

自动控制理论

国防工业出版社



7-222
111
21

自动控制理论

〔日〕 上滝致孝、长田正、白川详充、
长谷川健介、深尾毅 等编著

张洪钺 译

王纪文、程 鹏 校
高为炳、谭锐先

1107

1979.10.

国防工业出版社

DS81/07
内 容 简 介

本书是根据日本电气学会1970年出版的大学讲座“自动制御理论”(改订版)一书译出。书中内容是把现代控制理论同古典控制理论适当地结合起来,介绍了自动控制的基础理论,其中包括线性控制理论、反馈控制系统、采样控制系统、非线性控制系统、用统计方法对自动控制系统的研究以及最优控制理论。

本书可供自动控制技术专业的工程技术人员及大专院校有关专业的学生参考。

自动制御理论
(改订版)

〔日〕 上滝致孝 等编著
电气学会 1970

*

自动控制理论

张洪钺 译

王纪文 等校

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可証出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

太原印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 137⁷/₈ 352 千字

1979年2月第一版 1979年2月第一次印刷 印数: 00,001—50,400册

统一书号: 15034·1734 定价1.70元

目 录

绪论	1
----	---

第一章 数学准备 (向量和矩阵)

1.1 向量和矩阵的种类	7
1.2 矩阵的运算	8
1.2.1 矩阵的相加和相减	8
1.2.2 标量积	9
1.2.3 矩阵的积	9
1.2.4 子矩阵	11
1.2.5 矩阵的微积分	12
1.3 行列式和逆矩阵	13
1.3.1 行列式	13
1.3.2 子行列式和余因子	15
1.3.3 余因子矩阵和逆矩阵	16
1.4 向量空间	17
1.5 矩阵的特征值和特征方程	19
1.6 二次型	21
1.7 向量的内积和范数	24
1.8 摘要	25
1.9 习题	26

第二章 状态变量和线性动态系统

2.1 线性动态系统	28
2.2 状态变量和状态空间	29
2.3 线性动态系统的过渡响应	34

2.3.1 变系数系统	35
2.3.2 常系数系统	38
2.3.3 变系数系统的转移矩阵	42
2.4 可观性和可控制性	45
2.5 摘要	51
2.6 习题	51

第三章 拉普拉斯变换和传递函数

3.1 拉普拉斯变换和拉普拉斯反变换	53
3.1.1 拉普拉斯变换	55
3.1.2 拉普拉斯反变换	59
3.2 向量的拉普拉斯变换和系统的特征方程式	62
3.3 传递函数和过渡响应	65
3.4 传递函数和方块图	70
3.5 传递函数和状态方程	78
3.6 摘要	87
3.7 习题	88

第四章 频率响应和反馈控制系统的稳定性问题

4.1 频率响应的意义	90
4.2 频率响应的表示方法	92
4.2.1 向量轨迹图	92
4.2.2 对数频率特性 (波德图)	94
4.2.3 增益-相位图	97
4.3 控制系统的基本构成环节	99
4.4 频率特性和过渡响应	101
4.4.1 由过渡响应求频率响应的方法	101
4.4.2 由频率响应求过渡响应的方法	103
4.5 反馈控制系统	105
4.5.1 开环频率特性和闭环频率特性	106

4.6	动态系统的稳定性	111
4.7	劳斯和胡尔维茨稳定判据	113
4.8	乃奎斯特稳定判据	116
4.9	摘要	124
4.10	习题	125

第五章 反馈控制系统的分析和设计

5.1	稳态特性的分析	127
5.2	过渡特性的分析	131
5.3	增益余量和相位余量	134
5.4	根轨迹法	135
5.5	控制系统设计概要	141
5.6	调整增益的补偿方法	144
5.7	串联补偿法(加补偿环节的第一种方法)	146
5.7.1	相位超前补偿	146
5.7.2	相位迟后补偿	150
5.8	反馈补偿法(加补偿环节的第二种方法)	152
5.9	摘要	154
5.10	习题	155

