



普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

过程控制与 自动化仪表

◎ 刘波峰 主编

GUOCHENG KONGZHI YU
ZIDONGHUA YIBIAO



免费电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

过程控制与自动化仪表

主 编 刘波峰
副主编 杨唐胜 唐 璐
参 编 范小春 高飞燕 李 亚



机械工业出版社

前 言

自 20 世纪 90 年代以来,过程控制技术与自动化仪表发展十分迅速,特别是在其他相关技术(如计算机技术、网络技术、先进控制方法、智能仪表)的推动下,过程控制的检测、执行仪表及过程控制系统正日益朝智能化方向发展。过程控制与自动化仪表方面的教材也需紧跟理论与技术发展的潮流,与时俱进。

本书是根据“过程控制与自动化仪表”课程基本要求所确定的编写大纲编写的,适合电气工程、自动化、测控技术与仪器、化学工程与工艺、能源与动力等专业学生,也可供在电力系统、石油化工、能源动力、钢铁生产等领域专业人员学习参考。

本书是根据作者多年的教学经验与积累,结合在自动化领域里的科研成果及近年来过程控制系统的相关新技术,合理选取素材内容,精心编写。

本书的主要特点是在保证基本知识概念的基础上,简化传统理论和方法,加强新知识的介绍;为适应教育改革,突出素质教育的特点,加强理论与实际的结合。本书根据工业生产过程的特点,联系国内的生产实际状况和国外先进技术,贯彻应用自动控制理论分析和设计过程控制系统的原则,高度重视理论结合工程实际,注意内容前后的衔接,突出重点。在叙述自动化仪表内容时,突出技术发展的前沿和潮流,重点阐述检测仪器的智能化,先进控制系统、计算机控制系统(包括分布式控制系统和现场总线控制系统)等新内容在本书中也占有一定的篇幅。

全书共 10 章,其中包括第 1 章绪论,第 2 章过程特性,第 3 章检测与变送,第 4 章调节器,第 5 章执行器与安全栅,第 6 章单回路控制系统,第 7 章复杂过程控制系统,第 8 章先进控制系统,第 9 章计算机过程控制系统,第 10 章生产过程控制实例。每章后均附有思考题与习题。

本书由湖南大学刘波峰任主编,杨唐胜、唐璐任副主编,湖南科技大学范小春、南华大学高飞燕、湖南工程学院李亚参编。其中第 1、3、10 章由刘波峰编写,第 4、9 章由杨唐胜编写,第 2、8 章由唐璐编写,第 6 章由范小春编写,第 5 章高飞燕由编写,第 7 章由李亚和刘波峰编写。教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会委员、湖南大学副校长章兢教授审阅了全稿,并对本书提出了许多宝贵的意见和建议,这对提高本书的质量起了重要作用,对此表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中,得到了教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会委员浙江大学赵光宙教授、教育部输变电新技术工程研究中心主任湖南大学王耀南教授的热情关怀和指导,还得到了湖南大学涂春明教授等其他同行、专家、老师的帮助和支持,特此表示深深的感谢和敬意。本书在编写中参阅了大量书刊文献和资料,在此对有关单位和作者表示衷心的感谢。

本书参考教学时数为 32~60 学时,其中包括 8 学时实验。

编 者

目 录

前言

第 1 章 绪论 1

- 1.1 过程控制系统与自动化仪表发展
概况 1
 - 1.2 过程控制系统的组成与特点 2
 - 1.2.1 过程控制系统的组成 2
 - 1.2.2 过程控制系统的特点 3
 - 1.3 过程控制系统与自动化仪表的分类 3
 - 1.4 评价过程控制系统的性能指标 5
- 思考题与习题 7

第 2 章 过程特性 9

- 2.1 过程的数学模型 10
 - 2.1.1 过程变量 10
 - 2.1.2 状态变量和状态方程 10
 - 2.2 机理法建模 11
 - 2.2.1 单容过程建模 12
 - 2.2.2 过程特性 14
 - 2.2.3 多容过程建模 16
 - 2.2.4 分布式参数系统建模 16
 - 2.3 测试法建模 17
 - 2.3.1 冲激响应 17
 - 2.3.2 响应曲线法 18
 - 2.3.3 相关统计法 20
 - 2.3.4 最小二乘法 25
- 思考题与习题 28

第 3 章 检测与变送 30

- 3.1 过程检测仪表的组成 30
- 3.2 测量误差和检测仪表性能指标 31
 - 3.2.1 测量误差的分类 31
 - 3.2.2 检测仪表的基本技术指标 31
- 3.3 温度检测 33
 - 3.3.1 热电偶 33
 - 3.3.2 热电阻 38
 - 3.3.3 温度变送器 40
 - 3.3.4 辐射温度计 40
- 3.4 压力检测 43
 - 3.4.1 弹性式压力测量元件与压力表 44
 - 3.4.2 固态压力仪表 45
 - 3.4.3 压力变送器 46

3.5 流量检测 48

- 3.5.1 流量检测的基本概念及单位 48
 - 3.5.2 流量检测仪表 49
 - 3.6 物位测量 57
 - 3.6.1 液位检测 58
 - 3.6.2 料位与相界面检测 60
 - 3.7 成分检测仪表 65
 - 3.7.1 红外气体分析仪表 65
 - 3.7.2 热导式气体分析仪表 67
 - 3.7.3 气相色谱分析仪表 68
- 思考题与习题 71

