

高等学校轻工专业试用教材

过程控制工程

冯品如 主编

中国轻工业出版社

高等学校轻工专业试用教材

过程控制工程

冯品如 主编

中国轻工业出版社

(京)新登字034号

图书在版编目 (CIP) 数据

过程控制工程 / 冯品如主编. -北京: 中国轻工业出版社, 1995.7

大专教材

ISBN 7-5019-1725-6

I. 过… II. 冯… III. 过程控制-高等学校-教材 IV. T
P273

中国版本图书馆CIP数据核字 (95) 第04705号

责任编辑 缪丽雯

*

中国轻工业出版社出版
(北京市东长安街6号)
北京市卫顺印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售

*

787×1092毫米1/16印张: 31 字数: 716千字

1995年5月 第一版第一次印刷

印数: 1—2000 定价: 17.65元

ISBN7-5019-1725-6 / -TP·023

内 容 提 要

本书共十三章。前六章讲述过程控制的基本理论、系统设计与分析方法，后几章结合轻工业发酵过程、制糖过程、食品加工过程、玻璃和陶瓷生产过程、造纸生产过程等介绍具体的控制系统。书中既有简单控制系统和复杂控制系统，也有直接数字控制系统、集散型计算机控制系统和最优控制、适应性控制等现代控制技术。

本书是轻工高等学校自动化专业的教材，亦可供科研院所和企业从事工业自动化方面工作的工程技术人员参考。

尊敬的读者：

欢迎您购买中国轻工业出版社出版的图书。希望此书能够对您的工作和生活有所帮助。恳切欢迎您阅读此书后，对该书做出评价，特别是就书中存在的问题（如选题、内容、编辑、校对、装帧设计、印刷装订、出版格式等）提出宝贵的意见。我们将非常感激。对提高质量有重要贡献者，本社将酌情奖励。

来信请寄：北京市东长安街6号(邮编：100740)

中国轻工业出版社总编办公室

EAC09/03

前 言

本教材是受原轻工业部工业自动化专业教材编审委员会委托编写的。本书可作为轻工院校工业自动化等专业的教材，也可作为工业自动化方面的工程技术人员参考书。

本书除绪论外共分十三章。为适应轻化工院校专业的特色，在本书的最后部分编写了：发酵过程、制糖过程、食品加工过程、玻璃和陶瓷生产过程、造纸生产过程控制系统共五章，这是一种新的尝试，有待今后来总结。

参加本书编写的有：无锡轻工业学院、西北轻工业学院、四川轻化工学院、齐齐哈尔轻工业学院共 8 人，其中冯品如编写了绪论、第一章、第二章、第七章、第九章；马久祥编写了第三章下半部分；贺庆之编写了第六章部分、第十章；孙怀禄编写了第六章部分、第十一章；陈涛编写了第三章上半部分；唐建国编写了第五章、第十二章；姜东辉编写了第四章、第八章；吴志坚编写了第十三章。

本书由无锡轻工业学院冯品如教授主编，浙江大学王骥程教授主审。在编写过程中，夏德钤教授及教材编委会对本书出版给予了很大支持和关心；同时还得到齐齐哈尔轻工业学院吴绍新教授和无锡轻工业学院郭美珍工程师的帮助，在此一并表示感谢。

由于编者水平所限，时间紧迫，教材中难免存在缺点和错误，恳请读者批评指正。

编者

1993. 12.

目 录

绪论	1
第一章 被控对象的特性及其实验方法	3
第一节 概述	3
一、分析法	3
二、实验测定法	3
第二节 单容对象的动态特性及其数学描述	4
一、水槽水位的动态特性	5
二、加热对象的动态特性	7
三、气罐的动态特性	8
四、对象动态特性	9
五、对象的自衡特性	10
第三节 多容对象的特性、容量滞后、纯滞后	12
一、双容对象的特性和容量滞后	12
二、纯滞后	13
第四节 动态特性的测量和识别	15
一、概述	15
二、时域法	15
三、频率特性法	20
四、用伪随机信号相关仪对系统在线识别	25
第五节 电子模拟计算机及其在分析自动控制系统中的应用	39
一、概述	39
二、电子模拟计算机中的运算部件	39
三、系统的仿真研究法	44
第二章 简单控制系统的设计与分析	53
第一节 过程控制系统的组成及术语	53
一、过程控制系统的组成	53
二、过程控制的术语	54
第二节 过程控制系统的分类及闭环系统的组成	55
一、分类	55
二、闭环控制系统的组成	56
第三节 过程控制系统的过渡过程和品质指标	56
第四节 简单控制系统与全过程控制间的关系	61