第六章 采样控制

6.1	采样控制系统	157
6.2	z 变换	160
6.2.1	z 变换的定义和变换公式	160
6.2.2	z 变换的重要定理	164
6.2.3	采样系统的频率特性	166
6.3	脉冲传递函数	168
6.3.1	脉冲传递函数的定义	168
6.3.2	广义 z 变换	174

6.4	保持器	177
6.4.1	保持器的传递函数	178
6.4.2	保持环节的频率特性	181
6.5	采样控制系统的稳定性	186
6.5.1	采样系统稳定的意义	186
6.5.2	稳定性判据	190
6.6	采样控制系统的设计	196
6.6.1	用模拟量生产过程控制方式的设计方法	197
6.6.2	有限时间响应	201
6.7	摘要	209
6.8	习题	211

第七章 非线性动态控制系统

7.1	概述	213
7.2	非线性系统的数学模型	214
7.3	非线性环节的分类	217
7.4	几何学的分析	220
7.5	线性系统的性质	224
7.6	非线性系统的特征	227
7.7	稳定的概念	231
7.8	非线性控制的意义	235
7.9	摘要	241
7.10	习题	242

第八章 非线性系统的分析

8.1	概述	245
8.2	线性伺服系统	245
8.3	相平面分析	249
8.4	非线性控制系统的相平面分析	253

8.4.1 非线性特性是分段线性的情况	253
8.4.2 不连续非线性系统的相平面分析	258
8.5 描述函数法	264
8.6 用描述函数法分析稳定性	270
8.7 摘要	273
8.8 习题	274

第九章 非线性控制系统的稳定性判别法

9.1 概述	276
9.2 时间域内的稳定性判别法	276
9.2.1 李亚普诺夫第二法	276
9.2.2 线性常系数系统的稳定问题	280
9.2.3 李亚普诺夫第二法在稳定性判别以外的应用	283
9.2.4 非线性系统的稳定问题	285
9.3 频率域内的稳定性判别法	294
9.4 摘要	298
9.5 习题	299

第十章 用统计学方法研究自动控制系统

10.1 概率论	301
10.1.1 概率	301
10.1.2 联合概率密度函数和相关	306
10.1.3 随机过程	308
10.2 相关函数	312
10.2.1 定义	312
10.2.2 自相关函数的性质	313
10.2.3 互相关函数的性质	315
10.2.4 自相关函数和互相关函数的关系	315
10.3 频谱密度	318
10.3.1 双边拉普拉斯变换	318

10.3.2	频谱密度和相关函数	322
10.3.3	频谱密度的传递	328
10.3.4	平均功率的计算	330
10.3.5	频谱密度之间的关系	332
10.4	有随机输入信号时控制系统的设计	336
10.4.1	反馈控制系统的误差	337
10.4.2	最优线性滤波器	340
10.4.3	反馈控制系统最优参数的确定	348
10.4.4	卡尔曼滤波器	351
10.5	相关函数的计算	357
10.5.1	模拟的方法	357
10.5.2	用数字计算机的计算方法	358
10.6	摘要	360
10.7	习题	361

第十一章 最优控制理论

11.1	概述	363
11.2	最优化的方法 (静态的情况)	364
11.2.1	极小的条件	364
11.2.2	存在等式约束条件的情况	364
11.2.3	计算方法 (梯度法)	368
11.2.4	计算方法 (二阶梯度法)	370
11.2.5	牛顿-拉甫生法	371
11.3	最优控制 (离散时间的情况)	372
11.3.1	基本形式	372
11.3.2	具有二次指标函数的线性系统	375
11.3.3	边界条件的一般化	378
11.4	最优控制 (连续系统)	381
11.5	用变分法的解法	385
11.5.1	变分法	385
11.5.2	用变分法求解最优控制问题	388
11.6	一般情况和极大值原理	391

