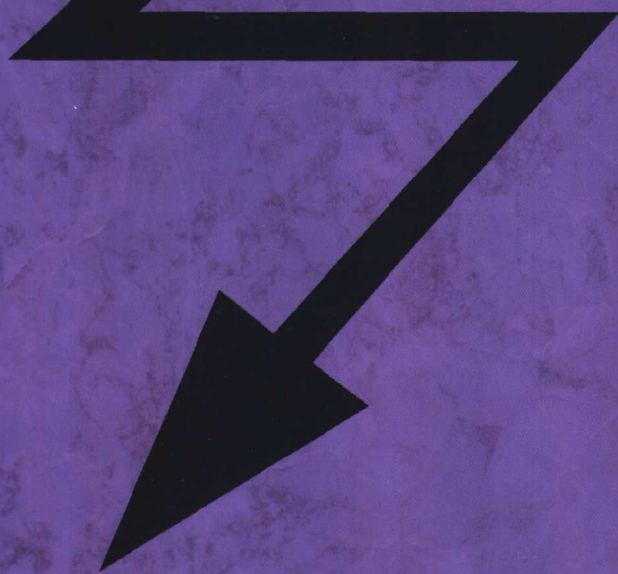


Regong  
Guocheng  
Zidongkongzhi  
Yuanli

# 热工过程

# 自动控制原理

陈绍炳 于向军 编著



东南大学出版社

# 热工过程自动控制原理

陈绍炳 于向军 编著

东南大学出版社

## 内容提要

全书共分 10 章。第 1 章介绍自动调节系统的基本概念。第 2 章介绍单变量系统的数学描述;简介基本环节及其联接方式;阐述怎样建立系统方框图以及传递函数推导方法。第 3 章通过单位阶跃响应曲线阐述热工对象基本特征;介绍三种求近似传递函数的试验方法;论述自动调节器的基本调节作用和工业调节器组成及其动态特性。第 4 章详细讨论了二阶系统的阶跃响应特点;说明稳定性与特征方程根之间关系;介绍劳斯判据判断稳定性方法。第 5 章介绍线性控制系统的根轨迹分析方法。第 6 章介绍控制系统的频域分析方法;讲述乃奎斯特判据和稳定性裕量(相位裕量和增益裕量)等概念。第 7 章介绍单回路调节系统的三种整定计算方法,选择调节器参数,以使系统具有适当的稳定性裕量。第 8 章介绍了常用的复杂控制系统及其整定方法。第 9 章介绍线性采样调节系统的基本概念和基本分析方法;介绍了分析离散系统的  $z$  变换法和脉冲传递函数。第 10 章介绍现代控制理论——状态变量分析方法基础知识;介绍线性定常系统状态方程的求解与状态转移矩阵;介绍了一种综合方法——状态反馈与极点配置法。

### 图书在版编目(CIP)数据

热工过程自动控制原理/陈绍炳,于向军编著. —南京:  
东南大学出版社,2003.8

ISBN 7-81089-338-6

I. 热... II. ①陈... ②于... III. 热力工程-自  
动控制 IV. TK32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 049660 号

东南大学出版社出版发行  
(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人:宋增民

江苏省新华书店经销 江苏省地质测绘院印刷厂印刷  
开本:787mm×1092mm 1/16 印张:17 字数:430 千字

2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月第 1 次印刷

印数:1~2800 册 定价:27 元

## 前 言

现代火力发电厂是典型的涉及热能转换和利用的大型热工过程,由于电能生产的重要性和电能不能大规模储存的特性,自动控制技术已是确保电厂安全、经济和干净生产的必需的技术手段。

自动控制理论的内容极为丰富,相应的书也很多,本书以热工生产过程为主要研究对象,介绍基本控制理论。以经典的线性理论为主要内容,应用传递函数及微分方程作为描述和分析动态系统的基本工具。本书同时介绍了线性采样系统及现代控制理论的基本描述方法。针对热工生产过程的复杂性,本书介绍了一些复杂控制系统的分析整定方法,主要是串级控制系统和前馈-反馈控制系统。

本书是作者在讲授热工过程自动控制原理和热工控制系统两门课程的基础上编写的,主要作为热能动力工程专业的必修课教材,也可作为相近专业同类课程的教材和供从事热工过程自动控制工作的工程技术人员参考。

本书是在东南大学动力工程系领导和很多老师的支持鼓励下完成的。在编写过程中,浦复良老师对全书作了仔细的审阅和修改并提出许多宝贵的意见;吕剑虹教授在本书讲义的试用过程中提出了许多好的建议;郭亚楠硕士和徐志凯硕士在书稿录入及作图方面做了许多工作。在此,谨向他们表示衷心的感谢。