第五节 被控变量与操纵变量	64
一、概述	64
二、被控变量的选择	64
三、操纵变量的选择	66
四、确定控制方案的实例	73
第六节 参数测量和信号变送在系统分析设计中的考虑	75
一、关于纯滞后	75
二、关于测量滞后	76
三、信号传递滞后	78
第七节 执行装置在系统分析设计中的考虑	79
一、概述	79
二、什么是调节阀的流量特性	79
三、阀流量特性的选择	80
四、S值的选取	83
五、阀门定位器的应用	85
第八节 工业用调节规律的选取	86
一、概述	86
二、调节器选型	87
三、调节性能分析	87
四、积分饱和及其防止	91
第九节 控制系统的工程整定及投运	93
一、工程整定	93
二、简单控制系统的投运及故障分析	103
第三章 复杂控制系统	109
第一节 串级控制系统	109
一、基本思想和系统构成	109
二、串级控制系统的特点	112
三、串级控制系统的设计	116
四、工程实施中的一些问题	120
五、串级控制系统的变形	123
第二节 均匀控制系统	125
一、均匀控制的目的和要求	125
二、均匀控制系统的结构	126
第三节 比值控制系统	128
一、概述	128
二、常见比值控制系统的结构和类型	129
三、比值系数K的设置	132
四、设计和实施中的若干问题	135

五、其他类型的比值控制方案	138
第四节 前馈控制系统	141
一、基本原理	141
二、前馈控制的几种形式	142
三、前馈控制规律的实施	147
第五节 分程控制系统	149
一、基本概念	149
二、分程控制方案的应用	150
第六节 选择性控制系统	152
一、基本概念	152
二、选择性控制系统的类型	153
三、关于防积分饱和	156
第七节 按对象传递函数设计控制算法的控制系统	157
一、大纯滞后补偿控制系统	157
二、差拍控制系统	162
第八节 其他复杂控制系统	167
一、按计算指标控制的系统	167
二、非线性系统	174
三、采用阀位控制器 (VPC) 的控制系统	175
第四章 直接数字控制系统	179
第一节 计算机控制系统的组成和过程通道	179
一、硬件组成	179
二、软件组成	180
三、过程通道的组成和功能	181
四、模拟量输入通道	181
五、模拟量输出通道	186
六、过程通道的抗干扰措施	188
第二节 DDC系统控制规律的连续设计方法	192
一、引言	192
二、数字PID调节器的连续设计	195
三、PID控制算式的改进	198
四、PID调节器参数的整定	200
第三节 DDC系统控制规律的离散设计方法	205
一、引言	205
二、最小均方误差设计法	209
三、DDC系统的其他控制算式	214
第五章 集散型计算机控制系统 (DCS)	223
第一节 可编程调节器控制系统	223

一、KMM可编程调节器简介	224
二、怎样发挥可编程调节器的作用	228
三、KMM调节器的应用	231
第二节 集散型控制系统	242
一、集散型控制系统的产生	242
二、集散型控制系统的优点	243
三、TDC 3000系统的基本组成及功能简介	244
四、应用实例	247
五、选用DCS应注意的几个问题	256
第三节 低成本自动化 (LCA) 简介	258
一、问题提出	258
二、低成本自动化 (LCA) 的概念及其内容和特点	259
三、LCA的系统结构	260
第六章 数学模型及最优控制	263
第一节 数学模型与建模的一般知识	263
第二节 一般线性静态数学模型	264
第三节 动态数学模型	265
一、非参数模型	266
二、输入输出模型	266
三、状态空间模型	267
第四节 状态的估计与参数的辨识	269
一、卡尔曼滤波	270
二、最小二乘参数估计	273
三、模型参数的递推估算法	275
四、渐消记忆的参数递推估计	277
五、模型噪声干扰时的递推估计	277
六、系统的非参数辨识法	279
七、反馈控制系统的辨识条件	281
第五节 最优控制系统	282
一、概述	282
二、静态最优控制系统	283
三、动态最优控制系统	285
第六节 适应控制系统概念	287
一、适应控制系统的作用和类型	287
二、简单适应控制系统	288
第七章 发酵过程控制	289
第一节 数学模型	291
一、概述	291

