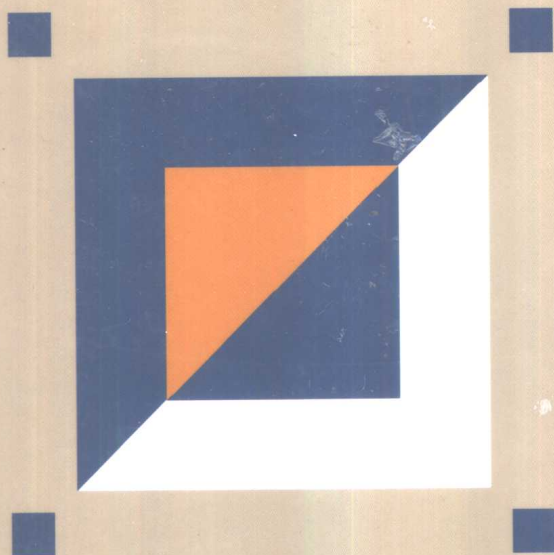


多模型自适应控制

王伟 李晓理 著



科学出版社

多模型自适应控制

王 伟 李晓理 著

科 学 出 版 社

2001

内 容 简 介

本书从基本原理与方法、多种实用算法及理论分析、应用等诸方面描绘了多模型自适应控制的全貌。全书共分十二章。第一章为概论,第二、三章分别介绍了基于连续时间系统的间接和直接多模型自适应控制,第四到八章分别介绍了基于离散时间系统的间接和直接多模型自适应控制、多输入多输出系统的多模型自适应控制及非线性系统的多模型自适应控制,第九章介绍基于模糊规则的多模型自适应控制,第十章为多模型在预测控制中的应用,最后两章为实际应用和结语。本书是国内多模型自适应控制方面的第一本著作,内容深入浅出、有机结合,取材新颖、广泛,理论联系实际。

本书适宜于从事控制理论与控制工程专业的广大科技人员阅读,也可供高等院校相应专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

多模型自适应控制/王伟,李晓理著.-北京:科学出版社,
2001
ISBN 7-03-009357-7

I. 多… II. ①王… ②李… III. 自适应控制 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 25623 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001 年 7 月第 一 版 开本:850×1168 1/32

2001 年 7 月第一次印刷 印张:6

印数:1-2 000

字数:155 000

定价:15.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(杨中))

前 言

多模型自适应控制(Multiple Model Adaptive Control)于 20 世纪 70 年代研制成功,并在 90 年代再度成为自适应控制的一个研究热点。它具有如下特点:(1)根据被控对象结构及参数的不确定性对被控对象建立多个模型,覆盖其不确定性。(2)基于切换原则,选择描述当前被控对象的有效模型进行多模型自适应控制器设计。(3)常规的自适应控制器设计方法仍可以被用来设计多模型自适应控制器。从以上特点可以看出,多模型自适应控制是对传统的自适应控制方法的一种推广,其目的在于能对各种复杂的、高度不确定的、含跳变参数的系统给出一种行之有效的控制方法。由于多模型自适应控制固有的特点,近十几年来它在国际自动控制领域倍受重视,取得了很多理论研究成果,在实际中也得到成功的应用。但这些成果大多分散发表在不同的杂志和会议上,这给从事此方面研究的科技人员全面掌握这种控制方法带来一定的困难。本书的目的就是要通过全面介绍多模型自适应控制的机理、算法和实际应用,推动这一控制方法在我国的研究和应用。

全书共分三大部分,即连续时间系统多模型自适应控制、离散时间系统多模型自适应控制、多模型自适应控制在实际过程中的应用,主要介绍多模型自适应控制的直接算法、间接算法及性能分析,基于“局部化”技术的多模型自适应控制算法及性能分析,多变量系统多模型自适应控制及性能分析,非线性系统多模型自适应控制等。尽管本书只介绍了某些典型的方法和算法,但随着多模型自适应控制的不断发展,新的算法定会层出不穷,工业应用也会越来越多。

本书作者要对澳大利亚纽卡斯尔大学的 G. C. Goodwin 教授

和法国 Grenoble 实验室的 Z. Binder 教授在多模型自适应控制方面所进行的有益的讨论及在文献资料方面提供的帮助表示衷心的感谢。作者的研究工作先后得到了国家杰出青年科学基金(69825106)和教育部骨干教师资助计划的资助,特此表示感谢。

本书是作者多年研究工作的结晶。希望本书的出版能为推广多模型自适应控制在我国的研究和应用起到一定的促进作用。由于作者水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

