



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育“十三五”规划教材

过程控制仪表及 控制系统

第3版

◎ 主编 廉迎战 林德杰



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

前 言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书自问世以来，深受广大读者和兄弟院校师生的厚爱，在综合考虑读者的意见和建议的基础上做了修订。本书立足高等教育人才培养，遵循主动适应社会发展需要、突出应用性和工程性、加强实践能力培养的原则，借鉴国外教育思路，融入工科院校的教学成果，从实际出发，精选内容，突出重点。

随着计算机技术、物联网技术、智能控制技术的发展，过程控制仪表和过程控制系统已经进入数字化、网络化、智能化的时代。本书在修订时力求重组教学内容，去掉陈旧的，提炼有用的，加强有效的，引入先进的，通过大量过程控制系统实例分析，举一反三，引导学生正确理解和掌握新理论、新知识、新技术和新方法，提高学生分析问题和解决问题的能力，理论联系实际，培养创新型人才。

本书以连续工业过程特性、参数检测变送、控制仪表显示、过程控制系统设计和分析为主线展开论述，涵盖了过程控制系统所使用的变送器、调节器、执行器、辅助仪表、单回路控制系统、模糊控制系统、集散控制系统和现场总线控制系统等内容，系统地阐述了过程控制系统的原理、结构、特点和应用，围绕中心内容，在不影响本书系统性的前提下，对第2版中部分理论性过强、教学推导烦琐、学生不易接受和生产实践中较少应用的内容进行了缩编和删改。

本书适用48学时（其中：理论教学40学时，实验教学8学时）的教学。删节部分内容后，并不影响本书的系统性和结构，可适用36学时（其中：理论教学32学时，实验教学4学时）的教学。书中标“*”的章节内容可根据各校情况选讲。

本书由广东工业大学自动化学院廉迎战和林德杰任主编，编写第1、4、5章；李学聪任副主编，编写第3章；朱燕飞编写第2章；钟映春编写第6、7章；杨玲玲编写第8、9章。北京航空航天大学刘维高级工程师、中南大学信息学院凌玉华副教授、长岭炼油厂赵振声高级工程师对本书的编写提出许多宝贵建议，并给予大力支持。

本书在编写过程中，参考了大量的文献和资料，在此对有关单位和作者表示诚挚的谢意！

由于编者水平有限，书中错漏在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言	
第1章 绪论	1
1.1 过程控制系统的应用与组成	1
1.1.1 典型过程控制的应用	1
1.1.2 过程控制系统组成	3
1.2 过程控制系统的分类	3
1.2.1 按系统的结构特点分类	3
1.2.2 按给定值信号的特点分类	4
1.3 过程控制系统的特点	4
1.4 过程控制系统质量指标	5
1.4.1 系统过渡过程指标	5
1.4.2 误差综合性能指标	6
1.5 过程控制系统的发展概况	7
1.5.1 仪表化与局部自动化阶段	7
1.5.2 综合自动化阶段	7
1.5.3 全盘自动化阶段	7
思考题与习题	8
第2章 被控过程的数学模型	9
2.1 概述	9
2.1.1 建立被控过程数学模型的目的	9
2.1.2 被控过程数学模型的概念	10
2.1.3 建立被控过程数学模型的方法	11
2.2 解析法建立过程的数学模型	11
2.2.1 单容过程的建模	11
2.2.2 多容过程的建模	14
2.3 响应曲线辨识过程的数学模型	17
2.3.1 阶跃响应曲线的测定	17
2.3.2 矩形脉冲响应曲线的测定	17
2.3.3 由阶跃响应曲线确定过程的数学模型	18
*2.4 相关函数法辨识过程的数学模型	27
思考题与习题	34
第3章 检测变送仪表	36
3.1 概述	36
3.1.1 基本概念	36
3.1.2 测量误差	37
3.1.3 仪表性能指标	38
3.1.4 检测仪表分类	39
3.1.5 检测仪表调校	41
3.2 压力检测与变送	42
3.2.1 基本概念	42
3.2.2 压力检测分类	42
3.2.3 压力检测原理	43
3.2.4 差压变送器	46
3.2.5 微型压力检测变送器	50
3.3 温度检测与变送	51
3.3.1 温度检测分类	51
3.3.2 温度检测原理	52
3.3.3 温度变送器	55
3.3.4 微型温度检测变送器	62
3.4 流量检测与变送	66
3.4.1 概述	66
3.4.2 差压式流量计	67
3.4.3 靶式流量计	70
3.4.4 浮子流量计	71
3.4.5 容积式流量计	73
3.4.6 涡轮流量计	73
3.4.7 涡街流量计	74
3.4.8 电磁流量计	75
3.5 液位变送器	76
3.5.1 浮力式液位变送器	76
3.5.2 静压力式液位变送器	78
3.5.3 液位检测仪表选用	79
3.6 成分分析仪表	80
3.6.1 成分分析仪表分类	80
3.6.2 红外气体分析仪	81
3.6.3 气相色谱分析仪	82

