

自适应控制的理论及应用

冯 纯 伯

(东南大学自动化研究所, 南京)

摘 要

本文概要地介绍自适应控制理论的主要方面及其应用, 关于应用主要报导若干国内的实例。

一、前 言

自适应控制近年来得到了广泛的重视, 有关它的理论和应用国内外学者都做了大量的工作, 取得了大量的成果。自适应控制的理论仍在发展阶段, 虽然已经取得许多好的结果, 使自适应控制能够在一定领域内付诸实用, 但理论尚不完善, 还有许多疑难问题有待解决。在应用方面, 新的成功实例不断出现, 部分商品化产品已经出现, 在我国也取得了良好的成果, 因此密切注意自适应控制理论及其应用的发展是有必要的。

自适应控制的目的是使控制器能适应被控对象参数缓慢变化或对象特性难以确知的情况的。这种控制系统要能够在线调整控制器参数以适应情况的变化。常用的自适应控制器方案大致有: 编程控制、模型参考自适应 (MRAC) 和自校正控制 (STR)。第一种属于开环调节参数系统, 理论相对简单。本文将着重讨论后两种自适应控制方案的理论问题及其应用情况。

MRAC 最初应用于确定性连续系统, STR 则源于离散随机系统。最初设计的思路是不同的。但两者有许多相同之处, 两者均有两个闭路 (见图 1), 内环是一般反馈回

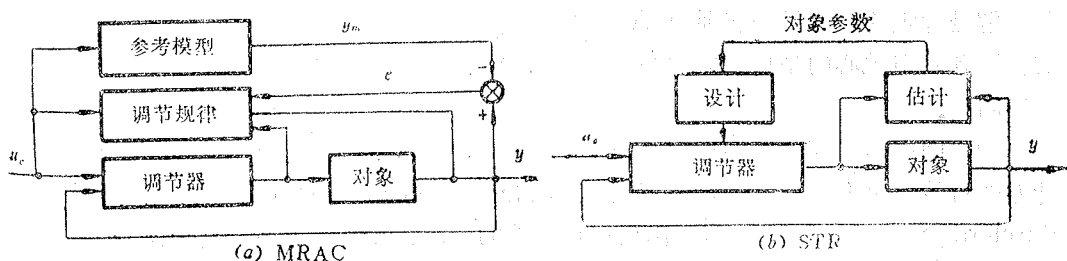


图 1 自适应控制系统

路, 控制器参数调节则由外环来实现。参数调节都是根据对象的输入输出数据来进行的。但调节参数的方案和内环的设计准则是不同的。在 MRAC 中调节器参数的调整可

以是直接的也可以是间接的,在STR中调节器参数的调整可以是隐式的(implicit),它和直接式(direct)MRAC相当,STR中调节器参数的调整可以是显式的(explicit)它和间接式(indirect)MRAC相当,详细讨论见[34, 36~39]。以上说明MRAC和STR有许多共同之处,它们碰到的理论上的问题有许多是共同的。以下我们将统一讨论它们的问题。

最近,Åström对自适应控制作了一个很好的综述^[1],文中附有369篇文献目录,大致包括了近年来的主要文献。另外,文献[2]中也收集了一些文献。有兴趣者可以查找这两篇综述。若有必要我们将引用这两篇综述中的文献。在本文的参考文献中引入国内部分学者的部分论文,目的是向国内同行介绍他们的工作。这里所引的论文和作者当然远远不能包括全部,有兴趣者只好自己去查找了。

二、理 论

因为要根据输入输出数据在线不断调节控制器的参数,因此自适应控制系统是本质非线性系统,因此而产生的问题相当多,相当复杂。要把这些问题都研究清楚是十分困难的。研究这些理论问题的目的,一方面是为了掌握现有设计的性能,另一方面是探索新的方案的途径。下文将讨论一些主要的理论问题。有一点要说明的是,目前的自适应控制系统大都认为参数的变化是缓慢的,参数变化的速率远低于控制器参数的适配过程,另外还认为系统的动态响应速度远大于参数匹配的速率,在这样的假设下可取得一些坚实的理论结果。如果以上条件不成立,则问题大为复杂化,理论分析的难度大为增加。虽然这类问题已引起了人们的重视,但至今为止,好的成果还不多。

