

线性控制系统的分析与综合

〔美〕陈启宗 著

林道垣 胡寿松 林代业 译

国防工业出版社

73.8221

602

线性控制系统的分析与综合

〔美〕陈启宗 著

林道垣 胡寿松 林代业 译

国防工业出版社

9408/22
内 容 简 介

本书是自动控制的专著，内容包括经典控制和现代控制，在叙述方法上侧重于应用。全书共分十二章：前五章介绍自动控制的基本理论，包括：引言；线性定常系统的数学描述；控制部件和控制系统；定量和定性分析；计算机模拟和实现。第六章到第十一章介绍用经典控制理论和现代控制理论进行控制系统设计的方法，包括：设计导论；可综合的传递函数和反馈；最优控制系统；根轨迹法；频域法；参数最优化。第十二章为“后记”，概括地介绍了多变量系统、线性离散时间系统、随机系统和自适应系统等基本概念。此外还有两个附录，分别介绍了拉普拉斯变换和矩阵的基本知识，供读者复习之用。全书内容丰富，阐述清晰，重点突出，实用性强。

本书可作为工科高等院校自动控制专业的主要教学参考书，也可供有关工程技术人员参考。

ANALYSIS AND SYNTHESIS OF
LINEAR CONTROL SYSTEMS

Chi-Tsong Chen

Holt, Rinehart and Winston, Inc. 1975.

线性控制系统的分析与综合

[美] 陈启宗 著

林道垣 胡寿松 林代业 译

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

通县张家湾曙光印刷厂印装

850×1168¹/₃₂ 印张 12¹/₈ 305 千字

1982年11月第一版 1982年11月第一次印刷 印数：0,001—6,300册

统一书号：15034·2407 定价：1.50元

译者序

本书是美籍中国学者、纽约州立大学电气科学系教授陈启宗博士的近期著作。作者是一位实际经验和教学经验都非常丰富的自动控制专家，著作很多。他的作品有一个显著的特点，就是概念阐述得特别透彻，内容深入浅出，并且很注重应用，本书尤为突出。

本书是一本控制系统设计的入门书。全书共有十二章和两个附录。

第一章，导论。介绍什么是控制系统，通过列举范围广泛的各种控制系统实例来说明控制系统的组成，并概略介绍了全书的内容。

第二章，线性定常系统的数学描述。介绍实际的物理系统如何抽象成为数学模型，给出单变量系统的输入-输出描述(即传递函数)，单变量系统和多变量系统的状态变量描述，并提出系统完全表征的概念和条件。

第三章，控制部件和控制系统。介绍全书所用控制部件的作用，并推导其传递函数和状态变量方程；举出各种典型控制系统的例子，说明其原理，同时推导受控对象的传递函数和状态变量方程。

第四章，定量和定性分析。介绍组合系统的数学描述；用传递函数和状态变量方程求解系统的精确响应；介绍 BIBO（有界输入-有界输出）稳定性、渐近稳定性和全稳定性的概念，三者的区别和联系，以及完全表征的概念在判断系统稳定性中的重要作用；此外还介绍了劳斯-古尔维茨判据和稳定系统的稳态响应。

第五章，计算机模拟和实现。介绍动态方程的模拟机和数字机模拟的原理和方法；同时介绍有理传递函数的各种型式的实现问题。

第六章，设计导论。介绍为了达到某种控制目的应该如何选择设备；如何确立性能准则；同时还介绍了设计中常碰到的问题以及解决这些问题的方法。

第七章，可综合的传递函数和反馈。介绍系统综合（设计）时的一些指导性原则，同时说明为什么要用反馈。

第八章，最优控制系统。介绍二次型性能准则如何建立；如何求出最优的总传递函数；如何求出最优控制规律；此外还介绍调节器问题的解法以及采用输出反馈、状态反馈和部分状态反馈时补偿器的设计方法。

