

高等学校教材

# 工业生产过程控制

何衍庆 俞金寿 蒋慰孙 编著

化学工业出版社  
教材出版中心  
·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

工业生产过程控制 / 何衍庆, 俞金寿, 蒋慰孙 编  
著. 北京: 化学工业出版社, 2004. 2  
高等学校教材  
ISBN 7-5025-5205-7

I. 工… II. ①何…②俞…③蒋… III. 生产过程-控  
系制统-高等学校-教材 IV. TP278

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 010867 号

---

高等学校教材

工业生产过程控制

何衍庆 俞金寿 蒋慰孙 编著

责任编辑: 王丽娜

文字编辑: 余德华

责任校对: 凌亚男

封面设计: 关 飞

\*

化学工业出版社 出版发行  
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

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

\*

新华书店北京发行所经销

聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 25 $\frac{1}{4}$  字数 628 千字

2004 年 3 月第 1 版 2004 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5205-7/G · 1372

定 价: 40.00 元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

# 前 言

根据工业自动化专业的教学要求, 工业生产过程控制是在学生学完控制原理、化工原理、仪表和控制装置、微机原理后开设的专业课程。通过本课程的学习, 要求学生了解和掌握工业生产过程中有关控制系统的结构、工作原理和应用实施等知识。根据不同的专业要求深度, 可学习工业设备的控制和工业生产过程的控制等内容。为此, 本书采用多种形式来阐述控制系统的有关内容, 分别按控制结构、工业过程设备、工业生产过程的三部分进行讨论。其中, 第一部分(1~3章)是后续各章的基础, 内容涉及简单控制系统各组成环节的分析和相互影响; 常见复杂控制系统, 如串级控制、均匀控制、比值控制、前馈控制、分程控制、选择性控制、双重控制和基于模型计算的控制系统等; 以现代控制理论为基础的先进控制系统, 包括状态反馈、预测控制、解耦控制、软测量和推断控制、自适应和鲁棒控制、时滞补偿控制、智能控制、监督控制、故障检测诊断和容错控制及综合自动化等。第二部分(4~8章)以工业过程设备为主线, 分析和讨论不同类型工业设备的控制, 包括流体输送设备、传热设备、锅炉设备、精馏塔和化学反应器设备的控制, 通过对不同设备工艺特点和控制要求的分析, 确定相应的控制系统。第三部分(第9章)按工业生产过程分类, 分别对合成氨过程、间歇过程、常减压过程、催化裂化过程、乙烯过程、聚合过程、生物发酵过程、制浆造纸过程和冶金过程的控制进行分析, 针对特定的工业生产过程, 分析各自的特点, 并提出相应的控制方案。为便于学习, 每章后均附习题和思考题。

本书提供计算机辅助教学 CAI 课件。教师可根据教学要求选用部分或全部内容进行讲授, 学生可根据学习内容复习或自学有关内容。该 CAI 课件建立在 MATLAB 操作平台上, 为控制系统分析和仿真提供了极为方便的舞台。因此, 控制系统的研究和分析等都可直接通过 MATLAB 和 SIMULINK 进行。盘中所提供的程序也为学生学习 MATLAB 提供了示例。

本书是自动化专业学生的一门必修课教材, 可供工业生产过程控制领域的工程技术人员和设计人员参考, 也可作为相关专业师生的参考教材。

本书由何衍庆、俞金寿、蒋慰孙编著。编写工作中得到华东理工大学教务处、信息学院和自动化系的关心和帮助, 姜捷、杨洁、王为国等同志为本书编写做了不少工作, 另外还得到了化学工业出版社有关领导和编辑的大力支持和帮助, 谨此一并表示衷心的感谢!

由于时间和编著者的水平有限, 错漏在所难免, 恳请读者不吝指正。

编著者

2003 年 10 月于华东理工大学

# 目 录

绪论 .....	1	习题和思考题 .....	75
<b>1 简单控制系统 .....</b>	<b>7</b>	<b>2 常用复杂控制系统 .....</b>	<b>77</b>
1.1 控制系统组成和控制性能指标 .....	7	2.1 串级控制系统 .....	77
1.1.1 控制系统的组成 .....	7	2.1.1 基本原理、结构和性能分析 .....	77
1.1.2 控制系统的控制性能指标 .....	9	2.1.2 串级控制系统设计和工程应用中的问题 .....	83
1.2 过程动态特性和建立过程的动态模型 .....	13	2.1.3 串级控制系统的变型 .....	88
1.2.1 过程动态特性 .....	13	2.2 均匀控制系统 .....	90
1.2.2 过程动态模型的建立 .....	19	2.2.1 基本原理和结构 .....	90
1.3 检测变送环节 .....	21	2.2.2 控制器参数整定 .....	94
1.3.1 检测变送环节的性能 .....	21	2.3 比值控制系统 .....	96
1.3.2 对检测变送信号的处理 .....	22	2.3.1 基本原理、结构和性能分析 .....	96
1.4 执行器环节 .....	24	2.3.2 控制方案分析 .....	98
1.4.1 执行器概述 .....	24	2.3.3 比值控制系统设计和工程应用中的问题 .....	103
1.4.2 流量特性 .....	26	2.3.4 比值控制系统的变型 .....	105
1.4.3 控制阀特性的选择 .....	29	2.4 前馈控制系统 .....	106
1.4.4 阀门定位器的正确使用 .....	33	2.4.1 基本原理、结构和性能分析 .....	106
1.4.5 其他执行器 .....	35	2.4.2 前馈控制系统设计和工程应用中的问题 .....	111
1.5 控制器的模拟控制算法 .....	40	2.5 分程控制系统 .....	114
1.5.1 基本控制算法分析 .....	40	2.5.1 基本原理、结构和性能分析 .....	114
1.5.2 比例控制算法 .....	41	2.5.2 分程控制系统设计和工程应用中的问题 .....	115
1.5.3 比例积分控制算法 .....	43	2.6 选择性控制系统 .....	117
1.5.4 积分饱和及其防止 .....	45	2.6.1 基本原理、结构和性能分析 .....	117
1.5.5 比例微分控制算法 .....	47	2.6.2 选择性控制系统与其他控制系统的结合 .....	119
1.5.6 比例积分微分控制算法 .....	49	2.6.3 选择性控制系统设计和工程应用中的问题 .....	123
1.6 控制器的数字控制算法 .....	50	2.7 双重控制系统 .....	124
1.6.1 模拟控制算法的数字化 .....	50	2.7.1 基本原理、结构和性能分析 .....	124
1.6.2 数字控制算法的改进 .....	52	2.7.2 双重控制系统设计和工程应用中的问题 .....	127
1.6.3 连续系统的离散化 .....	57	2.8 基于模型计算的控制系统 .....	128
1.7 控制器参数整定和控制系统投运 .....	59	2.8.1 根据模型计算测量值的控制系统 .....	128
1.7.1 控制器参数整定的若干原则 .....	59	2.8.2 根据模型计算设定值的控制系统 .....	130
1.7.2 控制器参数整定 .....	61	2.8.3 非线性控制 .....	131
1.7.3 控制系统的投运和维护 .....	66		
1.8 与 PID 控制密切相关的几类控制算法 .....	67		
1.8.1 二维 PID 控制算法 .....	67		
1.8.2 时间比例控制系统 .....	68		
1.8.3 差拍控制系统 .....	68		