本书得以顺利出版还要感谢郑家茂教授和宋增民教授的关心和帮助;感谢东南大学出版基金的资助。

由于编者的水平有限,本书在内容取材、体系安排、文字表达等方面必有不少缺点甚至错误,敬请读者批评指正。

编 者

2003年6月于东南大学

# 目 录

第 1 章 绪论	1
§ 1.1 自动控制的概念	1
§ 1.2 反馈控制的原理	2
§ 1.3 控制系统的方框图	4
§ 1.4 自动控制系统的分类	5
§ 1.5 控制系统的过渡过程	7
§ 1.6 小结	8
习题 1	8
第 2 章 线性自动控制系统的数学描述	9
§ 2.1 概述	9
§ 2.2 单变量系统的数学描述	11
§ 2.3 基本环节和环节的联接方式	21
§ 2.4 方框图变换与简单物理系统传递函数推导	31
§ 2.5 小结	40
习题 2	40
附录 2- I 拉普拉斯变换	44
第 3 章 热工对象和自动调节器的动态特性	53
§ 3.1 概述	53
§ 3.2 热工对象动态特性的特点	54
§ 3.3 由实验阶跃响应曲线求对象的近似传递函数	57
§ 3.4 自动调节器的基本调节作用	65
§ 3.5 工业调节器的动态特性	68
§ 3.6 小结	73
习题 3	74
第 4 章 线性控制系统的时域分析	76
§ 4.1 概述	76
§ 4.2 二阶系统分析	77
§ 4.3 高阶系统的瞬态响应分析	85
§ 4.4 系统的稳定性和劳斯稳定性判据	87
§ 4.5 小结	91
习题 4	91
第 5 章 线性控制系统的根轨迹分析	93
§ 5.1 根轨迹的概念	93
§ 5.2 作闭环根轨迹图的几条规则	95
§ 5.3 根轨迹作图举例	100
§ 5.4 小结	106
习题 5	106
第 6 章 控制系统的频域分析	108

§ 6.1	系统或环节输出-输入模型的频率特性描述	108
§ 6.2	基本环节的频率特性	110
§ 6.3	频率特性稳定性判据-乃奎斯特判据	115
§ 6.4	闭环系统的频率特性	128
§ 6.5	小结	135
习题 6		135
第 7 章	单回路控制系统的整定	137
§ 7.1	概述	137
§ 7.2	整定控制系统的性能指标	138
§ 7.3	使系统特征方程的主导复根的衰减指数 $m$ 为指定值的整定计算方法(常称广义频率特性计算方法)	143
§ 7.4	用根轨迹法进行整定	154
§ 7.5	控制系统的工程整定方法	167
§ 7.6	小结	174
习题 7		175
第 8 章	复杂控制系统及其整定	176
§ 8.1	单回路反馈控制系统的不足	176
§ 8.2	串级控制系统	177
§ 8.3	前馈-反馈控制系统	181
§ 8.4	小结	182
习题 8		183
第 9 章	线性采样控制系统	184
§ 9.1	概述	184
§ 9.2	信号的采样与复现	184
§ 9.3	$z$ 变换方法	191
§ 9.4	脉冲传递函数	199
§ 9.5	系统中有采样器时方框图的运算	202
§ 9.6	采样调节系统的稳定性	208
§ 9.7	连续系统的离散化	213
§ 9.8	小结	218
习题 9		218
第 10 章	状态变量分析方法基础知识	220
§ 10.1	概述	220
§ 10.2	系统的状态空间描述	220
§ 10.3	化系统的输出/输入传递函数描述为状态空间描述	226
§ 10.4	由系统的状态空间表达式求传递函数阵及系统的复合联接	236
§ 10.5	线性定常系统状态方程的求解与状态转移矩阵	240
§ 10.6	线性定常系统状态的能控性和能观测性	253
§ 10.7	线性定常系统综合的概念-状态反馈与极点配置	256
§ 10.8	小结	263
习题 10		263
参考文献		266

# 第 1 章 绪 论

## § 1.1 自动控制的概念

20 世纪人类的科学文明获得了巨大的进步,控制科学与控制技术随着控制理论与计算机技术的发展也得到了迅速的发展。自动控制技术极大地提高了劳动生产率,推动了现代工农业及国民经济各部门的巨大发展,在许多现代化科学技术部门中控制技术是不可缺少的。可以说,综合自动化水平是一个国家科学技术水平的反映。

**自动控制**的含义是:一个正在进行的过程或一个正在运行的设备不需要人的连续直接干预能自动地按预期要求进行的一切技术手段都称自动控制。自动控制面对的是一个正在进行的过程或一个正在运行的设备,反映过程进行或设备运行的各种参数都是随时间变化的,所以是一个**动态系统**。这样的过程或设备可能很大很复杂,如火力发电厂的锅炉,也可能是一个简单的加热器,或者可能是一个发酵过程或城市的交通过程。它们都是实现自动控制的对象。在过程进行或设备运行中人的干预不是直接的,但仍是需要的。所谓“预期要求”一般就是表征过程进行或设备运行性能“优劣”的**性能指标或目标函数**。因此,要使自动控制获得成效,必须对过程或设备特性有充分的了解,其中包括对有关性能“优劣”的性能指标也有充分了解,更应掌握有关的自动控制原理,包括理论以及实现的技术手段。

现代火力发电厂是典型的涉及热能转换和利用的大型热工过程,由于电能生产的重要性和电能不能大规模的储存的特性,自动控制技术已是确保电厂安全、经济和干净生产的必需的技术手段。火电厂热工过程自动控制主要包括如下内容:

(1) **自动检测**:自动地检查和测量反映生产过程运行情况的各种物理量、化学量以及生产设备的工作状况,以监视生产过程的进行情况和趋势,称为自动检测。

(2) **顺序控制**:根据预先拟定的程序和条件,自动地对设备进行一系列的操作,称为顺序控制。顺序控制也称自动操作,在发电厂中主要用于主机或辅机的启动和停止。

(3) **自动保护**:在发生事故时,自动采取保护措施,以防止事故进一步扩大或保护生产设备使之不受严重破坏,称为自动保护。

(4) **自动调节**:自动维持生产过程在规定的工况下进行,称为自动调节。

生产过程中,必须保证产品一定的数量和质量要求,同时也要保证生产的安全和经济,这就要求生产过程在预期的工况下进行。但是,生产过程总会经常地受到各种因素的干扰和影响,使运行工况发生偏离,必须通过自动调节实现正常运行的要求。因此,自动调节是最经常起作用的一种自动控制职能,它对生产过程的正常进行有很大影响。由于自动调节在生产过程自动控制中的重要作用,所以有些文献上就把自动调节称为自动控制。

控制科学和控制技术还在不断发展,一方面控制水平在不断提高,以适应更复杂,更精密和更困难的控制要求;另一方面,控制科学与控制技术的应用范围已扩展到生物、医学、环境、经济管理和其它社会生活领域。控制科学与控制技术已成为现代社会不可缺少的组成部

分,有关自动控制的知识已成为各类专业人员必须具备的基础知识。本书讨论的仅是工业过程(主要是热工过程)自动控制的一些基础理论,也就是基本的控制理论。

## § 1.2 反馈控制的原理

反馈控制是常用的控制技术。由人工完成控制任务的称人工手动控制,由一套仪器设备(包括计算机)完成控制任务的称自动控制。图 1-1 是一个简单的加热器出口温度人工手动控制的示意图。控制任务是:在满足外界负荷(热水用户的用水量)需要的前提下,希望将加热器出口水温度  $\theta$  控制在预期要求的温度  $\theta_0$  上。为了便于说明,结合图 1-1 先介绍常用术语。

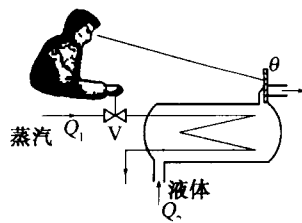


图 1-1 人工调节示意图

(1) 被控对象:被控制的生产过程称为被控对象。如图 1-1 中的加热器。

(2) 被调量(被控参数):表征生产过程是否符合规定工况的物理量称被调量或被控参数,如图 1-1 中的加热器出口水温度  $\theta$ 。

(3) 给定值:希望被调量维持的数值称为给定值或规定值。如图 1-1 中的出口水温度希望值  $\theta_0$ 。在很多情况下,给定值是不变的,在有些情况下给定值是按一定要求变化的,例如升温、升压、升速等过程中,温度、压力和速度定值就应按要求改变。

(4) 扰动:引起被调量变化的各种原因都称为扰动。在图 1-1 中可能引起出口水温度  $\theta$  变化的原因,如:热水用户的用水量  $Q_2$ (外界负荷),加热蒸汽流量  $Q_1$ ,进水温度,蒸汽温度等变化都是扰动。

(5) 控制量(或调节量):由控制(调节)作用改变去控制被调量变化的物理量称控制量(或调节量),如图 1-1 中的蒸汽流量  $Q_1$ 。

(6) 控制机构(调节机关):接受控制(调节)作用去改变控制量(调节量)的设备称控制(调节)机构,如图 1-1 中的蒸汽流量控制阀门  $V$ 。

用上述术语来表示,控制就是消除扰动的影响,使被调量恢复到给定值的过程。在图 1-1 中就是操作人员通过改变加热蒸汽流量  $Q_1$ (通过手动改变蒸汽流量调节阀  $V$  的开度  $\mu$  实现),消除各种扰动(主要是外界负荷即用户的用水量)的影响,使加热器出口温度  $\theta$  等于给定温度  $\theta_0$ 。操作人员的控制策略是:首先观测加热器出口温度  $\theta$ ,确定出口温度  $\theta$  与给定温度  $\theta_0$  的偏差的方向(是  $\theta > \theta_0$ ,还是  $\theta < \theta_0$ )和大小,决定是关小或开大蒸汽流量调节阀  $V$ ,以及应如何关小或开大蒸汽流量调节阀  $V$ ,直到使出口温度  $\theta$  等于给定温度  $\theta_0$ 。在这里,决定控制作用的是被调量  $\theta$  与给定值  $\theta_0$  的偏差,所以是按偏差(方向、大小)来控制的。同时,操作人员和被控对象之间的关系,可以用图 1-2 来表示,它表示了,在实现控制的过程中各个变量之间的关系,这种形式的图被称为方框图(图 1-2)。在这种按偏差控制的方式中,操作人员先从被控对象获得信息(被调量  $\theta$  的大小),经过判断、分析,确定控制作用又反馈到被控对象,这种方式称为**反馈控制**。从信息传输的过程看,它们构成了一个闭合回路,或形成一个闭环,所以又称**闭环控制**。

