}^n \Delta e(kT) + \\ & \Delta k_d [\Delta e(kT) - \Delta e(kT - 1)] \end{aligned} \quad (6)$$

综上所述，利用模糊自适应理论，自动调节对象增量模型 M ，即 PID 控制器影响系统响应的 3 个参数 Δk_p Δk_i Δk_d 的值，结合模糊控制对非线性及参数不确定的控制对象来说有较好的品质，将压力变化及变化率模糊化，利用模糊规则进行模糊推理，离线生成控制规则表，得到相应的 PID 控制参数变化率，根据此表在线查询 PID 3 个参数变化率值，与初值进行合成，完成对 PID 参数的在线自校正。

2.2 工程实现

设计控制系统结构框图如图 2。

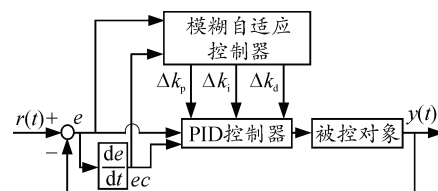


图 2 气液增力缸模糊自适应 PID 控制系统结构

1) 语言变量的确定：根据生产需要，设气液增力缸给定值为 x ，输出压力 y 论域 [1 300 N, 5 600 N]，其中系统误差输入 $e(k)$ 基本论域为 [-850, 3 450]，系统误差变化率输入 $ec(k)$ 基本论域为 [-1 700, 6 900]。 Δk_p 基本论域为 [-0.5, 0.5]； Δk_i 基本论域为 [-0.1, 0.1]； Δk_d 基本论域为 [-3, 3]；语言变量： E 、 EC 、 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_D 。

2) 语言变量论域的设计：设 E 、 EC 的论域为 {-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6}；设 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 论域为 {-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7} 则量化因子 $K_e = 12/(e_h - e_l) = 3/1075$ 同理 $K_{ec} = 3/2150$ 其中比例因子 $K_{\Delta k_p} = (\Delta k_{ph} - \Delta k_{pl})/14 = 1/14$ 同理 $K_{\Delta k_i} = 1/14$, $K_{\Delta k_d} = 1/70$ 。

3) 定义各语言变量的语言值：将 E 、 EC 和 ΔK_p ΔK_i ΔK_D 划分为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}。

4) 定义各语言值的隶属度函数。根据专家经验总结出 E 、 EC 和 ΔK_p ΔK_i ΔK_D 隶属度函数曲线，如图 3、图 4 所示，相应的赋值见表 1、表 2。

5) 建立模糊规则：根据工程实践，① 当 $|E|$ 较大时，为使系统具有较好的跟踪性能，取较大的 K_p 与较小的 K_D ，同时为避免系统响应出现较大的超调，应对积分作用加以限制，通常 $K_i = 0$ 。② 当 $|E| |EC|$

为中等大小时，为使系统具有较小的超调， K_p 应取的小些。此时 K_D 的取值对系统的影响较大，应取的小些； K_I 的取值要适当。③ 当 $|E|$ 较小时，为使系统具有较好的稳定性能， K_I 与 K_D 均应取的大些；同时为避免系统在设定值出现振荡，并考虑系统抗干扰性能，当 $|EC|$ 较大时， K_D 可取的小些， $|E|$ 较小时， K_D 可取的大些。相应的控制规则见表 3。

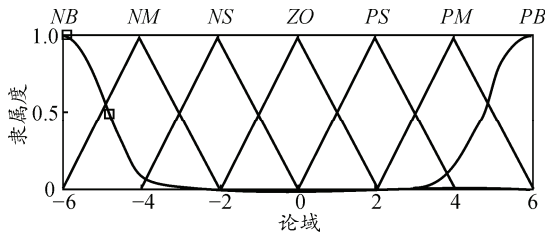


图 3 输入 E 、 EC 的隶属度函数曲线

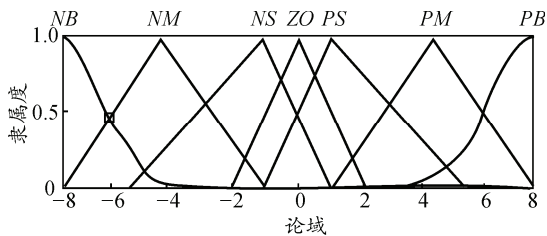


图 4 输出 ΔK_p 、 ΔK_I 、 ΔK_D 隶属度函数曲线

6) 模糊推理：将实际检测的系统误差和误差变化率量化为模糊控制器的输入。

$$E^* = \left\langle K_e \left(e^* - \frac{e_h + e_l}{2} \right) \right\rangle = \left\langle \frac{3}{1075} (e^* - 1300) \right\rangle \text{ 同理,}$$

