



21世纪普通高等教育规划教材

# 过程控制仪表 及控制系统

林德杰 主编

3  
机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪普通高等教育规划教材

# 过程控制仪表及控制系统

主编 林德杰  
参编 廉迎战 向 阳  
主审 符 曦 毛宗源



机械工业出版社

本书基于生产实际和工程应用,重点介绍了过程的建模、过程控制仪表、各种过程控制系统的设计、参数整定及常用过程自动控制系统的分析。除了详细介绍目前国内仍在广泛使用的 DDZ-III 型电动单元组合仪表的工作原理及其外特性,以及常用的传统仪表过程自动控制系统外,结合生产过程自动控制技术的发展趋势,还对电子化、微型化、数字化和智能化等先进的过程自动控制仪表的工作原理及其外特性以及计算机集散控制系统和现场总线自动控制系统进行了深入、系统和详细的分析和论述。全书内容丰富,取材新颖,结构严谨,系统性强。充分体现了理论联系实际,重在培养的原则。

本书可作为高等院校自动化、电气工程及自动化、化学工程、环境工程、食品科学与工程、工业工程以及相近专业的本科生教材,亦可作为相关专业的研究生和工程技术人员的参考用书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

过程控制仪表及控制系统/林德本主编. —北京:机械工业出版社, 2004.6

21 世纪普通高等教育规划教材

ISBN 7-111-14388-4

I. 过… II. 林… III. ①过程控制—仪表—高等学校—教材②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 (2004) 第 037716 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 贡克勤 版式设计: 霍永明 责任校对: 魏俊云

封面设计: 张静 责任印制: 闫焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 6 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·17.5 印张·429 千字

定价: 25.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646  
封面无防伪标均为盗版

# 前 言

“过程控制仪表及控制系统”是高等工科院校自动化和相近专业的一门必修课。主要研究过程建模、过程控制仪表的原理及其外特性、过程控制系统的设计、参数整定和实用典型过程控制系统的分析。是一门与生产实际和工程应用紧密联系的综合性学科。前置课程有“电子技术”、“自动检测技术”、“微机原理及应用”和“自动控制理论”等。

随着现代工业生产的迅速发展，生产过程规模不断扩大，生产过程自动化已成为一项庞大的系统工程，生产过程控制系统的结构日益复杂。微电子技术、数据通信技术、网络技术和计算机多媒体技术在生产过程自动化中已得到日益广泛的应用，过程控制仪表已向电子化、微型化、数字化和智能化的方向发展；过程控制系统从传统的仪表控制系统向计算机集散控制系统和现场总线控制系统迅速发展已成为不争的事实。本书以“理论联系实际、重在能力培养和与时俱进”为原则，紧密联系国内生产实际和国内外先进的技术水平，以目前国内仍在广泛应用的 DDZ-III 型仪表和传统的典型仪表控制系统为主线展开深入的讨论，并详细介绍了代表当今过程控制仪表发展方向的电子化、微型化、数字化和智能化过程控制仪表以及计算机集散控制系统和现场总线控制系统，以便使培养的学生适应目前自动化技术发展的需要。

本书将过程控制仪表和控制系统有机地结合起来，结合现代工业生产过程的特点，介绍过程控制系统的设计方法和典型过程控制系统的分析，做到系统性与典型性相统一，技术先进性与工程实用性相融合。本书内容丰富，取材新颖，结构严谨，系统性强。在内容叙述上，注重由浅入深，简明扼要，通俗易懂。以工程应用实例引导读者正确运用基础理论和新技术解决工程实际问题。充分体现了理论联系实际和重在能力培养的原则。

本书可作为高等院校自动化、电气工程及自动化、化学工程、食品科学与工程、工业工程、环境工程以及相近专业的本科生教材。亦可作为相关专业的研究生和工程技术人员的参考用书。本书适用 50 学时（其中，理论教学 42 学时，实验教学 8 学时）的教学用书；若删除第二章第四节、第三章第六节、第四章第二节、第六章和第八章第六、七、八节，并不影响本书的系统性，亦适用 36 学时（其中，理论教学 32 学时，实验教学 4 学时）的教学用书。上述建议