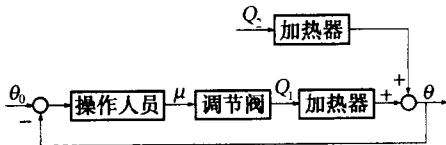


图 1-2 加热器温度人工调节方框图



反馈控制的目的是消除被调量与给定值的偏差,所以控制作用的正确方向应该是:被调量高于给定值时也就是偏差为负时控制作用应向减小方向,当被调量低于给定值时也就是偏差为正时控制作用应向加大方向,因此控制作用的方向与被调量的变化相反,也就是反馈作用的方向应该是**负反馈**,负反馈是反馈控制系统能够完成控制任务的**必要条件**。

从扰动产生(如用水量增加),使被调量变化(出口水温度降低),操作人员改变调节机关(开大调节阀开度 $\mu$ )增加蒸汽流量 $Q_1$ 使被调量最终又回到给定值( $\theta = \theta_0$ )有一个过程,这个过程称为**控制过程**或**调节过程**。在控制过程中,被调量会暂时偏离给定值,这个偏差称为**动态偏差**;而且调节过程总要经历一定的时间,这个时间称为**过渡过程时间**。显然,动态偏差的大小和过渡过程时间的长短取决于操作人员的控制经验和水平,也取决于控制作用对被调量影响的特性(也就是被控对象的特性)。有时,当操作人员控制不当时(例如根据偏差极性大幅度改变调节机关),根本无法最终实现被调量等于给定值,而是偏差越来越大不能完成控制任务。

如果用一整套自动控制装置来代替操作人员的工作,使生产过程不需要人的直接干预就能自动地完成控制任务,这就叫**自动控制**(或**自动调节**)。图1-3a就是加热器出口温度自动控制的示意图,图1-3b是该自动控制系统方框图(信息作用关系),从信号的相互关系看,是一个负反馈控制系统,以后只讨论负反馈控制系统(简称反馈控制系统)。

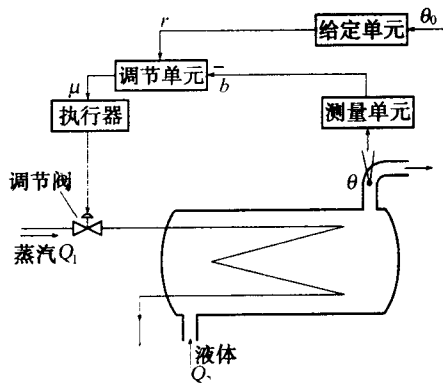


图 1-3(a) 加热器出口温度自动控制示意图

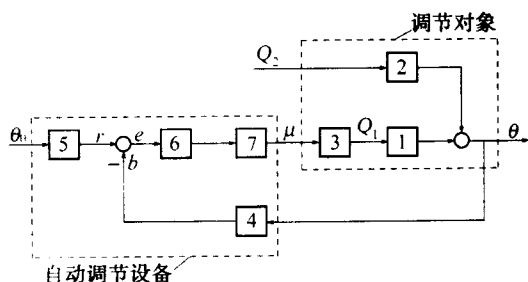


图 1-3(b) 加热器出口温度自动控制系统的方框图

组成自动控制系统所需的设备主要包括:

(1) 测量单元:用来测量被调量  $\theta$ ,并把被调量转换为与之成比例(或其它固定函数关系)的某种便于传输和综合的信号  $b$ 。

(2) 给定单元: 用来设定被调量的给定值  $\theta_0$ , 发出与测量信号  $b$  同一类型的给定值信号  $r$ 。

(3) 调节单元: 接受被调量信号和给定值信号比较后的偏差信号, 发出一定规律的调节指令  $\mu$  给执行器。

(4) 执行器: 根据调节单元送来的调节指令  $\mu$  去推动调节机构, 改变调节量。

当被调量偏离给定值后, 自动控制设备就自动地对生产过程进行控制, 直到被调量等于给定值不再进一步变化时为止。应该指出, 并不是自动控制设备一经安装就能执行控制任务、实现生产过程自动控制的。为了使自动控制系统能满意地工作, 必须研究控制系统的运动规律。研究反馈控制有关问题的学科称为反馈控制理论, 本书以后几章主要讨论反馈控制理论及其应用。

### § 1.3 控制系统的方框图

在前面, 我们已经用方框图表示了加热器出口温度人工控制和自动控制时的信号传输关系。在控制原理中, 将经常用方框图来表示信号的传输关系。这里作一必要的说明。

控制系统的方框图是用图解的方法表示各部分信号的传递关系。方框图中的每个方框表示实现信号传递的基本单元, 称环节, 方框中箭头的方向表示信号传递的方向, 对每一个方框来说, 箭头指向方框的表示输入信号, 箭头离开方框的表示输出信号。它们都是时间的函数。如图 1-4 所示:

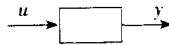


图 1-4 方框图中的一个环节

$u$  表示输入信号,  $y$  表示输出信号。 $u$  是引起  $y$  变化的原因,  $y$  是  $u$  作用的结果。

控制系统的方框图可以根据需要进行合并或分解。例如, 在图 1-3b 中, 如果将调节阀的开度  $\mu$  作为输入信号, 出口温度  $\theta$  作为输出信号, 那么方框 3 和 1 可以合并成一个方框, 也可将调节器 6 及执行器 7 合并成一个方框, 它的输入为偏差  $e$ , 输出为  $\mu$ 。这样可将方框图 1-3b 变成图 1-5。

