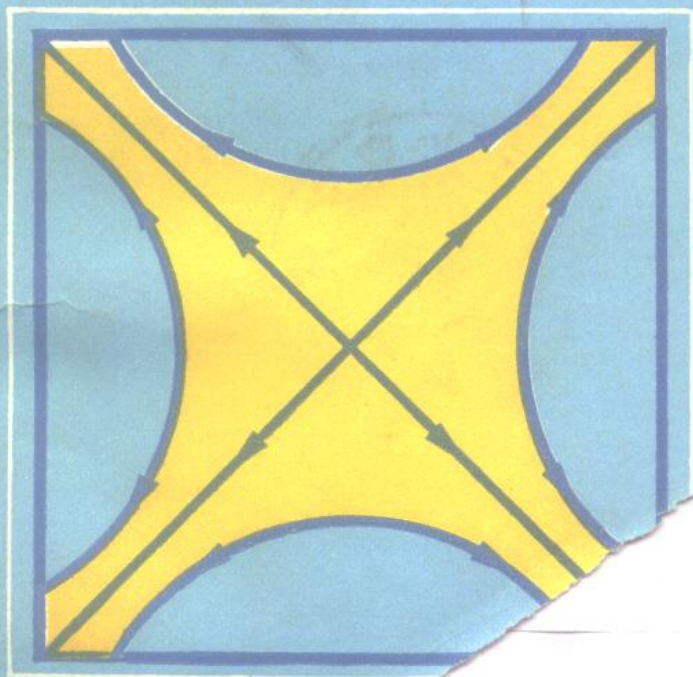


基础控制 理论

畑 四郎 著



北京工业学院出

基础控制理论

畑 四郎 著
郑 炎 译

北京工业学院出版社

内 容 简 介

本书是日本控制理论专家，大阪府立大学校长畑四郎教授为非自控专业讲授控制理论而编写的教材，是作者多年教学经验的总结。原书已再版七次，本书是根据85年最新版本翻译的。本书在内容取舍、层次安排上较符合初学者的认识规律，不但可作为非自控专业学生学习控制理论的教材，也可作为向广大工程技术人员普及基础控制理论和自学时的参考书。

全书共分八章：第一章至第六章是线性控制系统理论，其中第六章介绍了与工业自动化关系密切的过程控制理论。第七章介绍了非线性控制系统的研究方法，有关相平面和状态变量的概念，为进一步学习现代控制理论打下基础。第八章介绍离散值控制系统。

220157

基础控制理论

畑 四郎 著

郑 炎 译

※

北京工业学院出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防科工委印刷厂印刷

※

787×1092毫米 32开本 8.875印张 191千字

1987年6月第一版 1987年6月第一次印刷

印数：1—5000册

统一书号： 15434·58 定价：1.50元

译者序

当代科学技术的发展特点，一是不断探索新的研究领域，即开拓边缘学科。一是各学科、各专业的相互渗透，即研究方法和技术手段的创新，其中又以电子数字计算技术和自动控制技术向各个领域的渗透、转移最为明显。因此控制理论作为许多专业必须问津的基础理论已是大势所趋。目前国内外运用控制理论来解决社会科学，经济、生物系统，乃至机械结构设计等方面的问题已取得可喜成果。

自动控制的观念和技术由来已久，但古典控制理论作为独立学科的存在，只有四十多年历史。到六十年代初，为满足空间技术、现代武器系统和大工业生产的需要，对自动控制技术提出了更高的要求，再加上电子数字计算机的优异功能，促使以状态空间为基础的现代控制理论得到飞速发展。现代控制理论现已初具规模，在理论和实践上都有丰硕成果，正在向人工智能和智能控制的高级阶段发展。但现代控制理论的出现，丝毫未降低古典控制理论的重要实用价值，这是因为：

