第13卷 第6期 自动化学报 Vol.13, No. 6
1987年11月 ACTA AUTOMATICA SINICA Nov., 1987

自适应控制系统的鲁棒性

冯纯伯 罗宁苏 李晓明
(南京工学院)

摘 要

本文讨论自适应控制系统的鲁棒性问题，说明了产生不稳现象的各种原因，介绍现有文献中解决这类问题的主要办法。

一、前 言

自适应控制系统的理论和应用近年来得到了迅速的发展，它是反馈控制理论及应用中的热门问题之一。这里所说的自适应控制是指参数自适应控制，它要解决的是以下一类系统的控制问题：

1. 参数缓慢变化的系统；

2. 某些参数，特别与高频特性有关的参数难以确知。

由于这类系统在工业系统中大量存在，因此自适应控制系统的理论受到了广泛的重视。

现有文献中关于自适应控制系统的设计方案大致可分为两类，一类是自校正系统[1]，一类是模型参考自适应系统[2,3]。或者也可把现有的自适应控制系统分为以输出反馈为基础的自适应系统和以参数辨识为基础的自适应系统。这两类系统设计的思路虽然不同，但对相当多的一些设计方案有其共同之处。这两类系统的许多问题也大致类同。近年来在自适应控制理论方面的主要成就是：对系统结构(系统零、极点数目，时延等)已知但参数未知或慢变的线性系统提出了一些能保证系统全局稳定的设计，给出了使控制器参数收敛或完全匹配的算法和条件。由于得到了这样的结果，因此自适应控制在过程控制或其它慢变过程的控制中，得到了广泛而有成效的应用。但是理论分析和仿真[4,5]表明，如果系统结构不确知，许多现有的设计都有可能引起失稳，这就是说存在一个鲁棒性不强的问题。这一问题已引起了控制界的广泛重视，纷纷提出各种改进方案。本文将综合介绍这方面的最新结果。上述两类自适应控制方案可能产生不稳的机理基本相似，因此本文对这两类系统作统一考虑。

二、不稳定现象的产生

凡是采用连续调整控制器参数或采用递推算法改变控制器参数的自适应系统，都是

本文于1987年1月5日收

本质非线性系统，对这类系统的分析是相当复杂和困难的. 前面已经提到现有的自适应控制系统基本上是在系统结构参数已知的情况下设计的，而且一般来说要在"持续激励"的条件下才能完成参数匹配. 在许多实际情况中这样的要求不一定能得到满足，而自适应系统又是非线性系统，因此在某些情况下就有可能失稳，这就是"鲁棒性"问题之所在. 下面分几种情况说明产生这一问题的原因.

1. 未建模动态特性的影响

用 Lyapunov 函数法或 Popov 的超稳定性理论设计的模型参考自适应系统具有图 1(a) 所示的误差模型[3]. Landau[28] 指出相当多的随机离散系统的参数估计器或自适应控制器的参数递推算法，其数学模型如图 1*b* 所示. 在系统结构参数确知的情况下，可以

