

江苏省高等学校精品教材建设立项项目

免费提供电子教案

<http://www.cmpedu.com>



21 世纪高等院校电气信息类系列教材

过程控制系统

郭一楠 常俊林 赵 峻 樊晓虹 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



江苏省高等学校精品教材建设立项项目

21 世纪高等院校电气信息类系列教材

过程控制系统

郭一楠 常俊林 赵 峻 樊晓虹 编著
关新平 费树岷 审

机械工业出版社

本书详细讨论了过程控制系统的结构、原理、特点、系统分析和应用,并与实际工程应用相结合。在内容安排上,既强调了过程建模、参数测量与变送、简单和先进控制策略等基础知识,又增加了过程计算机控制软硬件及网络控制等新技术内容。考虑到行业需求,书中加入了涉及系统安全性的防爆知识。

让读者从应用的角度,理解过程控制问题的本质,掌握分析和设计过程控制系统的方法。

本书可作为高等院校自动化及相近专业本科生教材,也可供煤炭、冶金、电力、化工等部门从事过程控制工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

过程控制系统/郭一楠等编著. —北京:机械工业出版社, 2009.2

江苏省高等学校精品教材建设立项项目

(21世纪高等院校电气信息类系列教材)

ISBN 978-7-111-25042-5

I. 过... II. 郭... III. 过程控制—自动控制系统—高等学校—教材 IV. TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第188840号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:时静 责任编辑:郝建伟 版式设计:霍永明

责任校对:陈立辉 责任印制:杨曦

三河市国英印务有限公司印刷

2009年2月第1版第1次印刷

184mm×260mm·18.5印张·456千字

0001—4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-25042-5

定价:30.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379753 88379739

封面无防伪标均为盗版

出版说明

随着科学技术的不断进步，整个国家自动化水平和信息化水平的长足发展，社会对电气信息类人才的需求日益迫切、要求也更加严格。在教育部颁布的“普通高等学校本科专业目录”中，电气信息类（Electrical and Information Science and Technology）包括电气工程及其自动化、自动化、电子信息工程、通信工程、计算机科学与技术、电子科学与技术、生物医学工程等专业。这些专业的人才培养对社会需求、经济发展都有着非常重要的意义。

在电气信息类专业及学科迅速发展的同时，也给高等教育工作带来了许多新课题和新任务。在此情况下，只有将新知识、新技术、新领域逐渐融合到教学、实践环节中去，才能培养出优秀的科技人才。为了配合高等院校教学的需要，机械工业出版社组织了这套“21世纪高等院校电气信息类系列教材”。

本套教材是在对电气信息类专业教育情况和教材情况调研与分析的基础上组织编写的，期间，与高等院校相关课程的主讲教师进行了广泛的交流和探讨，旨在构建体系完善、内容全面新颖、适合教学的专业教材。

本套教材涵盖多层面专业课程，定位准确，注重理论与实践、教学与教辅的结合，在语言描述上力求准确、清晰，适合各高等院校电气信息类专业学生使用。

机械工业出版社

序

流程工业 (Process Industry) 是指连续不间断或半连续批量的生产过程, 在石油、电力、冶金、煤矿、化工、造纸、橡胶、陶瓷、玻璃、制药等行业中大量存在, 对国民经济有着举足轻重的作用。流程工业是一类高度复杂的工业系统, 不仅伴随有物理、化学反应过程, 还有物质、能量的传递和转换过程, 其系统特征多表现为大范围连续性和不确定性、高度非线性和强耦合性, 给控制好这类工业系统的品质带来相当的难度。

过程控制系统 (Process Control System) 是针对流程工业的特点而构成的自动控制系统, 涉及的研究范畴包括过程动态特性、传感与变送、检测信号调理、控制器与控制规律、执行机构、控制参数调整、系统组成与投运等, 并涉及计算机硬件技术和软件工程。它是保障流程工业安全、高效生产, 节能减排, 优质高产, 增加经济效益, 降低生产成本的重要手段。

