



21 世纪大学新型参考教材系列

系统与amp;控制

(日) 细江繁幸 编著

Inter University



科学出版社

OHM 社

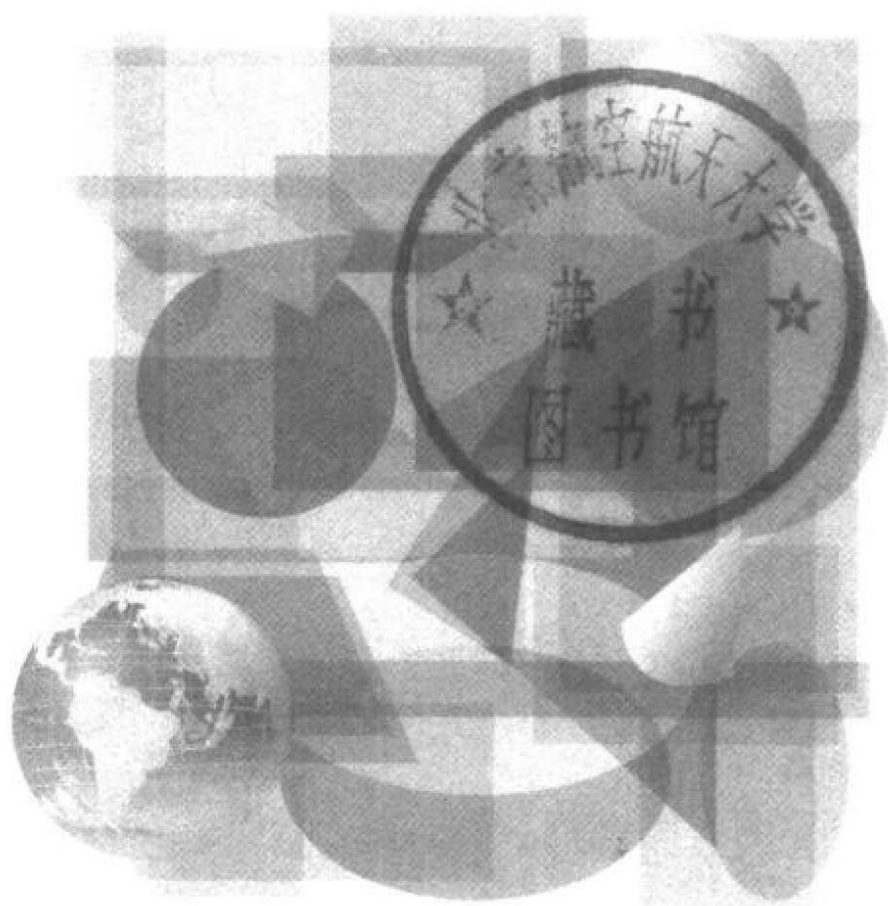
00129319

TP273
260

21 世纪大学新型参考教材系列

系统与amp;控制

〔日〕 细江繁幸 编著
白玉林 王毓仁 译
李 平 校



科学出版社 OHM 社

2001. 北京



北航 C0547566

FR06/1

图字:01-2001-0070 号

Original Japanese edition

Interuniversity System to Seigyō

by Shigeyuki Hosoe et al.

Copyright © 1997 by Shigeyuki Hosoe

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. and Science Press.

Copyright © 2001

All rights reserved.

本书中文版版权为科学出版社和 OHM 社所共有

インターユニバーシティ
システムと制御

細江繁幸 オーム社 2000 第1版第4刷

图书在版编目(CIP)数据

系统与控制/[日]细江繁幸编著;白玉林等译. - 北京:科学出版社,2001

(21世纪大学新型参考教材系列)

ISBN 7-03-009313-5

I. 系… II. ①细… ②白… III. 系统与控制 - 高等学校 - 教材 IV. TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 16940 号

北京东方科龙电脑图文制作有限公司 制作

科学出版社 OHM 社 出版

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2001 年 4 月第 一 版 开本: A5(890 × 1240)

2001 年 4 月第一次印刷 印张: 6 1/8

印数: 1—3 000

字数: 184 000

定 价: 12.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

中译本前言

构成当今信息社会基础的是 3C 技术,即计算机(Computel)、通信(Communication)、控制(Contval)技术,这种说法已被许多人所认同。其中,现代系统控制技术正广泛应用于交通、宇航、能源及制造业等国民经济的各个领域。这也是 21 世纪我国用高新技术改造传统产业的重要课题。

