

多模型自适应控制*

李晓理 王 伟 孙 维
(东北大学自动化研究中心 沈阳 110006)

摘 要 给出多模型自适应控制产生的背景,对模型集的建立、多模型控制器的形成以及算法的收敛性和稳定性进行了分析,介绍了多模型自适应控制在工业生产过程中的应用和最新研究成果,同时提出了存在的问题及进一步发展方向。

关键词 多模型,自适应控制,稳定性

分类号 TP 13

Multi-model Adaptive Control

Li Xiaoli, Wang Wei, Sun Wei
(Northeastern University)

Abstract The background of multi-model adaptive control (MMAC) is reviewed. The construction of model set, the structure of MMAC controller, and the convergence and the stability of algorithms are analysed. The applications of MMAC to industrial product process and the new results are introduced. The existing problems and the future tendency of MMAC are pointed out.

Key words multi-model, adaptive control, stability

1 引 言

传统的自适应控制器设计往往基于一个参数固定或慢时变的系统模型,并假设操作环境是时不变或慢时变的。随着控制理论的发展和实际过程控制的需要,要求人们设计出适合于复杂系统(如系统故障、子系统动态变化、传感器或执行器故障、外部扰动、系统参数变化较大等)的控制器。对于这种复杂的被控系统,使用常规自适应控制器进行控制往往效果不好。因为系统从一种操作环境突变到另一种操作环境,系统的参数变化很大,常规自适应控制器中的辨识器难以跟随参数的实际变化,造成模型不准确,从而导致基于此模型设计的控制器性能不佳。

为此,人们提出利用多模型来逼近系统的动态性能,再基于多模型设计出多模型自适应控制器,从而对复杂系统进行有效的控制。多模型自适应控制(MMAC)的基本思想是用

$$\Omega = \{M_i | i = 1, 2, \dots, n\} \quad (1)$$

表示一个以模型 M_i 为元素的模型集。该模型集可理解为一个广义的模型集,其中 M_i 既可表示被控对象模型,也可表示不同的状态反馈矩阵,以及误差落在不同局部区域或复杂工业过程的不同操作工序。同时定义

$$C = \{U_i | i = 1, 2, \dots, n\} \quad (2)$$

为基于 Ω 设计的控制器集合,其中 U_i 为基于 M_i 设计的控制器。被控系统的控制器可表示为

$$U_{sys} = f(U_1, U_2, \dots, U_n, \theta) \quad (3)$$

其中, f 为线性或非线性函数, θ 为参数向量。

从早期 Lamiotis^[1,2] 的基于后验概率加权的多模型控制,到近几年 Goodwin^[3-5]、Narendra^[6-9] 等人的基于模型切换的多模型自适应控制器,多模型自适应控制经历了近 30 年的发展历史,在理论和实践方面都取得了许多成果。近年来,各主要国际控制杂志(如 IEEE-AC, Automatica 等)以及重要国际学术会议(如 ACC, CDC 等)发表了很多这方面的文章。美国著名学者 Narendra 在 1994 年 CDC 大会上发表的“参数自适应控制——结束还是开始”一文中,着重指出 MMAC 是自适应控制的最新发展方向之一。

* 国家杰出青年科学基金项目(69825106)

2 模型集的建立

MMAC 是以多个模型来逼近系统的不确定性,在多个模型的基础上建立控制器。因此,所建的模型集以及元素模型的多少将直接影响控制的精度和性能。

早期的基于概率加权的多模型控制大多基于这样一个前提条件:已知被控系统的模型参数仅在元素不多的一个参数集合中变化,这样便可用有限个模型来描述系统。这主要适用于实际过程中被控系统参数变化和扰动变化分布在离散值上的情况。在实际问题中,由于被控系统的外部环境和系统模型参数变化很大,用少量模型已不足以描述,因此便出现这样的问题:不用大量的模型,系统就无法精确描述;若模型过多,则在每一步控制过程中,模型集中很大一部分模型与此刻的系统“真实”模型又相差甚远。这样,不但造成控制器在计算上的浪费,而且“多余”模型的“过度竞争”也会降低控制器的性能。

基于上述原因,为了获得性能更好的 MMAC 算法,人们开始寻求更有效的具有动态调整能力的模型集来处理这一问题。

1) Moving-Bank 方法^[10,11]。其主要思想是每一时刻只基于模型集中一子集构造控制器,并随时动态调整此子集,使其能覆盖被控对象“真实”模型参数。而要移动和调整这一子集,就要有一个好的决策方案。目前较常用的方法有:残差调节,参数位置调节,参数位置、“速度”调节和概率调节。

