系统与控制

XI TONG YU KONG ZHI XI TONG YU KONG

席德勋　编

南京大学出版社

系 统 与 控 制

席德勋 编著

南京大学出版社

1989·南 京

内 容 简 介

本书从系统观点出发，以系统状态的可控性、可观测性、系统稳定性、灵敏度、输入输出特性来分析控制系统，把现代控制理论和经典控制理论结合起来介绍线性系统、非线性系统(包括双线性系统)、多输入多输出系统、最佳控制和自适应控制。本书共分八章，线性系统是基础，重点是非线性系统、多输入多输出系统、最佳控制和自适应控制。

本书着重基础，可供从事自动控制、无线电电子学、生物医学工程等方面的高年级大学生、研究生、教师以及工程技术人员参考。

責任编辑　李曾沛

系 统 与 控 制

席德勋　编著

南 京 大 学 出 版 社 出 版
（南京大学校内）

江苏省新华书店发行　江苏省阜宁印刷厂印刷
开本：850×1168　1/32　印张：21　字数：541千
1989年6月第1版　1989年6月第1次印刷
印数：1—1000

ISBN 7-305-00184-8

N·3　定价：5.00元

绪　论

所谓系统，可以理解为互相作用、互相依赖的事物的集合，它们构成具有特定功能的有机整体。一般，系统可以有如下几种分类方法：线性系统和非线性系统；时不变系统和时变系统；无记忆系统和记忆系统（动态系统）；集总参数系统和分布参数系统；连续时间系统和离散时间系统；确定性系统和随机系统。要研究一个控制系统，必须从它的基本性质着手，诸如系统状态的可控性和可观测性，系统稳定性，灵敏度以及输入输出关系等。状态是表示系统特性的量，状态向量是表示系统全部特性的具有最少数目的状态所构成的向量。一系统的状态在时间间隔$[t_0, t_f]$上是否可控，是指在此期间是否可从初始状态受控制函数（输入）作用转移到任一终止状态，如果系统所有的状态都能受控制而从初始状态转移到终止状态，则此系统的状态是完全可控的。系统状态的可控性与系统的输入（控制）有关而和系统的输出无关。一系统的状态在时间间隔$[t_0, t_f]$上是否可观测是指它们能否通过系统的输出来测量，而这种特性与系统有否输入无关。稳定性是系统的又一重要特性，通常，稳定性是指系统在平衡状态时受到外力干扰离开平衡状态后，是否能在外力撤除后回到平衡状态，如果能够实现，则称该系统是稳定的，否则是不稳定的。李雅普诺夫直接法是普适的系统稳定性判别方法，它不仅适用于线性时不变系统，也适用于非线性系统和时变系统。灵敏度是指系统的元件或参数偏离其标称值而引起的系统对标称情形的偏离。对线性时不变系统，一般用参数灵敏度，这是指系统增益对参数变化的灵敏度，它等于系统增益的相对变化与参数相对变化之

比。为了避免必须规定与灵敏度定义有关的条件，可以引用相对灵敏度，称之为比较灵敏度。它定义为：闭环系统因参数变化而引起的传递函数的变化，对在标称情形时等价于该闭环系统的开环系统的参数变化而引起等价系统传递函数的变化之比。用灵敏度很容易表示出参数变化对系统性能的影响。输入输出特性是指系统输入输出的关系。对线性时不变系统，它就是系统的传递函数，对非线性系统或时变系统，这种关系不能以传递函数表示，而以输入输出映射表示。

本书共分八章。第一、二两章论述线性时不变系统，它们是本书的基础部分，主要用频率响应法（频域）和状态空间法（时域）进行研究。随着计算机应用的日益广泛，离散时间系统用得越来越多，因此本部分也比较详细地讨论了离散时间系统。运用流图和信号流图方法分析线性时不变系统的一些特性，计算方便，简单明了。

第三章论述非线性系统，主要内容有两个方面，一是分析非线性控制系统的方法：状态空间法——相平面法和描述函数法，二是稳定性理论。李雅普诺夫方法是判别系统稳定性的一般理论，这种方法对线性系统和非线性系统、时不变系统和时变系统、连续时间系统和离散时间系统都适用。绝对稳定性问题，主要用来判别前馈部分是线性时不变的、反馈部分是非线性时变的系统的稳定性，这在分析自适应控制系统时特别有用。

