

上海交通大学出版社

现代控制 工程学

——动态系统的分析和控制

■ 原著：嘉纳秀明（日）

■ 编译：曹广益 刘国亭

现代控制工程学

——动态系统的分析和控制

曹广益 刘国亭 编译

2002/6/12-9

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书介绍现代控制理论及其应用,包括线性控制理论、随机信号、建模方法、系统辨识、状态估计、自适应控制等既需理论论证且具有重要的实用价值的自动控制问题。该书还反映了七十年代至八十年代初期现代控制理论中的一些较新的研究成果。

该书对于从事现代控制论研究和进行实际工作的科技人员、大学师生均有很好的参考价值。

现代控制工程学

——动态系统的分析和控制

出版: 上海交通大学出版社
(淮海中路 1984 弄 19 号)

发行: 新华书店上海发行所

印刷: 上海交通大学印刷厂

开本: 787×1092 (毫米) 1/32

印张: 9

字数: 201000

版次: 1991 年 1 月 第一版

印次: 1991 年 2 月 第一次

印数: 1—2250

科目: 233—302

ISBN7-313-00735-3/TP·13

定价: 1.80 元

编译者的话

目前有关自动控制方面的书籍很多，而我们编译的这本书具有的特点更为突出：首先是内容广泛，涉及机械、电气、化学等方面；其次是纵深层次跨度大，本书前几章(1—4章)适合于大专院校本科生作参考，而后几章(5—7章)则更适合于研究生学习使用，这几章需要更深的数学知识；第三是作为研究的手段，计算机知识在各章中得到了广泛的应用；第四，本书和实际及应用结合得很紧密，具有实用价值，而且各章节相互之间的关系交待清楚，对分析理解颇有帮助。

在本书编译过程中，得到了徐广涵、姚佳同志的大力支持，他们参与了部分章节的编译工作；本书承蒙林瑞森同志审阅了全部稿件，并提出许多宝贵意见，在此一并表示衷心的感谢。

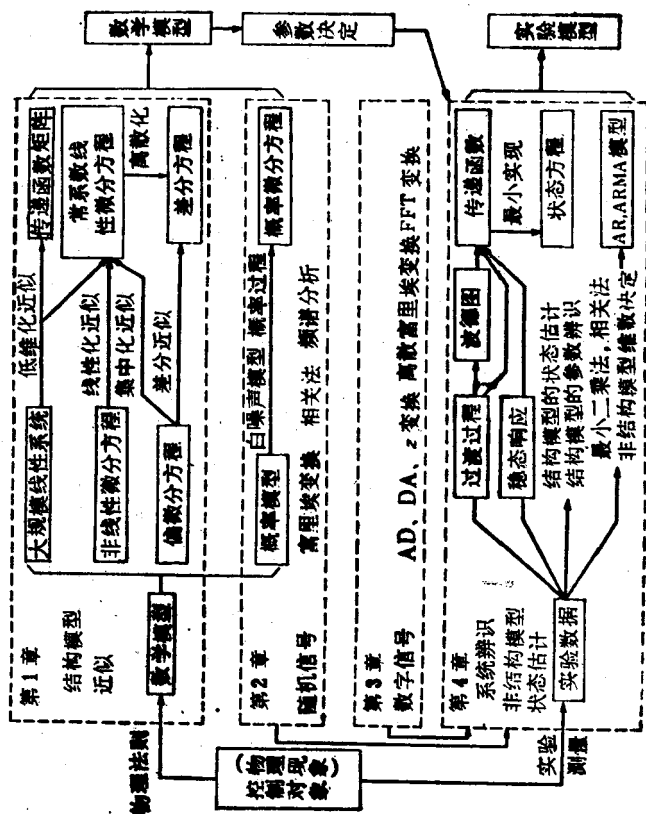
曹广益 刘国亭

前 言

在工业控制现场,技术人员首先要了解掌握研究对象的物理特性。众所周知,如果对对象的特性已有充分的了解,可以认为问题十有八、九得到解决。目前自动控制技术已应用在各个领域中,随着它在工业上应用的日益深入,迫切要求对研究对象的特性有更进一步的了解,这是因为现在的控制理论基本上是在建立在对控制对象充分了解而得出的模型的基础之上的。因此,作为控制学来说,必须把了解对象特性以及对控制理论的研究放在一起进行,同时作为研究的手段,计算机技术也必须牢牢掌握。