1. 稳定问题

任何一个非线性系统的首要问题是稳定问题。和线性微分方程不同,非线性微分方程对某一解是稳定的,对另一解则可能是不稳定的,因此我们关心的是自适应控制系统的全局稳定问题。

稳定问题的研究曾是推动MRAC发展的主要因素。自从发现Whitaker的MIT设计方案可能引起不稳定之后,许多学者如Donalson和Leonides^[40], Shackcloth和Butchart^[41], Parks^[42]等提出根据稳定性的要求来设计MRAC系统,采用的方法是Lyapunov函数法,得到了积分型的参数调节规律。他们的设计要求全状态可测。这就难以实现。在此情况下MRAC的参数调节系统的一般结构形成如图2所示,所示系统也称为误差模型。图中 θ 表示参数向量, φ 为一回归信号向量, e 为误差。

为分析这类系统Landau等引入超稳定性理论^[32, 33, 43]。根据无源性(超稳定性、正实性)分析^[24],这类系统稳定的充要条件是 $G(s)$ 为严格正实。在一般情况下 $G(s)$ 不一定是严格正实的,为了保证图2所示系统是严格正实的,Monopoli^[44]引入了

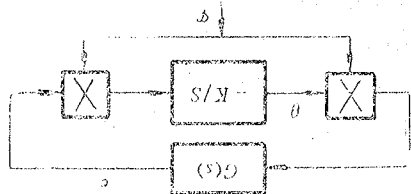


图2 误差模型

增广误差, Narendra^[50~52]等采用了特殊的过滤系统。还有可能想出其他的设计方案。为使系统全局渐近稳定,必须设法使误差模型中的直输回路 $G(S)$ 严格正实,至于代表自适应律的反馈回路一般是积分型的,但也可以是PID型的。若 $G(S)$ 严格正实,则只要反馈回路是正实的,则全系统仍是严格正实的^[62,43]。以上分析是建立在对误差模型的分析之上的。为使以上分析成立,要求回归向量 φ 是有界的,然而在没有证明系统是全局渐近稳定之前又不能肯定 φ 一定有界,这一问题一直被忽视,直到Egardt^[45~49]指出了回归向量 φ 和参数之间的关系可显式表示出来,从而得到了稳定性的严格证明,证明的关键之点在于说明参数误差是有界的。Egardt对MRAC和STR系统作了统一的考虑。

对于直接的MRAC系统,稳定性的证明建立在以下假设条件成立的基础上:

A1 系统的相对阶已知; A2 系统静态增益的符号已知,

A3 系统无不稳定的零点; A4 系统模型的阶和参考模型的阶一致。

以上所列假设条件是相当苛刻的。例如对于离散系统就要求系统时延已知且不变。许多连续系统经采样处理后常可能变为非最小相位系统,这就和A3不符。许多对象的特性很难精确描述,尤其是常存在高频特性的不精确性,在这种情况下无法选择一个参考模型在阶次上和对象完全一致,这就给稳定性带来很大的麻烦。

前已说明,目前分析一般的自适应系统时都假设系统参数的变化率很低,可以忽略不计,我们正是对定常线性系统利用Lyapunov函数法或Popov的超稳定性理论,求得了满足一定的假设条件下可保证系统稳定的自适应律。这种自适应率虽然可以保证系统稳定,但参数适配的过程还依赖于外界激励的条件,对此我们下文中还将进一步讨论。不管是对于确定性的连续系统或是离散的随机系统,这个参数适应过程都不可能很快,参数适配速度远低于系统的动态响应的速度。如果不是这样,就会出现许多复杂的尚有待探索研究的问题。试看图2的所示系统,对于零初值的情况可以得到下式

$$-\frac{d\theta}{dt} + k\varphi[G(p)\varphi^T\theta] = 0, \quad (1)$$

式中 $G(p)$ 为微分算子,它作用于时间函数 $\varphi^T\theta$ 。首先假设自适应回路的变化率远低于系统的动态响应速度,与 $\varphi(\theta)$ 相比 θ 可看成常数,于是根据Krylov和Eogoliubov^[53,54]的平均法由(1)式可得

$$-\frac{d\theta}{dt} + k\varphi(\theta)[G(p)\varphi^T(\theta)]\theta = 0, \quad (2)$$