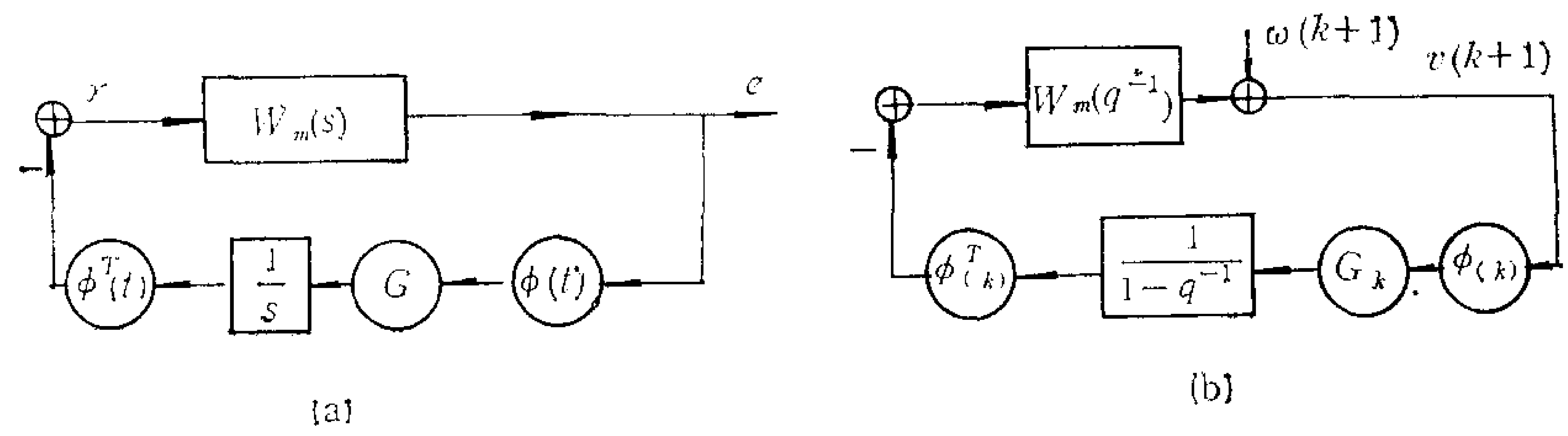

图 1

采取一些办法使图 1 所示系统是全局渐近稳定的. 现在我们用输入输出稳定性的分析方法研究这类系统. 输入输出特性分析方法对分析这类非线性系统有方便之处，近年来得到较多的重视[7,9,23,32,42]. 图 1 所示系统若是全局渐近稳定的，则在任意有界输入的作用下输出也必有界. 在此情况下，若"持续激励"条件能够满足，则控制器参数得以逐步达到完全匹配. 从输入输出稳定性的角度看，为使此系统全局渐近稳定，必须此系统的输入输出之间是严格无源的. 此系统中的反馈回路由自适应规律所决定，采用积分自适应律时此回路如图 1 所示，它是无源的(但非严格无源)，此反馈系统严格无源的充要条件是其直输回路是严格无源[42]. 当被控对象的结构参数已知时，可以采取一些巧妙的办法(例如文献[3]等所述)使直输回路 $W_m(s)$ 或 $W_m(q^{-1})$ 严格无源化，从而使得整个系统全局渐近稳定. 如果系统中存在未建模高频部分，这部分特性在设计中未能予以考虑，或很难予以考虑，在此情况下直输回路的传递函数就和原设计中的 $W_m(s)$ 或 $W_m(q^{-1})$ 不同，因此它可能不再是严格无源的，这样，全局稳定性就可能得不到保证. 还可以从另一角度来解释未建模高频特性有可能引起的失稳. 一般系统中都含有不同程度的高频特性，在线性系统设计中只要使剪切频率以外的高频频率特性不很突出，不破坏线性系统的稳定性即可，图 2 中的实线表明了这种情况. 但连续调节参数的自适应控制系统是一非线性系统. 设想系统输入某一频率的正弦信号，此信号将含于 $\phi(t)$ 或 $\phi(k)$ 之中，$\phi(t)$ 或 $\phi(k)$ 经积分再与 $\phi^T(t)$ 或 $\phi^T(k)$ 相乘后就会产生倍频，因此经反馈循环后就会在系统中产生高频，只要输入的频率合适就有可能将系统中的原来并不显著的高频成分显著激发起来，如图 2 中虚线所

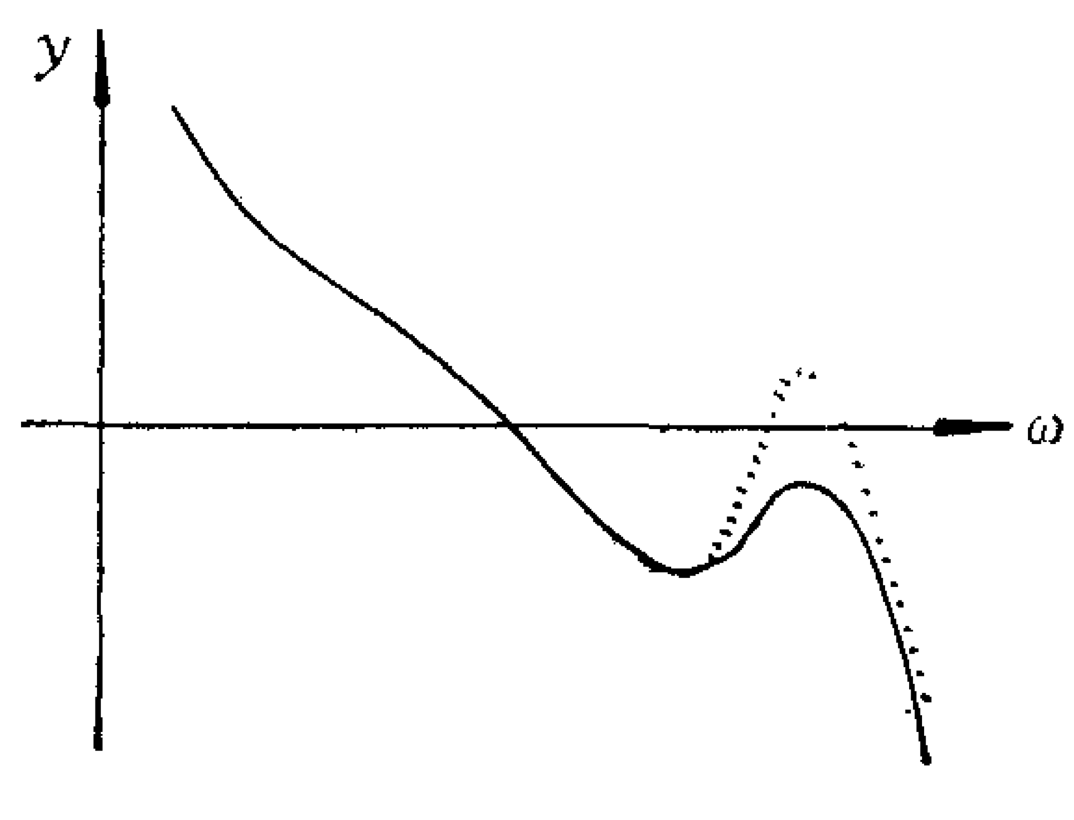

图 2

示．这样，系统就可能不稳定．这种现象在自适应增益愈高时愈为明显，这已为仿真所证实．以上分析表明，因为自适应系统为非线性系统，自适应回路的定常增益对不同频率的输入信号放大作用不一样，从而容易引起失稳．