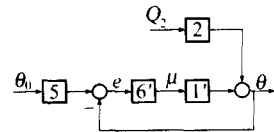


图 1-5 方框图

在上面已画出的方框图中, 还用到下面两个符号, 如图 1-6 所示。

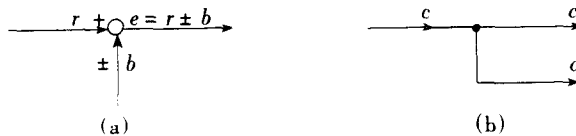


图 1-6 相加点和分支点符号

(1) 相加点符号: 图 1-6a, 表示  $e = r \pm b$ 。信号  $e$  是信号  $r$  和  $b$  的代数相加, 而且具有相同的量纲。

(2) 分支点符号: 图 1-6b, 表示一个信号送到两个地方。

以后, 为了简化, 只在信号相减的地方(图 1-6a) 标上“-”。

## § 1.4 自动控制系统的分类

生产过程的自动控制可以完成各种控制任务,组成各类自动控制系统。随着控制科学与控制技术的发展,出现了许多新型的控制系统,因此,很难确切地列举它们的全部分类,这里仅介绍几种具有代表性的分类。

### 一、按所要控制的变量分类

根据自动控制系统中所要控制的变量类型可以分成两类:

#### 1. 断续控制系统

如果所要控制的变量是开关量(开或关,大或小,有或无),则称为断续控制系统。例如:控制系统按事件的逻辑关系来决定控制变量的开或关就是逻辑控制系统;如果控制系统根据规定的条件和程序来决定控制变量的开或关,就是顺序控制系统,它们都是断续控制系统。断续控制系统主要用于设备的自动启、停和自动保护系统以及周期性工作中。

#### 2. 连续控制系统

控制系统所要控制的变量是连续的变量,称为连续控制系统,各种过程参数的自动控制系统都是连续控制系统。

### 二、按信号的馈送方式分类

#### 1. 反馈控制系统

这是最基本且常见的控制系统,控制是按被调量与给定值的偏差起作用的,也称按偏差控制。信号形成一个闭合回路,所以又称闭环控制系统。前面介绍的热热水加热器出口温度控制系统就是一个典型的反馈控制系统。扰动作用后要等到被调量发生变化并与给定值形成偏差才产生控制作用,所以从消除扰动的影响来看,控制作用是不及时的,但它时刻观测被调量,所以可以保证被调量不会有太大的偏离。其框图可用图 1-3b 表示。

#### 2. 前馈控制系统

直接根据扰动决定控制作用,可用图 1-7 的框图表示。由于这样的控制系统没有被调量的反馈信号,没有形成闭合回路,又称开环控制。扰动作用后,一方面通过被控对象会引起被调量变化,但同时由前馈控制器产生控制作用,力图消除扰动的的影响,所以,控制作用是很及时的。在理想情况下,可以做到在扰动作用下使被调量不变。但是,由于开环控制,控制效果无法检查,所以调节结束后,不一定能保证被调量等于给定值,同时为了实现前馈控制,扰动信号必须是可测量的。

前馈控制作用常用于对主要外部扰动进行抑制,以减少动态偏差。

#### 3. 前馈 - 反馈控制系统

在反馈控制系统的基础上加上主要扰动的前馈控制构成了前馈 - 反馈控制系统,可用图 1-8 的框图表示。

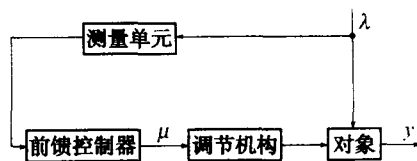


图 1-7 前馈控制系统

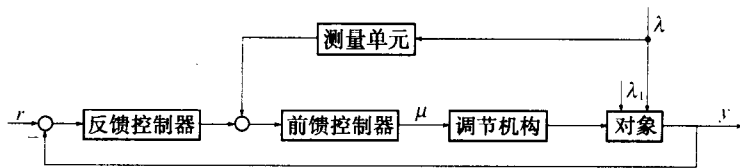


图 1-8 前馈 - 反馈控制系统

图中,  $\lambda$  为主要的扰动,  $\lambda_1$  为其它外部扰动。这样的控制系统一方面可以快速地通过前馈控制器消除主要的外部扰动的影响(常称扰动补偿作用);同时,由反馈作用保证被调量  $y$  在允许的范围内。前馈 - 反馈控制系统是实际工业生产过程最常用的控制系统。

### 三、按给定值信号的特点分类

根据生产过程要求保持的被调量给定值的不同类型可分为:

#### 1. 恒值控制系统

在运行时被调量的给定值恒定不变,也就是被调量保持为某一固定数值。这是热工过程自动调节中应用最多的一种自动控制系统。

#### 2. 程序控制系统

被调量的给定值是预定的时间函数。例如,在汽轮机启动时,希望转速随时间成一定的函数关系变化,这就要求用程序控制系统。

#### 3. 随动控制系统

被调量的给定值决定于某些外来的因素而不是预先拟定的。例如:在汽轮机启动过程中,采用计算机实现机组的最优升速控制。汽机转速的升速率不是预先给定的而是通过计算机按汽温(主蒸汽、再热蒸汽)、汽缸壁温等具体情况再根据机组当时的差胀、振动等情况确定的,它是某个外部条件的控制函数。这样的控制系统称为随动控制系统。