式中 $\overline{(\cdot)}$ 表示取平均。只要 $G(S)$ 是严格正实的,同时系统得到充分激励,在此情况下 $\varphi\varphi^T > 0$ 得到保证,于是(2)式中 $\overline{(\cdot)} > 0$,因此系统稳定。现在假设 θ 变化远快于 φ ,于是由(1)可近似得到

$$-\frac{d\theta}{dt} + k\varphi\varphi^TG(p)\theta = 0. \quad (3)$$

对 φ_0 线性化得到此系统的特征方程为

$$\det[sI + k\varphi_0\varphi_0^T G(s)] = s^{n-1}[s + KG(s)] = 0, \quad (4)$$

其中 I 表示么阵, $K = k\varphi_0^T\varphi_0$. 若 $G(s)$ 的零极点之差大于等于 2, 只要 K 充分大, 系统一定不稳. 这就是说只要充分强地激励系统, 就可使系统不稳. 为避免这一缺点, 人们提出以下经过修正的自适应律

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{d}{1 + \varphi^T\varphi} \varphi e. \quad (5)$$

虽然系统稳定性分析是近来自适应控制理论发展中取得的重大进展, 但以上分析表明这种稳定性的证明都是有一些严格限制条件的. 由于自适应控制系统是本质非线性、时变的系统, 因此要把问题分析透还是相当困难的.

2. 激励问题

系统跟踪误差 e 衰减到零并不等于自适应控制器的参数已经适配. 若静态增益选择得正确, 则对于一定的输入信号, e 可相当快地衰减到零, 但在这过程中控制器的参数还远没有完成适配. 参数适配还依赖于系统是否持续激励 (Persistency of excitation). 持续激励的含义有两层, 一是持续激励的时间必须充分长, 否则参数来不及达到基本匹配. 若被激励起来的动态过程很快结束, 那么只能留待下一次被激励时再启动参数的适配. 按前面的分析, 若系统严格满足假设条件 A1~4, 按理系统即使不激励也应该稳定. 然而分析 (2) 式说明系统必须充分激励才能保证 $\varphi\varphi^T > 0$, 否则, 若自适应回路仍继续工作, 则会引起“喷发” (Bursting) 现象^[81]. 持续激励的另一层意思是要求将系统的各个振模都能激发起来. 从物理上看这一要求是容易理解的, 若系统的某一振模没有被激发起来, 就不能在输出信号中提取出它的信息, 因此对系统的了解是不完整的, 控制器的参数就不能正确匹配. 从数学上看, 为要辨识 n 个参数, 不论采用最小二乘型的或梯度型的 (随机逼近法) 参数递推算法, 都要在 n 维参数空间中形成一凸的或严格凸的函数, 对它进行优化递推处理, 若没有充分激励, 则得不到完整的凸函数, 完整的参数辨识也就不可能. 一个 n 个不同频率的信号定义为 $2n$ 阶激励信号. 为使一个单输入单输出的系统充分激励起来, 要采用的激励信号的阶次应为零极点数之和加 1, 即等于要辨识的参数数目.

需要指出一点, 系统辨识和自适应控制同样需要充分激励, 但两者是有所不同的. 对于系统辨识, 系统的参数并不改变, 相对于被辨识的系统辨识器处于开环, 因此适用于定常线性系统的谱分析方法是严格适用的. 对于自适应控制系统, 参数调节处于闭环, 由于反馈的作用常使激励信号减弱, 因此阻碍参数适配的进程. 另一方面, 由于参数调节处于闭环, 因此严格说来这是一个时变的非线性系统, 对定常线性系统适用的谱分析方法严格说来是不适用的, 这一情况和前面的关于稳定性的讨论是类似的. 在这种情况下, 若要严格考虑系统的时变及非线性的影响, 应对激励条件提出怎样的严格要求, 笔者认为尚待研究.

