

# 基于神经网络的反馈线性化非对称系统<sup>①</sup>

李雅梅, 郭琳

(辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院, 葫芦岛 125105)

**摘要:** 针对对称阀控非对称缸电液伺服系统的非线性, 为了提高系统的控制精度, 在分析该系统的固有特性的基础上提出了反馈线性化控制策略, 分析了反馈线性化系统的稳定性, 并采用神经网络自适应补偿控制对不确定参数进行补偿, 最后选择合理参数进行仿真实验。实验表明: 基于神经网络技术的反馈线性化阀控非对称系统不但稳定性好、控制精度高, 而且系统的跟踪性能优越, 适用于实时控制的场合。

**关键词:** 反馈线性化; 对称阀控非对称缸; 不对称性; 神经网络补偿

## Feedback Linearization Asymmetric System Based on Neural Network

LI Ya-Mei, GUO Lin

(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

**Abstract:** Considering the symmetric valve controlled asymmetrical cylinder electro-hydraulic servo system of nonlinear and in order to improve the control precision of the system, a novel feedback linearization control strategy is put forward based on the analysis of the inherent property of the system. The feedback linearization stability of the system is analyzed, and adaptive compensation control for uncertain parameters is introduced by using the neural networks. Finally reasonable parameters are chosen for the simulation. Experimental results show that the neural network technique based feedback linearization valve control system not only has good stability, high control accuracy, also the system tracking performance is superior, which is applicable to real time control situation.

**Key words:** Feedback linearization; Symmetrical valve controlled asymmetrical cylinder; asymmetry; Neural network compensation

阀控非对称缸系统适用于直线往复式的运动场合, 广泛应用于矿山自动化机械中。它是一种典型的非线性系统, 通常由对称电液伺服阀和单出杆的非对称缸构成, 占地空间小、成本低。但是, 由于活塞两腔面积不相等造成流量非线性, 给控制系统带来了困难。近年来, 出现 BP 神经网络等多种新型的电液伺服系统控制方式, 它的学习速度慢且训练效果与学习样本的输入顺序关系较大, 使应用受到了限制。本文运用反馈线性化的模糊数学方法来处理非对称缸系统<sup>[1]</sup>, 将其状态反馈线性化、输入输出反馈线性化, 进而使模型已知的非线性系统全局线性化。最后再用神经网络补偿的方法改善系统控制精度, 优化控制方案。

## 1 非对称缸的反馈线性化跟踪控制

### 1.1 非对称缸系统的固有特点

与对称缸相比, 单出杆非对称缸的工作空间小、结构简单且可靠性高。但是, 对称伺服阀控制非对称缸电液系统在工作特性上有很大差异<sup>[2]</sup>。图 1 为对称阀控非对称液压缸弹簧质量系统示意图。图中  $Q_1$ 、 $Q_2$  为伺服缸两腔的流量;  $A_1$ 、 $A_2$  分别为两腔的有效面积;  $F_1$ 、 $F_2$  为两腔的压力;  $x_l$  为以液压缸中位为零点的活塞位移;  $V_h$  是伺服阀到液压缸之间的等效容积;  $2L_a$  是油缸有效行程;  $m$  为等效质量;  $B$  为运动阻尼;  $K_f$  为弹性系统;  $\beta_e$  为油液的弹性模量;  $F_s$  为系统压力,  $F_r$  为回油压力(在此近似取为 0);  $y$  为活塞

<sup>①</sup> 收稿时间:2011-12-06;收到修改稿时间:2012-01-06

位移, 若  $y^{(1)} > 0$  则活塞向有活塞杆方向运动, 液压缸伸出, 输入到大面积端的流量要补充活塞移出的体积, 所以移动速度慢; 反之, 若  $y^{(1)} < 0$ , 则活塞向反方向运动, 液压缸收回, 由于活塞面积小, 尽管同样的输入流量, 但速度却变快。