第九章，根轨迹法。介绍希望根位置的确定方法和根轨迹的画法，然后举例说明根轨迹法在设计中的应用，并说明多参数问题如何转化成单参数问题处理。

第十章，频域法。介绍时域性能准则如何转化为频域性能准则；频域法中三种图（极坐标图、波德图和对数幅相图）的画法；频域法的稳定判据以及稳态和瞬态性能准则如何以开环传递函数表示；最后介绍如何用波德图法设计整个系统，包括各种补偿网络的设计。

第十一章，参数最优化。介绍时域的二次型性能准则如何转化为频域性能准则，并以整个系统的某些参数来表示，然后求出性能准则为最小时的参数值，既介绍了分析法，也介绍了图解法。

第十二章，后记。对以上各章节介绍的各种设计方法（最优设计法、根轨迹法、频域法和参数最优化法）所得的结果以及这些方法本身的优缺点作了比较；同时概括地介绍多变量系统、线性离散时间系统、时变系统、非线性系统、随机系统、自适应和自学习系统的基本概念。

本书主要特点是：

经典理论和现代理论同时并举，学习之后可以基本掌握这两种理论并了解它们的优缺点；

着重于通过举例说明设计方法的应用，
各种方法和概念之间的区别和联系阐述得很清晰，
重点放在系统的综合（设计）方面，分析只是为设计作准备；

全书有很多密切结合实际的例题和习题，涉及面广，使人眼界开阔；

以一个典型的雷达天线跟踪系统的设计问题为中心贯穿于全书，有利于提高读者设计控制系统的能力；

每章末尾都有小结和复习题，便于复习巩固。

在翻译过程中，对于所发现的原书中的错误，均作了修正，有些地方并加了页末注。

本书的序言及第一章至第五章由林道垣同志翻译，第六、七、八、九、十一章由胡寿松同志翻译，第十、十二章和两个附录由林代业同志翻译。以林道垣同志为主对全书进行了审校。

由于我们水平所限，书中的错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

本书在定稿前承李淑兰同志审读修改并提出了宝贵意见，谨致谢忱。

前 言

这是一本关于线性控制系统设计的入门书，它是从纽约州立大学教的一学期高年级课程所用的讲义发展起来的。这本讲义，加上一些附加内容，又在台湾交通大学低年级一年的课程中用过。本书要求的基础是牛顿定律和克希霍夫定律的知识。不过，熟悉拉普拉斯变换和初等线性代数是有帮助的，但不是必要的，这些知识将在附录中复习到本书所需要的程度。

本书的主要目的，是使读者能够进行控制系统的完整设计，即从列写控制元件的数学方程到最后一步综合需要的补偿器。书中介绍了四种不同的设计方法，并讨论了它们的优缺点。这些方法应用于具有四阶传递函数的跟踪天线系统的例子，然后将设计结果进行模拟和比较。由于这些方法是对控制系统的线性模型发展起来的，因此在实际应用中，对饱和、负载和噪声问题必须加以检验。这些问题本书将反复加以讨论。

线性定常● 控制系统的设计，可以用传递函数或状态变量方程来进行。状态变量方程属于现代控制理论或最优控制理论的范围●，而经典控制理论则全部采用传递函数。本书对两种数学方法都作了介绍：最优设计用传递函数和状态变量方程两种方法讨论，而状态变量反馈问题则用传递函数来解决，这样就把两种方法结合起来了。

最优控制理论的证明所要求的数学超出了本书的水平。但是，这并不妨碍我们应用最优设计方法。作者认为，与根轨迹法和频域法相比，有些最优设计方法在概念上和计算上如果不是更简单的话，至少也是同样简单的。所以本书先介绍了最优设计方法，