(TU-1549.1101)

责任编辑：杨家福

封面设计：张 放

ISBN 7-03-009357-7



9 787030 093578 >

ISBN 7-03-009357-7/TP · 1549

定 价：15.00 元

目 录

前言

第一章 概论	1
1.1 引言	1
1.2 多模型自适应控制的基本原理	3
1.3 多模型自适应控制的实际应用	6
第二章 连续时间系统间接多模型自适应控制	9
2.1 多自适应模型构成的多模型自适应控制	9
2.2 多固定模型与多自适应模型构成的多模型自适应 控制	13
第三章 连续时间系统直接多模型自适应控制	23
3.1 基于输出反馈的直接多模型自适应控制	23
3.2 直接多模型自适应控制算法的稳定性分析	27
第四章 离散时间系统间接多模型自适应控制	33
4.1 输入受限系统的间接多模型自适应控制	33
4.2 间接多模型自适应控制的稳定性分析	37
第五章 基于局部化技术的离散时间系统多模型自适应 控制	41
5.1 确定性系统多模型自适应控制	41
5.2 确定性系统多模型自适应控制的稳定性分析	45
5.3 有界扰动系统的多模型自适应控制	48
5.4 有界扰动系统的多模型自适应控制的稳定性分析	53
第六章 离散时间系统直接多模型自适应控制	58
6.1 基于状态反馈的直接多模型自适应控制	58
6.2 基于局部化技术的直接多模型自适应控制	65

第七章	离散时间多输入多输出系统多模型自适应控制	74
7.1	多输入多输出系统的直接多模型自适应控制	74
7.2	仿真例子	79
第八章	离散时间非线性系统的多模型自适应控制	81
8.1	基于神经网络的多模型自适应控制	82
8.2	基于 Laguerre 函数的多模型自适应控制	87
8.3	多线性模型构成的多模型自适应控制	94
第九章	基于模糊规则的多模型自适应控制	101
9.1	模糊监督控制	101
9.2	模糊建模和线性矩阵不等式方法	106
第十章	多模型在预测控制中的应用	122
10.1	非线性系统预测控制的多模型方法	122
10.2	广义预测多模型自适应控制	128
第十一章	多模型自适应控制的实际应用	142
11.1	机器人手臂的间接多模型自适应控制	142
11.2	多模型自适应在温度控制中的应用	146
11.3	化工过程连续搅拌釜的多模型自适应控制	152
11.4	动脉氧气量的多模型自适应控制	160
第十二章	结语	175
	参考文献	177

第一章 概 论

1.1 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。我们常常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、系统参数出现大的变化等等)的控制器。对于这种复杂的被控系统,利用常规的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然变化到另一种操作环境,系统的参数将产生很大变化,这时常规自适应控制器中的辨识器难于跟随参数的实际变化,造成模型不准确,从而基于此模型而设计的控制器性能不佳。

在这种背景下,人们提出了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;这种控制器对复杂系统能达到较好的控制精度、跟踪速度以及稳定性。

从早期 D. G. Lainiotis^[1~4]的基于后验概率加权的多模型控制到近几年来 G. C. Goodwin^[5~8]、K. S. Narendra^[9~15]等人提出的基于模型切换的多模型自适应控制器,多模型自适应控制已经经过了近 30 年的发展,并在理论和实践方面取得了很多成果。近些年来国际主要控制杂志如 IEEE Trans AC、Automatica 等以及国际重要学术会议如 ACC(美国控制会议)、CDC(IEEE 控制与决策会议)等有很多这方面的文章发表。一些学者对以前的工作做了总结,如综述文章^[16~17]及著作^[18],美国著名学者 Yale 大学 K. S. Narendra 教授在 1994 年的 CDC 会议作大会报告“参数自适应控制——结束还是开始”,在自适应控制的发展方向中着重提出了多

模型自适应控制是自适应控制的最新发展方向之一^[10]。国际杂志 Int. Journal of Control 在 1999 年 7/8 期出版了多模型控制的专刊,使得多模型控制的研究在国际上再一次受到重视。

目前采用多模型、切换和调整方法进行自适应控制研究并在国际上产生影响的主要有以下几个小组。

(1)以美国 Yale 大学 K. S. Narendra 教授为主的研究小组。目前该小组已经在这方面发表了多篇文章,分别发表在 IEEE Trans AC、IEEE Control System 和 CDC 上,属间接多模型自适应控制,且大多研究连续时间系统。间接多模型自适应控制的主体思想是首先根据被控对象参数的变化范围设立多个模型,同时建立以模型输出误差为变量的具有积分特点的标志切换函数。在每一采样时刻根据标志切换函数值选择与实际被控对象最接近的模型,并将基于此模型的控制器的切换为当前控制器,这种控制器可极大地改善参数跳变系统的瞬态响应,但当被控对象含随机扰动时,模型切换可能不收敛或收敛速度慢。