第 4 章 调节器 73

- 4.1 调节器的 PID 控制规律 73
 - 4.1.1 比例作用控制算法 74
 - 4.1.2 比例-积分作用控制算法 76
 - 4.1.3 比例-微分作用控制算法 77
 - 4.1.4 比例-积分-微分作用控制算法 79
 - 4.1.5 一组 MATLAB 仿真实验 79
 - 4.2 DDZ-III 调节器 80
 - 4.2.1 基型调节器的盘面布置 80
 - 4.2.2 基型调节器的组成 81
 - 4.2.3 输入电路 82
 - 4.2.4 PID 运算电路 83
 - 4.2.5 输出电路 85
 - 4.2.6 手动操作电路及自动-手动切换 85
 - 4.2.7 测量及给定指示电路 87
 - 4.3 可编程数字调节器 88
 - 4.3.1 KMM 可编程调节器的主要特点 88
 - 4.3.2 KMM 可编程调节器的构成 88
 - 4.3.3 KMM 可编程调节器的功能 90
 - 4.3.4 可编程序调节器的用户编程 94
- 思考题与习题 100

第 5 章 执行器与安全栅 101

- 5.1 执行器 101
 - 5.1.1 执行器的构成 101
 - 5.1.2 执行器的分类及特点 101
- 5.2 气动执行器 102
 - 5.2.1 气动执行机构 102
 - 5.2.2 调节阀 104

5.2.3 电-气转换器与阀门定位器	112	7.3.3 前馈控制的选用与稳定性	156
5.3 电动执行器	113	7.3.4 前馈控制系统参数的整定	156
5.3.1 电动执行机构工作原理	113	7.4 时间滞后控制系统	157
5.3.2 电动执行机构的特性	115	7.4.1 史密斯预估控制系统	157
5.4 智能执行器	115	7.4.2 采样控制系统	158
5.4.1 概述	115	7.4.3 时间滞后控制系统应用举例	159
5.4.2 智能执行器应用举例	117	7.5 比值控制系统	160
5.5 安全栅	117	7.5.1 单闭环比值控制	160
5.5.1 安全火花防爆系统与防爆等级	118	7.5.2 双闭环比值控制	160
5.5.2 齐纳式安全栅	118	7.5.3 变比值控制	161
5.5.3 隔离式安全栅	119	7.5.4 比值控制系统应用举例	162
思考题与习题	121	7.6 均匀控制系统	162
第6章 单回路控制系统	123	7.6.1 均匀控制系统的基本原理	162
6.1 单回路控制系统设计概述	123	7.6.2 均匀控制系统方案	162
6.1.1 过程控制系统设计的基本要求	123	7.7 分程控制系统	163
6.1.2 过程控制系统设计的基本方法	124	7.7.1 分程控制原理	164
6.1.3 过程控制系统设计的步骤	124	7.7.2 分程控制系统设计	165
6.2 单回路控制系统方案设计	125	7.7.3 分程控制系统应用	165
6.2.1 被控参数的选择	125	7.8 选择性控制	167
6.2.2 控制参数的选择	125	7.8.1 选择性控制系统类型	167
6.2.3 测量、变送器的选择	128	7.8.2 选择性控制系统设计	168
6.2.4 执行器的选择	129	7.8.3 选择性控制系统的工业应用	169
6.2.5 调节器的选择	130	7.8.4 选择性控制系统中的积分饱和及其防止	169
6.3 调节器参数的工程整定方法	135	7.9 多变量解耦控制系统	170
6.3.1 临界比例度法	135	7.9.1 多变量过程及其耦合	170
6.3.2 衰减曲线法	136	7.9.2 相对增益与相对增益矩阵	170
6.3.3 响应曲线法	137	7.9.3 变量配对	174
6.3.4 经验试凑法	138	7.9.4 解耦控制系统的设计	175
6.3.5 几种工程整定方法的比较	139	思考题与习题	179
6.4 单回路控制系统设计应用举例	140	第8章 先进控制系统	182
6.4.1 储槽液位控制系统设计	140	8.1 概述	182
6.4.2 乳化物干燥系统设计	141	8.2 适应性控制系统	182
思考题与习题	143	8.2.1 预先适应控制	182
第7章 复杂过程控制系统	144	8.2.2 自适应控制	184
7.1 串级控制系统	144	8.3 基于模型的控制	184
7.1.1 串级控制系统的原理与结构	144	8.3.1 内模控制	185
7.1.2 串级控制系统分析	146	8.3.2 模型预测控制	185
7.2 串级控制系统设计	149	8.3.3 基于过程模型的控制	187
7.2.1 主、副回路控制器选择	149	8.4 专家系统	187
7.2.2 串级控制系统参数的整定	150	8.5 模糊控制	188
7.2.3 串级控制系统设计举例	151	8.6 适应过程参数变化的控制系统	190
7.3 前馈控制系统	152	8.6.1 适应静态增益变化的控制系统	190
7.3.1 前馈控制系统的基本原理	152	8.6.2 适应纯滞后时间变化的控制系	
7.3.2 前馈控制系统的主要结构形式	154		

统	192	9.5 工业以太网网络	211
8.6.3 适应时间常数变化的控制系统	193	9.5.1 工业以太网概述	212
思考题与习题	195	9.5.2 工业以太网的应用	213
第9章 计算机过程控制系统	196	思考题与习题	216
9.1 计算机过程控制系统的构成	196	第10章 生产过程控制实例	217
9.1.1 计算机过程控制系统的特点	196	10.1 发电厂单元机组协调控制系统	217
9.1.2 计算机过程控制系统的发展趋势	197	10.1.1 单元机组的生产过程及其协调控制系统	217
9.2 可编程序控制器	197	10.1.2 单元机组负荷控制方式	219
9.2.1 可编程序控制器的组成与工作原理	198	10.2 转炉的过程控制	221
9.2.2 可编程序控制器的应用	202	10.2.1 顶吹供氧控制系统	221
9.3 集散控制系统	203	10.2.2 底吹供气控制系统	222
9.3.1 DCS组成与体系结构	203	10.3 精馏塔的控制	223
9.3.2 集散型控制系统的应用	206	10.3.1 精馏塔的控制要求	223
9.4 现场总线控制系统	207	10.3.2 被控变量的选择	224
9.4.1 FCS组成与结构	207	10.3.3 精馏塔的控制方案	225
9.4.2 几种主要的现场总线简介	208	思考题与习题	226
9.4.3 现场总线控制系统应用	210	参考文献	227