二、 μ_m 和 K_s 的估算	294
三、 $Y'_{x/o}$, M_s , $Y_{x/s}$ 的估算	295
四、酵母发酵过程的经验模型	296
五、结构模型	297
六、生化反应器(或称发酵罐)的数学模型	297
第二节 电子计算机在发酵过程中的应用	299
一、概述	299
二、用于模型建立和过程分析简介	300
三、用于发酵过程	301
第三节 发酵过程控制实例	304
一、概述	304
二、溶氧(又称DO)浓度控制	304
三、酵母发酵过程控制	308
四、柠檬酸发酵过程控制	312
五、啤酒发酵过程控制系统	314
六、青霉素发酵过程控制	324
第八章 制糖过程传热设备的控制	327
第一节 基本原理	327
一、概述	327
二、传热过程的静态特性	327
三、传热设备的动态特性	330
四、传热设备的自动控制方案	333
第二节 蒸发器的控制	334
一、概述	334
二、糖厂蒸发站的控制	335
第三节 间歇式煮糖自动化	345
一、概述	345
二、典型的间歇式结晶过程	346
三、典型的常规间歇煮糖自动化系统	349
四、间歇煮糖自动化研究和微电脑煮糖自动化系统	354
第九章 食品生产过程控制	359
第一节 数学模型	360
一、概述	360
二、数学模型	360
三、数据采集	361
四、模型/数据拟合	361
五、实例	361
第二节 食品加工和存贮过程中质量损失的预测和仿真	366

一、概述	366
二、质量损失与环境因素和食品构成的函数关系	366
三、食品加工和存贮过程中质量损失的预测和仿真	367
第三节 食品罐头杀菌控制	370
一、概述	370
二、系统的构成	370
第四节 面包、点心隧道式烘烤炉温度控制	371
一、概述	371
二、系统组成和控制原理	371
第五节 自动油炸机的温度控制	372
一、概述	372
二、系统组成和控制原理	372
第六节 食品厂输配料计算机控制	373
一、系统的主要功能	373
二、系统构成	373
三、功能的实现	374
第七节 食用酒精蒸馏控制	375
一、概述	375
二、检测、控制变量的技术要求	375
三、蒸馏控制系统的组成及工作原理	376
四、计算机选型和主要性能	376
五、控制系统的接地	378
第八节 奶粉生产过程控制	378
一、概述	378
二、牛奶蒸发器的控制	379
三、奶粉干燥机的控制	379
第九节 味精(谷氨酸钠)结晶过程控制	381
一、概述	381
二、控制方案的确定	382
三、系统的组成与硬件结构	382
四、应用软件设计	383
第十节 冷库制冷自动控制	383
第十一节 番茄酱的浓度控制	385
第十章 玻璃、陶瓷生产过程控制系统	386
第一节 玻璃进料配比控制系统	386
一、配料系统的工艺要求	386
二、配料计算机控制的硬件结构	388
三、电子秤称量方法与称量精度	389

四、配比控制的系统软件	390
第二节 玻璃窑炉控制系统	391
一、玻璃窑炉的对象特性	392
二、玻璃窑炉的燃烧控制	394
三、料道温度的自整定控制	401
四、玻璃液位的非线性PID控制与自适应控制	403
五、玻璃窑炉的集散控制系统	407
第三节 陶瓷窑炉控制系统	408
一、陶瓷窑炉对温度、压力及气氛的要求	408
二、烧煤明焰隧道窑的自动控制	409
三、烧油隧道窑温的自动控制	411
第十一章 制浆造纸生产过程控制	412
第一节 间歇蒸煮器蒸煮过程的微机控制	412
一、概述	412
二、间歇蒸煮微机控制系统的构成	413
三、间歇蒸煮的终点控制	415
第二节 造纸机生产过程的微机控制	418
一、概述	418
二、造纸机的生产流程及原理简介	418
三、成纸的定量水分微机控制系统	419
四、造纸机的其他控制系统	428
第十二章 精馏过程的控制	432
第一节 精馏塔的静态特性	432
一、工艺过程简介	432
二、物料平衡	433
三、能量输入与分离度	433
四、变量关系图	434
第二节 精馏塔被控变量的选择	435
一、塔顶(或塔底)的温度控制	435
二、灵敏板的温度控制	436
三、温差控制	436
第三节 精馏塔的基本控制方案	437
一、按精馏段指标的控制方案	437
二、按提馏段指标的控制方案	439
三、精馏塔的压力控制	441
第四节 精馏塔的新型控制方案	443
一、以平稳操作为目标的新型方案	443
二、节能的新型控制方案	447

