HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

高等学校教材

自适应控制原理

ZISHIYING KONGZHIYUANLI

孙德保 汪秉文

华中理工大学出版社

自适应控制原理

孙德保　　汪秉文

华中理工大学出版社

自适应控制原理

孙德保　汪秉文

责任编辑　　殷伯明

*

华中理工大学出版社出版发行

（武昌喻家山）

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社印刷厂印刷

*

开本:787/1092　1/32　印张:8　字数:177　000

1991 年 12 月第 1 版　1991 年 12 月第 1 次印刷

印数:1-1　000

ISBN 7-5609-0612-5/TP・59

定价:2.10 元

(鄂)新登字第 10 号

前　　言

本书是在编者给自动控制专业高年级学生及硕士研究生讲授自适应控制的讲义基础上编写而成的，参考教学学时为 40 学时。本书主要介绍自适应控制的基本原理，它包括：自适应控制系统的组成，基本原理及设计方法，自适应滤波与预测，为讲授的需要也适当介绍概率统计与随机过程、正系统及波波夫超稳定性等方面的内容。

自从 50 年代末期由美国麻省理工学院提出第一个自适应控制系统以来，先后出现过许多形式完全不同的自适应控制系统。但从理论基础和设计原理来看，比较成熟的是两类自适应控制系统，一类是模型参考自适应控制系统，一类是随机自适应控制系统。模型参考自适应控制系统主要由参考模型，自适应控制器及可调系统组成。其主要作用原理是根据参考模型与可调系统之差，来调整自适应控制器的控制规律，使可调系统逐步趋近于参考模型，从而达到自适应控制的目的。模型参考自适应控制系统的设计原理主要基于非线性时变反馈控制系统的稳定性理论，它有两种方法，一是用李亚普诺夫稳定性理论来综合设计模型参考自适应控制系统，一是基于波波夫的超稳定性理论来设计模型参考自适应控制系统。随机自适应控制系统的作用原理是：该系统能在线实时地辨识受控系统的未知变量或变化，自动地校正控制器的控制作用，以便使控制效果最优或次最优，或达到某个预期的目标。具体地说，就是当受控系统的结构或参数未

知时，或者当结构或参数发生变化时，控制计算机能对这种结构或参数及时地进行辨识，并能按照一定的性能指标要求，确定出最优的控制作用，使受控过程能不断地沿预定的轨线前进。随机自适应控制系统理论的发展主要经历三个阶段：自校正调节器；自校正控制器；极点配置的自校正控制技术。目前，这两类自适应控制系统均得到广泛应用，本书将重点介绍这两类自适应控制系统的作用原理及设计方法。

全书共分四章。第一章概述，介绍正实引理及波波夫超稳定性理论；第二章辨识、滤波和预测，主要介绍自适应滤波和预测；第三章重点介绍自校正控制理论和方法；第四章介绍设计模型参考自适应系统的几种方法。

编　者

1990 年 8 月

目　　录

第一章　概　　述

§1.1　引　　言

现代科学技术的发展，对自动控制技术提出了越来越高的要求。自适应控制理论作为现代控制理论的一个重要分支，已引起人们高度重视，并吸引了控制界众多学者对此进行研究。近二十年来，这一领域的理论成果不断涌现，实际应用也愈来愈多。自适应控制从理论到实践正不断地深入发展。

自适应控制的思想来源于对实际系统的控制实践。被控系统中存在的不确定性因素使得控制变得十分困难。以严格数学理论为基础的最优控制，虽然在理论上可以得到一个使系统某项性能指标达到最优的控制器，但在实践中，最优控制实现的前提条件却往往不易满足。这是由于受控系统过于复杂，其内在规律没有被足够了解，或者是系统动态特性、周围环境在运行过程中发生了变化。比如，电炉的动态特性会随着加热工件的材料、体积、电网电压波动而发生变化；大型船只动态特性会因其在航行中的船速、吃水深度和风浪大小而不同；交直流调速系统的动态特性会因其内部某些参数变化，非线性因素存在及负载的变化而呈现很大差异。系统的不确定性使得人们无法把握系统运行的周围环境，无从建立受控过程准确的数学模型。这样，一般的反馈控制系统甚至最优控制都不能发挥其作用。因此需要有一种更复杂的控制器，它能用于动态未知的系统，并能自动地适应受控过程的特性变化。这种控制就是自适应控制。