3.6.4 热磁式氧分析仪	83	*4.6 数字式调节器	129
3.6.5 氧化锆氧量分析仪	85	4.6.1 数字式调节器控制规律的 实现	129
*3.7 智能检测变送器	87	4.6.2 数字式调节器的硬件组成	132
3.7.1 数学式检测变送器	87	4.6.3 专家自整定调节器	133
3.7.2 电容式数字压力变送器	88	4.6.4 虚拟调节仪表	134
3.7.3 单总线智能温度变送器	90	*4.7 现代显示记录仪表	135
3.7.4 多通道智能温度变送器	92	4.7.1 全数字式显示记录仪表	135
3.7.5 ST3000 系列智能变送器	95	4.7.2 数字模拟混合显示记录仪表	136
3.7.6 3051 型智能压力变送器	96	4.7.3 虚拟显示记录仪表	137
3.7.7 EJA 型差压(压力)智能 变送器	97	思考题与习题	138
3.7.8 虚拟变送器	98	第5章 过程执行仪表	139
思考题与习题	100	5.1 概述	139
第4章 过程控制仪表	102	5.2 电动执行机构	140
4.1 概述	102	5.2.1 直行程电动执行机构	141
4.2 DDZ-III 型调节器	103	5.2.2 角行程电动执行机构	142
4.2.1 输入电路	105	5.3 气动执行机构	144
4.2.2 比例微分电路	106	5.3.1 气动执行机构结构	144
4.2.3 比例积分电路	107	5.3.2 气动薄膜调节阀	145
4.2.4 整机的比例积分微分电路 传递函数	110	5.4 电—气转换器和阀门定位器	155
4.2.5 输出电路	111	5.4.1 电—气转换器	155
4.2.6 手动操作电路和无平衡 无扰动切换	112	5.4.2 电—气阀门定位器	156
4.2.7 指示电路	114	5.5 电动执行机构和气动 执行机构选择	158
*4.3 改进型调节器	114	*5.6 安全栅	159
4.3.1 抗积分饱和调节器	115	5.6.1 安全火花防爆的一般概念	159
4.3.2 微分先行 PID 调节器	116	5.6.2 安全栅的类型	160
4.3.3 比例微分先行 PID 调节器	116	5.6.3 变压器隔离式安全栅	162
4.3.4 非线性 PID 调节器	117	思考题与习题	164
*4.4 DDZ-III 指示记录仪	118	第6章 单回路控制系统的设计	165
4.4.1 仪表的整机构成	119	6.1 概述	165
4.4.2 测量组件	119	6.1.1 一般要求	165
*4.5 自动平衡显示记录仪表	123	6.1.2 控制方案	165
4.5.1 电子电位差式自平衡显示 记录仪表	123	6.1.3 基本方法	166
4.5.2 电桥自动平衡显示记录仪表	126	6.1.4 设计步骤	166
4.5.3 自动平衡显示记录仪表 放大器	128	6.1.5 主要内容	167
		6.2 系统方案设计	167
		6.2.1 被控参数的选择	167
		6.2.2 控制参数的选择	168

6.2.3 测量变送器的选择	173	控制系统	220
6.2.4 执行器的选择	177	8.1 比值控制系统	220
6.2.5 调节器控制规律的选择	177	8.1.1 概述	220
6.2.6 调节器作用形式的选择	178	8.1.2 控制方案	220
6.3 调节器参数的整定	179	8.1.3 系统设计	223
6.3.1 工程整定法	179	8.1.4 系统实施	225
6.3.2 计算机仿真寻优整定法	182	8.1.5 系统整定	225
6.4 系统的投运	184	8.1.6 工业应用	226
6.5 系统设计举例	185	8.2 均匀控制系统	227
6.5.1 喷雾式干燥设备控制 系统设计	185	8.2.1 概述	227
6.5.2 贮槽液位控制系统设计	187	8.2.2 控制方案	227
思考题与习题	188	8.2.3 调节器选型	229
第7章 提高控制质量的控制系统	190	8.2.4 系统整定	229
7.1 串级控制系统的设计	190	8.2.5 工业应用	230
7.1.1 概述	190	*8.3 分程控制系统	231
7.1.2 系统结构	191	8.3.1 概述	231
7.1.3 系统特点	192	8.3.2 控制方案	233
7.1.4 系统设计	193	8.3.3 系统设计	233
7.1.5 系统整定	196	8.3.4 工业应用	234
7.1.6 工业应用	198	*8.4 选择控制系统	236
7.2 前馈控制系统	200	8.4.1 概述	236
7.2.1 概述	200	8.4.2 控制方案	237
7.2.2 系统结构	201	8.4.3 方案选择	239
7.2.3 系统特点	201	8.4.4 系统设计	241
7.2.4 控制方案	202	8.4.5 工业应用	242
7.2.5 系统规律	205	思考题与习题	243
7.2.6 选用原则	207	第9章 先进控制系统	244
7.2.7 前馈控制系统设计	207	9.1 概述	244
7.2.8 系统整定	209	*9.2 模糊控制系统	245
7.2.9 工业应用	211	9.2.1 概述	245
7.3 大时延控制系统	212	9.2.2 系统结构	245
7.3.1 概述	212	9.2.3 控制器设计	246
7.3.2 常规控制系统	212	9.2.4 控制方案	253
7.3.3 预估控制系统	214	9.2.5 工业应用	256
7.3.4 采样控制系统	217	9.3 集散控制系统	258
7.3.5 工业应用	217	9.3.1 概述	258
思考题与习题	218	9.3.2 系统架构	259
第8章 满足特定要求的过程		9.3.3 系统硬件结构	260
		9.3.4 软件及组态	264