11.6.1 一般情况	391
11.6.2 极大值原理	397
11.7 最短时间控制	401
11.8 计算方法	405
11.9 最优反馈控制	407
11.9.1 哈密顿-雅可比方程	408
11.9.2 动态规划	410
11.9.3 具有二次指标函数的线性系统的最优反馈控制规律	413
11.10 摘要	414
11.11 习题	416
附录	418
习题解答	426

绪 论

所谓控制,是指某个主体使其它的对象按照一定目的来动作。所谓“其它的对象”可以是一种过程,也可以是器械,再大的则是生产系统。一般将这些称为控制对象。所谓“某个主体”从根本上说是人,或是在自动控制方面部分代替人的器械。因此,在自动控制中一般将它叫做控制机构。而所谓“动作”,器械的动作就不用说了,一般说来是指“其它对象”的“状态”的变化。

在考察变化时,有时是单纯地讨论从状态 x_1 到 x_2 的变化适当与否或其方法等等,有时则必须将它的“时间变化”考虑在内。象前者那样,没有必要将时间变化当作本质的东西来考虑时,称为静态考察,而后者必须考察时间变化时,则称为动态考察。在静态考察时,事物现象的特性叫做静特性,而动态考察时,事物现象的特性则叫做动特性。在古典控制论中,主要是研究一个量的动特性,随着用控制理论来处理的系统的增大,有必要从静的和动的双方进行考察。

所谓静态,即使它在宏观上处于变化的过程中,但由于它是一种不必直接把时间当作变量来考虑的状态,因此能把它解释为在时间上是固定不变的状态。也就是说,在所考虑的范围中的现象是达到平衡的状态,我们把它称为平衡状态或定常状态。换句话说,静态论是处理定常状态下的问题。与此相反,动态论则是处理非定常状态下的问题。这时,直接把时间当作变量的微分方程或积分方程以及差分方程等当然就成为主要的东西了。

可是问题还在于所谓“按照一定的目的”。不用说,这是指在给定条件下动作所按照的目的。但是,被给定的条件如果是幻

想的，在数学上即使有意义，在工程上则没有意义，而且，根据这样的条件，有时观测和控制本身就是不可能的。总括地考察这些问题，就构成了对系统的可观测性和可控制性的讨论。

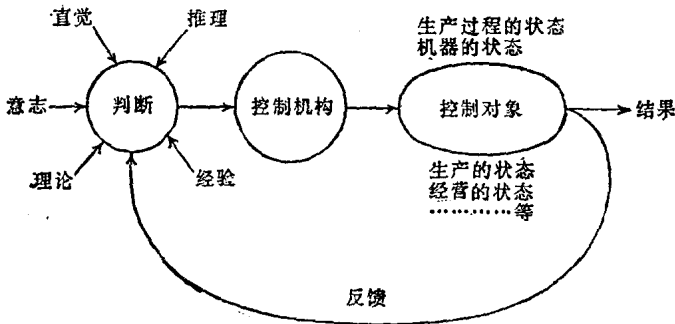


图 1

一般说来，理论的发展是着眼于对事物性质的综合的抽象的掌握。也许可以说，它是和数学本身的发展相平行的。控制理论也不例外，以线性伺服理论为核心的古典控制理论已向着能包含非线性系统动作的状态向量控制论变化。这种状态向量论不只是从系统的输入输出来讨论系统的特性，不仅把输出当作系统的状态，而是把系统内部的各部分状态综合起来表示系统的特性。

控制的目的是，在古典控制的概念中是简单地盲目追求目标值，现在则已发展成为适当地选择目标值本身，这样一种扩大了的概念。而且，使物体最有效地运转的操纵效率理论在近代控制理论的观点上也得到了重新估价，并发展了今天的最优控制理论。单纯的极值论和变分学的方法以及状态向量论相结合，产生了象贝尔曼的动态规划和庞特里亚金的极大值原理等这样的动态最优控制的卓越的概括理论。

