

上海普通高校“九五”重点教材



上海市教育委员会组编

蒋慰孙 俞金寿 编著

GUOCHENG

过
程

KONGZHI

控
制

GONGCHENG

工
程

中国石化出版社

第二版

TP273

J59

世界银行贷款资助项目

上海市教育委员会组编

(2)

过程控制工程

第二版

蒋慰孙 编著
俞金寿

2

中国石化出版社

内 容 提 要

本书主要讨论了过程控制系统的结构、原理、特点、适用场合、系统设计及应用等问题,并在分析稳态和动态数学模型的基础上,阐述了过程工业(石化、化工、轻工、医药等)生产过程中典型单元操作的控制方案。本书的特点是基本理论与新的发展并重,理论与实际结合,内容切合信息时代的需要,并力求深入浅出,着重物理概念。

本书可供从事过程控制的工程技术人员或有关专业的高校师生阅读使用,也可作为过程控制工程的课程教材、继续教育教材或参考书,亦可供需要了解过程控制的自动化工作者和高校师生参考。

71650/22

图书在版编目(CIP)数据

过程控制工程/蒋慰孙,俞金寿编著.-2版.-北京:
中国石化出版社,1999.9
ISBN 7-80043-824-4

I.过… II.①蒋… ②俞… III.过程控制 IV.TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 41882 号

过 程 控 制 工 程
第二版
上海市教育委员会组编
蒋慰孙 俞金寿 编著
中国石化出版社出版发行
地址:北京市东城区安定门外大街 58 号
邮编:100011 电话:(010)84271850
北京金剑照排厂排版
北京京丰印刷厂印刷
新华书店北京发行所经销

*

787×1092 毫米 16 开本 28 印张 70⁰ 千字 印 6361-9361

1988 年 7 月第 1 版 1999 年 8 月第 2 版第 3 次印刷

定价:39.00 元

再 版 前 言

本书的第一版是1988年出版的，到现在已经近十二年了。使我们深感荣幸的是，本书受到了不少大专院校的欢迎，被选为教材，也受到了许多自动化技术人员的欢迎。本书曾荣获全国优秀教材奖。

这次再版，我们努力保持第一版原有的优点，并力求克服原书的缺点，特别是随着科学技术的进步，原书的某些部分显然已落后于时代的节拍。

这十多年来，过程控制与整个的工业自动化一样，出现了三大变化：(1)计算机控制装置代替单元组合仪表，成为控制装置的主流；(2)现代控制理论在继续完善和发展，然而并没有像一些理论界所希望的那样在工业上得到足够的推广，但是，来自工业界的一些先进控制策略发展很迅速，预测控制似乎可以作为其中的代表，在国际和国内都备受并注；智能控制的热潮也已来到，像模糊控制几乎已家喻户晓；(3)自动化的范畴进一步扩大，现在早已不局限于检测和控制，操作优化带来显著的经济效益，故障检测和诊断提高了生产的安全性和可靠性，与生产管理的结合进而走向综合自动化的目标。本次再版在内容的更新上做了一定努力，像第三章和第四章的很多内容是重新写的，为使篇幅不致过于膨胀，也删去不少现在看来较次要的内容；另外，更换和补充了一些更合适的应用例子。

本书大体上仍保持原来的体系，也保持紧密结合工业过程实际、理论联系实际的特点。同时，全书增加了习题，对原书的一些笔误和错字也作了更正。

本书绪论、第一至四章由蒋慰孙执笔，第五至八章由俞金寿执笔。不妥之处欢迎读者批评指正。

作者写于华东理工大学

1999年3月

绪 论

一、过程控制的发展与趋势

在自动化的发展中,有两个明显的特点:第一,任务的需要、理论的开拓与技术工具和手段的进展三者相互影响、相互推动、相互促进,显示了一幅交错复杂,但又轮廓分明的画卷,三者间表明出明晰的同步性;第二,自动化是一门综合性的技术,控制论更是一门广义的学科,在自动化的各个领域,移植借鉴,交流汇合,表明出强烈的交流性。在逐步进入信息社会、知识经济时代的今天,面对计算机技术的挑战,回顾自动化技术的历史进程,对明确今后过程控制的发展方向,是很有必要的。