本书是作者多年教学经验和科研实践的积累, 具有自己特有的教学套路, 适量结合了煤矿行业的特色, 按过程控制系统的组成与设计思路组织编写的。首先, 概要论述了过程控制系统的组成、性能指标及流程对象共有特征的环节特性, 包括难控的纯迟延环节和自衡与非自衡惯性环节, 以建立起过程控制的基本概念; 其次, 有选择性地讨论了流程对象的建模方法, 为过程控制系统的整定和高等过程控制方法的应用做了铺垫; 接着, 用明显的篇幅阐述了过程参数的检测、变送和控制器的设计, 以及控制执行机构和系统本安防爆技术, 尤其突出讨论了 PID 控制规律及其整定方法, 同时介绍了一些高等控制方法和复杂控制系统的组成, 包括串级控制系统、前馈控制系统、大滞后控制系统、比值控制系统、分程控制系统等; 之后, 又简明介绍了计算机过程控制系统的组成和原理, 包括集散控制系统、现场总线控制系统、网络控制系统等; 最后, 重点分析了一些典型生产过程和部分煤矿工业过程控制系统的设计。全书知识覆盖面广, 内容介绍有轻有重, 契合当前技术发展的趋势。

根据作者的教学经验, 本书可用于自动化专业、电气工程及自动化专业或其他相关专业本科生“过程控制系统”课程的教学, 学时数可以为 30~56 不等, 其中课堂教学不少于 30~44 学时, 同时配置 2~12 学时的实验教学。如果选用本书作为教材, 教师需要根据不同的专业和不同的学时, 有选择地讲授本书内容。

“过程控制系统”是一门工程性很强的课程, 教学过程要注意工程性内容的

引入,理论联系实际,充分利用计算机技术,为培养学生的工程概念和能力创造实验和设计条件。授课应该突出基本概念,遵循“由浅入深,由特殊到一般”的认识规律,减少繁琐的公式推导,增加工程实例分析,体现“厚基础,重实践”的教学原则。可能的情况下利用本书附录介绍的监控组态软件,使课程的抽象理论形象化。监控组态软件是伴随集散控制系统的出现走进控制应用领域的,它犹如“应用软件生成器”,借助它可以神工般地生成特定的应用程序,提高了过程控制系统的开发速度,保证了过程控制应用的成熟性和可靠性。掌握一种以上主流的监控组态软件似乎已成为公认的衡量控制应用能力的重要标志,“过程控制系统”的课程教学要注意到这种人才需求。

要教好“过程控制系统”这门课,教师需要融会理论知识,并积累一定的工程经验。这样才能驾驭课堂,默默地将学生引入过程控制知识领域,并让学生陶醉其中。书本只是知识的载体,照本宣科一定乏味,要让知识的灵魂活现,这考验教师的基本功。

信奉学生一定有学习能力,但不一定都能学好“过程控制系统”这门课。如果学生能就有关知识点提出质疑,那说明开始掌握这些知识了。作为学生一定要学会挖掘知识的关联和应用,这才是真正学到了东西。

通读全书,受益颇深,心中暗暗惊讶——一本书已经容纳不下过程控制系统的知识内容了。

萧德云教授

2008年12月于清华大学

前 言

根据自动化专业的培养计划和教学要求,过程控制是继自动控制原理、控制理论基础、检测技术与装置、微机原理及应用之后开设的一门专业必修课。通过本课程的学习,学生可以从系统和工程的角度理解过程控制系统,重点掌握系统分析、设计、参数整定和实现方法,了解工业应用中必须注意的安全性、可靠性问题,从而提高控制系统设计与分析的能力。本书内容由浅入深,组织结构合理、条理清晰、实例丰富、与生产生活紧密结合,具有启发性,结构体系更符合现代教育理念和创新型人才培养需求。本书内容具有以下特点:

1) 从时代的要求出发,强调理论联系实际、工艺结合控制、基础知识融合新型技术。增加了近年来在过程控制领域应用日益广泛的计算机过程控制内容及相关新技术,如网络控制系统,使读者在掌握过程控制课程基本内容的同时,对其发展进程和趋势能有一个深入了解。引入了大量应用实例和研究成果,特别是作者在过程控制领域中的部分科研成果,使之更适合当前工程实际的发展需要。

2) 强调行业特色,优化教材内容结构。考虑到目前大部分高等工科院校都独立开设了“智能控制”和“计算机集成制造系统”课程,本书删除了有关智能控制和整厂控制的内容。针对煤炭、冶金、化工等行业对生产安全性要求高的特点,增补了防爆技术的有关内容。

3) 章节安排模块化,拓宽适用面。不同层次授课对象或读者可以根据自身需求,合理组合或跳过某些章节,不会对授课体系和阅读的连续性造成过大影响。全书遵循“建模-分析与综合-实现”的过程控制系统设计原则,由简单到复杂排列各个知识点。