本书为日本“21 世纪大学新型参考教材系列”之一,内容翔实、深入浅出,既介绍了传统的以反馈控制、频率响应为主的频域控制系统的设计方法,又介绍了基于状态空间、观测器、最优调节器及卡尔曼滤波器(Kalman filter)等现代时域控制理论,还涉及到近年来才出现的鲁棒(Robust)控制,模糊(Fuzzy)控制以及神经网络(neuro net)控制等非线性控制的设计方法。

他山之石,可以攻玉。中译本译文流畅严谨¹⁾,可读性强,可以作为我国大专院校自动控制专业的参考教材,并适合于在职的工程技术人员进行系统控制方面的培训或进修使用。

近年来,科学出版社从国外引进版权,并翻译出版了电子电路、通信、控制及计算机等方面的科技书籍和参考教材,相信会受到我国科技人员和大专院校师生的欢迎,得到市场的首肯。

铁道科学院 王忠文

1) 本书第 1、6、7 章由王毓仁翻译;第 2~5 章,8~12 章由白玉林翻译。

前 言

目前,系统控制在电气系统、机械系统、化学系统等领域应用相当广泛。以前我们认为“控制”只在某些工厂中,或者像火车、飞机等非常庞大的机械方面应用。但是,现在日常生活中普遍使用的一些机器也是可控的,例如空调、汽车等。最近在一般家庭中计算机普及得越来越广,其中的硬盘、打印机都使用了惊人的高精度控制。即控制系统的应用领域越来越广泛,并且其重要性也在逐渐提高。

本书中介绍的是系统控制的基础知识——与控制工程学有关的内容。编写时以尽可能让读者容易理解为宗旨。本书所涵盖的内容包括频率响应法、状态空间法、鲁棒(robust)控制设计方法、用非线性描述函数及相位的解析法、模糊控制以及神经网络的应用等。在以前的教科书中,一般只讲解频率响应法、状态空间法等,所以在这一点上本书还是有很多特点的。

本书在内容方面的特点是:它包含了鲁棒控制、非线性控制、模糊控制,以及神经网络等。鲁棒控制系统的设计方法是近10年来新开发的,所以在高等院校的教科书中对此方法的说明并不多。本书中所叙述的内容虽然只是非线性控制理论的一部分,但重要的是通过这些即可清楚地理解线性控制与非线性控制的区别。

由于叙述内容较多,故错误在所难免。实际上编写本书时,每一位作者第一次写出的书稿都比预定篇幅超出了不少。所以,对有些公式的推导内容不得不舍去。虽然牺牲了一些理论内容,但基本的概念都尽可能地交待清楚了。另外,在各章后都列有一些练习题,这样也可以弥补一些讲解不足的地方。

最后,我代表作者向家田正之先生以及在执笔和选项方面给了宝贵意见的白井支朗先生致以深深的感谢。

细江繁幸

为了适应21世纪的要求

面向21世纪,日本各大学进行了系与学科的改编、研究生院的调整、导入两期制等。伴随着这些调整,现有的教材显得不适应现代学生的水平和兴趣要求。因此就要求有一套从版面到内容都更新颖的教科书。

本系列正是考虑到这种新的要求,经过不断深入考察和讨论,按照全新的整体编排形式制作完成的新型教材。曾荣获第七届日本工科教育协会奖「业绩奖」。

21世纪大学新型参考教材系列 编辑委员会

主任委员: 家田正之 (爱知工业大学)
编委: 稻垣康善 (名古屋大学)
白井支朗 (丰桥技术科学大学)
梅野正义 (名古屋工业大学)
大熊 繁 (名古屋大学)
绳田正人 (名城大学)

