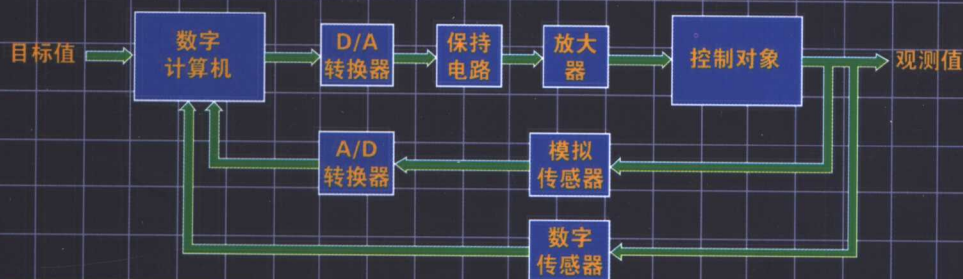


OHM 大学理工系列

控制理论

〔日〕藤井隆雄 编著



数字控制系统的构成



科学出版社
www.sciencep.com



控制理论

〔日〕 藤井隆雄 编著
卢伯英 译

科学出版社
北 京

图字:01-2002-4417 号

Original Japanese language edition

Shinsedai Kougaku Series Seigyo Riron

Edited by Takao Fujii

Written by Takao Fujii, Suel Sugimoto, Sumasu Yamada, Nobuaki Kobayashi, Tarou Tsujino and Yoshiaki Kawamura

Copyright © 2002 by Takao Fujii

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese version Published by Science Press,

Beijing Under license from Ohmsha, Ltd.

Copyright © 2003

All rights reserved

新世代工学シリーズ

制御理論

藤井隆雄 オーム社 2002

图书在版编目(CIP)数据

控制理论/(日)藤井隆雄编著;卢伯英译. —北京:科学出版社,2003

(OHM 大学理工系列)

ISBN 7-03-012079-5

I. 控… II. ①藤…②卢… III. 控制理论-高等学校-教材 IV. 0231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 079088 号

责任编辑 崔炳哲 责任制作 魏 谨

责任印制 刘士平 封面设计 李 力

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社发行 各地新华书店经销

2003 年 9 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2003 年 9 月第一次印刷 印张: 12

印数: 1—5 000 字数: 171 000

定 价: 23.50 元

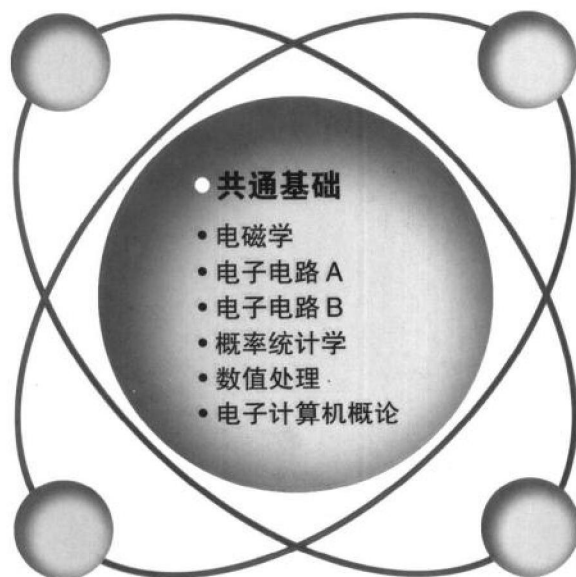
(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

通信、信息领域

- 通信工程学
- 信息通信工程
- 光通信与无线通信系统
- 信号处理
- 计算机构成
- 系统软件
- 编程语言
- 控制系统
- 计算机网络
- 数据库
- 计算机应用
- 人工智能