● 原文为“时不变”，即“定常”之意。——译者

● 原文为“状态变量方程常常被视为与现代控制理论或最优控制理论等同”。

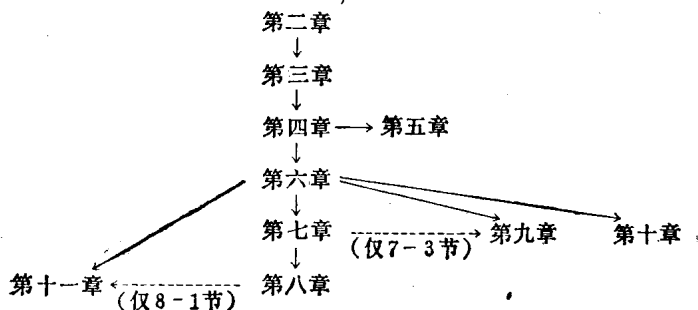
然后才介绍根轨迹法和频域法。当然，研究这些方法的顺序是能够交换的（参看本书序言末尾所列各章之间的逻辑关系）。

在大多数的教科书中，根轨迹法是和单位反馈系统一起介绍的，而本书则从阐述单参数问题开始，这样做，根轨迹法就可以应用于控制系统的任何配置。频域法的阐述也不同于其他的教科书，在从时域技术指标导出频域技术指标上作了努力，虽然这些推导是不严格的，但希望这种方法对于频域法的研究能够有所裨益。

本书重点放在综合方面，而分析只保留到最少的程度，或者只作为综合的工具而加以研究，大多数结果只是作为定理仔细地加以叙述而没有证明。为了帮助读者掌握主要概念，在每章末尾都附有复习题和习题。

由于集成电路的发展和计算机的广泛应用，离散时间法变得越来越重要。本来很想在书中加入离散时间法，因为毕竟连续时间法的许多结果，如实现、最优设计和根轨迹法，均可以直接用于离散时间的情况。然而，这个愿望由下列两个理由而被放弃了：第一，书中的内容超出了一学期课程所能教完的分量；第二，为了对离散时间系统作有意义的介绍，不可避免地要讨论编码、采样、模数转换和某些数字电路的实现，而这就会大大地增加本书的篇幅。

本书各章之间的逻辑关系如下：



陈启宗

——于纽约

目 录

第一章 导论	1
1-1 控制系统	1
1-2 问题的表述	2
1-3 本书的范围	3
参考文献	6
第二章 线性定常系统的数学描述	7
2-1 物理系统和模型	7
2-2 集中参数系统的输入、输出和状态变量	9
2-3 线性定常系统	12
2-4 单变量系统的输入-输出描述	16
2-5 单变量系统的状态变量描述	21
2-6 多变量系统的数学描述	25
2-7 完全表征	29
2-8 小结和复习题	34
参考文献	35
习题	36
第三章 控制部件和控制系统	41
3-1 引言	41
3-2 交流装置和直流装置	41
3-3 伺服电动机	44
3-4 齿轮系	51
3-5 传感器	55
3-6 误差检测器	60
3-7 放大器	63
3-8 补偿网络	65
3-9 控制系统的例子	68
3-10 小结和复习题	77
参考文献	79
习题	79

第四章 定量和定性分析	87
4-1 组合系统的数学描述	87
4-2 传递函数——部分分式展开	91
4-3 动态方程的解	97
4-4 BIBO 稳定性、渐近稳定性和全稳定性	103
4-5 稳定性和完全表征	108
4-6 劳斯-古尔维茨判据	113
4-7 稳定系统的稳态响应	118
4-8 简化	121
4-9 小结和复习题	125
参考文献	126
习题	126
第五章 计算机模拟和实现	133
5-1 动态方程的模拟机模拟	133
5-2 动态方程的数字机模拟	143
5-3 实现问题	146
5-4 真有理函数的实现	147
5-5 向量真有理传递函数的实现	157
5-6 小结和复习题	163
参考文献	164
习题	165
第六章 设计导论	167
6-1 设备选择	167
6-2 性能准则	169
6-3 两种基本设计方法	175
6-4 设计中的困难	176
6-5 复习题	181
参考文献	181
习题	181
第七章 可综合的传递函数和反馈	184
7-1 总传递函数的极点超过其零点的数目	184
7-2 总传递函数的零点和极点	188

