

普通高等教育“十一五”规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



ZIDONG KONGZHI YUANLI  
**自动控制原理**

巨林仓 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

# 自动控制原理

普通高等教育“十一五”规  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHU

TP13/220

2007

ZIDONG KONGZHI YUANLI  
**自动控制原理**

主 编 巨林仓  
编 写 杨清宇 张 钊 刘齐寿  
主 审 于希宁



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

## 内 容 提 要

本书比较全面地介绍了自动控制理论的基本概念。阐述了控制系统数学模型的建立方法、时域分析法、频域分析法,简要介绍了控制系统的根轨迹法;介绍了控制系统校正装置、PID控制系统的基本设计方法,线性定常系统状态空间分析和设计。结合各部分内容,给出了用 MATLAB 进行控制系统分析和辅助设计的示例。

本书可作为高等学校能源动力类专业“自动控制原理”课程教材,也可供相关科技人员参考使用。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理/巨林仓主编. —北京:中国电力出版社, 2007  
普通高等教育“十一五”规划教材  
ISBN 978 - 7 - 5083 - 5416 - 3

I. 自... II. 巨... III. 自动控制理论—高等学校—教材  
IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 045501 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2007 年 8 月第一版 2007 年 8 月北京第一次印刷  
787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.5 印张 478 千字  
印数 0001—3000 册 定价 29.80 元

## 敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

# 前 言

随着生产过程高度文明和全面信息化的发展,生产过程的自动化水平在不断提高,自动控制作为自动化最基本、最重要的内容已被众多的专业领域所重视。

本书根据能源动力类及其相关专业的“自动控制原理”教学的需要而编写,可作为高等学校能源动力、机械类专业自动控制原理的教材,也可作为相关工程技术人员的参考书。

本书在历年能源动力类“自动控制原理”课程教学讲稿的基础上,根据教学改革的需要而编写,力求做到自动控制的基本概念准确,基本原理清晰,重点突出。

全书共分为六章和三个附录。第一章介绍自动控制的基本概念;第二章介绍控制系统的数学模型,包括微分方程、传递函数、结构图和状态空间模型;第三章介绍控制系统的时域分析法,同时简要介绍控制系统的根轨迹法;第四章介绍控制系统的频域分析法;第五章介绍基于根轨迹和伯德图的超前、滞后、滞后—超前校正装置的设计方法,PID控制系统的设计方法;第六章介绍利用状态空间法对线性定常系统进行分析 and 设计的方法。每章都有利用MATLAB进行控制系统分析和辅助设计的示例。三个附录分别介绍了拉普拉斯变换、MATLAB基本概念和本书部分习题的参考答案。

西安交通大学巨林仓编写了第一章、第二章第一节~第六节、第三章、第四章、附录A和附录B内容,并对全书进行了统稿。西安交通大学杨清宇编写第六章、第二章第七节、第八节,并对第三章部分内容进行了修改。西安交通大学张钊编写第五章第一节~第四节内容,西安交通大学刘齐寿编写第五章第五节~第七节内容。张钊对第一章~第五章的习题进行了选择和验算,杨清宇进行了第六章习题的选择和验算。

华北电力大学于希宁教授对书稿进行了认真审阅,提出了宝贵的修改意见,在此表示诚挚的感谢。

尽管作者对于本书书稿进行了认真的修改,但由于作者水平所限,书中的不足之处在所难免,真诚希望读者批评指正。

编者

2007年6月

# 目 录

## 前言

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| <b>1 自动控制的基本概念</b> .....       | 1   |
| 1.1 自动控制的基本概念 .....            | 1   |
| 1.2 反馈控制的基本原理 .....            | 2   |
| 1.3 动态特性 .....                 | 3   |
| 1.4 对自动控制系统性能的基本要求 .....       | 5   |
| 1.5 自动控制系统的类型 .....            | 7   |
| 1.6 控制系统示例 .....               | 10  |
| 1.7 本书的体系结构 .....              | 12  |
| 习题 .....                       | 12  |
| <b>2 控制系统的数学模型</b> .....       | 15  |
| 2.1 控制系统的数学模型 .....            | 15  |
| 2.2 物理装置数学模型推导 .....           | 21  |
| 2.3 控制系统的典型环节 .....            | 32  |
| 2.4 控制系统的方框图 .....             | 40  |
| 2.5 控制对象的动态特性 .....            | 48  |
| 2.6 自动控制器 .....                | 53  |
| 2.7 控制系统的状态空间表达式 .....         | 57  |
| 2.8 MATLAB 下控制系统的模型表示 .....    | 64  |
| 习题 .....                       | 69  |
| <b>3 控制系统的时域分析</b> .....       | 75  |
| 3.1 稳定性分析 .....                | 75  |
| 3.2 瞬态响应分析 .....               | 82  |
| 3.3 二阶系统的瞬态响应 .....            | 85  |
| 3.4 高阶系统的瞬态响应 .....            | 93  |
| 3.5 线性定常系统状态方程求解 .....         | 97  |
| 3.6 误差分析 .....                 | 103 |
| 3.7 PID 各控制作用对系统性能的影响 .....    | 108 |
| 3.8 控制系统的根轨迹法 .....            | 114 |
| 3.9 用 MATLAB 进行控制系统的时域分析 ..... | 121 |
| 习题 .....                       | 130 |
| <b>4 控制系统频域分析</b> .....        | 135 |
| 4.1 频率特性 .....                 | 135 |