电子、材料领域

- 模拟电子电路
- 数字电路
- 电子电气材料
- 半导体器件
- 集成电路
- 电子功能材料
- 光电子学
- 光与电磁波
- 激光工程
- 电子与离子



系统、控制领域

- 传感工程
- 控制理论
- 数字控制
- 系统工程
- 机电一体化
- 机器人工程
- 人工接口
- 控制系统
- 计算机网络
- 计算机图形学
- 信息媒体工程

电力、能源领域

- 能源环境学
- 电力电子学
- 电气机器
- 电力系统工程
- 电力传输工程
- 超电导工程
- 电化学

丛书序

主编 樱井良文

现在,很多大学正在进行院系调整以及学科、专业的重组,以研究生培养为重点,引入学期制,采用新的课程体系授课,特别是由于学期制教学计划的引入,使得原来分册编写的教材很难在一个学期的教学中消化。因此,各学校对“易教”、“易学”教材的需求越来越迫切。

本系列是面向通信、信息,电子、材料,电力、能源,以及系统、控制等多学科领域的新型教学参考系列。系列中的各册均由活跃在相应学科领域第一线的教授任主编,由年轻有为的学者执笔,内容丰富、精炼,有利于对学科基础的理解。设计版面时着重为学生留出了写笔记的空间,是一种可以兼作笔记,风格别致的教学参考书。

希望肩负新世纪工程技术领域发展重任的青年读者们,通过本教程系列的学习,建立扎实的学科基础,在实践中充分发挥自己的应用能力。

OHM 大学理工系列编辑委员会

主 编

樱井良文 大阪大学名誉教授

副主编

西川祐一 大阪工业大学校长
京都大学名誉教授

编委(按姓氏笔画顺序)

广濑全孝	产业技术综合研究所 下一代半导体研究中心主任	井口征士	大阪大学教授
木村磐根	大阪工业大学教授 京都大学名誉教授	仁田旦三	东京大学教授
白井良明	大阪大学教授	西原 浩	放送大学教授 大阪大学名誉教授
池田克夫	大阪工业大学教授 京都大学名誉教授	滨川圭弘	立命馆大学教授 大阪大学名誉教授

前言

作为控制工程重要基础的“控制理论”，在这里被编写成了一种从初级知识开始，到介绍控制理论全貌的入门性教科书。因此，它有别于以前出版的控制理论教科书。本书涵盖了从古典控制到现代控制和数字控制的广阔领域，这也是本书的既定目标，从而也构成为本书的最大特点。这个目标与控制理论的发展是有很大关系的。

回顾控制理论的发展历史，首先是 20 世纪 30 年代产生的古典控制理论，然后是 20 世纪 60 年代产生的现代控制理论。这两种控制理论分别在频域和时域内进行研究，因而是两种相互对应的控制理论。但是，经过这两种对应的控制理论的变化和发展，控制理论于 20 世纪 80 年代开始走向将古典控制与现代控制相融合的道路，并且在创建包含两种形态的理论体系方面，从本质上实现了重大的规范性 (paradigm) 的变化。作为其演变结果，是近年来创建了作为“鲁棒控制理论”体系的反馈控制理论。基于上述原理的反馈控制理论，不仅在数学上增加了严密性，而且还转变成了一种适宜于应用的理论。当今存在于古典控制与现代控制之间的“篱笆”，也正在逐渐地被拆除。

在这种情况下，作为支撑控制工程的两大支柱，古典控制与现代控制这两种控制理论依然占据着重要位置。特别是在古典控制理论中发展起来的频域设计方法，和在现代控制理论中引进的适合于设计计算的系统表示方法 (状态空间法)，都在鲁棒控制理论中原封不动地被继承了下来，它们的重要性非但没有消失，反而变得比以前更加重要了。尤其是近年来在数字计算机计算能力迅速提高的背景下，以计算机的应用为前提的数字控制理论，就变得更加重要了。

本书将过去以分册形式编辑的上述三种控制理论，汇集成一册，只要学习了本书，就能够奠定广泛的基础，从而为在大学的研究生课程中进一步学习控制理论创造条件，这就是编辑本书的目的。本书各章及其执笔者如下：

