

文章编号: 1002-0411(2004)01-0072-05

# 多模型控制方法的研究进展及其应用现状

胡国龙<sup>1,2</sup>, 孙优贤<sup>1</sup>

(1. 浙江大学工业控制技术国家重点实验室, 浙江大学工业控制研究所, 浙江 杭州 310027;

2. 中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518004)

**摘要:** 本文探讨了多模型控制算法的发展和现状, 对几种主要的发展成熟的算法——多模型预测控制算法——多模型自适应控制算法、交互式多模型算法进行了研究, 同时分析了多模型控制算法中模型切换及稳定性、模型集的选取等关键问题, 分析了当前多模型控制算法应用的现状和今后的发展方向.\*

**关键词:** 多模型; 模型切换; 稳定性; 模型集

中图分类号: TP72

文献标识码: A

## Advances and Application of Multiple Model Control Method

HU Guo long<sup>1,2</sup>, SUN You xian<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory of Industrial Control Technology, Institute of Industrial Control Technology, Zhejiang University,

Hangzhou 310027, China; 2. ZTE Corporation, Shenzhen 518004, China)

**Abstract:** In this paper, advances in multiple model control algorithm are surveyed, several mature algorithms including multiple model predictive control algorithm, multiple model adaptive control algorithm and interacting multiple model algorithm are investigated. Some key problems such as selection of model bank and stability of model switching are analyzed. Development and application of multiple model control algorithm are also studied.

**Keywords:** multiple model; model switching; stability; model bank

## 1 引言 (Introduction)

多模型控制的思想早在 70 年代就提出来了, 对一些比较复杂的系统, 在一定条件下, 多模型控制会具有更强的鲁棒性. 当今工业控制过程中, 不同的生产条件下的模型结构或参数往往不同, 该过程控制模型可视为多模型系统. 近年来, 对非线性系统也往往用多个线性模型来逼近, 多模型方法被认为是处理非线性系统常用的方法和技术. 经过 30 年的发展, 理论上各种多模型控制方法已是异彩纷呈, 而且在许多应用领域预测控制成功应用的报道也是层出不穷. 多模型预测控制算法、多模型自适应控制算法、交互式多模型算法等多模型控制算法一出世就受到广泛注意, 很快有许多成功的应用.

## 2 多模型方法的发展和现状 (Development and status of multiple model method)

多模型算法经过 30 多年的发展渐渐成熟丰富起来, 形成几种比较成熟的算法.

### 2.1 多模型预测控制

近年, 非线性模型控制成为研究的热点, 但是真正用在实际工业过程控制上的控制策略却不多. 主要的原因是建立精确的非线性模型比较困难, 需要花很多时间做实验获得精确模型的动态参数. 即使是已知的模型结构, 也难以在实时等约束条件下估计参数及其状态.

多模型预测控制是一种处理非线性系统较常用的方法<sup>[1,2]</sup>. 其特点是用多个线性模型来逼近非线性过程, 将预测控制与多模型方法相结合, 用一种非线性系统的线性化多模型表示, 并在综合考虑控制期望轨迹和过程非线性特性的基础上, 为各线性化子模型给出了多模型参考轨迹, 得到一种非线性多模型预测控制方法.

首先, 将非线性系统用线性化多模型表示. 考虑非线性系统  $\Sigma$ :

$$\begin{cases} x(k+1) = f(x(k), u(k)) \\ y(k+1) = g(x(k), u(k)) \end{cases}$$

不失一般性, 设系统的输出空间为  $Y$ , 则可在

$Y$  中选取  $N$  个输出  $y_0 \leq \dots \leq y_{N-1}$ , 并得到相应的平衡点  $(x_i, u_i, y_i), i = 0, \dots, N-1$ . 在各平衡点附近将系统线性化展开, 可得到原非线性系统的  $N$  个线性化模型  $\sum_i$ , 它们构成了原系统的线性化多模型表示.