本书是面向自动化、电气工程及自动化、工业工程等本科专业的一门必修专业课教材,适用于 56 学时,亦适用于 48 学时、32 学时。既可供从事过程控制工作的广大工程技术人员参考,也可作为相关专业师生的参考教材。

本书由中国矿业大学郭一楠副教授主编,完成了各章节主要内容的编写和全书统稿、定稿;常俊林副教授参与了第 6 章和第 7、8 章部分内容的编写;赵

峻老师参与了第4章和第3、10章部分内容的编写；平顶山工学院樊晓虹副教授参与了第10章部分内容的编写。本书的电子教案可在 www.cmpedu.com 上下载。全书由燕山大学关新平教授、东南大学费树岷教授审核。在本书编写过程中，得到了中国矿业大学教务处、信息与电气工程学院的关心和帮助，该书的顺利完成得益于江苏省精品教材建设项目和中国矿业大学课程建设项目的支持。在此一并向关心和支持本书出版的所有单位和个人表示最诚挚的感谢！

由于时间仓促和作者水平有限，错漏之处在所难免，请读者不吝指正。

作 者
于中国矿业大学

变 量 说 明

n	衰减比	R	电阻
ψ	衰减率	v	速度
m	衰减度	c_p	比热容
σ	超调量	ρ	密度
$e(\infty)$	余差	g	重力加速度
t_s	调节时间	l	调节阀阀芯位移
e	偏差	δ	比例带
y	被控量	δ_K	临界比例带
z	被控量测量值	δ_s	衰减比例带
q	控制量	K	比值系数
u	控制信号	K_c	比例增益
f	干扰量	K_I	积分增益
r	设定值	K_D	微分增益
x_q	零点	K_o	被控过程静态增益
B_x	量程	K_v	调节阀静态增益
δ_A	实际相对误差	K_m	检测传感单元静态增益
δ_x	示值相对误差	T_o	广义过程时间常数
δ_B	引用相对误差	τ_o	广义过程滞后时间常数
η	灵敏度	T_I	积分时间常数
h	液位	T_D	微分时间常数
T	温度	T_s	衰减振荡周期
q	流量	T_c	采样周期
q_v	体积瞬时流量	F	相互干扰系数
q_g	重量瞬时流量	ξ	阻尼比
q_m	质量瞬时流量	ω	角频率
I	电流	Δ	增量
U	电压	k	采样序号
E	电势	t	时间
p	压力	$G_c(s)$	控制器的传递函数
p_{atm}	环境大气压力	$G_v(s)$	执行器的传递函数
p_g	表压	$G_m(s)$	检测变送器的传递函数
p_v	真空度	$G_f(s)$	干扰通道的传递函数
C	电容	$G_o(s)$	控制通道的传递函数
L	电感		

目 录

出版说明

序

前言

第1章 绪论	1
1.1 典型过程控制问题	1
1.1.1 连续过程	1
1.1.2 间歇过程	2
1.2 过程控制性能要求	3
1.2.1 时域控制性能指标	3
1.2.2 积分控制性能指标	5
1.3 过程控制系统组成	6
1.4 过程控制系统发展概况	7
1.4.1 过程控制系统体系结构的发展	7
1.4.2 过程控制检测仪表和执行机构的发展	8
1.4.3 过程控制策略的发展	9
1.5 过程控制系统的分类	9
1.6 本章小结	11
1.7 习题	11
第2章 被控过程特性及其数学模型 ...	12
2.1 被控过程的特性	12
2.2 被控过程的数学模型	14
2.2.1 被控过程数学模型的类型	15
2.2.2 过程建模的基本方法	15
2.3 解析法建立过程的数学模型	16
2.3.1 解析法建模的一般步骤	16
2.3.2 单容过程的建模	17
2.3.3 多容过程的建模	21
2.4 实验辨识法建立过程的数学模型	24
2.4.1 实验辨识法建模的基本步骤与方法	24
2.4.2 响应曲线法辨识过程的模型	25
2.4.3 最小二乘法辨识过程的模型	33
2.5 本章小结	36
2.6 习题	36