$EC^* = \left\langle \frac{3}{2150} (ec^* - 2600) \right\rangle$ ，根据模糊输入和规则库中蕴涵的输入输出关系，模糊推理方法得到模糊控制器的输出模糊值 C^*

$$C^* = (E^* \times EC^*) \circ R \quad (7)$$

7) 清晰化接口：笔者采用加权平均法，输出控

制量为：

$$\Delta K_p^* = \left(\frac{\sum_i \mu_{C_i} \times \Delta K_{pi}}{\sum_i \mu_{C_i}} \right) \text{ 同理 } \Delta K_I^* \Delta K_D^*$$

8) 离线生成控制查询表：根据控制规则表求出每条规则的模糊蕴涵关系 R_i ，以 ΔK_{pi} 为例

$$R_{\Delta K_{pi}} = [(E_i) \times (EC_i)]^T \times C_i(\Delta K_{pi}) \quad (8)$$

其中 $[(E_i) \times (EC_i)]^T$ 为写成列向量的形式。

$$\mu_{R_i}(E, EC, \Delta K_p) = \mu_{A_i}(E) \wedge \mu_{B_i}(EC) \wedge \mu_{C_i}(\Delta K_p)$$

模糊关系矩阵 $R = \bigcup_i R_{\Delta K_{pi}}$ ，其中模糊蕴涵关系以隶属度函数^[8]表示：

$$\mu_R(E, EC, \Delta K_p) = \bigvee_i [\mu_{A_i}(E) \wedge \mu_{B_i}(EC) \wedge \mu_{C_i}(\Delta K_p)]$$

清晰化处理之后得到控制器的精确输出量

$$\Delta k_p = K_{\Delta k_p} \Delta K_p + \frac{\Delta k_{ph} + \Delta k_{pl}}{2} \text{ 则模糊自适应 PID}$$

$$\text{的 3 个参数为: } \begin{cases} k_{p(k)} = k_{p(k-1)} + \Delta k_p \\ k_{i(k)} = k_{i(k-1)} + \Delta k_i \\ k_{d(k)} = k_{d(k-1)} + \Delta k_d \end{cases} \text{。建立如下控制}$$

查询表，见表 4。

表 1 输入变量 E 、 EC 的赋值

E/EC	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
NB	1	0.8	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NM	0	0.2	1	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NS	0	0	0	0.2	1	0.8	0	0	0	0	0	0	0
ZO	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.8	1	0.2	0	0	0
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0.8	1	0.2	0	0
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	1	0.8

表 2 输出语言变量 ΔK_p 、 ΔK_I 、 ΔK_D 赋值

ΔK_p	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
NB	1	0.8	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NM	0	0.2	1	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NS	0	0	0	0.2	1	0.8	0	0	0	0	0	0	0
ZO	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.8	1	0.2	0	0	0
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0.8	1	0.2	0	0
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	1	0.8

表 3 控制规则

$\Delta K_p \Delta K_I \Delta K_D$	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/PS	PM/NB/ZO	PM/NM/ZO	PS/NM/ZO	PS/ZO/PB	ZO/ZO/PB
NM	PB/NB/NS	PB/NB/NS	PM/PM/NS	PM/NM/NS	PS/NS/ZO	ZO/ZO/NS	ZO/ZO/PM
NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PM/NS/NM	PS/NS/NS	ZO/ZO/ZO	NS/PS/PS	NM/PS/PM
EC	ZO	PM/NM/NB	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/ZO	NM/PS/PS	NM/PM/PM
PS	PS/NS/NB	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO	NM/PM/PS	NM/PM/PS
PM	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO	NM/PB/PS	NB/PB/PS
PB	ZO/ZO/PS	NS/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO	NB/PB/PB	NB/PB/PB

表 4 ΔK_p 模糊查询

ΔK_p	E													
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	
EC	-6	7	7	6	6	5	5	4	2	2	1	1	1	0
	-5	6	6	5	5	5	5	3	1	1	1	1	1	0
	-4	5	5	5	5	4	4	3	2	2	1	0	1	0
	-3	5	5	5	5	4	4	3	2	2	1	1	1	1
	-2	4	4	4	3	3	3	1	1	1	-2	-2	-3	-4
	-1	4	4	4	3	4	3	1	1	1	-2	-2	-3	-4
	0	4	4	1	1	1	1	0	-1	-2	-3	-3	-4	-4
	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-3	-3	-4	-4
	2	2	2	2	2	1	0	-1	-2	-2	-4	-4	-4	-4
	3	1	1	1	0	-1	-1	-3	-3	-4	-4	-4	-5	-6
	4	1	0	1	1	-2	-1	-4	-4	-4	-4	-5	-6	-6
	5	1	0	-2	-1	-2	-1	-3	-3	-4	-5	-5	-6	-7
	6	1	1	-2	-1	-2	-2	-4	-4	-4	-5	-5	-7	-7