前面提出反馈常使激励减弱,这对控制不利,对此陈翰馥作了深入的分析,并提出采用指数衰减外加激励信号,以改善性能^[7-8]。

3. 参数收敛问题

对参数匹配过程的分析是自适应控制理论中的一个重要问题,它所研究的问题有参数收敛的条件、可能的收敛点和收敛速度等。前已说明参数收敛与激励条件有密切关系。参数收敛的速度与算法本身有密切关系,一般来说最小二乘型的估算算法能提供远比投影型(随机逼近型)的算法为快的收敛速度。可以证明在充分激励的情况下,最小二乘法 and 随机逼近法都可提供按指数衰减的收敛速度,但衰减指数可相差很远。对于参数收敛问题,陈翰馥等^[3-6]作了细致的分析。

对于系统辨识同样要分析收敛的各方面的问题。前已指出,由于自适应控制中要研究的参数收敛问题是闭环系统的参数匹配过程的问题,因此要复杂一些。

为适应实际情况的需要,对于参数收敛问题,笔者认为以下问题是值得深入研究的。

(1) 如何提高收敛速度,如何利用有限数据来辨识参数。

参数收敛速度当然是愈快愈好,如何设计算法以提高收敛速度是值得探讨的问题。参数辨识过程相当于对目标函数优化的过程。常用的算法都是梯度法的变种,而且是一步寻优。我们知道数学规划法中有许多快速算法可以借用,笔者在文献^[65]中提出多步递推算法就是可行的一种。现有的一步递推算法没有把历史数据中的有用信息充分提取出来加以利用,若能从输入输出数据中提取充分的信息量,当可提高收敛速度。

(2) 近似建模问题。

由于很难知道系统的精确结构,或者即使能知道也很难采用高阶的参数模型与之匹配,因此在实用中只能采用简化模型,这样建模就只能是有误差的。这就提出了一个近似建模问题。在这方面有许多问题有待研究,例如建模的结果将会和输入信号的形式有关,和选择的模型的结构有关,也存在一个辨识算法的鲁棒性问题,等等。袁震东等^[10-13]研究了传递函数的辨识问题,他们证明了传递函数估计的强一致性渐近正态性,并给出了传递函数估计精度的一些关系。刘兵等^[63]提出了频率特性的分段时域递推估算方法,给出了估算精度。以上的建模都是本质非参量的建模,有重要意义,这方面的研究有待继续。

4. 鲁棒性问题

假设 A4 要求参考模型和实际对象同等复杂,这实际上是做不到的。一般参考模型都比被控简单,忽略了实际系统中存在的高频特性,这就有可能引起系统不稳。自从 Rohrs^[1]等指出未建模高频特性可能引起失稳以来,鲁棒问题就成为自适应控制理论中的热门问题,文献[2]对鲁棒性问题作了综合介绍。

一个稳定的系统总存在一定限度的鲁棒性。文献[15,16,18]说明 MRAC 系统对外干扰、测量误差、时变参数等都具有一定的鲁棒性,对于未建模动态特性,也不都是不能稳定,陈宗基^[16,18]指出若未建模动态特性的零极点数目相同,则仍会有一定的鲁棒性。在物理上这一结论是容易理解的。这种情况下相当于图 2 所示系统中的直输回路中串入一个严格正实的传递函数,根据文献[62],直输回路仍可能是严格正实的,因此

系统稳定。

为提高自适应系统的鲁棒性,可针对现有的一些自适应算法加以适当的改进,可采用的主要途径有:

(1) 改变自适应律,引入 σ -修正^[50],这相当于使图2中反馈回路严格无源化,从而提高全系统的严格无源度,从而提高稳定性。

(2) 引入灵敏区^[60],使对未建模动态特性不敏感。

(3) 引入逻辑切换^[65],保证即使有未建模特性存在时仍能 使图2中的直输回路严格无源化。

(4) 采用混合式自适应控制,只在离散时刻调整控制器的参数,在参数未调整期间系统处于线性工作状态,这样减弱了本质非线性的影响,从而提高鲁棒性。

今后鲁棒问题仍将是自适应控制理论中的热点。系统的鲁棒性显然与设计方案密切相关,探索鲁棒性强的设计方案是有重要实际意义的,对此我们在下文中还将讨论。我们认为为提高自适应控制系统的鲁棒性,首先必须选择未采用自适应律的控制器是鲁棒的。

5. 其他非线性问题

许多STR系统是建立在优化某一指标函数的基础上的,但并非所有的算法都能保证控制器参数能收敛到全局最优点。对于能保证收敛到最优控制点的情况称之为“自调整”(Self-tuning),Kumar^[35,55]证明有些算法是“自调整”的,有些不是。以上是考虑不存在未建模特性情况,若存在未建模特性,情况当然完全改观。