自适应控制到目前为止还没有一个公认的统一的定义，但一个自适应控制系统至少应具有如下功能：它能对环境和过程本身进行监测，并实时地提供有关被控过程的各种输入、输出和状态信息；它必须将系统当前的性能与期望的性能指标进行比较，并作出相应的决策；它能自动地修正系统参数并调整控制作用，使系统性能指标达到或接近最优。

关于自适应控制系统的形式，目前在国内外理论上比较成熟，实践上比较成功的主要有两大类，一类是辨识与控制结合的随机自适应控制系统，其典型形式是自校正调节器(STR)，另一类是模型参考自适应控制系统(MRAS)。

针对被控对象动态未知且又受随机干扰，以致控制器参数无法确定的情况，自校正控制将在线辨识和控制结合在一起，其结构如图 1.1.1 所示。

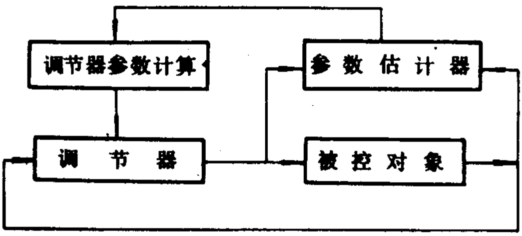

图 1.1.1　自校正控制的结构图

自校正控制的方法是首先针对被控对象引进一个数学模型，用在线辨识方法估计模型参数，根据辨识结果对调节器参数进行在线修正，从而达到自适应控制的目的。不同参数估计方法和不同的控制策略可以得到不同的自校正控制算法。

模型参考自适应控制系统的基本结构如图 1.1.2 所示。

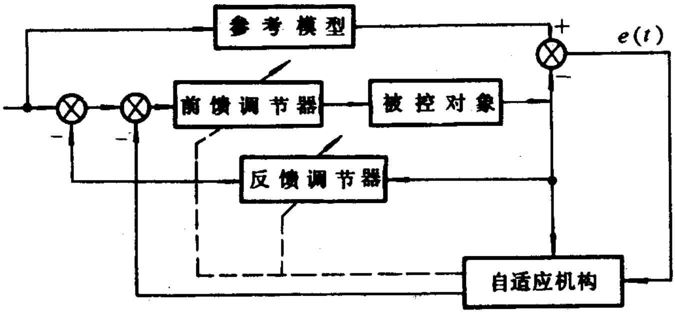

图 1.1.2　模型参考自适应控制结构图

对系统性能的要求由一个理想的参考模型来体现，未知对象由可调节的调节器进行控制。只要在系统运行过程中，被控对象与参考模型动态不一致，广义误差 $e(t)$ 就会通过自适应机构，遵循一定的自适应规律产生相应的调节作用。这种调节作用或者修正调节器参数，或者产生一个辅助控制作用，从而促使由调节器、自适应机构以及被控对象组成的可调系统与参考模型动态一致，使广义误差达到极小或趋近于零。

自校正控制技术最初用于解决随机离散时间调节器问题，而模型参考自适应控制是在解决确定性连续时间伺服问题中发展起来的。开始，人们对上述两种控制方法之间的联系还不很清楚，后经研究表明，这两种方法具有很紧密的联系。在模型参考自适应控制分析中起重要作用的正实条件，在自校正调节器的收敛性分析中同样起着重要作用。前者的参考模型和后者的预报模型都是用来规定控制目标的，且两种方法中的参数自适应算法具有相似的结构。因此，可将模型参考自适应控制和自校正控制作统一处理，在一个通用结构中进行论述。