9.3.5 通信网络	267	9.4.3 控制方案	277
*9.3.6 工程设计与实施	270	9.4.4 系统特点	278
9.3.7 工业应用	271	9.4.5 工业应用	280
*9.4 现场总线控制系统	274	思考题与习题	283
9.4.1 概述	274	参考文献	284
9.4.2 系统结构	274		

第 1 章 绪 论

过程控制通常是指化工、石油、电力、轻工、纺织和生物等工业部门生产过程的自动化。过程控制系统是工业生产过程被控制参数为温度、压力、流量、液位、成分、黏度和酸碱度等这样一些实时自动控制系统。本章重点介绍过程控制系统的组成、分类、特点、指标和发展概况等内容。

1.1 过程控制系统的应用与组成

现代工业生产过程通常是指将原材料转变成产品或半成品，并具有一定生产规模的过程。按照产品类型和生产工艺组织方式，企业的行业类型可分为：流程制造行业和离散制造行业。

流程制造行业的工艺过程是连续进行不能中断的，工艺过程的加工顺序是固定不变的，生产设施按照工艺流程布置，物料按照固定的工艺流程连续不断地通过一系列设备和装置被加工处理成为成品。流程制造行业主要包括：石油化工、电力能源、橡胶塑料、玻璃陶瓷和生物制药等行业。流程制造行业过程参数包括：温度、压力、流量、液位、比例、成分、湿度和 pH 值等。

离散制造行业的工艺过程，各零件的加工过程各自独立，所以整个产品的生产工艺是离散的，制成的零件通过部件装配和总装配最终成为成品。离散制造行业主要包括：机械制造、电子电器、航空制造、冶金加工和汽车制造等行业。离散制造行业过程参数包括：速度、位移、角度和加速度等。

过程控制系统主要是针对流程制造行业的过程变量自动控制系统。

1.1.1 典型过程控制的应用

在流程制造行业的生产过程中，为保证生产安全顺利进行，实现优质高产，提高经济效益和劳动生产率，节约能源，改善劳动条件，保护环境，必须对生产过程中的各种参数，例如温度、压力、流量、液位、黏度、湿度、酸碱度（pH 值）以及各种物料的成分等进行自动控制。下面以几个典型的工业实际控制系统为例，说明过程控制系统的组成。

1. 锅炉过热蒸汽温度控制系统

锅炉是电力、化工、冶金、石油和轻工等工业部门常用的动力设备。例如在火力发电厂中，过热蒸汽温度控制是保证汽轮机组正常运行的一个重要条件，过热蒸汽温度控制系统原理图见图 1-1。

发电厂从锅炉汽鼓中出来的饱和蒸汽经过过热器继续加热成为过热蒸汽，过热蒸汽的温度能达到 460℃ 左右。过热蒸汽温度过高或过低，都会直接影响汽轮机的寿命，影响生产过程的顺利进行，严重时，会造成事故，损坏生产设备。

因此过热蒸汽温度是生产过程中的一个重要工业参数，必须对其进行控制。通常在过热蒸汽之前或中间部分串接一个减温器，通过控制减温水流量的大小来改变过热蒸汽的温度，

过热蒸汽温度控制系统见图 1-1。系统中采用温度检测元件 1 测量过热蒸汽的温度，经过温度变送器 2 将测量信号送至温度调节器 3 的输入端，并与过热蒸汽温度的给定值进行比较，得到其偏差，调节器按此偏差进行运算后输出控制信号，以控制调节阀 4 的开度，从而控制减温器的流量，达到控制过热蒸汽温度的目的。图 1-1 中过热蒸汽温度为被控参数 $y(t)$ ；冷水的流量为控制参数 $q(t)$ ；过热蒸汽生产过程为被控过程。

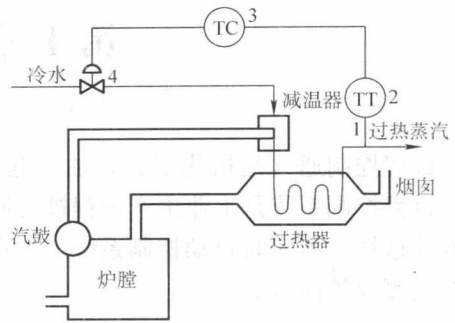


图 1-1 过热蒸汽温度控制系统原理图

- 1—温度检测元件 2—温度变送器
- 3—温度调节器 4—调节阀

2. pH 控制系统

在石油、化工、印染和造纸等生产过程中会产生大量的污水，若不经处理直接排放到江河湖泊，必将造成严重的环境污染，破坏生态平衡，影响人们的生产和生活，危及人身健康。

例如在造纸和印染生产过程中，排放出大量的碱性污水，根据国家有关规定，必须对污水进行处理，使其酸碱度 $\text{pH} = 7$ ，才能排入江河湖泊，为此设计了如图 1-2 所示的 pH 值过程控制系统。系统采用 pH 变送器 2 测量污水的酸碱度，然后与 pH 调节器 3 中的给定值进行比较得到偏差，调节器按此偏差进行运算后发出控制命令，以改变调节阀 4 的开度，从而改变酸碱液量的 pH 值，达到对碱性污水中和的目的。图 1-2 中，pH 值为被控参数 $y(t)$ ；进入储液罐的酸液流量为控制参数 $q(t)$ ；储液罐内液体的 pH 值为被控过程。