近年来还发现在自适应控制系统可能出现分岔和混沌现象。

6. 新的自适应控制方案的探讨

为提高自适应系统的鲁棒性,有必要探求新的设计方案。如果把自适应控制系统看成是一个参数跟踪问题,那么现有的不少设计方案相当于要求在参数空间中实现由点到点的追踪,这可谓“紧配合”,显然可以理解,实现起来十分困难,因而引起了一系列的问题。自适应控制的目的无非是解决一些对象特性变化和不确定性的问题,并没有必要一定实现点到点的紧配合。若把这一要求改为参数域到域或函数带到带的配合将可能方便得多。因此作者认为非参量化的自适应控制系统的设计是有重要实用意义的。刘兵等^[64]提出了一种频域设计方法就是有意义的尝试。

近年来国内外一些学者对自适应鲁棒控制有兴趣,作者认为这也是一个有意义的问题。根据以上讨论的相似观点,作者认为重要的不仅是实现鲁棒控制器的参数跟踪,而更是如何保证鲁棒控制器的鲁棒性不会变坏。

最近Nussbaum^[56]提出了万用镇定器(Universal stabilizer)的概念,Morse^[57,58]将它推广应用于一般系统,这一思想新颖,提出了一个新的探索路子。

近年来国际上对如何把预测控制的思想应用于自适应控制给以广泛的注意^[20],国内也有人在这方面进行工作,例如袁著祉^[66]的工作。这种控制方案似乎更符合对偶控制(Dual Control)的原理,它与鲁棒性强的二次型最优状态反馈系统有密切关系,故预计有可能取得较好的鲁棒性。

三、应 用

虽然上面说自适应控制理论还存在这样那样的缺陷,但这并不阻碍自适应控制在工业中得到愈来愈广泛的应用。国际上已经出现自适应控制的设计公司,在市场上也出现了某些商品。一种较典型的自校正调节器的结构图如图 3 所示。在此系统中正常情况靠

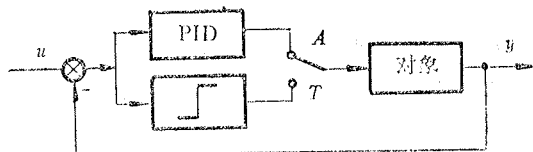


图 3 自适应整定系统

PID 调节,需要重新整定 PID 的参数时开关切向 T 端,引入高增益继电器,系统产生自振,然后测量振幅和相位,或者用 FFT 测定对象的在若干点的频率特性,即可重新调整 PID 的参数,这种系统可用单板机实现。

国内在自适应控制方面也取得了许多有成效的成果,就作者粗略的了解,可举出以下一些:

1. 过程控制方面

舒迪前在加热炉的自校正调节取得了实际效果^[21-23]。袁著祉和韩志刚分别在不同的造纸厂实现了自校正调节,袁著祉还试用了广义预测自校正调节,运行表明它有良好的鲁棒性。以上这些控制都是多变量的,各有特色。

2. 飞行器控制

陈宗基等^[17,10]将模型参考自适应控制应用于飞行器的控制和抑制飞机舵机的自振,后者是多年来没有解决的疑难问题。

史维对某型靶机实现了自适应控制^[25],试飞表明,性能明显提高。

3. 传动控制

钱尧新等^[27]将 MRAC 应用于某型火炮调速系统,改善了系统动态性能。叶宁等^[26]在某望远镜上实现了 MRAC 控制。以上实践表明,由于采用了线性参考模型,使得原系统中一些非线性因素(如间隙、干摩擦等)的不良影响得到减弱。

以上所举的例都是或者通过鉴定、或者经过实用试验的成果。这些例子当然不代表全体,还有许多成果是作者不知道的。总的看来,对于一些慢过程 STR 可以取得实效,对于能较精确建模的对象 MRAC 行之有效。可以期望自适应控制将在我国得到日益广泛的应用。

四、结 束 语

经过三十来年的广泛研究,自适应控制理论取得了重大进展,诸如对稳定性分析,各种控制方案和算法的设计等都有了较深入的研究,在此基础上自适应控制已经付诸应用,在这些取得实用效果的自适应控制系统除了应用已有的理论成果外,也常根据实际

