

基于动态模型库的多模型切换控制

翟军勇, 费树岷

(东南大学 自动化学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 针对含有有界扰动和模型参数跳变的离散时间系统, 提出基于动态模型库的多模型切换控制方法. 在模型参数范围未知情况下, 利用在线学习的多模型自适应控制算法自动建立多模型, 并对模型库中的子模型进行优化. 采用具有积分特性的指标函数作为切换准则, 在每一采样时刻根据其最小值来选择与实际系统最接近的模型, 并将基于此模型的控制器切换为当前控制器. 文中证明了该算法能够保证闭环系统的稳定性和跟踪误差的渐近收敛性. 计算机仿真结果表明该算法的有效性.

关键词: 多模型; 切换控制; 动态模型库

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Multiple-model switching control based on dynamic model bank

ZHAI Jun-yong, FEI Shu-min

(School of Automation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: Multiple-model switching control(MMSC) based on a dynamic model bank is proposed to deal with discrete-time systems with bounded disturbance and parameter variations. An online learning algorithm is applied to build multiple models automatically, and optimize the model bank. At each sampling time, a model, which best matches the current dynamics of the system, is chosen; and the corresponding controller is applied to the system based on the switching index function with integral property. The closed-loop system stability is established; and the tracking error is proved to be asymptotically convergent. Simulation results confirm the validity of the proposed method.

Key words: multiple models; switching control; dynamic model bank

1 引言(Introduction)

对于一类参数时不变或慢时变的系统, 可采用传统自适应控制方法. 当边界条件改变或子系统故障等原因导致系统参数发生跳变时, 系统的瞬态响应会明显变差. 由于实际系统中存在系统参数突变、外部扰动等不确定性的影响, 使得传统自适应控制难以付诸实施. 若试图用一个数学模型来精确地描述被控对象及其工作环境, 往往不能获得满意的控制效果. 早在20世纪70年代就有人提出了多模型控制^[1], 当时的控制器主要是以加权平均的形式构成. 进入90年代以后, 美国耶鲁大学Narendra教授领导的科研小组提出了基于指标切换函数的多模型自适应控制^[2~4]. Cezayirli等针对不确定非线性系统用多模型切换控制来改善系统的瞬态响应^[5]. 作者将神经网络学习能力与多模型切换思想相结合, 提出基于神经网络的多模型自适应切换控制算法^[6]. Fu等将神经网络与多模型切换控制应用到非

线性多变量系统^[7]. 若在模型库中找不到与系统相匹配的子模型, 此时基于最靠近系统动态特性模型而设计的控制器将被用来控制系统, 导致系统瞬态响应较差. 除非模型库中子模型参数分布十分密集, 否则仍会出现模型不匹配, 但这样会造成系统很大的计算负担. 为了减少模型库中子模型的数量, 文[8]采用Localization技术优化系统的模型库. 文[9]采用Moving-Bank方法动态调节模型库的中心以覆盖系统的最优估计参数, 但上述方法没有从根本上减少子模型的数量, 这导致计算量仍然很大.

本文针对含有有界扰动和模型参数跳变的离散时间系统, 提出基于动态模型库的多模型切换控制方法. 将在线学习与多模型切换的思想相结合, 快速准确地对复杂系统进行多模型建模和在线调整, 并对模型库中的子模型进行优化, 有效地降低了模型库中子模型的数量, 大大减少了计算量. 计算机仿真结果表明该算法的有效性.

收稿日期: 2008-07-21; 收修改稿日期: 2009-04-09.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(60835001); 国家自然科学基金资助项目(60904020); 教育部博士点基金资助项目(20070286039, 20070286040).