第 1 章 绪 论

过程控制是指对具备连续的或按一定程序周期进行的生产过程的自动控制，在石油、化工、电力、冶金、造纸、轻工、水处理、制药等领域得到广泛应用。过程是指在生产装置或设备中进行的物质和能量的相互作用和转换过程。表征过程的主要参量有温度、压力、流量、液位、成分、浓度等。

过程控制是自动化技术的重要组成部分，在现代工业生产过程，通过参量的控制，为实现各种最优的技术经济指标、提高经济效益和劳动生产率、节约能源、改善劳动条件、保护环境等方面起着越来越大的作用。

1.1 过程控制系统与自动化仪表发展概况

过程控制与自动化仪表的发展过程主要经历以下几个阶段：

1) 手工控制阶段。20 世纪 40 年代前后，其特点是手工操作状态，凭经验人工控制生产过程，劳动生产率很低。

2) 仪表化与局部自动化阶段。20 世纪 50 年代前后是过程控制发展的第一个阶段，一些工厂企业实现了仪表化和局部自动化。主要特点有：检测和控制仪表采用基地式仪表和部分单元组合仪表（多数为气动仪表）；过程控制系统结构为单输入、单输出系统；被控参数主要是温度、压力、流量和液位等；控制目的是保持这些参数的稳定，消除或者减少对生产过程的扰动；理论方面的成就主要是出现了频率法和根轨迹法的经典控制理论，解决单输入、单输出的定值控制系统的分析和综合问题。

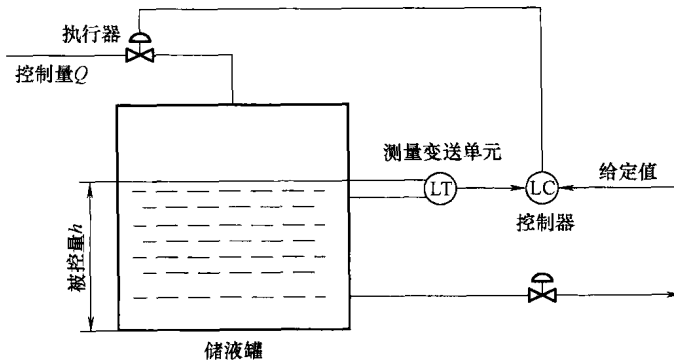
3) 综合自动化阶段。20 世纪 60 年代是过程控制发展的第二个阶段，工厂企业实现车间或大型装置的集中控制。主要特点有：检测和控制仪表采用单元组合仪表（气动、电动）和组装仪表，计算机控制系统的应用，实现直接数字控制（DDC）和设定值控制（SPC）；过程控制系统结构为多变量系统，出现各种复杂控制系统，如串级、比值、均匀控制、前馈、选择性控制系统；控制目的上升到提高控制质量或实现特殊要求；在经典控制理论的基础上，现代控制理论开始应用，出现了前馈控制（按扰动来控制，在扰动可测的情况下，可以提高控制质量）、选择性控制（在生产过程遇到不正常工况或被控量达到安全极限时，自动实现的保护性控制）等控制方法。

4) 全盘自动化阶段。20 世纪 70 年代以后发展到现代过程控制的新阶段，这是过程控制发展的第三个阶段。主要特点有：检测和控制仪表为各类新型仪表、智能化仪表、微型计算机；过程控制系统结构由单变量到多变量系统；由 PID 控制规律到特殊控制规律；由定值控制到最优控制、自适应控制；由仪表控制系统到智能化计算机分布式控制系统（分布式控制系统，现场总线控制系统）；现代控制理论如状态空间分析、系统辨识与状态估计、最优滤波与预测等全面应用于过程控制领域。

1.2 过程控制系统的组成与特点

1.2.1 过程控制系统的组成

图 1-1 是一个储液罐液位控制系统的原理示意图，控制要求液位高度 h 维持在给定值上。工作过程是由测量变送环节的测量元件测出液位实际高度，通过变送环节转换成标准信号（如 DDZ-III 仪表为 $4 \sim 20\text{mA}$ ）并送至控制器，控制器比较当前测量值和给定值，根据二者的偏差，做出相应的控制指令，执行器做出相应的动作，使得液位高度在给定值上。



由上述过程可知，过程控制系统一般由控制器、执行器、被控过程和测量变送等环节组成，其一般性框图如图 1-2 所示。图 1-2 也反映了自动控制的本质——反馈。基于反馈构成的闭环控制是过程控制的核心内容。在过程控制中，图 1-2 所示的系统也称为单回路控制系统。

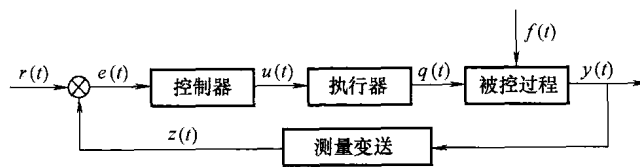


图 1-2 中所涉及的名词术语有：

- 1) 被控参数（变量） $y(t)$ ，被控过程内要求保持设定数值的工艺参数。
- 2) 控制（操纵）参数（变量） $q(t)$ ，受控制器操纵，用以克服扰动量的影响，使被控参数保持设定值的物料量或能量。
- 3) 扰动量 $f(t)$ ，除控制参数外，作用于被控过程并引起被控参数变化的其他各种因素。
- 4) 给定值 $r(t)$ ，被控参数的设定值。
- 5) 当前值 $z(t)$ ，被控参数经测量变送环节实际测量的值。
- 6) 偏差 $e(t)$ ，被控参数的设定值与当前实际值之差。
- 7) 控制作用 $u(t)$ ，控制器的输出量。