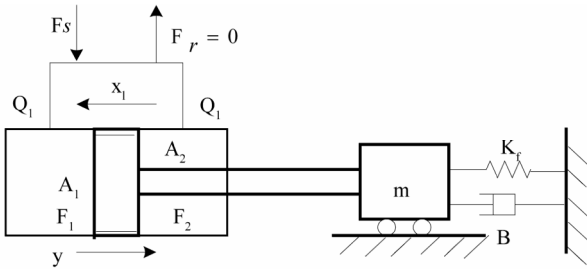


图 1 对称阀控非对称液压缸弹簧质量系统

### 1.2 对称阀的流量特性

分析非对称缸系统固有特性得出其数学描述方程为:

$$\begin{cases} Q_1 = A_1 x_l^{(1)} + \left( \frac{V_h + A_1(x_l + L_a)}{\beta_e} \right) F_1^{(1)} \\ Q_2 = A_2 x_l^{(1)} - \left( \frac{V_h + A_2(L_a - x_l)}{\beta_e} \right) F_2^{(1)} \end{cases} \quad (1)$$

$$F_1 A_1 - F_2 A_2 = m x_l^{(2)} + B x_l^{(1)} + K_f x_p \quad (2)$$

忽略伺服系统动态特性, 设伺服阀线圈的控制电流为  $i$ , 流量系数为  $k_{sv}$ , 脉冲函数  $\delta(i) = \begin{cases} 1 (i \geq 0) \\ 0 (i < 0) \end{cases}$

则伺服阀的流量方程为:

$$\begin{cases} Q_1 = k_{sv} i (\delta(i) \sqrt{F_s - F_1} + \delta(-i) \sqrt{F_1}) \\ Q_2 = k_{sv} i (\delta(i) \sqrt{F_2} + \delta(-i) \sqrt{F_s - F_1}) \end{cases}$$

## 2 反馈线性化系统的数学模型与实现

### 2.1 BP 神经网络

BP 神经网络算法简单易行, 计算量小是最成熟的神经网络算法之一, 如图 2 所示。运用 BP 算法要有一定的经验, 通过试凑来确定网络的层数、每层节点数及初始权值等问题。对于非线性伺服系统的诸多不确定因素是难以用经验来估计预测的, 所以采用 BP 神经网络算法很难精确得出非线性系统模型, 对以后

的分析计算增添不必要的麻烦。

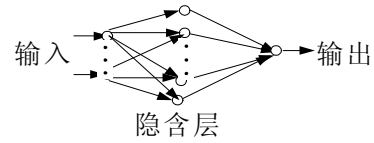


图 2 BP 神经网络

### 2.2 非对称系统的反馈线性化

本文采用文献[3]中关于对称阀非对称缸的数字模型与反馈线性化模糊数学方法结合, 来推导  $V_{01} = V_{02}$  位置上液压缸的固有频率<sup>[4]</sup>。由于液体压缩容积模量为  $E = \Delta p / \Delta V$  则非对称缸大、小面积端液压弹簧刚度分别为:

$$C_1 = \frac{A_1^2 \beta_e}{V_0 + A_1 y}, \quad C_2 = \frac{i^2 A_1^2 \beta_e}{V_0 + A_1 i(y - y_1)}$$

总液压刚度  $C$  化简整理得:

$$C = A_1^2 \beta_e \left[ \frac{i^2}{V_{02} + A_1 i(y - y_1)} + \frac{1}{V_{01} + A_1 y} \right]$$

最小刚度发生在点  $y_1 = y / \sqrt{i} + 1$ , 最小刚度

$$C_{\min} = A_1^2 \beta_e (\sqrt{i} + 1)^2 / A_1 y = A_1^2 \beta_e (\sqrt{i} + 1)^2 / V$$

油缸无阻尼固有频率

$$\omega = \sqrt{C_{\min} / m} = \sqrt{\frac{A_1^2 \beta_e (\sqrt{i} + 1)^2}{A_1 y V m}}$$

进而推出非对称系统的开环传递函数为

$$y = \frac{\left( \frac{K_{q1} X_v}{A_1} - \frac{K_{ce} F_L}{A_1^2} \right) + \left( -\frac{g V F_L}{\beta_e A_1^2} \right) S}{S + \frac{2\zeta}{\omega} S^2 + \frac{1}{\omega^2} S^3}$$