2 问题描述(Problem statement)

考虑如下线性离散时变系统:

$$A(t, z^{-1})y(t) = z^{-d}B(t, z^{-1})u(t) + \eta(t). \quad (1)$$

式中: $A(t, z^{-1}), B(t, z^{-1})$ 是时间 t 和后移算子 z^{-1} 的多项式;

$$A(t, z^{-1}) = 1 + a_1(t)z^{-1} + \cdots + a_n(t)z^{-n},$$

$$B(t, z^{-1}) = b_0(t) + b_1(t)z^{-1} + \cdots + b_m(t)z^{-m},$$

且 $b_0(t) \neq 0, \forall t \geq 0$; $u(t), y(t)$ 为系统的输入和输出; d 为时滞常数; $\eta(t)$ 外部扰动. 系统满足如下条件:

- 1) 时滞 d 已知;
- 2) $A(t, z^{-1}), B(t, z^{-1})$ 次数的上界已知;
- 3) 多项式 $B(t, z^{-1})$ 的根位于复平面单位圆内;
- 4) 外部扰动 $\eta(t)$ 有界, 即 $|\eta(t)| \leq \Delta$.

定义未知参数向量

$$\theta(t) = [-a_1(t) \cdots -a_n(t) \ b_0(t) \cdots b_m(t)]^T. \quad (2)$$

相应的回归向量

$$\phi(t-1) = [y(t-1) \cdots y(t-n) \ u(t-d) \cdots u(t-m-d)]^T. \quad (3)$$

则系统(1)可简写为

$$y(t) = \phi^T(t-1)\theta(t) + \eta(t). \quad (4)$$

3 基于动态模型库的多模型切换控制 (MMSC based on dynamic model bank)

基于动态模型库的多模型切换控制(multiple model switching control, MMSC)结构设计方案如图1所示.

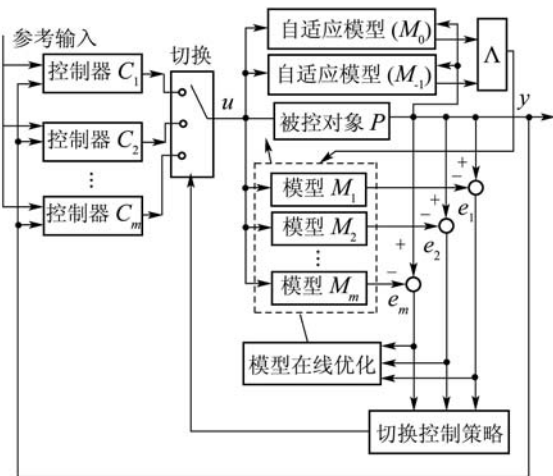


图1 基于动态模型库的多模型切换控制系统

Fig. 1 MMSC system based on dynamic model bank

其中 M_i 和 C_i 是动态模型库中的子模型及相应的

控制器. 多个固定模型可以用来改善系统的瞬态响应, 但是当常规自适应模型(记为 M_{-1}) 的初值参数偏离实际对象较大时, 参数的收敛速度很慢. 为了解决上述问题, 引入第2个自适应模型(记为 M_0), 即重新赋初值的自适应模型. 当切换到固定模型时, 其参数重新用该固定模型的参数赋值, 该方法可获得较快的收敛速度^[2].

3.1 自适应模型参数估计(Parameter estimation of adaptive models)

采用带死区投影算法^[10]:

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \frac{\alpha(t-1)\phi(t-1)e(t)}{c + \phi^T(t-1)\phi(t-1)}, \quad (5)$$

$$e(t) = y(t) - \phi^T(t-1)\hat{\theta}(t-1), \quad (6)$$

$$\alpha(t-1) = \begin{cases} 1, & |e(t)| > 2\Delta, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $c > 0$ 是防止分母为零而增加的一个常数, $\hat{\theta}(t)$ 为参数 $\theta(t)$ 在 t 时刻的估计值.

3.2 多模型建立与优化(Building and optimization of multiple models)

通过先验知识和一些试验结果得到被控对象参数的变化范围, 可离线设计多个固定模型. 若事先对参数变化范围未知的情况下, 采用在线学习的多模型自适应控制方法建立多模型^[11], 并对模型库进行优化.