3. 液位控制系统

在工业生产过程中，有许多储液罐储存原料、半成品或成品。前一道工序的成品或半成品不断地流入下一道工序的储液罐进行加工和处理，为保证生产过程能连续地正常进行，必须对储液罐的液位进行控制。

在图 1-3 中的液位控制系统，其测量值与给定值进行比较得到偏差，调节器按此偏差发出控制命令，控制调节阀开度，达到使储液罐液位控制在给定值的目的。

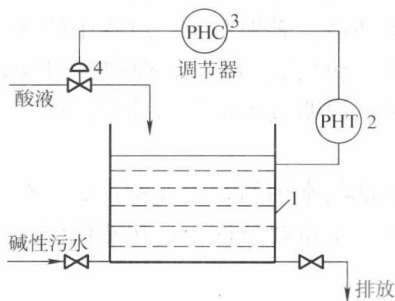


图 1-2 pH 值过程控制系统

- 1—储液罐 2—pH 变送器
- 3—pH 调节器 4—调节阀

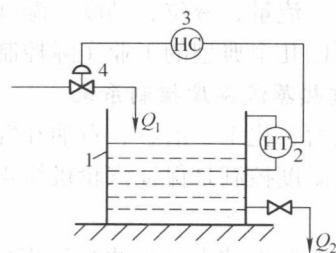


图 1-3 液位控制系统

- 1—储液罐 2—差压变送器
- 3—液位调节器 4—调节阀

图中，若由于扰动作用使液位变化，经差压变送器 2、液位调节器 3 后，控制调节阀 4

的开度做相应的变化,从而流入储液罐的流量 Q_1 做相应的变化,使储液罐的液位控制保持在给定值。图中储液罐的液位为被控参数 $y(t)$; 流入储液罐的液体流量为控制参数 $q(t)$; 储液罐为被控过程。

1.1.2 过程控制系统组成

从上述过热蒸汽的温度控制、污水废液的酸碱度中和处理和储液罐的液位控制三个工业过程控制系统实例可见,过程控制系统由测量元件、变送器、调节器、调节阀和被控过程等环节构成,若将测量元件、变送器、调节器、调节阀统称为过程检测控制仪表,则一个简单的过程控制系统由被控过程和过程检测控制仪表两部分组成。过程控制系统组成的框图见图 1-4。

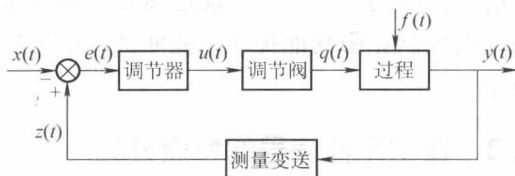


图 1-4 过程控制系统组成框图

图中, $y(t)$ 为被控参数,例如过热蒸汽的温度、pH 值、液位等;测量变送单元将被控参数检测出来并变换成便于远传的统一信号 $z(t)$; $z(t)$ 与给定的信号 $x(t)$ 比较得偏差 $e(t) = z(t) - x(t)$; $e(t)$ 经调节器运算后输出控制作用 $u(t)$; $u(t)$ 控制调节阀的开度,改变流体的流量 $q(t)$,从而使被控参数 $y(t)$ 回到给定值 $x(t)$ 附近, $q(t)$ 称为控制参数;从被控参数检测点至调节阀之间的管道或设备,称为被控过程,可简称过程;作用于过程且使被控参数 $y(t)$ 变化的作用称为扰动。控制参数 $q(t)$ 的作用是使被控参数稳定在给定值附近,称为内部扰动;扰动作用 $f(t)$ 企图使被控参数 $y(t)$ 偏离给定值 $x(t)$,称为外部扰动。控制系统中控制作用就是要克服外部扰动 $f(t)$ 对被控参数 $y(t)$ 的影响,保证其尽快回到给定值。

必须指出:

- 1) 两个框之间的一条带箭头的连线表示其相互关系和信号的传递方向,并不表示两框之间的物料联系。
- 2) 各框之间信号作用是单向的,即各框的输入信号会影响其输出信号,而输出信号不会反过来影响输入信号。
- 3) 调节阀控制的介质流量可以是流入过程,也可以是从过程流出来。若被控物料是流入过程的,则正好与箭头方向一致;若被控物料从过程流出来,则与箭头的方向相反。

1.2 过程控制系统的分类

过程控制系统的分类方法很多,常用下列分类方法:

1.2.1 按系统的结构特点分类

1. 反馈控制系统

反馈控制系统是根据被控参数与给定值的偏差进行控制的,最终达到消除或减小偏差的目的,偏差值是控制的依据。它是最常用、最基本的一种过程控制系统。由于该系统由被控量的反馈量构成一个闭合回路,故又称为闭环控制系统。反馈信号也可能有多个,构成一个

以上的闭合回路，称为多回路反馈控制系统。

2. 前馈控制系统

前馈控制系统是根据扰动量的大小进行控制的，扰动是控制的依据。由于没有被控量的反馈，所以是一种开环控制系统。由于它是开环控制系统，无法检查其控制效果，故不能单独应用。