在过程控制系统中，一般将控制器、执行器和测量变送环节统称为过程（自动化）仪表。这样，一个简单的过程控制系统等于被控过程加过程控制仪表。

1.2.2 过程控制系统的特点

过程控制系统与其他自动控制系统相比较，其特点如下：

(1) 连续生产过程的自动控制

过程控制一般是指连续生产过程的自动控制，其被控量需定量控制，而且应该是连续可调的。如果控制动作在时间上是离散的（如采样控制系统等），但是其被控量需定量控制，也归入过程控制。

(2) 被控过程的复杂性

现代工业生产过程是多种多样的，由于产品品种多样，生产规模大小不同，工艺要求各异，因此过程控制中的被控过程是多种多样的。例如热工过程中的锅炉、热交换器；冶金过程中的转炉、高炉；机械工业中的热处理炉；石油化工过程中的精馏塔、化学反应器、流体传输设备等。它们的动态特性多数具有大惯性、大滞后、非线性等特点。有些机理复杂（如发酵、生化过程等）的过程至今尚未被人们所掌握，很难用目前过程辨识方法建立其精确的数学模型，因此设计能适应各种过程的控制是非常困难的。

(3) 过程控制方案的多样性

由于被控过程的复杂、多变，因此其特性多半属多变量、分布参数、大惯性、大滞后和非线性等。为了满足上述特点与工艺要求，过程控制中的控制方案也是十分丰富的。最常见的有单变量控制系统、多变量控制系统、仪表过程控制系统、计算机集散控制系统，还有复杂控制系统，如比值、前馈、分程控、选择、解耦控制等。先进的控制技术如自适应控制、预测控制、专家控制、模糊控制等也不断地运用到过程控制系统中。

(4) 定值控制是过程控制的一种主要形式

在多数工业生产过程中，过程控制的主要目的在于消除或减小外界干扰对被控量的影响，使被控量能稳定控制在给定值上，使生产稳定，保证产品的质量与产量。因此，定值控制仍是目前过程控制的一种主要形式。

(5) 过程控制系统由标准化的过程检测与控制仪表组成

过程控制通过各种检测仪表、控制仪表对生产过程进行自动检测、自动监督和自动控制。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，这些检测和控制仪表都是符合一定技术规范或技术标准，可以做到互连、互操作和互换。

1.3 过程控制系统与自动化仪表的分类

(1) 过程控制系统的分类

过程控制系统的分类方法众多，按给定值信号的特点可分为以下几种。

1) 定值控制系统。系统被控量（温度、压力、流量、液位、成分等）的给定值保持在某一固定值（或在某一很小范围内变化），例如图 1-1 所示的例子就是定值控制系统。系统的其他输入信号为扰动信号。

2) 随动控制系统。被控量的给定值随时间任意地变化的控制系统。作用是克服一切扰动，使被控量及时跟踪给定值变化。例如在加热炉燃烧过程控制中，控制系统就要使空气量跟随燃料量的变化自动控制空气量的大小从而保证达到最佳燃烧。

3) 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。控制的目的是使被控量按规定的程序自动变化，例如热处理装置的温度控制系统。

(2) 自动化仪表的分类

按仪表工作所需能源来分类,主要有三:一类是气动仪表,它以干燥、清洁的压缩空气为能源,其压力大小为 140kPa;一类是电动仪表,其能源为 220V 交流供电,或 24V 直流供电;还有一类是以液压为工作能源的液动仪表。

(3) 按组成结构分类

按组成结构可分为基地式仪表、单元组合式仪表、组装式仪表和分散型综合控制系统等。

1) 基地式仪表。基地式仪表是给定、测量、调节等机构全装在一个壳体內的仪表。它是专为某种被测参数在特定的测量范围内使用的仪表。它与单输入单输出的简单控制系统相对应。

2) 单元组合式仪表。单元组合式仪表按照自动调节系统中各组成部分的功能和现场使用要求,分成若干个独立的单元。各单元之间用标准信号联系。在使用时再按一定的要求,将各单元组合在一起。单元组合仪表按工作能源又可分成气动单元组合仪表和电动单元组合仪表。

3) 组装式仪表。它是将集成电路和其他一些电子元器件按照功能制成若干插件,根据需要选择不同的插件就能组成自动调节或控制系统。

4) 分散型控制系统。在控制技术 (Control)、计算机技术 (Computer)、通信技术 (Communication)、屏幕显示技术 (CRT) 等“4C”技术迅速发展的基础上研制成的一种控制系统。它的设计思想是分散控制、集中管理。

(4) 按防爆能力分类

按防爆能力可分为普通型、隔爆型和安全火花型等。

工业的迅猛发展,特别是石油化工、矿山等企业對仪表的防爆能力日益重视,除气动仪表已应用在易燃、易爆场合外,电动仪表也具备了各种防爆性能。现场仪表的防爆能力已成为仪表性能的重要指标。

1) 普通型是指未采取防爆措施的仪表。

2) 隔爆型是指只能应用在非危险场所,采取隔离措施以防止引燃引爆事故的仪表。例如最普通的办法是采用足够厚的金属外壳,其连接处采用符合规定的螺纹。有的情况下对壳体的材质和壳內空间的尺寸也有规定。这样的仪表,当表內电路出现故障时,其破坏范围被限制在密闭的壳体内,不至于将周围易燃气体引燃。