情况引入一些可解决实际工程问题的辅助措施。从本文的介绍可以看出,在这一领域仍然有许多理论问题有待解决。可以肯定自适应控制理论仍将处于快速发展之中。

这篇综述所涉及的面是有限的,国内同行所做的工作也远未能都作介绍,我们所讨论的问题也只限于定常线性系统的自适应控制,还有许多问题未涉及,例如,近年来时变系统的自适应控制引起了人们的注意,我国谢贤亚^[29,30]、李争^[31]做了些工作,这方面工作在发展之中。

限于作者的水平,文中难免有错误,欢迎指出。

致谢 在撰写此文时舒迪前、袁震东、陈宗基等同志提供了宝贵的资料和意见,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Åström, K. J., Adaptive Feedback Control, Proceedings of the IEEE, 75:2, (1987), 185—217.
- [2] 冯纯伯、罗宁苏、李晓明, 自适应控制的鲁棒性, 自动化学报, 13:6, (1987), 463—472.
- [3] Chen, H. F. (陈翰馥), Self-tuning Controller and Its Convergence Under Correlated Noise, Int. J. of Control, 35, (1982).
- [4] Chen, H. F., Strong Consistency and Convergence Rate of Least Squares Identification, Scientia Sinica, Series A, 25, (1982).
- [5] Chen, H. F., Recursive System Identification and Adaptive Control by Use of the Modified Least Squares Algorithm, SIAM J. Control and Optimization, 22, (1984), 759—776.
- [6] Chen, H. F., Caines, P. E., Strong Consistency of the Stochastic Gradient Algorithm of Adaptive Control, IEEE Tr., AC—30, (1985), 189—192.
- [7] Chen, H. F., Guo, L., Asymptotically Optimal Adaptive Control with Consistent Parameter Estimates, SIAM J. Control and Optimization, 25, (1987), 558—575.
- [8] Chen, H. F., Guo, L., Optimal Adaptive Control and Consistent Parameter Estimates for ARMAX, SIAM J. Control and Optimization, 25, (1987).
- [9] Chen, H. F., Guo, L., A Unified Approach to Tracking and Quadratic Cost for Stochastic Adaptive Control Systems, Preprints of the 10th IFAC World Congress, Munich, (1987).
- [10] Yuan, Z. D. (袁震东), Ljung, L., Black-box Identification of Multi-variable Transfer Functions, Asymptotic Properties and Optimal Design, Int. J. Control, 40: 2, (1984), 233—256.
- [11] 袁震东, 传递函数的时域估计及其应用, 华东师范大学学报(自然科学版), 3, (1984), 21—27.