包含控制对象和控制机构在内的全部系统称为控制系统。系

系统的输入称为目标值，系统的输出称为被控制量。在反馈控制系统中，把目标值和被控制量进行比较来决定控制动作(见图1、图2)。

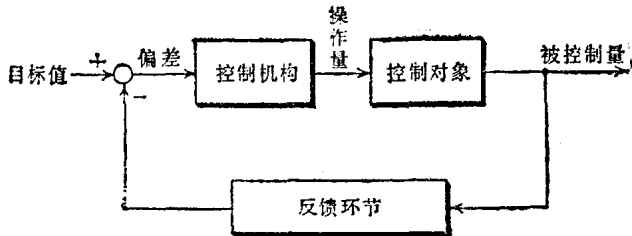


图 2

古典控制理论主要研究单一回路的反馈控制系统，按照线性控制系统那样，它仅仅把目标值和被控制量的偏差当作基本量。一面看控制结果，一面反复地进行修正，这样一种反馈控制的方法从不够确切的观点来看，也许可以说是放弃了控制算法。在这种反馈系统中，即使控制算法编排得不是十分精确地符合控制对象的动特性，但只要系统具有收敛性，偏差也必然收敛到零。而且，由于反馈本身所具有的性质，还可以校正那种弯曲类型的非线性使其更加线性化。重要的问题是不破坏稳定性，这也许就是在反馈控制系统中重视稳定性问题的原因。

这样，反馈控制可以大体上没有误差地去控制该系统。然而，经常地进行“反省”这种性质不能不是“消极的”。特别是在连续系统中的反馈，在动作性质上，它的不间断的“神经质”而又不够大胆将会造成一种不良的情况。如后面所说，微分的动作也许能弥补这个短处。然而，如果这个微分的动作也是用反馈的结果，那问题就不能得到本质上的解决。

一般说来，机动性是和“反省的行为”相反的东西，正因为如此，使前馈控制有了意义。前馈控制的方法提前预测现象并构

成对策，一旦行动起来，无需回顾控制的结果（见图3）。因为没有反馈，所以有必要周密地计算它的动作程序。

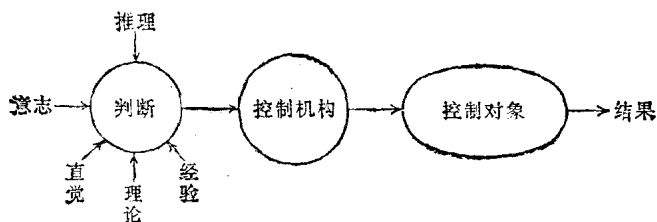


图 3

理论的发展方向是统一地解释各种现象，与此同时，工程学则毕竟应在一个方面去提高对各个具体对象的适用性。因为工程学是一门实用的科学，它不能仅仅满足于理论体系的艺术性。所谓工程学可以说是将天上的声音降到地面的学问，然而这个声音也许还可以从地面上反射到天上。不管怎么说，因为控制系统是一种系统，在上述的意义上控制理论极可以说是一门工程科学。

随着数字计算机的发展和普及，自动控制系统已朝着将人包含在内的大控制系统的分析和综合问题的方向发展。而且，只要一掌握系统中各部分的各种各样的状态，也许可以说无论什么样的控制都能做到，这就构成了真正的综合的命题。而且随着计算机使用可能性的扩大，越发可以实现高级的控制算法。为此，有必要掌握信号自身，也有必要基于统计处理和模型识别论等方法来进行研究。

在工程系统方面，决定各个系统的发展方向是重要的，而在学科体系方面评价各种理论的地位也是重要的。不是罗列现象地去盲目学习，而是经常地想一下这里是什么意思，研究其在理论体系中所占的地位，即使是笼统地也有必要。果能如此，至少对事物所涉及到的范围的意义搞清楚了，从而对该事物也会更明确一