自动化技术的前驱,可以追溯到古代,如我国指南车的出现。至于工业上的应用,一般以瓦特的蒸汽机调速器作为正式起点。这就是说,工业自动化的萌芽是与工业革命同时开始的。这时候的自动化装置是机械式而且是自力型的。随着电动、液动和气动这些动力源的应用,电动、液动和气动的控制装置开辟了新的控制手段。

有人把直到30年代末这段时期的控制理论称为第一代控制理论,分析的主要问题是稳定性,主要的数学方法是微分方程解析方法。这时候的系统(包括过程控制系统)是简单控制系统。仪表是基地式、大尺寸的,满足当时的需要。

到二次世界大战前后,控制理论有了很大的发展。Nyquist 和 Bode 的频域法、Evans 的根轨迹法等建立,使经典控制理论发展到了成熟的阶段,这是第二代控制理论。这些理论原来是以电工和电子为对象,从随动系统的实践中提高得出的,移植到定值系统占重要地位的过程控制系统中来,既有成功的一面,也有不完全适应的一面。用以指导工程实际,定性的效果好,定量的意义就不那样明显了。

从50年代开始,随着工业的发展,控制需求的提高,除了简单控制系统以外,各种复杂控制系统也发展起来了,而且取得了显著的功效。为适应多种结构系统的需要,在控制器方面,单元组合式仪表应运而生。在60~70年代相当长的一段时期内,气动单元组合仪表(QDZ)和电动单元组合仪表(DDZ)是控制仪表的主流。

从60年代开始,现代控制理论迅猛发展,这是以状态空间方法为基础,以极小值原理和动态规划等最优控制理论为特征的,而以在随机干扰下采用 Kalman 滤波器的线性二次型系统(LQG)设计方法宣告了时域方法的完成。这是第三代控制理论,在航天、航空、制导等领域取得了辉煌的成果,在过程控制领域也有所移植,但是实验室和学院式的研究远远多于在过程工业上的实际应用,可能是由于要急于达到任务的终点和目标,现代控制理论进展迅速,对有些重要方面的补充是后来进行的。比如:

(1) 关于系统结构的研究;

(2) 关于建模方法的研究——用现代控制理论进行系统设计,过程的动态数学模型是不可缺少的,除了依据过程机理方程建模,即过程动态学的方法以外,依据过程的输入输出数据进行系统辨识和参数估计,已作为一门分支学科迅速发展起来;

(3) 关于多变量系统设计的研究——照系统结构复杂性的顺序,似乎应接单输入单输出(SISO)系统、多变量系统(即多输入多输出 MIMO 系统)和最优控制系统的次序来发展,但由

于任务的需要,最优控制系统反而发展在多变量系统之前。然而,多变量系统对过程控制等有着重要的意义,这方面的研究必须补上。除了时域方法以外,英国学派从 Rosenbrock 到 Mac Farlane 在多变量频域法上取得重大进展,对现代控制理论和经典控制理论起了沟通融合的作用。

在技术工具方面,电子数字计算机的出现是一个重大的突破。40 年代创制的第一台数字计算机采用电子管元件,内存量不大,速度不快,又很笨重。到 60 年代,作为科学计算用的数字计算机已显示了极大威力。元件由电子管到晶体管、再到集成电路和大规模集成电路,速度和存储量更是以接近指数型的速率上升。不能不说计算机对数学方法有着深刻影响,在工程上数值方法得到了广泛应用。状态空间分析方法的发展是与数字计算机的普及应用分不开的。

人们很快想到把计算机用于过程控制。计算机控制有两个主要方向,一是进行直接数字控制(direct digital control, DDC);二是监督控制(SCC),用计算机给出最优的设定值,进行操作优化。在 50 年代末,60 年代初,两方面都有取得成功的报道。但是当时的计算机在能力和可靠性方面还较差,工业上的推广并不很迅速。我国从 60 年代初期就开始计算机过程控制的试点工作,由于相类似的原因,经历了曲折的历程,也走过了与国外一样的马鞍形弯路。

