

文章编号: 1001-0920(2002)03-0372-03

基于 T-S 模型的钻杆对中自适应预测控制

刘忠信¹, 孙青林¹, 陈增强¹, 袁著祉¹, 杨小军¹
唐共民², 巴鲁军², 张云龙²

(1. 南开大学 自动化系, 天津 300071; 2. 胜利油田渤海管具公司, 山东 东营 257200)

摘要: 为非线性系统建立 T-S 模糊模型, 采用基于 T-S 模型的局部递推最小二乘法对模糊规则后件参数进行辨识, 然后用一步预测控制的方法进行控制。在钻杆对中控制中, 定义了矢量化的时间为控制量, 采用上述方法, 在实际应用中取得了良好的效果。

关键词: T-S 模糊模型; 局部递推最小二乘法; 预测控制

中图分类号: TP 273 **文献标识码:** A

T-S model based adaptive predictive control in drill stems windage adjusting

LIU Zhong-xin¹, SUN Qing-lin¹, CHEN Zeng-qiang¹, YUAN Zhu-zhi¹
YANG Xiao-jun¹, TANG Gong-min², BA Lu-jun², ZHANG Yun-long²

(1. Department of Automation, Nankai University, Tianjin 300071, China;

2. Bohai Pipe Tools Company, Shengli Oil Field, Dongying 257200, China)

Abstract: A T-S fuzzy model is established for nonlinear systems. Local recursive least square method is used to identify the sequence parameters of fuzzy rules. One-step-predictive method is adopted in system control. The method is applied to drill stems windage adjusting where directional time is defined as control action. The application results show the effectiveness of the proposed method.

Key words: T-S fuzzy model; local recursive least square; predictive control

1 引言

石油钻杆由管体和接头组成, 由于承受应力和磨损程度不同, 管体寿命远高于接头。因而接头损坏时需更换新接头, 以实现钻杆再生, 延长其寿命。再生的工序之一是对中, 通过对中使管体与接头的中心轴线重合, 之后才能进行摩擦对焊和热处理等工序。

对中如图 1 所示, 夹具夹住管体, 通过一套液压装置驱动夹具的上下移动, 从而带动管体升降以实

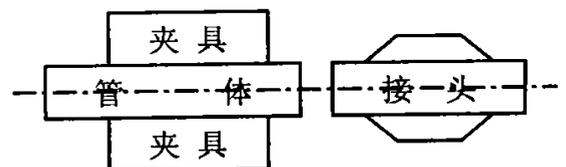


图 1 对中示意图

收稿日期: 2001-01-09; 修回日期: 2001-05-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(60174021); 天津市自然科学基金项目(013800711)

作者简介: 刘忠信(1975—), 男, 河北保定人, 博士生, 从事计算机控制、计算机通讯和智能控制等研究; 袁著祉(1937—),

© 1994-2008, China Academic Electronic Journal Service. All rights reserved. http://www.cnki.net

现管体与接头中心线的重合。液压装置受两个电磁阀的开关控制。

夹具的移动具有很强的非线性特性, 而且由于油温、油压、油粘度等因素对其影响较大, 故钻杆对中是典型的非线性控制系统, 同时又是一个慢时变的系统。要对它建立精确的数学模型十分困难。另外, 由于夹具移动时间短(一次移动需几十到几百 μs), 从而造成测量数据不充分, 而且夹具的移动靠控制电磁阀的开关来实现, 其移动速度不可控。因此传统控制方法难以在钻杆对中获得良好的控制效果, 需要研究新型的对中控制系统。

近年来, 基于 T-S 模糊模型^[1]的非线性控制成为人们研究的热点之一^[2]。另一方面, 预测控制具有鲁棒性强、控制效果好等特点, 适用于工业控制过程。把 T-S 模糊模型与预测控制技术相结合, 为人们控制非线性对象提供了一条新的途径^[3]。本文根据钻杆对控制的特点, 采用基于 T-S 模型的局部递推最小二乘法^[4]来动态辨识对象的模型。该方法把每条模糊规则的后件参数分开进行辨识, 大大减少了计算量, 同时对规则参数递推进行调整, 因而模型能及时反映系统的动态变化, 适合在线应用。根据局部递推最小二乘法得到动态线性化模型后采用一步预测控制, 并定义了矢量化的时间为控制量, 成功地解决了测量数据不充分、夹具移动速度不可控等难点。我们将该方法应用于实际钻杆对控制过程, 运行结果验证了这种方法具有很好的控制效果。