电子器件

电子物性
半导体工程学
电子器件
集成电路A
集成电路B
光电子学

公共基础

电磁学A
电磁学B
电气电路A
电气电路B
电子电路A
电子电路B
电气数学
信息数学
程序设计

测量·控制

系统与控制
信号分析
传感测量
柔性信息处理
机器人控制

信息通信

逻辑电路与自动机械
计算机工程学
程序语言设计
信息传送和符号的理论
信息通信工程学
信息网络

电气能源

电气能源基础
等离子体电子工程学
电力系统工程学
电气电子材料
高电压/绝缘工程学
电动机
电力电子学

目 录

1 学习系统与控制的方法

1.1 各种各样的系统与控制	2
1.2 控制系统的结构——反馈控制	3
1.3 控制系统的设计——建模	4
练 习 题	5

2 动态系统与状态方程

2.1 动态系统的建模——状态方程式	8
2.2 非线性系统的线性近似	13
2.3 状态方程式的解——研究动态系统的作用 ...	15
练 习 题	19

3 传递函数与方框图

3.1 拉普拉斯变换	22
3.2 逆拉普拉斯变换及其应用	25
3.3 传递函数与脉冲响应	27
3.4 基本的传递函数	29
3.5 方框图及其等价变换	31
练 习 题	34

4 系统的频率特性

4.1 频率传递函数——从频域角度看输入 输出关系	38
4.2 奈奎斯特图——在复平面上研究 $G(j\omega)$	40
4.3 伯德图——增益与相位的表示方法	43

练 习 题	49
5 稳定性分析	
5.1 系统的稳定性	52
5.2 卢斯的稳定判别法	53
5.3 赫尔维兹稳定判别法	55
5.4 奈奎斯特稳定判别法	56
5.5 根轨迹	60
练 习 题	63
6 反馈控制系统的特性	
6.1 反馈控制系统的传递函数	66
6.2 反馈控制系统的过渡特性	68
6.3 反馈控制系统的稳定特性	72
练 习 题	74
7 反馈控制系统的设计	
7.1 反馈控制系统设计的基本方法	78
7.2 伺服系统的设计——频率响应法	79
7.3 过程控制系统的设计——PID 调整	86
练 习 题	89
8 时域控制系统设计	
8.1 可控制性	92
8.2 利用极分布设计调节器	93
8.3 可观测性	97
8.4 利用极分布设计观测器	99
8.5 合并观测器的调节器	100
练 习 题	101
9 最优调节器与卡尔曼滤波器	
9.1 线性 2 次最优调节器	104

9.2 卡尔曼滤波器	107
9.3 最优调节器与卡尔曼滤波器的对偶性	109
9.4 合并卡尔曼滤波器的最优调节器	110
练 习 题	114
10 鲁棒控制	
10.1 不确实性也是模型的一部分	118
10.2 符号的引入—— H_∞ 控制名称的由来	121
10.3 鲁棒稳定性的条件	122
10.4 采用 H_∞ 范数的控制问题的形式化	124
10.5 H_∞ 控制问题及其解法	127
10.6 利用 H_∞ 控制理论设计电机控制系统	130
练 习 题	133
11 非线性系统控制——恢复弯曲的物体	
11.1 非线性系统的处理	136
11.2 描述函数法——从非“线性”取出线性	137
11.3 利用描述函数进行稳定性判断——关于周期 振荡	139
11.4 相位面法——用螺旋图表示非线性 系统的概貌	142
11.5 利用相位面进行特性分析——右旋 与左旋	144
11.6 可变结构控制——以切换为中心	146
练 习 题	149
12 模糊与神经控制——经验与大脑	
12.1 模糊理论的基础——根据经验指导 控制操作	152
12.2 模糊控制——再现专家的经验	153
12.3 神经网络的基础——非线性的机能网络 ...	154
12.4 神经控制——生物运动的起因	156

12.5 神经网络与模糊理论的融合——智慧与 经验的结晶	159
练 习 题	162
练习题解答	163
参考文献	179

篇外话

冲水马桶水槽的控制	3
具有若干个输入和输出的动态系统	18
复数区域中的卷积积分	34
探讨频率特性	48
有界输入输出稳定性与内部稳定	62
控制系统——CAD	74
全部为软件的伺服系统	88
关于“最优”	115
鲁棒与适应	132
非线性特征与考斯现象	149
数字计算机 + 神经网络 = 高级模拟?	159

1

学习系统与控制的方法

在本章中,将讲解控制工程学的目的与用途,并概述本书内容。

1.1 各种各样的系统与控制

“控制”这个词在日常生活中也经常使用,并且如飞机的自动导航仪、机器人的控制等在报纸上也经常看到,所以我想读者会对“控制”有一定印象,也许它总是与飞机、汽车等具体对象有一定关系的原因吧。如果读一下本书的第2章以后的部分就会明白其原因。在此,并没有举出具体的实例图,而是列出了数学公式、表现系统联结关系的原理图等。这些作为控制的一个侧面,将独立于固定具体的事物,再进一步正确地讲,它们将证明很多对象共同适用的、某些一般的方法论的存在。本书中我们将要学的就是这种方法论。