从 70 年代开始,出现了微处理器和以微处理器为主要构成单元的微计算机,这又是一个重大的突破。20 多年来,微计算机的价格越来越便宜,功能越来越丰富。以微处理器为主要构成单元的控制装置,如集散控制系统(DCS)、可编程逻辑控制器(PLC)、工业 PC 机和数字控制器等,已成为今日控制装置的主流。把微型计算机用于过程控制,早已几乎没有反对的意见,实践中已取得十分显著的成就。

现在工业装置的规模往往很大,这是为了追求规模效益。被控变量和控制回路的数目很多。同时,自动化的要求也日益提高,除了控制和检测以外,需要把生产管理职能也结合起来。而且除了连续过程以外,也需要考虑间歇(批量)过程。在这种情况下,用若干台微型计算机来控制,显然比用一台集中的小型或中型计算机灵活、方便和可靠得多。信息化、数字化和网络化的当代潮流,使 DCS 等获得巨大的发展,用微计算机网络系统或用集散控制系统控制生产,国内也已变得相当普遍。

从 70 年代以来,自动化系统和理论继续向深度和广度进军,其成就是辉煌的:

(1) 以预测控制系统为代表的先进控制 现代控制理论可说是数学家的成就,与经典控制理论来自工程界不同。从工程应用的角度出发,切合工程需要,对最优控制系统引入滚动优化的思路,工程师们提出了预测控制系统,在过程控制领域的应用非常成功,在理论上也有所创新,商业化工程软件获得普遍推广。

(2) 自适应控制和鲁棒控制系统 现代控制理论应用于过程控制的最大困难是过程数学模型的不确定性。不论是从机理导出或由辨识得到的简化数学模型与实际过程间总有差距,因而求出的最优控制规律实际效果并不好。控制理论家从两个侧面设法改进,一是将控制与辨识结合起来,依据辨识结果调整控制规律,使系统能适应环境的变化,这是自适应控制;二是寻求在过程不确定情况下仍然能很好工作的控制规律,增强系统的鲁棒性(坚实性, robustness),这是鲁棒控制。不能说两者思路不新,想法不对,两者的研究工作在今天仍是大量的,在工业应用上也有许多成功的报道。但两者仍各有一些问题,工业上采用仍然不多。

(3) 非线性和分布参数系统 与线性的、集中参数的系统相比,在理论上还没有那样成

熟。在实际生产过程中,线性往往是一种理想情况,一种假设或近似。非线性系统却是多种多样,大量存在的。分布参数系统也不少。近来,非线性系统的绝对线性化理论是突破性的进展。正交函数逼近方法在理论上也有巨大进步。但在工程应用上都不够普遍。

(4) 大系统理论 在系统结构上出现了上下级之间有隶属关系的递阶控制系统和相互间有必要横向联系的分散控制系统,它们都是若干子系统的集合。为了分析和设计这些系统,大系统的分解和协调是一个重要命题。大系统理论在一段时期内很受学术界关注,现在作为一门学科分支仍占一定地位。

(5) 智能控制系统 人工智能的发展差不多是与计算机同步的,将人工智能引入自动控制,就产生了智能控制。它是基于知识的控制,具有很多特点。模糊控制、专家规则与专家系统控制、人工神经网络控制、模式识别控制等等都被看作是传统控制的补充,在许多特定场合下发挥了卓越的作用,像模糊控制用于洗衣机、摄像机等家电用品,已为人们所共知。

(6) 生产优化 生产的优化一直是工程界追求的目标。除了设计优化外,运行中的优化同样能带来显著的经济效益。如不涉及生产管理层的优化,则运行中的优化包括控制过程动态过程的优化与操作设定点的优化。前者称为最优控制,后者称为操作优化。现在最优化已成为一门分支学科,出现了各式各样的优化算法。在工程中的实践很受领导重视,因为它是一条不增加硬件设备而通过软件工具来增产增收的途径,经济效益相当显著。