步。所谓“群盲摸象”，只限于局部而不管整体，这不是一种好的方法。本书就是在这样的意图上来编写的，它不是单单去堆积过去的知识，而是直接从状态向量论出发。并且为了必要的连贯性，不怕重复多次。另外，即使是古典的方法，但还有重要的存在价值的话，在初步学习上就尽量不加遗漏，把它适当地展开。

在线性控制论里（第一章～第五章），为了明确控制系统总的考虑方法，首先引入了根据状态变量法的研究方法，再说明古典的反馈控制，特别注意两者的有机联系。第一章是以向量和矩阵为中心的数学上的准备。第二章引入了状态变量的概念，以及基于状态变量在时间域里来表示和分析控制系统。第三章用着眼于输入和输出间关系的频率域的方法表示和分析控制系统，同时说明它和状态变量法之间的联系。第四章说明以反馈控制系统为中心内容的频率响应法以及稳定性问题。第五章研究反馈控制系统的分析和设计等问题。

在第六章采样控制系统中，讨论了线性常系数的离散系统。因为这种系统包含了在时间上不连续的因素，作为实际的系统来讲，在物理上是非线性的，但如果仅仅注意输入和输出，那末线性关系还是成立的。即使是离散系统，状态变量法也可以应用，但对于有限时间响应等实用的算法，本书还是用了旧的方法。

第七章的非线性动态系统中，焦点是放在非线性系统上，阐述了包含线性系统在内的控制系统的定性理论。有关非线性系统的概括性理论，它越是概括，就越不能和线性控制系统分割开来进行研究。往下，在第八章的非线性控制系统的分析中，把第七章的定性理论应用于具体的非线性控制系统，严密地分析了各种控制系统。在第九章的非线性控制系统的稳定性判别法中，提出了第七章定性理论中特别重要的稳定问题，说明它能巧妙地用于判别非线性控制系统的稳定性。

第十章是根据统计的方法处理自动控制系统。在该章中，从概率论的初步概念到卡尔曼滤波器作了大概的解释。还叙述了随

机信号通过系统时掌握系统性能的方法。最后，试图使读者了解所谓系统的识别具有什么意义。

在第十一章最优控制理论中，对静态最优化问题作了一般性的解释，动态最优化问题是作为静态最优化问题的数学扩展来说明的，试图使读者能概括地掌握最优控制问题。由于本书篇幅所限，有些数学推导省去了，读者如需深一步理解，只要参考一般的数学书就够了。

第一章 数学准备（向量和矩阵）

我们所研究的自动控制系统，一般能用任意阶的微分方程来表示，通过适当地选择变量，还可以用一阶微分方程组来表示。系统越复杂，一般来说，微分方程的阶次就越高，从而，一阶微分方程组的方程数目也越多。为了统一地处理这种微分方程组，采用向量和矩阵的运算方法是方便的，而且也容易掌握其物理意义。为了容易理解正文，在本章中叙述了有关向量和矩阵的简单的数学准备知识。

1.1 向量和矩阵的种类

矩阵是由 m 行 n 列排列而成的长方形阵，一般用大写黑体字来表示。矩阵 $\mathbf{A}$ 可写成

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & & \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

a_{ik} 是矩阵的元素。有时也把这个矩阵简写成 $[a_{ik}]$ 或 $\mathbf{A} = [a_{ik}]$ 。 m 行 n 列构成的矩阵叫 $(m \times n)$ 矩阵。特别在 $m = n$ 时，称为方阵，而 n 是方阵的维数。 $(m \times 1)$ 矩阵叫做 m 维列矩阵，或 m 维（列）向量，常用下式所示的小写黑体字表示

$$\mathbf{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

此外， $(1 \times n)$ 矩阵称为 n 维行矩阵，或 n 维行向量。列向