三、安全保护控制方案·····	449
第十三章 锅炉控制系统 ·····	450
第一节 概述 ·····	450
一、锅炉设备工艺流程简述·····	450
二、锅炉设备的控制任务·····	450
第二节 锅炉汽包水位的自动控制 ·····	451
一、汽包水位控制的意义·····	451
二、汽包水位的动特性·····	452
三、汽包水位控制系统的设计·····	456
第三节 过热蒸汽温度控制系统 ·····	464
一、控制系统的组成·····	464
二、过热蒸汽温度的控制系统·····	465
第四节 燃烧过程的控制系统 ·····	469
一、基本任务·····	469
二、主要控制系统及有关问题·····	470
三、燃油锅炉的燃烧控制系统设计·····	471
四、燃煤锅炉的燃烧控制系统设计·····	479
参考文献 ·····	481

绪 论

一、工业过程自动化的发展概况

在工业和科学技术发展的过程中，自动化技术起着极其重要的作用。工业过程自动化是保证生产高质、稳产、低耗、安全、改善劳动条件、减少环境污染的重要手段，也是工业企业现代化的重要标志之一。

工业过程自动化的发展过程，大体经历了以下三个阶段：

第一阶段，30年代到40年代，采用基地式仪表，实现单体设备就地分散的局部自动化。当时过程控制的目的主要是维持温度、压力、液位、流量等参数为某一定值，以保证产品的产量和质量稳定。

第二阶段，40年代到50年代，相继出现了气动、电动单元组合仪表和巡回检测装置，以实现集中监视、集中操作和集中控制，强化生产，提高设备效率，适应工艺设备向大型化和工艺过程连续化发展的需要。

第三阶段，60年代至今，从车间集中控制向工厂综合自动化发展，开始采用电子计算机控制，出现了过程优化与管理调度自动化相结合的计算机分级控制系统。这种递阶的计算机分级过程控制系统属于一种大规模工业自动化系统。它使工业自动化技术发展到一个新阶段，是目前自动化发展的一个重要方向。

众所周知，电子数字计算机的出现，在科学技术上引起了一场深刻的革命。计算机除了能高速自动地进行数学运算外，还具有记忆、判断、比较等逻辑功能，因此，不仅在数据处理、科学计算等方面应用极广，而且在工业过程自动控制方面也得到了越来越广泛的应用。一般把用于工业自动控制的电子计算机称为工业控制机（简称工控机或控制机）。

二、计算机在过程控制中的地位和作用

由于电子学和其他科学的进步而产生的电子自动控制机器，已经可以开始有条件地代替一部分特定的脑力劳动，就象其他机器代替体力劳动一样，从而大大提高了自动化技术水平，这些最新的成就，使人类面临着一个新的科学技术和工业革命前夕。这个革命成果，就它的意义来说，远远超过蒸汽机和电的出现而产生的工业革命。

计算机的用途最基本的有科学计算（包括辅助设计），数据处理（包括各种业务管理），系统仿真及定时控制（包括智能机器人）等几方面。

计算机的应用不仅促进了现代控制理论的发展，而且亦推动了自动化向深度与广度进军，使生产自动化提高到更高的水平。

根据自动化的目的和要求不同，采用的技术工具和应用的理论范围也不同，就生产自动化而言，大致经历了三类不同的发展水平（见表0-1）。由此可见，计算机是实现生产过程综合自动化及管理自动化的主要手段。近几年来，在过程控制中广泛应用集散控制系统（DCS），日、美、欧工业发达国家中，从事仪器仪表和集散控制系统生产的厂

表 0-1

生产自动化的不同水平

	局部自动化	综合自动化	管理自动化
目的要求	生产工艺稳定, 正常操作运行, 被调量为定值或给定函数	最优化操作工况保证优质、高产低耗, 目标函数为极值(极大或极小)	全面完成技术经济指标, 使企业经济效益最高, 实现最优化管理与控制多个目标函数极值
技术工具	各种传感器、检测仪器、调节执行机构、计算机及外围, 外部设备	同左 质量分析仪多台计算机及外围, 外部设备	同左 大中小微型计算机成套设备、通风设备、计算机网络
规模	单机、机组、工段、车间	工段、车间、分厂、全厂	分厂、全厂、企业、联合企业、公司
应用的理论	自动调节原理; 采样控制; 多变量系统; 现代控制理论;	现代控制理论; 模型识别; 最优控制; 自适应控制	现代控制理论; 大系统理论; 运筹学、决策论; 经济管理理论