2. 外加干扰的影响

对于线性系统，只要闭环稳定，则不论外加干扰加在何处都不致引起系统失稳．对于自适应系统这样的非线性系统，情况就不同了．前面已指出，要使系统全局渐近稳定，必须该系统对输入是严格无源的．若外加干扰作用的位置和控制输入不相同，则即使原系统已设计得对控制输入是严格无源的，但对外加干扰就可能不是严格无源的，在此情况下，若控制器参数尚未达到完全匹配，此时若外加干扰持续作用，就可能破坏全局稳定性．这也反映由于不能适用叠加原理，非线性系统的问题要复杂得多．

3. 激励条件的影响

目前自适应控制系统用的参数调整算法基本上是两类．一类是最小二乘法；一类是投影算法或随机逼近法．现有的参数适应律或者是这两类方法的各种变种；或两者的交替运用．不论哪一种方法，为使参数得以适配，必须“持续激励”的条件得以保证．参照对时不变定常线性系统的分析，直观地看，“持续激励”的一种含义是输入信号必须含丰富的频率成分，使系统的各个模态得以激发起来．设输入信号 $u(t)$ 的谱密度为 $S_u(\omega)$，输出信号 $y(t)$ 的谱密度为 $S_y(\omega)$，则有

$$S_y(\omega) = |W(j\omega)|^2 \cdot S_u(\omega).$$

为从输出 $y(t)$ 中提取系统传递函数的全部频率特性 $W(j\omega)$ 必须使系统输入的 $S_u(\omega)$ 能完全覆盖 $W(j\omega)$，若 $S_u(\omega)$ 只能覆盖 $W(j\omega)$ 的一部分，则利用输入输出数据也只能将被激发起来的模态的信息提取出来．“持续激励”的另一重意思是激励的时间必须足够长，使得利用这段时间内的输入输出数据足以使参数基本达到适配．以上参照对定常线性系统的分析，讨论了“持续激励”问题．实际上自适应控制系统是时变的非线性系统（但其参数时变速度远低于系统的动态响应），因此对“持续激励”应提出什么样的较精确的要求是比较复杂的问题．这一问题已引起重视．

最近 Anderson[15] 研究了四种常用的自适应算法，指出若系统的持续激励中断，则会产生“喷发 (Bursting)” 现象，形如图 3 所示．前已指出要经过相当长(理论上要无限长)时间才能达到控制器参数的完全适配．若激励中断，则由于系统内部干扰及信号处理中的量化误差等的影响，控制器参数在继续调整之中，并向不匹配的方向游动(因为此时系统的各模态没有充分被激励起来)，以致引起系统发散．但当系统发散时系统又获得充分激励，从而系统又重新收敛，这样的现象可以不断重复．对于没有未建模动态特性的系统，原自适应控制系统是全局稳定的，因此即使产生“喷发”现象尚不致于完全失稳．但若

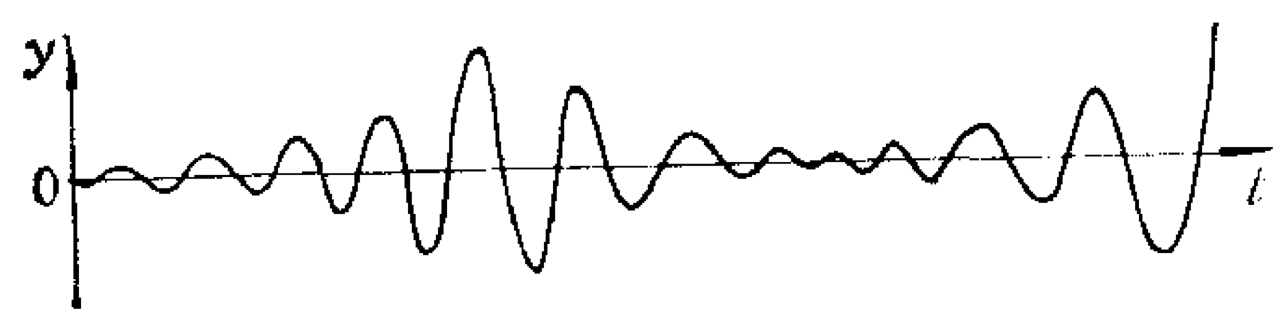

图 3

有未建模特性存在，情况就完全不同了，比较容易引起失稳. 由以上分析可以看出对于自适应系统如何确保持续激励是很重要的. 关于激励条件文献中有许多讨论，这是一个很重要的问题.

4. 系统零点的影响

不稳定的零点相当普遍地存在于离散时间系统中. 许多离散系统是由于对连续系统采样处理而获得，如果原连续系统极零点之差大于2，当采样周期足够小时，这样的系统离散化之后将产生不稳定零点. 当原系统的参数变化时，对应的离散系统的不稳定的零点的位置也将改变，这就给设计增加麻烦. 如果自适应控制系统采用零极点配置的方案，则为了避免不稳定零极点的对消，要解 Bezout 方程，这是比较麻烦的，计算中容易出现病态. 如果零点变动，则更是不便. 如果采用的是加权最小方差性质的自适应控制方案，则问题可得到一定程度的缓解. 但当零点在较大范围内变化时，也有失稳的可能. 以上问题对于逆稳定系统都是不存在的，一般逆稳定系统的设计要容易得多. 对于零点的影响文献[20]作了详细讨论.