也可采用充入惰性气体或将电路浸在油中的办法隔离,其用意是用惰性气体或油熄灭电火花,并帮助散热降温;同时,使周围易燃物与电路隔离。

3) 安全火花型仪表。这类仪表采用低压直流小功率电源供电,并且在电路的设计中考虑防爆,对电路中的储能元件(例如电容、电感)严加限制,使电路在故障下所产生的火花微弱到不足以点燃周围的易燃气体。此外,危险区以外发生电路的故障,也有可靠的措施,使高电压、大电流不能进入危险区。

(5) 按统一信号分类

单元组台式仪表按其能源分为气动单元组合仪表和电动单元组合仪表。气动单元组合仪表的能源为 140kPa 的干燥清洁的压缩空气,它的统一信号为 20 ~ 100kPa。I 型电动单元组合仪表的能源为交流 220V,统一信号为直流 0 ~ 10mA,II 型和 III 型单元组合仪表能源为直流 24V,统一信号为直流 4 ~ 20mA。

(6) 按仪表功能分类

单元组合式仪表可分为现场安装仪表和控制室安装仪表两大部分,共 8 大类。按仪表在系统中所起的不同作用,现场安装仪表可分为变送单元类和执行单元类;控制室内安装仪表又可分为调节单元类、转换单元类、运算单元类、显示单元类、给定单元类和辅助单元类等。各单元的作用和品种如下:

1) 变送单元类。它将各种被测参数如温度、压力、流量、物位等物理量转换成相应的 DC

0~10mA、DC 4~20mA 或 20~100kPa 信号，并将其传送到显示、调节单元，以供指示、记录或控制。变送单元的主要品种有温度变送器、压力变送器、差压变送器、流量变送器、液位变送器等。

2) 转换单元类。转换单元是单元组合仪表与其他系列仪表之间联系的桥梁，它能将电压、频率等电信号转换成相应 DC 0~10mA、DC 4~20mA 或 20~100kPa 信号，实现与电动单元组合仪表标准信号之间的转换，如电动调节单元的输出需进行电-气转换才能驱动最常用的气动薄膜调节阀。

3) 调节单元类。它将来自变送单元的测量信号和给定信号进行比较，按其差值给出控制信号去控制执行器的动作，使被控量和给定值相等。调节单元的品种有比例、积分、微分调节器；比例、积分调节器；比例、微分调节器和比例调节器等。

4) 运算单元类。它将各类仪表输出的标准统一信号进行加、减、乘、除、开方、二次方等数学运算，以满足多参数测量、校正和调节的要求。运算单元的品种有加减器、乘除器和开方器等。

5) 显示单元类。已将各种被测参数进行指示、记录、报警和积算等，供操作人员监视控制系统工况之用。显示单元副品种有比例积算器、开方积算器、自动显示记录仪等。

6) 给定单元类。提供被控参数的给定值送到调节单元，实现定值控制。给定单元的输出也可供给其他仪表作为参考基准值。其品种有恒流给定器、比值给定器和时间程序给定器等。

7) 执行单元类。它接收调节器所输出的调节信号或手动控制信号，使阀门开大或关小，以达到调节的目的。这类产品主要有电动执行器和气动调节阀。

8) 辅助单元类。辅助单元有操作器、阻尼器、限幅器、安全栅等。操作器用于手动操作。阻尼器用于压力或流量等信号的平滑阻尼。限幅器用于限制信号的上、下限范围。安全栅用于将危险场所与非危险场所隔开，起安全防爆作用。

1.4 评价过程控制系统的性能指标

一个控制性能优良的过程控制系统应该在给定值发生变化或系统受到扰动作用时，被控量应该平稳、迅速和准确地趋近或回复到给定值。因此，过程控制系统的性能是在稳定性、快速性和准确性单项目性能指标的基础上综合考虑，提出综合性能指标。

1. 系统阶跃响应曲线性能指标

图 1-3a、b 所示分别是给定值和扰动作阶跃变化时的过渡过程的典型曲线，常用的性能指标有以下几种。

(1) 衰减比和衰减率

衰减比是衡量一个振荡过程的衰减程度的指标，它等于两个相邻的同向波峰值之比，即衰减比为

$$n = \frac{y_1}{y_3} \quad (1-1)$$

衡量衰减程度的另一种指标是衰减率，它是指每经过一个周期以后，波动幅度衰减的百分数，即衰减率为

$$\psi = \frac{y_1 - y_3}{y_1} \times 100\% \quad (1-2)$$

衰减比与衰减率两者有简单的对应关系，例如衰减比 n 为 4:1 就相当于衰减率 $\psi = 0.75$ 。为了保证控制系统有一定的稳定裕度，在过程控制中一般要求衰减比为 4:1~10:1，这相当于衰减