|             |                         |            |
|-------------|-------------------------|------------|
| 4.2         | 频率特性的表示法                | 137        |
| 4.3         | 基本因子的频率特性               | 139        |
| 4.4         | 开环系统的频率特性图              | 150        |
| 4.5         | 用频率特性分析系统的稳定性           | 155        |
| 4.6         | 闭环系统频率特性与动态性能之间的关系      | 164        |
| 4.7         | 用 MATLAB 绘制频率特性图        | 171        |
|             | 习题                      | 177        |
| <b>5</b>    | <b>控制系统设计和校正</b>        | <b>182</b> |
| 5.1         | 概述                      | 182        |
| 5.2         | 串联校正装置                  | 184        |
| 5.3         | 控制系统设计的根轨迹法             | 188        |
| 5.4         | 控制系统设计的频率响应法            | 194        |
| 5.5         | 反馈(并联)校正                | 199        |
| 5.6         | 单回路 PID 控制系统设计          | 202        |
| 5.7         | 复合控制系统                  | 209        |
|             | 习题                      | 217        |
| <b>6</b>    | <b>线性控制系统的状态空间分析与设计</b> | <b>221</b> |
| 6.1         | 能控性和能观测性                | 221        |
| 6.2         | 状态反馈与极点配置               | 234        |
| 6.3         | 状态估计与状态观测器              | 240        |
| 6.4         | 用 MATLAB 进行状态空间分析       | 249        |
|             | 习题                      | 253        |
| <b>附录 A</b> | <b>拉普拉斯变换</b>           | <b>257</b> |
| A.1         | 复变量和复变函数                | 257        |
| A.2         | 拉普拉斯变换                  | 258        |
| A.3         | 拉普拉斯变换定理                | 263        |
| A.4         | 拉普拉斯反变换                 | 268        |
| A.5         | 用拉普拉斯变换法解线性微分方程         | 273        |
| <b>附录 B</b> | <b>MATLAB 基础知识</b>      | <b>276</b> |
| B.1         | MATLAB 基本功能             | 276        |
| B.2         | MATLAB 基本操作             | 277        |
| B.3         | MATLAB 绘图               | 282        |
| B.4         | 矩阵、向量运算                 | 286        |
| B.5         | 微分方程数值解                 | 292        |
| B.6         | MATLAB 数据的导入和导出         | 294        |
| <b>附录 C</b> | <b>习题参考答案</b>           | <b>296</b> |
|             | <b>参考文献</b>             | <b>306</b> |

## 1 自动控制的基本概念

在工程和科学技术的发展过程中,自动控制起到了极为重要的作用。无论是机器人、宇宙飞船、导弹制导、现代工业生产过程,还是日常生活中的冰箱、空调等应用场合,自动控制都已经成为不可缺少的重要组成部分。

自动控制理论和技术的不断发展,不仅使人们从繁重的体力劳动和大量的重复性手工操作中解放出来,而且可以提高生产率和产品质量,保证生产设备和人身安全。因此,广大的工程技术人员和科学工作者都应该具备一定的自动控制知识。

### 1.1 自动控制的基本概念

生产过程的操作和控制可分为人工控制和自动控制。用人工实现生产工艺过程需要的操作叫人工控制,而根据人工控制的思想,由自动控制装置完成的操作过程则称为自动控制。

图 1.1.1 为汽包锅炉水位自动控制系统示意图。在控制理论术语中,被控制的生产过程或设备称为控制对象(被控对象、受控对象),如图 1.1.1 所示的汽包及进出口管道。通过控制所要维持的工艺参数称为被控量,如图 1.1.1 所示的汽包水位  $h$ 。被控量所要保持的数值称为给定值(设定值),如汽包水位的给定值  $h_0$ 。对被控量的控制一般都是通过改变参与生产过程的某些物质的流量或能量来实现的。因此在生产设备上必须装有用来改变进入受控对象的物质或者能量的装置,这种控制装置称为控制机关,如给水调整门。改变控制机关的位置从而改变控制量的作用称为控制作用量,如给水流量。除控制作用量外,引起被控量变化的其他因素统称为扰动。因此,控制也就是通过控制机关的动作,改变控制作用量来抵消扰动对被控量的影响,从而使被控量等于给定值或与给定值的偏差保持在允许的范围

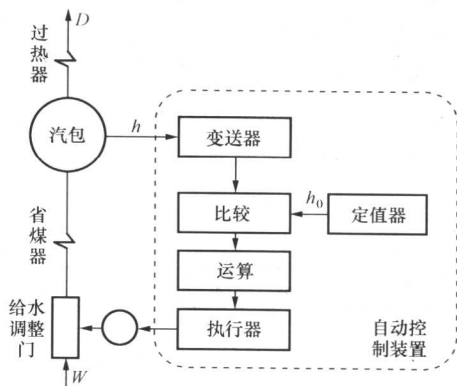


图 1.1.1 汽包锅炉水位自动控制系统

用于实现自动控制的装置称为自动控制装置。从自动控制的要求来看,自动控制装置由以下三部分组成。

(1) 测量变送部件(测量变送器):用来测量被控量。把物理参数(如液位、温度、压力、流量等)转换成某种便于远距离传送,并与被控量成比例(或某种确定的函数关系)的测量信号。