2) 从系统的稳定性出发设计模型集。基于切换原则,文献[9]给出了多固定模型集,基于此模型集设计的控制器可保证闭环系统稳定。[12]将模型参数允许集分割成多个子集,从而构成多模型集合。

3) 动态优化模型集。文献[7,9]利用多自适应模型或自适应模型和多固定模型共同组成模型集,基于固定模型设计的控制器保证响应速度,而基于自适应模型设计的控制器则保证精度。[13,14]对所选择的元素模型添加一辅助输入量,以保证元素模型的输出尽量逼近系统的输出。[15]将系统的模型参数空间逐步划分,直到找出包含系统真实模型的最小区域,在此区域内建立模型集。[16]给出一种对模型集元素增减的策略,使设计的状态估计器的状态估计值与原状态估计器的状态估计值具有相同的精度。

4) 利用神经网络来减少元素模型个数^[17]。仿真表明,基于神经网络所设计的多模型控制器,对参数

变化的被控对象的控制效果优于基于原模型集设计的控制器。

3 多模型自适应控制器的构成

3.1 多模型参数辨识

自适应控制与参数辨识密切相关,多模型参数辨识已取得许多成果。文献[18]利用多个递推最小二乘辨识器的辨识参数加权和求取被控对象模型参数。[4]基于不同模型阶次建立多阶次模型辨识器,可辨识不同阶次模型参数。[9]则利用多固定模型参数,根据性能指标动态调整自适应辨识器初值,以加速辨识参数的收敛速度。多模型辨识对参数变动大的被控对象以及一些非线性系统具有良好的效果。

3.2 以加权方式构成 MMAC

基于概率加权的方法最早见于文献[1,2],其主要思想是根据分割定理求解元素模型的后验概率,通过概率加权求解被控对象控制器。各元素模型为

$$\theta: \begin{cases} x(k+1) = \Phi x(k) + G u(k) + w(k) \\ z(k) = H_i x(k) + v(k), \quad i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (4)$$

其中, $x(k) \in R^n$, $z(k) \in R^n$ 分别是状态向量和观测向量; $w(k)$, $v(k)$ 为相互独立的噪声干扰。基于每个元素模型设计最优控制器 $u_i(i = \{1, 2, \dots, n\})$, 则被控系统控制器为

$$u_{\text{sys}} = \sum_{i=1}^n \Pr(\theta_i | z^k) u_i \quad (5)$$

其中, $\Pr(\theta_i | z^k)$ 为每个元素模型的后验概率, z^k 是到当前时刻为止所获得的观测数据。这种加权组合的方法在其它领域(如最优预测^[19]、状态估计^[20,21])也得到了应用。加权组合控制器易于实现,尤其适合于工业应用,但其理论还不够完善,如闭环系统的稳定性很难证明,目前也只是对其收敛性进行了研究和分析。因此这方面的理论研究还需进一步加强。

3.3 基于切换策略构成 MMAC

切换策略是一种基于稳定条件的控制器切换,近年来关于这种 MMAC 的研究成果不断涌现^[3-5,7-9,12,22-24]。在频繁的控制切换过程中,保持系统稳定是非常重要的。

文献[12]根据预先设定的模型集设计多个状态反馈矩阵 $\{k_1, k_2, \dots, k_n\}$, 控制器为 $u(k) = k_{h(i)} y(t)$ (当 $t \in [t_{i-1}, t_i]$ 时, $h(t) = i$, 此时 $k_{h(i)} = k_i$), 则问题转化为 i 的选择问题, 而 i 的选择要从系

统稳定出发来设计。这一类型切换控制器的切换顺序事先已经给出,而何时切换到另一控制器则由系统输出决定,可称为“直接切换控制”。[22, 24]即属于这种类型的切换控制。

[7~9]针对线性连续时间被控对象建立多个模型,并构成多个模型参考控制器,每个采样时刻基于性能指标函数寻找最接近被控对象的模型,并将基于此模型的控制器切换为当前控制器。这种多模型控制器在进行有限次或无限次切换时均可保证被控系统稳定,其性能指标函数为

$$J_i(t) = \alpha e_j^2(t) + \beta \int_0^t e^{-\lambda(t-\tau)} e_j^2(\tau) d\tau \quad (6)$$

其中, α 和 β 用来调整性能指标函数对当前和过去误差的测量, λ 为遗忘因子, e_j 为模型与系统输出间的误差。使 J_i 为最小的模型所对应的控制器为当前有效控制器。这类切换控制中,多模型用来决定何时切换到哪个控制器,其主要目的是在自适应控制中用最少的先验知识来改善自适应系统的稳定性。这种切换控制可称为“间接切换控制”。[3~5, 23]均属于此类切换控制。