(7) 故障检测和诊断 生产的可靠性和安全性是优质生产的前提。严重的生产事故会导致巨大的经济损失和社会影响。在生产中及时发现故障,并把事故消灭在萌芽状态,无疑是保证可靠性和安全性的重要一环。从 70 年代以来,故障检测和诊断(fault detection and diagnosis, FDD)技术得到了很大的发展,方法众多,工程化商品软件也已得到开发。与之相关,工况监测系统已提到议事日程,在存在故障时仍能工作的容错控制系统也受到人们的关注。

(8) 生产计划和调度 它们属于生产管理范畴,也有自动化和优化的需求。把整个生产过程作为一个递阶系统来看待,计划和调度处于上层。为实现计划和调度的自动化和优化,人们也已开拓了许多方法。

现在被称为综合自动化的系统,就是包括生产计划和调度、操作优化、先进控制和基层控制等内容的递阶控制系统,亦称管理控制一体化的系统。这类自动化是靠计算机及其网络来实现的,因此也称为计算机集成过程系统(Computer Integrated Process System, CIPS)。这里,计算机集成指出了它的组成特征,过程系统指明了它的工作对象,正好与计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS)相对应,有人也称之为过程工业的 CIMS。

可以认为,综合自动化是当代工业自动化的主要潮流,它是以整体优化为目标,以计算机为主要技术工具,以生产过程的管理和控制的自动化为主要内容,将各个自动化“孤岛”综合集成为一个整体的系统。

在自动化控制装置方面,也正在发生根本性的改革。在 DCS 中,数字化是不彻底的,只实现了半数字化,因为变送器的输出是模拟信号,执行器的输入也是模拟信号,一条通信线联接一台仪表,网络化的程度也不高。正在出现的现场总线(field bus)控制系统,则所有的信号都是数字化的,用网络形式连接。过去十年内,世界上出现了许多现场总线的企业,当前较流行的标准有 CAN、HART、LONWORKS、PROFIBUS、FF 等。特别值得指出的是现场总线基金会 FF,这是一个国际性的组织,正在制订统一的现场总线标准。

根据国际电工委员会(IEC)和现场总线基金会(FF)的定义,现场总线是连接智能现场设备和自动化系统的数字式、双向传输、多分支结构的通信网络。它有如下优点:①用一对N结构代替一对一结构,一条通信线能连接N台仪表,减少了连接线,因而减少了安装费用,工期缩短,易维护,可靠性高,抗干扰能力强,精确度高。②互换性、互操作性好,不同制造厂生产的仪表可以互联,互操作,开放性高,公开性好。③控制分散。现场仪表不仅有检测功能,而且可以有运算功能和控制功能,因而通过现场仪表就可构成控制回路,使控制回路彻底分散。

FF现场总线是开放式的互联网络,所有技术和标准都是公开的,可以很容易地将其他网络与它集成,方便共享信息,为综合自动化奠定物质基础。

Internet是当代进入信息社会的一个标志,知识经济时代正在到来。自动化是现代化的特征之一。我们必须在理论和应用两方面多作开拓,不断向深度和广度进军,使我国的过程控制达到新的水平。

二、过程控制工程的研究对象与任务

过程控制工程(process control engineering)是自动化的一门分支学科,研究的任务是对过程控制系统进行分析与综合。在这里,综合主要是指方案设计。过程控制工程是以过程控制系统为主体,控制理论为基础,化学工程与工艺为一翼,自动化仪表和计算机为另一翼。学科结构见图1所示。