(2) 运算部件(控制器):接受变送器来的被控量测量信号,并把它与给定值进行比较。

当被控量与给定值有偏差时,产生一个反映偏差方向(正或负)和大小的信号。根据这个偏差信号按照预先设计的规律(如比例、积分、微分等)进行运算,并根据运算结果改变控制信号。这个运算部件也就是常说的自动控制器(简称控制器)。控制器中通常附有一个可调的定值器用于确定给定值,运行人员可以根据生产过程的要求在定值器上预先设置好给定值。

(3) 执行机构:按照控制器发出的控制信号使控制机关动作,改变控制作用。

把自动控制装置和受控对象连接在一起就构成了一个自动控制系统。在自动控制系统中,为了得到好的控制效果,自动控制装置应根据人们掌握的对象特性和积累的操作经验来设计和调整。

## 1.2 反馈控制的基本原理

### 1.2.1 控制系统方框图

自动控制系统中,控制对象和控制装置是通过信号的传递相互连接起来的。在图 1.1.1 所示的给水自动控制系统中,当外部负荷变化引起蒸汽流量改变时,汽包水位的变化通过变送器转换成自动控制器能够接受的统一信号(如电动控制器所采用的电流或电压信号)。在控制器中,反映被控量变化的电流或电压信号首先与代表给定值的电流或电压信号进行比较,得到一个偏差信号。然后按预定的运算规律对偏差信号进行运算,得到所需的控制信号。该控制信号送到执行机构,用于调整给水控制阀,改变进入锅炉的给水流量,以抵消蒸汽流量变化对汽包水位产生的影响。锅炉给水自动控制系统的这一信号传递关系,可用图 1.2.1 所示的方框图来表示。

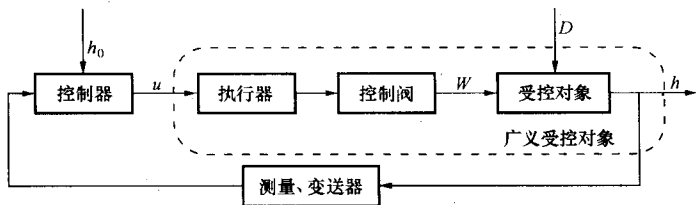


图 1.2.1 锅炉给水自动控制系统方框图

在图 1.2.1 中,每一个小方框均代表自动控制装置和控制对象的一个部件或几个部件的组合,称之为环节。环节之间带有箭头的连线表示信号的传递途径和方向。每一环节既有“输入信号”,也有“输出信号”,分别称为

环节的输入(量)和输出(量)。输入量和输出量之间存在着一定的因果关系。方框图中的环节并不代表部件或设备的具体结构,而是代表这个部件或设备将输入信号转变为输出信号的单向传递关系。也就是说,从每一个环节本身来看,作用永远沿着输入量到输出量这一方向进行,而没有相反方向的作用。

方框图清楚地表明了控制系统控制过程中各个信号之间的单向因果关系。因此可以研究每个环节的特性,然后在此基础上研究整个控制系统的特性。

同一个控制系统可以画出多种不同形式的方框图。画方框图的原则是要能正确地表示出信号之间的连接关系,可繁可简。如图 1.2.1 所示的锅炉给水自动控制系统方框图,可以按虚线框把执行器、控制阀和控制对象用一个环节表示,称之为广义控制对象(也简称为控制对象),则可画出图 1.2.2 所示的方框图。

### 1.2.2 反馈控制系统

在图 1.2.2 中也采用了自动控制原理中常用的变量表示符号。其中： $c(t)$  为被控量（也称系统输出）； $r(t)$  为给定值（也称设定值，或给定输入）； $d(t)$  为扰动量（也称扰动输入）； $u(t)$  为控制量。方框图 1.2.2 清楚地表示了控制系统输出 [被控量  $c(t)$ ] 和输入 [扰动量  $d(t)$  和给定值  $r(t)$ ] 之间的变化关系。

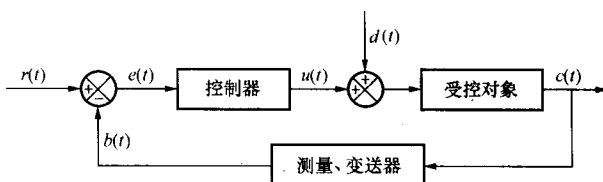


图 1.2.2 简化的自动控制系统方框图

在图 1.2.2 中，“ $\otimes$ ”为加法器，也称合点，输入量相加或相减用“+”或“-”标在 $\otimes$ 内。图中的“ $\perp$ ”称分点，它表示经过该分点后，信号沿两条路线传递，而且两条路线上的信号都与输入分点的信号相等。