控制的应用范围不仅包括飞机、机器人,还有空调设备、汽车的空(气)燃(料)比、空载转速、功率组合等的控制;另外还有电力传输系统的电压、频率控制,硬盘控制,化学过程的温度、压力、流量的控制,压延过程的控制,各种工作机械的控制,大型建筑物的振动控制等,可以说数不胜数,只不过其形态与功能不同而已。虽然类型如此之多,但它们都是一般系统控制方法论的对象。

这种理由之一是,控制目标的共通性。也就是说,上述的机器,程序中都有需要控制的固有变量(可称为控制量或输出量)。要使这些变量控制在与希望值(目标值),或期望的轨道尽可能地接近,并保持这个值,这是最重要的。从这一点上很多控制系统的控制目标是共通的。例如飞机的自动导航系统使飞机路线、高度保持在目标值上;机械手的前进方向必须沿着一定的目标轨迹移动;空调设备要使房间保持我们设定的温度等等。其它的例子读者可自己考虑分析。

如上所述,为了控制输出就需要在控制设备上加上输入量,这种输入量可称为操作量或控制输入。例如,飞机等的升降舵的变位角,机械手的关节转矩等就是要控制的物理量。另外,控制对象中除控制输入以外,还有不可控制的部分,如突变风、负荷变化、环境变化等,这些都是经常出现的。由于这些后者的因素使控制变得困难起来,因此把它统称为外界干扰。控制输入、外界干扰、控制量的关系如图1.1所示。

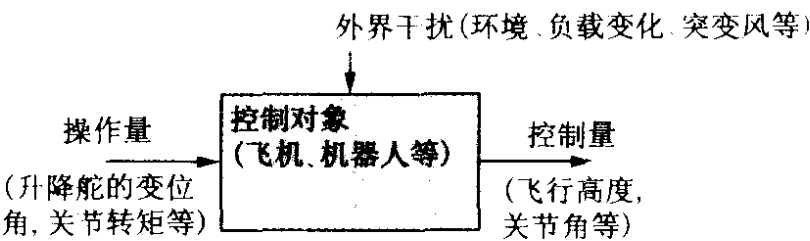


图 1.1 控制对象的输入与输出

1.2 控制系统的结构——反馈控制

要预知外界干扰和在控制过程中进行检测都是困难的,所以,要预先考虑外界干扰而决定控制输入是不可能的,在此情况下,大部分的控制系统所采用的最基本的方式都是反馈控制。

冲水马桶水槽的控制

在我们身边就能见到反馈控制的实例——冲水马桶的水槽。利用浮力,水槽空了,水就进入,水位达到一定水位时就自动停止进水。人类在厕所中应用这些原理的时候大约是在100年到200年前。但是,对于水槽水位的自动控制,已有很长的历史了,如希腊、罗马时代关于水时钟的记录。有兴趣的读者可参见文献[1]、[2]。另外,文献[2]是美国电气与电子工程师学会(IEEE)出版的“控制工程学手册”中的内容。其中有关应用部分的开始一节就是马桶的水位调整的话题。此外,不光是马桶,还有水池子,洗脸池的排水管为什么作成“U”的形状呢?

图 1.2 所示的是控制系统的结构。这种控制系统测量控制结果的控制量,并将其与目标值进行比较,若有误差,则要将控制输入进行修正,这就是反馈控制的基本原理。图中的传感器是检出控制量的部分。一般传感器输出的是电气信号等与控制量不同的物理量,故目标值有必要与之对应地进行一些变换。驱动器从控制器接收信号后,要变换为大功率的操作量。而控制器是在误差信号的基础上,为了保持小的误差而进行必要的控制信号计算的装置,相当于控制系统的大脑。最简单的情况下,控制器是将误差变成常数倍的比例元件。但是控制对象越复杂,或越需要高精度的控制时,控