本书着重介绍如何在了解对象的基础上,建立模型的系统分析方法和实用的控制理论。为了有助于机械、电气、化学等方面的技术人员阅读,本书在主要内容及文字描述上进行了仔细推敲。在微处理器及微型计算机如此普及的当今,利用这些新技术来进行系统分析的方法,当然是所有技术人员必须掌握的。

本书第1章到第4章尽可能详细地叙述了如何利用自动控制技术与了解现象本身的系统分析方法。在第1章中讲述了用各种各样的物理法则推导数学模型的方法,以及对其进行线性控制和如何得出近似模型的方法。而在第4章中,叙述了如何将对象进行实验,对输入、输出数据进行处理,从而推导出数学模型的方法,以及如何识别参数的方法。为此,还要掌握数据处理的方法。作为预备知识,在第2章中叙述了利用随机信号的富里埃变换的分析法。第3章中叙述了数字信号



的性质和用FFT来对信号进行处理的方法。第1至第4章内容的关系如图所示。

自动控制理论发展到目前为止,它的体系基本上已很完善了,特别是线性系统理论方面,实用价值也不断增大。这一类的控制系统的设计理论都已编成计算方法,成为如CAD那样使用很方便的标准程序。这样一来,不是自动控制专业的其他技术人员也能自由地应用这个理论,这是因为一般使用者不必对自控中的某些细小定理进行证明以及用不到对实际上不易发生的特殊情况进行考察。当然还有一个先决条件,即较为广泛地了解自动控制理论所具有的意义及专门用语所具有的意义、实用性和使用方法。

由此出发,第5章中介绍了线性系统控制理论的基本考虑方法和有代表性的设计理论。第6章中叙述了在处理非线性系统时最关键的稳定性问题。第7章中叙述了系统的自适应方法,这方面,最近越来越显示出它的必要性和重要性。

本书的前半部分以作者在大阪大学工学部机械工程学科的本科学士中所讲授的课程内容为主。后半部分以研究生院的前期课程为主,再加上一些新内容整理而成。本书采用了拉普拉斯变换和应用了拉氏变换的输入、输出系统的基础控制理论,所以读者应具备以上知识。

技术教育好比织布,对技术工作者来讲,了解对象的物理性质、对其本质的深入掌握等,可以比作为纵向线纱;而对这些物理现象的深入探讨,找出达到控制目的技术方法,则可以比作为横向线纱。纵向线纱能使布有一定的强度,而横向线纱使布织得绚丽多彩。本书如能对各位稍有帮助的话,作者的目的也就算达到了。

嘉纳秀明 1984年3月

目 录

第 1 章 物理现象的系统分析(1)——结构模型	1
1.1 结构模型的系统分析	2
1.2 系统状态方程式及其性质	17
1.2.1 连续时间系	17
1.2.2 离散时间系	21
1.3 结构模型的近似方法	22
1.3.1 非线性系统的线性近似法	22
1.3.2 分布参数系统的集中化近似	27
1.3.3 低维近似法	36
第 2 章 随机信号	40
2.1 随机信号与概率论	41
2.1.1 概率与概率变量	41
2.1.2 定常随机信号	45
2.2 富里埃变换	46
2.3 相关函数	57
2.4 频谱密度函数	62
2.5 白噪声	64
2.6 线性系统随机信号的输入响应	67
2.6.1 用传递函数表示的系统	67
2.6.2 用状态方程表示的系统	72