在图 1.2.2 中，从系统输出  $c(t)$  引出的信号，先经过测量变送器，再经合点，反馈到控制器，该信号  $b(t)$  称为反馈量（简称反馈）。该系统中的反馈量以削弱（取负号）控制器输入信号的方式起作用，因此也称为负反馈。

反馈量  $b(t)$  与给定值  $r(t)$  的偏差  $e(t)$  称为误差，即

$$e(t) = r(t) - b(t)$$

从信号的连接关系来看，该自动控制系统的信号流向构成一个闭合回路，因而也称闭环控制系统。这是最简单的自动控制系统，或称单回路自动控制系统。

## 1.3 动态特性

自动控制系统中，控制对象和控制器的信号随时都在相互作用着，但控制系统可能出现两种状态。当被控量等于给定值，且控制系统中的各信号都处于平衡状态时，称为静态或稳态。一旦由于某种原因使系统受到扰动，被控量不等于给定值时，控制器进行控制，称系统进入动态（过程）或瞬态（过程）。在动态过程中，控制器不断根据被控量与给定值的偏差来调整作用量，直到被控量等于给定值，当系统中各信号都达到新的平衡状态时，系统又进入静态。控制系统就是这样从静态受到扰动后进入动态，经过控制后又进入新的静态周而复始地工作。衡量自动控制系统品质优劣的主要标准是动态过程中各个参数的变化情况，因此动态特性是自动控制系统分析和设计的基础。

控制系统在初始平衡状态下受到某一时间函数  $x(t)$  的输入作用时，其输出响应将是另一个时间函数  $y(t)$ 。 $x(t)$  与  $y(t)$  之间存在着某种因果关系，这种因果关系便是系统的动态特性。系统动态特性的定义也适合于系统中的元件、部件、控制器或控制对象等。

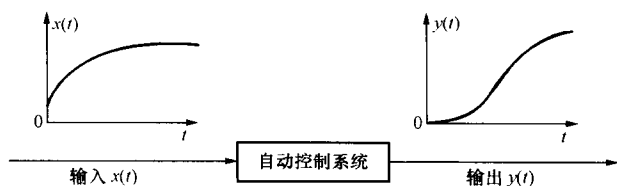


图 1.3.1 自动控制系统动态特性的图示法表示

动态特性有多种表示法，最直观的表现方法是图示法，如图 1.3.1 所示。自动控制系统在任意时间函数  $x(t)$  的输入扰动下，其输出为时间函数  $y(t)$ 。这里  $x(t)$  与  $y(t)$  之间的关系就表示了自动控制系统的

动态特性,但是具体是什么样的关系不甚明了。既精确又便于分析动态特性的表示方法是数学模型,如动态方程(微分方程)、传递函数、频率特性、状态方程、差分方程等,这些模型将在后面的章节中陆续介绍。

分析动态特性时,最常用的输入函数是阶跃函数、斜坡函数、抛物线函数、脉冲函数和正弦函数。

### 1. 阶跃函数

阶跃函数的数学表达式为

$$x(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ x_0 & t \geq 0 \end{cases} \quad (1.3.1)$$

式中:  $x_0$  称为阶跃幅值。

阶跃函数是测试动态特性时应用最多的输入函数,阶跃函数具有图 1.3.2 所示的时间变化特性。

幅值  $x_0=1$  的阶跃函数称为单位阶跃函数,用  $1(t)$  来表示。幅值为  $x_0$  的阶跃函数可以写成  $x_0 \cdot 1(t)$ 。用  $1(t-t_0)$  表示跃变发生在  $t=t_0$  时刻、幅值为 1 的阶跃函数。从而发生在  $t=t_0$  时刻、跃变幅值为  $x_0$  的阶跃函数可表示成  $x(t) = x_0 \cdot 1(t-t_0)$ , 即

$$x(t) = x_0 \cdot 1(t-t_0) = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ x_0 & t \geq t_0 \end{cases} \quad (1.3.2)$$

### 2. 斜坡函数

斜坡函数如图 1.3.3 所示,其数学表达式为

$$x(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ vt & t \geq 0 \end{cases} \quad (1.3.3)$$

斜坡函数表示从  $t=0$  时刻开始,以恒定速度  $v$  变化的时间函数。由于该函数的变化速度是恒定的,因此也称等速度函数。 $v=1$  的斜坡函数称为单位斜坡函数。

### 3. 抛物线函数

抛物线函数的数学表达式为

$$x(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \frac{1}{2}at^2 & t \geq 0 \end{cases} \quad (1.3.4)$$

抛物线函数表示从  $t=0$  时刻开始,以恒定加速度  $a$  变化的时间函数,如图 1.3.4 所示。由于该函数变化的加速度是恒定的,所以也称等加速度函数。 $a=1$  的抛物线函数称为单位抛物线函数。