3. 前馈-反馈控制系统

前馈控制的主要优点是能迅速及时地克服主要扰动对被控量的影响，而前馈-反馈控制利用反馈控制克服其他扰动，能使被控量迅速而准确地稳定在给定值上，提高控制系统的控制质量。

1.2.2 按给定值信号的特点分类

1. 定值控制系统

由于工业生产过程中大多数工艺要求系统的被控量能稳定在某一给定值上，因此，定值控制系统是应用最多的一种控制系统。若由于扰动作用出现偏差，系统便产生控制作用克服扰动对被控量的影响，使被控量稳定在给定值。

2. 随动控制系统

随动控制系统是被控量的给定值随时间任意变化的控制系统。例如，锅炉燃烧过程控制系统中，为保证达到完全燃烧，必须保证空气量随燃料的变化而成比例变化。由于燃料量是随负荷变化的，因此控制系统就要根据燃料量的变化，自动控制空气量的大小，以求达到最佳燃烧状态。

3. 程序控制系统

程序控制系统被控量的给定值是按预定的时间程序而变化的。例如，退火炉温度控制系统的给定值是按升温、保温与逐次降温等程序自动变化的，因此，控制系统按此预先设定的程序进行控制。

1.3 过程控制系统的特点

与其他自动控制系统相比，过程控制系统具有如下特点：

1. 系统由过程检测控制仪表组成

如前所述，一个过程控制系统是由被控过程和过程检测控制仪表两部分组成的。设计过程控制系统时，必须根据过程的特性和工艺要求，选用过程检测控制仪表组成控制系统，然后通过整定调节器的PID参数，使系统运行于最佳状态，实现对生产过程的最佳控制。

2. 被控过程的多样性

在现代生产过程中，由于生产规模不同，工艺要求各异，产品品种多样，因此被控过程的形式是多种多样的。有些生产过程具有大惯性、大延时(大滞后)的动态特性和严重的非线性的特点；有些生产过程的工作机理复杂(如发酵、生化过程等)，至今尚未被人们所认识，因此很难用目前的解析方法或过程辨识方法求得其精确的动态数学模型，要设计出能适应各种过程的最佳控制系统是比较困难的。

3. 控制方案的多样性

随着现代工业生产的迅速发展,生产工艺条件变得越来越复杂,对过程控制系统的要求也越来越高。由于被控过程的多样性,且多数属于多变量、分布参数、非线性、大惯性和大时延。为了满足生产要求,过程控制中的控制方案十分丰富,常用的有单变量控制系统、多变量控制系统、常规仪表控制系统、计算机集散控制系统和现场总线控制系统等。

4. 被控制过程多属慢过程,且多属于参量控制

如前所述,被控过程多属大惯性、大时延的过程,因此决定了控制过程是一个缓慢的过程。另外,在石油、化工、冶金、电力、轻工、建材和制药等生产过程中,常用温度、压力、流量、液位(物位)、成分和pH值等参量来表征其生产过程是否正常,必须对这些参量进行自动检测和自动控制,因此过程控制多半属参量控制。

5. 定值控制是过程控制的一种主要形式

目前,在生产过程中,多数生产工艺要求被控参数保持恒定或在很小范围内变化。因此,过程控制的主要目的是如何减小或消除外界扰动对被控参数的影响,使其稳定在给定值上,以达到优质高产、低消耗的目的。

1.4 过程控制系统质量指标

在给定值发生变化或受到外界扰动作用时,一个性能良好的过程控制系统被控量应能平稳、迅速和准确地趋近或回复到给定值上。在衡量和比较不同控制方案时,必须定出评价控制性能好坏的质量指标。常用的评价过程控制系统控制性能优劣的质量指标有以下两种:

1.4.1 系统过渡过程指标

通常以阶跃信号作用下控制系统输出的过渡过程曲线来描述系统的各项指标,见图1-5。图1-5a为扰动值阶跃作用下的响应曲线;图1-5b为给定值阶跃作用下的响应曲线。

1. 余差(静态偏差) e

余差是指系统过渡过程结束后,被控参数新的稳定值 $y(\infty)$ 与给定值 c 之差,其值可正可负。它是一个静态质量指标,对定值控制系统,给定值是生产的技术指标,希望余差越小越好。

2. 衰减比和衰减率

衰减比是衡量过渡过程稳定性的一个动态质量指标,它等于振荡过程的第一个波的振幅与第二个波的振幅之比,即

$$n = \frac{B}{B'}$$

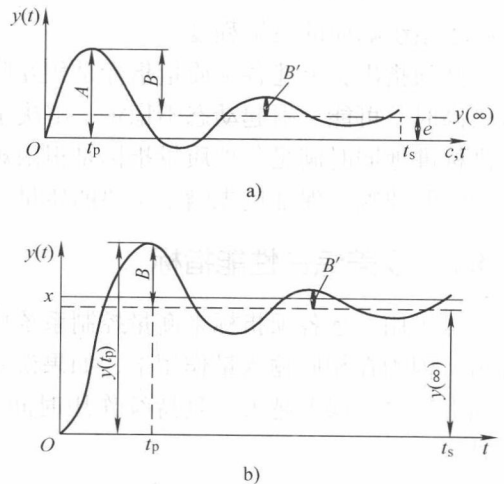


图1-5 阶跃作用下控制系统过渡过程响应曲线
a) 定值控制系统 b) 随动控制系统

$n < 1$, 系统是不稳定的, 是发散振荡; $n = 1$, 系统也是不稳定的, 是等幅振荡; $n > 1$, 系统是稳定的, 若 $n = 4$, 系统为 4:1 的衰减振荡, 是比较理想的。