#### IV

仅供参考。

本书第一～第七章由林德杰编写；第八章由廉迎战编写；研究生向阳同学搜集了大量的参考文献，并输入全书的文稿和制作所有图表。全书由林德杰统稿和主编。华南理工大学毛宗源教授和广东工业大学符曦教授审阅了全稿，并担任主审；广东工业大学自动化学院副院长谢光汉博士和林均淳副教授参审。专家、教授们提出了大量宝贵的意见和建议，对提高本书的质量起了重要作用。广东工业大学自动化学院领导对本书的编写给予大力支持。在此，对各位专家、教授和领导们表示衷心的感谢。本书的编写参考了大量文献和资料，在此对有关单位和作者一并致谢。

由于编者水平有限，书中的缺点和错误在所难免，敬请广大师生和读者批评指正。

**编 者**

# 目 录

## 前言

<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 过程控制系统的组成及其分类 .....	1
第二节 过程控制系统的特点 .....	3
第三节 过程控制系统的质量指标 .....	4
第四节 过程控制系统的发展概况 .....	6
思考题与习题 .....	7
<b>第二章 被控过程的数学模型</b> .....	8
第一节 概述 .....	8
第二节 解析法建立过程的数学模型 .....	10
第三节 响应曲线辨识过程的数学模型 .....	15
第四节 相关函数法辨识过程的数学模型 .....	25
思考题与习题 .....	33
<b>第三章 变送单元</b> .....	36
第一节 概述 .....	36
第二节 差压变送器 .....	38
第三节 温度变送器 .....	42
第四节 流量检测与变送 .....	48
第五节 液位变送器 .....	58
第六节 成分分析仪表 .....	61
第七节 微型化、数字化和智能化变送器 .....	69
思考题与习题 .....	82
<b>第四章 调节单元</b> .....	83
第一节 DDZ-III型调节器 .....	83
第二节 改进型调节器 .....	94
第三节 数字式调节器 .....	98
思考题与习题 .....	103
<b>第五章 执行单元</b> .....	105
第一节 概述 .....	105

第二节 电动执行机构 .....	106
第三节 气动执行机构 .....	107
第四节 气动薄膜调节阀 .....	108
第五节 电—气转换器和阀门定位器 .....	117
思考题与习题 .....	120
<b>第六章 显示记录单元 .....</b>	<b>122</b>
第一节 显示记录仪表的工作原理 .....	122
第二节 自动平衡显示记录仪表 .....	124
第三节 DDZ-III 指示记录仪 .....	133
第四节 现代显示记录仪表 .....	137
思考题与习题 .....	141
<b>第七章 安全栅 .....</b>	<b>142</b>
第一节 概述 .....	142
第二节 输入式安全栅 .....	145
第三节 输出式安全栅 .....	149
思考题与习题 .....	150
<b>第八章 过程控制系统设计与分析 .....</b>	<b>151</b>
第一节 单回路控制系统设计 .....	151
第二节 串级控制系统设计 .....	175
第三节 前馈控制系统 .....	185
第四节 大时延控制系统 .....	196
第五节 比值控制系统 .....	203
第六节 均匀控制系统 .....	209
第七节 分程控制系统 .....	212
第八节 选择控制系统 .....	216
第九节 模糊控制系统 .....	219
第十节 集散控制系统 .....	228
第十一节 现场总线控制系统 .....	248
思考题与习题 .....	266
<b>参考文献 .....</b>	<b>270</b>

# 第一章 绪 论

## 第一节 过程控制系统的组成及其分类

在现代生产过程中,为保证生产安全顺利进行,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(PH值)以及各种物料的成分等进行自动控制。因此,自动控制技术广泛应用于石油、化工、冶金、机械、电力、轻工、纺织、建材、原子能以及航空航天等工业部门。

### 一、过程控制系统的组成

为了便于理解,以几个典型过程控制系统为例,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、轻工等工业部门常用的动力设备。锅炉输出的过热蒸汽的温度是生产工艺的重要参数,过热蒸汽温度的高低,会直接影响到生产过程能否顺利进行,严重时,会损坏生产设备。因此,必须对锅炉过热蒸汽的温度进行自动控制,控制系统组成的原理图见图 1-1。其控制原理简述如下:

由于各种内外扰动的影响,过热蒸汽的温度是不稳定的,因此,过热蒸汽的温度利用温度检测元件(如热电阻)和温度变送器检测,并转换成便于远传的统一标准信号,与温度调节器的给定信号进行比较,其偏差送给调节器运算后控制调节阀的开度,增大或减小冷却水的流量,从而使过程蒸汽的温度稳定在给定值附近。