5. 时延变化的影响

现有的自适应控制系统一般都假设时延已知且不变. 如果时延是变化的，则必须在线辨识时延，而辨识时延并不容易，特别是在闭环的情况下. 要稳定时延未知且变化的系统显然有较大的难度. 目前对变时延系统的自适应控制研究得还不多.

三、提高鲁棒性的各种方案

上一节的分析表明自适应控制系统的鲁棒性问题是由多种原因所引起的，但其中一个关键性的因素是未建模动态特性的影响. 针对这一情况近年来提出了许多解决办法，以下介绍其中主要的.

一般自适应控制系统都采用积分形式的自适应规律. Ioannou 和 Kokotovic[6] 提出了对一般自适应规律的 σ 修正，他们所采用的自适应规律实际上是一阶惯性调节规律，用奇异摄动分析方法，证明了采用这种方法之后，系统的鲁棒性得到改善. 从输入输出特性分析的角度来看，这样的结论是显然的. 根据文献[39]，在图1所示系统的反馈回路为一阶非周期环节，它是严格无源的，于是根据文献[39]中得到的无源性定理，整个系统的无源度增加，系统的稳定裕度增加. 顺便指出，采用 PID 型自适应规律也可达到相同目的，在文献中已有较多的讨论，这里不作详细的介绍.

为回避未建模特性的影响，Kreisselmeier[12-14] 提出了采用可变死区的办法. 设想未建模高频特性引起的动态响应均不超出死区，则可消除它对参数匹配产生的影响. 又因为未建模高频特性引起的响应随输入信号的大小而变，因此所采用的死区必须是可变的. 所采用的死区的形式是

$$D(e_1)=\begin{cases}0 & |e_1|\leqslant d_0,\\ e_1-d_0 & e_1>d_0,\\ e_1+d_0 & e_1<-d_0.\end{cases}$$

其中 e_1 为相对辨识误差. 死区的宽度 d_0 可变，其确定规则较复杂，对系统模型知道得愈

确切则 d_0 可愈小，此时自适应系统可适配得更好，否则 d_0 只能放大．所采用的参数适配规律相应地变为

$$\dot{\theta} = -\Gamma_1 \cdot D(e_1) - \Gamma_2 \cdot f(\theta),$$

$$f(\theta) = \begin{cases} 0 & ([\theta_{\min}]_i \leqslant \theta_i \leqslant [\theta_{\max}]_i), \\ \theta_i - [\theta_{\max}]_i & (\theta_i > [\theta_{\max}]_i), \\ \theta_i - [\theta_{\min}]_i & (\theta_i < [\theta_{\min}]_i). \end{cases}$$

由此可以看出要求知道适配参数的上界和下界．Kreisselmeier 的设计方案是很直观的，其方案是对模型参考自适应系统的改进．然而这里也提出一个新的问题，即在高频未建模动态特性存在的情况下如何实现降阶建模，把系统的低频部分的特性辨识出来．设想这一问题能够解决，则具有高鲁棒性的自适应控制系统的设计可自然解决．这一问题下面还将讨论．

未建模高频特性可能引起不稳的根本原因，在于连续调整控制器参数的自适应系统是非线性系统．前已说明对于线性系统这一问题并不存在．为缓解这种不利现象，Elliot[24] 提出间隔 $N(N>1)$ 个采样周期调整一次控制器参数，而参数辨识仍每采样一次进行一次．他证明此系统的性能得到改善．从物理概念出发这是容易理解的，调整参数的间隔放大就等于减弱自适应回路的非线性的影响，因此也就降低未建模高频特性可能引起的不利影响．事实上已有不少研究者提出间隔若干采样周期之后调整一次参数的方案，有不少自校正调节器的商品，采用的方案就是只在适当的时候调整一次参数．这样就回避或减弱了非线性问题．或者有人会提出异议：不及时地、不断地调整参数不能跟上被控对象参数的变化．对此我们有以下看法：目前有关自适应控制的理论绝大多数是针对系统特性未知但不变的情况的，因此若系统特性或参数变化的速率与目前所得参数适配的速率相当，则现有理论一般不能成立，既然不允许被控对象的参数快速变化，那么经过较多采样周期才调整一次控制器的参数就应该是可允许的．时变系统的自适应控制近年来引起了人们的关注．但这一问题的解决有其自身的特殊的难处，因为时变线性系统的线性控制本身就十分困难，至今扎实而有效的理论和方法还不多．时变系统的自适应控制理论尚在开创阶段．

未建模动态特性一般都是高频特性，它的模态频率比较高，考虑到这种情况，Rohrs[8] 提出适当选择较长的采样周期，减弱或消除对高频特性信息的提取，这相当于加过滤器，把高频信号过滤掉，这样自然使未建模高频部分的影响减小．

前面已经指出，从输入输出特性分析的角度看，未建模特性之所以有可能引起失稳，原因是由于图 1 所示误差模型中的直输回路在未建模特性存在的情况下，可能变成不严格正实．如果有办法使直输回路仍然严格无源化，则自适应系统自然是全局渐近稳定的．为此冯纯伯[42]提出了一种引入逻辑切换的自适应控制系统，其结构图如图 4a 所示．