习题和思考题 .....	134	3.10.2 综合自动化系统的特点 .....	207
<b>3 先进控制系统</b> .....	136	3.10.3 现场总线和现场总线控制系统 .....	208
3.1 状态反馈控制 .....	136	习题和思考题 .....	210
3.1.1 状态反馈和极点配置 .....	136	<b>4 流体输送设备的控制</b> .....	212
3.1.2 状态反馈控制系统设计和工程应用中的问题 .....	142	4.1 泵和压缩机的基本控制 .....	212
3.2 预测控制 .....	143	4.1.1 离心泵的控制 .....	212
3.2.1 预测控制的基本特征 .....	143	4.1.2 容积式泵的控制 .....	214
3.2.2 预测控制系统实施时应注意的问题 .....	146	4.1.3 风机的控制 .....	215
3.2.3 预测控制算法 .....	147	4.1.4 压缩机的控制 .....	215
3.3 解耦控制 .....	149	4.1.5 变频调速器的应用 .....	217
3.3.1 系统关联分析和相对增益 .....	149	4.2 离心压缩机的防喘振控制 .....	217
3.3.2 解耦控制的设计和工程应用中的问题 .....	153	4.2.1 离心压缩机的喘振 .....	217
3.4 软测量和推断控制 .....	161	4.2.2 离心压缩机防喘振控制系统的设计 .....	218
3.4.1 软测量技术 .....	161	4.2.3 实例分析 .....	222
3.4.2 推断控制系统 .....	165	习题和思考题 .....	225
3.5 自适应控制和鲁棒控制 .....	168	<b>5 传热设备的控制</b> .....	226
3.5.1 自适应控制系统基本结构和类型 .....	168	5.1 传热设备的特性 .....	226
3.5.2 简单自适应控制系统 .....	169	5.1.1 换热器静态特性的基本方程式 .....	227
3.5.3 自整定控制器 .....	170	5.1.2 换热器的静态放大系数及应用 .....	228
3.5.4 自校正控制器 .....	171	5.2 一般传热设备的控制 .....	231
3.5.5 模型参考自适应控制系统 .....	173	5.2.1 调节载热体流量 .....	231
3.5.6 鲁棒控制 .....	175	5.2.2 调节载热体的汽化温度 .....	232
3.6 时滞补偿控制 .....	178	5.2.3 工艺介质分路 .....	233
3.6.1 Smith 预估补偿控制 .....	178	5.2.4 调节传热面积 .....	234
3.6.2 其他时滞补偿控制系统 .....	181	5.3 复杂控制系统的应用 .....	236
3.7 智能控制 .....	185	5.3.1 前馈-反馈控制 .....	236
3.7.1 智能控制概述 .....	185	5.3.2 基于模型计算的控制 .....	237
3.7.2 专家系统 .....	186	5.3.3 选择性控制 .....	239
3.7.3 模糊控制 .....	188	5.4 蒸发器的控制 .....	240
3.7.4 神经网络控制 .....	193	5.4.1 蒸发器的特性 .....	240
3.8 监督控制 .....	195	5.4.2 蒸发器的主要控制回路 .....	241
3.8.1 监督控制及其原则 .....	195	5.4.3 蒸发器的辅助控制回路 .....	242
3.8.2 操作优化控制 .....	196	5.5 工业窑炉的控制 .....	242
3.8.3 统计过程控制 .....	198	5.5.1 陶瓷窑炉的控制 .....	243
3.9 故障检测诊断与容错控制 .....	201	5.5.2 玻璃窑炉的控制 .....	244
3.9.1 故障检测诊断的基本概念 .....	201	5.5.3 水泥窑炉的控制 .....	246
3.9.2 工况监测控制 .....	203	习题和思考题 .....	247
3.9.3 容错控制 .....	204	<b>6 锅炉设备的控制</b> .....	248
3.10 综合自动化 .....	206	6.1 锅炉设备及其控制要求 .....	248
3.10.1 综合自动化的意义 .....	206	6.2 锅炉汽包水位控制 .....	249