1. 从工程实践上看，实际系统中的绝大多数是单变量、线性、集中、时不变系统，或者是可以在工程允许范围内近似为这样的系统，这恰恰是古典控制理论的用武之地。

2. 经过多年的工程实践，古典控制理论是已经“工程

化”了的理论，有丰富的图表、资料，有完备的实验手段可资利用。因此在工程技术领域里，古典控制理论仍然是分析和综合自动控制系统的主要技术手段。

3. 掌握了古典控制理论，可以更快更好地学习现代控制理论。前者是控制理论的基础，后者是在此基础上的引伸和发展。

本书是作者多年学习的体会和教学经验的总结，向读者介绍了古典控制理论的基本概念和主要内容，内容的深度、广度，层次的安排，适合于非控制专业的教学和工程技术人员自学。讲述方法的独到之处在于从例题出发，导出基本公式和引伸出理论要点，符合初学者的认识规律，便于理解、记忆。各章节对初学者容易搞错的地方特别强调说明，不失为使读者少走弯路的经验之谈。习题的安排，既是为了加深对所学内容的理解，又考虑到提高计算能力和设计实际系统的技巧，应该说作者的安排和剪裁颇具匠心。

本书根据日本森北出版社1985年2月8日第七次印刷版本校对出版，对原文中某些不妥之处，征得原著者同意后，在译文中已作订正。

译稿经韩九如高级工程师技术校阅，并提出不少宝贵意见，谨此致谢。限于水平和经验，错漏之处在所难免，诚恳希望读者批评指正。

郑 炎

1985.5.

序 言

这次，我的日文版著作《基础控制理论》一书由郑炎先生译成中文将要介绍给中国的广大科技工作者和同学们，我表示热烈祝贺。

何以说反馈控制的概念和技术是推动当代科学技术取得重大进展的重要原因，就是作为其核心的控制理论，当前对从事工程技术的科技工作者和研究人员来说，已经成为必不可少的基础知识。同时，对专门研究生物系统、经济系统、社会系统等领域的人们来说，也是极为有用的知识。

好在这本书作为教科书在日本也得到好评，自初版以来，每年都要增印上千册。就其内容易于理解、学习易于掌握而言，从我以它为教材的实践经验中得到了证实。

诸位读者，我期待着你们在很好地理解书中内容，提高自身应用能力的基础上，培养向更高深的内容挑战的能力。并衷心祝愿你们的成就会带来反馈控制技术在中国的普及和技术水平的全面提高。

最后，我要指出，由于译者郑炎先生对日文版原著《基础控制理论》的仔细阅读，提出了很多订正意见，在表示敬佩的同时顺致感谢。

据译者告知，中译本的出版成功，北京工业学院出版社给予了极大的支持，在此深表谢意。

期待着中译本的出版将日中学术交流推进一步。

1985.6.5

原著者 畑 四郎

(日本国大阪府立大学校长)

目 录

第一章 控制的概念

1.1 状态的推移和控制	(1)
--------------------	-------

1.2 反馈控制	(2)
----------------	-------

习题1	(5)
-----------	-------

第二章 环节的特性与响应

2.1 线性环节和非线性环节	(6)
----------------------	-------

2.2 拉普拉斯变换	(7)
------------------	-------

(1)拉普拉斯变换的定义 (2)阶跃函数 (3)指数函数
(4)一阶导数 (5)不定积分 (6)高阶导数 (7)延迟函数
(8)三角函数 (9)s 域中的微分 (10)s 域里的积分
(11)包含变量的情况 (12)终值·初值