(2)以澳大利亚 Newcastle 大学 G. C. Goodwin 教授为主的研究小组。其中 M. Y. Fu 开创了直接多模型自适应控制^[19~24]。直接多模型控制的特点是,首先根据被控对象模型参数设立多个局部模型,且对应于多个局部模型设立多个局部稳定的控制器,将这些控制器按照从小到大编号顺序排好,从编号为 1 的控制器开始作为当前控制器,根据切换函数值判断当前控制器是否为使被控对象稳定的控制器,如果是则继续保留为当前控制器,否则将编号加 1 的下一个控制器切换为当前控制器;以此类推,最终切换到能使闭环系统稳定的控制器上。其特点是整个切换过程闭环系统是指数稳定的,且省去了常规自适应控制的一些假设条件,如常数增益的符号、最小相位的假设等。但当模型过多时,虽然整个过程指数稳定,但过渡过程会不好,当然现在正在研究如何更好地解决这个问题,也已经有了一些结果。

(3)法国 Grenoble 实验室的 Z. Binder 教授也在多模型自适应控制方面做了很多研究工作^[25~29],主要是基于概率加权法和的形

式构成控制器,即根据模型误差对每个局部模型构成加权值;当前控制器为多个局部模型控制器输出的加权和,其结果相当于一种软切换,其特点是切换过程比较平滑,不会造成切换时输出有大的跳跃,但其稳定性很难证明,只有一些少量的收敛性结果。

国际上此领域工作主要有:1)非线性系统的多模型表示;2)模型集的优化;3)控制器的结构及基于 Lyapunov 稳定性意义上的切换及调整算法;4)闭环系统的稳定性判据;5)鲁棒控制与多模型控制相结合。

1.2 多模型自适应控制的基本原理

在介绍多模型自适应控制之前,为使读者更清楚地了解什么是多模型自适应控制,有必要对多模型自适应控制的基本原理作一描绘。多模型自适应控制器基本上由以下三部分组成。

(1) 根据被控对象模型参数、结构的不确定性对被控对象建立多个模型,构成多模型集合

$$\Omega = \{M_i | i = 1, 2, \dots, n\} \quad (1.1)$$

其中 Ω 表示一个以模型 M_i 为元素的模型集,这个模型集可以理解为一个广义的模型集, M_i 可表示系统模型,也可表示不同的状态反馈矩阵、误差落在的不同局部区域或一个复杂工业过程的不同操作工序。

(2) 根据模型集合 Ω 中的不同模型建立多个控制器,构成控制器集合

$$C = \{U_i | i = 1, 2, \dots, n\} \quad (1.2)$$

其中 C 为基于 Ω 设计的控制器集合, U_i 为基于 M_i 而设计的控制器。

(3) 给定切换原则,以选择能够描述当前被控对象的最佳模型,并将基于最佳模型而设计的控制器切换为当前控制器

$$U_{sys} = f(U_1, U_2, \dots, U_n, \theta) \quad (1.3)$$

其中 f 为一线性或非线性函数, θ 为一参数向量。不同的多模型自

适应控制器会有不同的切换函数,因此函数 f 可表示为不同的形式。

1.2.1 模型集的建立

多模型自适应控制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,因此模型集的建立、元素模型的多少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的文献^[1~4]大多基于这样一个前提条件,即已知被控系统的模型参数只在一个元素不多的参数集合中变化,这样就可以用有限个模型来描述系统。这主要应用于实际过程中被控系统参数变化、扰动变化分布在一些离散值上的情况。

随着控制理论的深入和解决实际问题的需要,由于被控系统的外部环境变化很大,系统模型参数变化也很大,用少量的模型已不足以描述系统,这样便出现了如下的问题:不用大量的模型,系统无法精确地描述。若模型过多,在每一步的控制过程中,模型集中有很大一部分模型与此刻的系统“真实”模型相差甚远,这样不但造成基于这部分模型而设计的控制器在计算上的浪费,同时这些“多余”的模型造成的“过多的竞争”也会降低控制器的性能。