6.2.1	锅炉汽包水位的动态特性	249	7.6.4	优化控制	306
6.2.2	锅炉汽包水位的控制	250	习题和思考题		313
6.2.3	应用示例	254	<b>8 化学反应器的控制</b>		314
6.3	蒸汽过热系统的控制	255	8.1	概述	314
6.4	燃烧控制系统	256	8.1.1	化学反应器的类型	314
6.4.1	燃烧控制的任務	256	8.1.2	化学反应器的控制要求	315
6.4.2	燃烧过程的控制	256	8.1.3	化学反应器的基本控制策略	317
6.4.3	燃烧过程中烟气氧含量闭环控制	258	8.2	化学反应器的特性	317
6.4.4	炉膛负压控制及安全控制系统	259	8.2.1	化学反应速度	317
6.4.5	锅炉控制的实例	261	8.2.2	化学平衡	320
6.5	火电站锅炉和发电机组的协调控制	263	8.2.3	转化率	321
6.5.1	协调控制概述	263	8.2.4	化学反应器的热稳定性	322
6.5.2	协调控制	263	8.3	化学反应器的基本控制	324
习题和思考题		267	8.3.1	出料成分的控制	324
<b>7 精馏塔的控制</b>		269	8.3.2	反应过程的工艺参数作为间接被控变量	324
7.1	精馏塔的控制要求和扰动分析	269	8.3.3	pH 控制	326
7.1.1	精馏塔的控制要求	269	8.3.4	化学反应器的推断控制	327
7.1.2	精馏塔的扰动分析	270	8.3.5	稳定外围的控制	328
7.2	精馏塔的特性	272	8.3.6	开环不稳定反应器的控制	329
7.2.1	物料平衡和内部物料平衡	272	习题和思考题		331
7.2.2	能量平衡	274	<b>9 典型工业生产过程的控制</b>		332
7.2.3	进料浓度 $x_F$ 和流量 $F$ 对产品质 量的影响	275	9.1	合成氨过程的控制	332
7.3	精馏塔被控变量的选择	276	9.1.1	变换炉的控制	332
7.3.1	采用温度作为间接质量指标	277	9.1.2	转化炉水碳比控制	333
7.3.2	采用压力补偿的温度作为间接质量 指标	278	9.1.3	合成塔的控制	334
7.4	精馏塔的基本控制	278	9.2	间歇过程的控制	336
7.4.1	产品质量的开环控制	279	9.2.1	间歇过程的分类与特点	336
7.4.2	按精馏段指标的控制	280	9.2.2	间歇过程的控制	340
7.4.3	按提馏段指标的控制	281	9.2.3	生产计划和调度	342
7.4.4	精馏塔的塔压控制	282	9.3	常减压过程的控制	347
7.5	复杂控制系统在精馏塔中的应用	283	9.3.1	常减压过程的特点	347
7.5.1	串级控制	283	9.3.2	常减压塔的控制	348
7.5.2	前馈-反馈控制	284	9.4	催化裂化过程的控制	351
7.5.3	选择性控制	284	9.4.1	催化裂化过程的特点	351
7.5.4	节能控制	286	9.4.2	催化裂化过程的控制	352
7.6	先进控制系统在精馏塔中的应用	295	9.5	乙烯过程的控制	355
7.6.1	软测量和推断控制	295	9.5.1	乙烯裂解过程的特点	356
7.6.2	预测控制	298	9.5.2	乙烯裂解过程的控制	357
7.6.3	专家系统	302	9.5.3	分离过程的控制	361
			9.6	聚合过程的控制	362
			9.6.1	聚合过程的特点	362
			9.6.2	聚合过程的控制	362
			9.7	生化过程的控制	370

9.7.1 生化过程的特点.....	370	9.9.1 转炉炼钢过程的控制.....	384
9.7.2 生化过程的控制.....	374	9.9.2 初轧生产过程的控制.....	387
9.8 制浆造纸过程的控制.....	379	习题和思考题 .....	389
9.8.1 制浆造纸过程的特点.....	379	附录 管道仪表流程图的设计符号 .....	390
9.8.2 制浆造纸过程的控制.....	380	参考文献 .....	393
9.9 冶金过程的控制.....	384		

# 绪 论

## (1) 工业生产过程控制概述

工业生产过程控制 (Industrial Process Control) 是指石油、化工、电力、冶金、纺织、建材、轻工、核能等工业部门生产过程的自动化。

与其他自动控制系统比较, 工业生产过程控制具有下列特点。

① 过程控制系统由过程检测、变送和控制仪表、执行装置等组成, 通过各种类型的仪表完成对过程变量的检测、变送和控制, 并经执行装置作用于生产过程。这些仪表可以是气动仪表、电动仪表, 可以是模拟仪表也可以是计算机或者智能仪表。随着计算机技术的应用, 大量的数字式仪表应运而生, 数字通信得到实际应用, 现场总线仪表和现场总线控制系统的出现标志着新型仪表革命的到来。不管采用什么仪表或计算机装置, 从过程控制的基本组成来看, 过程控制系统总是包括对过程变量的检测变送、对信号的控制运算和输出到执行装置, 完成所需操纵变量的改变, 从而达到所需控制目标 (或指标)。

② 工业生产过程控制的被控过程具有非线性、时变、时滞及不确定性等特点, 因此, 难于获得精确的过程数学模型, 使在其他领域应用成功的控制策略不能移植过来或增加了移植的难度, 这就给控制带来了困难。

③ 工业生产过程控制所控制的过程多属于慢过程。与航天、运动过程的控制不同, 被控过程通常具有一定时间常数和时滞, 过程的控制并不需要在极短时间内完成。

④ 工业生产过程控制方案具有多样性。由于工业过程的多样性, 控制方案也适应被控过程的特点, 具有多样性。同一被控过程, 因受到的扰动不同, 需采用不同的控制方案; 控制方案适应性强, 同一控制方案可适用于不同的生产过程控制。常用的控制方案有简单控制系统、串级控制系统、比值控制系统、均匀控制系统、前馈控制系统、分程控制系统、选择性控制系统、双重控制系统等, 随着过程控制研究的深入, 大量先进控制系统和控制方案得到开发和应用, 例如状态反馈控制、预测控制、解耦控制、时滞补偿控制、专家系统和模糊控制等智能控制。