其中:

$$\zeta = \frac{K_{ce}}{2A_1} \sqrt{\frac{\beta_e m}{tV}} + \frac{B_f}{2A_1} \sqrt{\frac{tV}{\beta_e m}}, \quad t = \frac{i^3 \sqrt{i} + 1}{(1+i)(1+i^3)(\sqrt{i} + 1)}$$

再求出阀控系统正反向运动时的流量增益

$$K_{q1} = \begin{cases} K_{q10}(1) = \alpha \beta \sqrt{F_s}, X_y \geq 0 \\ K_{q10}(2) = -\alpha \beta \sqrt{i F_s}, X_y \leq 0 \end{cases}$$

### 3 反馈线性化系统的稳定性

为研究采用反馈线性化模糊数学方法的非对称系

统的稳定性,引入“仿射非线性系统”这一数学概念,也就是将非线性系统转化为仿射非线性系统<sup>[5]</sup>。

首先,设  $x=[x_f, x_f^{(1)}, F_1, F_2]^T=[x_1, x_2, x_3, x_4]^T$ , 则式(1)和(2)可以改写为

$$x^{(1)} = \left[ x_2, \frac{1}{m} [(-K_f x_1 - Bx_2) + A_1 x_3 - A_2 x_4], \eta_1, \eta_2 \right]^T$$

其中

$$\eta_1 = \frac{\beta_e}{V_h + A_1(L_a + x_1)} \{k_{sw} i [\delta(i) \sqrt{F_s - x_3} + \delta(-i) \sqrt{x_3}] - A_1 x_2\}$$

$$\eta_2 = \frac{\beta_e}{V_h + A_2(L_a - x_1)} \{A_2 x_2 - k_{sw} i [\delta(i) \sqrt{x_4} + \delta(-i) \sqrt{F_s - x_4}]\}$$

此位置控制系统的输出方程取为  $z = x_1$ , 令仿射非线性系统的阶数  $n = 4$ , 则系统反馈线性化处理, 有

$$z^{(1)} = x_1^{(1)} = x_2$$

$$z^{(2)} = x_2^{(1)} = \frac{-K_f x_1 - Bx_2 + A_1 x_3 - A_2 x_4}{m}$$

$$z^{(3)} = x_2^{(2)} = \frac{B(K_f x_1 + Bx_2 - A_1 x_3 + A_2 x_4)}{m^2} + \frac{(A_1 \eta_1 - A_2 \eta_2 - K_f x_2)}{m}$$

这里系统关系度  $r = 3 < n = 4$ , 要判断零动态子系统稳定性。采用工程中的处理方法: 假设零动态子系统是稳定的, 并根据该假设设计控制律, 如果控制效果是渐近稳定的, 则认为假定成立系统稳定。考虑系统零动态时有:

$$\begin{cases} z^{(1)} = 0 \\ z^{(2)} = 0 \\ z^{(3)} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_2 = 0 \\ A_1 x_3 - A_2 x_4 = K_f x_1 \\ A_1 x_3^{(1)} - A_2 x_4^{(1)} = 0 \\ u = 0 \end{cases} \quad (3)$$

当  $u = 0$  时,  $x_2 = 0$ ,  $x_1$  渐近稳定; 按式(3)的规则,  $x_3$ 、 $x_4$  渐近稳定; 再由力的平衡方程, 式  $A_1 x_3 - A_2 x_4 = K_f x_1$  渐近稳定因此按上述简化系统来分析该系统是稳定的, 方案是切实可行的。

#### 4 伺服系统的组成

如图 3 所示电液伺服系统的跟踪控制框图, 线性化后阀控伺服系统变为三阶纯积分环节, 为物理实现方便先取输入  $r$  的三阶导数, 低阶导数由积分器来实现<sup>[6]</sup>。根据 ITAE 准则来进行最优化设计取:

$K_1 = K_2^2 \alpha$ ,  $K_0 = K_2^3 \beta$ , 其中,  $\alpha = 0.707$ ,  $\beta = 0.1865$ ,  $K_2$  与上升时间  $t_r$  的关系为  $K_2 = 5.5/t_r$ 。取上升时间  $t_r = 0.13s$ , 则控制器的参数可取为:  $K_2 = 42.3$ ,  $K_1 = 1265.5$ ,  $K_0 = 14115.6$ 。

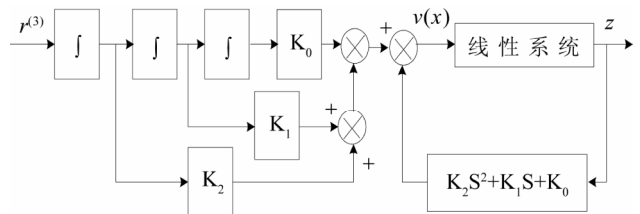


图 3 电液伺服系统的跟踪控制框图

#### 5 神经网络参数的自适应补偿控制

现实中反馈线性化电液伺服系统常存在: 等效运动质量、弹簧刚度和油液弹性模量等不确定参数。其中油液弹性模量  $\beta_e$  的取值一般为 700-1400MPa, 是不可精确估计的, 往往会在跟轨迹跟踪上产生稳态跟踪误差。由于神经网络能辨识未知函数, 较好地处理系统的不确定性。在此利用神经网络来辨识系统的不确定性因素造成的控制量偏差, 并将其作为补偿控制量直接叠加在系统的控制端, 同时对系统实施控制作用, 便能很好的补偿对控制性能的影响<sup>[7]</sup>, 如图 4 所示。

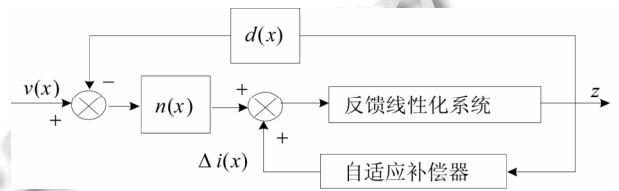


图 4 神经网络参数自适应补偿控制

把  $\eta_1$ 、 $\eta_2$  代入  $z^{(3)}$  表达式, 将  $z^{(3)}$  整理成线性函数的形式:

$$z^{(3)} = d(x) + \frac{1}{n(x)} i$$

其中

$$d(x) = -\frac{1}{m} K_f x_2 + \frac{B}{m^2} (K_f x_1 + Bx_2 - A_1 x_3 + A_2 x_4) -$$

$$\frac{\beta_e}{m} x_2 \left[ \frac{A_1^2}{V_h + A_1(L_a + x_1)} + \frac{A_2^2}{V_h + A_2(L_a - x_1)} \right]$$

$$\frac{1}{n(x)} = \frac{\beta_e k_{sw}}{m} \left[ \frac{A_1}{V_h + A_1(L_a + x_1)} (\delta(i) \sqrt{F_s - x_3} + \delta(-i) \sqrt{x_3}) + \right.$$

$$\frac{A_2}{V_h + A_2(L_a - x_1)}(\delta(i)\sqrt{x_4} + \delta(-i)\sqrt{F_s - x_4})$$

令,  $d(x) = G_1 + G_2 + \beta_e G_3$ ,  $\frac{1}{n(x)} = \beta_e G_4$ , 系统

某时刻油液弹性模量为  $\beta_{ex}$ , 初始估计值为  $\beta_e$ , 那么估计误差为  $\Delta\beta_e = \beta_{ex} - \beta_e$ , 则有

$$\begin{aligned} \Delta d(x) &= d(x, \beta_{ex}) - d(x, \beta_e) \\ &= [G_1 + G_2 + \beta_{ex} G_3] - [G_1 + G_2 + \beta_e G_3] \\ &= \Delta\beta_e G_3 \end{aligned}$$

$$\Delta \frac{1}{n(x)} = \frac{1}{n(x, \beta_{ex})} - \frac{1}{n(x, \beta_e)} = \Delta\beta_e G_4$$