动态模型 M_i :

$$\hat{y}_i(t) = \phi^T(t-1)\theta_i, \quad i \in \{1, 2, \cdots, m\}.$$

在不同的操作条件下, 它包含了系统的动态特性.

利用累计预测误差最小的动态模型来重新初始化自适应模型 M_0 :

$$\hat{y}_0(t) = \phi^T(t-1)\hat{\theta}_0(t-1).$$

$\hat{\theta}_0(t-1)$ 采用投影算法(5)~(7)进行参数估计.

常规自适应模型 M_{-1} :

$$\hat{y}_{-1}(t) = \phi^T(t-1)\hat{\theta}_{-1}(t-1).$$

$\hat{\theta}_{-1}(t-1)$ 采用同样的算法进行参数估计, 但其参数不被重新初始化.

模型 i 在有限时域长度 h 内的累计预测误差, 即指标切换函数:

$$J_i(t) = \alpha e_i^2(t) + \beta \sum_{j=t-h+1}^{t-1} \exp(-\tau(t-j)) e_i^2(j). \quad (8)$$

式中: $\alpha \geq 0, \beta > 0, i \in \{-1, 0, \cdots, m\}$, α 和 β 决定当前误差和历史误差在性能指标中的权重, 遗忘因子 $\tau > 0, e_i(t)$ 为模型 i 在 t 时刻的误差.

为防止模型库中子模型的数量无限增加,需对模型库中的子模型进行优化. 设动态模型库中子模型最大规模为 $\max(\max \in \mathbb{Z}^+)$, 在采样 k 时刻系统已建立 m 个模型: 若 $m < \max$, 则利用“获胜”自适应模型参数建立一个新的子模型 M_{m+1} , 即

$$m := m + 1, \theta_{m+1} := \hat{\theta}_j(k), \\ j = \arg \min \{J_{-1}(k), J_0(k)\}.$$

否则, 找出与当前 k 采样时刻“获胜”自适应模型 M_j 最远的模型 M_f , 其参数被重新赋值, 即

$$\theta_f := \hat{\theta}_j(k), f = \arg \max \|\hat{\theta}_j(k) - \theta_i\|, \\ i \in \{1, 2, \dots, m\}.$$

从而保证模型库中子模型的数量最多为 $\max$.

3.3 多模型切换策略(MM switching strategy)

基于多模型切换控制是通过在多个局部控制器之间切换来实现的. 在采样 k 时刻, 根据性能指标函数 $J_i(k)$, $i \in \{-1, 0, \dots, m\}$ 来进行, 并根据其最小值切换到相应的控制器. 为避免任意快速切换带来系统的不稳定, 引入Middleton等人^[12]提出的滞后切换算法. 设在采样 k 时刻系统采用第 j 个控制器, 而 $J_l(k) = \min\{J_i(k)\}$, $i \in \{-1, 0, \dots, m\}$, $l \neq j$, 即 $J_j(k)$ 不是最小值. 当 $J_j(k) \leq J_l(k) + \rho$ ($\rho > 0$ 为滞后因子)时, 则仍采用第 j 个控制器; 当 $J_j(k) > J_l(k) + \rho$ 时, 则切换到第 l 个控制器.

4 稳定性分析(Stability analysis)

引理 1 对于模型(4), 参数估计算法(5)~(7)有如下性质^[10]:

1)

$$\|\hat{\theta}(t) - \theta_0\| \leq \|\hat{\theta}(t-1) - \theta_0\| \leq \|\hat{\theta}(0) - \theta_0\|, \\ \forall t \geq 1;$$

2)

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\alpha(t-1)[e^2(t) - 4\Delta^2]}{c + \phi^T(t-1)\phi(t-1)} = 0, 0 < c < \infty.$$

引理 2 若系统(1)满足最小相位假设条件, 那么必存在常数 c_1, c_2 , 使得 $|u(t-d)| < c_1 + c_2 \max_{0 \leq \tau \leq t} |y(\tau)|$. 其中 $0 \leq c_1 < \infty, 0 < c_2 < \infty$.