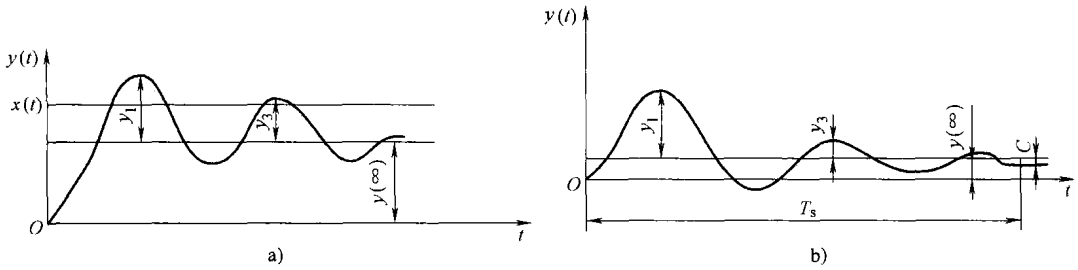


图 1-3 阶跃变化的响应曲线

a) 设定值阶跃响应曲线 b) 扰动值阶跃曲线

率为 75% ~ 90%。这样，大约经过两个周期以后就趋于稳态，振荡幅度极小。

(2) 最大动态偏差和超调量

最大动态偏差是指设定值阶跃响应中，过渡过程开始后第一个波峰超过其新稳态值的幅度，如图 1-3a 中的 y_1 所示。最大动态偏差占被控量稳态变化幅度的百分数称为超调量，即

$$\sigma = \frac{y_1}{y(\infty)} \times 100\% \quad (1-3)$$

最大动态偏差（或超调量）表示的是被控参数偏离给定值的程度，所以是衡量控制系统的—个重要指标。

(3) 残余偏差

残余偏差是指过渡过程结束后，被控量新的稳态值 $y(\infty)$ 与设定值 r 之间的差值，也称静差或余差，它是控制系统稳态准确性的衡量指标。即

$$C = r - y(\infty) \quad (1-4)$$

一般而言，过程控制系统的残余偏差越小越好。但对于某些控制要求不很高的场合，如储槽的液位控制，可以允许有较大的残余偏差，实现有差控制。

(4) 过渡过程时间

过渡过程时间是指控制系统从受到扰动作用开始到过渡过程结束所需要时间，理论上为无穷长。在实际工程中，一般取被控参数与稳态值 $y(\infty)$ 的偏差为 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 以内范围所需要的时间，图 1-3b 中以 T_s 表示。过渡过程时间是衡量控制系统快速性的指标， T_s 通常越小越好。

2. 偏差积分性能指标

上述的单项性能指标不能综合地对过程控制系统做全面的评价。通常采用误差积分指标衡量控制系统性能的优良程度，可反映出过渡过程的动态偏差、调节时间，还可兼顾衰减比、超调量等，是一类综合指标。偏差积分的值越小越好，常用的有以下几种形式：

误差积分 (IE) 为

$$IE = \int_0^{\infty} e(t) dt \quad (1-5)$$

绝对误差积分 (IAE) 为

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (1-6)$$

二次方误差积分 (ISE) 为

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (1-7)$$

时间与绝对误差乘积积分 (ITAE) 为

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

以上各式中, $e(t) = y(t) - y(\infty)$ 。

采用不同的积分公式意味着评价过渡过程性能优良程度的侧重点不同, 在使用时应根据控制系统的实际情况选取。

误差积分指标的缺点是不能保证控制系统具有合适的衰减率, 特别是一个等幅振荡过程, 其 IE 却等于零, 显然是不合理。为此, 通常是先满足衰减率的要求, 然后再考虑使某种误差积分为最小。

思考题与习题

1-1 图 1-4 是一反应器温度控制系统示意图。A、B 两种物料进入反应器进行反应, 通过改变进入夹套的冷却水流量来控制反应器的温度保持不变。试画出该温度控制系统的框图, 并指出该控制系统中的被控过程、被控参数、控制参数及可能影响被控参数变化的扰动有哪些?

1-2 锅炉是化工、炼油等企业中最常见的主要设备。汽包水位是影响蒸汽质量及锅炉安全的一个十分重要的参数。水位过高, 会使蒸汽带液, 降低了蒸汽的质量和产量, 甚至会损坏后续设备; 而水位过低, 轻则影响汽液平衡, 重则烧干锅炉甚至引起爆炸。因此, 必须对汽包水位进行严格控制。图 1-5 是一类简单锅炉汽包水位控制示意图, 要求:

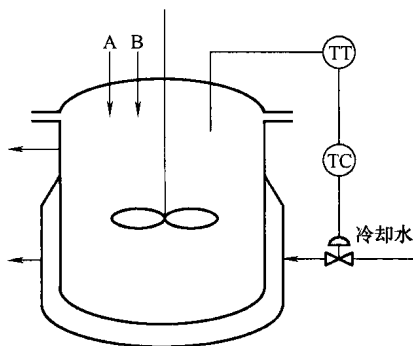


图 1-4 反应器温度控制系统

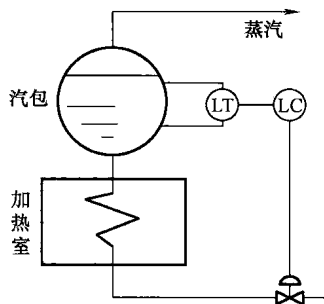


图 1-5 锅炉汽包水位控制示意图

(1) 画出该控制系统框图。

(2) 指出该控制系统中的被控过程、被控参数、控制参数和扰动参数各是什么?

(3) 当蒸汽负荷突然增加, 试分析该系统是如何实现自动控制的。

1-3 评价过程控制系统的衰减振荡过渡过程的品质指标有哪些? 有哪些因素影响这些指标?

1-4 为什么说研究过程控制系统的动态特性比研究其静态特性更有意义?

1-5 某反应器工艺规定操作温度为 $800 \pm 10^\circ\text{C}$ 。为确保生产安全, 控制中温度最高不得超过 840°C 。

现运行的温度控制系统在最大阶跃扰动下的过渡过程曲线如图 1-6 所示。

(1) 分别求出稳态误差、衰减比和过渡过程时间。

(2) 说明此温度控制系统是否已满足工艺要求。

1-6 什么是单元组合仪表?

1-7 DDZ-III 组合仪表的信号是如何表示的? 活零点设置的目的是什么?