制器也就越复杂。

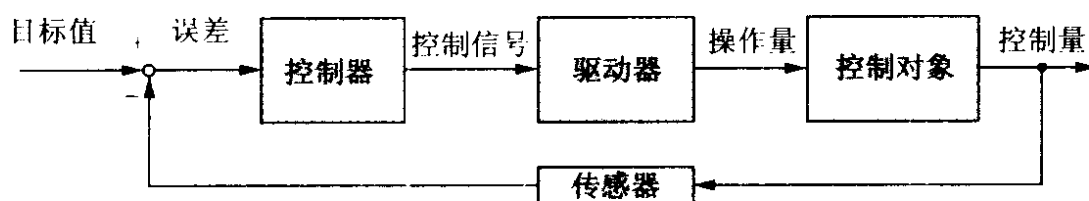


图 1.2 反馈控制的原理图

如果对某些外界干扰可以进行测定时,可以预测它对控制量的影响,为了消除这种影响也就可以决定控制输入量。这种控制方式称为前馈控制。反馈控制是检出控制结果后开始修正操作的,而前馈控制是有外界干扰的情况下预先测出其影响而迅速消除它,因此,后者能比前者更迅速地作出对策。但是,在实际生活中并不是所有的外界干扰都可以预测的,因此,采用前馈控制时往往同时采用反馈控制。

1.3 控制系统的设计——建模

进行控制系统的设计时,先要选定驱动器、传感器等,还要进行功率计算,并论证可靠性、经济性、耐久性及可维护性。这些都是与设计方案紧密相关的。另外,还要决定控制器的控制规范(控制算法),这都是系统设计中最重要的两项工作。尤其后者是体现控制功能的最重要之处。控制规范的好坏就决定了能够充分发挥设备的性能。因此,在诸多的教科书中认为,系统设计的阶段就是决定控制规范的阶段,本书也是这样认为的。

本书的目的是对解决实际问题的控制理论进行尽可能的详尽阐述。全书由 12 章组成,并分成三个部分。

- ① 控制对象的模式化(第 2、3 章)
- ② 稳定性、频率特性的分析(第 4~6、11 章)
- ③ 控制规范的制定(第 7~12 章)

所谓的模式化,是指利用物理、化学法则,或者根据调查系统的输入和输出关系,用微分方程式及传递函数等数学模型来表示控制对象动态的方

法。在模式化过程中,当然要对动态过程进行详细研究,并且对控制对象进行深入的了解,另外,还要把模式化与仿真技术相结合进行各种各样数值试验,这样会得到很多好结果。此外,在控制系统设计中,控制对象越复杂其直感和经验方面遇到的困难也越多。我们为了取得理论的和合理的设计手段,不能不掌握合适的数学模型。一旦得到了该系统的数学模型,就能够更进一步研究该系统的稳定性、反应速度、频率特性等方面的控制特性,还能了解系统参数的理论关系。

在①与②的基础上,可以总结出几种控制规范来,这些规范大体可分为两种:一种是PID控制、相位超前,滞后补偿等的设计法。这种方法是预先决定控制规范,再用这些参数与控制对象进行比较试验调整;另一种方法是解析法,即将评价函数最小化,再求解约束条件,以便得到控制规范。

最后的两章与前面各章节稍有不同,也就是说,到第10章为止都是线性系统的控制方法,而最后两章涉及到非线性控制的内容,就像第1章1.1节提到的那样,很多控制问题都是以控制量接近控制目标值为目的的方法。只要控制进行得准确,系统的状态和目标值就与控制值相差不远,所以在非线性系统中,把曲线的连接处局部地认为是近似于直线,与线性系统是相似的。但是,在动作范围较大的场合,其非线性特性就很明显,就需要采取特别的对策。

在第10章中介绍了较新的关于模式化的精度与设计性能之间的问题。

练习题

- 1 在室温控制的实例中,尽可能多地举出几种外界干扰的因素。
- 2 在用反馈控制对室温进行控制时,图1.2中的各方框和信号,各自对应于什么?

2

动态系统与状态方程

在反馈控制理论中,采用动态系统的数学模型来进行控制对象和控制系统的分析与设计。本章中将要重点讲述的状态方程,正是这种数学模型。在本章中,将以机械系统和电子电路等为例,讲解状态方程是怎样推导出来的。进而讲述状态方程的解法以及怎样计算动态系统的各种动作。对状态方程的线性近似法也进行一些介绍。