引理 3 若

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{S^2(t)}{b_1(t) + b_2(t)\sigma^T(t)\sigma(t)} = 0,$$

其中: $\{b_1(t)\}, \{b_2(t)\}, \{S(t)\}$ 是实纯量序列, $\{\sigma(t)\}$ 是实向量序列, 满足下面的条件:

1) 一致有界性: 存在一个正实数 K , 使得 $0 < b_1(t) < K < \infty, 0 \leq b_2(t) < K < \infty, \forall t > 1$;

2) 线性有界条件: $\|\sigma(t)\| \leq c_1 + c_2 \max_{0 \leq \tau \leq t} |S(\tau)|$,

其中: $0 \leq c_1 < \infty, 0 < c_2 < \infty$.

则 $\lim_{t \rightarrow \infty} S(t) = 0$ 且 $\{\|\sigma(t)\|\}$ 有界.

定理 1 在假设条件1)~4)下, 本文提出的基于动态模型库的多模型切换控制算法, 能够保证闭环系统的稳定性及输出跟踪误差渐近收敛, 即

1) $\{u(t)\}, \{y(t)\}$ 有界;

2) $\limsup_{t \rightarrow \infty} |e_c(t)| \leq 2\Delta$.

证 由假设3), 存在 $m_1 \geq 0, m_2 > 0$, 满足

$$|u(k-d)| < m_1 + m_2 \max_{1 \leq \tau \leq t} |y(\tau)|.$$

其中 $1 \leq k \leq t$.

由式(3), 得

$$|\phi(t-1)| \leq p\{m_1 + \max(1, m_2) \max_{1 \leq \tau \leq t} |y(\tau)|\}.$$

其中 $p = m + n$.

由控制误差 $e_c(\tau) = y(\tau) - y_r(\tau)$, 得

$$|y(\tau)| \leq |e_c(\tau)| + |y_r(\tau)| \leq |e_c(\tau)| + m_3.$$

其中 $|y_r(\tau)| \leq m_3$ ($0 \leq m_3 < \infty$)为有界参数输入. 从而

$$|\phi(t-1)| \leq M_1 + M_2 \max_{1 \leq \tau \leq t} |e_c(\tau)|.$$

其中:

$$0 \leq M_1 = p\{m_1 + m_3 \cdot \max(1, m_2)\} < \infty,$$

$$0 \leq M_2 = p \cdot \max(1, m_2) < \infty.$$

由 $e_c(t) = e(t) + \phi^T(t-1)(\hat{\theta}(t-1) - \hat{\theta}(t-d))$ 及引理1, 得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\alpha(t-1)|e_c^2(t) - 4\Delta^2|}{c + \phi^T(t-1)\phi(t-1)} = 0.$$

由引理3, 得 $\{u(t)\}, \{y(t)\}$ 有界,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |e_c(t) - 2\Delta| = 0, \limsup_{t \rightarrow \infty} |e_c(t)| \leq 2\Delta.$$

证毕.

对于含有跳变参数线性时变系统, 在相邻的两次参数跳变之间可以被看作线性时不变系统. 当两次参数跳变的时间间隔足够长时, 基于动态模型库的多模型切换控制改善了被控系统的控制品质, 大大减少了模型库中子模型数量.

5 仿真研究(Simulation study)

考虑如下由差分方程描述的被控对象:

$$(1 + a_1(t)z^{-1} + a_2(t)z^{-2})y(t) = \\ z^{-1}b_0(t)u(t) + 0.1 \cos t. \quad (9)$$

其中参数 (a_1, a_2, b_0) 未知. 参考输入为单位幅值, 周期为50的方波信号. 含参数跳变的时变系统如下:

$$(a_1, a_2, b_0) = \begin{cases} (-0.45, 0, 0.5), & 0 \leq t \leq 49, \\ (-1, 0.25, 0.35), & 50 \leq t \leq 99, \\ (0.2, -0.1, -0.3), & 100 \leq t \leq 149, \\ (-0.45, 0, 0.18), & t \geq 150. \end{cases}$$