第3章 过程参数检测与变送仪表	39
3.1 概述	39
3.2 检测仪表的工作特性	40
3.3 测量误差	41
3.3.1 测量误差的基本概念	41
3.3.2 检测仪表的性能指标	42
3.4 温度检测与变送	44
3.4.1 温度检测方法	45
3.4.2 热电偶	46
3.4.3 热电阻	50
3.4.4 温度变送器	53
3.4.5 温度检测仪表的选型	58
3.5 压力检测与变送	59
3.5.1 压力的概念及其检测	59
3.5.2 弹性式压力检测仪表	60
3.5.3 电气式压力检测仪表	61
3.5.4 压力变送器	62
3.5.5 压力检测仪表的选用	66
3.6 流量检测与变送	66
3.6.1 流量的概念及其检测	66
3.6.2 典型流量检测仪表	67
3.7 物位检测与变送	72
3.7.1 物位检测的基本方法	72
3.7.2 常用物位检测仪表	73
3.8 智能检测仪表	75
3.8.1 智能流量积算仪	76
3.8.2 智能温度变送器	78
3.9 煤矿常用检测仪表	80
3.10 本章小结	83
3.11 习题	83

第4章 执行器	85
4.1 执行器的工作原理与分类	85
4.2 电动执行机构	86
4.2.1 工作原理	86
4.2.2 伺服放大器	87
4.2.3 执行机构	87

4.3 气动执行机构	88
4.4 调节机构	89
4.4.1 调节阀的结构	89
4.4.2 调节阀特性	91
4.5 电-气转换器	96
4.6 阀门定位器	97
4.7 执行器的选择	97
4.8 本章小结	99
4.9 习题	99

第5章 仪表本安防爆技术 101

5.1 防爆基础理论	101
5.1.1 爆炸性物质分类	101
5.1.2 危险场所防爆技术	102
5.2 本质安全防爆技术	103
5.3 安全栅	104
5.3.1 安全栅的基本形式	104
5.3.2 输入式安全栅	105
5.3.3 输出式安全栅	108
5.4 本安防爆系统设计要求	108
5.4.1 本安防爆系统设计的一般要求	109
5.4.2 现场总线本安防爆技术	110
5.5 本章小结	111
5.6 习题	112

第6章 PID控制器设计及参数

整定	113
6.1 PID控制原理	113
6.1.1 比例(P)控制算法	113
6.1.2 比例积分(PI)控制算法	114
6.1.3 比例微分(PD)控制算法	117
6.1.4 PID控制算法	119
6.1.5 比例-积分-微分控制算法的 选择	120
6.2 PID控制参数的整定方法	121
6.2.1 PID参数整定的一般原则	121
6.2.2 临界比例度法	122
6.2.3 衰减曲线法	122
6.2.4 反应曲线法	123
6.2.5 三种常用工程整定方法的比较	126
6.2.6 PID参数的自整定	128
6.3 DDZ-Ⅲ型PID控制器	129
6.3.1 输入电路	131

6.3.2 比例微分电路	132
6.3.3 比例积分电路	133
6.3.4 输出电路	135
6.3.5 控制器的传递函数	136
6.3.6 手动操作电路及自动—手动 切换	137
6.3.7 指示电路	139
6.4 本章小结	140
6.5 习题	140

第7章 复杂过程控制系统 142

7.1 串级控制系统	142
7.1.1 串级控制的基本原理	142
7.1.2 串级控制系统的特点与分析	144
7.1.3 串级控制系统的设计	148
7.1.4 串级控制系统的参数整定	152
7.1.5 串级控制系统的应用范围	153
7.2 前馈控制系统	156
7.2.1 前馈控制的基本原理	156
7.2.2 前馈控制的特点及局限性	157
7.2.3 前馈控制系统的主要结构 形式	158
7.2.4 前馈控制系统的选用原则及 应用	161
7.3 大滞后过程控制系统	163
7.3.1 大滞后对控制品质的影响	163
7.3.2 史密斯预估补偿控制	164
7.3.3 改进型史密斯预估补偿控制	165
7.3.4 内模控制	166
7.4 比值控制系统	168
7.4.1 比值控制的常见类型	168
7.4.2 比值控制系统的设计	170
7.5 选择性控制系统	174
7.5.1 选择性控制的常见类型	175
7.5.2 选择性控制系统的设计	177
7.6 分程控制系统	178
7.6.1 分程控制系统的基本原理	178
7.6.2 分程控制系统的设计	179
7.6.3 分程控制系统的应用	180
7.7 本章小结	182
7.8 习题	182