自适应控制领域的早期研究是在 20 世纪 50 年代发展高性

能飞行器自动驾驶仪时开始的。早期的研究刚开始虽具有很大的热情，但由于缺乏先进的研究设备和坚实的理论基础，因而进展十分迟缓。60 年代人们对控制理论的发展作出了许多贡献，产生了状态空间方法、参数估计、随机控制和最优控制理论。70 年代在现代控制理论的基础上，自适应控制又有了显著的发展，在自适应控制的实现方案、系统结构、系统稳定性、收敛性分析等方面，都取得了重要的成果。功能强、价格低廉的微处理器的出现，使自适应控制成了控制技术中最活跃的一个领域。尽管它的基本理论问题目前还没全部解决，但它在工业生产实践中的许多应用却是成功的。可以预见，随着计算机技术的不断发展，人们对自适应控制理论和应用的研究必将不断地深入，成果也将不断地涌现。

§1.2　概率理论和随机过程

概率论和随机过程的理论和方法，是研究控制问题的有力工具，随着电子计算机的发展和普及，它们在滤波、预测和控制中得到了更为广泛的应用。为阅读本书方便，在此作简要介绍。

一、概率理论

自然界有许多现象，它们在一定条件下可能出现，也可能不出现，这种现象称为随机事件，简称事件。概率论就是研究随机事件数量规律的数学分支。

概率空间的概念是概率论研究的基础。

将 Ω 视为由抽象点 ω 的全体构成的空间，并且用 $\mathscr{T}$ 表示 Ω 中的一些子集组成的非空集合。如果称 $\mathscr{T}$ 为 Ω 中的一个 σ- 代数，或 σ- 域，则要求它满足

(1) $\Omega \in \mathscr{T}$；

(2)如果 $A \in \mathscr{T}$,则 $\bar{A} \in \mathscr{T}$, $\bar{A} = \Omega - A$;

(3)如果可列多个 $A_m \in \mathscr{T}$, $m = 1,2,\cdots$,则 $\bigcup_{m=1}^{\infty} A_m \in \mathscr{T}$。

设 $P(A)$ 是定义在 $\mathscr{T}$ 上的实值集函数,如果将 $P(A)$ 作为一个概率测度,则要求它满足

(1)对每个 $A \in \mathscr{T}$,有 $1 \geqslant P(A) \geqslant 0$;

(2)$P(\Omega) = 1$;

(3) 若 $A_i \in \mathscr{T}$,且对 $i \neq j$,有 $A_i \cap A_j = \varnothing$,则 $P(\bigcup A_i) = \Sigma_i P(A_i)$。

于是,称三元总体$(\Omega, \mathscr{T}, P)$为概率空间,且称点 ω 为基本事件,$\mathscr{T}$ 中的集 A 称为事件,$P(A)$ 为 A 的概率。

二、随机变量

为了能用数学方法研究随机现象,揭示客观存在着的统计规律性,下面引入随机变量的概念。

设 $(\Omega, \mathscr{T}, P)$ 为一概率空间,且设 $X(\omega)$ 是 Ω 的一个实值函数,如果 X 是关于域 $\mathscr{T}$ 可测度的(即 $\{\omega: X(\omega) \in \mathscr{G}\}$ 对每一个实的开集 $\mathscr{G}$ 是 $\mathscr{T}$ 的一个元素),则 X 是一个随机变量。

随机变量的期望值(或均值)定义为

$$E\{X\} = \int_{\Omega} X(\omega) dP。$$

若函数 F 定义为

$$F(x) = P\{\omega : X(\omega) \leqslant x\},$$

则称 $F(x)$ 为 P 的分布函数。显然 $F(x)$ 是非递减右连续的,且满足

$$\lim_{x \to -\infty} F(x) = 0;$$

$$\lim_{x \to \infty} F(x) = 1。$$

如果 $F(x)$ 是连续的,它就可用概率密度函数 $p(y)$ 来表示:

$$F(x)=\int_{-\infty}^{x}p(y)dy。$$

如果 $X(\omega)$ 是一个 n 维随机向量，定义随机向量的分布函数为

$$F(x)=P(\omega: X_i(\omega)\leqslant x_i,\quad i=1,2,\cdots,n)$$

相应地可用概率密度函数(如果存在的话)表示为

$$F(x)=\int_{-\infty}^{x_1}\cdots\int_{-\infty}^{x_n}p(y)dy_1\cdots dy_n$$

三、独立性与条件概率

设 $(\Omega,\mathscr{T},P)$ 为一概率空间，如果 n 个事件 $A_1,\cdots,A_n\in\mathscr{T}$ 满足

$$P(A_1\cap A_2\cdots\cap A_n)=P(A_1)\cdots P(A_n)$$

则称事件 $A_1,\cdots,A_n$ 是独立的。

设 $P(A_2)>0$，定义在事件 A_2 出现的条件下，事件 A_1 出现的条件概率为

$$P(A_1|A_2)=P(A_1\cap A_2)/P(A_2),$$

当且仅当 A_1 和 A_2 相互独立时，有

$$P(A_1|A_2)=P(A_1)。$$

如果 X 是定义在$(\Omega,$a $,P)$ 上的一个随机变量，定义 X 的条件均值为

$$E\{X|A\}=\int_{\Omega}X(\omega)P(d\omega|A)。$$

一般地，如果 $\mathscr{T}_1$ 是一个 $\mathscr{T}$ 的 σ-可加子代数(即 $\mathscr{T}_1$ 包括空集$\varnothing$并且在求补和可数的并运算下是封闭的)，那么 X 关于 $\mathscr{T}_1$ 的条件期望可写为 $E\{X|\mathscr{T}_1\}$，且

(1) $E\{X|\mathscr{T}_1\}$是 $\mathscr{T}_1$ 可测度的；

(2)对所有的 a $\in\mathscr{T}_1$，$\int_A E\{X|\mathscr{T}_1\}dP=\int_A XdP$ 。

如果 X 是集 B 的特征函数(即 $X(\omega)=1,\omega\in B;X(\omega)=0,$

$\omega \notin B$)，则 $E\{X|\mathscr{F}_1\}$是 B 的条件概率。如果 $\mathscr{F}_1$ 是由 $\{Y_1,\cdots,Y_n\}$ 生成的 σ- 代数，可将条件期望写为 $E\{X|Y_1,\cdots,Y_n\}$。

条件期望的性质为

(1)如果 $A = E\{X|\mathscr{F}_1\}$，$B = E\{X|\mathscr{F}_1\}$，则 $A = B$，a.s.（符号 a.s. 意指"几乎处处"）；

(2)如果 X 是关于 $\mathscr{F}$ 可测度的，则

$$E\{X|\mathscr{F}_1\} = X, \qquad \text{a.s.};$$

(3)如果 X 对 $\mathscr{F}$ 的每个集是独立的，则

$$E\{XY|\mathscr{F}_1\} = E\{X\}E\{Y|\mathscr{F}\}, \qquad \text{a.s.};$$

(4)如果 $\mathscr{F}_{n-1}$，$\mathscr{F}_n$ 是 $\mathscr{F}$ 的子 σ-代数，且 $\mathscr{F}_{n-1}\subset\mathscr{F}_n$，则

$$E\{E\{X|\mathscr{F}_{n-1}\}|\mathscr{F}_n\} = E\{X|\mathscr{F}_{n-1}\}, \qquad \text{a.s.},$$

$$E\{E\{X|\mathscr{F}_n\}|\mathscr{F}_{n-1}\} = E\{X|\mathscr{F}_{n-1}\}, \qquad \text{a.s.}。$$

上述结果称为条件期望的平滑特性，特别

$$E\{E\{X|Y_1,\cdots,Y_{n-1}\}|Y_1,\cdots,Y_n\}$$
$$= E\{X|Y_1,\cdots,Y_{n-1}\}, \quad \text{a.s.},$$
$$E\{E\{X|Y_1,\cdots,Y_n\}|Y_1,\cdots,Y_{n-1}\}$$
$$= E\{X|Y_1,\cdots,Y_{n-1}\}, \quad \text{a.s.}。$$

如果 $\mathscr{F}_{n-1}\subset\mathscr{F}_n\subset\mathscr{F}$，$n=1,2,\cdots$，则$\{\mathscr{F}_n\}$是一个递增子 σ-代数序列。