图中 SFS 为一符号跟随系统，它始终保持 e' 和 x 同符号．取 $W_m(s)$ 的结构和对象的建模部分的结构完全一致(零极点数目相同)，当有高频未建模部分存在时误差模型(见图 4(b))中的 $W'_m(s)$ 和 $W_m(s)$ 不一致，我们并不要求 $W_m(s)$ 或 $W'_m(s)$ 严格无源，为使直输回路严格无源化，再引入一个严格无源的 $W_r(s)$，它的极点数目和 $W_m(s)$ 的相同．用 $W_r(s)$ 的输出 x 来改变 e 的符号，使 e' 的符号和 x 一致，但 $|e|=|e'|$．由

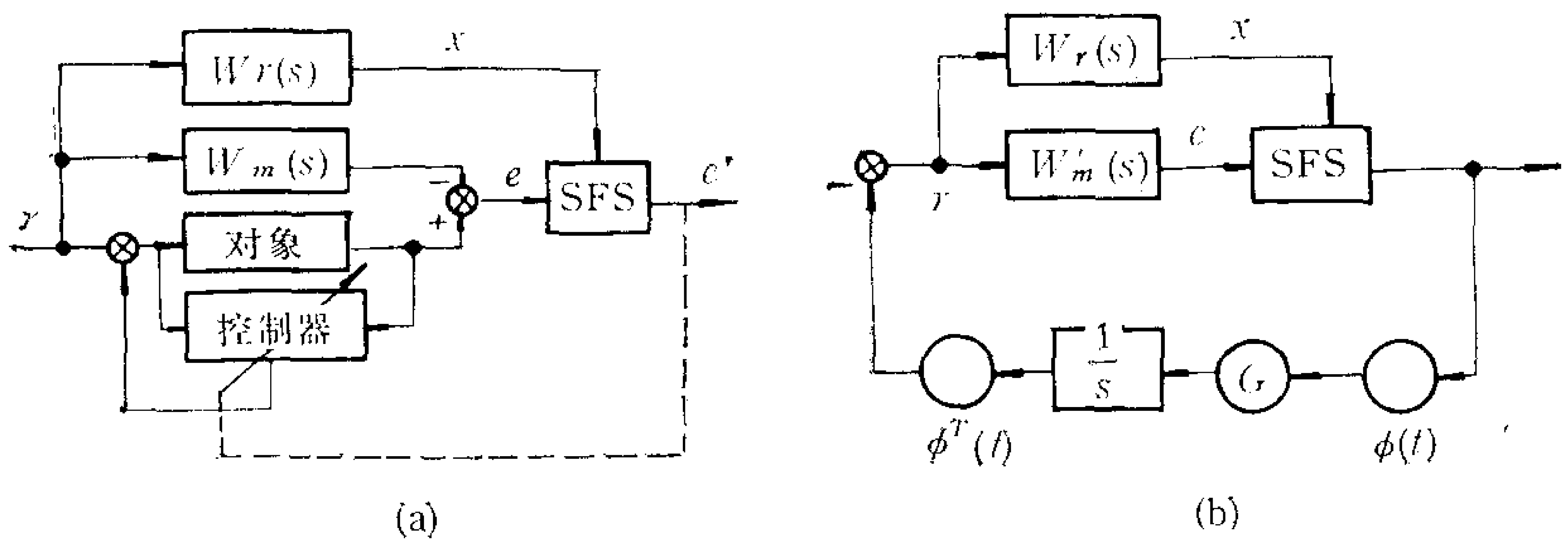

图 4

于 $W_r(s)$, $W_m(s)$ 的输入和系统的输入是相同的，因此此系统的误差模型如图 4(b) 所示. 只要 $W'_m(s)$ 是稳定的,则由于 $W_r(s)$ 严格无源和 SFS 的作用，直输回路已严格无源化了[42],所以系统是全局稳定的. 我们知道参数的自适应适配都是受误差 e 控制的，如果 $W_m(s)$ 不严格无源,则多数时候参数适配的过程不是收敛而是发散，在出现发散的时候只要改变 e 的符号即可. 如何判断何时发散呢? 只需利用 $W_r(s)$ 的输出的符号,这就是这种方案的基本思想. 当然,在长期有信号作用的情况 SFS 可能不断切换，实用上不方便. 为解决这一矛盾,可以将此方案和引入死区的方案结合起来,文献[43]讨论了这一问题.