习题2	(23)
-----------	--------

2.3 拉普拉斯反变换·展开定理	(24)
------------------------	--------

(1)拉普拉斯反变换 (2)留数法 (3)部分分式法

习题3	(30)
-----------	--------

2.4 传递函数·方块图	(31)
--------------------	--------

(1)传递函数的定义 (2)传递函数的合成 (3)方块图
的等效变换

习题4	(44)
-----------	--------

2.5 脉冲响应·单位阶跃响应·频率响应	(46)
----------------------------	--------

(1)褶积积分 (2) δ 函数 (3)脉冲响应 (4)突变响
应(5)频率响应与频率传递函数

2.6 惯性环节及其响应	(54)
--------------------	--------

2.7 振荡环节及其响应	(57)
(1) $\zeta < 1$ 的情况 (2) $\zeta = 0$ 的情况 (3) $1 \leq \zeta$ 的情况	
2.8 时延环节	(63)
习题5.	(64)
2.9 频率传递函数的表示法	(66)
(1) 向量轨迹 (2) 伯德图 (3) 振幅-相位曲线	
习题6.	(76)
第三章 闭环系统的特性	
3.1 特征方程的根与过渡响应	(77)
3.2 闭环系统的稳定. 不稳定与稳定边界	(80)
3.3 稳定性判据	(83)
(1) 古尔维茨判据 (2) 劳斯判据 (3) 奈奎斯特判据	
(4) 伯德图判据	
习题7.	(95)
3.4 闭环系统的频率响应	(95)
(1) 采用反向量轨迹法 (2) 尼柯尔斯图法	
3.5 闭环系统的过渡特性	(100)
(1) 闭环系统响应时间的讨论 (2) 二阶滞后系统的过渡响应	
3.6 闭环系统的稳态特性	(106)
(1) 对于目标值的静态偏差 (2) 由扰动引起的稳态偏差	
习题8.	(111)
3.7 根轨迹法	(112)
(1) 开环传递函数和根轨迹 (2) 根轨迹作图法则	
(3) 用根轨迹改善闭环系统的过渡特性	
习题9.	(125)
第四章 伺服元件与伺服机构	
4.1 电位器	(126)
4.2 差动变压器	(128)

4.3	自整角机	(130)
4.4	旋转变压器	(131)
4.5	在测量、记录仪器中伺服机构的应用	(134)
4.6	调制器与同步整流	(137)
4.7	采用可控硅的闭环系统	(141)
习题10		(144)

第五章 伺服系统的综合

5.1	伺服系统的设计	(145)
5.2	特性补偿	(146)
(1)由调整增益而引起的特性的改善 (2)由相位补偿而引起的特性改善 (3)反馈补偿		
5.3	伺服系统综合的步骤	(154)
(1)从尼柯尔斯图调整增益和算出响应时间 (2)根据伯德图讨论稳定性 (3)根据稳态偏差的计算讨论控制精度 (4)根据相位超前环节的串联校正改善响应速度 (5)根据相位滞后环节的串联校正改善控制精度		
5.4	伺服系统相位补偿练习	(161)

习题11	(163)
------------	-------

第六章 过程控制

6.1	过程控制系统的构成	(164)
6.2	过程的特性	(165)
6.3	过程调节器的动作	(166)
(1)开关控制(双位置动制) (2)比例控制 (3)积分控制 (4)比例加积分控制 (5)微分控制与 $P-I-D$ 控制		
6.4	调节器的最佳调整和其他控制方式	(173)
(1)调节器的最佳调整 (2)扰动对策 (3)最佳控制 (4)计算机直接控制DDC		

习题12	(176)
------------	-------

第七章 非线性控制系统

7.1	非线性系统概要	(177)
7.2	线性化法	(179)
	(1)线性化的原理 (2)实测曲线的线性化	
7.3	状态变量与相平面	(184)
7.4	相平面解析法	(187)
	(1)关于相平面轨迹 (2)在相平面解析法中的限制	
	(3)关于二阶线性系统的相平面轨迹 (4)相平面轨迹	
	的构成 (5)相平面轨迹与过渡响应	
7.5	折线近似法	(199)
7.6	极限环	(203)
7.7	描述函数	(205)
	(1)描述函数和它的求法 (2)用描述函数判别非线性	
	系统的稳定性	
7.8	伺服系统的最佳转换	(210)
习题13		(212)

第八章 离散值控制系统

8.1	离散值控制系统概要	(214)
8.2	采样数据的表示	(215)
8.3	z 变换 · z 反变换	(217)
	(1) z 变换及其求法 (2) $F^*(s)$ 的积分运算 (3) z 反	
	变换及其求法 (4)终值定理 · 初值定理	
8.4	脉冲传递函数	(226)
8.5	采样定理	(229)
8.6	保持器	(231)
	(1)零阶保持器 (2)一阶保持器	
8.7	闭环系统的脉冲传递函数	(234)
8.8	扩展 z 变换	(236)
	(1) $L < T$ 时 (2) $L = kT + T_L$ ($T_L < T$)时	
8.9	有限整定时间响应	(241)