四、随机过程

上面讨论的随机变量和随机向量的取值是不依赖于时间和其它参数的，而在许多实际问题中，往往还须观察和研究随机现象的演变过程，这就是随机过程理论研究的内容。

设已知概率空间(Ω，$\mathscr{F}$，P)及参数集 $T\subset(-\infty,\infty)$，如对每一 $t\in T$，有一定义在此空间上的随机变量 $X(t,\omega)$，($\omega\in\Omega$)，就称$\{X(t,\omega),t\in T\}$(简记为$\{X(t),t\in T\}$)为随机过程。t 一般表示时间。对于每一个 t，$X(t,\omega)$是随机变量，$\omega\in\Omega$。对于每一个 ω，

$X(t,\omega),t\in T$ 称为随机过程的样本函数或实现。

定义随机过程的均值 $\mu(t_1)$和协方差 $C(t_1,t_2)$分别为

$$\mu(t_1) = E\{X(t_1,\omega)\},$$
$$C(t_1,t_2) = E\{[X(t_1,\omega) - \mu(t_1)][X(t_2,\omega) - \mu(t_2)]^T\}。$$

如果随机过程$\{X(t),t\in T\}$对所有 $t\in T$ 的均值和协方差都存在,则称它为二阶矩过程。在二阶矩过程中,研究得最多的是一种称为宽平稳过程的随机过程。

如果一个随机过程$\{X(t),t\in T\}$满足

(1)均值 $E\{X(t)\}=\mu$ 为有限常数,

(2)协方差 $C(t_1,t_2)$仅是$|t_1-t_2|$的函数,

则这个随机过程是宽平稳过程。

与宽平稳过程相对应的有所谓严平稳过程。如果对任一有限集$(t_1,\cdots,t_N)$,即 T 的任一有限子集$(X(t_1+\tau),X(t_2+\tau),\cdots,X(t_N+\tau))$的联合分布不依赖于 τ,则称随机过程$\{X(t),t\in T\}$为严平稳的。

严平稳过程的一切有限维分布函数不随时间的推移而改变。容易看出,严平稳过程不一定是宽平稳的,因为严平稳过程不一定有二阶矩;反之,宽平稳过程也不一定是严平稳过程,因为它不一定符合严平稳过程的定义。由于对宽平稳过程的研究和应用比较多,因此常把宽平稳过程简称为平稳过程。

对于一个平稳过程$\{X(t),t\in T\}$,如果

$$\lim_{T\to\infty}\frac{1}{2T}\int_{-T}^{T}X(t)dt = E\{X(t)\},\quad \text{a.s.},$$

则称这个过程的均值具有各态历经性(或称遍历性)。相应地,如果

$$\lim_{T\to\infty}\frac{1}{2T}\int_{-T}^{T}[X(t_1) - \mu(t_1)][X(t_2) - \mu(t_2)]^T dt$$

$$= E\{[X(t_1) - \mu(t_1)][X(t_2) - \mu(t_2)]^T\} = C(t_1, t_2),$$

则称这个过程的协方差具有各态历经性。

各态历经性表明，平稳随机过程的一个样本按时间（足够长）的平均可以描述这个过程的统计平均。这样，实践中当获取样本函数簇有困难时，各态历经性给解决实际问题带来很大的方便。值得注意的是平稳过程不一定是各态历经的，但由于各态历经性的条件比较宽，因此处理实际问题时总是首先假定过程是各态历经的。

在宽平稳情况下，可将 $C(t_1, t_2)$ 写作 $C(\tau)$，其中 $\tau = t_1 - t_2$。$C(\tau)$ 的傅立叶变换称作谱密度函数，用 $\varphi(j\omega)$ 表示。

这样，对于离散时间过程，可以得到下面的傅立叶变换对：

$$\varphi(j\omega) = \sum_{-\infty}^{\infty} C(\tau) e^{-j\omega\tau},$$

$$C(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \varphi(j\omega) e^{j\omega\tau} d\omega。$$

对于连续时间过程，同样可得到傅立叶变换对：

$$\varphi(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} C(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau,$$

$$C(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(j\omega) e^{j\omega\tau} d\omega。$$

特别可以推导出，如果 $C(\tau) = \delta(\tau)$，$\delta(\tau)$ 称作狄拉克(Dirac) δ 函数，则谱密度函数为常数。通常，称均值为零，谱密度为非零常数的平稳过程为白噪声过程或简称白噪声，这是仿照具有均匀光谱的白光的称呼。