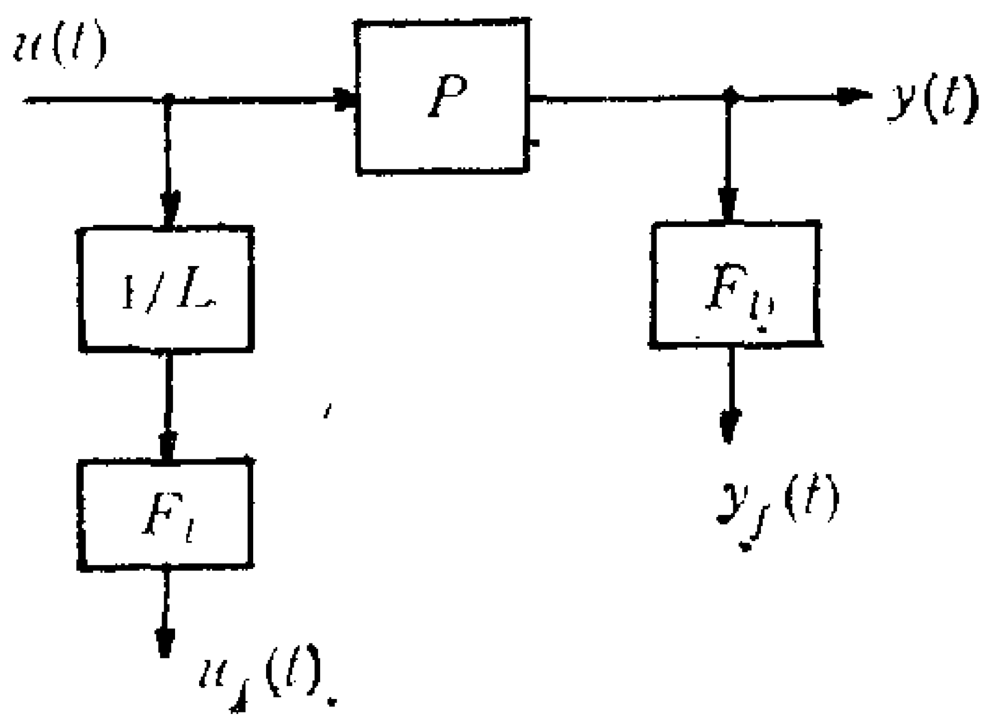

图 5

经典的线性反馈控制理论告诉我们，用频率法设计反馈系统可保证系统有较好的鲁棒性. 现有的自适应控制理论都是在时域中讨论的. 时域方法的优点在于便于计算和分析. 能否借用频域法鲁棒性好的优点呢? 刘兵等首先研究了这一问题，他提出了一种频率特性的时域递推估算方法[40]和自适应系统的频域设计方法[41]. 在频域设计中并不需要准确知道全频带的特性，只要知道一定频带（主要是低频段）的频率特性就可以了,为此刘兵等采用图 5 所示系统对系统频率特性 $P(\omega)$ 分频段进行辨识. 图中 F_l 为一定带宽的线性状态变量过滤器,要辨识的系统的频率特性的频带就在它的带宽内. L 为一稳定多项式,已知. 根据图 5，有

$$Y_f(\omega) = L(\omega)\cdot P(\omega)\cdot U_f(\omega).$$

利用 $y_f(t)$ 和 $u_f(t)$ 的数据可以估算出 $L(\omega)P(\omega)$. 他的办法是引入一个频域指标函数,利用 F_l 的输出数据,通过优化这一指标函数,求得 $L(\omega)\cdot P(\omega)$. $L(\omega)$ 的引入,是为了利用 $L(\omega)$ 的零点已知这个条件去消除随机干扰引起的估算偏差[44]. 这种方法适用于降阶建模,建模精度与 F_l 的带宽有关,带宽愈小,精度愈高. 要得到高精度，只要分段辨识频率特性即可. 刘兵把这种方法用于自适应控制系统的设计. 顺便指出，近年来对频率特性的时域辨识已引起人们的重视[33-35].

在第二节中我们已经指出，现有的递推参数辨识理论上要经过无限长时间才能收敛到真值. 如激励中断将产生不稳或“喷发”现象. 为克服这一困难，Solbrand、Ljung 等[36]

提出利用一段时间内记录下来的成批数据，重复使用进行辨识．重复使用可以不断消除初始误差．若所记录的数据已包含了对象特性的足够信息，则重复递推计算可以达到收敛到真值的目的．考虑到目前计算机存储技术发展极快，这种方案是容易实现的．有了这种办法，对自适应控制系统间隔一定时间整定一次参数就可以做到．

以上介绍的情况表明，若有一种方法能保证自适应系统在有未建模动态特性存在及持续激励不能保证的情况下，均能保证系统全局稳定，则是十分有意义的．这一问题引起了人们的兴趣．人们提出这样的问题：对于线性定常系统

$$\dot{X} = A \cdot X + B \cdot U,$$
$$Y = C \cdot X,\ u \in R^m,\ y \in R^r.$$

是否存在一个形如下式所规定的

$$\dot{Z} = f(Z, Y),\ Z \in R^q,$$
$$U = g(Z, Y),$$

C^∞ 万用自适应镇定器 (Universal Adaptive Stabilizer)，使此系统总保持稳定．Byrnes 等[31]得到的结论是：如果存在这样的 q 阶 C^∞ 万用自适应镇定器，则此系统的极点必可通过 q 阶线性补偿器把它们设置在左半闭平面内．以上结论表明光滑镇定器的局限性，这就从另一方面说明冯纯伯提出的带 SFS 逻辑切换系统的优越性，后者不是光滑镇定器．

对上述问题 Nussbaum 提出了很引人注目的研究结果[30]．他讨论了一阶系统

$$\dot{y} = ay + gu$$

的自适应镇定问题．此系统的 a，g $(g \neq 0)$ 包括其符号均不知道，问此系统是否可用

$$\dot{x} = f(x, y), \qquad x \in R^1,$$
$$u = h(x, y)$$

所规定的镇定器使系统保持稳定．Nussbaum 证明若 f 和 h 为有理函数，则这样的光滑镇定器并不存在．但若取无理函数 $f = y^2$，$h = x^2 \cdot \cos(x) \cdot y$，则可使此系统始终保持稳定．这一结果是很诱人的，$x^2\cos(x)$ 因此得名为 Nussbaum 增益．最近 Morse 等[32]把 Nussbaum 增益用于高阶系统的自适应镇定．Morse 的结果只要求系统是逆稳定的，并不要求系统必须稳定，只要求知道系统阶次的上界及极零点数目之差．Morse 并未分析他的设计方案的鲁棒性，这有待于深入的研究，但这种镇定方法不受激励条件的限制，有其研究价值．