第8章 先进过程控制系统 185

8.1 预测控制	185	9.5 本章小结	237
8.1.1 预测控制的基本原理	185	9.6 习题	238
8.1.2 预测模型	186		
8.1.3 参考轨迹	189	第 10 章 过程控制系统设计及应用	
8.1.4 控制算法	189	实例	239
8.2 自适应控制	191	10.1 过程控制系统设计概述	239
8.2.1 自适应控制的基本原理	191	10.1.1 过程控制系统设计的一般要求	239
8.2.2 自校正控制系统	192	10.1.2 过程控制系统设计的基本方法与开发步骤	240
8.2.3 模型参考自适应控制系统	193	10.1.3 控制方案的确定	242
8.3 统计过程控制	194	10.1.4 系统的工程设计	249
8.3.1 统计过程控制的基本原理	194	10.2 干燥过程的控制系统设计	252
8.3.2 质量控制图	194	10.2.1 干燥过程的工艺要求	252
8.3.3 其他统计过程控制技术	195	10.2.2 控制方案设计	252
8.4 控制系统故障诊断和容错控制	196	10.3 电厂燃煤锅炉控制	254
8.4.1 故障检测和诊断的基本概念	196	10.3.1 电厂生产过程及控制要求	254
8.4.2 故障检测和诊断的主要方法	197	10.3.2 锅炉锅筒水位控制	256
8.4.3 容错控制	199	10.3.3 锅炉燃烧过程控制	258
8.5 软测量和推理控制系统	200	10.3.4 过热蒸汽温度控制系统	262
8.5.1 软测量技术	200	10.3.5 机炉协调控制	263
8.5.2 推理控制系统	202	10.4 选煤过程控制	264
8.6 本章小结	204	10.4.1 选煤生产过程及控制要求	265
8.7 习题	204	10.4.2 跳汰机自动控制系统	266
		10.4.3 重介质选煤监测与控制系统	268
第 9 章 计算机过程控制系统	205	10.4.4 真空过滤机液位控制系统	271
9.1 计算机过程控制系统	205	10.5 本章小结	272
9.1.1 计算机过程控制系统结构	205	10.6 习题	272
9.1.2 数据采集及数据转换	208		
9.1.3 控制系统软件体系	211	附录	274
9.1.4 数字 PID 控制算法	213	附录 A 仪表分度表	274
9.2 集散控制系统	215	A.1 铂铑 ₁₀ -铂热电偶分度表	274
9.2.1 集散控制系统组成	215	A.2 镍铬-镍硅(镍铝)热电偶分度表	274
9.2.2 集散控制系统的递阶结构	217	A.3 铂铑 ₃₀ -铂铑 ₆ 热电偶分度表	275
9.2.3 集散控制系统的通信网络	220	A.4 工业铂热电阻分度表	276
9.2.4 集散控制系统的设计	221	A.5 工业铜热电阻分度表	276
9.3 现场总线控制技术	223	附录 B 常用监控软件介绍	277
9.3.1 现场总线简介	223	B.1 iFIX 组态软件	279
9.3.2 常见现场总线	225	B.2 InTouch 组态软件	280
9.3.3 现场总线控制系统	229	B.3 组态王软件	281
9.4 工业以太网控制系统	232	参考文献	283
9.4.1 工业以太网技术	233		
9.4.2 工业以太网与现场总线	234		
9.4.3 基于网络的控制系统	235		

第 1 章 绪 论

在工业生产过程中,为保证生产安全,达到优质高产,提高经济效益和劳动生产率,节约能源,改善劳动条件和保护环境,必须对生产过程的各种参数,例如温度、压力、流量、物位、粘度、湿度、酸碱度以及各种物料的成分等进行自动控制。因此,保持生产过程中各种参数处于期望的运行工况,安全经济运行,且满足环境和质量的要求,是过程控制系统的主要任务。目前,过程控制技术已广泛应用于石油、化工、冶金、机械、电力、轻工、纺织、建材以及航空航天等工业部门。

1.1 典型过程控制问题

过程控制 (Process Control) 是指工业生产过程中连续的或按一定周期程序运行的生产过程自动化。过程控制的基础是对生产过程的理解。所谓过程 (Process), 就是采用化学和物理方法将原料加工成产品的过程, 它涉及过程操作和设备运行两个方面。根据过程特性, 可以将其划分为连续、间歇两种形式。

1.1.1 连续过程

连续过程是指稳态条件下连续完成生产任务的生产过程。下面举例加以说明:

1) 贮液罐。在石油、化工、轻工和食品等工业生产过程中, 有许多储存原料、半成品的贮液罐。前一道工序的成品或半成品不断地流入下一道工序的贮液罐进行加工和处理, 为保证生产过程能连续地正常进行, 必须对贮液罐的液位 h 进行控制, 如图 1-1a 所示。液位高度可以通过调节液体输入量或液体输出量来加以控制。

2) 管式热交换器。热交换器中管道内的物料被管道外的蒸汽加热, 如图 1-1b 所示。物料出口温度 θ 可以通过操纵蒸汽量来加以控制。同时, 入口温度和物料流量的变化影响着热交换器的运行。

3) 热裂解炉。原油受热后被裂解为若干较轻的石油馏分。裂解过程所需热量由燃料和空气混合燃烧提供。炉温可以通过调整燃料与空气之比来加以控制。原油组分和燃料热值的波动都会影响炉温和裂解效果。

上述过程控制实例中, 过程变量可以划分为三类:

1) 被控量 (Controlled Variable), 即被控制的过程变量, 例如液位高度、物料出口温度等。被控量的期望值称为设定值。

2) 操作量 (Manipulated Variable), 即用来保持被控量等于或接近设定值的过程变量。例如液体输入流量、蒸汽量等。

3) 干扰量 (Disturbance Variable), 即能够影响被控量的过程变量。干扰量往往与过程操作环境的变化有关, 如环境温度、物料入口温度等。一些干扰量可以在线测量, 但大多数则无法测量, 如图 1-1c 中热裂解炉的原油组分。

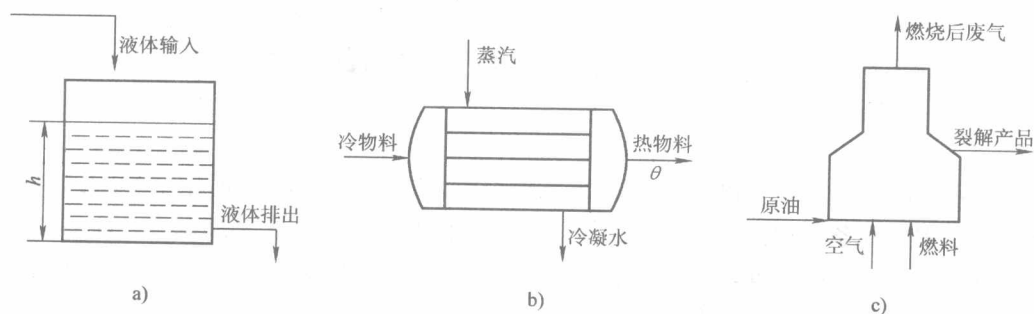


图 1-1 典型连续过程

a) 贮液罐 b) 管式热交换器 c) 热裂解炉

1.1.2 间歇过程

在间歇生产中存在一系列操作工序，无论发生在一个设备还是多个设备，都需要按照预定的顺序来执行，从而生产出指定数量的产品。每个批次的产品产量通常很小，大额产量往往要按照预定的生产计划重复操作工序完成。由于产品产量比连续生产过程产量小，所以间歇生产的设备往往能通过不同组合来生产多种产品，如图 1-2 所示。

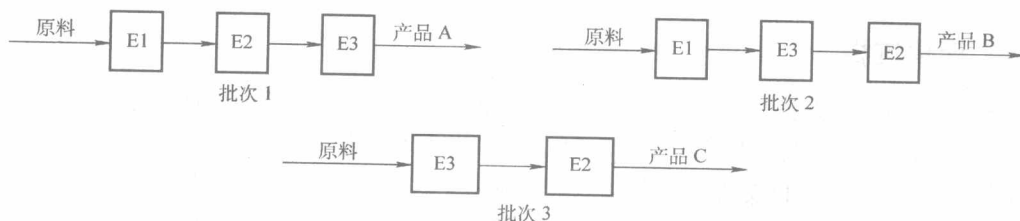


图 1-2 间歇过程 (E1-E3 为生产设备)

间歇过程在产品频繁改变且生产的数量很少时，能满足多产品生产所需的灵活性。其生产所需库存较小，生产不同产品的设备的调整时间较短。间歇过程的核心在于如何保证在合格生产多个产品的同时使设备利用率最大。目前，间歇过程已用于微电子、制药、特殊化学和发酵工业等工业领域。