通过上述方法建立非线性过程的线性化多模型表示, 并建立相应的多模型参考轨迹后, 采用线性预测控制的方法, 对各线性化子模型进行预测控制. 根据权重函数计算的结果, 对模型进行切换. 文[2]采用递归贝叶斯定理, 文[3]采用模糊集方法辨识计算权重. 在每次切换后, 针对线性化模型, 可得到阶跃响应系数, 并建立从输出值到局部设定值的多模型参考轨迹. 原理如图 1 所示.

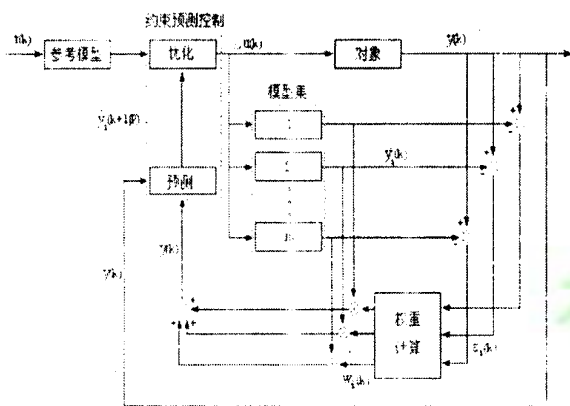


图 1 多模型预测控制结构

Fig.1 Structure of multiple model predictive control

### 2.2 多模型自适应控制

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, 实际过程控制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. 如文[4]采用多模型自适应控制对一类非线性时变系统进行故障诊断. 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.

多模型自适应控制算法的基本思想是用:

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

表示一个以模型  $M_i$  为元素的模型集, 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:

$$C = \{ G_i | i = 1, 2, \dots, n \}$$

为基于  $\Omega$  设计的控制器集合, 其中  $G_i$  为基于  $M_i$  设计的控制器. 被控系统的控制器可表示为:

$$G_{sys} = f(G_1, G_2, \dots, G_n, \theta)$$

其中,  $f$  为线性或非线形函数,  $\theta$  为参数向量.

Narendra<sup>[5]</sup>等提出基于切换的多模型自适应控制器, 但模型切换时系统瞬态响应不太好. 文[6]对连续时间系统采用多个自适应模型同时辨识的方法, 文[7]采用多个固定模型和两个自适应模型相结合的方法构造多模型集来改善跳变系统的瞬态响应. 文[8]将多模型自适应控制推广到离散时间系统. 文[9]将它进一步推广到非线性离散动态系统. 文[10]采用动态可更新的模型集的智能多模型自适应控制. 文[11]提出了变结构多模型自适应估计器.

### 2.3 交互式多模型算法

在混合估计中, 交互式多模型(IMM——Interacting Multiple Model)滤波器以其优越的性能而受到广泛的研究. 对于结构未知或结构可随机突变的系统的估计, 目前很难用摄动法或时变参数加以近似建模. 因为在估计系统状态时, 需要同时辨识系统在该时刻的运动模式(或系统的结构), 以便建立有效的滤波模型. 而当系统的运动模式不确定或随机突变时, 许多常规算法因对系统的运动模式辨识上的延迟与误报, 使估计发生严重偏差, 而这种偏差致使对系统的运动模式的辨识出现更大的误报, 从而严重影响滤波的精度和稳定. 这就是所谓的混合估计问题. 混合估计问题最初来源于机动目标跟踪, 而现在混合估计除了广泛应用于机动目标跟踪外, 也应用于在线故障诊断、在线噪声辨识、非线性随机系统的分段线性化滤波等. 目前对混合估计的研究以多模型估计为主流. 多模型估计的基本思想是: 将参数空间映射为模型集, 而基于每个模型的滤波器并行地工作, 系统的状态估计则是各模型滤波器所做估计的数据融合. 在多模型估计算法中, 以 IMM 较为优越.

Blom 和 Bar-Shalom 提出的交互多模型算法(IMM)是目前性能代价比最高的机动目标跟踪算法之一. IMM 算法包括交互、滤波和组合三部<sup>[12-14]</sup>.