切换控制已取得许多稳定性的结果,但多局限于线性、连续时间系统,有些结果很难推广到非线性、离散时间系统。另外,虽然具有稳定性的切换控制最终是渐近稳定的,但其过渡过程可能超调很大,这些都有待于进一步研究。

3.4 非线性系统的多模型自适应控制

多模型自适应控制应用于非线性系统还只是一种尝试。文献[8]用4个神经网络模型,对一个2输入2输出的3阶系统,在初始状态、存在外部干扰、存在系统参数变化、外部干扰和系统参数变化4种情况下,学习其动态特性。让系统在 E_1, E_2, E_3, E_4 这4种环境下连续过渡,每一时刻将系统输出与4个神经网络模型输出进行比较,根据输出误差判断系统当前所处的状态(若此时有 i 个神经网络控制器对应的输出误差最小,则系统处于第 i 种状态),同时将对应此状态的神经网络模型控制器选为当前控制器。

在实际过程中,若系统环境变化个数超过所对应的神经网络模型的个数,则需增加神经网络模型,而增加的神经网络模型要以原模型中最接近系统模型的神经网络的权值作为训练初值。这样不断完善模型集合,以适应非线性系统的变化。

[25] 对一个非线性系统在不同平衡点上进行局部线性化,构成多个线性模型;然后用不同线性模

型的加权组合逼近非线性系统,进而基于线性模型构成多模型控制器。目前,对非线性系统多模型控制器的建立和参数调整还没有一般性的准则,但这一领域的研究已经开始,这方面的专著也已问世^[26]。

4 MMAC 算法的收敛性和稳定性

收敛性分析多见于基于加权组合的 MMAC 算法,即权值的收敛,保证靠近系统“真实”模型的元素模型的加权值收敛于1,而远离“真实”模型的元素模型的加权值趋近于0。

文献[27]设系统的模型参数集为

$$\Omega = \{\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_p\} \quad (7)$$

其中 θ_0 为系统真实参数。设 $p(j|Z^n)$ 为在获得 z^n 的条件下选中第 j 个模型的条件概率, $Z^n = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$, z_n 是一系列的随机观测值。则系统模型的估计参数为

$$\hat{\theta} = \sum_{j=0}^p \theta_p(j|Z^n) \quad (8)$$

[27] 证明了 $\hat{\theta}$ 最终将收敛于 θ_0 , 即

$$\begin{cases} \lim_n p(j|Z^n) = 0, & j = 1, 2, \dots, p \\ \lim_n p(0|Z^n) = 1 \end{cases} \quad (9)$$

[28] 对于当系统的真实模型参数不存在于模型集时,采用后验概率加权的方法进行多模型参数估计,并证明此时参数将收敛于模型集中某一模型参数,且该模型参数最接近于系统模型参数。[29]给出多模型状态估计的收敛性证明,采用的数学工具多为概率计算,如贝耶斯公式、条件概率计算等。

稳定性分析主要见于采用切换方式的多模型自适应控制^[3~5, 7, 9, 12, 22~24],并且着重证明在频繁的控制器切换过程中,输入输出信号的有界性,以及输出是否稳定跟踪设定值。稳定性结果主要针对线性、连续系统,多采用 Lyapunov 稳定性理论进行证明。

5 实际应用成果

除了理论和方法上所取得的成果外,MMAC 也有一些成功的实际应用。[30]针对飞行器控制系统参数变化、不同的时延以及信号带宽,设计出多模型控制器,获得较好的控制性能。[31]利用多模型状态估计,对飞行器执行器、传感器故障进行检测分析。[8]对机器人的跟踪问题采用多模型自适应控制代替常规自适应控制,以减小瞬态误差。[32, 33]将多模型自适应控制应用于生物医学领域,针对不同病人建立多模型,采用加权组合多模型控制器,通过注

射药物对病人的血压进行控制, 实验结果证明控制效果好于以往的 PID 控制。[34] 将非线性多模型用于 pH 值的中和过程, 该过程难以用多项式模型描述, 但用非线性多模型却能很好地逼近。[35] 用多个模型代表发酵过程的不同操作工序, 基于模糊判断规则判断当前处于哪一道工序, 进而采取不同的控制方案。[25] 利用多个线性模型逼近非线性过程, 对复杂的非线性异分子聚合反应器的反应过程进行控制。其它多模型控制在工业上的应用, 限于篇幅, 这里不做过多的介绍。