⑤ 控制系统分为随动控制和定值控制, 工业生产过程控制的常用形式是定值控制。它们都采用一些过程变量, 例如温度、压力、流量、物位和成分等作为被控变量, 过程控制的目的是保持这些过程变量能够稳定在所需的设定值, 能够克服扰动和负荷变化对被控变量造成的影响。

⑥ 工业生产过程控制的实施手段具有多样性, 尤其是在开放系统互操作性和互联性等问题得到解决后, 实现过程控制目标的手段变得更为丰富。用户可以方便地在计算机控制装置上实现所需控制功能; 可以方便地更换损坏的仪表而不必考虑是否与原产品一致; 可以方便地在控制室或现场获得仪表的信息, 例如量程、调整日期、误差等, 还可以直接进行仪表的校验和调整。

## (2) 工业生产过程控制的发展趋势

工业生产过程控制的发展趋势有两个明显的特点。一是同步性。任务的需要、理论的开拓、技术手段的进展这三者之间相互推动, 互相促进, 显示了一幅错综复杂、但又轮廓分明

的画卷，三者间呈现明显的同步性。二是综合性。自动化技术是一门综合性的技术，控制论更是一门广义的学科，在自动化各个领域移植借鉴、交流汇合，表现出强烈的交流性。

在进入信息社会和知识经济时代的今天，面对计算机技术的挑战，回顾过程控制技术的历史进程，对明确今后工业生产过程控制的发展方向是很必要的。

自动化技术的前驱，可以追溯到古代，如我国指南车的出现，水运仪象台的应用等。在工业生产的应用，通常以瓦特的蒸汽机调速器作为正式起点。因此，工业自动化的萌芽是与工业革命同时开始的。当时的自动化装置以自力式机械装置为代表。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。

纵观过程控制发展的历史，大致经历下列几个阶段。

第一阶段从 20 世纪 30 年代到 40 年代。该阶段控制理论采用的数学方法是微分方程解析方法，以研究单输入、单输出控制系统为主，被控变量是常用的过程参数，例如温度、压力、流量和物位等，采用的仪表是基地式仪表和部分气动单元组合仪表。

第二阶段从 20 世纪 40 年代到 50 年代。该阶段，控制理论称为经典控制理论，包括奈魁斯特和伯德的频域法、欧文斯的根轨迹法等，以电子和电工为对象，从随动控制系统的实践中提高，并移植到定值控制系统为主的工业生产过程控制系统中来。解决定值控制系统的分析和综合等问题，采用的仪表仍以基地式仪表为主，气动单元组合仪表也开始大量应用于工业生产过程控制。

第三阶段从 20 世纪 50 年代到 60 年代。这阶段出现了现代控制理论，并指导实践应用，过程控制得到较快发展。为适应工业生产过程控制的要求，一些复杂控制系统得到开发，并在实践应用中被证明有良好控制效果，组合式仪表得到广泛应用，气动和电动单元组合仪表成为当时控制仪表的主流。从 20 世纪 60 年代开始，现代控制理论得到应用，并取得成效，最优控制理论的出现标志了第三代控制理论的诞生。它们在航天、航空和制导等领域取得应用的成功，并希望将它们移植到过程控制领域。代表性成果有极小值原理（Pontryagin, 1962）、动态规划（Belman, 1963）、随机性系统的最小二乘状态估计（Kalman, 1960）等。现代控制理论的可控性、可观性、实现理论、规范型和分解定理等基本理论的建立，使控制从工程设计上升到一门新的学科，系统辨识和参数估计、随机控制、自适应控制和鲁棒控制等控制领域的理论分支相继得到开发和研究，但是在工业生产过程控制领域，这些理论还未能发挥作用。

第四阶段从 20 世纪 70 年代开始，为解决大规模复杂系统的优化和控制问题，现代控制理论与系统理论相结合，形成了大系统控制理论（Mohammad, 1983），其核心是系统的分解和协调，多级递阶优化和控制（Mesarovic, 1970）是应用大系统理论的典范。除了高维线性系统外，大系统理论仍未突破现代控制理论的基本思想和框架，对其他复杂控制系统仍束手无策。同时，基于知识的专家系统、模糊控制、人工神经网络控制、学习控制和基于信息论的智能控制、含有大量不确定和难于建模的复杂控制系统应运而生，并在许多应用领域得到广泛应用。这阶段的仪表从直接数字控制（DDC）到集散控制系统，特别是 DCS 集散控制系统的硬件可靠性大大提高，控制回路和危险的分散、数据显示和实时监督等功能的集中等特点，使得它在工业生产过程的控制中得到广泛应用，现代控制理论因计算机的应用而得以实现。

第五阶段从 20 世纪 80 年代开始，随着计算机技术、显示技术、控制技术、通信技术的发展，工业生产过程控制也得到飞速发展。现场总线控制系统和现场总线仪表的诞生和应用

不仅推动了过程控制的发展，也对经典的集散控制系统提出了挑战，开辟了控制系统的新纪元。随着通信技术的发展，工业生产过程和控制与管理集成在一起，组成了计算机集成过程控制系统，或综合自动化系统，它将管理和控制集成在一个大系统中，用市场经济进行调节，以全局优化为目标，实现了信息的集成，将常规控制、先进控制、过程优化、过程管理、生产调度、经营决策等功能集成在一起，以适应市场的不同要求。开放系统互联标准的建立为过程控制系统的发展提供了依据。以微处理器为核心的控制装置已经成为过程控制领域的主流装置，集散控制系统被大量应用于工业生产过程的控制和管理。