在第二节中已经指出不稳定的零点给自适应控制系统的设计带来麻烦．文献[20]对此作了综述讨论．不稳定零点使系统的灵敏度增高，鲁棒性下降．为克服这一缺陷，人们比较注重采用 LQG 设计方法[26]，此法便于考虑不稳定零点，但计算较烦．LQG 设计要用系统输出的预估．既然要用到预估，人们自然会想到是否可以将自适应控制和预测控制结合在一起，形成一种新的自适应控制．预测控制[45]并不要求精确知道对象的全部特性，因此两者结合有可能克服未建模动态特性的影响，从而得到鲁棒性较好的控制方案．这方面的研究工作才开始[27,37,38]，可望能有好的结果．

四、结 束 语

本文讨论了自适应控制系统的鲁棒性问题，从机理上说明了产生这一问题的原因，简要地介绍了为解决这一问题近年来取得的一些结果，具体的计算和分析请参阅有关的文献．自适应控制系统是一种本质非线性系统，要完全研究清楚这类非线性系统的各方面的性质并不是件容易的事．所以，虽然近年来为解决鲁棒性问题已经取得不少成果，但尚不能认为这一问题已经圆满解决．本文中介绍的各种方法各有其长，但不能说能全面解决问题，看来“综合治理”及采取更进一步的“智能化”的办法可能是更可取的．另外，我们的讨论基本上局限于人们已经普遍接受的自校正及模型参考这两类自适应控制．当然，自适应控制也不只限于这两大类．举例来说，在苏联得到充分发展的变结构控制系统，对系统参数变化就具有很强的鲁棒性，并有良好的动态性能．这类控制方案近年来在西方引起很大兴趣，不少学者也把它归入自适应控制．总之，自适应控制理论尚在发展之中，鲁棒性问题仍是研究的核心问题之一．

参 考 文 献

[1] Åström, K. J. and Wittenmark, B., On Self-tuning Regulators, *Automatica*, **9**(1973), 195—199.

[2] Morse, A. S., Global Stability of Parameter Adaptive Systems, *IEEE Tr.* AC-**25**(1980), 433—440.

[3] Narendra, K. S. and Valavani, L., Stable Adaptive Controller Design——Direct Control, *IEEE Tr.* AC-**23** (1978), 570—583.

[4] Rohrs, C. E., Valavani, L., Athans, M. and Stein, G. Robustness of Continuous-time Adaptive Control Algorithms in the Presence of Unmodeled Dynamics.
Åström, K. J., A Commentary on C. E. Rohrs et al. Robustness of Continuous-time Adaptive Control Algorithms in the Presence of Unmodeled Dynamics, *IEEE Tr.* AC-**30**(1985), 881—889.

[5] Rohrs, C. E., Valavani, L., Athans, M., and Stein, G., Robustness of Adaptive Control Algorithms in the Presence of Unmodeled Dynamics, 21st IEEE Conf. on Decision and Control, 1982, 3—11, Oriando.

[6] Ioannou, P. A. and Kokotovic, P. V., Adaptive Systems with Reduced Models, New York, Springer-Verlag, 1983.

[7] Kosut, R. L., Input/output Properties of Adaptive Control Systems: Robustness and Reduced Order Design, IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation, 1985, 183—188, York.

[8] Rohrs C. E., Some Design Guidelines for Discrete-time Adaptive Controllers, IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation, 1985, 81—89, York.

[9] Kosut, R. L. and Friedlander, B., Robust Adaptive Control: Conditions for Global Stability, *IEEE Tr.* AC-**30**(1985), 610—624.

[10] Riedle, B. D. and Kokotovic, P. V., A Stability-instability Boundary for Disturbance-free Slow Adaptation with Unmodeled Dynamics, *IEEE Tr.* AC-**30**(1985), 1027—1030.

[11] Riedle, B. D. and Kokotovic, P. V., Stability Analysis of an Adaptive System with Unmodeled Dynamics, *Int. J. Control*, **41**(1985), 389—402.

[12] Kreisselmeier, G. and Anderson, B. D. O., Robust Model Reference Adaptive Control, *IEEE Tr.* AC-**31** (1986), 127—133.

[13] Kreisselmeier, G., A Robust Indirect Adaptive Control Approach, *Int. J Control*, **43**(1986), 161—175.

[14] Kreisselmeier, G., An Approach to Stable Indirect Adaptive Control, *Automatica*, **21**(1985), 425—431.

[15] Anderson, B. D. O., Adaptive Systems, Lack of Excitation and Bursting Phenomena, *Automatica*, **21**(1985), 247—258.

[16] Lee, T. H. and Narendra, K. S., Stable Discrete Adaptive Control with Unknown High-frequency Gains, *IEEE Tr.* AC-**31**(1986), 477—479.

[17] Goodwin, G. C. and Teoh, E. K., Persistency of Excitation in the Presence of Possibly Unmodeled Signals,

IEEE Tr. AC-**30**(1985), 595—597.

[18] Goodwin, G. C., Norton, J. P., and Viswanathan, M. N., Persistency of Excitation for Nonminimal Models of Systems Having Purely Deterministic Disturbances, *IEEE Tr.* AC-**30**(1985), 589—592.