X

7-3 为什么要反馈?	190
7-4 小结和复习题	199
参考文献	201
习题	201
第八章 最优控制系统	204
8-1 二次型性能准则	204
8-2 最优控制系统: 传递函数法	207
8-3 最优控制系统: 状态变量法	214
8-4 调节器问题	218
8-5 所有的状态变量都能反馈吗?	220
8-6 补偿器设计: 输出反馈	224
8-7 补偿器设计: 状态反馈	231
8-8 补偿器设计: 部分状态反馈	237
8-9 小结和复习题	243
参考文献	245
习题	246
第九章 根轨迹法	249
9-1 问题表述: 单参数变化	249
9-2 希望的极点位置	251
9-3 根轨迹图	258
9-4 根轨迹法设计	267
9-5 小结和复习题	276
参考文献	278
习题	278
第十章 频域法	284
10-1 频域指标	284
10-2 频域图: 极坐标图、波德图和对数幅相图	290
10-3 频域中的稳定性检验	299
10-4 开环传递函数指标	302
10-5 按波德图设计	313
10-6 小结和复习题	328
参考文献	330
习题	330

第十一章 参数最优化	334
11-1 解析法	335
11-2 数值法	344
11-3 结语	350
参考文献	351
习题	351
第十二章 后记	353
12-1 跟踪天线问题各种设计结果的比较	353
12-2 进一步的课题	357
参考文献	365
附录 A 拉普拉斯变换	366
参考文献	370
附录 B 矩阵理论	371
B-1 矩阵	371
B-2 矩阵的秩	372
B-3 线性代数方程	375
参考文献	376

第一章 导 论

1-1 控 制 系 统

由于本书研究控制系统的分析和设计，因此在一开始就讨论什么是控制系统是适宜的。粗略地说，为了达到某个目的而设置的任何元件的组合或任何装置，都是一个控制系统。这个定义是很模糊的，按照这个定义，许多系统都可以视为控制系统。让我们举一些例子。

一个经济系统的成败是通过总的国家生产、失业率、平均小时工资和消费品价格指数来衡量的。如果消费品价格指标的年增长太大，或者失业率是不可接受的，则经济政策必须加以修改。这可以通过改变利率、政府开支和金融政策而做到。这个经济系统可以看作一个控制系统，其目的是获得一个健全的总的国家生产的年增长，以保持失业率低于一定的百分比和消费品价格指数不变。控制因素就是政府开支、利率和金融政策。这个系统有几个相互联系的因素，其因果关系现在还没有得到准确的了解；此外，有许多不确定的因素（如消费品的消费量、劳资纠纷和国际危机）牵涉到这个系统，所以经济系统是一个极其复杂的控制系统。

发送一个宇宙飞船到月球又把它安全地回收到地球上来，是另一个复杂的控制系统的例子。如果对宇宙飞船的轨道的控制不正确，那么飞船就可能跑到外层空间去。另一个控制问题，是从地球上监控月球表面上宇航员所背的电视摄影机，摄影机通过遥控来扫描月球表面，并对准感兴趣的目标。

并非所有的控制系统都像刚才所提到的那么复杂，室内加温系统、制冷器和烘箱都是控制系统，它们所控制的是某些封闭空间中的温度；浴室中的抽水马桶也是一个控制系统，它保持水面

于预定的高度，驾驶汽车同样也是一个控制问题，我们控制汽车在一条路上以所要求的速度奔驰。

控制系统在现代制造业和工业生产过程中是必不可少的。例如，研究图 1-1 所示的核电站，为了保持蒸汽的压力和温度在固定的水平上，要求有一个控制系统来调整控制棒的位置；要求有另一个控制系统来调节所产生的电压，譬如说，120 伏。调节涡轮轴的转速和保持锅炉中的水位也需要有控制系统。造纸厂的整个生产过程——从送进原料的最初阶段到控制纸的重量、厚度和强度的最后阶段——可以通过使用控制系统而自动地完成。所以控制系统在工业生产过程中的确是必不可少的。