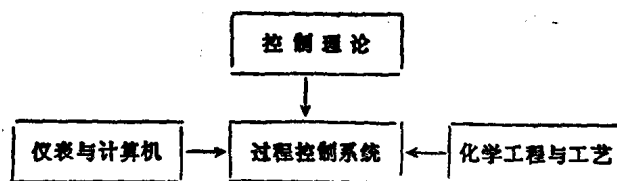


图1 过程控制工程的学科结构

从某个角度看,可以认为控制工程是控制理论在过程控制系统中的应用,包括理论的移植与改造、系统结构的研究、控制算法的确定以及控制系统的实现。以最简单的单输入单输出系统为例,是用检测元件和变送器测出被控变量,在控制装置中与设定值作比较之后,按一定规律(控制算法)得出控制信号,送往执行器,调整操作变量,以使被控变量达到和保持设定值。这里就有各部分特性对整体性能的影响要考虑,如何按照整体要求,选择被控变量、操作变量和控制规律,如何选择各构成部件,也就是整体如何设计的问题。当输入变量和输出变量数目不止一个时,或者控制要求不仅是被控变量保持设定值时,情况将更为复杂。总的说来,控制工程要解决图2所示系统的方案设计问题。

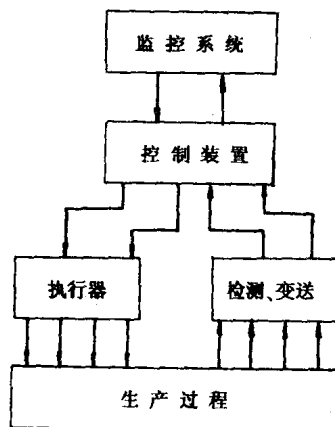


图2 系统的控制结构

从另一个角度,也可以认为控制工程是使早年凭经验、凭直觉、凭定性说理的实际控制系统设计上升到科学性、条理性、有定量理论指导的阶段。把控制理论、工艺分析与仪表计算机方面的知识结合起来,构成一门综合的工程科学。

自动化是技术进步的一种体现,在知识经济时代,是不可或缺的重要组成部分。过程控制对过程工业带来十分明显的效益,

如保证产品质量、提高产量、降低消耗、安全运行、改善劳动条件、提高管理水平等。其中有些经济效益是便于直接计算的，有些经济效益却不那么容易计算，带有潜在的性质(如长期可靠运行)，有些效益还有重要的社会意义。在设计控制系统时，必须从以上的目标出发，必须考虑经济效益，为自动化而自动化是缺少意义的。

控制工程是综合性的应用学科，可以划成不同的断面进行阐述。本书采用的方式是分为两大部分，分别按系统结构和所控过程分章。第一至四章是按系统结构分章，从简单到复杂，从定值控制到最优控制，从直接控制方式到递阶控制方式。其中第一章是简单控制系统，即单输入单输出 PID 控制系统，尽管简单，但使用最广，有很多问题需要阐述和讨论。第二章是常见的复杂控制系统，它们本质上仍是经典控制理论的产物，但已属于多变量系统的范畴。第三章是先进控制系统，它们是以现代控制理论为基础的，预测控制在工业上已广泛采用，是这类系统的代表。本章也对工业上有应用价值的状态反馈控制、动态最优控制、解耦控制、推理控制、自适应控制、鲁棒控制、时滞补偿控制等作了说明，对近年来迅速发展的智能控制也作了介绍。第四章是优化和综合自动化系统，以操作优化为重心，并对统计质量控制、故障检测和诊断、计划和调度以及 CIMS (计算机集成制造系统)作了介绍。各章分别讨论系统的结构、原理、特点及设计问题，并辅以一定数量的过程控制系统实例。第五至八章按所控过程分章。对几类代表性的过程，在讨论稳态和动态数学模型的基础上，讨论它们的控制方案，体现了控制系统与工艺特性的结合。过程工业单元操作虽多，但其机理不外乎流体力学、传热学、质量传递和化学反应动力学，流体输送、换热、精馏和化学反应是最常遇到的典型过程。熟悉了这些过程控制方案如何建立，不仅能掌握这些过程的控制工程，对其他过程也将能举一反三，触类旁通。