定义  $z^k$  为系统在  $k$  时段上的量测集,  $\hat{x}(i|l)$  为基于模型  $Z^l$  在  $i$  时刻的滤波估计,  $P(i|l)$  为基于模型  $Z^l$  在  $i$  时刻的协方差矩阵,  $N(y; \bar{y}, P)$  为正态分布密度函数,  $u_j(k)$  为模型  $j$  在其模型集匹配的条件下的  $k$  时刻的概率.

IMM 算法可以简单用三部分描述.

(1) 交互  $\forall i, j \in M_f, u_{ij}(k-1|k-1) = (1/\bar{c}_j) p_{ij} u_i(k-1) \bar{c}_j$  是归一化因子.

$$\bar{c}_j = \sum_i p_{ij} u_i(k-1)$$

$$\hat{x}_{0j}(k-1|k-1) = \sum_i \hat{x}_j(k-1|k-1) \times u_{ij}(k-1|k-1)$$

$$P_{0j}(k-1|k-1) = \sum_i P_i(k-1|k-1) + [\hat{x}_i(k-1|k-1) - \hat{x}_{0j}(k-1|k-1)] \times [\hat{x}_i(k-1|k-1) - \hat{x}_{0j}(k-1|k-1)]^T \times u_{ij}(k-1|k-1)$$

(2) 滤波  $\forall j \in M_f$ , 各模型进行滤波, 将  $\hat{x}_{0j}(k-1|k-1)$ ,  $P_{0j}(k-1|k-1)$  输入第  $j$  个模型滤波器, 滤波估计为  $\hat{x}_j(k|k)$ , 估计方差为  $P_j(k|k)$ .

$$\hat{x}_j(k|k-1) = F_j(k-1) \hat{x}_{0j}(k-1|k-1) + \Gamma_j(k-1) \bar{v}_j(k-1)$$

$$P_j(k|k-1) = F_j(k-1) P_{0j}(k-1|k-1) \times F_j(k-1)^T + \Gamma_j(k-1) \times Q_j(k-1) \Gamma_j(k-1)^T$$

$$\hat{x}_j(k|k) = \hat{x}_j(k|k-1) + W_j(k) r_j(k)$$

$$P_j(k|k) = P_j(k|k-1) - W_j(k) S_j(k) W_j(k)^T$$

$$r_j(k) = z(k) - z(k|k-1)$$

$$\hat{z}_j(k|k-1) = H_j(k) \hat{x}_j(k|k-1)$$

$$S_j(k) = H_j(k) P_j(k|k-1) H_j(k)^T + R_j(k)$$

$$W_j(k) = P_j(k|k-1) H_j(k)^T S_j(k)^{-1}$$

$$A_j(k) = N(r_j(k); 0, S_j(k))$$

$$u_j(k) = \frac{1}{c} A_j(k) \sum_i p_{ij} u_i(k-1) = \frac{1}{c} A_j(k) \bar{c}_j$$

(3) 组合

$$\hat{x}(k|k) = \sum_j \hat{x}_j(k|k) u_j(k)$$

$$P(k|k) = \sum_j \{ P_j(k|k) + [\hat{x}_j(k|k) - \hat{x}(k|k)] \times [\hat{x}_j(k|k) - \hat{x}(k|k)]^T \}$$

交互式多模型算法广泛应用于目标跟踪和故障诊断等混合估计问题<sup>[15~18]</sup>, 且模型切换服从马尔可夫过程. 对混合估计的研究目前以多模型估计为主. 在多模型估计算法中, 以 IMM 较为优越. IMM 假设模型之间的转移服从马尔可夫过程, 与其它多模型估计算法相比, IMM 比一阶广义伪贝叶斯方法自适应能力强, 它避免了全假设树滤波的计算量随时间无限增长的问题. 文[34]进一步发展 IMM 算法, 利用模型集的概念, 首次提出了双马氏过程的模型切换假设, 构造出一种两级交互式多模型滤波器.