2 基于 T-S 模型的局部递推辨识

多输入单输出(MISO)系统的离散时间模型可由 n 条模糊规则组成的规则集来表示^[1]。T-S 模糊模型的第 i 条模糊规则表示为

R^i : If x_1 is A_1^i , x_2 is A_2^i , ..., x_m is A_m^i

then $y^i = p_0^i + p_{1x_1}^i + p_{2x_2}^i + \dots + p_{mx_m}^i$

对于输入向量 $(x_1^k, x_2^k, \dots, x_m^k)$ ($k = 1, 2, \dots$), 它对第 i 条规则的隶属度为 $\mu_i(k)$ 。令 $\beta_i(k) = \mu_i(k) \setminus \bigcup_{j=1}^n \mu_j(k)$, 则系统的输出为

$$\hat{y}(k) = \sum_{i=1}^n \beta_i(k) y^i(k) \quad (1)$$

T-S 模糊规则的建立有多种方法, 如模糊聚类方法^[5], 局部线性模型树(LOLIMOT)方法^[3]等。

局部递推最小二乘法的思想是: 把输入空间分成若干个模糊子空间, 在每个模糊子空间里建立关于系统输入-输出的简单线性关系模型, 不考虑这

些线性模型的交叉, 在每次采样之后, 根据采样值对每条规则的参数进行修正。这种方法把各个规则的参数分开来进行辨识, 大大减少了计算量, 同时用递推来计算和调整各条规则的后件参数, 适合实际应用的需要。

定义 $0 < \epsilon < 1$, 样本 k 对于第 j 条 T-S 模糊规则, 只有当 $\mu_j(k) < \epsilon$ 时才修正其参数。后件参数修正递推公式如下^[4]

$$\begin{cases} \hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + \frac{P_j(k) \Phi_{j,k+1}}{\Phi_{j,k+1} P_j(k) \Phi_{j,k+1} + \beta_j^{-1}(k+1)} \times \\ [y(k+1) - \Phi_{j,k+1} \hat{\theta}(k)] \\ P_j(k+1) = P_j(k) - \frac{P_j(k) \Phi_{j,k+1} \Phi_{j,k+1} P_j(k)}{\Phi_{j,k+1} P_j(k) \Phi_{j,k+1} + \beta_j^{-1}(k+1)} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\hat{\theta} = [p_0^j, p_1^j, \dots, p_m^j]^T$ 是第 j 条规则的后件参数估计, $\Phi_k = [1, x_1^k, x_2^k, \dots, x_m^k]$ 。 P_j 和 $\hat{\theta}$ 的初值选择类似于最小二乘估计递推算法(RLS)^[6]的初值选择。

3 钻杆对中的一步预测控制

3.1 钻杆对中系统的动态线性化模型

在钻杆对中系统中, 控制目标是使管体中心线与接头中心线的高度偏差为 0, 控制动作是夹具上升和下降两个电磁阀的开关及打开相应电磁阀的时间。为便于分析计算, 我们定义一个矢量化的时间 u 来描述控制动作, 即

$$\begin{cases} u > 0, & \text{控制动作由夹具上升电磁阀执行} \\ u = 0, & \text{没有控制动作} \\ u < 0, & \text{控制动作由夹具下降电磁阀执行} \end{cases}$$

$|u|$ 表示打开电磁阀的时间。例如, $u = -2$ 表示打开夹具下降电磁阀, 经过时间 $|u| = |-2| = 2$ 后关闭夹具下降电磁阀。这样便可用这个矢量化的时间 u 来描述两个电磁阀的控制动作。于是, 钻杆对中系统的 T-S 模糊模型的第 i 条模糊规则可表示为

R^i : If x_1 is A_1^i , then $y^i = P_0^i + P_{1x_1}^i + P_{2x_2}^i$

这里, x_1 是当前偏差, x_2 是矢量化的时间 u , y^i 是偏差, A_j^i ($j = 1; i = 1, 2, \dots, n$) 是模糊集合, P_j^i ($j = 0, 1, 2; i = 1, 2, \dots, n$) 是规则后件参数。