白噪声是一种理想随机过程，由于它具有不相关性，因此在实践中总是尽量产生一些近似于白噪声的信号作为试验信号。

五、正态随机过程

正态（高斯[Gauss]）过程是一种重要的二阶矩过程，它在物

理上是很常用的。

如果任意有限多个 $X(t_1),X(t_2),\cdots,X(t_n)$ 的联合分布是正态的，即随机向量$(X(t_1),X(t_2),\cdots,X(t_n))$的联合密度函数为

$$p(x)=[(2\pi)^n|\Sigma|]^{-\frac{1}{2}}\exp\left[-\frac{1}{2}(x-\mu)^T\Sigma^{-1}(x-\mu)\right],$$

式中，协方差 Σ 是正定对称阵，μ 是实值列向量，则随机过程 $\{X(t),t\in T\}$ 是正态的。

正态过程由它的均值和协方差函数完全确定了它的有限维分布簇，从而完全确定了过程的统计特性，因而对正态过程来说，宽平稳性和严平稳性是一致的。

下面的性质以后要用到：

(1) 如果 X 是一个具有均值 μ 和协方差 Σ 的 N 元正态随机变量，则当 $Y=BX+\gamma$ 时，Y 是一个具有均值 $B\mu+\gamma$ 和协方差为 $B\Sigma B^T$ 的正态随机变量。

(2) 如果 X 是一个具有均值 μ 和协方差 Σ 的 N 元正态随机变量，且 X，μ 和 Σ 可分解为

$$X=\begin{bmatrix}X_1\\X_2\end{bmatrix},\qquad \mu=\begin{bmatrix}\mu_1\\\mu_2\end{bmatrix},\qquad \Sigma=\begin{bmatrix}\Sigma_{11}&\Sigma_{12}\\\Sigma_{21}&\Sigma_{22}\end{bmatrix},$$

则 X_1,X_2 是分别具有均值 μ_1,μ_2 和协方差 Σ_{11},Σ_{22} 的正态随机变量，而 Σ_{12} 是由 X_1 和 X_2 的相应分量的协方差构成的互协方差阵。

(3) 仍在(2)的条件下，在给定 $X_2=x_2$ 条件下的 X_1 的条件分布仍为正态分布，其均值和协方差分别为 $\mu_1+\Sigma_{12}\Sigma_{22}^{-1}(x_2-\mu_2)$ 和 $\Sigma_{11}-\Sigma_{12}\Sigma_{22}^{-1}\Sigma_{21}$ 。

以上性质的证明可参看有关概率论和随机过程的教材。

§1.3 正实引理与正系统

正实性概念最初是由布隆在研究网络综合问题中提出的。假设一单端网络的阻抗具有形式

$$Z(s) = (2s^2 + 3s + 2)/(s + 1),$$

试综合一个输入阻抗为 $Z(s)$ 的网络。解决问题的途径可以将 $Z(s)$ 化为几个简单项之和

$$Z(s) = 2s + 1 + 1/(s + 1),$$

通过观察可用三个子网络串联而成，所求网络如图 1.3.1 所示。

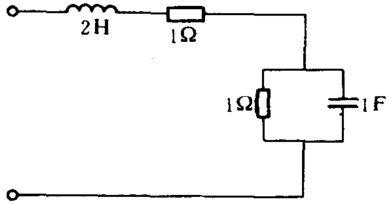

图 1.3.1 正实函数的无源网络实现

那么，对任何给定的 $Z(s)$ 是否都能用 R,L,C 这样的无源元件构成呢？答案是否定的。能用无源 R,L,C 元件进行综合的函数就是下面将要定义的正实函数。从能量的观点理解，网络的无源性表现出网络中能量的非负性，其相应的传递函数就是正实的。随着控制理论的发展，正实函数的概念在波波夫稳定性理论，逆最优控制以及自适应控制等方面均起着重要作用。

下面来定义正实函数、正实矩阵、正系统、并证明十分有用的正实引理。

一、正实函数