第 1 章 概述(藤井隆雄)

第 2 章 从拉普拉斯变换到传递函数(杉本末雄)

第 3 章 控制系统特性的研究方法(山田澄)

第 4 章 基于传递函数的控制系统设计(小林伸明)

第 5 章 状态空间法(辻野太郎)

第 6 章 数字控制系统(河村嘉显)

本书的第 2 章至第 6 章的执笔者均是在私立大学从事控制理论教育与研究工作的经验丰富的专家。令编著者感到荣幸的是,本书不仅适合于专门学习控制工程的院系的学生,而且对机械工程、电气工程、化学工程等院系的学生学习系统控制课程也是有用的。

最后,谨向为本书的出版提供机会的本系列丛书编辑委员会主编樱井良文先生和编委井口征士先生,以及在本书的策划阶段,对本书的结构及执笔人选提供宝贵意见的京都大学片山彻先生表示衷心的感谢。

藤井隆雄

编著者、著者简介

藤井隆雄

编者,执笔:第1章

1969年 大阪大学研究生院基础工学
研究科硕士毕业

1983年 获工学博士学位

现在 大阪大学研究生院基础工学
研究科教授

杉本末雄

执笔:第2章

1974年 Polytechnic University 电气工
学科系统科学专业博士毕业
Ph. D.

现在 立命馆大学理工学部电气电
子工学科教授

山田 澄

执笔:第3章

1973年 美国加州大学伯克利分校原
子力工学专业博士毕业

1974年 Ph. D.

现在 摂南大学工学部电气电子工
学科教授

小林伸明

执笔:第4章

1976年 熊本大学研究生院工学研究
科硕士毕业

1983年 获工学博士学位

现在 金泽工业大学机械系教授

辻野太郎

执笔:第5章

1990年 大阪大学研究生院工学研究
科博士前期课程毕业

1999年 获工学博士学位

现在 福岡工业大学工学部电气工
学科副教授

河村嘉显

执笔:第6章

1971年 大阪府立大学研究生院工学
研究科博士毕业
获工学博士学位

现在 大阪电气通信大学工学部电
子工学科教授

目 录

第 1 章 概 述	1
1.1 什么是控制	1
1.2 控制的基本观点	2
1.3 控制的必要性和种类	5
1.4 本书的结构和特征	7
1.5 本书的学习方法	8
 第 2 章 从拉普拉斯变换到传递函数	11
2.1 拉普拉斯变换和拉普拉斯反变换	11
2.1.1 复数和复函数	11
2.1.2 拉普拉斯变换	13
2.1.3 拉普拉斯变换的性质	15
2.1.4 拉普拉斯反变换	17
2.2 线性定常系统	22
2.2.1 线性系统与定常系统	22
2.2.2 脉冲响应和传递函数	25
2.3 传递函数与方框图	27
2.3.1 各种系统的传递函数	28
2.3.2 方框图	30
练习题	36
 第 3 章 控制系统特性的研究方法	39
3.1 系统特性的时域分析(瞬态响应分析)	39
3.1.1 阶跃响应	40
3.1.2 斜坡响应	45
3.2 控制系统对正弦输入信号的响应(频率响应分析)	46
3.2.1 传递函数与频率响应函数的关系	46
3.2.2 频率响应的图解表示方法	48