	(1)有限整定时间响应的概念 (2)脉冲传递函数 $D(z)$ 的构成	
8.10	脉冲传递函数的向量轨迹	(245)
	(1) s 平面与 z 平面的对应 (2) $G(z)$ 的向量轨迹	
8.11	采样控制系统稳定性的判别	(249)
	(1)取决于特征方程式根的判据 (2)奈奎斯特稳定判据	
习题14.		(251)
附录		(254)
参考文献		(265)
习题解答		(266)

第一章 控制的概念

1.1 状态的推移和控制

现在，我们来考察一下浴盆里的水位和水温的例子。如图 1.1 所示，水、煤气可以分别由阀门 V_w 和 V_g 来调节。当人们入浴的时候，水位 h 和水温 t 都要发生变化，把最理想的状态（希望状态）定为： $t=42^{\circ}\text{C}$ ， $h=60\text{cm}$ ，现状态用 $S(t, h)$ 来表示。为了保持最理想状态，应该怎样操作阀门 V_w 和 V_g 才好呢？为此，应先求出希望状态 $S_0(42, 60)$ 和现状态 $S(t, h)$ 之间的差异，也就是偏差 $e(42-t, 60-h)$ ，并以此作为确定阀门操

作量的依据。这种关系用图 1.2 来表示，若把作为确定操作量依据的偏差加在控制环节上，由此而产生必须的操作量，并把它传递给控制对象，使之成为仅仅取决于温度的传递环路，如图 1.3 所示。我们知

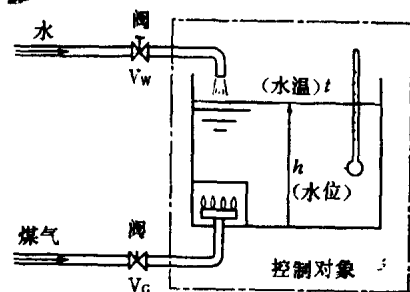


图1.1 浴盆的水位和水温

道，为了完成这样的控制，必须构成由控制环节、控制对

象、检测元件等组成的闭合回路。另外，现状态 $S(t, h)$ 是随操作量 $u(W, G)$ 和各种外界扰动而时刻变化的。提供适当的操作（控制），使得现状态向希望状态方向推移、进而近似地保持希望状态，这就是控制的概念。如果在这样的闭环控制环路中有人参与称之为手动控制；如果从判断到操作阀门全部由机器来实现的话称为自动控制。