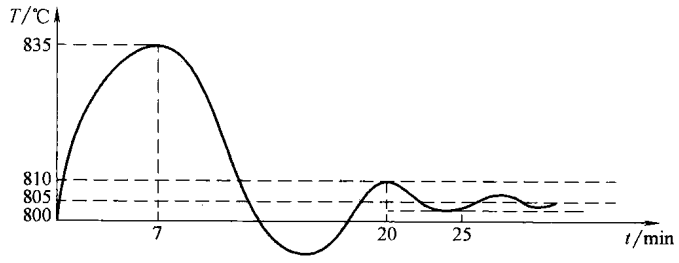


图 1-6 某反应器温度控制系统过渡过程曲线

第2章 过程特性

要实现对过程的控制，就必须对对象过程有足够精确的了解。首先要分析过程的特性，分析过程特性则需要用数学对其进行描述，这种数学描述就是系统的数学模型。构建过程的数学模型是一项综合性的活动，需要用到工程科学的许多基本原理，例如热力学、动力学、输送现象等。要设计过程的控制系统，建立过程的数学模型是十分关键的步骤。

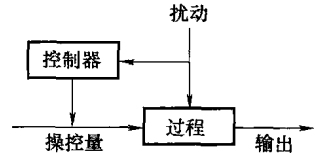


图 2-1 前馈控制原理图

图 2-1 是前馈控制原理图，通过对扰动进行测量，可以预估扰动对过程输出的影响。为了将输出值控制在目标范围内，要用控制器改变操控量，以消除扰动的影响。问题是如何改变操控量才能消除扰动的影响，要回答这个问题，就必须知道两个关系式，也就是过程的数学模型，即

$$\begin{aligned} \text{输出} &= f_1 (\text{扰动}) \\ \text{输出} &= f_2 (\text{操控量}) \end{aligned}$$

这样，通过控制操控量使得

$$f_2 (\text{操控量}) - f_1 (\text{扰动}) = 0$$

就能消除扰动的影响。在这个例子中可以清楚看到，数学模型在前馈控制系统的设计中起决定性作用。没有准确的数学模型，就无法设计有效的前馈控制系统。

图 2-2 为推断控制原理图，其基本原理是通过测量输出来调控未测受控量，使其处于理想值。由于控制目标无法直接测量，因此只能通过测量输出与未测量的关系来估计它的值，即

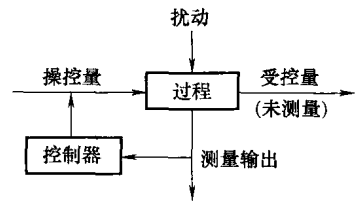


图 2-2 推断控制原理图

$$\text{受控量} = f (\text{测量输出})$$

而只有研究清楚了过程的数学模型，才有可能得到两者的关系式。在知道这个关系式之后，就能比较估计值与目标值，然后利用反馈控制的原理来控制操控量。很显然，要设计推断控制系统，正确的数学模型也是不可或缺的。

要利用数学模型对过程对象进行分析，首先要建立系统的数学模型。建立过程模型一般通过两种途径，机理法建模和测试法建模。

机理法建模即对过程系统进行理论分析。针对控制的目的和方法，应用物理化学系统的知识，对过程系统进行简化假设，通过理论推导得出系统的数学模型。如果对过程系统的原理了解得很清楚，就有可能通过机理法直接建立过程的模型。但在很多时候根据过程的物理和化学原理进行建模往往非常困难，或者虽然能得到模型的种类和结构，却不知道各参数的具体取值。有时候甚至不知道过程系统的基本原理和具体结构，只能得到系统的输入输出。另外即便建立了很好的模型可能也不够，因为很多物理和化学过程是非线性的，将其线性化时，结果受时间影响。另外很多物理和化学过程是非平稳过程，参数随时间变化，从而导致动态特性也随时间变化。对于这种情况，就需要通过实验和对实验数值进行处理的办法来得到系统的数学模型。通过实验和数据处理的办法来得到系统数学模型的办法就是测试法建模。测试法建模通常先根据已知的系统信息和理论分析估计系统的模型类型，然后选择适当的辨识方法来得到描述输入和输出之间关系的具体模型。测试法建模也称为系统辨识，或者过程辨识。由于系统辨识需要进行大量计算，而且经常是在线进行，对速度要求很高，因此通常需要依靠计算机实现。

2.1 过程的数学模型

为了刻画一个过程系统，首先需要一组描述系统状态的基本变量，其次需要有一组描述系统状态如何随时间变化的方程。

2.1.1 过程变量

如图 2-3 所示，与过程有关的变量（流速、温度、压力、浓度等）可以分为输入和输出变量。输入变量又可进一步分为操控量（由操作员或控制装置调节）和扰动量（不受操作员或控制装置调节）。输出变量则分为测量输出量（通过直接测量得到的输出量）和未测输出量（没有或无法直接测量的输出量）。扰动量也分为测量扰动和未测扰动。在一个反应容器中，作为扰动的流速 F 和温度 T 很容易测量，就可以视为测量扰动。而反应物的成分则通常无法测量，因此视为未测扰动。未测扰动经常会导致控制问题的难度增加。