### 3 多模型方法的关键问题 (Key problems of multiple model method)

#### 3.1 多模型算法的模型切换和稳定性

多模型方法对非线性系统也往往用多个线性模型来逼近, 是处理非线性系统常用的方法和技术. 对这类多模型系统控制问题, 往往是先对每个子系统同时设计多个控制器, 实际应用中根据模型的切换条件取不同的控制器的输出. 但对于基于模型切换的多模型控制来讲, 从一个模型切换到另一个模型时, 会引起系统的瞬态响应. 这里, 关键问题是在模型切换时如何做到控制平滑切换, 克服模型切换带来的扰动和瞬态响应. 文[35]证明了一类非线性多模型自适应控制切换时的稳定性. 根据模型集分三种情况选取: a) 所有辨识模型都是自适应的; b) 模型集由一个自适应模型、 $N-1$  个固定模型组成; c) 模型集由两个自适应模型、 $N-2$  个固定模型组成. 基于切换方式的多模型自适应控制在设计稳定的控制器时, 往往采用输入输出信号的有界性、无偏估计、零误差以及输出是否稳定跟踪设定值<sup>[5,7]</sup>, 并证明初始状态为原点和非原点系统都稳定. 文[36]采用 Lyapunov 稳定性理论进行证明.

#### 3.2 模型集的选取

多模型控制算法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. 所建的模型集相关匹配程度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. 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, 需用大量的模型来描述, 来覆盖所有可能出现的情况, 包括被控系统参数变化和扰动突变的情况. 文[1, 23, 30] 采用经验、知识的方法构造模型集. 文

[8]通过辨识得到模型集,文[31]在辨识模型集上建立多模型自适应,提高系统瞬态响应.文[33]提出了分片线性化方法辨识一类非线性系统,给出了非线性系统的多线性模型表示.

同时模型多了也会带来一个问题: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,造成控制器在计算上的浪费,增加了算法的复杂程度,降低实际控制过程的实时性能.由于此原因,为了获得性能更好的多模型控制算法,人们开始寻求更有效的具有动态调整能力的模型集.文[31,32]采用了 Moving-Bank 方法,主要思想是在某一时刻,在整个模型集中抽取与当前控制对象相关程度大的模型构成子模型集,并且这个子集随时动态调整.文[5~7]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.

#### 4 多模型方法的应用分析 (Application analysis of multiple model method)

随着多模型方法的日益发展成熟,形成几种比较成熟的算法,伴随着这些算法的发展,其应用方面也取得了很大成功.交互式多模型算法用于机动目标(飞行器)跟踪<sup>[15~18]</sup>,形成在有噪声干扰、突然加速等条件下也能稳定跟踪的算法<sup>[25,26]</sup>.模型自适应估计用来估计未知系统参数,通过离散参数平行滤波器对飞行器、执行器、传感器故障进行诊断和检测<sup>[19]</sup>.文[24]提出了一种采用自适应多模型方法的智能容错控制.文[27]用多模型算法辨识非线性系统,提高控制系统的瞬态响应和抗干扰性.文[28]采用多模型扩展卡尔曼滤波器修复带有模糊参数的图像.文[21~23]提出基于多模型方法的机器人遥控器来提高机器人运动轨迹的稳定性和精确性.文[29]将多模型预测控制应用于生物医学领域,根据病例建立模型集,采用切换多模型控制器注射药物,对病人的动脉血压进行有效的控制.

#### 5 多模型研究方法存在的问题和发展方向 (Problem and tendency of multiple model method)

理论上多模型控制算法已经很丰富,发展起来的几种算法(多模型预测控制算法、多模型自适应控制算法、交互式多模型算法)也很成熟.实践上多模型控制算法也广泛取得了成功,但仍有许多理论和

应用上的问题没有完美地解决,需要进一步研究.

1) 多模型控制器的理论研究.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、离散时间系统多模型控制器的稳定性等.

2) 模型集的选取.模型集以及元素模型的多少和模型的相关匹配程度将直接影响控制的精度和性能.

3) 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,满足工业控制实时性的要求.