本书不按仪表控制系统和计算机控制系统来划分，因为微计算机的应用日益普遍，原来用单元组合仪表实现的系统现在纷纷改用 DCS 装置来实现，从系统结构上看没有根本区别；同时，像可编程数字控制器这样一些技术工具，仪表和计算机的界线也几乎消失。在本书中，抓住系统这个核心作为分析的基础。例如，在一开始的简单控制系统一章中，就不仅讨论了连续 PID 控制规律，同时也阐述了离散 PID 规律；既分别体现了使用模拟式控制器和计算机控制时的特点，又在整体上进行了分析和比较。

本书不讨论各种检测元件、变送器、控制装置、执行器的原理和结构，正如图 1 所表明，它们是控制系统的一翼，不是本门工程科学的核心；也不讨论各种微计算机及接口的原理和结构，原因也一样。这样，使本书保持一定的系统性和学科性，不流于芜杂。

本书也不复述控制原理的基本内容，如根轨迹法、频率法和状态空间法等。本书着眼于这些基本方法的运用，同时，为了把一些基本理论移植到过程控制领域，在方法上有些须作必要的扩展和延伸，这些在书内已作了讨论。

本书也不复述化工原理和化学反应工程的基本内容，而是从输入变量与输出变量间内在关系的视角，分析了稳态和动态特性，并与控制方案挂起钩来。

仪表和计算机、控制理论和化学工程与工艺是学科结构的三个侧翼，希望读者将它们作为先修课程来对待。

习 题

1. 你知道 DDC 和 SCC 出现的历史吗？
2. 世界上第一台 DCS 和第一台 PLC 的出现是什么时候？什么型号？

3. 现代控制理论在过程控制的应用为什么不很成功?
4. 试对现在常用的计算机控制装置的类型作一评述。
5. 气动控制装置现在的应用已大为减少,但是,控制阀还是大量用气动的,为什么?
6. 传感器(transducer)和变送器(transmitter)两词的区别在哪里?
7. 一个原来用 DCS 控制的装置现在想改用现场总线系统,检测元件和变送器是否必须全部更换?

目 录

绪论	1
一、过程控制的发展与趋势	1
二、过程控制工程的研究对象与任务	4
习题	5

上篇 控制系统

第一章 简单控制系统	1
第一节 典型结构和控制指标	1
一、典型结构	1
二、控制指标	3
第二节 过程特性与动态模型建立	5
一、过程特性的类型	5
二、 K 、 T 、 τ 对控制品质的影响	7
三、过程动态模型建立的辨识方法	9
四、过程动态机理模型的列写方法	19
第三节 检测信号的获取与处理加工	23
一、测量性能	23
二、动态特性	25
三、滤波和信号处理	25
第四节 执行器的若干问题	27
一、执行器的类型	27
二、流量特性	28
三、 S 值的选择	33
四、动态特性	33
五、阀门定位器的应用	34
第五节 连续 PID 控制算法	36
一、PID 控制算法的一般形式	36
二、P 作用控制算法	36
三、PI 作用控制算法	38
四、积分饱和及其防止	40
五、PD 作用控制算法	42
六、PID 作用控制算法	44
第六节 离散 PID 控制算法	44
一、几类离散 PID 控制算法	44
二、直接数字控制(DDC)中离散 PID 控制算法的改进	46

三、控制度和采样周期的选择	49
四、用计算机实现直接数字控制的一些问题	50
五、连续系统方程的离散化	52
第七节 控制器参数工程整定	55
一、控制器参数整定的若干原则	55
二、控制器参数整定的经验方法	56
三、控制器参数整定的反应曲线法	58
四、系统的投运和维护	60
第八节 与 PID 控制密切相关的几类系统	62
一、二维 PID 控制系统	62
二、时间比例控制系统	63
三、差拍控制系统	63
四、自整定控制器	68
习题	69
第二章 常用复杂控制系统	71
第一节 串级控制系统	71
一、基本原理和结构	71
二、功能和设计准则	72
三、工程设计和实施中的一些问题	76
四、引入辅助变量的控制系统	79
第二节 均匀控制系统	80
一、基本原理和结构	80
二、控制器参数整定	82
第三节 比值控制系统	83
一、基本原理和结构	83
二、两种形式控制方案的比较	84
三、比值系数的设置	86
四、方案实施的若干问题	87
五、比值控制系统的几种变型	89
第四节 前馈控制系统	89
一、基本原理和结构	89
二、系统设计	92
三、工程实施中的一些问题	95
第五节 分程控制系统	97
一、基本原理和结构	97
二、实施时的几个问题	97
第六节 选择性控制系统	98
一、基本原理和结构	98
二、工程设计和实施时的几个问题	100
三、系统示例	101