衡量系统的稳定性也可用衰减率来表示, 衰减率 φ 为

$$\varphi = \frac{B - B'}{B}$$

为了保证系统有足够的稳定度, 通常 φ 取值为 0.75 ~ 0.9。

3. 最大偏差和超调量

对于定值控制系统, 最大偏差是指被控参数第一个波峰值与给定值 c 之差, 它用来衡量被控参数偏离给定值的程度。由图 1-5a 可见, 最大偏差 $A = B + e$ 。

随动控制系统常用超调量来衡量被控参数偏离给定值的程度。超调量 σ 可定义为

$$\sigma = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\%$$

最大偏差 A 或超调量 σ 是衡量控制系统的重要动态质量指标。有些生产工艺规定了最大偏差的限制条件, 不允许超出某一数值。

4. 过渡过程时间 t_s

从扰动开始到被控参数进入新的稳态值的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 范围内所需的时间, 称为过渡过程时间 t_s 。它是反映系统过渡过程快慢的质量指标, t_s 越小, 过渡过程进行得越快。

5. 峰值时间 t_p

从扰动开始到过渡过程曲线到达第一个峰值所需的时间, 称为峰值时间 t_p 。 t_p 值的大小反映了系统响应的灵敏程度。

必须指出, 上述各项质量指标是相互联系又相互制约的, 例如, 一个系统的稳态精度要求很高时, 可能会引起动态不稳定; 解决了稳定问题后, 又可能因反应迟钝而失去快速性。要高标准地同时满足各项质量指标是很困难的, 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质量指标。

1.4.2 误差综合性能指标

除了用上述各项指标来衡量控制系统质量外, 也常用误差积分指标判断系统控制质量的优劣。因为在相同输入量作用下, 如果误差越小, 且持续作用时间越短, 则系统的控制质量越高; 反之, 误差越大, 且持续作用时间越长, 则质量越差。常用的误差性能指标有下列几种:

$$\text{误差平方积分(ISE)} = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \rightarrow \min$$

$$\text{时间乘误差平方积分(ITSE)} = \int_0^{\infty} te^2(t) dt \rightarrow \min$$

$$\text{误差绝对值积分(IAE)} = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \rightarrow \min$$

$$\text{时间乘误差绝对值积分(ITAE)} = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt \rightarrow \min$$

上述各式中, $e(t)$ 为偏差, $e(t) = z(t) - x(t)$, 见图 1-4。在实际工作中具体选用何种性能指标, 必须根据系统的性能和生产工艺要求进行综合考虑后确定。

例如：ISE 着重于抑制过渡过程的大误差；ITAE 着重于惩罚过渡过程拖得的太长。另外，误差积分指标有一个缺点，不能够保证系统具有合适的衰减率，而衰减率是控制系统非常重要的指标。因此通常的做法是首先确定衰减率，然后再选择利用误差积分为最小判定系统的优劣。

1.5 过程控制系统的发展概况

随着工业生产自动控制技术的发展，过程控制技术在现代工业生产领域的应用范围和应用层次越来越深入，过程控制系统和控制技术经历了一个由简单到复杂、从低级到高级并日趋完善的过程。纵观过程控制的发展历程，大致经历了下述几个阶段。

1.5.1 仪表化与局部自动化阶段

20 世纪五六十年代，一些工厂企业实现了仪表化与局部自动化，这是过程控制发展的第一个阶段。这个阶段的主要特点是：检测和控制仪表主要采用基地式仪表和部分单元组合仪表(多数是气动仪表)，组成单输入—单输出的单回路定值控制系统，对生产过程的热工参数，如温度、压力、流量和液位进行自动控制。控制目的是保持这些参数的稳定。过程控制系统的设计、分析的理论基础是以频率法和根轨迹法为主体的经典控制理论。

1.5.2 综合自动化阶段

20 世纪六七十年代，由于工业生产的不断发展，对过程控制提出了新的要求。电子技术的发展也为生产过程自动化的发展提供了完善的条件，过程控制的发展进入第二个阶段。在这个阶段，出现了一个车间乃至一个工厂的综合自动化。其主要特点是：大量采用单元组合仪表(包括气动和电动)和组装式仪表。同时，电子计算机开始应用于过程控制领域，实现直接数字控制(DDC)和设定值控制(SPC)。在系统结构方面，为提高控制质量与实现一些特殊的控制要求，相继出现了各种复杂控制系统，例如，串级、比值、均匀和前馈—反馈控制等。在过程控制理论方面，除了采用经典控制理论外，开始应用现代控制理论以解决实际生产过程中遇到的更为复杂的问题。

1.5.3 全盘自动化阶段

20 世纪 70 年代以来，过程控制技术进入飞速发展阶段，计算机控制技术在工业生产中得到广泛应用，可以对整个工艺流程、全工厂乃至整个企业集团公司进行集中控制和经营管理应用计算机系统对多参数进行综合控制，是这一阶段的主要特点，这是过程控制发展的第三个阶段。其主要特点是：在检测与变送方面，大量采用以微处理器为核心的智能化控制检测仪表；在系统结构方面，由集中向分散转变，相继出现了集散控制系统、现场总线控制系统等，它们在很大程度上满足了复杂过程工业的一些特殊控制要求；在过程控制理论方面，以现代控制理论和人工智能为基础，针对工业过程本身的非线性、时变性、耦合性、不确定性等特性，提出许多行之有效的解决方法，如：模糊控制、推理控制、预测控制等，常被称为先进过程控制，以解决实际生产过程中遇到的更为复杂的控制问题。