4) 模型切换的稳定性研究.切换指标的选择是多模型控制的关键问题,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.

5) 对存在随机干扰的不确定系统多模型控制的研究,以及对模型阶次、参数变化系统、非线性系统多模型控制鲁棒性的研究.

#### 参 考 文 献 (References)

- [1] Aufderheide B, Prasad V, Bequette B W. A comparison of fundamental model-based and multiple model predictive control [A]. Proceedings of IEEE 40th Conference on Decision and Control [C]. 2001. 4863 ~ 4868.
- [2] Aufderheide B, Bequette B W. A variably tuned multiple model predictive controller based on minimal process knowledge [A]. Proceedings of the IEEE American Control Conference [C]. 2001. 3490 ~ 3495.
- [3] Nakamori Y, Suzuki K, Yamanaoka T. Model predictive control of nonlinear processes by multi-model approach [A]. Proceedings of the Conference of the IEEE Industrial Electronics Society [C]. 1991. 1902 ~ 1907.
- [4] Diao Y, Passino K M. Intelligent fault tolerant control using adaptive schemes and multiple models [A]. Proceedings of the IEEE American Control Conference [C]. 2001. 2854 ~ 2859.
- [5] Narendra K S, Balakrishnan J, Ciliz M K. Adaptation and learning using multiple models, switching and tuning [J]. IEEE Control Systems Magazine, 1995, 15(1): 37 ~ 51.
- [6] 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.
- [7] Narendra K S, Balakrishnan J. Adaptive control using multiple models [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1997, 42(2): 171 ~ 187.
- [8] 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.
- [9] Chen L, Narendra K S. Nonlinear adaptive control using neural