当前工业生产过程控制发展的主要特点如下。

① 生产装置实施先进过程控制成为发展主流。早期的简单控制由于受经典控制理论和常规仪表的制约，难于解决生产过程控制中的系统耦合、非线性和时变等特点，随着企业对过程控制高柔性和高效益的要求，先进控制正受到过程工业界的普遍关注。先进过程控制（APC：Advanced Process Control）指在动态环境下，基于模型、充分借助计算机能力，为工厂获得最大利润而实施的一类运行和技术策略。这种先进过程控制策略的实施，能使工厂运行在最佳工况，实现所谓“卡边生产”。有资料报道，某乙烯装置投资 163 万美元实施先进过程控制，完成后预期可获得每年 600 万美元的效益。目前，先进的过程控制软件约有几百种，应用先进过程控制的项目有数千项，一些集散控制系统和控制软件开发公司都推出和研究开发相应的先进过程控制软件，先进过程控制软件的应用正以年增长率 30% 左右的速度递增。先进过程控制的控制策略包括：双重控制和阀位控制、时滞补偿控制、解耦控制、自适应控制、差拍控制、状态反馈控制、多变量预测控制、推断控制及软测量技术、智能控制（专家控制、模糊控制、神经网络控制等）等，尤其以智能控制作为开发、研究和应用的热点。

② 过程优化受到过程工业界的普遍关注。通常，连续过程工业生产中上游装置的部分产品是下游装置的原料，整个生产过程存在装置间的物流分配、物料平衡、能量平衡等一系列问题。借助过程优化可使整个生产过程获得很大的经济和社会效益。过程优化主要寻找最佳工艺操作参数的设定值，使生产过程获得最大经济效益，这也称为稳态优化。稳态优化采用静态模型，进行离线或在线的优化计算。离线优化是在约束条件下采用各种建模优化方法寻求最优工艺操作参数，提供操作指导。在线优化是周期进行模型计算、模型修正和参数寻优，并将参数值直接送控制器作为设定值。为获得稳态最优，要求系统工作在一种保守程度较小的特定工况下，一旦偏离该工况，各项指标会明显变差，操作难度增加，并导致生产不安全。随着稳态优化的深入研究，直接影响过程动态品质的最优动态控制也显示出其重要性。

生产过程优化是在各种约束条件下，寻求目标函数最优值时生产过程变量的设定值。由于生产过程的复杂性，通常，生产过程的优化解并不一定是全局的最优解，但应是在约束条件下的满意解。为此，可以在工艺设计的同时，考虑控制方案的实施和控制效果，消除可能导致控制失效或可能的制约因素，使工艺和控制结合。

③ 开放系统和标准化。从工业自动化仪表发展看，从基地式仪表、单元组合仪表到以微处理器为基础的计算机控制装置，自动化仪表的发展极为迅速，近年来，在传统 DCS 基础上，现场总线仪表和现场总线控制系统相继问世，使自动化仪表有了质的飞跃。现场总线控制系统的主要特点是开放性、智能化，产品符合开放系统互联标准，它实现了真正的双向数字式通信和控制，成本降低，设计、安装和维护工作量减小，将控制下放到现场级。

随着计算机技术、网络技术、通信技术、控制技术及其他高新技术的发展，过程控制仪表和系统都将出现新的发展，系统的开放和标准化使用户最终得益。

④ 综合自动化。过程工业自动化在国际国内的市场竞争中不断提高，从原来各制造厂商的“自动化孤岛”综合集成为一个整体的系统。综合自动化是当代工业自动化的主要潮流。计算机集成制造系统在连续工业中的具体体现就是综合自动化。综合自动化是在计算机通信网络和分布式数据库的支持下，实现信息和功能的集成，把控制、优化、调度、管理、经营、决策等集成在一起，最终形成一个能适应生产环境的不确定性、市场需求的多变性、全局优化的高质量、高效益、高柔性的智能生产系统。

综合自动化通常由基础控制级、先进控制和优化级、计划调度级、管理级和辅助决策级等组成。其特点如下。

- 系统采用递阶系统结构。由于综合自动化系统应用于相互关联的工业系统，它的决策不仅需要各子系统的决策，还需要上级的协调来实现全局的优化，因此，综合自动化系统采用递阶系统结构。它具有结构灵活、系统扩展容易、信息共享、减少各子系统的信息存储量和计算量、可靠性高、成本低等优点。

- 系统主线式控制和管理。综合自动化实现了管理和控制一体化，实现了电子、仪表和计算机的一体化。通常，现场总线控制系统和集散控制系统主要完成工业生产过程的控制任务，上位计算机组成计算机网络，完成全厂或全公司的信息、资源的合理利用、管理和决策。

- 系统的信息集成是综合自动化的关键。综合自动化是将现场设备的信息、过程控制的信息、车间经济核算的信息、管理调度和计划调度的信息、原料和产品的购销信息、市场需求信息等各种信息集成在一个系统中，实现信息共享、资源共享，充分利用和发挥信息作用，以获得最大的经济效益。

⑤ 现场总线控制系统。现场总线控制系统是适应综合自动化发展需要而诞生的，它是仪表控制系统的革命。

现场总线是一种计算机的网络通信总线，是位于现场的多个总线仪表与远端的监控计算机装置间的通信系统。因此，从结构看，现场总线是底层控制通信网；从通信报文的长度看，它是短帧通信；从传输速率看，它有低速和高速两类；从传输范围看，它是局部通信网。

现场总线的技术特点如下。

- 开放性 现场总线是开放网络。符合现场总线通信协议的任何一个制造厂商的现场总线仪表产品都能方便地连接到现场总线通信网，符合通信标准的不同制造商的产品可以互换或替换，而不必考虑该产品是否是原制造商的产品。因此，用户可以购置不同制造商的现场总线产品，把它们集成在一个控制系统中，并进行信息的互相交换。