$\Delta\beta_e / \beta_e = p$  对系统的理想控制信号与实际控制信号进行整理化简后分别为 (4) 和 (5):

$$i(x, \beta_{ex}) = \frac{v(x) - d(x, \beta_{ex})}{1/n(x, \beta_{ex})} = \frac{v(x) - (G_1 + G_2) - \beta_e(1+p)G_3}{\beta_e(1+p)G_4}$$

$$i(x, \beta_e) = \frac{v(x) - d(x, \beta_e)}{1/n(x, \beta_e)} = \frac{v(x) - [G_1 + G_2 + \beta_e G_3]}{\beta_e G_4}$$

式 (4) 与式 (5) 相比有 K

$$\begin{aligned} K &= \frac{v(x) - (G_1 + G_2) - \beta_e(1+p)G_3}{\beta_e(1+p)G_4} \bigg/ \frac{v(x) - [G_1 + G_2 + \beta_e G_3]}{\beta_e G_4} \\ &= \frac{v(x) - (G_1 + G_2) - \beta_e(1+p)G_3}{(1+p)[v(x) - (G_1 + G_2) - \beta_e G_3]} \end{aligned}$$

(K 为理想控制信号与实际控制信号的比值)。由于, 估计误差  $\Delta\beta_e = \beta_{ex} - \beta_e$  变化范围相对于  $\beta_e$  的取值范围 700-1400MPa 来说较小, 在此四舍五入后  $p$  趋于 0,  $1+p$  趋于 1, 从而 K 的取值趋于 1, 即通过神经网络自适应补偿器补偿后反馈线性化系统的稳态跟踪误差约等于 0。而对于阶跃输入, 由于系统的开环增益  $K_0 = 14115.6$  相当大, 若忽略油缸内漏, 则  $\Delta i(x) = i(x, \beta_{ex}) - i(x, \beta_e) \approx 0$ 。此外, 为减小不确定参数对系统稳定性的影响, 采用反馈线性化控制技术时, 还应注意估计值的偏差方向: 当运动质量和弹性刚度的估计偏差方向相同 (同时偏大或同时偏小) 且与油液弹性模量  $\beta_e$  的偏差方向相反时, 会在一定程度上减小参数偏差对系统稳定性的影响。

## 6 仿真实验

表 1 所示<sup>[8]</sup>的非对称缸系统的参数对反馈线性化控制方案进行仿真。

表 1 非对称缸系统参数

参数	数值	参数	数值
$A_1(\text{m}^2)$	0.0911	$K_f(\text{N/m})$	170
$A_2(\text{m}^2)$	0.0551	$B(\text{Ns/m})$	70.051
$V_h(\text{m}^3)$	0.0212	$k_{sv}(\text{m}^3/\text{A}\sqrt{\text{Pas}})$	0.021
$L_a(\text{m})$	0.053	$F_s(\text{MPa})$	22
$m(\text{kg})$	45.26	$\beta_e(\text{MPa})$	1000

图 5 是幅值为 30mm 频率为 50rad/s 的反馈线性化控制正弦波的跟踪结果, 稳态误差接近零。采用神经网络自适应补偿控制的波形跟踪见图 6。为保证补偿器不会对系统的稳定性造成威胁, 对补偿控制器输出进行限幅, 取  $\beta_e = 1200\text{MPa}$ ,  $\beta_{ex} \in [700, 1400]\text{MPa}$ , 则参数  $\beta_e$  的变化范围  $p \in [-5/12, 1/6]$ , 可见稳态误差明显减小, 较补偿前控制效果有显著改善。