3.3 系统稳定性的研究方法(stability analysis) ...	61
3.3.1 线性定常系统的稳定性	61
3.3.2 反馈控制系统稳定性的研究方法 ...	62
练习题	73
第4章 基于传递函数的控制系统设计	75
4.1 控制系统的性能评估	75
4.1.1 瞬态特性的评估	75
4.1.2 稳态特性的评估	81
4.2 基于瞬态响应的设计考虑	85
4.2.1 什么是根轨迹	85
4.2.2 利用根轨迹设计控制系统	87
4.3 基于频率响应的设计考虑	89
4.3.1 通过增益调整提高性能	89
4.3.2 利用相位超前与相位滞后校正提高性能	90
4.4 过程控制系统的设计考虑	94
练习题	97
第5章 状态空间法	101
5.1 对线性系统的更详尽描述	101
5.1.1 实际系统的状态空间模型	101
5.1.2 一般情况下的状态空间模型	104
5.1.3 状态空间模型的时域响应	105
5.2 状态空间模型与传递函数的关系	106
5.2.1 由状态空间模型变换成传递函数 ...	106
5.2.2 从传递函数到状态空间模型	108
5.2.3 传递函数的极点与状态空间模型 ...	111
5.3 执行器和传感器的充分性问题	114
5.3.1 线性系统的可控性	114
5.3.2 线性系统的可观测性	116
5.3.3 传递函数的可控性和可观测性 ...	119
5.3.4 标准构造定理	121
5.3.5 坐标变换与可控性及可观测性 ...	125
5.3.6 最小实现	126

5.4 系统的安全运行问题	127
练习题	129
第 6 章 数字控制系统	133
6.1 数字控制的概况	133
6.2 连续时间与离散时间系统的关系	135
6.2.1 离散时间状态方程式	135
6.2.2 例题	136
6.3 离散时间系统的响应研究	137
6.3.1 一阶系统的响应	137
6.3.2 基于特征值的系统分解	139
6.3.3 特征值为复数时的响应	141
6.3.4 关于状态的稳定性:内部稳定性	142
6.3.5 输入-输出稳定性	143
6.4 系统性质的考虑	144
6.4.1 可控性与可观测性	144
6.4.2 信号的 z 变换	146
6.4.3 用脉冲传递函数表示输入-输出 关系	148
6.4.4 用状态方程式表示传递函数	150
6.5 基于反馈的系统控制	151
6.5.1 通过状态反馈使系统稳定化	151
6.5.2 状态的观测	153
6.5.3 利用观测器进行输出反馈	155
6.6 最优调节器设计	156
6.6.1 对控制性能的评价	156
6.6.2 评价函数的最小化	158
6.6.3 例题	159
6.6.4 LQ 最优调节器在什么样的 系统中有效	161
练习题	162
练习题简答	163
参考文献	175

第 1 章 概 述

为了能更深入地学习本书第 2 章以后介绍的控制理论,即“用于控制中的理论”,作为预备知识,本章将首先介绍什么是控制,基于什么观点进行控制,为什么需要控制和什么地方有控制;其次,将介绍本书的总体结构及其特征;最后,就控制理论的学习方法提出一些建议。

1.1 什么是控制

在现代社会中,到处都在使用“控制(control)”这个词。例如在我们身边经常会看到的一些情况,像利用空调机控制室内和车内的温度,应用微型计算机控制冷藏库内的温度等。此外,控制还包括从医学界对微小基因和分子的控制,到产业界的大型建筑和桥梁等构造物的振动控制,化工厂中热和流量的控制,钢铁工厂中的滚轧控制等。更进一步讲,即使在远离地球的宇宙空间,也还有火箭和人造卫星的姿态控制和轨道控制。在所有这些控制中,有一个共同之处就是必定有希望的控制对象和控制目的。例如在对室内温度进行控制时,希望控制的对象是房间的温度,希望把温度保持在“25℃”等则是其控制目的。前者称为**控制量**(controlled variable),其希望的值称为**目标值**(set point),后者则称为**控制目的**(control objective)。为了达到这个目的,当然必须对控制对象施加某种操作。具体地说,在室温控制情况中,就应该适当地切换压缩机开关,以便对从室内排出的气化热量进行必要的调节。另外,为了调节气化热这种控制量,施加到对象上的量称为**操作量**(manipulated variable)。这样,在进行“控制”的地方,必然有控制量和控制目的,而且为了适应这种目的,还需要向对象施加必要的操作(操作量)。总之,这就是“控制”的定义。这里必须给予关注