计算机仿真参数如下: 指标切换函数参数 $\alpha=5$, $\beta=1$, $\tau=0.75$, $h=10$; 投影算法参数 $c=0.1$. 在线学习自适应模型初值 $\hat{\theta}_{-1}(0) = \hat{\theta}_0(0) = [1, 0, 1]^T$. 模型库最大数目 $\max = 20$. 建立子模型的阈值 $\delta = 0.01$. 滞后切换中滞后因子 $\rho = 0.02$.

基于在线学习的多模型自适应控制算法系统输入输出曲线如图2所示, 系统自动建立了37个固定模型, 控制器切换曲线如图3所示. 而采用本文基于动态模型库的多模型切换控制算法, 系统控制输入输出曲线如图4所示, 动态模型库中最大规模为20. 控制器切换曲线如图5所示.

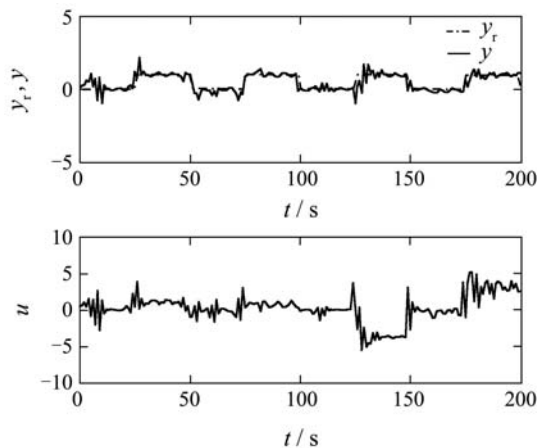


图2 基于在线学习的多模型控制算法输入输出曲线

Fig. 2 The input-output curve of MM based on learning

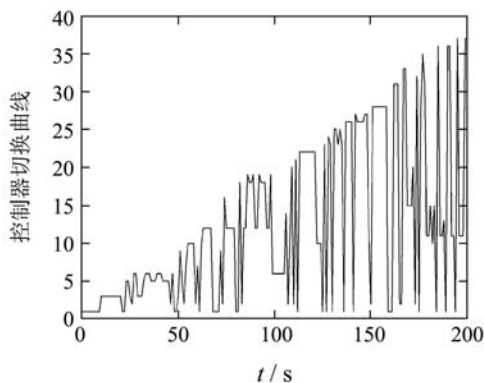


图3 基于在线学习的多模型控制算法控制器切换曲线

Fig. 3 The controllers switching curve of MM based on online learning

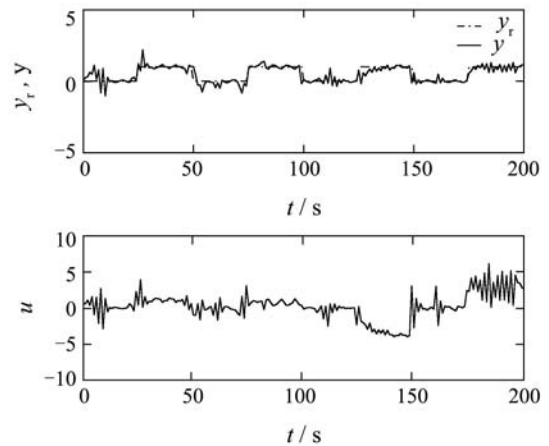


图4 本文控制算法输入输出曲线

Fig. 4 The input-output curve of the proposed method

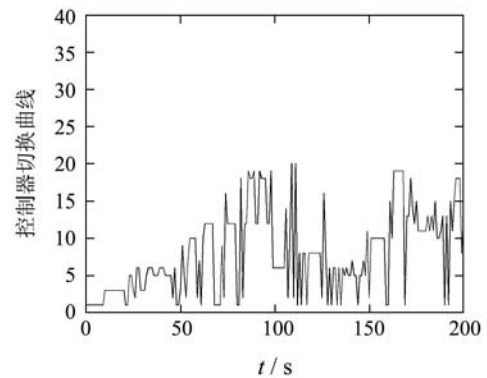


图5 本文控制算法控制器切换曲线

Fig. 5 The controllers switching curve of the proposed method

从仿真可以看出, 两种算法系统的控制输入输出整体效果相当, 但基于动态模型库的多模型切换控制只用了20个动态子模型, 其计算量在控制性能没有降低的情况下大大减少, 从而避免模型库中子模型数量过度增长而导致计算量剧增和性能的下降.

6 结语(Conclusion)

针对传统自适应控制算法, 实际对象在不同工况下的模型参数突变和含有外部扰动情形下系统瞬态响应特性较差, 本文提出一种基于动态模型库的多模型切换控制算法. 引入动态模型库而无需被控对象的先验知识建立多模型. 在每一采样时刻根据指标切换函数选择与实际对象最接近的模型, 并将基于此模型的控制切换为当前控制器. 同时对动态模型库进行优化, 有效地降低了模型库中子模型的数量, 大大减少了计算量. 计算机仿真结果表明该算法的有效性.

参考文献(References):

- [1] ATHANS M, CASTANON D, DUNN K, et al. The stochastic control of the F-8C aircraft using a multiple model adaptive control(MMAC)

- method—part I: equilibrium flight[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1977, 22(5): 768 – 780.
- [2] NARENDRA K S, BALAKRISHNAN J. Improving transient response of adaptive control systems using multiple models and switching[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1994, 39(9): 1861 – 1866.
- [3] NARENDRA K S, BALAKRISHNAN J. Adaptive control using multiple models[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1997, 42(2): 171 – 187.