连续生产过程与间歇生产过程相比较而言，存在的差别如表 1-1 所示。

表 1-1 连续过程与间歇过程之间的差别

类 型	间 歇 过 程	连 续 过 程
生产过程	按预定顺序进行	连续生产
设备的使用	能生产多种产品，任意组合	生产给定的一种产品
输出产品	批量	连续
工艺条件	可变化	稳态、一般不变化

综上所述，在工业生产过程中，由于生产规模大小、工艺要求不同，生产品种多种多样，因此，被控过程形式也多种多样。

1.2 过程控制性能要求

过程控制涉及工业生产的各个领域,不同的工艺过程控制有不同的性能要求。一般而言,过程控制系统要求:在设定值发生变化或受到外界扰动作用时,被控量应能平稳、迅速和准确地趋近或回复到设定值上。因此,稳定性、快速性、准确性是一个控制系统性能好坏的集中反映。

控制系统性能的首要指标是稳定性;快速性是指当控制系统受到干扰影响时,控制系统能尽快地做出响应,改变控制量,使被控量与设定值之间有偏差的时间尽可能短;准确性描述控制系统的被控量与设定值之间的偏差,即静态偏差应尽可能小。除上述性能指标外,控制系统的偏离度也是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量偏离设定值的离散程度。

一个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性能的要求不同,例如,液位控制系统一般要求保证液位不溢出或排空,而精馏塔温度控制系统的控制精度达到正负零点几度。不同类型的控制系统,其控制性能指标也不同,例如,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。

过程控制系统稳定性、快速性、准确性可以采用时域指标或积分指标加以描述。

1.2.1 时域控制性能指标

阶跃输入信号作用下,控制系统的输出响应曲线所表示的控制系统性能指标称为时域性能指标,主要包括衰减比、最大动态偏差与超调量、余差、振荡频率和调节时间、偏离度等。下面结合图 1-3,具体阐述各时域性能指标。

1. 衰减比 n

衰减比 (Subsidence Ratio) 是控制系统的稳定性指标,用它衡量一个振荡过程的衰减程度。它是相邻同方向两个波峰的幅值之比,即

$$n = \frac{y_1}{y_2} \quad (1-1)$$

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; $n < 1:1$ 表明控制系统输出发散,系统处于不稳定状态; $n > 1:1$ 表明控制系统输出衰减,系统处于稳定状态。衰减比越大,系统越稳定。

另一个衡量衰减程度的指标是衰减率 ψ ,它是指每经过一个周期后,波动幅度衰减的百分数,即

$$\psi = \frac{y_1 - y_2}{y_1} \times 100\% \quad (1-2)$$

为了保证系统有足够的稳定度,通常取 $\psi = 0.75 \sim 0.9$,建议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。

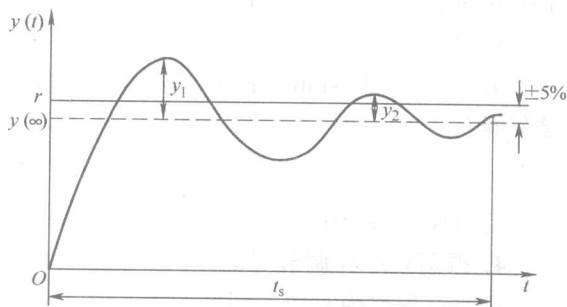


图 1-3 控制系统的时域控制性能指标

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 ξ 的关系为

$$n = e^{2\pi m}$$

$$m = \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \quad (1-3)$$

衰减比与衰减率、衰减度之间的对应关系，如表 1-2 所示。

表 1-2 控制系统的时域控制性能指标

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	0.5	0.1103	10:1	0.9	0.3665

2. 最大动态偏差与超调量

最大动态偏差 (Maximum Dynamic Error) 是指设定值阶段响应中，过渡过程开始后第一个波峰超过其新稳态值的幅度，即图 1-3 中的 y_1 。最大动态偏差占被控量稳态变化幅度的百分数为超调量 σ (Overshoot)，记作

$$\sigma = \frac{y_1}{y(\infty)} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 $y(\infty)$ ——被控量的最终稳态值。

对于二阶振荡过程，超调量与阻尼比、衰减比具有以下对应关系

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{n}} \times 100\% \quad (1-5)$$