的是控制对象。

在室内温度控制的例子中,因为直接施加操作的是空调器,所以如果狭意地考虑,也许认为控制对象是空调器。然而,要决定作为控制量的室温,不只要考虑空调器,还需要了解房间的大小和房间的结构,以及构成材料等。因此,在控制理论中,把房屋等作为一个单独体系与外界分离开来。把这个分离的体系称为**系统**(system)。而且外界通过压缩机对系统产生作用(吸热操作),作为其作用结果,系统又被看作是对外界产生作用(输出所谓控制量信号)的控制对象。用方框及输入输出箭头表示的图称为**方框图**(block diagram),图 1.1 表示了这种方框图。

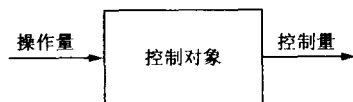


图 1.1 系 统

对于这种情况中的房屋系统,因为被控制的是温度,所以特别地称之为**控制对象**(control system)。像压缩机那样,对控制对象施加必要的操作量的装置,称为**执行装置**(actuator)。另外,一般来说,称外界对系统的作用为**输入量**(input),系统对外界的作用为**输出量**(output),特别是在控制对象的情况下,分别称之为操作量和控制量。对于“系统”,人们关注的是它与外界进行相互作用时的功能,也就是说关注的是输入与输出之间的**输入-输出关系**,它与作为系统实体的“装置”是无关的,这是它的最大特征。如上所述,控制是存在于各种领域的普遍性概念。但是,控制对象的种类却是极其繁多的,因为在控制理论中不是单独地对它们进行处理,而是把它们作为“系统”这一共同的结构进行处理,所以控制理论是与应用领域无关的一种普遍性理论。下一节,我们将从系统的控制这一立场出发,根据采用何种观点实施控制进行论述。

1.2 控制的基本观点

实际上,对室内温度应当怎样进行控制呢?具体地说,应当怎

样确定作为对温度进行控制的操作量气化热呢？如果考虑往浴池中加水时的情况，人们就会容易理解，为了进行良好的控制，必须一面不断地监视作为控制量的水位和温度，一面确定出相应的操作量。如果进行稍许详细地叙述，这种方法就是要将现时的控制量与目标值进行比较，然后对相应的操作量（供水量和气化热）进行适当的调整（判断）并施加到控制对象。在往浴池中加水时，通过人手操作水龙头开关进行的控制称为**手动控制**（manual control），采用微型计算机对室内温度等进行的自动化控制称为**自动控制**（automatic control）。无论是哪种控制，其共同点通常都是把操作结果进行反馈，并且用以进行判断，以确定下一步操作。就这种意义而言，这种控制被称为**反馈控制**（feedback control），图 1.2 表示了这种控制方法的运行步骤。

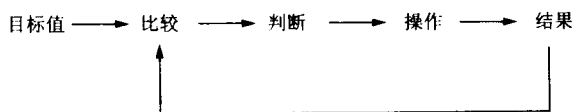


图 1.2 反馈控制

由图 1.2 还可以清楚地看出，因为这种控制是由一系列循环步骤构成的封闭回路，所以也称为**闭环控制**（closed-loop control）。与之对应，正如在往浴池中加水时经常看到的那样，事先预测浴池中的水达到所希望的水位所需的时间，并把预测时间设定到定时器中，一旦定时器发出到时信号，即停止往浴池中加水。这种基于预先决断的控制称为**前馈控制**（feedforward control）。这种控制的运行步骤如图 1.3 所示，它因向前（forward）传递信息而得名。此外，因为其运行步骤不是循环进行的，所以也称为**开环控制**（open-loop control）。这两种控制方式的重大区别发生在控制对象存在不确定因素时，例如，如图 1.4 所示，考虑一个大型水箱在上部进水下部出水时的水位控制问题。