#### 4. 比值控制系统

这种系统维持两个变量之间的比值为一定数值。例如:在锅炉的燃烧过程自动控制中,要求空气量随燃料量的变化而成比例变化,这样才能保证经济燃烧。

### 四、其它分类

自动控制系统还可根据其它特点分类,例如:

#### 1. 时间连续系统和采样控制系统

在反馈控制系统中,所有变量都是连续的时间函数,如被调量是连续地测量和连续地进行控制的系统称为时间连续系统;而每隔一段时间测量一次被调量和给定值的偏差并对生产过程进行一次控制的系统称为采样控制系统。采样控制系统中有一个或一个以上变量是在时间上离散的,而它的工作原理则与时间连续系统基本相同。

#### 2. 线性系统和非线性系统

控制系统可以(或近似可以)用线性方程来描述的系统称为线性控制系统,而必须用非线性方程来描述的系统称为非线性控制系统。

此外,还有其它自动控制系统的分类方法。在热工过程自动控制中应用最多的是前馈 - 反馈控制系统,最基本的是单回路线性反馈控制系统。

## § 1.5 控制系统的过渡过程

一个常见的恒值控制系统可以用图 1-9 的框图表示。

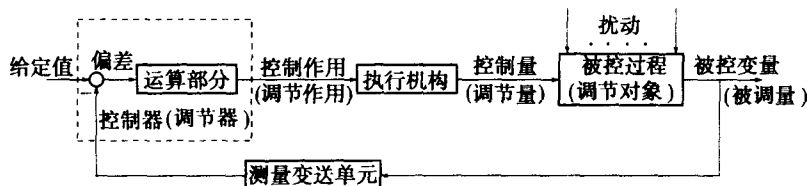


图 1-9 单回路反馈控制系统

如果系统处于某一起始平衡状态,即各个变量都不随时间变化,这种状态也称**静态**或**稳态**。当有扰动发生时系统的平衡将被破坏,被调量发生变化,通过控制系统的工作经过一个控制过程,整个系统达到了一个新的平衡状态,被调量又等于给定值,这个过程就是控制的**过渡过程**。

一个控制系统在不同类型的扰动作用下,它的控制过渡过程是不同的。为了便于比较过渡过程,从而判断控制系统的工作品质,通常选定一些典型的扰动信号,这样,可以根据过渡过程评价系统的工作品质。在热工过程中常用的典型输入扰动信号采用单位阶跃函数,其数学表达式为:

$$u(t) = \mathbf{1}(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

其图形如图 1-10 所示,这里的时间  $t = 0$  表示在该时刻前系统处在稳态。

在给定值为单位阶跃函数扰动下,系统的过渡过程有如图 1-11 所示四种基本形式。图(a)为**衰减振荡过程**,被调量  $y$  经过一段时间振荡后能很快趋向一个新的平衡状态,这种过渡过程是比较理想的。图(b)是**非周期过程**,也称**单调过程**,被调量  $y$  没有振荡,单调地趋向于一个新的平衡状态,这种过程一般时间比较长。这两种过程都能达到新的平衡状态,称**稳定过程**。图(c)为**等幅振荡**,被调量  $y$  不停地等幅振荡,它令执行机构反复动作,达不到新的平衡状态。这种过程称为**临界稳定过程**。图(d)中被调量  $y$  不但不能达到新的稳定,而且变化幅度越来越大,是一个**扩大振荡过程**,这是绝对不允许在生产过程中出现的不稳定过程。

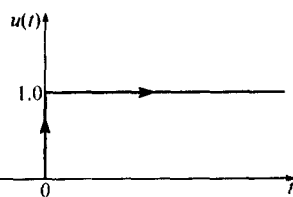


图 1-10 单位阶跃函数

一个自动控制系统调节过程的好坏在稳态下是很难判断的,只有在扰动作用下的调节过渡过程中才能加以评价。即使像图 1-11a 和图 1-11b 这样的过程,只根据是否为稳定的过程也很难区分品质的优劣。一般说,一个调节过程的优劣,除了稳定是必须的,还要考虑过渡过程中被调量的准确性,即与给定值的偏差的大小,以及过渡过程的快速性,即整个过程的时间长短。所以必须综合稳定、准确和快速的要求来分析与设计控制系统,使生产过程实现高品质的自动控制。