综上所述,可画出过程控制系统组成的框图,见图 1-2。

图中, $y(t)$ 为被控参数,例如过热蒸汽的温度;测量变送单元将被控参数检测出来并转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,改变冷却水的流量 $q(t)$ ,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

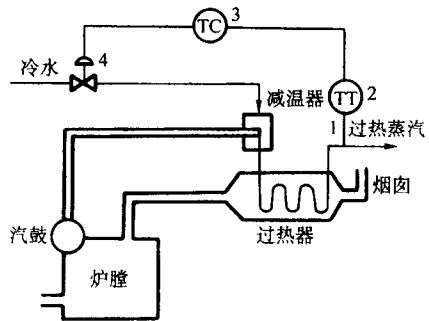


图 1-1 过热蒸汽温度控制系统  
1—温度检测元件 2—温度变送器  
2—调节器 4—调节阀

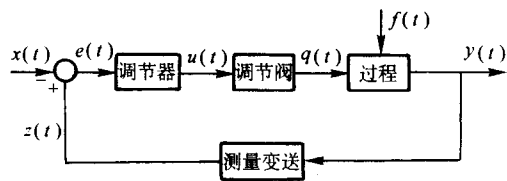


图 1-2 控制系统框图



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于给定值附近,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传递方向,并不表示框之间的物料联系。

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,则与箭头的方向不一致。

## 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,影响生产和人民生活,危及人民身体健康。根据国家有关规定,必须对污水进行处理,使其酸碱度  $PH=7$ ,才能排入江河湖泊,为此,组成图 1-3 所示的 PH 控制系统。在扰动作用下,当 PH 值变化时,经检测变送器 PHT 和调节器 PHC 控制调节阀的开度作相应的变化,最终使污水的 PH 值回到给定值附近。因此,可画出控制系统图,见图 1-2。图中,PH 值为被控参数  $y(t)$ ;进入液槽的酸液流量为控制参数  $q(t)$ ;液槽为被控过程。

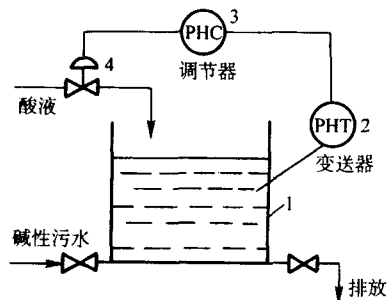


图 1-3 PH 控制系统

1—贮液罐 2—PH 变送器 3—PH 调节器 4—调节阀

## 3. 液位控制系统

在石油、化工、轻工和食品等工业生产过程中,有许多贮罐作为原料、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,必须对贮罐的液位进行控制。为此组成图 1-4 的液位控制系统。

图中,若由于扰动作用使液位变化,经液位变送器、调节器后,控制调节阀的开度作相应的变化,从而流入液罐的流量  $Q_1$  作相应的变化,达到使液罐的液位控制在给定值上的目的。控制系统框图见图 1-2,其中,液罐的液位为被控参数  $y(t)$ ;流入液罐的液体流量  $Q_1$  为控制参数  $q(t)$ ;液罐为被控过程。

由上述三个过程控制系统实例可见,过程控制系统由测量、变送器、调节器、调节阀和电子计算机(也可以看作一台仪表)统称为过程测量控制仪表,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。

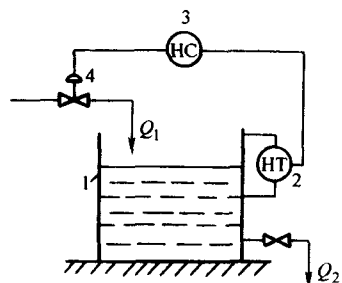


图 1-4 液位控制系统

1—贮液罐 2—差压变送器 3—液位调节器 4—调节阀

## 二、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：

### (一) 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，构成一个以上闭环回路，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的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。

### (二) 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，偏差一旦出现，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。

## 第二节 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. 控制过程多属缓慢过程和参量控制

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、制药等生产过程中，常用温度、压力、流量、液位（物位）、成分、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，所以定值控制是过程控制的一种主要形式。

# 第三节 过程控制系统的质量指标

一个性能良好的过程控制系统在给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优劣的质量指标。常用的控制性能优劣的质量指标有下列两种。