- [12] Ljung, L., Yuan, Z. D., Asymptotic Properties of black-box Identification of Transfer Functions, IEEE Tr. AC—30, (1985), 514—530.
- [13] Yuan, Z. D., Ljung, L., Unprejudiced Optimal Open Loop Input Design for Identification of Transfer Functions, Automatica, 21, (1985), 697—708.
- [14] 袁震东, 基于ARMAX模型的广义预测控制, 控制理论与应用, 1, (1988), 12—17.
- [15] Cook, P. A., Chen Z. J. (陈宗基), Robustness Property of MRAC Systems, IEE Proc., (1982).
- [16] Chen, Z. J., Cook, P. A., Robustness of MRAC Systems with Unmodelled Dynamics, Int. J. Control, (1984).
- [17] 陈宗基、张洪铨, 自适应控制在飞行控制中的应用, 航空学报, (1982).
- [18] 陈宗基, 具有建模误差的MRAC系统的鲁棒性, 自动化学报, 12: 1, (1986), 53—61.
- [19] 陈宗基、高金源, 某飞机极限环振荡的抑制, 航空学报, (1986).
- [20] 陈宗基, 广义 Narendra 方案及其对建模误差的鲁棒性, 控制理论与应用, 4: 1, (1987), 67—76.
- [21] 舒迪前, 刘立, 胥一顺, 多变量自校正调节器及其在电加热炉上的应用, 自动化学报, 11: 1, (1985), 21—29.
- [22] 舒迪前等, 计算机控制电加热炉多变量自校正调节器, 控制理论与应用, 3: 4, (1986), 115—121.
- [23] 舒迪前、刘宏才, 尹怡欣, 具有通用性指标的多变量自校正控制器, 控制理论与应用, 4: 1, (1987), 18—29.
- [24] 冯纯伯、史维, 自适应控制, 电子工业出版社, 北京, (1986).
- [25] 史维、金伯寿、傅海帆, 无人机机载微机程序控制和自适应控制系统, 南京工学院学报, 6, (1987).
- [26] 叶宁、汪晓来、陈子衡, 用自适应控制改善天文望远镜低速性的仿真研究, 控制理论与应用, 3: 4, (1986), 13—19.
- [27] 钱尧新、胡维礼, 调速系统的模型参考自适应控制, 华东工学院学报, (1988).
- [28] Clarke, D. W., Mohtadi, C., Properties of Generalized Predictive Control (Survey), IFAC'87 10th World Congress, Preprints, 10, (1987), Munich, 63—74.
- [29] Xie, X., Evans, R. J., Adaptive Control of Discrete-time Time-varying Systems with Unknown Deterministic Disturbance, IEE Proc. 131, Pt. D, 3, (1984).
- [30] Xie, X. (谢贤亚), Discrete Time Stochastic Adaptive Control for Time-varying Systems, IEEE Tr, AC—29, 7, (1984).
- [31] 李争, 时变系统的自校正控制, 控制与决策, 2, (1986), 23—28.
- [32] Feldbaum, A. A., Optimal Control System, New York, Academic Press, (1965).
- [33] Landau, I. D., Adaptive Control—The Model Reference Approach, New York, Marcel Dekker, (1979).

- [34] Åström, K. J., Self-tuning Regulators-Design Principles and Applications, in K. S. Narendra and R. V. Monopoli, Eds., Applications, in K. S. Narendra and R. V. Monopoli, Eds., Applications of Adaptive Control, New York, Academic Press, (1980), 1-68.
- [35] Kumar, P. R., Optimal Adaptive Control of Linear-quadratic Gaussian Systems, SIAM J. Control and Optimization, 21:2, (1983), 163-178.
- [36] Egardt, B., Stability of Model Reference Adaptive and Self-tuning Regulators, Ph. D. Dissertation, Rep. CODEN: LUTFD2/TFRT-1017, Dept. of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, (1983).
- [37] Egardt, B., Unification of Some Continuous-time Adaptive Control Schemes, IEEE Tr. AC-24, (1979), 588-592.
- [38] Egardt, B., Unification of Some Discrete-time Adaptive Control Schemes, IEEE Tr. AC-25, (1980), 693-696.
- [39] Landau, I. D., Model Reference Adaptive Controllers and Stochastic Self-tuning Regulators-A Unified Approach, Trans. ASME, 103, (1981), 404-416.
- [40] Donaldson D. D., Leondes, C. T., A Model Reference Parameter Tracking Technique for Adaptive Control Systems, IEEE Tr. Appl. Ind., (1963), 241-262.
- [41] Shackcloth B., Butchart, R. L., Synthesis of Model Reference Adaptive Systems by Liapunov's Second Method, In P. H. Hammond, Ed., Theory of Self Adaptive Control Systems, Proc. 2nd IFAC Symp. (Teddington, UK, 1965), New York, Plenum, (1966).
- [42] Parks, P. C., Lyapunov Redesign of Model Reference Adaptive Control Systems, IEEE Tr. AC-11, (1966), 362-367.
- [43] Popov, V. M., Hyperstability of Control Systems, Berlin, FRG, Springer-Verlag, (1973).
- [44] Monopoli, R. V., Model Reference Adaptive Control with an Augmented Error Signal, IEEE Tr. AC-19, (1974), 474-484.
- [45] Feuer, A., Morse A. S., Adaptive Control of Single-Input Single-Output Linear Systems, IEEE Tr. AC-23, (1978), 557-569.
- [46] Egardt, B., Stability of Adaptive Controllers, Lecture Notes in Control and Information Science, 20, Springer-Verlag, (1979).
- [47] Larminat, Ph. de., On Overall Stability of Certain Adaptive Control Systems, Proc. of 5th IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation, Darmstadt, FRG, (1979).
- [48] Egardt, B., Stability Analysis of Discrete-time Adaptive Control Schemes, IEEE Tr. AC-25, (1980), 710-716.