20 世纪 80 年代，分布式控制系统(DCS)集计算机技术、控制技术、通信技术和故障诊

断技术和图形显示技术为一体,使工业自动化进入控制管理一体化的新模式。DCS 控制系统以智能控制理论为基础,以计算机及网络为主要手段,对企业的经营、计划、调度、管理和控制全面综合,实现从原料进库到产品出厂的自动化、整个生产系统信息管理的最优化,并依托人工智能、控制理论和运筹学相结合的智能控制技术向工厂全面自动化的方向发展。

20 世纪 90 年代,又出现了现场总线控制系统(Fieldbus Control System, FCS),它是继计算机技术、网络技术和通信技术得到迅猛发展后,与自动控制技术和系统进一步结合的产物。它的出现使控制系统中的各类仪表单元进入了网络时代,从而改变了传统控制系统的基本结构和连接方式。现场总线控制系统是一种全分散、全数字化、智能化、双向、互联、多变量、多点和多站的通信和控制系统。它的出现给过程控制系统带来了一次全新的革命性的变化,是过程控制系统的发展方向。

思考题与习题

1-1 简述过程控制的发展概况。

1-2 图 1-6 为温度控制系统,试画出该系统的框图。简述其工作原理;指出被控过程、被控参数和控制参数。

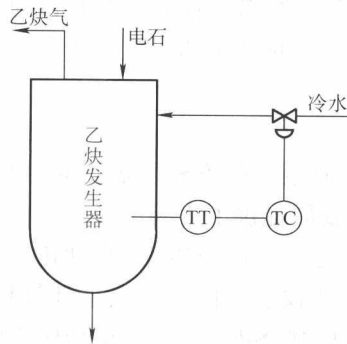


图 1-6 温度控制系统

1-3 常用过程控制系统可分为哪几类?

1-4 过程控制系统过渡过程的质量指标包括哪些主要内容?它们的定义是什么?哪些是静态质量指标?哪些是动态质量指标?

第 2 章 被控过程的数学模型

在过程控制系统的分析和设计中，过程的数学模型是极其重要的基础资源，建立被控过程的数学模型对于实现生产过程自动化有着十分重要的意义，因此，系统控制品质的优劣，主要取决于对生产工艺过程的了解和建立被控过程的数学模型。

2.1 概述

2.1.1 建立被控过程数学模型的目的

要对现代日益复杂、庞大的被控过程进行操作、自动控制、最优设计等方面的研究和开发，首先要求建立其数学模型，归纳起来，建立被控过程数学模型的目的主要有以下几点：

1. 设计过程控制系统和整定调节器的参数

在设计过程控制系统时，选择控制通道，确定控制方案，分析质量指标，探讨最佳工况以及调节器参数的最佳整定值等，均以被控过程的数学模型为重要依据。尤其是实现生产过程的最优控制，若没有充分掌握被控过程的数学模型，就无法实现最优设计。

2. 指导生产工艺及其设备的设计

通过对生产工艺及其设备数学模型的分析 and 仿真，可以确定有关因素对整个被控过程特性的影响，从而指导生产工艺及其设备的设计。

3. 对被控过程进行仿真研究

通过对被控过程数学模型进行仿真研究，在计算机上进行分析、计算，可获取代表或逼近真实过程的大量数据，为过程控制系统的设计和调试提供大量所需信息，从而降低设计成本和加快设计进度。

被控过程数学模型的部分应用与要求见表 2-1。

表 2-1 被控过程数学模型的部分应用与要求

应用目的	过程模型类型	精确度要求
调节器参数整定	线性、非线性、时间连续	较低
前馈、解耦、预估系统设计	线性、参量或非参量、时间连续	中等
系统 CAD	线性、参量或非参量、时间离散	中等
自适应控制	线性、参量、时间离散	中等
最优控制	线性、参量、时间连续或离散	高

对建立被控过程数学模型的具体要求，因其用途不同而异，但总的来说，一是应该尽量简单，二是应该准确可靠。

2.1.2 被控过程数学模型的概念

1. 被控过程模型描述形式

在过程控制系统中,被控过程是指正在运行中的各种工艺生产设备,被控过程的数学模型是指被控过程在各输入量(包括控制量和扰动量)作用下,其相应的输出量(被控量)变化函数关系的数学表达式。

过程的数学模型有两种描述形式:一是用曲线或数据表格表示,称为非参量形式;二是用数学方程表示,称为参量形式。参量形式表示的数学模型常用微分方程、传递函数、差分方程、脉冲响应函数、状态方程和观察方程等形式来描述。

图2-1为过程控制系统框图。被控过程 $W_0(s)$ 是由多个输入量 $q(t)$, $f_1(t)$, $f_2(t)$, \dots , $f_n(t)$ 和单个输出量 $y(t)$ 组成的物理系统。