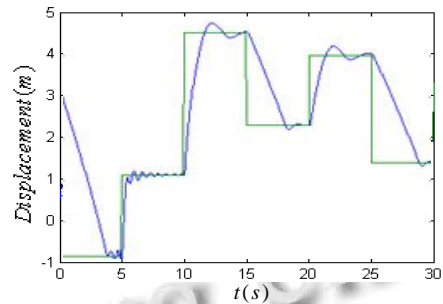


图 5 补偿前控制系统的跟踪结果

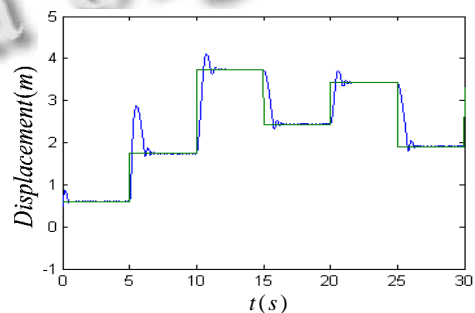


图 6 补偿后控制系统的跟踪结果

## 7 结语

通过对电液阀控系统的分析, 推导出其数学模型, 并进行反馈线性化处理和稳定性分析。又针对弹性模 (下转第 221 页)

算法的执行效率略优于 FDM 算法。

## 5 总结

分布式数据库系统中的关联规则挖掘算法的性能改进主要集中于降低网络通信开销和减少候选频繁项集上。传统的 FDM 算法容易造成频繁项集的丢失,而已有的改进措施又引发了网络通信开销过高的问题。本文在分析 FDM 及其改进算法的基础上,提出了一种基于改进的适用于分布式数据库系统中的关联规则挖掘算法 LTDM, LTDM 算法在全局站点和局部站点上引入了映射标示数组,可以在降低网络通信开销的同时保证频繁项集的完整性。实验结果证明, LTDM 算法在网络通信开销控制和算法运行效率方面具有比 FDM 算法更有优异的性能。

### 参考文献

- 1 Hahsler M, Bettina G, Hornik K, Buchta C. Introduction to arules a computational environment for mining association rules and frequent item sets,2010.
- 2 Novak PK, Lavra N, Webb GI. Supervised descriptive rule discovery:A unifying survey of contrast set, emerging pattern and subgroup mining.Journal of Machine Learning Research, 2009,10(09):43-48.
- 3 杨明,孙志挥,吉根林.快速挖掘全局频繁项目集.计算机研究与发展,2003,40(4):620-626.
- 4 Agrawal R, Imielinski T, Swami A. Mining Association Rules between Sets of Items in Large Databases, ACM SIGMOD Conf, Management of Data,1993.
- 5 王春花,黄厚宽,李红莲.一种快速有效的分布式开采多层关联规则的算法.计算机研究与发展,2001,38(4):438-443.
- 6 Cheung DW, Han J, Ng V, Fu AWC, Fu Y. A Fast Distributed Algorithm for Mining Association Rules.Proc.1996 Int'l Conf. Parallel and Distributed Information Systems (PDIS '96).1996.31-42.
- 7 Nijssen S, Guns T, Raedt LD. Correlated itemset mining in roc space:a constraint programming approach. KDD,2009. 647-656.

(上接第 169 页)

量参数的不确定性,采用了神经网络自适应补偿控制对不确定参数进行补偿,并分别对补偿前后系统的跟踪性能进行了 MATLAB 仿真,通过对比结果表明,经过神经网络补偿后控制误差明显减小,从而证明了采用神经网络的反馈线性化非对称电液伺服系统方案的可行性。

### 参考文献

- 1 何玉彬,李新忠.神经网络控制技术及其应用.北京:科学工业出版社,2000.
- 2 王永超,金勇,王力,等.基于模糊神经网络的电液伺服系统建模.计算机仿真,2011,28(5):184-187.
- 3 刘长年.液压伺服系统优化设计理论.北京:冶金工业出版社,1989.
- 4 刘公信.不对称油缸电液伺服系统分析.煤矿机械,2008,29(8):77-79.
- 5 杜红彬,余昭旭.一类仿射非线性系统的自适应神经网络输出反馈变结构控制.控制理论与应用,2008,25(6):1042-1044.
- 6 倪敬,彭丽辉,项占琴,等.扩轧管电液伺服系统非线性建模与控制.机械工程学报,2009,45(5):250-255.
- 7 Chen ZX, Wang LY. Adaptable product configuration system based on neural network. International journal of production research,2009,47(18):5087-5107.
- 8 朱学彪,陈奎生,傅连东,等.基于 AMFC 的电液伺服系统控制算法研究.液压气动与密封,2008,28(4):57-6.