- [49] Egardt, B., Stability Analysis of Continuous-time Adaptive Systems, SIAM J. Control and Optimization, 18, (1980), 540—558.
- [50] Narendra, K. S., Lin, Y. H., Valavani, L. S., Stable Adaptive Controller Design—Part II: Proof of Stability, IEEE Tr. AC—25, (1980), 440—448.
- [51] Narendra, K. S., Lin Y. H., Design of Stable Model Reference Adaptive Controllers, In Applications in Adaptive Control, New York, Academic Press, (1980).
- [52] Narendra, K. S., Stable Discrete Adaptive Control, IEEE Tr. AC—25, (1980), 456—461.
- [53] Krylov, A. N., Bogoliubov, N. N., Introduction to Non-linear Mechanics, (1937), English Translation, Princeton, NJ, Princeton Univ, (1943).
- [54] Mitropoliki, Y. A., Problems de La Theorie Asymptotique des Oscillations Non Stationnaires, Paris, France: Gauthier-Villars, (1966).
- [55] Kumar, P. R., Will Self-tuning Occur for General Cost Criteria? Proc. 23rd IEEE Conference on Decision and Control, Las Vegas, NV, (1984).
- [56] Nussbaum, R. D., Some Remarks on a Conjecture in Parameter Adaptive Control, System Control Letters, 3, (1983), 243—246.
- [57] Morse, A. S., An Adaptive Control for Globally Stabilizing Linear Systems with Unknown High-Frequency Gains, Proc. INRIA Conference on Analysis and Optimization of Systems, Lecture Notes in Control and Information Science, 62, Berlin FRG, Springer-Verlag, (1984), 58—68.
- [58] Morse, A. S., New Directions in Parameter Adaptive Control, Proc. of 23rd IEEE Conference on Decision and Control, Las Vegas, NV, (1984), 1566—1568.
- [59] Ioannou, P. A., Kokotovic, P. V., Adaptive Systems with Reduced Models, New York, Springer-Verlag, (1983).
- [60] Kreisselmeier, G., Anderson, B. D. O., Robust Model Reference Adaptive Control, IEEE Tr. AC—31, (1986), 127—133.
- [61] Anderson, B. D. O., Adaptive Systems, Lack of Excitation and Bursting Phenomena, Automatica, 21, (1985), 247—285.
- [62] 冯纯伯, 复合系统的输入输出特性分析, 中国科学, A辑, 9, (1985) 864—868.
- [63] Liu, B. (刘兵), Feng, C. B. (冯纯伯), Piecewise Identification of Frequency Characteristic of Dynamic Systems, Modelling, Identification and Robust Control, Edited by C. I. Byrns and A. Lindquist, North-Holland, (1986), 605—614.
- [64] Liu, B., Feng, C. B., Frequency Domain Approach for Design of

- Adaptive Control and System Identification, Proc. of IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation, New York, (1985).
- [65] 冯纯伯, 反馈系统的无源性分析及其应用, 自动化学报, 11:2, (1985), 111—117.
- [66] 袁著祉, 递推广义预测自校正控制器, 自动化学报 (将刊出).
- [67] 韩志刚, 稳定的参数自适应控制系统及其应用, 控制理论与应用, 4:4, (1987), 76—81.
- [68] 张运、潘继勤, 关于自适应模型跟踪控制的改进, 自动化学报, 13:6, (1987), 401—407.
- [69] 王柏林, 水轮发电机组的模型参考自适应控制, 自动化学报, 13:6, (1987), 408—415.
- [70] 钟慕良、苏春翌, 多变量极点配置自校正动态解耦控制器, 控制理论与应用, 5:1, (1988), 25—32.
- [71] 林威、刘美华, 多变量自适应控制——具有任意维数输入输出, 控制理论与应用, 5:1, (1988), 33—41.
- [72] 罗宗虔、戴劲, 自校正预估 PID 控制器, 控制理论与应用, 5:1, (1988), 100—104.

Theory and Applications of Adaptive Control

Feng Chunbo

(Institute of Automation, South East University, Nanjing)

Abstract

The main problems in adaptive control theory and its applications are discussed. Only domestic cases of applications are mentioned.