- 智能化 现场总线仪表把处理器引入仪表，使仪表本身成为网络的一个节点，并参与通信，这表明现场总线采用数字通信。在现场总线仪表中可完成原来需在分散过程控制装置或回路控制器中才能完成的各种运算和控制。因此，在现场就可以完成控制系统的各种基本功能要求，送控制室的数据全部是数字信号，保证了功能的自治性。

- 互操作性 互操作性包含设备的可互换性和可互操作性。可互换性指不同厂商的设备在功能上可以用同一功能的其他厂商同类设备互换。可互操作性指不同厂商的设备可互相通信，并能在各厂商的环境中完成其功能。

- 环境适应性 现场总线是专门为现场应用而设计的，因此，它能很好地适应现场的操作环境。表现为通信媒体可采用双绞线、同轴电缆和光缆等多种类型，对电磁干扰的抗扰性强，可实现本安回路、可总线供电等。

现场总线技术的发展也推动了现场总线仪表的发展。为满足现场总线通信的开放和互操作性的要求，现场总线仪表应是智能仪表。它具有互操作性、互换性、可靠性、混合性、采用数字通信、智能化、分散性等特点。

现场总线控制系统把控制功能彻底分散到现场总线仪表，真正实现分散控制的功能。现场总线控制系统需要有类似 DCS 中分散过程控制装置的控制软件，一些要进行人机信息交换的现场总线仪表还需有类似操作管理装置的人机接口及管理软件。现场总线控制系统软件包括现场总线组态软件、维护软件、仿真软件、现场设备管理软件和监控软件等。

### (3) 工业生产过程控制的研究对象与任务

工业生产过程控制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、设计和应用。

对工业生产过程中已有的控制方案进行分析，总结各种控制方案的特点是过程控制工程的第一个任务。工业生产过程的工艺流程确定后，如何设计出满足工艺控制要求的控制方案是过程控制工程的第二个任务。在控制方案已经确定后，如何使控制系统能够正常运行，并发挥其功能是过程控制工程的第三任务。

工业生产过程控制工程的基础是控制理论，它的技术工具和分析工具包括工业生产过程工程与工艺、自动化仪表和计算机，所研究的主体是工业过程控制系统。图 1 所示为工业生产过程控制工程的学科结构及相互之间的联系。

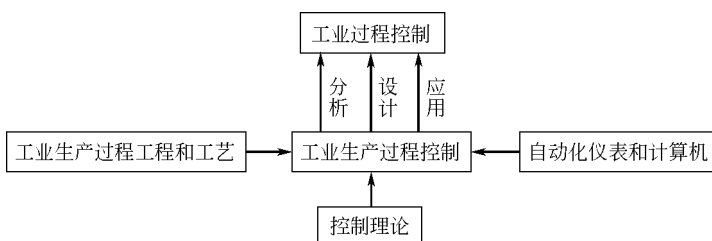


图 1 工业生产过程控制工程的学科结构

工业生产过程控制工程是控制理论在工业过程控制系统的重要应用。控制理论的移植和改造、控制系统结构的研究、控制算法的确定及控制系统的实现等都是控制理论与工业生产过程工程 and 工艺、仪表和计算机的有机结合，是它们在工业过程控制系统的成功应用。

工业生产过程中的被控变量要求达到和保持在工艺操作所需的设定值，为此，需要检测和变送这些被控变量，并按一定的控制规律输出信号到执行器，调整操纵变量。如何选择被控变量，如何设计控制方案，如何选择操纵变量，应根据什么控制规律计算控制器输出，控制器参数应如何设置，控制系统各构成部件如何选择和配合等都是工业生产过程控制工程所需要解决的问题。图 2 所示为控制系统的控制结构。工业生产过程控制工程即要解决图 2 所示控制系统的方案设计、分析和应用问题。

从发展观点看，过程控制工程是从早期的凭经验、凭直觉、凭定性说理的实际控制系统设计上升为科学性、条理性、有定量理论指导的阶段。

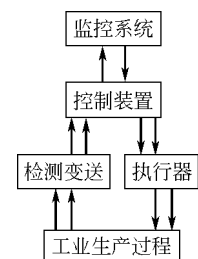


图 2 控制系统的控制结构

把控制理论、工业生产过程工程和工艺、自动化仪表和计算机的知识有机结合，构成了一门综合性的工程科学。



### 思考题

1. 试述过程控制的发展史，它与控制理论、技术工具之间的关系如何？
2. 现代控制理论为什么在工业生产过程控制中的应用不很成功？
3. 试述计算机过程控制的发展过程。
4. 工业生产过程控制工程的任务是什么？
5. 过程控制工程的综合性主要体现在什么地方？
6. 为什么要对工业生产过程进行控制？

# 1 简单控制系统

## 1.1 控制系统组成和控制性能指标

### 1.1.1 控制系统的组成

在生产过程中有各种控制系统，图 1-1 所示为几个简单控制系统的示例。在这些控制系统中都有一个需要控制的过程变量，例如图中的温度、压力、液位等，这些需要控制的变量称为被控变量 (Controlled Variable)。为了使被控变量与希望的设定值 (Set Point) 保持一致，需要有一种控制手段，例如图中的蒸汽流量、回流流量和出料流量等，这些用于调节的变量称为操纵变量 (Manipulated Variable) 或操作变量。被控变量偏离设定值的原因是由于过程中存在干扰 (Disturbance)，例如蒸汽压力、泵的转速、进料量的变化等。设定值又称为参比变量 (Reference Variable)，随动控制系统的参比变量是变化的。