[19] Lozano, R. L. and Goodwin, G. C., A Globally Convergent Adaptive Pole Placement Algorithm Without a Persistency of Excitation Requiement, *IEEE Tr.* AC-**30**(1985), 795—798.

[20] M'Saad, M., Ortega, R., and Landau, I. D., Adaptive Controller for Discrete-time Systems with Arbitary Zeros: An Overview, *Automatica,* **21**(1985), 414—423.

[21] Narendra, K. S., Annaswamy, A. M., and Singh, R. P., A General Approach to the Stability Analysis of Adaptive Systems, *Int. J. Control,* **41**(1985), 193—216.

[22] Narendra, K. S. and Annaswamy, A. M., Robust Adaptive Control in the Presence of Bounded Disturbances, *IEEE Tr.* AC-**31**(1986), 306—315.

[23] Ortega, R., Praly, L., and Landau, I. D., Robustness of Discrete Time Direct Adaptive Controller, *IEEE Tr.* AC-**30**(1985), 1179—1187.

[24] Elliott, E., Christi, R., and Das, M., Global Stability of a Direct Hybrid Adaptive Pole Placement Algorithm, 22nd IEEE CDC, San Antonio, 1983.

[25] Elliott, E , Christi, R., and Das, M , Global Stability of Adaptive Pole Placement Algorithms, *IEEE Tr.* AC-**30**(1985), 348—356.

[26] Clarke, D. W., Kanjilal, P. P., and Mohtadi, C., A Genaralized LQG Approach to Self-tuning Control, *Int. J. Control,* **41**(1985), 1509—1544.

[27] Martin-Sanchez, J. M., Shah, S. L., and Fisher, D. G., A Stable Adaptive Predictive Control System, *Int. J. Control,* **39**(1984), 15—34.

[28] Landau, I. D., Near Supermartingale for Convergence Analysis of Recursive Identification and Adaptive Control Schemes, *Int. J. Control,* **35**(1982), 197—226.

[29] De Larminat, Ph., Unconditional Stabilization of Linear Discrete System via Adaptive Control, *Syst. Control Lett.,* **1981**, 47—51.

[30] Nussbaum, R. D., Some Remarks on a Conjecture in Parameter Adaptive Control, *System and Control Letters,* **1983**, 243—246.

[31] Byrnes, C. I., Helmke, U., and Morse, A. S., Necessary Conditions in Adaptive Control, Modelling, Identification and Robust Control, Edited by C. I. Byrns and L. Lindequist, North-Holland, 1986, 3—14.

[32] Mudgett, D. R. and Morse, A. S., Adaptive Stabilization of Linear Systems with Unknown High-frequency Gains, *IEEE Tr.* AC-**30**(1985), 549—554.

[33] Ljung, L., Asymptotic Variance Expressions for Identified Black-box Transfer Function Models, *IEEE Tr.* AC-**30**(1985), 834—844.

[34] Yuan Zhendong (袁震东) and Ljung, L., Black-box Identification of Multivariable Transfer——Asymptotic Properties and Optimal Input Design, *Int. J. Control,* **40**(1984), 233—256.

[35] Yuan Zhendong (袁震东) and Ljung, L., Unprejudiced Optimal Input Design for Identification of Transfer Functions, *Automatica,* **21**(1985), Nov..

[36] Solbrand, G., Ahlen, A., and Ljung, L., Recursive Methods for Offline Identification, *Int. J. Control,* **41** (1985), 177.

[37] Åstrom, K. J., Adaptive Control with a Long Prediction Horizon, 25th IEEE Conference on Decision and Control paper, 1986, Dec. Athens.

[38] Mohtadi, C., Generalized Predictive Control, LQ or Pole-placement, A Unified Approach, 25th IEEE Conference on Decision and Control paper, 1986, Dec. Athans.

[39] 冯纯伯，复合系统的输入输出特性分析，中国科学，A 辑，1985.9.

[40] Liu, B. (刘兵) and Feng C. B. (冯纯伯), Piecewise Identification of Frequncy Characteristic of Dynamic Systems, Modelling, Identification and Robust Control, Edited by C. I. Byrns and A. Lindquist, North-Holland, 1986, 605—614.

[41] Liu, B. (刘兵) and Feng C. B. (冯纯伯), Frequncy Domain Approach for Design of Adaptive Control and System Identification, IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation, 1985, York.

[42] 冯纯伯，反馈系统的无源性分析及其应用，自动化学报，1985 年第 2 期.

[43] Feng C. B. (冯纯伯) and Wang H. F. (王海风), Design Schemes for Robust Adaptive Control Systems, 控制理论及应用，1986 年第 1 期.

[44] 冯纯伯、郑卫新、刘兵，系统参数估算的偏差补偿最小二乘法，控制与决策，1986 年创刊号.

[45] 席裕庚、张仲俊，一类新型计算机控制算法：预测控制算法，控制理论及应用，1985 年第 3 期.

[46] 袁著祉，递推广义预测自校正控制器，自动化学报待发表.

ROBUSTNESS OF ADAPTIVE CONTROL SYSTEMS

FENG CHUNBO LUO NINGSU LI XIAOMING
(Nanjing Institute of Technology)

ABSTRACT

An overview of the problem of robustness of adaptive control systems is given in this paper. The instability phenomena are discussed. The main methods for solving this problem are introduced.