第七节 双重控制(阀位控制)系统	105
一、基本原理和结构	105
二、系统分析	106
习题	107
第三章 先进控制系统	108
第一节 状态反馈控制	108
一、系统的描述形式	108
二、状态反馈与极点配置	112
三、状态反馈系统的工程设计	115
四、确定性系统的状态观测器	117
五、随机性系统的状态估计器	119
第二节 动态最优控制系统	122
一、命题描述	122
二、极小值原理简介	123
三、时间最短控制	124
四、线性二次型最优控制(LQR)	126
五、高斯分布下的线性二次型最优控制(LQG)	130
六、最小方差控制(MV 控制)	130
第三节 预测控制系统	134
一、基本情况	134
二、动态矩阵控制(DMC)的基本算法	134
三、DMC 算法的参数选择和品质分析	138
四、有约束的多变量 DMC	142
五、其他的预测控制算法	143
六、DMC 应用实例	144
第四节 解耦控制系统	145
一、系统间的关联和关联程度的衡量	145
二、减少与解除耦合的途径	149
三、串接解耦装置的设计	152
四、解耦控制实例	154
第五节 软测量技术和推断控制系统	156
一、软测量的意义	156
二、软测量方法	157
三、狭义的推断控制	159
四、广义的推断控制	161
第六节 适应控制系统	161
一、适应控制系统的作用和类型	161
二、简单适应控制系统	162
三、模型参考型适应控制系统	163
四、自校正调节器	165

第七节 鲁棒控制系统	166
一、对象的不确定性和系统的鲁棒性	166
二、 H^∞ 和 H^2 范数	168
三、标准 H^∞ 控制问题	169
四、 H^∞ 控制问题的求解	171
第八节 时滞补偿控制系统	171
一、Smith 预估器原理	171
二、改进方案	173
第九节 智能控制系统	174
一、智能控制的发展	174
二、模糊控制	175
三、专家规则控制	178
四、神经网络控制	181
习题	185
第四章 优化和综合自动化系统	186
第一节 操作优化的命题和意义	186
一、优化的类型和命题	186
二、操作优化的正确选点	188
三、约束条件	190
第二节 最优化方法	191
一、最优化方法的类型和算法性能的评价	191
二、求导法	193
三、线性规划(LP)法	194
四、数值搜索法	194
五、梯度法	196
六、用于复杂过程优化的逐次二次规划(SQP)法	198
七、随机优化方法	201
第三节 操作优化示例	204
一、工艺说明及优化要求	205
二、相关函数积分法——一种不需模型的优化方法	205
三、酮苯脱蜡的操作优化	207
第四节 统计过程控制(SPC)	208
一、基本概念	208
二、Shewhart 控制图和 $\bar{x} - R$ 图	208
三、多元投影方法	210
第五节 故障检测诊断(FDD)和容错控制	213
一、可靠性工程基本概念	213
二、故障检测和诊断的一些概念	214
三、故障检测和诊断的主要方法	215
四、过失误差检测和数据校正	219

五、工况监测系统	221
六、容错控制系统	222
第六节 生产计划和调度	224
一、计划和调度命题的意义	224
二、计划和调度的一些原则	225
三、间歇型生产过程的调度	227
第七节 综合自动化系统	230
一、综合自动化的意义	230
二、综合自动化系统的特点	232
三、现场总线和现场总线控制系统	233
四、网络化	236
习题	237
参考文献	238