基于这种原因,人们为了获得性能更好的多模型自适应控制算法,便开始寻求更有效的具有动态调整能力的模型集来处理这个问题。

(1)“移动子集”方法。首先用“模型参数允许集”表示系统模型参数所有可能取值构成的参数集合^[30~34],然后,基于这个参数集将构成一个元素模型很多的模型集,但每个时刻只取其中的一个子集;这个子集中的每个元素模型的参数正好以此时的系统最优估计参数(按照某种最优策略)为中心覆盖最优估计参数;但这个最优参数的估计值每个时刻可能在变化,使得最优估计参数落在这个子集的外部,此时便要移动这个子集以获得一个新的模型子集,使其再次覆盖最优估计参数。这就需要有一个良好的决策方

案,目前比较常用的有:1)残差调节;2)参数位置调节;3)参数位置及“速度”调节;4)概率调节。

(2) 从系统的稳定性出发设计模型集。对一个被控系统设计多个固定模型,基于一种切换原则,切换到基于不同固定模型而设计的控制器上。并保证在多个控制器之间相互切换时闭环系统是稳定的。在此基础上,通过指标函数选定最佳控制器,改进瞬态响应。

(3) 动态优化的模型集。提出利用自适应模型或自适应模型和固定模型共同组成模型集,这样由于自适应模型的存在,模型集每个时刻都在发生变化,向“真实”模型靠拢,这样基于固定模型设计的控制器保证了响应速度,而基于自适应模型而设计控制器保证了精度^[9,11,14]。一种方法是将系统的模型参数变化空间划分成几个区域,在每个区域选取代表性的模型,以此代表性模型的输出与系统的真实输出相比较,基于某种性能指标,最接近真值的模型所在的区域为最有效模型区域,以此类推,可以找到包含真实模型的最小区域,在此区域建立模型集^[26]。文献[35~36]给出了一种关于模型集元素增减的策略,使基于模型增减后的模型集设计出的状态估计器的状态估计值与基于原模型集设计的状态估计器的状态估计值有同样的精确度。

(4) 利用神经网络来减少元素模型个数。在多模型控制中,如果在模型集中找不到与系统模型相匹配的模型参数,这时基于最靠近系统的模型而设计的控制器将被用来控制实际系统,这样会造成系统输出偏差很大。除非模型集中模型参数分布得十分密集,否则仍会出现模型不匹配,但这样会造成很大的计算负担。采用神经网络,通过 BP 算法,动态调整权值,逼近系统动态特性,既可以减少模型集中元素模型的个数,又由于神经网络有逼近非线性函数的能力,还不会有模型偏差很大的现象产生。文献[47]用两个极端模型(分别代表系统干扰在正方向和负方向达到最大值时的系统模型表示)和一个神经网络模型组成多模型控制系统,对一个有变化参数的二阶系统进行控制。与由 10 个元素模型组成多模型控制器相比

较,当系统参数变化在 10 个元素模型中找不到匹配的模型时,由神经网络构成的多模型控制器的性能要远远地好于前者。

1.2.2 多模型自适应控制器的构成

多模型自适应控制器首先基于每个元素模型构成元素模型控制器,然后被控系统的控制器由元素模型控制器通过一种线性或非线性关系构成。

(1) 以加权方式构成。基于概率加权这种方法最早见于文献[1~4],20 世纪 80 年代以后也有类似的文章发表^{[28],[38]}。其基本方法是根据“分割定理”(Partition theorem)求解元素模型的后验概率,然后通过概率加权求解系统控制器。

(2) 切换策略。首先给定基于某一性能指标的切换函数,然后选择输出使性能指标为最小的元素模型,进行控制时切换到基于此元素模型而设计的控制器上。另一种切换策略是基于稳定条件下的切换,滑模变结构控制便是一种这样的切换^[58~60]。这种策略近年来不断有文章发表^[5~15,19~24,61~62],因为在频繁的控制器的切换过程中,保持稳定是非常重要的。一种类型的切换控制器的切换顺序是事先给定的,而何时切换到另一个控制器,直接由系统输出决定,可称之为“直接切换控制”。另一类切换顺序是使某一指标函数最小。在这一类切换控制中,多模型用来决定什么时间切换到哪一个控制器上,其主要的目的是在自适应控制当中用最少的先验知识来改善自适应系统的稳定性;这种切换控制可称之为“间接切换控制”。

1.3 多模型自适应控制的实际应用

除了理论和方法上所取得的成果外,多模型自适应控制也在实际中有了一些成功的应用。文献[80~84]将多模型自适应控制应用到飞行器控制系统中。飞行器控制系统不仅要考虑参数的变化,还要考虑不确定的动态特性。高频段的不确定可能来自模型的