3 系统仿真

利用 Matlab 中 Simulink 进行控制系统仿真，

3.1 系统模型仿真

如图 5 所示。

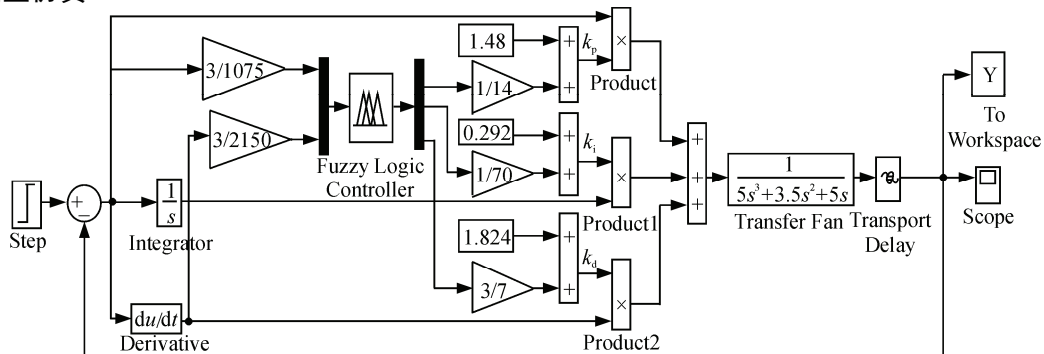


图 5 模糊自适应 PID 控制系统仿真模型

3.2 仿真结果分析

常规 PID 控制的阶跃响应曲线如图 6。

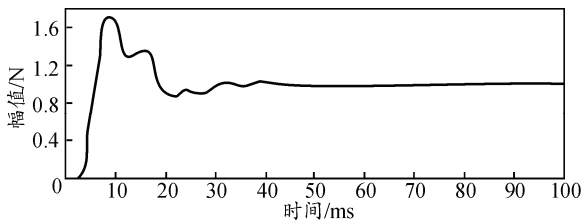


图 6 常规 PID 控制系统稳定边界法整定仿真结果

模糊自适应 PID 控制阶跃相应曲线如图 7。

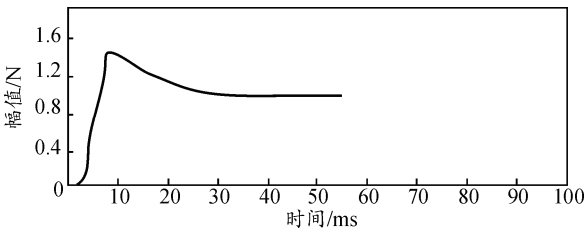


图 7 模糊自适应 PID 控制器阶跃响应

比较图 6、7 可见，模糊自适应 PID 响应时间缩短了，稳态误差减小了，改善了系统的动态特性，提高了气液增力缸在压力控制中的控制精度。

4 结束语

笔者通过 Simulink 对基于西门子 S7-200 的模

糊自适应 PID 控制器进行仿真，仿真结果表明：这种控制方法相对于一般的模糊控制更易实现，比常规的 PID 控制具有更好的稳态和动态特性，可提高气液增力缸压力控制的精度。设计的 LAD 程序还可根据用户需求更改查询表，更具实用性。

参考文献：

- [1] 王延徽, 樊志新. 一种新型的气液增力缸[J]. 液压与气动, 1999(3): 32-33.
- [2] 贺宝国, 彭光正, 伍清河. 模糊 PID 控制在气动摆缸位置伺服控制中的应用[J]. 液压与气动, 2004(1).
- [3] 李士勇. 模糊控制、神经控制与智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996.
- [4] 陈建国, 黄立, 张积广, 等. 多指标约束下 PID 参数统一优化定量整定方法[J]. 兵工自动化, 2012, 31(2): 47-51.
- [5] 刘廷俊, 李兆文. 气动比例位置系统的建模与仿真研究[J]. 机床与液压, 2002(4).
- [6] 李言俊, 张科. 自适应控制理论及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.
- [7] Wang L X. Stable Adaptive Fuzzy Control of Nonlinear Systems[C]. Proc. 31st IEEE Conf. on Decision and Control. Tucson: 1992.
- [8] 王耀南, 孙炜. 智能控制理论及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.