由式(1)得到系统的动态线性化模型为

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^n \beta_i y^i = P_0 + P_{1x_1} + P_{2x_2} \quad (3)$$

其中

$$P_j = \prod_{i=1}^n P_i^j, \quad j = 0, 1, 2 \quad (4)$$

3.2 一步预测控制

得到系统的动态线性化模型后, 选取如下目标函数

$$\min J = (\hat{y} - y_r)^2 \quad (5)$$

其中, \hat{y} 是由式(3)得到的系统输出的预测值, y_r 是输出的设定值。令 $\partial J / \partial x_2 = 0$, 由式(3), (4) 得到

$$x_2 = (y_r - P_0 - P_{1x_1}) \setminus P_2 \quad (6)$$

在对中控制过程中, 设定值 $y_r = 0$, 因而式(6)化为

$$x_2 = (P_0 + P_{1x_1}) \setminus P_2 \quad (7)$$

这样便得到了对中控制的控制量。若 x_2 为正值, 则控制动作为打开夹具上升电磁阀, 经时间 $|x_2|$ 后关闭此电磁阀; 否则控制动作为打开夹具下降电磁阀, 经时间 $|x_2|$ 后关闭夹具下降电磁阀。

3.3 钻杆对中控制的步骤

1) 对系统采用模糊聚类或局部线性模型树等方法建立 n 条 T-S 模糊规则。

2) 选取 ϵ 和满意偏差 y_s 。对于每一条模糊规则, 选择 P_i 和 θ_i 的初值 ($i = 1, 2, \dots, n$), 置 $k = 0$ 。

3) 采样得到当前的偏差, 如果偏差的绝对值小于等于 y_s , 则对中控制完毕; 否则转 4)。

4) 对于每一条模糊规则 i , 计算隶属度 $\mu_i(k)$, 如果 $\mu_i(k) \in \epsilon$, 则根据式(2) 递推计算 $P_i(k+1)$ 和 $\theta_i(k+1)$; 否则 $P_i(k+1) = P_i(k)$, $\theta_i(k+1) = P_i(k)$ 。

5) 根据式(3), (4) 得到系统的动态线性化模型。

6) 根据式(7), 用一步预测控制算法计算控制量来进行控制。

7) 令 $k = k + 1$, 转 3)。

4 运行结果

在胜利油田渤海管具公司钻杆对中控制中, 我们为该系统建立了 11 条模糊规则的 T-S 模型, 隶属度函数采用高斯函数, 取 $\epsilon = 0.1$, 满意偏差 $y_s = 0.2 \text{ mm}$ 。实际运行结果表明, 一般控制夹具移动 2 ~ 4 次即可达到目标, 控制过程为 10 ~ 20 s。表 1 是对中过程中 10 次运行的控制结果。

表 1 实际运行控制结果

次数	偏差		第 1 次移动		偏差		第 2 次移动		偏差		第 3 次移动		偏差		第 4 次移动		偏差
	μm	ms	μm	ms	μm	ms	μm	ms	μm	ms	μm	ms	μm	ms	μm	ms	μm
1	2 345	- 424	1 967	- 373	845	- 157	65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	- 1 902	486	- 1 820	465	- 155	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	2 190	- 419	1 920	- 403	1 275	- 267	382	- 89	95	-	-	-	-	-	-	-	-
4	1 237	- 392	1 060	- 358	360	- 93	250	64	- 100	-	-	-	-	-	-	-	-
5	- 3 150	550	- 3 092	550	- 400	100	- 147	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	1 667	- 410	1 500	- 360	820	- 191	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	2 005	- 546	1 657	- 401	760	- 175	57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	- 490	105	- 342	75	- 30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	- 650	180	- 652	180	- 530	147	- 101	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	- 1 235	359	- 130	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

从表中可以看出, 钻杆管体在受液压装置驱动的夹具作用下的运动具有很强的非线性, 其向上和向下运动均具有不同的非线性特性, 并且在相同初始偏差情况下移动相同的时间, 移动结果存在较大的差异, 说明管体的移动受外界条件的影响较大。而控制器则能通过自学习适应外界条件的变化, 因而取得了很好的控制效果。这充分显示出控制器的实用性和有效性。