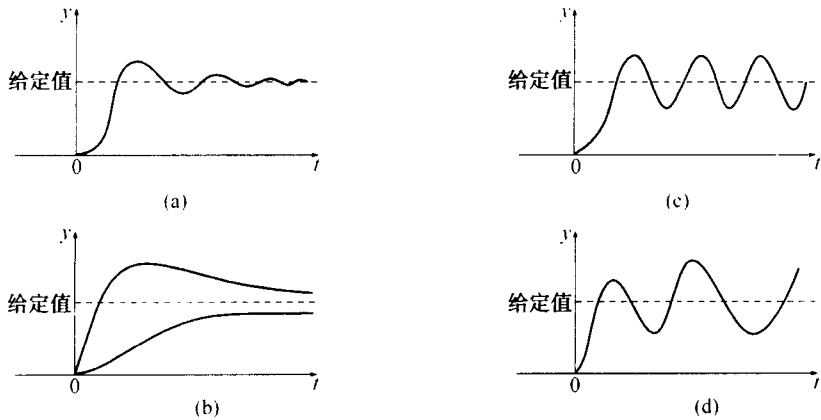


图 1 - 11 过渡过程的四种基本形式

## § 1. 6 小 结

本章介绍自动控制系统的基本概念。

自动调节是生产过程自动控制的主要组成部分。在生产过程中主要应用反馈控制系统，它根据被调量和给定值的偏差进行调节，调节的目的是使被调量等于给定值。

控制系统的方框图就是用图解的方法表示系统中各个变量之间的相互关系，方框图可以根据需要进行合并或分解。

自动控制系统有很多分类方法。在热工过程自动控制中应用最多的是前馈 - 反馈控制系统，最基本的是单回路线性反馈控制系统。

一个自动控制系统调节过程的好坏在稳态下是很难判断的，只有在扰动作用下的调节过渡过程中才能加以评价。控制系统的过渡过程有衰减振荡过程、非周期过程、等幅振荡过程和扩大振荡过程四种，其中前两种过程为稳定过程，第三种过程为临界稳定过程，第四种过程为不稳定过程。一个控制系统的控制质量可以综合稳定性、准确性和快速性三方面的要求来衡量。

### 习 题 1

1 - 1 日常生活中有许多开环和闭环控制系统，试举几个例子并说明工作过程。

1 - 2 图 1 - 1 所示的加热器出口温度控制中，蒸汽流量与加热水量变化相同数量时，对出口温度的影响是否相同？为什么？

1 - 3 在加热器出口温度控制中，当出口温度等于给定温度时，控制作用的方向是开大蒸汽流量调节阀，这是一个什么样的系统，还能完成控制任务吗？为什么？

1 - 4 为什么负反馈是反馈控制系统可以使用的必要条件而不是充分条件？

1 - 5 如果图 1 - 1 的加热器出口温度是人工控制，不同操作人员控制的结果会出现图 1 - 11 中的四种过渡过程吗？为什么？

## 第 2 章 线性自动控制系统的数学描述

### § 2.1 概 述

自动控制理论研究的问题主要有两个：

(1) 一个给定的自动控制系统它是如何运动的,它的运动具有哪些性质和特性?这类问题称为**系统分析**。例如,给定一个自动控制系统,要研究在扰动作用下,系统中的各个变量是如何变化的,或者在瞬间的扰动作用下,系统又是如何变化的,它们具有什么特征。

(2) 如何设计一个控制系统或如何控制系统的运动使它具有预先要求的性质与特征?这类问题称为**系统综合**。例如,如何选择系统中的参数,使图 1-9 所示的反馈控制系统在给定值单位阶跃函数扰动下具有如图 1-11a 那样的过渡过程?

显然,只有在系统分析的基础上才能对系统进行综合。系统综合是生产过程自动控制系统能够具体实现的条件。要解决上面两个问题,都离不开对表征系统运动的所有参数变量及它们之间关系的充分了解,并用数学形式进行描述。这就是常说的必须建立系统的数学模型。建立数学模型是控制原理的基础。

#### 一、动态系统

一个动态系统可以用图 2-1 示意。

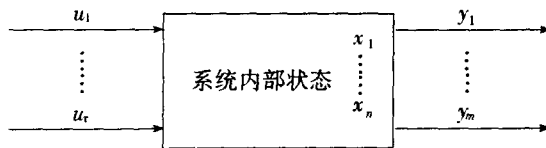


图 2-1 动态系统示意

其中： $u_1, u_2, \dots, u_r$ ——外界对系统的扰动,也就是动态系统的**输入变量**,是时间的函数；

$y_1, y_2, \dots, y_m$ ——系统对外界的影响,也就是动态系统的**输出变量**,也是时间的函数；

$x_1, x_2, \dots, x_n$ ——系统内部联系输入和输出的**状态变量**,也是时间的函数。

**动态系统**是指有特定输入和输出设备或装置的一种模型。在第 1 章中介绍的热热水加热器出口温度控制系统中被控对象(加热器)和自动调节器都可看成动态系统,而整个反馈控制系统也可看成一个动态系统。**动态系统简称系统**。在动态过程中系统的输入、输出和状态都是时间的函数,都是变量。它们之间的关系就称系统的**动态特性**,动态特性的数学描述(数学表达式)就称**动态系统的数学模型**,一般情况下,动态特性与动态模型是指的同一含义。

如果动态系统只有一个输入变量和一个输出变量就称系统为**单变量系统**或**单输入-单输出系统(SI-SO)**。如果动态系统有两个或两个以上的输入变量和两个或两个以上的输

出变量就称系统为**多变量系统或多输入 - 多输出系统(MI - MO)**。

## 二、动态系统的数学模型

系统的动态特性可以用两类方法描述：

### 1. 系统的输出 - 输入描述

不考虑系统内部的状态  $x$ ，只建立系统输出变量  $y$  与输入变量  $u$  之间的数学关系。这类动态模型根据需要可以有多种形式，彼此之间可以互相转换，适用于不同的系统分析与综合方法时使用。系统的输出 - 输入描述只涉及系统端部特性，不反映系统内部的特性，所以从本质上说这样的描述并不能反映动态系统的全貌。