图 1.3 前馈控制

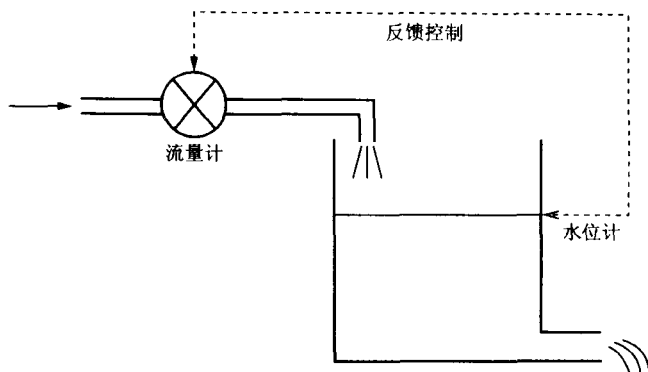


图 1.4 水箱的水位控制

现在考虑因某些原因使水压受到扰动时的情况,这时因为水箱的水位呈现出紊乱状况,所以与这种紊乱相应的反馈控制将产生出适当的修正作用,从而有可能减小水位的扰动。与此对应,前馈控制则无法察觉这种扰动信号,只能根据事前决定的判断进行控制。因此,它是不能对水位的紊乱状况进行控制的。在水压波动等的系统中,当有来自于外界的不可预测的输入信号施加于系统时,就称这种输入信号为扰动(disturbance)。实际上,在许多的控制实例中,抑制类似于这个例子中出现的扰动影响成了一个重要课题。例如,沿着轨道运转的人造卫星,长时间处于太阳和月球的重力作用之下,再加上空气阻力等的干扰,轨道本身会发生无规律的变化,因此,在适当的时候对轨道进行控制(修正)是必要的。另外,对于用空调器对室温进行自动控制的情况,一天中室外气温的变化和房间的开关都构成了外部干扰。反馈控制的优点就是具有处理这种外部干扰的能力。在许多自动控制的应用实例中,采用了这种控制方式(参见图 1.2)。采用这种控制方式的自动控制系统的一般结构,可以表示成图 1.5 所示的方框图。