商不断推出性能价格比高的新型系统, 其应用功能日益增强, 可靠性日益提高, 既发展了各种大型集散控制系统以适应过程控制大型化的需要; 同时, 也发展各种中、小型系统, 以较低的价格适应中小型工业企业的需要。近年来, 我国陆续引进了许多种集散控制系统, 同时国内也自行开发生产了一些集散控制系统, 广泛应用于各工业部门, 并取得了良好的技术经济效益。

微型计算机控制生产过程, 首先要对生产过程的有关参数(如温度、压力、流量等)进行采样, 并通过过程输入通道把模拟量转换成相应的数字量。按不同的控制目的, 微型机控制系统有两类: 一是用微型机进行数据检测处理的系统; 二是用微型机进行控制的系统。在现阶段, 微型机控制主要目的在于提高产品质量; 保证安全运行; 减少原料和能量消耗; 控制和减小环境污染以及提高企业的管理水平等。

三、我国应大力发展低成本自动化(LCA)

在日、美、欧一些工业发达国家, 工业自动化正在按照两种不同模式向前发展。一方面一些大型企业和跨国公司正在努力实行 CIM 和 CIP 技术, 这是一种高投资、高技术、高效益、高风险的发展模式。另一方面大量中小型企业正在实行低成本自动化(LCA)的发展模式。许多实践表明, 采用 LCA 技术的中小型企业同样能制造出高水平、高质量、好性能价格比的产品, 而且, 在市场上具有很强的竞争力。

我国是发展中国家, 经济实力和工业水平与发达国家相比尚有很大差距。除去极少数外向型参与国际竞争的重点企业, 探索实行 CIM 和 CIP 发展模式外; 绝大多数大、中、小型企业都应实行 LCA 发展模式。因大、中、小型企业生产制造工艺装备水平的差异和其他技术经济条件的不同, 在实施 LCA 的水平上也应有些区别。在制订实施 LCA 方案时, 对于企业每一个技术改造或建设项目都要全面权衡技术、经济、发展等各方面的关系来确定项目内容的深广度, 这样才能使每一个 LCA 工程项目都获得最好的技术经济投资效益。事实上, 由于当代电子自动化技术发展迅速, 一代自动化装备的寿命只有七、八年左右, 若欲从 LCA 的自动化装备进一步发展实行 CIM 或 CIP 时, 原来的 LCA 装备的寿命也已结束, 其投资早已回收。因此, 企业在规划将来实行 CIM 或 CIP 时, 一般不需要过分考虑现在实行 LCA 的具体技术延续性。综上所述, 在我国绝大多数企业实行 LCA 的发展模式, 是全局优化发展之路。

第一章 被控对象的特性及其实验方法

第一节 概 述

设计一个自动控制系统，首先应对被控制对象的特性作全面的分析和测定。通常研究被控制对象特性的方法有两种：

一、分 析 法

对于简单的对象或系统各环节的特性，可以通过分析过程的机理、用物料或能量平衡关系列出含有时间变量的数学模型，即对象动态特性的微分方程式。

二、实验测定法

对复杂对象的微分方程式很难建立，也不容易求解，因此通过实验测定，将取得的数据进行加工整理而求得对象的微分方程式或传递函数。这种方法用得较多，以下将着重讨论实验测定法。

对象的输出参数与输入参数之间含有时间的函数关系式，即为对象的动态特性的微分方程式。而对象的输出参数就是被控变量；输入参数是引起被控量变化的因素。对象的输入参数有两种：控制作用与干扰作用。控制作用至被控变量之间的信号联系称为控制通道，干扰作用至被控变量之间的信号联系称为“干扰通道”。例如在图 1-1 温度控制系统