## 一、系统过渡过程质量指标

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，希望余差愈小愈好。

### 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

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

$n < 1$ , 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  $\varphi$  为

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

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

### 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  $A = B + c$ 。

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  $\sigma$  可定义为

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

最大偏差  $A$  或超调量  $\sigma$  是衡量控制系统的重要质量指标。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,  $t_s$  愈小, 过渡过程进行得愈快。

### 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。

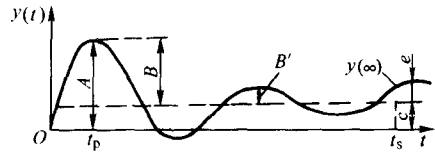
必须指出, 上述各项质量指标是相互联系又相互制约的, 例如, 一个系统的稳态精度要求很高时, 可能会引起动态不稳定; 解决了稳定问题后, 又可能因反应迟钝而失去快速性。要高标准地同时满足各项质量指标是很困难的, 因此, 应根据生产工艺的具体要求, 分清主次, 统筹兼顾, 保证优先满足主要的质量指标。

## 二、误差 (偏差) 性能指标

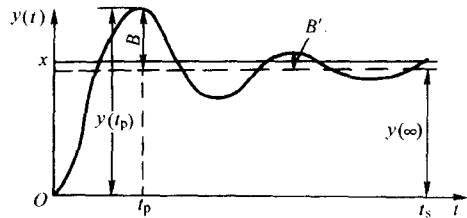
除了用上述各项指标来衡量控制系统质量外, 也常用误差积分指标判断系统质量的优劣。因为在相同输入量作用下, 如果误差愈小, 且持续作用时间愈短, 则系统的质量愈高; 反之, 误差愈大, 且持续作用时间愈长, 则质量愈差。常用的误差性能指标有下列几种:

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

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



a)



b)

图 1-5 阶跃作用下系统过渡过程曲线

a) 定值系统 b) 随动系统

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

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

上述各式中,  $e(t)$  为偏差,  $e(t) = y(t) - y(\infty)$ 。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。

## 第四节 过程控制系统的发展概况

随着现代工业生产的迅速发展, 作为自动控制技术重要部分的过程控制技术也得到迅猛发展, 并达到新的水平。回顾工业生产自动化的发展历程, 大致经历了下述几个阶段。

### 一、仪表化与局部自动化阶段

20 世纪 50~60 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。

### 二、综合自动化阶段

20 世纪 60~70 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。

### 三、全盘自动化阶段

20 世纪 70 年代以来, 过程控制技术进入了飞速发展阶段, 实现了全盘自动化。微型计算机 (以下简称微机) 广泛应用于过程控制领域, 对整个工艺流程, 全工厂, 乃至整个企业集团进行集中控制和经营管理以及应用多台微机对生产过程进行控制和多参数综合控制, 是这一阶段的主要特点。在检测变送方面, 除了热工参数的检测变送以外, 粘度、湿度、PH 值及成分的在线检测与数据处理的应用日益广泛。模拟过程检测控制仪表的品种、规格增加, 可靠性提高, 具有安全火花防爆 (DDZ-III) 性能, 可用于易燃易爆场合。以微处理器为核心的单元组合仪表正向着微型化、数字化、智能化和具有通信能力方向发展。过程控制系统的结构方面, 也从单参数单回路的仪表控制系统发展到多参数多回路的微机控制系统。微机控制系统的发展经历了直接数字控制、集中控制、分散控制和集散控制几个发展

阶段。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基本单元——各种仪表单元也进入了网络时代，从而改变了传统回路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。
- 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？

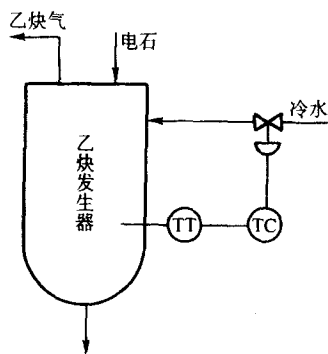


图 1-6 温度控制系统

## 第二章 被控过程的数学模型

### 第一节 概 述

如前所述,一个过程控制系统由被控过程和检测控制仪表两部分组成。因此,系统的控制品质取决于被控过程和检测控制仪表的特性。由于过程控制仪表的特性是可以人为改变的,以适应不同被控过程的需要,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。