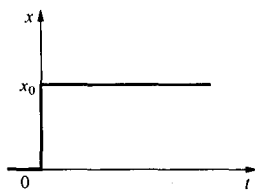


图 1.3.2 阶跃函数

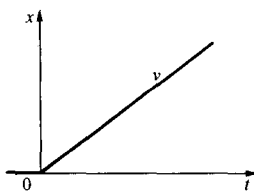


图 1.3.3 斜坡函数

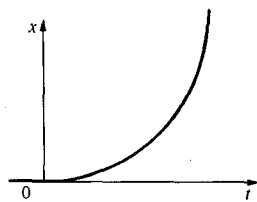


图 1.3.4 抛物线函数

### 4. 脉冲函数

脉冲函数可以看作方波函数(如图 1.3.5 所示)的方波宽度  $t_0$  趋于 0 时的函数,其数

学表达式为

$$x(t) = \lim_{t_0 \rightarrow 0} \frac{A}{t_0} [1(t) - 1(t - t_0)] \quad (1.3.5)$$

如图 1.3.6 所示, 脉冲函数的唯一参数是脉冲强度  $A$ 。

强度等于 1 的脉冲函数称为单位脉冲函数或  $\delta$  函数, 记作  $\delta(t)$ 。于是强度为  $A$  的脉冲函数可以写成  $A \cdot \delta(t)$ 。

$\delta(t - t_0)$  表示在  $t = t_0$  时刻出现的单位脉冲函数。根据脉冲函数的定义, 脉冲函数具有如下的特性

$$\delta(t) = \begin{cases} 0 & t \neq 0 \\ \infty & t = 0 \end{cases} \quad (1.3.6)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (1.3.7)$$

由  $\delta$  函数的性质和阶跃函数的定义可以看出, 单位脉冲函数是单位阶跃函数的导数, 即

$$\delta(t) = \frac{d}{dt} [1(t)] \quad (1.3.8)$$

## 5. 正弦函数

上面所述的几种输入函数所得到的输出响应都具有时间特性, 常作为时域分析而用。而正弦函数

$$x(t) = A \sin \omega t \quad (1.3.9)$$

是振幅为  $A$ , 角频率为  $\omega$  的周期性函数, 如图 1.3.7 所示。线性控制系统在正弦函数输入作用下, 稳态输出也是正弦函数。稳态输出幅值与正弦输入函数幅值的比值, 稳态输出相位与正弦输入函数相位的差, 都是输入信号角频率  $\omega$  的函数。当  $\omega$  从 0 到  $\infty$  变化时, 称该函数为系统的频率特性。根据频率特性分析系统的方法称频域分析法。频域分析法是自动控制系统理论的一个很重要的组成部分。

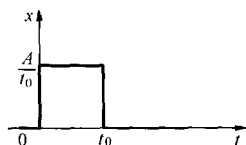


图 1.3.5 方波函数

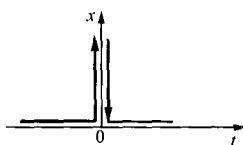


图 1.3.6 脉冲函数

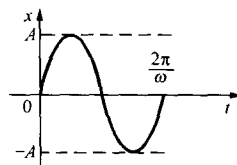


图 1.3.7 正弦函数

## 1.4 对自动控制系统性能的基本要求

从生产过程的要求看, 希望自动控制系统能及时消除扰动对被控量的影响, 使被控量与给定值的偏差在允许的范围内, 保证系统的被控量按照预定的规律进行变化。尽管不同类型的控制系统具有不同的性能指标要求, 但一般情况下, 主要从稳定性、准确性和快速性三个方面来衡量控制系统的工作性能。

### 1.4.1 稳定性

稳定性是对控制系统最基本的要求, 不稳定的控制系统在生产过程中不能应用。在实际生产过程中不但要求控制系统是稳定的, 而且还要有一定的“稳定裕量”, 以保证在每次动

态调整过程中振荡次数不致过多（一般限于 2~3 次）。

一个自动控制系统受到给定值为阶跃函数的输入扰动后，被控量的响应过程可能具有图 1.4.1 所示的几种不同形式。图 1.4.1 (a) 是非周期的控制过程曲线，图 1.4.1 (b) 是衰减振荡控制过程曲线。在这两种控制过程中，被控量经过一定的动态过程后重新达到新的平衡状态，具有这两类过程的系统是稳定的。图 1.4.1 (c) 是被控量等幅振荡的控制过程曲线，此时系统受到扰动后不能达到新的平衡，系统处于临界稳定状态，这种状态在工程上认为是不稳定的，在实际中不能采用。图 1.4.1 (d) 为被控量发散振荡的控制过程曲线，此时系统是不稳定的。