5 结 论

用来辨识非线性对象的模型, 大大减少了计算量, 用此方法递推调整规则参数, 使模型能够及时反映系统的动态变化, 适合于在线应用。在钻杆对中控制系统中, 定义了矢量化的时间作为控制量, 并采用一步预测控制, 成功地解决了测量数据不充分、夹具移动速度不可控等难点, 在钻杆对中控制的应用中取得了很好的效果。本文提出的方法可以推广到其它非线性对象的建模与控制中。

振已经消除。

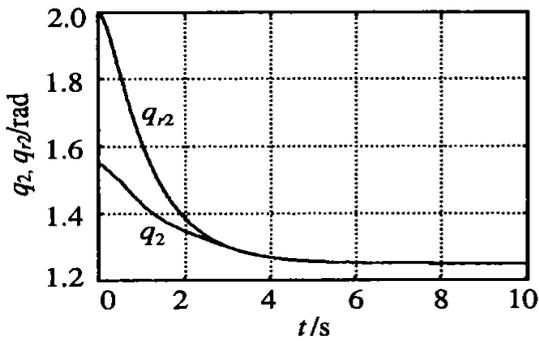


图 2 无抖振控制时关节 2 的跟踪输出信号

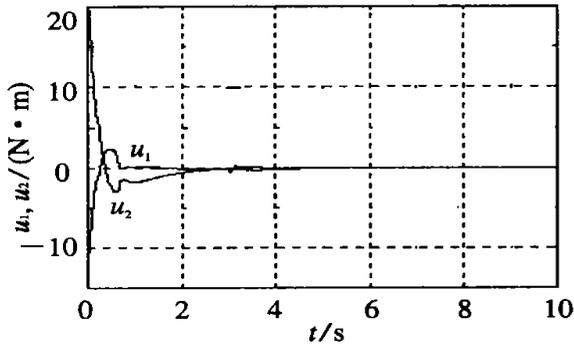


图 3 无抖振控制时关节 1 和 2 的控制输入信号

6 结 论

本文设计了刚性机械手的快速终端滑模鲁棒控制器,采用优化方法分析了系统的稳态跟踪精度和用于消除抖振的饱和函数宽度之间的关系,推导出数学表达式。可根据给定的跟踪精度指标,设计出整个机器人控制系统。通过计算机仿真验证了本文提出的控制方法的有效性。

参考文献(References):

- [1] Yu X, Wu Y, Man Z. On global stabilisation of nonlinear dynamical systems[A]. Variable Structure Systems, Sliding Mode and Nonlinear Control: Lecture Notes in Control and Information Science[C]. NY: Springer-Verlag, 1999. 109-122.
- [2] Man Z, A P Paplinski. Robust tracking control for rigid robotic manipulators[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1994, 39(1): 154-159.
- [3] Spong M W. On the robust control of robot manipulator[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1992, 37(11): 1782-1786.
- [4] Yu T. Terminal sliding mode control for rigid robots [J]. Automatica, 1998, 34(1): 51-56.

(上接第 374 页)

参考文献(References):

- [1] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its application to control[J]. IEEE Trans on SMC, 1986, 15(1): 116-132.
- [2] Liu Haifa, Wei Qingfu. Identification and optimization of T-S fuzzy model[A]. Proc of 14th IFAC World Cong[C]. Beijing, 1999.
- [3] Martin Fischer, Oliver Nelles, Rolf Isermann. Predictive control based on local linear fuzzy models

[J]. Int J System Science, 1998, 29(7): 679-697.

- [4] 刘忠信,陈增强,袁著祉.基于 T-S 模型的局部递推辨识及广义预测控制[J].清华大学学报(J of Tsinghua Univ), 2000, 40(S2): 100-104.
- [5] Miyamoto S. Fuzzy sets in information retrieval and cluster analysis [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1990.
- [6] 王翼,王秀峰.现代控制论基础[M].北京:高等教育出版社, 1995. 402-406.

(上接第 380 页)

参考文献(References):

- [1] Tillman F A, Hwang C L, Kuo W. Optimization of system reliability[M]. New York: Marcel Dekker, 1980.
- [2] Hikita M, Nakagawa Y, Narihisa H. Reliability optimization of system by a surrogate-constraints

algorithm [J]. IEEE Trans on Reliability, 1992, 41(3): 473-480.

- [3] Xu Z K, Kuo W, Lin H H. Optimization limits in improving system reliability [J]. IEEE Trans on Reliability, 1990, 39(1): 51-60.