第3章 数字信号.....76

3.1 离散时间信号及 z 变换.....77

3.2 z 变换与拉普拉斯变换的关系.....84

3.3 逆 z 变换.....90

3.4 利用 z 变换求差分方程式的方法.....92

3.5 脉冲传递函数.....93

3.6 离散时间系统的状态变量表示.....95

3.7 离散时间系统的稳定性.....100

3.8 离散富里埃变换.....102

3.9 快速富里埃变换.....107

第4章 物理现象的系统分析(2)——系统辨识及

非结构模型的建立.....116

4.1 动态特性的研究.....117

4.1.1 阶跃响应法.....117

4.1.2 稳态响应法.....121

4.1.3 随机信号的输入方法.....123

4.1.4 M序列信号.....123

4.2 从非参数模型建立参数模型.....126

4.2.1 根据频率特性求传递函数的方法.....126

4.2.2 由传递函数建立状态方程的方法.....128

4.3 相关函数和频谱密度函数的估计.....133

4.3.1 估计量的性质.....133

4.3.2 相关函数估计.....136

4.3.3 频谱密度函数估计.....138

4.4	参数辨识	141
4.4.1	估计法的基本概念	142
4.4.2	非构造模型	149
4.4.3	根据最小二乘法进行参数辨识	150
4.4.4	递推最小二乘法	152
4.4.5	根据豪斯霍尔德变换求标准方程的解	154
4.4.6	AR 模型参数辨识	158
4.5	状态估计	164
第 5 章	线性控制理论	168
5.1	可控性和可观性	168
5.1.1	可控性条件	169
5.1.2	可观性条件	172
5.1.3	离散系统的可控性和可观性	173
5.1.4	根据传递函数来看系统的可控性和可观性	175
5.2	系统的结构	178
5.2.1	建立标准形式	181
5.3	用状态反馈法来设计控制系统	188
5.3.1	用极点配置法来设计控制系统	188
5.3.2	最佳调节器的控制系统设计	192
5.3.3	黎卡提方程的数值解法	198
5.4	利用观察器和输出反馈来设计控制系统	203
5.4.1	观察器的构成	203
5.4.2	采用观察器来配置极点	209

5.4.3	只取决于输出的最佳控制	212
5.5	多变量系统的频域设计	217
5.5.1	解耦	217
5.5.2	解耦检验	221
第6章	系统的稳定性	226
6.1	系统方程式与平衡状态	226
6.2	稳定性概念	227
6.3	李雅普诺夫方法	233
6.4	含有非线性因素的控制系统 的稳定条件	237
6.5	正实函数	240
6.6	波波夫定理	244
6.7	非线性系统的大范围渐近稳定控制	247
第7章	自适应控制系统	252
7.1	线性系统的自适应参数识别	253
7.2	模型参考自适应控制	256
7.3	仅利用可能测定的输入来建立模型 参考自适应控制	263
7.4	离散时间系统的模型参考控制	269
7.5	自校正控制	273
参考文献		277

第1章 物理现象的系统分析〈1〉

——结构模型

工程技术人员在解决工程问题时，首先要深刻了解有关工程问题物理现象的本质。为此，必须定量地掌握随时间、空间变化的该物理现象的温度、流量、压力、浓度、位置、角度和速度的变化。所谓定量掌握，具体就是指数学模型。在经典物理学中，自然现象所表现的特性已经找到了各种物理法则，并且得到了证明。以此为基础，可以分析不少工程问题。物理法则一般可概括为平衡问题。即各种现象中有物质平衡、能量平衡和运动平衡等；描述各种状态相互关系的理论公式或通过实验建立起来的虎克定律；描述传热、辐射、热传导的法则；根据电磁场理论等建立描述物理现象的基本方程式等。这样建立起来的数学模型称为结构模型。第4章中讲到的用实验方法得出某个对象的输入、输出数据来建立的模型称为非结构模型。

根据结构模型能清楚了解控制对象的物理构造。同类装置具有相同的方程式，而仅仅系数不同，因而具有普遍通用性，这是结构模型分析法的优点；而非结构模型只局限于某一控制对象，不同对象必须重建新的方程。对比较简单的模型，用黑盒关系即能方便地建立方程，这是这种方法的优点。

在控制过程中应用模型是为了设计控制系统并用模型来估计被控对象每时每刻的运动状态。因此，某个对象的结构模型

建立后，也不一定因为该模型能正确表现实际对象的运动状态，因而就适合在控制过程中应用这个模型。例如，描述动力系统用的超临界压力的锅炉模型，可归结为非线性联立偏微分方程边界值的问题，但是，即使使用大型计算机求解也要化好几天，计算成本昂贵；而且，在线控制中所要的信息是两分钟后的温度与压力变化，并且希望在几秒内能确定这些数值。因此，这种模型不能用来作为在线控制模型，必须将精确的模型加以简化。