6 结 语

从理论到实践都已证明多模型自适应控制的有效性, 但仍有许多理论和方法上的问题需要进一步研究。

1) 多模型自适应控制器的理论研究。如基于加权组合的多模型控制器的稳定性, 基于切换控制的非线性系统、离散时间系统 MMAC 的稳定性等。

2) 优化模型集的研究。多模型控制器的缺点是模型多、计算量大。在保证控制精度的前提下优化模型集, 减少元素模型个数, 提高计算速度, 是多模型控制应用于工业控制的重要条件。

3) 切换指标的选择是多模型自适应控制的关键问题, 它对算法的稳定性、收敛性、系统瞬态响应具有至关重要的作用, 因此在这方面仍需进行深入研究。

4) 对存在随机干扰的不确定系统多模型自适应控制的研究, 以及对模型阶次、参数变化系统多模型自适应控制鲁棒性的研究。

5) 非线性系统 MMAC 的研究。非线性系统模型较难建立, 很难加以控制。利用多个线性模型逼近非线性模型, 或用多个简单非线性模型逼近复杂非线性模型, 进而建立多模型控制器, 对某些非线性系统会起到很好的控制效果。

6) 多变量系统 MMAC 的研究。多变量系统模型参数较多, 常规自适应控制往往由于参数辨识不准而得不到较好的控制效果, 且计算量很大。当模型参数在一个较小的集合中变化时, 采用多模型控制可以减少计算量, 改善控制效果。多变量系统多模型控制将是 MMAC 今后的一个研究方向。

参 考 文 献

- Lainiotis D G. Optimal adaptive estimation structure and parameter adaption. *IEEE Trans on Autom Contr*, 1971, 16(2): 160 ~ 170
- Lainiotis D G. Partitioning a unifying framework for adaptive system- I: Estimation. *Proc of IEEE*, 1976, 64(8): 1126 ~ 1143
- Middleton R H, Goodwin G C, Hilland D J *et al*. Design issues in adaptive control. *IEEE Trans on Autom Contr*, 1988, 33(1): 50 ~ 58
- Morse A S, Mayse D Q, Goodwin G C. Application of hysteresis switching in parameter adaptive control. *IEEE Trans on Autom Contr*, 1992, 37(9): 1343 ~ 1354
- Weller S R, Goodwin G C. Hysteresis switching adaptive control of linear multivariable systems. *IEEE Trans on Autom Contr*, 1994, 39(7): 1360 ~ 1375
- Narendra K S. Parameter adaptive control—The end ... or the beginning. In: *Proc of 33rd Conf on Decision and Control*. Lake Buena Vista, 1994. 2117 ~ 2125
- Narendra K S, Balakrisham J. Improving transient response of adaptive control systems using multiple models and switching. *IEEE Trans on Autom Contr*, 1994, 39(9): 1861 ~ 1866
- Narendra K S, Balakrishnan J, Ciliz M K. Adaptation and learning using multiple models, switching and tuning. *IEEE Contr Syst Mag*, 1995, June: 37 ~ 51
- Narendra K S, Balakrishnan J. Adaptive control using multiple models. *IEEE Trans on Autom Contr*, 1997, 42(2): 171 ~ 187
- Gustafson J A, Maybeck P S. Flexible spacestructure control via moving-bank multiple model algorithms. *IEEE Trans on Aerosp Electr Syst*, 1994, 30(7): 671 ~ 684
- Maybeck P S, Hentz K P. Investigation of moving-bank multiple model adaptive algorithms. *J of Guid Contr and Dyn*, 1987, 10(1): 90 ~ 96
- Fu M Y, Barmish B R. Adaptive stabilization of linear systems via switching control. *IEEE Trans on Autom Contr*, 1986, 31(10): 1097 ~ 1103
- Badr A, Binder Z, Rey D. Weighted multi-model control. *Int J Syst Sci*, 1992, 23(1): 145 ~ 149
- Badr A, Biner Z, Rey D. Application of tracking multi-model control to nonlinear thermal control process. *Int J Syst Sci*, 1990, 21(9): 1795 ~ 1803
- Nagib G, Gharieband W, Binder Z. Qualitative multi-model control using a learning approach. *Int J Syst Sci*, 1990, 23(6): 855 ~ 869
- Li X R. Multiple-model estimation with variable structure. *IEEE Trans on Autom Contr*, 1996, 41(4): 478