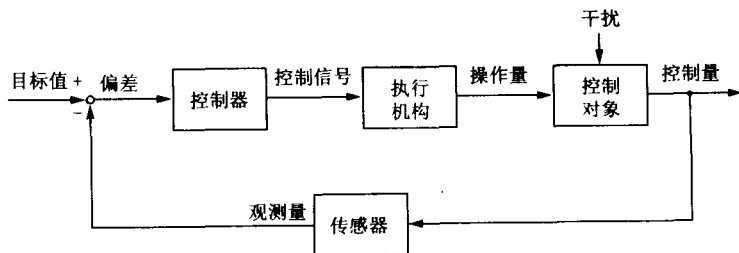


图 1.5 反馈控制系统的构成

下面我们针对前面列举的室内温度控制的情况,对图 1.5 进行说明。首先,作为控制量的室温,由安装在空调器室内机上的温度传感器进行测量,并且把测量值(称为**观测量**)与目标值进行比较,从而计算出与设定温度之间的差值(称为**误差**)。其次,以微型计算机为主构成的**控制器**(controller),根据这个误差进行判断,并且确定出**控制信号**送往作为执行机构的压缩机。压缩机接收到这个信号后,产生一个与这个控制信号相应的操作量(气化热),并将其施加于控制对象。根据输入-输出特性,控制对象可以确定作为输入量的操作量的输出,以及与干扰相应的输入量的输出,总之可以确定出作为控制量的室温。这个温度由温度传感器进行计量,并构成所谓的循环信息流。在图 1.5 中,控制器,执行机构和传感器等,都是控制对象之外的构成元素。但是,如果从其功能来看,其中每一个构成元素都可以看作是系统。而且伴随着相互作用它们彼此结合在一起,这样,作为一个整体,显然构成了一个系统。这个系统具有使输出量(控制量)趋近于输入量(目标值)的控制功能。这种具有控制功能,并且以控制作为目的的**系统**,称之为**控制系统**(control system)。实际上,人体本身也是一个控制系统。如果以人的步行作为例子,则控制量就是脚的行动。观察脚的行动的眼睛是传感器,看到脚的行动后,为了能向肌肉发出适当的指令信号而进行判断的人脑是控制器,肌肉则是执行器。由这个例子也可以清楚地看出,控制系统起到的最重要作用,就是完成了控制器的功能,这种功能能够根据控制的误差信息确定出适当的操作量(确切地说,是确定出为产生出适当的操作量所必须的控制信号)。这种运算方式称为**控制律**,如何寻找出优良的控制律是控制理论的重要课题,这方面的研究工作称为控制系统的设计。

1.3 控制的必要性和种类

在前一节中,作为自动控制的基本观点,我们研究了反馈控制问题。那么为什么需要控制呢?在各种各样的控制中,诸如在生产现场中被用作非接触搬运和支撑用的“磁悬浮控制”,如果没有自动控制,原本就形成不了这种技术。在这里,因为控制对象本来是不稳定的,所以必须利用自动控制使其变成稳定的。另外,考虑

在控制的演示中获得成功应用的“倒立摆”的情况,在一根摆的情况下,因为可以对其移动进行某种程度上的预测,所以对其进行手动控制是可能的,但是对于由两根摆构成的双重倒立摆和由三根摆构成的三重倒立摆,其运动情况就会相当复杂,因此不可能进行预测,这时自动控制就成为必要的了。同样,在大规模的复杂的工厂控制中,自动控制也是适当的。但是,大多数自动控制,例如像往浴池中加水时那样,这时即使不采用自动控制,仅靠手动控制,多半也能满足要求。但是作为更完善的方案,正如在最新式的浴池系统中那样,只要按压一下自来水和热水量的开关,就能够自动地达到预定的水量和预定的加热温度,是很方便的。另外在生产现场中,与其让操作人员一个一个地通过水位计一边察看水位一边开关供水阀门,不如将它们都实现自动化,从而可以提高生产效率,并且减轻人们的劳动负担。比这更重要的是,自动控制与手动控制比较,可以实现更为精确的控制。例如,在钢铁加工的轧制控制中,汽车生产用的钢板厚度加工中,在自动控制的条件下可以达到微米级精度,因此为产品质量的提高作出了重大贡献。这样高的精度用手动控制无论如何也是无法实现的。采用这样的自动控制的效果,是带来了便利、高效和产品质量的提高等,其结果是可以把人们从简单的劳动中解放出来,并且使高质量产品的大批量生产成为可能。

如前面所述,控制可以应用于各种各样的领域,达到各种不同的目的,下面我们对其进行分类整理。首先,当着眼于进行控制的时间时,像汽车和飞机的控制那样,观测和控制相对于时间是连续进行的,这时就称这种控制为**连续时间控制**。与此对应,当观测和控制的运作是在一定时间间隔内断续进行时,则称这种控制为**离散时间控制**或称**采样控制**。近年来开发的控制器,多数都采用了数字计算机,它断续地以数字量的形式提取观测信号,并且以数字量的形式将控制信号输出,这样的控制被特别地称为**数字控制**。在本书中,基本上是研究前述的连续时间控制,关于数字控制,将在第6章讨论。

其次,我们按控制的目的进行分类。首先,以跟踪变化着的目标值作为主要目的的控制,称之为**跟踪控制**。当目标值一定时,以抑制干扰的影响作为主要目的的控制称为**定值控制**。采用冷却器的室温控制就是后一种控制的代表性例子。

另外,若依据控制量进行分类,则把以任意变化的物体的位