- [4] NARENDRA K S, CHENG X. Adaptive control of discrete-time systems using multiple models[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(9): 1669 – 1686.
- [5] CEZAYIRLI A, CILIZ M K. Transient performance enhancement of direct adaptive control of nonlinear systems using multiple models and switching[J]. *IET Control Theory and Applications*, 2007, 1(6): 1711 – 1725.
- [6] 翟军勇, 费树岷, 达飞鹏. 基于神经网络多模型自适应切换控制研究[J]. 中国电机工程报, 2005, 25(24): 61 – 66.
(ZHAI Junyong, FEI Shumin, DA Feipeng. Multi-model adaptive switching control based on neural network[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2005, 25(24): 61 – 66.)
- [7] FU Y, CHAI T Y. Nonlinear multivariable adaptive control using multiple models and neural networks[J]. *Automatica*, 2007, 43(6): 1101 – 1110.
- [8] ZHIVOGLYADOV P, MIDDLETON R, FU M. Localization based switching adaptive control for time-varying discrete-time systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(4): 752 – 755.
- [9] GUSTAFSON J, MAYBECK P. Flexible space structure control via moving-bank multiple model algorithms[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(3): 750 – 757.
- [10] GOODWIN G C, SIN K S. *Adaptive Filtering, Prediction and Control*[M]. Engle-wood Cliffs : Prentice Hall, 1984.
- [11] 翟军勇, 费树岷. 基于在线学习的多模型自适应控制[J]. 中国电机工程报, 2005, 25(9): 80 – 83.
(ZHAI Junyong, FEI Shumin. Adaptive control using multiple models based on online learning[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2005, 25(9): 80 – 83.)
- [12] MIDDLETON R H, GOODWIN G C, HILL D J, et al. Design issues in adaptive control[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1988, 33(1): 50 – 58.

作者简介:

翟军勇 (1977—), 男, 博士, 副教授, 目前从事多模型智能控制研究, E-mail: jyzhai@163.com;

费树岷 (1961—), 男, 教授, 博士生导师, 目前从事非线性控制系统设计与综合、鲁棒控制、自适应控制等研究, E-mail: smfei@seu.edu.cn.