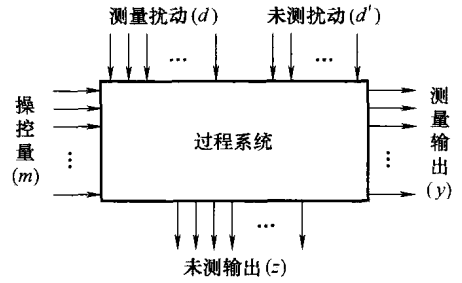


图 2-3 过程的输入输出变量

例 2-1 图 2-4 为具有冷却功能的连续搅拌反应容器，其中字母 c 表示浓度， F 表示流量， T 表示温度。输入变量为 c_{Ai} 、 T_i 、 F_i 、 T_{ci} 、 F_c 、 (F) ，输出变量为 c_A 、 T 、 F 、 T_{co} 。其中流量 F 即可视为输入变量也可视为输出变量。如果输出管道上有阀门控制流速，则 F 为输入变量；否则就是输出变量。假设反应物输入流无法进行控制，则 c_{Ai} 、 T_i 、 F_i 就是扰动量。如果冷却剂流速受阀门控制，则 F_c 为操控量，而 T_c 则是扰动量。输出变量中 T 、 F 、 T_{co} 为测量输出量，因为它们的值可以通过热电偶 (T 、 T_{co}) 和流量计 (F) 很方便地测量。浓度 c_A 也可以通过连接到输出管道的分析仪器（气相色谱仪、红外光谱仪等）进行测量，在这种情况下， c_A 就是测量输出量。但在大部分工业现场都不具备这种分析仪器，因为价格昂贵而且实时性不好，在这种情况下， c_A 就是未测输出量。

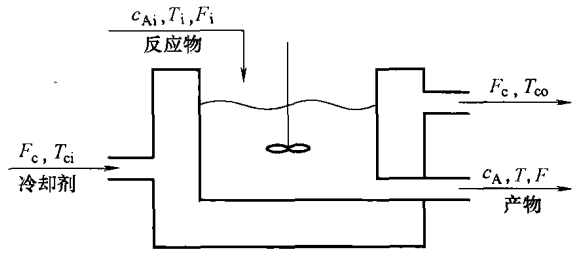


图 2-4 具有冷却功能的连续搅拌反应容器

2.1.2 状态变量和状态方程

对于大多数过程系统，感兴趣的基本量只有 3 种：质量、能量和动量。通常这些基本量无法或很难直接测量，对于这种情形可以选择其他容易测量的量，然后间接得到基本量。质量、能量和动量可以用密度、浓度、温度、压力、流速、位移等变量来刻画。这些刻画系统状态的量就称为状态变量。而通过基本量的守恒原理推导得出的状态变量（因变量）与各种自变量的关系就称为状态方程。状态方程与状态变量一起组成了过程系统的数学模型，从中可以得到过程系统的静态或动态特性。

在过程控制领域，通常考虑线性时不变模型，如果是非线性情形，也尽可能将模型简化为线性模型，或是局部线性化，然后再利用线性系统的分析方法进行研究。典型的线性系统连续模型可以用常系数线性微分方程描述为

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + y(t) = b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + \dots + b_0 u(t) \quad (2-1)$$

式中, u 为输入; y 为输出。

例 2-2 图 2-5 所示为弹簧阻尼系统, 质量为 m 的物体连接在弹簧和阻尼器上, 位置为 x , 弹性系数为 k , 阻尼系数为 d , 弹簧受位置为 $u(t)$ 的簧片控制, 因此物体的受力为

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = -k(x(t) - u(t)) - d \frac{dx(t)}{dt} \quad (2-2)$$

转化为标准形式

$$\frac{m}{k} \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \frac{d}{k} \frac{dx(t)}{dt} + x(t) = \frac{1}{k} u(t) \quad (2-3)$$

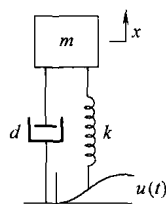


图 2-5 弹簧阻尼系统

通过拉普拉斯变换, 线性时不变系统可以用输入与输出之间的传递函数 $G(s)$ 描述, 即

$$Y(s) = G(s)U(s) \quad (2-4)$$

拉普拉斯变换的定义为

$$L\{f(t)\} = F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (2-5)$$

而且有以下性质

$$L[\dot{f}(t)] = sF(s) \quad (2-6)$$

据此可以得到式 (2-3) 常微分方程的拉普拉斯变换为

$$(ms^2 + ds + k)Y(s) = kU(s) \quad (2-7)$$

从而得到弹簧阻尼系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k/m}{s^2 + \frac{d}{m}s + \frac{k}{m}} \quad (2-8)$$

2.2 机理法建模

机理法建模通常借助于一些描述物理化学原理的方程, 主要包括:

- 1) 守恒方程。主要是质量、能量和动量守恒。
- 2) 物理或化学状态方程。如牛顿定律、本构方程等。
- 3) 唯象方程。描述不可逆事件, 如摩擦、热传递等, 通常可以通过熵平衡来描述。

对于通常的工程领域, 所关注的过程系统的能量和质量既不会创生也不会消失, 因此遵循守恒原理

$$\frac{S_{\text{acc}}}{\Delta t} = \frac{S_{\text{in}}}{\Delta t} - \frac{S_{\text{out}}}{\Delta t} + \frac{S_{\text{gen}}}{\Delta t} - \frac{S_{\text{con}}}{\Delta t} \quad (2-9)$$

式中, S 可以是总质量、单个容器中的质量、总能量或动量, 其中 S_{acc} 为累积量; S_{in} 为流入量; S_{out} 为流出量; S_{gen} 为产生量; S_{con} 为消耗量; Δt 为时间周期。通常将流入的量视为正, 流出的量视为负。

应用守恒原理可以得到一组微分方程, 其中的因变量是基本量, 自变量是时间。解微分方程就可以确定基本量 (状态变量) 如何随时间变化, 从而得到过程的动态特性。如果状态变量不随时间变化, 就认为过程处于稳态。稳态时单位时间内 S 的累积量的变化为 0, 通过守恒原理得到的是代数方程。