- networks and multiple models [ C ]. Proceedings of the IEEE American Control Conference [ C ]. 2000 . 4199 ~ 4203 .
- [ 10 ] Filev D, Larsson T. Intelligent adaptive control using multiple models [ A ]. Proceedings of the IEEE Intelligent Control [ C ]. 2001 . 314 ~ 319 .
- [ 11 ] Li X R. Multiple-model estimation with variable structure-part II: model-set adaptation [ J ]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(11) : 2047 ~ 2060 .
- [ 12 ] Mazor E, Averbuch A, Bar-Shalom Y, *et al.* Interacting multiple model methods in target tracking: a survey [ J ]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(1) : 103 ~ 123 .
- [ 13 ] Blom H A P, Bar-Shalom Y. The interacting multiple model algorithm for systems with Markovian switching coefficients [ J ]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1998, 33(8) : 780 ~ 783 .
- [ 14 ] Li X R, Bar-Shalom Y. Design of an interacting multiple model algorithm for air traffic control tracking [ J ]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1993, 1(1) : 186 ~ 194 .
- [ 15 ] Daeipour E, Bar-Shalom Y. An interacting multiple model approach for target tracking with glint noise [ J ]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1995, 31(2) : 706 ~ 715 .
- [ 16 ] Chen B, Tugnait J K. An interacting multiple model fixed-lag smoothing algorithm for markovian switching systems [ A ]. Proceedings of the IEEE 37th Conference on Decision and Control [ C ]. 1998 . 269 ~ 274 .
- [ 17 ] Zhan Y M, Jiang J. An interacting multiple-model based fault detection, diagnosis and fault-tolerant control approach [ A ]. Proceedings of the IEEE 38th Conference on Decision and Control [ C ]. 1999 . 3593 ~ 3598 .
- [ 18 ] Munir A, Atherton D P. Maneuvering target tracking using an adaptive interacting multiple model algorithm [ A ]. Proceedings of the IEEE American Control Conference [ C ]. 1994 . 1324 ~ 1328 .
- [ 19 ] Lane D W, Maybeck P S. Multiple model adaptive estimation applied to the LAMBDA URV for failure detection and identification [ A ]. Proceedings of the IEEE 33th Conference on Decision and Control [ C ]. 1994 . 678 ~ 683 .
- [ 20 ] Fisher K A, Maybeck P S. Multiple model adaptive estimation with filter spawning [ A ]. Proceedings of the IEEE American Control Conference [ C ]. 2000 . 2326 ~ 2331 .
- [ 21 ] Ciliz M K, Narendra K S. Intelligent control of robotic manipulators: a multiple model based approach [ A ]. Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems [ C ]. 1995 . 422 ~ 427 .
- [ 22 ] Ciliz M K, Narendra K S. Multiple model based adaptive control of robotic manipulators [ A ]. Proceedings of the IEEE 33th Conference on Decision and Control [ C ]. 1994 . 1305 ~ 1310 .
- [ 23 ] Leahy M B, Sablan S J. Multiple model-based control of robotic manipulators: an overview [ A ]. Proceedings of the IEEE 29th Conference on Decision and Control [ C ]. 1990 . 1976 ~ 1977 .
- [ 24 ] Diao Y, Passino K M. Intelligent fault tolerant control using adaptive schemes and multiple models [ A ]. Proceedings of the IEEE American Control Conference [ C ]. 2001 . 2854 ~ 2859 .
- [ 25 ] Munir A, Mirza J A. Parameter adjustment in the turn rate models in the interacting multiple model algorithm to track a maneuvering target [ A ]. Proceedings of the IEEE International Multi Topic Conference [ C ]. 2001 . 262 ~ 266 .
- [ 26 ] Mazor E, Averbuch A, Bar-Shalom Y, *et al.* Interacting multiple model methods in target tracking [ J ]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(1) : 103 ~ 123 .
- [ 27 ] Cheng Y C, Yu C C. Identification and control of nonlinear systems using multiple models: relay feedback approach [ A ]. Proceedings of the IEEE American Control Conference [ C ]. 1999 . 3327 ~ 3331 .
- [ 28 ] Koch S, Kaufman H, Biemond J. Restoration of spatially varying images using multiple model extended Kalman filters [ A ]. Proceedings of the IEEE 32nd Conference on Decision and Control [ C ]. 1993 . 1216 ~ 1221 .
- [ 29 ] Aufderheide B, Rao R R, Bequette B W. Multiple model predictive control of canine hemodynamic variables [ A ]. Proceedings of the Biomedical Engineering Society and Engineers in Medicine and Biology Conference [ C ]. 1999 . 256 ~ 257 .
- [ 30 ] Leahy M B, Sablan S J. Multiple model-based control of robotic manipulators: theory and experimentation [ A ]. Proceedings of the IEEE 5th Intelligent Control [ C ]. 1990 . 830 ~ 835 .
- [ 31 ] Fujinaka T, Omatu S. A switching scheme for adaptive control using multiple models [ A ]. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Control [ C ]. 1999 . 80 ~ 85 .
- [ 32 ] Gustafson J A, Maybeck P S. Control of a large flexible space structure with moving-bank multiple model adaptive algorithms [ A ]. Proceedings of the IEEE 31st Conference on Decision and Control [ C ]. 1992 . 1273 ~ 1278 .
- [ 33 ] 李晓理, 王书宁. 基于分片线性化方法的非线性系统多模型自适应控制 [ J ]. 控制与决策, 2002, 17(1) : 45 ~ 48, 52 .
- [ 34 ] 梁彦, 谭伟, 潘泉, 等. 两级交互式多模型算法 [ J ]. 自动化学报, 2001, 27(5) : 26 ~ 656 .
- [ 35 ] Narendra K S, George K. Adaptive control of simple nonlinear systems using multiple models [ A ]. Proceedings of the IEEE American Control Conference [ C ]. 2002 . 1779 ~ 1784 .
- [ 36 ] Boskovic J D, Mehra R K. Stable multiple model adaptive flight control for accommodation of a large class of control effector failures [ A ]. Proceedings of the IEEE American Control Conference [ C ]. 1999 . 1920 ~ 1924 .

## 作者简介

胡国龙(1976 - ),男,博士,研究领域为预测控制,多模型控制方法和神经网络.