~ 493

- 17 Al Akhras M A, Alyand G M, Green R J. Neural network learning approach of intelligent multimodel controller. IEE Proc Contr Theory Appl, 1996, 143(4): 395 ~ 400
- 18 Anderson P. Adaptive forgetting in recursive identification through multiple models. Int J Contr, 1985, 42(5): 1175 ~ 1193
- 19 Qi X J. A multi-model adaptive predictor for stochastic with Markov switching parameters. Int J Contr, 1986, 43(5): 1453 ~ 1463
- 20 Blom H A P, Bar Shalom Y. The interacting multiple model algorithm for systems with Markov switching coefficients. IEEE Trans on Autom Contr, 1988, 33(8): 780 ~ 783
- 21 Miyazawa Y, Dowell E H. An approach to modeling and estimation for uncertain system. J of Guidance, Control and Dynamics, 1989, 12(5): 672 ~ 680
- 22 Miller D E. Adaptive stabilization using a nonlinear time-varying controller. IEEE Trans on Autom Contr, 1994, 39(7): 1347 ~ 1359
- 23 Pait F M, Morse A S. A Cyclic switching strategy for parameter-adaptive control. IEEE Trans on Autom Contr, 1994, 39(6): 1172 ~ 1183
- 24 Miller D E, Davison E J. An adaptive control which provides Lyapunov stability. IEEE Trans on Autom Contr, 1989, 34(6): 599 ~ 609
- 25 Banerjee A, Arkum Y, Ogunnaik B *et al.* Estimation of nonlinear systems using linear multiple models. AICHE J, Chem Eng Res and Dev, 1997, 43(5): 1204 ~ 1225
- 26 Smith R M, Johansen T A. Multiple model approaches to nonlinear modeling and control. London: Taylor & Frances, 1997
- 27 Baram Y, Sandell N R Jr. Consistent estimation of finite parameter sets with application to linear systems identification. IEEE Trans on Autom Contr, 1978, 23(3): 451 ~ 454
- 28 Baram Y, Sandell N R Jr. An information theoretic approach to dynamic system modeling and identification. IEEE Trans on Autom Contr, 1978, 23(1): 61 ~ 66
- 29 Tugnait J K. Convergence analysis of partitioned adaptive estimators under continuous parameter uncertainty. IEEE Trans on Autom Contr, 1980, 25(3): 569 ~ 573
- 30 Miyazawa Y. Robust flight control system design with multiple model approach. J of Guid Contr and Dyn, 1992, 15(3): 785 ~ 788
- 31 Lane D W, Maybeck P S. Multiple model adaptive estimation applied to the Lambda URV for failure detection and identification. In: Proc IEEE 33rd Conf Decision Contr. Lake Buena Vista, 1994. 678 ~ 683
- 32 Yu C, Roy R J, Kaufman H *et al.* Multiple-model adaptive predictive control of mean arterial pressure and cardiac Output. IEEE Trans on Biomed Eng, 1992, 39: 765 ~ 778
- 33 Martin J F, Schneider A M, Smith N T. Multiple-model adaptive control of blood pressure using sodium nitroprusside. IEEE Trans on Biomed Eng, 1987, 34: 603 ~ 611
- 34 Pottmann M, Unbehauen H, Seborg D E. Application of a general multi-model approach for identification of highly nonlinear processes — A case study. Int J Control, 1993, 57(1): 97 ~ 120
- 35 Konstantinov K B, Yoshida T. A knowledge-based pattern recognition approach for real-time diagnosis and control of fermentation processes as variable structure plants. IEEE Trans on SMC, 24(4): 908 ~ 914

作者简介

李晓理 男, 1971年生。2000年于东北大学获博士学位, 现为清华大学自动化系博士后。主要研究方向为多模型自适应控制, 广义预测控制。

王伟 男, 1955年生。1988年获东北大学工学博士学位, 现为东北大学教授, 博士生导师。主要研究方向为自适应控制, 广义预测控制, 计算机控制及其工业应用。

孙维女, 1975年生。东北大学自动化研究中心博士生。主要研究方向为多模型自适应控制。

(上接第389页)

作者简介

王群仙 女, 1969年生。1998年于南开大学计算机与系统科学系获博士学位, 现在河北工业大学自动化系任教。研究领域为预测控制, 智能控制等。

李少远 男, 1965年生。1997年在南开大学计算机与系

统科学系获博士学位, 现为上海交通大学自动化所博士后研究人员。研究领域为预测控制, 模糊控制, 自适应控制与应用。

李俊芳 女, 1975年生。现在河北工业大学自动化系攻读硕士学位。研究方向为预测控制, 智能控制等。