变化、执行器的非线性、数值信号过程的不确定时延,这些因素常导致闭环系统不稳定。设计多模型控制器考虑不同的时延、带宽,可获得较好的控制性能^{[81],[83]}。文献[82]通过比较被测地形高度来估计飞行器的位置,但这种算法的性能依赖于地形高度线性化的局部有效性,如果被估计的位置的初始值偏离真实位置较远,滤波器估计值将出现大的偏离,若利用多模型的方法建立多个估计器,每个估计器初始化于不同的位置,利用多模型自适应估计器将正确的估计飞行位置,进而改善飞行性能。文献[80]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。文献[12, 13]中机器人的跟踪控制有很多非线性动态,这个问题近年来一直引起人们的注意,机器人在各种任务的执行期间的惯性动态使得控制问题成为一个很难解决的问题,利用动态模型的线性参数化已经使这个问题找到了解决的方法。许多研究工作者已经给出基于这种方案的全局稳定的自适应控制算法,并从试验上证明其性能要好于非自适应算法。但自适应算法渐近收敛速度过慢,可能会导致较大瞬态误差,为减少瞬态误差而采取了多模型自适应控制的方法。多模型自适应控制在生物医学领域已经取得很多成果,并有很多相关的文献发表。文献[85~87]介绍了通过输入药物对病人血压进行控制。在构成的被控系统中,其输入为药物的输入速率,输出为病人的血压,由于每个病人的身体状况不同,被控系统的模型参数(如增益、时延)也会不同,这样利用常规的PI或PID控制器进行控制就需要借助于人的经验对控制器随时进行调节,因而需要花费大量的时间和精力。采用多模型表示不同病人所代表的系统模型,针对不同模型采用PI或PID控制,利用加权组合构成被控系统的多模型控制器;仿真结果表明这种控制器的效果要好于常规控制算法。文献[85]把多模型方法应用到多变量系统,对一个患有心血管阻塞的病人通过调节两种药物的输入率来分别控制动脉血压和心脏输出,针对不同病人设计多模型,基于不同模型采用广义预测控制策略。仿真试验表明,这种控制策略在不同模型之间进行过渡切换情况下,具有较强的鲁棒性。文献[64]将

非线性多模型用于 PH 值的中和过程。中和过程是一个复杂的过程,很难用一个多项式模型描述,然而用非线性多模型却能很好地逼近它。文献[88]用多个模型描述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。文献[63]对一个复杂的非线性异分子聚合反应器的反应过程,利用多个线性模型逼近非线性过程,从而进行控制。多模型自适应控制还应用到其他领域如温度控制^[27]、目标跟踪^[89]等。

第二章 连续时间系统间接多模型 自适应控制

本章介绍基于连续时间系统的间接多模型自适应控制,对连续时间系统建立多自适应模型集或多个固定模型与自适应模型相结合的模型集,在多模型的基础上辨识模型参数,基于辨识的参数构成模型参考自适应控制器。这种多模型自适应控制可以极大地改善瞬态响应,覆盖大范围的参数不确定性,同时可以保证闭环系统稳定。

2.1 多自适应模型构成的多模型自适应控制^[9]

考虑如下线性时不变被控对象:

$$y_p = W_p(s)u \quad (2.1)$$

其中 $u: R_+ \rightarrow R$ 为输入, $y_p: R_+ \rightarrow R$ 为输出, $W_p(s)$ 为被控对象传递函数,满足

$$W_p(s) = k_p(Z_p(s)/R_p(s)) \quad (2.2)$$

$k_p \in R$ 且非零, $R_p(s)$ 和 $Z_p(s)$ 为首 1 的互质多项式,阶次分别为 n 和 $m(m < n)$,且多项式系数未知。

对被控对象传递函数式(2.2)作如下假设:

假设 2.1 被控对象传递函数式(2.2)阶次 n 、相对阶次 $n^* \triangleq n - m$ 已知, k_p 的符号已知。

假设 2.2 $Z_p(s)$ 为 Hurwitz 多项式。

多自适应模型参考控制器的结构如图 2.1 所示,它包括 N 个结构相同的间接控制器 $\{IC_j\}_{j=1}^N$ 。 N 个结构相同但辨识初值不同的自适应辨识模型 $\{I_j\}_{j=1}^N$,相应每一个 I_j 构成一个控制器 C_j ,辨识参数和控制器参数同时调整, N 个辨识模型同时工作,但只有一个控制器被连接到被控对象。而控制器的选择由指标切换函数