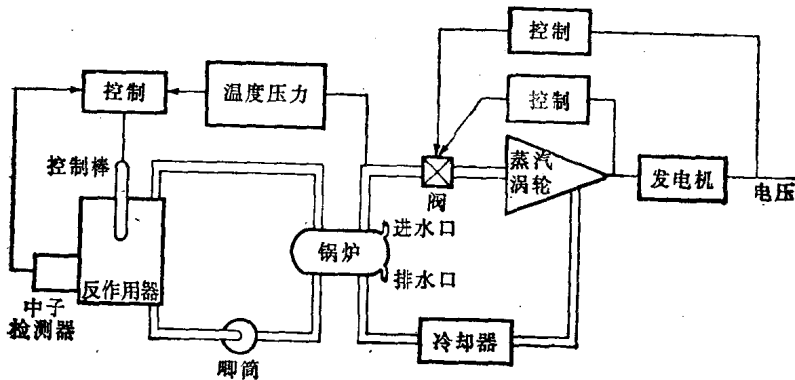


图1-1 简化的核电站

1-2 问题的表述

虽然控制系统可能看起来在形式上很不一样，但它们的设计实质上是同样类型的设计问题。这可以通过画控制系统的示意图看出来。

研究图 1-2 (a) 所示的浴室抽水马桶，这个机构的作用是在水位达到预定高度时自动关阀。这个系统的示意图如图 1-2 (b) 所示。浮筒将水位转变成阀的位置。虽然抽水马桶是一个很简单

的机构，但是它具有控制系统的一切成分。

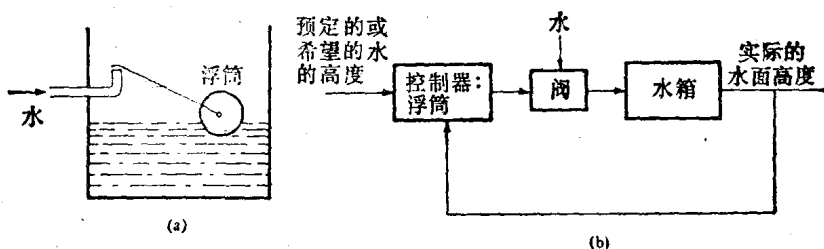


图1-2 抽水马桶示意图

一个室内加热器可以表示成图 1-3 那样，燃烧器通过热空气或热水对房间供热，热电偶测出房间的温度，将它和希望温度比较，然后使加热器接通或断开。我们看到，它的示意图和抽水马桶的示意图是非常相似的。

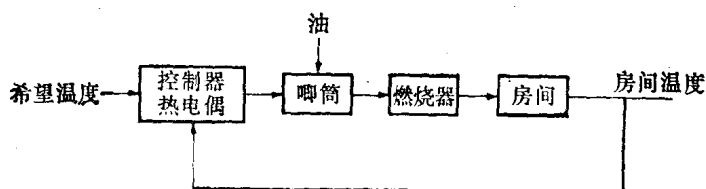


图1-3 室内加温系统示意图

登月舱下降阶段的控制如图 1-4 所示。希望的下降轨道预先计算好，控制的目的是使实际的下降轨道尽可能接近于希望轨道。这个目的是借机载计算机、高度表和其他装置的辅助达到的。作为最后一个例子，衣服干燥机控制的示意图如图 1-5 所示，根据希望的干燥程度和衣服的多少，我们调整计时器，在使用干燥机几次之后，我们很快就能学会正确地调整计时器了。