第四章讨论多输入多输出系统。对线性时不变系统，可以用矩阵信号流图进行分析计算。系统的多输入多输出，使得按规定性能实现系统控制比较困难。一个问题是系统响应和稳定性，运用状态反馈、输出反馈来配置极点，可以使系统不但稳定而且具有所要求的响应。另一个问题是耦合，一个线性时不变系统的传递矩阵往往不是对角的或分列的，这表明每个输出都是各个输入的线性组合，这种情形称之为耦合。对一个耦合系统，必须用解耦方法使系统传递矩阵变成对角矩阵或分列形式的矩阵，使输入输

出一一对应，或者一个输入对应几个输出。系统状态的估值是本章的一个重要内容，由于状态向量的维数通常大于输出向量的维数，所以部分状态变量不能由输出向量直接测得，而要用状态观测器来观测。当存在过程噪声和测量噪声时，应当用无偏估值方法。结构规范化对多输入多输出系统是重要的，这样可使状态系数矩阵和输出矩阵具有最简单的形状。稳定性是系统的重要特性，利用黎曼面可以使多值函数当作单值函数处理，以便把尼奎斯特判据推广到多变量情形。在实现多变量控制时，罗森勃洛克的逆尼奎斯特阵列是一种有效的方法，它可以基本上避开由于耦合而引起的麻烦。在控制过程中，干扰实际上是不可避免的，而且环境还会使被控对象的参数发生变化，强壮控制（也叫“鲁棒”控制）是克服上述对控制的影响的有效方法，利用跟踪补偿和稳定补偿使被控系统的输出完全和要求的输出一样，而且整个系统稳定。

第五章讨论最佳系统控制。本章分析了连续时间系统和离散时间系统的最佳化理论和方法。用变分法、极大值原理对无约束动态系统和有约束动态系统在时域中实现控制向量的最佳化，用维纳-何甫谱因式分解方法对系统灵敏度在频域中实现最佳化。最后用函数空间方法实现希尔伯特空间中的极小化以给出最佳化的统一形式。一个系统可以在控制空间内实现最佳化，也可以在状态空间内实现最佳化。

第六章讨论自适应系统控制。自适应控制系统是比反馈控制系统更高一级的控制系统，它是受了生物对环境适应的启发而发展起来的。这种系统能够对环境的变化有很强的适应能力，它具有系统辨识功能和决策能力，并能驱使系统达到规定的要求或者使系统最佳化。自适应控制系统实际上是一种时变系统，它的分析设计是以绝对稳定性理论为基础的超稳定性方法和正性系统概念。根据这些概念，可以构成连续时间和离散时间的自适应控制系统和自适应跟踪系统。模型参考自适应是常用的自适应方法，

实现比较容易。在此基础上，当模型参数未知时，可调参数系统在自适应功能实现后，测量它的参数就可以得到模型的参数，这就是自适应参数估值。同理，可以实现自适应状态观测。参数自适应是另一类自适应方法，它没有参考模型，系统的关键部分是动态辨识器，根据已规定的性能指标，实现自适应控制。

第七章分析双线性系统。双线性系统是一类特殊的非线性系统，它虽然是非线性的，但最接近线性系统。用双线性近似来模拟一般的非线性系统所得的结果比用线性近似更好。双线性模拟已广泛地应用到生物科学、工程科学和社会科学等各个方面。本章着重分析双线性系统的结构特性、反馈稳定性和最佳控制。

第八章介绍控制理论在生物系统中的某些应用。

目　录

第八章 控制理论在生物系统中的某些应用

参考资料

第一章 线性连续时间系统

线性系统是最基本的系统，人们对它研究得最多。连续时间系统是指系统的输入和输出对全部时间定义。线性时不变连续时间系统是一种用得最广泛的系统。分析这种系统有两种方法：一种是稳态分析，它的基础是傅里叶变换；另一种是瞬态分析，它的基础是拉普拉斯变换。拉普拉斯变换能够把常系数线性微分方程组变换为代数方程组。用图论方法解代数方程组是比较容易的，流图与信号流图是解代数方程组的有力工具，特别是矩阵信号流图，它是分析多输入多输出系统的有效方法。

系统最重要的性能之一是它的稳定性。为了改善系统的一些性能，往往引入负反馈，构成闭环系统；但由于信息传递的延迟，有可能使负反馈变成正反馈，甚至使系统不稳定。对一个闭环系统，判定该系统是否稳定是非常重要的，通常可以用罗斯-霍尔维兹方法和尼奎斯特方法，也可以用根轨迹法。为使系统稳定可靠而又能满足所要求的性能，用串联网络或并联网络进行补偿可以达到目的。