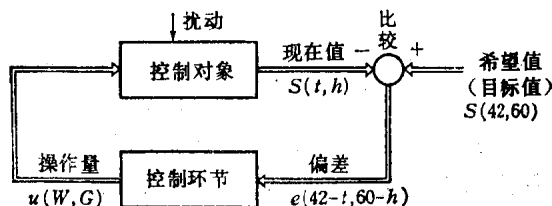


图1.2 控制系统的概念

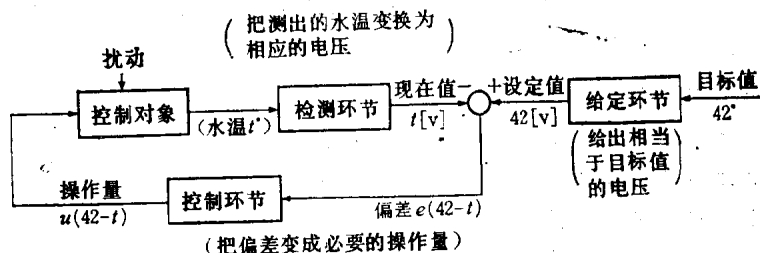


图1.3 温度控制系统的方块图和各环节的功能

1.2 反 馈 控 制

为使控制量在目标值变动和存在外界扰动的情况下能保持与目标值的近似，必须对现状态进行检测并给出作为控制

量的偏差，以及构成闭环即所谓的反馈控制系统。图 1.4 所示就是反馈控制系统的一般构成。反馈控制系统的特点是：

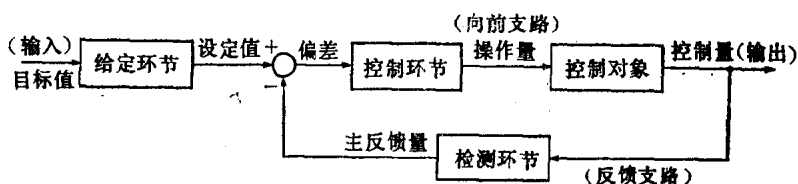


图1.4 反馈控制系统的构成

(i) 对目标值和控制量进行比较，并能自动地进行修正以消除这个差异；

(ii) 信息总是沿着一个方向传递，经由反馈支路形成闭环。

根据目标值随时间变化的规律把反馈控制系统分为：

(i) 定值控制（程序控制、电压、速度等的自动调节）；

(ii) 随动控制（伺服机构、速度控制、过程控制等）。

工厂里在加工原料制造产品的工艺过程中，要求控制系统切实保持其温度、流量、压力等状态按预定程序变化，即这些过程的控制大部分属于定值控制。另外，在自动平衡式测量仪器中，目标值就是被测量的变化，为了保持电位差计或电桥的平衡，要不断移动电位器的滑动接点，与之连接在一起的指针位置也随之而移动。对于位置和速度的随动控制装置，专门叫做伺服机构。

对这些控制系统的要求是：

(i) 响应速度要快；

(ii) 动作要稳定;

(iii) 控制精度要高。

图 1.5 是室温自动控制一例。由热电偶检测出室温，由电位

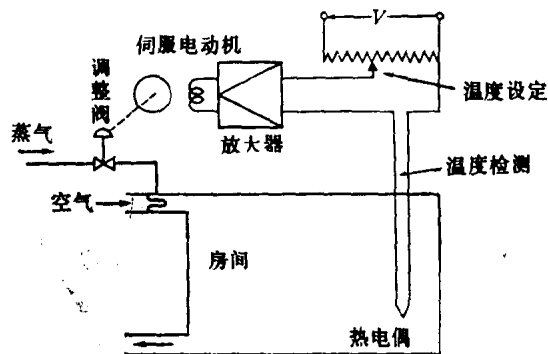


图1.5 室温自动控制系统

器设定温度目标值并将二者进行比较得到电位差，经放大后驱动伺服马达来调整调节阀，进而控制蒸气量以保持室温恒定。

采用反馈控制的优点是：

- (i) 提高产品质量，产品的一致性良好；
- (ii) 提高生产效率；
- (iii) 节约原料、燃料和动力；
- (iv) 减轻劳动强度，保证工作安全；
- (v) 延长生产设备的寿命。

在生产工艺过程中，除反馈控制外，顺序控制也是不可缺少的。它按预定的顺序，或者按特定理论约束的顺序，控制各阶段依次进行。但在本书中只涉及反馈控制理论。

习 题 1

1. 说明设定环节的作用。
2. 电烘箱的温度控制和防止过热是用什么样的机构来实现的。
3. 在定值调节系统里，偏差是零而操作量不是零，试叙述其理由。
4. 在手动控制系统里，必须要有人介入，试论述由此而产生的不良后果。

第二章 环节的特性与响应

2.1 线性环节和非线性环节

由于自动控制系统是反馈系统，其动作的结果能使某个控制量自动地与目标值趋于一致，因此我们希望控制系统的动作具有如下性质。这些虽已在 1.2 节中提及，但在这里仍需强调指出并加以说明。这就是：

(i) 对于目标值的变化，控制量能快速追随（响应要快）；

(ii) 如果控制量偏离目标值，其偏离幅度要随时间而减小（稳定性要好）；

(iii) 在稳态下，目标值和控制量之间的差异要尽可能小（控制精度要高）；

(iv) 扰动的影响要尽量小。

在反馈控制系统中，因为在信息传递的通道上配置了各种传递环节，如果我们不知道各环节的输入输出之间具有什么样的特性，就不可能知道作为其整体的控制系统会怎样动作，或者不知道上述要求在何种程度上能得到满足。这样，计算控制系统各环节和总体特性，或者根据测试进行讨论便是解析。而给出控制系统必需的指标，为了实现它，确定所需环节的种类和各自的规格这件事就是综合。

用于控制系统的环节可分为：晶体管放大器、可控硅放