### 2. 系统的输入 - 状态 - 输出描述

这种描述方法不但反映系统的端部特性而且还反映系统内部状态特性，是系统特性的完整表达，这样的描述就是系统的**状态空间描述**，在此描述基础上可以用现代控制理论的状态空间分析方法对系统进行分析 and 综合。

系统的两种描述方法通过一定的方法可以互相转换。关于系统的状态空间描述将在第 10 章中介绍，本章只介绍系统输出 - 输入描述的有关问题。

## 三、建立系统动态数学模型的方法

系统的动态数学模型是系统分析与系统综合的基础，模型的正确性直接影响到控制系统的设计、分析和综合结果的准确性与可靠性，也直接影响到控制任务的完成。常用的建模方法有下面几种：

### 1. 分析建模法

它以描述宏观物理现象的力学、热力学、传热学、流体力学及电工学等基本定律为基础，由系统的结构参数用理论分析的方法建立系统中各变量之间关系的数学表达式即数学模型。分析法建模时，一般常将系统按一定规则分成多个彼此相关的子系统(或环节)，再分别建立子系统(或环节)的变量之间的关系，最终确定整个系统的模型。一般说，分析法建模只适用于过程机理十分清晰的系统，而且为使模型不太复杂常常作必要的简化假定。分析法建模所得到的模型还需实际验证。

### 2. 试验建模法

试验建模法是人为地在系统的输入端加上某种测试信号(系统激励信号)，然后测量系统的输出信号，用数学方法求出系统的动态数学模型。有时，也可以不加输入信号而利用系统运行时各变量的实际运行数据用统计的方法建立系统的动态数学模型。

试验建模法已发展成一门完整的学科分支，就是“系统辨识与参数估计”，它涉及到许多理论问题。对热工过程来说，由于过程相对较慢(时间数量级)，常常采用阶跃信号、正弦信号及伪随机二进制信号作为试验输入信号，然后再测量系统的输出信号，用一定的数学方法得到系统的动态数学模型。

### 3. 综合法

将上述两种方法相结合形成的新方法。



## § 2.2 单变量系统的数学描述

只有一个输入变量和一个输出变量的系统(或系统中的一个环节),其输入  $u$  和输出  $y$  之间的数学关系就是单变量系统的输出 - 输入描述。

### 一、稳态模型和动态模型

#### 1. 稳态模型

系统在稳定状态下,即输入  $u$  和输出  $y$  各阶导数都为零(或  $t \rightarrow \infty$ )时,系统的输出  $y$  和输入  $u$  的关系称系统的**稳态模型**或**静态模型**,又可称**稳态特性**或**静态特性**。这时,变量与时间无关。所以稳态模型(或特性)可以用表述输出 - 输入变量关系的代数方程描述。常可写成:

$$y = f(u) \quad (2-1)$$

或者可以用表示输出  $y$  和输入  $u$  关系的数据表格,或者还可在输入  $u$  为横坐标输出  $y$  为纵坐标的直角坐标上用  $y$  与  $u$  的关系曲线描述。显然,三种描述输出  $y$  与输入  $u$  稳态关系的方法是可以互相转换的。其中在输出  $y$  与输入  $u$  的关系式确定后,代数方程中的各项系数可以为常数(或仅是时间  $t$  的函数),这些用系数表示的模型称**参数模型**,而表格形式或曲线形式的模型称**非参数模型**。

例如,图 2-2a 表示了一个直接安装在具体管路系统中的调节阀,其输入为阀门的开度  $\mu$ ,输出为管路中的液体流量  $Q$ ,在稳定状态下,可以写出如下关系:

$$(Q - Q_0)^2 = K\mu \quad (2-2)$$

式中:  $Q_0$ ——在  $\mu = 0$  时阀门的漏流量;

$K$ ——常数,其数值取决于阀门的结构、管路特性及介质性质等。

其输出 - 输入关系也可用图表示,这就是阀门的特性曲线。这里,表达式(2-2)是参数模型,它有参数  $K$  和“2”;曲线就是非参数模型。

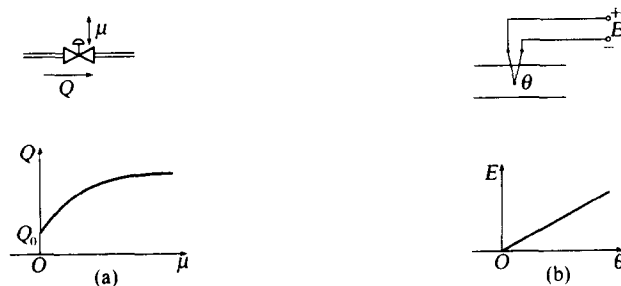


图 2-2 静态特性举例

又如图 2-2b 表示了用热电偶测量介质温度的过程,输出信号为热电偶的热电势  $E$ (mVDC),输入信号为被测介质温度  $\theta$ ( $^{\circ}\text{C}$ )。在稳定状态下,它们的关系为(假定热电偶冷端为零度):

$$E = \gamma\theta \quad (2-3)$$

式中:  $\gamma$ ——常数(mV/ $^{\circ}\text{C}$ ),取决于热电偶的分度号,直线就是热电偶的特性曲线。