状态变量法是1960年后推广的方法，它对线性的或非线性的系统，时不变的或时变的系统，连续时间的或离散时间的系统以及多输入多输出的系统均可适用。状态变量法很适于模拟计算和数字计算，而且更适于对系统进行一般性的分析。

第一节 傅里叶变换及其应用

傅里叶变换是一种积分变换，它把时间函数变成频率函数。

一、傅里叶变换及其基本性质

假定有一个周期函数$f(t)$，周期为T，它可以展开成傅里叶级数：

$$f(t)=a_0+\sum_{m=1}^{\infty}\{a_m\cos m\omega_0 t+b_m\sin m\omega_0 t\} \tag{1-1-1}$$

其中

$$\omega_0=\frac{2\pi}{T} \tag{1-1-2}$$

$$a_0=\frac{1}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t)dt \tag{1-1-3}$$

$$a_m=\frac{2}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t)\cos m\omega_0 t dt \tag{1-1-4}$$

$$b_m=\frac{2}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t)\sin m\omega_0 t dt \tag{1-1-5}$$

式（1-1-1）也可以表示成复数展开的形式：

$$f(t)=\sum_{m=-\infty}^{\infty} c_m e^{jm\omega_0 t} \tag{1-1-6}$$

其中

$$c_m=|c_m|e^{j\varphi_m} \tag{1-1-7}$$

$$|c_m|=\frac{1}{T}\left|\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t)e^{-jm\omega_0 t}dt\right| \tag{1-1-8}$$

$$\varphi_m=-\mathrm{tg}^{-1}\frac{b_m}{a_m} \tag{1-1-9}$$

式（1-1-6）表明一个周期信号可以分解成直流分量和频率从$-\infty$到$+\infty$的各种谐波分量。$|c_m|$称为信号的振幅频谱，φ_m称为信号的相位频谱。当$f(t)$是t的实函数时，$\overline{f(t)}=f(t)$。从式（1-1-6）知道，$\overline{c_m}=c_{-m}$，即$|c_m|=|c_{-m}|$，$\varphi_m=-\varphi_{-m}$，这

表明实函数$f(t)$的振幅频谱$|c_m|$是偶函数，相位频谱φ_m是奇函数。$f(t)$的复数展开式也表明了周期函数可以表示成频率为 0 ω，$\pm\omega_0$，$\pm 2\omega_0\cdots$的指数函数之和。成对出现的$e^{jm\omega_0 t}$和$e^{-jm\omega_0 t}$说明两个信号都振荡在频率$m\omega_0$上，但有相反方向旋转的相位因子，其和则给出一振荡频率为$m\omega_0$的时间实函数。注意，上面所说的频谱，只存在于离散的频率上，因此频谱是不连续的，于是这种频谱称为离散频谱，它只取决于$f(t)$的一个周期。

对非周期信号，可以把$f(t)$当作周期$T\to\infty$的周期信号，结果离散频谱的间隔变得无限小，离散谱就变成连续谱，傅里叶级数就变成傅里叶积分。因此，可以认为傅里叶积分是傅里叶级数的推广，而傅里叶级数是傅里叶积分的特例。一个非周期函数$f(t)$，可以在$-\frac{T}{2}<t<\frac{T}{2}$区间内展开成傅里叶级数：

$$f(t)=\sum_{m=-\infty}^{\infty}c_m e^{jm\omega_0 t}\qquad -\frac{T}{2}<t<\frac{T}{2},\ T\to\infty \tag{1-1-10}$$

其中

$$c_m \underset{T\to\infty}{=} \frac{1}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t)\, e^{-jm\omega_0 t}dt$$

令 $F(m\omega_0)=Tc_m$，而 $\omega_0=\frac{2\pi}{T}\to 0$，又令$m\omega_0=\omega$，

则式（1-1-10）变为

$$F(\omega)=\int_{-\infty}^{\infty}f(t)e^{-j\omega t}dt \tag{1-1-11}$$

由式（1-1-6）知道：

$$f(t)=\sum_{m=-\infty}^{\infty}c_m e^{jm\omega_0 t}$$

$$=\sum_{m=-\infty}^{\infty}\frac{F(\omega)}{2\pi}\omega_0 e^{j\omega t}$$