#### 一、建立被控过程数学模型的目的

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的数学模型的分析 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。

#### 二、被控过程数学模型的类型

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  $W_0(s)$  是多个输入量  $q(t), f_1(t), f_2(t), \dots, f_n(t)$ ，单个输出量  $y(t)$  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。

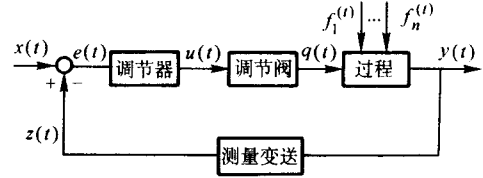


图 2-1 过程控制系统框图

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。

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（能量）平衡关系，用数学推理的方法建立过程的数学模型。

(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。

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， $Y$  为输出量； $U$  为输入变量； $\tau$  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愈多， $n$  和  $m$  愈大。对大多数工业过程，一般取  $n$  和  $m$  之值在 1~3 之间。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  $1/10 \sim 1/20$ 。



## 第二节 解析法建立过程的数学模型

如前所述, 根据过程的内在机理, 通过静态与动态物料 (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。在控制理论课程中已介绍过的用解析法建模的原理和方法, 同样适用于过程控制系统的建模。

静态物料 (能量) 平衡是指在单位时间内进入被控过程的物料 (能量) 等于单位时间内从被控过程流出的物料 (能量)。

动态物料 (能量) 平衡是指单位时间内流入被控过程的物料 (能量) 与流出被控过程的物料 (能量) 之差等于被控过程内物料 (能量) 贮存量的变化量。

### 一、单容过程的建模

单容过程是指只有一个贮蓄容量的过程。单容过程又可分为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 2-2a 为自衡过程的阶跃响应; 图 2-2b 为无自衡过程的阶跃响应。

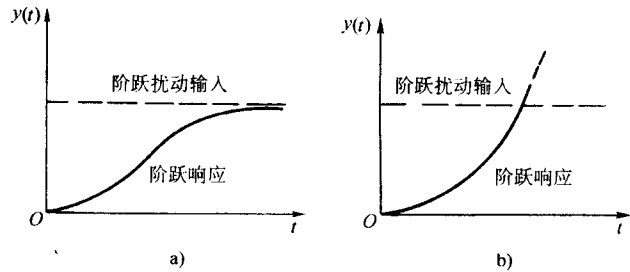


图 2-2 被控过程的阶跃响应

所谓自衡过程, 是指被控过程在扰动作用下, 平衡状态被破坏后, 无需操作人员或仪表的干预, 依靠自身能够恢复平衡的过程。而无自衡过程, 是指被控过程在扰动作用下, 其平衡状态被破坏后, 若无操作人员或仪表的干预, 依靠其自身的能力不能重新恢复平衡的过程。

**例 2-1** 图 2-3 为单容液位过程, 液位高度  $h$  为被控量, 液体体积流量  $Q_1$  为被控过程的控制量, 改变调节阀 1 的开度可改变  $Q_1$ , 体积流量  $Q_2$  为负荷量, 它取决于用户需要, 其大小可通过阀门 2 的开度来改变。试建立该过程的数学模型。

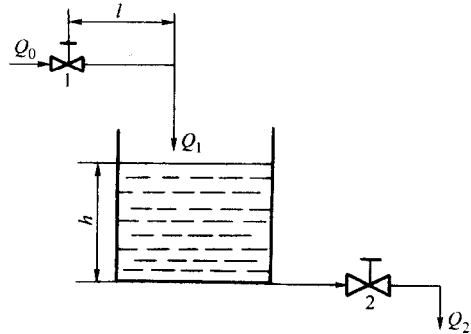


图 2-3 单容液位过程

**解** 被控过程的数学模型就是  $h$  与  $Q_1$  之间的数学表达式。根据动态物料 (能量) 平衡关系, 有

$$Q_1 - Q_2 = A \frac{dh}{dt} \quad (2-1)$$

写成增量形式

$$\Delta Q_1 - \Delta Q_2 = A \frac{d\Delta h}{dt} \quad (2-2)$$

式中,  $\Delta Q_1$ 、 $\Delta Q_2$  和  $\Delta h$  分别为偏离某平衡状态  $Q_{10}$ 、 $Q_{20}$  和  $h_0$  的增量;  $A$  为贮罐的截面