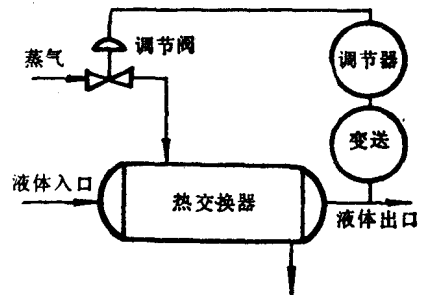


图 1-1 温度控制系统

中，调节阀的位移或调节阀前后气压的波动引起温度变化的信号联系是控制通道；出口处液体流出量的改变引起温度的变化的信号联系是干扰通道。

为了说明被控对象中各信号之间的动态关系，可以用方框图来表示，如图 1-2 所示。根据生产设备的具体结构及工艺要求，对象又可分为具有一个被控变量和多个被控变量两类。

(一) 多输入单输出的被控对象

在这类对象中有多个输入信号，常选取其中一个可控良好的输入信号作控制作用 $u(t)$ ，而其他的输入信号均作扰动作用 $F_1 \cdots F_n$ ，如图 1-2 (a) 所示。对线性对象来说，被控变量的变化为

$$Y(s) = G(s)U(s) + Gf_1(s)F_1(s) + \cdots + Gf_n(s)F_n(s) \quad (1-1)$$

式中 $G(s)$ ——控制作用下对象的传递函数，

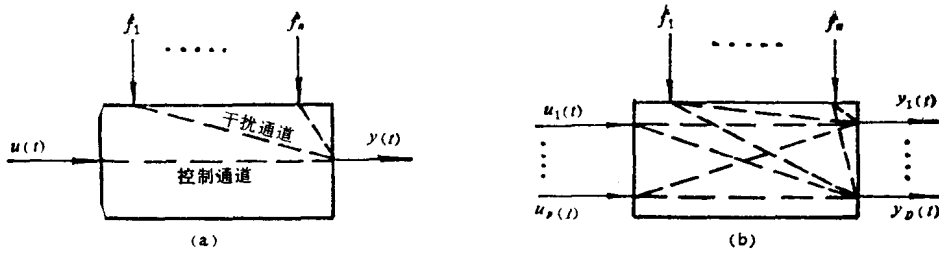


图 1-2 被控对象内的信号传递示意图

$G_{f_1}(s)$
 \vdots
 $G_{f_n}(s)$

在相应干扰作用下对象的传递函数;

$y(s)$ ——输出信号的拉氏变换;

$u(s)$ ——控制信号的拉氏变换;

$F(s)$ ——干扰信号的拉氏变换。

图 1-2 中的虚线，表示控制通道和干扰通道。从这个方框图可以看出，欲全面了解对象的动态特性，就需了解各通道的动态特性，这样做往往比较困难。但因控制通道在控制系统的闭环内，而控制作用又是自动地、反复地进行着，所以它的动态特性对系统过渡过程的稳定性起着决定性的作用。干扰通道在控制系统的闭环以外，通常干扰是随机的、短暂的，所以它的动态特性只影响过渡过程中被控参数的幅值。因此，在分析和整定控制系统时，最主要的应掌握控制通道的动态特性，这是系统整定的依据。以下讨论的被控对象的动态特性，主要是指控制通道的动态特性。

(二) 多输入多输出对象

在这类对象中，调节阀的数目经常和被控变量的数目相同。图 1-2(b)表示有 p 个被控变量， p 个控制作用和 n 个外部干扰作用，可得出对象的输出为

$$Y(s) = G(s)U(s) + G_f(s)F(s) \quad (1-2)$$

式中 $G(s)$ ——控制通道的传递矩阵;

$G_f(s)$ ——干扰通道的传递矩阵。

这类对象可能有两种情况:

(1) 被控对象被划分成若干个独立的被控区域(相应地有若干个独立的控制系统)，每个调节阀只对一个被控变量起作用。因此，对于每一个独立的被控区域对象的特性的分析，可按只有一个被控变量的对象来处理。

(2) 具有多个被控变量的对象有相应个数的控制作用，这些被控变量或者根据工艺过程的要求相互之间必须保持一定的关系；或者通过共同的对象都受某一控制作用的影响，而不能独立控制。这样，每个控制作用除了影响“本身的”被控变量外，还或多或少地影响其他的被控变量。为此，要求其他的调节器能协同动作，以防止其他被控变量受到不恰当的影响。有时，也可采用专门的解耦控制，以使某一控制作用限制在只影响“本身的”被控变量，而不影响其他被控变量。

第二节 单容对象的动态特性及其数学描述

在化工生产过程中，一般遇到的对象有加热器、流体设备、水槽等。在连续生产过