简化的方法，有把偏微分方程表示的分布参数系统近似成常微分方程表示的集中参数系统，即集中近似；有把非线性系统近似成线性系统，即线性近似；在线性集中参数系统中还有把高维的近似成低维的，即降维近似。

在控制过程的模型化过程中，为了把模型缩小到某种范围，经常应用近似的方法；因此必须记住控制对象的模型常常是一个近似系统。也就是说，即使给出某一数学模型，求得控制理论上的唯一的解，也不一定可以说这就是控制工程中的唯一的解。控制系统的设计者在研究数学模型时，必须经常明白这个模型是在什么条件下建立的，以及在什么程度上加以近似的。应用近似模型以后，纵然能用很严密的理论得出它的控制法则，但对于物理现象来说也不过是一个近似的控制法则。

1.1 结构模型的系统分析

结构模型系统分析的基本原理是建立在新研究系统内部微小部分物质的能量或运动的相互平衡基础上的，也就是说这些量是守恒的。对于微小部分来讲，输入输出量理应平衡。

根据物质平衡原理，有下列表达式：

$$\begin{aligned} & (\text{系统内的物质}) = (\text{流入系统的物质}) \\ & - (\text{流出系统的物质}) + (\text{系统内物质的生成}) \\ & - (\text{系统内物质的转化})。 \end{aligned}$$

根据能量平衡原理，有下列表达式：

$$\begin{aligned} & (\text{系统内的能量}) = (\text{流入系统的能量}) \\ & - (\text{流出系统的能量}) + (\text{系统内能量的发生}) \\ & - (\text{系统内能量的吸收})。 \end{aligned}$$

运动量的平衡是指对系统所加外力的出入与系统的运动量积蓄相等，这就形成了运动方程。计算这种平衡式时，必须根据各种物理现象特有的物理法则和实验结果。例如，辐射传热量与温度的4次方的差成比例；化学反应中发生的热量是温度倒数的指数函数。在平衡计算时这些都是必要的。下面叙述根据平衡式建立基础方程的方法。

[例 1.1] 流入、流出容器的液面模型。

图 1.1 表示截面积为 $C[\text{m}^2]$ ，流出孔到液面的高度为 $H[\text{m}]$ 的容器，设流出速度为 $V[\text{m/s}]$ ，大气压为 $p_0[\text{pa}]$ ，液体密度为 $\rho[\text{kg/m}^3]$ 。当液面不变动时，根据能量平衡的伯努里定理，液面到孔之间可由下式表示；

$$p_0 + \rho g H = p_0 + \frac{1}{2} \rho V^2。 \quad (1.1)$$

g 为重力加速度 ($g=9.80665[\text{m/s}^2]$)，从式(1.1)可得托里拆利公式：

$$V = \sqrt{2gH} \quad [\text{m/s}]。 \quad (1.2)$$

若流出孔的面积为 $S[\text{m}^2]$ ，则流出的液体流量应为 SV 。

如图 1.1 所示流出时发生缩流，实际流量应为 σSV ， σ 为阻

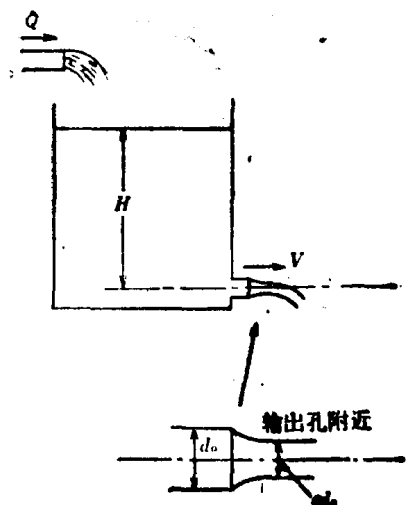


图 1.1 流入、流出的容器

尼(节流)系数。如流入容器的量为 Q_i [m^3/s], 流入与流出流量之差 $Q_i - \sigma S V$ 积存在容器之中, 并使液面上升, 这里设容器截面积为 C [m^2], 在 Δt [s] 中, 上升 ΔH [m], 则下面的平衡式成立:

$$C \cdot \Delta H = (Q_i - \sigma S V) \Delta t. \quad (1.3)$$

由此, 可得一次常微分方程

$$C \frac{dH(t)}{dt} = Q_i(t) - \sigma S \sqrt{2gH(t)} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (1.4)$$