下篇 过程控制

第五章 流体输送设备的控制	239
第一节 概述	239
第二节 泵及压缩机的控制	240
一、离心泵的控制	240
二、容积式泵的控制	242
三、风机的控制	243
四、真空泵的控制	243
五、压缩机的控制	244
六、变频调速器的应用	246
第三节 离心式压缩机的防喘振控制	246
一、离心式压缩机的喘振	246
二、防喘振控制系统	247
三、实例分析	251
习题	255
第六章 传热设备的控制	256
第一节 传热设备的静态特性	256
一、概述	256
二、换热器静态特性的基本方程式	257
三、换热器的静态放大系数	258
四、控制方案的分析及调节阀的选型	260
第二节 传热设备的动态特性	261
一、两侧流体完全混合的换热器动态特性	262
二、套管式换热器的动态方程	263
三、套管式换热器的动态特性	265
第三节 一般传热设备的控制	269

一、调节载热体流量	269
二、调节载热体的汽化温度	270
三、工艺介质分路	270
四、调节传热面积	272
第四节 复杂控制系统的应用	273
一、前馈-反馈控制	273
二、热焓控制	275
三、热量控制	276
四、选择性控制	277
第五节 锅炉设备的控制	278
一、概述	278
二、锅炉汽包水位的控制	279
三、蒸汽过热系统的控制	286
四、锅炉燃烧系统的控制	287
五、采用集散控制系统的锅炉控制实例	296
六、采用可编程控制器的锅炉控制实例	298
第六节 蒸发器的控制	300
一、蒸发器的特性	301
二、蒸发器的主控制回路	301
三、蒸发器的辅助控制回路	303
第七节 窑炉的控制	304
一、陶瓷窑炉的控制	304
二、玻璃窑炉的控制	306
三、水泥窑炉的控制	309
习题	311
第七章 精馏塔的控制	314
第一节 概述	314
一、精馏塔的控制要求	314
二、精馏塔的扰动分析	315
第二节 精馏塔的特性	316
一、物料平衡和内部物料平衡	316
二、能量平衡关系	318
三、进料浓度 Z_F 和流量 F 对产品质量影响	320
四、二元物系精馏塔的动态特性	320
五、多元组分精馏塔的动态方程	325
第三节 精馏塔被控变量的选择	326
一、采用温度作为间接质量指标	326
二、采用压力补偿的温度作为间接质量指标	327
第四节 精馏塔的基本控制	329
一、产品质量开环的控制	330

二、按精馏段指标的控制	331
三、按提馏段指标的控制	332
四、精馏塔的压力控制	333
第五节 复杂控制系统在精馏塔中的应用	336
一、串级控制系统	336
二、前馈控制系统	337
三、选择性控制系统	337
第六节 精馏塔的节能控制	339
一、浮动塔压控制	340
二、能量的综合利用控制	341
三、产品质量的“卡边”控制	343
四、双重控制的应用	343
五、控制两端产品质量	344
第七节 精馏塔的先进控制	348
一、软测量和推断控制	348
二、预测控制	355
三、专家系统	359
第八节 精馏塔的计算机优化控制	363
一、精馏塔的计算机控制	363
二、精馏塔的优化控制	367
习题	371
第八章 化学反应器的控制	373
第一节 化学反应器的类型	373
第二节 化学反应的基本规律	375
一、化学反应速度	376
二、化学平衡	378
三、转化率和停留时间的关系	379
四、化学反应器的热稳定性	380
第三节 化学反应器的动态特性	382
一、化学反应器的基本方程	383
二、连续搅拌槽式反应器的动态特性	384
第四节 化学反应器的控制	389
一、取出料的成分作为被控变量	389
二、取反应过程的工艺状态参数作为被控变量	390
三、pH 控制	393
四、化学反应器的推断控制	394
五、稳定外围的控制	397
六、开环不稳定反应器的控制	399
七、连续搅拌槽反应器的自适应控制	401
第五节 典型化学反应器的控制	403