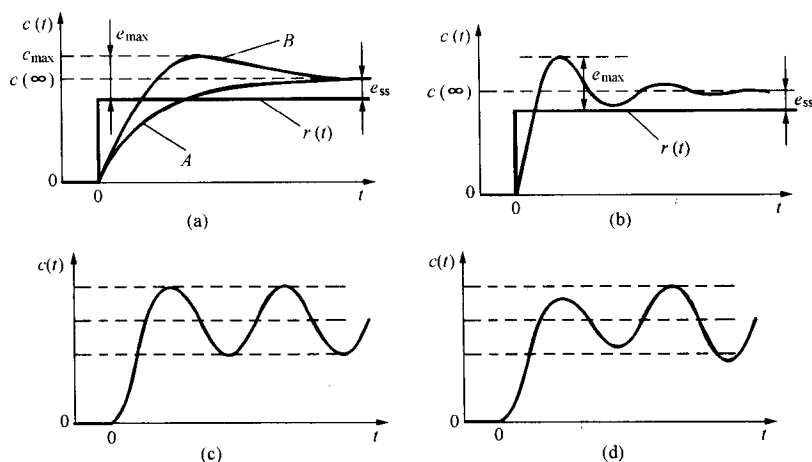


图 1.4.1 几种典型的控制过程曲线

控制系统的稳定性问题是由闭环反馈作用造成的。对工业控制对象而言，尤其是动力控制对象，被控量对控制作用的反应总是比较迟缓，因此在负反馈的情况下，由于反馈“过量”（即控制作用“过大”、“过小”或控制速度“过快”、“过慢”）有可能使系统发生振荡。改变反馈作用的强弱，就可能出现如图 1.4.1 所示的各种类型的控制过程。

### 1.4.2 准确性

准确性用来反映自动控制系统的被控量与给定值接近的程度，也就是被控量与给定值的偏差（误差）。一般用最大动态误差  $e_{\max}$  和稳态误差  $e_{ss}$  两个指标来衡量系统的准确性。

最大动态误差是指整个控制过程中被控量偏离给定值的最大偏差值。一个好的控制系统即使受到最大的扰动作用，最大动态误差也不能超过所允许的范围。

稳态误差  $e_{ss}$  是指控制过程结束后，被控量与给定值之间的偏差。最大的稳态误差往往出现在最大幅度负载变化时（例如由满负载到最低负载），一般应使系统最大的稳态误差不超过生产所允许的变动范围。

有时为了提高生产设备对变动负荷的适应能力和稳定性，亦有意保持一定的动态误差和稳态误差（即不同负荷下保持不同的稳态值）。例如火力发电机组为了能较快响应外界负荷要求，其负荷控制系统进行了特殊设计。当负荷指令变化时，允许主蒸汽压力在一定范围变化（降低准确性要求），以利用锅炉蓄热，快速响应负荷要求。

### 1.4.3 快速性

快速性是对控制系统动态过程持续时间方面的要求。一般希望从扰动开始到系统达到新

的平衡状态的过渡时间尽可能短,以保证下一次扰动来临时,上一次扰动所引起的控制过程已经结束。

在不同的生产过程中,稳定性、准确性和快速性的具体要求和主次地位是不同的。对一个控制系统要求三方面都达到很高的质量往往是不可能的。在系统稳定的前提下,准确性和快速性是两个矛盾的方面。一般总是在满足稳定性要求后,对准确性和快速性进行综合考虑。例如上面提到的单元机组负荷控制系统,为了能快速满足负荷要求,只好在准确性方面做出牺牲,允许主蒸汽汽压变化,以提高快速性。

一般而言,对一个自动控制系统除了上述稳定性、准确性和快速性等方面的基本要求外,还应满足其他一些要求。例如有些生产过程对被控量的变化速度有一定的限制,有些对控制作用的变化速度(控制阀开、关速度)和动作方式有一定的限制等。这些限制条件对自动控制系统的工作往往有重大的影响,在设计时都必须事先加以考虑。上述衡量控制系统性能的指标将在以后章节中陆续介绍。

## 1.5 自动控制系统的类型

实际生产过程中采用的自动控制系统类型多种多样。从不同的角度看,控制系统可以分为不同类型。

### 1. 按给定值变化规律分类

按给定值变化的规律分类,自动控制系统可以分为恒值控制系统、程序控制系统和随动控制系统。

恒值控制系统的给定值在系统运行过程中始终保持恒定,从而在稳态时被控量保持恒定或基本上保持恒定。例如锅炉主汽温、汽包水位控制系统,定压运行机组的主汽压控制系统等都属于这一类控制系统。

程序控制系统的给定值是事先设定好的已知函数。自动控制系统的任务是保证在不同运行状态下被控量按照预定的规律变化。例如锅炉启动时的升温、升压过程中,汽温和汽压的给定值是根据机组特性所确定的升温、升压曲线。控制系统的任务是保证主汽温和主汽压按升温、升压曲线变化。

随动控制系统的给定值不是恒定的,也不是按已知的规律变化的,而是按事先不能确定的一些随机因素而改变,因而被控量也是跟随这个事先不能确定的给定值而随时变化。例如发电机组条件启动时,需要根据机组某些部件的温差和应力来随时确定升温、升压的速度。由于每次启动时机组的状态不同,因而每次启动时的升温、升压速度也就不可能一样,这时的汽温、汽压自动控制系统就是随动控制系统。很显然,在随动控制系统中,给定值需要由操作人员或外来信号确定。

### 2. 按控制系统的结构分类

从自动控制系统的结构来分,控制系统可以分为闭环控制系统、开环控制系统和复合控制系统。

闭环控制系统即反馈控制系统,如图 1.2.2 所示。这种控制系统是自动控制中最基本的控制系统。在闭环控制系统中,被控量信号以反馈方式送到控制器的输入端,与给定值进行比较,并将比较的偏差作为改变控制作用的依据。控制的目的是减少被控量与给定值之间的