各个输入量引起被控量变化的动态特性是不同的,通常选择一个可控性良好的输入量作为控制量,即调节阀的输出 $q(t)$ 为控制量,控制量 $q(t)$ 也称为内部扰动或基本扰动,由于其作用于闭合回路内,对系统的质量指标起决定性作用。其余输入量称为外部扰动,对系统性能也有很大影响,因此也必须有所了解。

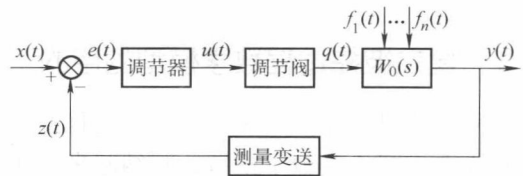


图 2-1 过程控制系统框图

被控过程的输入量与输出量之间的信号联系称为通道。控制量与被控量之间的信号联系称为控制通道。外部扰动与被控量之间的信号联系称为扰动通道。

2. 被控过程模型一般表达式

由实验辨识法建立的过程数学模型的结构比较简单。以单输入—单输出过程的模型为例,常用如下两种形式:

1) 线性时间连续型(可用微分方程或传递函数表示)

$$\begin{aligned} a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1 y'(t) + y(t) \\ = b_m u^{(m)}(t - \tau) + b_{m-1} u^{(m-1)}(t - \tau) + \dots + b_1 u'(t - \tau) + b_0 u(t - \tau) \end{aligned}$$

或

$$W_0(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0 + b_1 s + \dots + b_{m-1} s^{m-1} + b_m s^m}{1 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_{n-1} s^{n-1} + a_n s^n} e^{-\tau s}$$

式中, $Y(s)$ 为输出量; $U(s)$ 为输入变量; τ 为时延时间。

2) 线性时间离散型(可用差分方程或脉冲传递函数表示)

$$\begin{aligned} a_n y(k-n) + a_{n-1} y(k-n-1) + \dots + a_1 y(k-1) + y(k) \\ = b_m u(k-m-d) + \dots + b_1 u(k-1-d) + b_0 u(k-d) \end{aligned}$$

即

$$y(k) = \frac{b_0 + b_1 q^{-1} + \dots + b_{m-1} q^{-m+1} + b_m q^{-m}}{1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{n-1} q^{-n+1} + a_n q^{-n}} q^{-d} u(k)$$

式中, d 为时延时间(采样周期的整数倍); q^{-1} 为后向差分算符,与 Z 变换中 Z^{-1} 相当; k 为采样次数。

上式中等式两边的项数越多, n 和 m 越大。对大多数工业过程,一般 n 和 m 取 $1 \sim 3$ 。

此外,用差分方程描述数学模型时,采样周期一般取过渡过程时间的 $1/10 \sim 1/20$ 。

模型的阶次由 n 值大小确定, n 值越大,模型的阶次越高。例如, $n=1$,称该模型为一阶过程模型; $n=2$,称该模型为二阶过程模型。

2.1.3 建立被控过程数学模型的方法

建立过程数学模型的方法,通常采用:

(1) 解析法 解析法又称为机理演绎法。它根据过程的内在机理,运用已知的静态和动态物料(或能量)平衡关系,用数学推理的方法建立过程的数学模型。

静态物料(或能量)平衡关系:单位时间内进入被控过程的物料(或能量)等于单位时间内从被控过程流出的物料(或能量)。

动态物料(或能量)平衡关系:单位时间内进入被控过程的物料(或能量)减去单位时间内从被控过程流出的物料(或能量)等于被控过程内物料(或能量)储存量的变化率。

(2) 实验辨识法 实验辨识法又称为系统辨识与参数估计法。该法是根据过程输入、输出的实验测试数据,通过过程辨识和参数估计建立过程的数学模型。

(3) 混合法 即用上述两种方法的结合建立过程的数学模型。首先通过机理分析确定过程模型的结构形式,然后利用实验测试数据来确定模型中各参数的大小。

2.2 解析法建立过程的数学模型

根据过程的内在机理,通过静态与动态物料(或能量)平衡关系,用数学推导法建立过程的数学模型,称为解析法建模。

解析法建立被控过程数学模型,主要针对一阶无时延过程、二阶无时延过程、一阶有时延过程、二阶有时延过程等简单的模型,计算的参数主要在 $5 \sim 6$ 个以内。

2.2.1 单容过程的建模

单容过程是指只有一个储蓄容量的过程。单容过程又可分为有自衡单容过程和无自衡单容过程。

对大多数被控过程,其阶跃响应的特点是被控量的变化是单调无振荡、有时延和惯性的,见图2-2。

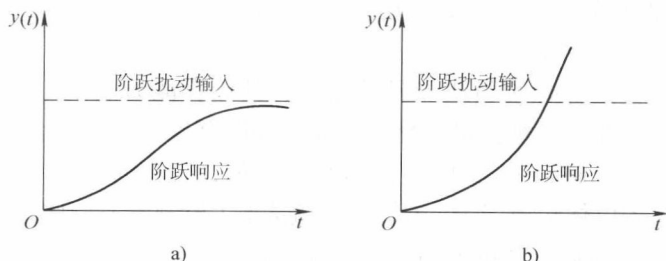


图2-2 被控过程的阶跃响应曲线

a) 自衡过程的阶跃响应 b) 无自衡过程的阶跃响应