超调量和最大动态偏差表征在过渡过程中被控量偏离设定值的超调程度，它反映了控制系统的稳定性。在某些生产工艺中限制最大偏差不允许超出某一数值。

3. 余差

余差 (Steady-state Error) 是指过渡过程结束后，被控量稳态值与设定值 r 之间的最终稳态偏差 $e(\infty)$ ，即

$$e(\infty) = r - y(\infty) \quad (1-6)$$

定值控制系统中， $r = 0$ ，因此 $e(\infty) = -y(\infty)$ 。余差衡量控制系统的稳态准确性。

4. 振荡频率和调节时间

过渡过程要绝对地达到新的稳态值，需要无限长的时间。因此，用被控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调节时间 t_s (Setting Time)。调节时间衡量控制系统的快速性。

过渡过程的振荡频率 ω 与振荡周期 T 的关系是

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (1-7)$$

在相同衰减比下，振荡频率越高，调节时间越短；在相同振荡频率下，衰减比越大，调节时间越短，快速性越好。因此，振荡频率也可作为衡量控制系统快速性的指标。

5. 偏离度

偏离度描述控制系统中被控量的统计特性，它通常遵循正态分布。若采用被控量的均值

a 作为设定值, 则偏离度 σ 采用其标准差进行度量, 如图 1-4 所示。

图 1-4 中, 均值为 0, 曲线 1 的标准差为 0.5, 曲线 2 的标准差为 1, 则曲线 1 的偏离度较小。根据正态分布曲线的特性, 在 $a \pm 2.85\sigma$ 范围内时, 被控量落在该范围的概率为 99%; 在 $a \pm 1.96\sigma$ 范围内时, 被控变量落在该范围的概率为 95%。

以造纸工业中的纸张定量控制为例说明偏离度。复印纸的定量为 70g, 如果偏离度小, 为使 95% 的产品满足定量控制要求, 设定值可设置为 $a \pm 1.96 \times 0.5 = 70.98\text{g}$; 如果偏离度大, 同样为使 95% 的产品合格, 则要将设定值设置在 $a \pm 1.96 \times 1 = 71.96\text{g}$ 。可见, 控制系统的偏离度越大, 纸浆原料的消耗越多。

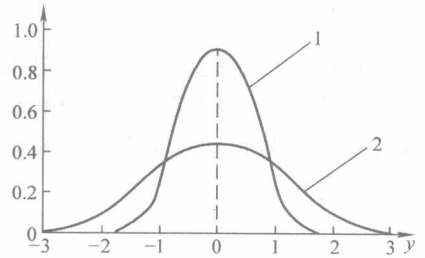


图 1-4 控制系统的偏离度

必须指出, 上述各项性能指标是相互联系又相互制约的, 例如, 要使系统具有较高稳态精度, 动态性能会有所降低, 甚至不稳定。同时满足系统中各项性能指标要求是很困难的, 因此, 应根据生产工艺的具体要求, 分清主次, 统筹兼顾, 保证优先满足主要的性能指标。

1.2.2 积分控制性能指标

除上述单项性能指标外, 常采用偏差的积分性能指标来衡量控制系统的性能, 它是系统的综合性能指标。积分性能指标常用于分析系统的动态响应性能, 主要包含以下几种:

1. 偏差平方积分 ISE (Integral of the Squared Error)

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (1-8)$$

该积分性能指标的缺点是系统响应会产生振荡。

2. 绝对偏差积分 IAE (Integral of the Absolute Value of Error)

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (1-9)$$

该积分性能指标的缺点是最小系统偏差的确定有困难。

3. 时间与绝对偏差乘积积分 $ITAE$ (Integral of the Time by Absolute Value of Error)

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (1-10)$$

它是常用的一种积分性能指标。通常, 该积分性能指标最小的系统具有较好的响应性能。但该积分性能指标的解析解不易获得。

不同积分性能指标对控制系统优良程度的侧重点不同。 ISE 侧重于抑制系统的较大偏差, 系统的衰减比可能较大; $ITAE$ 侧重于抑制过长的调节时间, 但系统的振荡可能较大。

总之, 一个过程控制系统正常运行的重要准则是负反馈准则和稳定运行准则。

(1) 负反馈准则: 控制系统成为负反馈的条件是该控制系统各开环增益之积为正。

(2) 稳定运行准则: 在干扰量作用下或设定值变化时, 控制系统静态稳定运行条件是控制系统各环节增益之积基本不变; 控制系统动态稳定运行条件是控制系统总开环传递函数的模基本不变。