偏差。只要被控量与给定值有偏差，就会不断地改变控制作用，直到被控量符合要求为止。因此闭环控制系统控制的最后结果总是能保证被控量等于或接近给定值。由于闭环控制系统是按被控量与给定值的偏差进行控制的，因此当控制系统受到扰动作用时，只能在被控量出现偏差之后才开始控制。这样被控量的动态偏差不可避免。

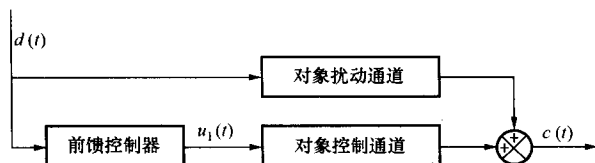


图 1.5.1 开环控制系统

如果控制系统中不存在被控量的反馈回路，控制器只是根据扰动（输入）信号来进行控制，则称为开环控制系统，也称为前馈控制系统，这种作用的控制器称为前馈控制器或补偿器。图 1.5.1 所示的控制系统就是典型的开环控制系统。

在这个控制系统中，前馈控制器接受了扰动信号  $d(t)$ 。一旦有扰动发生，自动控制系统就根据扰动  $d(t)$  的大小和方向按预定的规律产生控制作用  $u_1(t)$ ，以此来抵消扰动  $d(t)$  对被控量的影响。这种控制系统有时也叫“按扰动控制”。一般情况下，扰动对被控量的动态特性与控制作用对被控量的动态特性是不一样的。因此，在图 1.5.1 中，把扰动和控制作用对被控量的动态特性分别用“对象扰动通道”和“对象控制通道”来表示。

从理论上讲，只要控制规律选择恰当，开环控制系统可以做到无偏差控制，但实际上要实现无偏差控制是不可能的。由于开环控制系统没有被控量的反馈信号，因此控制过程是否能达到所期望的效果不能自动检查，即使有偏差也无法纠正。开环控制系统一般只在对被控量没有严格要求，或被控量测量有困难而扰动信号的测量比较方便的生产过程中单独使用。

在工业生产过程中，常将开环控制和闭环控制配合使用，组成复合控制系统，也称为前馈—反馈控制系统，如图 1.5.2 所示。当扰动发生，但被控量  $c(t)$  还没有反应时，补偿器（前馈控制器）先按扰动量的大小和方向进行“粗略”的调整，尽可能使控制作用  $u_1(t)$  在一开始就基本抵消扰动对被控量的影响，使被控量  $c(t)$  不致发生大的变化。被控量  $c(t)$  出现的“剩余”偏差则通过闭环回路来进行微调（校正作用）。因此这类自动控制系统对于扰动作用能够得到比简单闭环控制系统更好的控制效果。汽包锅炉给水控制、燃烧控制都采用这种控制系统。

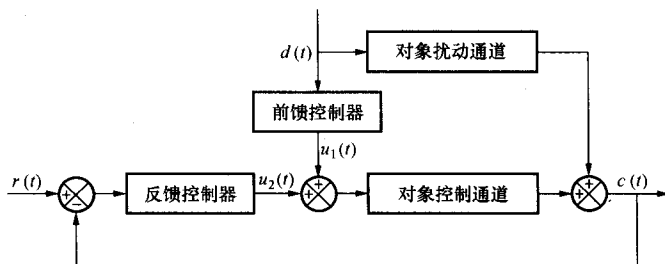


图 1.5.2 前馈—反馈控制系统

### 3. 按控制系统闭环回路的数目分类

按闭环回路的数目分类时，自动控制系统可分为单回路控制系统和多回路控制系统。

单回路控制系统只有被控量一个量反馈到控制器的输入端，形成一个闭合回路。如果除被控量反馈到控制器输入端之外，还有另外的辅助信号也作为反馈信号送入控制系统的某一个入口，形成一个以上的闭合回路，即形成多回路控制系统。例如图 1.5.3 所示的过热汽温自动控制系统。由于锅炉的过热汽温对控制作用（喷水量）的反应很慢，为了改善控制效

果, 往往将喷水减温器出口处的汽温作为辅助信号送到控制器的输入端, 从而形成了双回路控制系统。

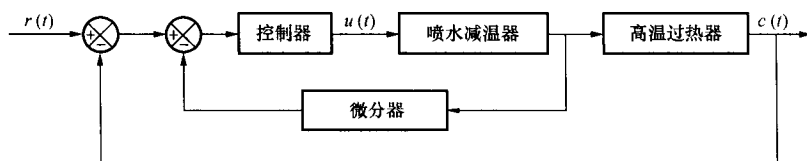


图 1.5.3 双回路汽温控制系统

#### 4. 按被控量数目分类

从被控量数目看, 自动控制系统可分为单输入单输出 (Single Input Single Output, SISO) 控制系统和多输入多输出 (Multi-Input Multi-Output, MIMO) 控制系统。

单输入单输出 (SISO) 控制系统是指控制系统中只有一个被控量和一个控制作用量。控制器的任务只是为了保持该被控量等于给定值。目前汽包锅炉上所采用的主汽温控制系统、给水控制系统都是单输入单输出控制系统。