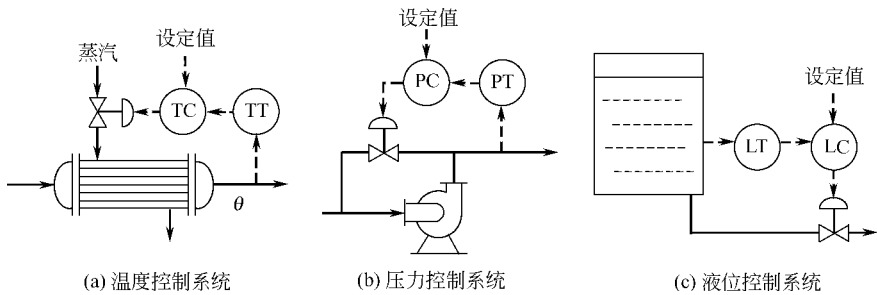


图 1-1 简单控制系统示例

在这些控制系统中，检测元件和变送器将被控变量检测并转换为标准信号，当系统受到干扰影响时，检测信号与设定值之间就有偏差，因此，检测变送信号在控制器中与设定值比较，其偏差值按一定的控制规律运算，并输出信号驱动执行机构改变操纵变量，使被控变量回复到设定值。

可见，简单控制系统由检测变送单元、控制器、执行器和被控对象组成。

检测元件和变送器 (Sensor and Transmitter) 用于检测被控变量，并将检测到的信号转换为标准信号输出。例如热电阻或热电偶和温度变送器、压力变送器和液位变送器等。

控制器 (Controller) 用于将检测变送单元的输出信号与设定值信号进行比较，按一定的控制规律对其偏差信号 (Error Signal) 进行运算，运算结果输出到执行器。控制器可以采用模拟仪表的控制器或由微处理器组成的数字控制器，例如用 DCS 中的控制功能模块等实现。

执行器 (Actuator) 又称最终环节 (Final Element)，它是控制系统环路中的最终元件，直接用于控制操纵变量变化。执行器接收控制器的输出信号，通过改变执行器节流件的流通面积来改变操纵变量。图 1-1 中用 TT、PT 和 LT 分别表示温度、压力和液位变送器，用 TC、PC 和 LC 表示相应的控制器，图中的执行器都用控制阀表示。它可以是气动薄膜控制

阀、带电气阀门定位器的气动控制阀等。执行器也可用变频调速电机等实现。

被控对象 (Object 或 Process) 是需要控制的设备, 例如图 1-1 中的换热器、泵和液位储罐等。

图 1-2 表示上述控制系统的构成。图 1-3 是用传递函数描述的图 1-2 简单控制系统的框图。这是通用的单输入单输出控制系统 (Single Input Single Output Control System) 的框图。从图中, 可以获得闭环控制系统的输入输出传递函数为

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_v(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_v(s)G_p(s)G_m(s)} \quad (1-1)$$

$$\frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{G_r(s)}{1 + G_c(s)G_v(s)G_p(s)G_m(s)} \quad (1-2)$$

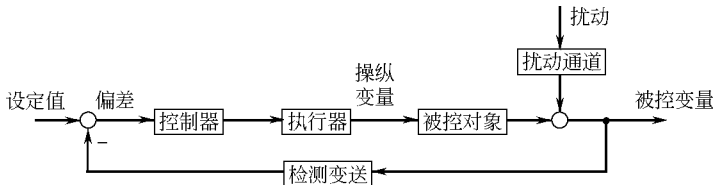


图 1-2 简单控制系统框图

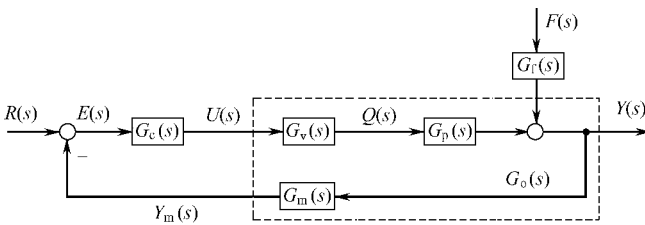


图 1-3 简单控制系统传递函数描述

对图 1-3 的说明如下。

① 框图中的各个信号都是增量。增益和传递函数都是在稳态值为零时得到的。图中的箭头表示信号的流向, 并非物流或能流的方向。

② 各环节增益的正或负可根据在稳态条件下该环节输出增量与输入增量之比确定。当该环节的输入增加时, 其输出增加, 则该环节的增益为正, 反之, 如果输出减小则增益为负。

③ 通常将执行器、被控对象和检测变送环节合并为广义对象, 广义对象传递函数用  $G_o(s)$  表示。因此, 简单控制系统亦可表示为由控制器  $G_c(s)$  和广义对象  $G_o(s)$  组成的闭环。

④ 将各环节的增益除以该物理量的基准值可得到无量纲的描述。当控制器输入和输出信号采用统一标准信号时, 广义对象的增益是无量纲的。

⑤ 简单控制系统有两个通道: 控制通道和扰动通道。控制通道是操纵变量到被控变量的通道。扰动通道是干扰到被控变量的通道。当扰动影响被控变量时, 简单控制系统通过控制通道的调节, 改变操纵变量来克服扰动对被控变量的影响。这类控制系统称为定值控制系统 (Fixed Set Point Control System)。当控制系统的设定值变化时, 控制系统同样通过控制通道的调节, 改变操纵变量, 使被控变量能跟随设定值的变化而变化。这类控制系统称为随动控制系统 (Follow-up Control System) 或伺服控制系统 (Servo Control System)。

⑥ 控制系统中如果包含采样开关，则这类控制系统称为采样控制系统 (Sampling Control System)，它可以由常规仪表加采样开关组成，也可以直接由计算机控制系统组成。根据采样开关的数量、设置的位置、采用保持器的类型和采样周期的不同，控制系统的控制效果会不同，应根据具体情况分析。

⑦ 通常将检测变送环节表示为 1，其原因是被控变量能够迅速正确地被检测和变送，此外，为了简化，也常将  $G_m(s)$  与被控对象  $G_p(s)$  合并在一起考虑。但是，对于有非线性特性的检测和变送环节，例如采用孔板和差压变送器测量流量时，应分别列出。