现在我们从这些例子中抽出基本的设计问题。每个控制系统

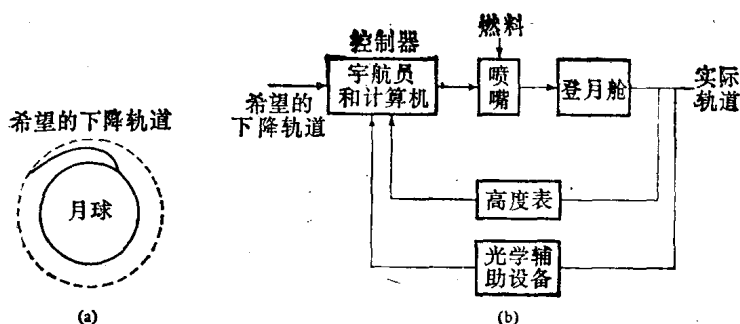


图1-4 登月舱的控制

都有一个目标或使命，如送登月舱到月球或保持室内温暖。登月舱和房间里的空气为受控对象。为了进行控制，我们需要一组装置，如喷管或燃烧器中的阀，这组装置称为执行元件；执行元件和受控对象一起称为设备；设备的输出即为受控变量；设备的输入称为激励信号。为了进行设计，先把目标转换为一个定量的东西，如希望的轨道或温度，这个定量的东西称为希望信号或指令信号。所以设计问题可以叙述如下：给定一个设备和一个希望信

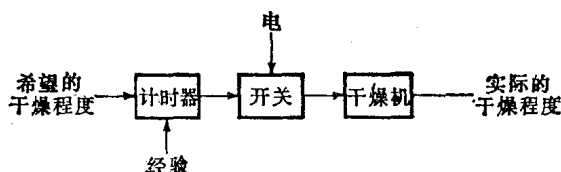


图1-5 简单干燥机控制示意图

号，如图 1-6 所示，设计整个系统，使设备的输出尽可能接近于希望信号。这可以通过设计控制器或补偿器以及使用敏感元件而达到。本书完全致力于这种问题。

基本上有两种控制系统：开环系统和闭环系统即反馈系统。在开环系统中，激励信号是预先决定的，不管实际的输出是什么它都是不变的。洗衣机和简单的干燥机（没有敏感装置的）就是这种类型的控制系统。在闭环系统中，激励信号是希望信号和实

实际输出的函数，图 1-1 至 1-4 的系统就是这种类型的系统。一个正确设计的反馈系统能够比一个开环系统工作得更好，这点以后将要详细讨论，本书的重点就是讨论反馈系统。

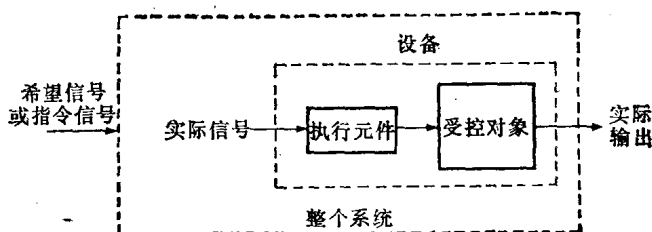


图 1-6 基本的设计问题

1-3 本书的范围

本书专门研究上节所提控制问题的设计，但并不打算全部解决所有提出的问题。事实上，我们只研究一类很特殊的控制系统——即线性的、定常的、集中参数的、连续时间的和确定的系统。一个控制系统可以是线性的或非线性的、定常的或时变的、集中参数的或分布参数的、连续时间的或离散时间的、确定的或随机的。粗略地说，一个系统，如果它满足叠加性，则称为线性系统；如果它的特性不随时间而变，则称为定常系统；如果它具有有限个状态变量，则称为集中参数系统（见第二章）。一个系统，如果它的响应在所有时刻都能确定，它就是连续时间系统；如果它不含有噪声，它就是确定系统。对于这一类系统已经能够相当完满地解决所提出的问题。

在第二章中，我们介绍全书所用的数学方程。首先介绍线性和定常的概念，然后从这些概念出发研究输入-输出描述，特别是传递函数描述和状态变量描述。同时也介绍完全表征的概念，在采用传递函数时这个概念是很重要的。

在第三章中，我们研究控制系统部件的模型和数学描述，然