多输入多输出 (MIMO) 控制系统是指由多个被控量和多个控制作用量所组成的自动控制系统。其中每一个控制作用可能会同时影响到几个被控量, 因此各个被控量不可能独立进行控制。当需要控制其中一个被控量时, 必须使各个控制器协调动作, 以防止其他被控量发生不应有的变化。例如直流锅炉的自动控制系统就是典型的多输入多输出控制系统。

#### 5. 按控制作用的形式分类

从控制作用的形式来看, 自动控制系统有连续控制系统、离散 (断续) 控制系统和继电作用控制系统。

连续控制系统的特点是控制系统中所有环节之间信号的传递是不间断的, 而且各个环节的输入量与输出量之间存在着连续的函数关系, 因而控制作用也是连续的。

离散 (断续) 控制系统中至少有一个采样元件将连续信号转换为有一定周期的脉冲信号, 因而控制作用是不连续的。用数字计算机或数字控制仪表组成的采样控制系统就是离散控制系统。

继电作用控制系统的特征是系统中某一环节具有继电特性, 即它的输出量幅值保持恒定, 但其有无输出或输出的方向决定于输入量的大小。例如继电器控制的双位控制系统就属于这类系统。

#### 6. 按系统的特性分类

按自动控制系统的特性不同, 可以把自动控制系统分为线性控制系统和非线性控制系统。

控制系统的所有元件、部件都是线性的, 输入与输出之间可以用线性微分方程来描述的系统称为线性控制系统。而当控制系统中存在非线性元件、部件时, 该系统称为非线性控制系统。非线性控制系统需要用非线性微分方程来描述。

描述控制系统的微分方程中, 输入量、输出量及各阶导数都是一次的, 且没有交叉项, 则该方程代表的控制系统是线性控制系统。如果描述线性控制系统的微分方程是线性定常微分方程 (各系数均为常数), 则系统称为线性定常控制系统。

线性控制系统满足叠加原理和齐次性条件。叠加原理是指当多个输入同时作用于系统

时, 系统的输出等于每个输入单独作用于系统所引起的输出之和; 齐次性条件是指当输入放大  $K$  倍时, 相应的输出也放大  $K$  倍。非线性控制系统的分析要比线性系统的分析复杂得多, 但许多非线性系统可以在工作点附近线性化, 因此也就可以用线性系统理论进行分析。本书仅限于线性定常控制系统的分析和讨论。关于非线性控制系统的分析和设计, 有兴趣的读者可参考相关文献。

自动控制系统还可以有其他的分类方法, 这里不一一列举。在所有的自动控制系统中, 最基本、应用最广泛的控制系统是线性、定常、闭环、单输入单输出控制系统。

## 1.6 控制系统示例

### 1. 速度控制系统

图 1.6.1 给出了发动机的瓦特式速度调节器的基本原理。用发动机的实际转速与设定转速的偏差调整进入发动机的燃料数量。

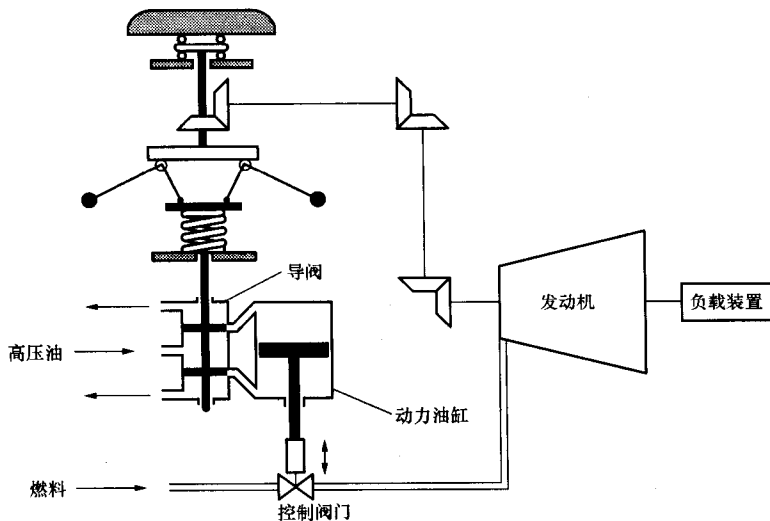


图 1.6.1 速度控制系统

系统的工作过程如下: 当发动机工作于设定速度时, 速度调节器的控制导阀停留在中间位置, 高压油不进入动力油缸的任何一侧, 燃料量保持不变。如果由于扰动使发动机的转速下降而低于设定值, 则速度调节器的离心力下降, 控制导阀向下移动, 高压油进入动力油缸的下侧, 使动力油缸阀向上移动, 开大控制阀门, 进入发动机的燃料量增加, 提高发动机的速度, 直到发动机的速度达到设定速度为止。相反, 如果发动机的转速高过设定值, 速度调节器的离心力增大, 控制导阀向上移动, 高压油进入动力油缸的上侧, 使动力油缸阀向下移动, 关小控制阀门, 进入发动机的燃料量减少, 发动机转速下降, 直到发动机的速度达到设定的速度为止。

在该速度控制系统中, 控制对象是发动机, 被控量是发动机转速。设定转速与实际转速之间的偏差是误差信号, 燃料量是控制作用信号。