⑧ 被控变量分为直接被控变量和间接被控变量两大类。简单控制系统的设计主要是被控变量和操纵变量的选择。被控变量的选择原则是：尽可能选用直接被控变量；有足够的灵敏度；工艺合理等。操纵变量的选择原则是：静态合理；动态迅速；稳定性和经济性等。

### 1.1.2 控制系统的控制性能指标

控制系统的性能指标可用时域指标或积分指标描述。

稳定性是控制系统性能的首要指标。这表明组成控制系统的闭环极点应位于  $s$  左半平面。准确性是控制系统的重要性能指标。这表明控制系统的被控变量与参比变量 (设定值) 之间的偏差，即静态偏差应尽可能小。快速性也是控制系统的重要性能指标。当控制系统受到扰动影响时，控制系统应尽快地做出响应，改变操纵变量，使被控变量与参比变量之间有偏差的时间尽可能短。除了上述性能指标外，控制系统的偏离度也是极重要的控制系统性能指标。它表示在控制系统运行过程中被控变量偏离参比变量的离散程度。

控制系统的控制性能指标应根据工艺过程的控制要求确定。不同的工艺过程对控制的要求不同。例如，简单液位控制系统常常只需要保证液位不溢出或排空，而精密精馏塔温度控制的控制精度可能在正负零点几度。其次，不同类型的控制系统，其控制性能指标也不同，例如，通常随动控制系统的衰减比建议调整在 10 : 1 以上，而定值控制系统的衰减比则建议调整在 4 : 1。

控制系统的控制性能指标可分为时域控制性能指标和积分控制性能指标。

#### 1.1.2.1 时域控制性能指标

用阶跃输入信号作用下控制系统输出响应曲线表示的控制系统性能指标称为时域控制性能指标。时域控制性能指标有衰减比、最大偏差 (超调量)、振荡频率和回复时间、偏离度等。图 1-4 所示为定值和随动控制系统的时域控制性能指标。

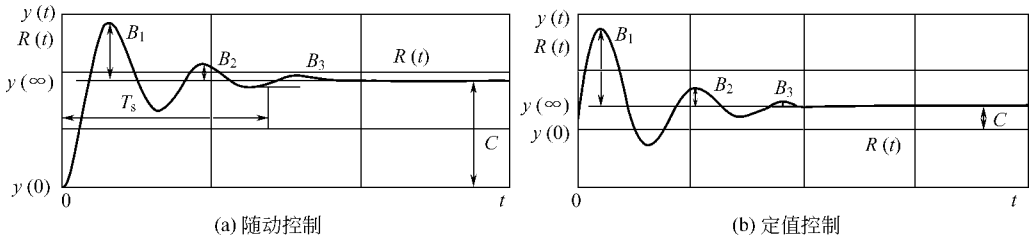


图 1-4 控制系统的时域控制性能指标

##### (1) 衰减比 $n$

衰减比 (Subsidence Ratio) 是控制系统的稳定性指标。它是相邻同方向两个波峰的幅值之比。即

$$n = \frac{B_1}{B_2} \quad (1-3)$$

衰减比  $n=1:1$  表明控制系统的输出呈等幅振荡，系统处于临界稳定状态；衰减比小于  $1:1$  表明控制系统输出发散，系统处于不稳定状态；衰减比越大，系统越稳定。通常，希望随动控制系统的衰减比为  $10:1$ ，定值控制系统的衰减比为  $4:1$ 。

衰减率  $\Psi$  也用于表示控制系统的稳定性。它是每经过一个周期后，波动幅度衰减的百分数，即

$$\Psi = \frac{B_1 - B_2}{B_1} \times 100\% \quad (1-4)$$

二阶系统常用衰减度  $m$  表示衰减的程度。它与衰减比  $n$ 、阻尼比  $\zeta$  的关系为

$$\begin{cases} n = e^{2\pi m} \\ m = \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \end{cases} \quad (1-5)$$

衰减比与衰减率、衰减度有一一对应关系，见表 1-1。

表 1-1 衰减比与衰减率、衰减度的关系

衰减比	衰减率	衰减度	衰减比	衰减率	衰减度
1:1	0	0	4:1	0.75	0.2206
2:1	0.50	0.1103	10:1	0.90	0.3665

## (2) 超调量和最大动态偏差

随动控制系统中，超调量 (Overshoot)  $\sigma$  定义为

$$\sigma = \frac{B_1}{C} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中， $C$  是输出的最终稳态值； $B_1$  是输出超过最终稳态值的最大瞬态偏差。

定值控制系统中，最终稳态值很小或趋于零，因此，采用最大动态偏差  $A$  表示超调程度。即

$$|A| = |B_1 + C| \quad (1-7)$$

超调量和最大动态偏差 (Maximum Dynamic Error) 表征在调节过程中被控变量偏离参比变量的超调程度。它也反映了控制系统的稳定性。

## (3) 余差

余差 (Steady-state Error) 是控制系统的最终稳态偏差  $e(\infty)$ 。在阶跃输入作用下，余差为

$$e(\infty) = r - y(\infty) = r - C \quad (1-8)$$

定值控制系统中  $r=0$ ，因此有  $e(\infty) = -C$ 。余差是控制系统的稳态准确性指标。

## (4) 回复时间和振荡频率

过渡过程要绝对地达到新稳态值需要无限时间，因此，用被控变量从过渡过程开始到进入稳态值  $\pm 5\%$  或  $\pm 2\%$  范围内的时间作为过渡过程的回复时间  $T_s$  (Settling Time)。回复时间是控制系统的快速性指标。

过渡过程的振荡频率  $\omega$  与振荡周期  $T$  的关系是

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (1-9)$$