这样所得的方程式其系数含有各种量纲。这里试图把这个方程式变成无量纲的形式, 首先以某一常数液位 H_s [m] 为基准, 这时流出量为 $Q_s = \sigma S \sqrt{2gH_s}$ [m^3/s], 用其除式

(1.4), 则

$$\frac{CH_s}{\sigma S \sqrt{2gH_s}} \frac{dH(t)/H_s}{dt} = \frac{Q_i(t)}{Q_s} - \sqrt{H(t)/H_s} \quad (1.5)$$

变成无量纲的方程式。

式中，左边系数的单位为时间，设

$$T = \frac{CH_s}{\sigma S \sqrt{2gH_s}} \quad [s] \quad (1.6)$$

T 就是用流出量 $\sigma S \sqrt{2gH_s}$ 除容器液体容积 C/H_s 的数值，表示液体流入容器到流出的平均时间 $T[s]$ ，即液体留在容器内的时间，可称为滞留时间或时间常数，设

$$t_1 = t/T, h(t) = H(t)/H_s, q_i(t) = Q_i(t)/Q_s \quad (1.7)$$

代入式(1.4)得

$$\frac{dh(t_1)}{dt_1} = -\sqrt{h(t_1)} + q_i(t_1) \quad (1.8)$$

全部成为无量纲的方程式，而且这个式子与容器的大小等一切因素无关。用这个方程式可表示所有大小容器的液位，可以说这个公式表现了液面系统的实质性内容。因此方程式的无量纲化是模型化中很重要的工作。它能使必须考虑的参数尽量减少，也便于观察到由于装置大小不同引起的不同现象的相互影响，还可以弄清装置按比例放大时相似条件的效果。

(1-8)式是非线性方程，因而设 $h(t_1)$ 的运动仅在 $h_s=1$ 的常值附近引起，对此可用线性方程加以近似，设

$$h(t_1) = 1 + x(t_1), q_i(t_1) = 1 + u(t_1),$$

则

$$\frac{dx(t_1)}{dt_1} = 1 - \sqrt{1 + x(t_1)} + u(t_1) \quad (1.9)$$

这里, $x(t_1)$ 、 $u(t_1)$ 分别为液位在平衡值附近的变动和流入量在平衡值附近的变动。

在(1.9)式中, 设 $x(t_1)$ 与 1 相比很小时, 则有

$$\sqrt{1+x(t_1)} \approx 1 + \frac{1}{2}x(t_1)。 \quad (1.10)$$

(1.9)式这时就成为线性微分方程

$$\frac{dx(t_1)}{dt} = -\frac{1}{2}x(t_1) + u(t_1)。 \quad (1.11)$$

这种线性化的方法, 将在 1.3 节中详细论述。

[例 1.2] 搅拌加热器。

图 1.2 所示为带有搅拌器的加热器。液体流入超过一定液位就要流出, 液体在这个系统中输入、输出相等, 体积为一常数。假定容器中的液体与外界绝热, 试研究其热平衡。设容器的容积为 $V[\text{m}^3]$, 流量为 $F[\text{m}^3/\text{min}]$, 加热器供给的热量为 $Q[\text{J}/\text{min}]$, 液体的密度为 $\rho[\text{kg}/\text{m}^3]$, 液体的比热为 $C_p[\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}]$, 容器内液体的温度为 $T[\text{K}]$, 流入液体的温度为 $T_i[\text{K}]$, 在 $\Delta t[\text{min}]$ 中, 由于液体流入所带进的热量与流

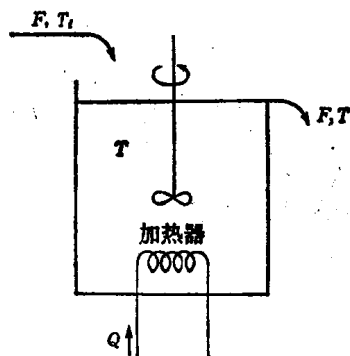


图 1.2 搅拌加热器