



“十三五”普通高等教育本科规划教材

ZIDONG KONGZHI YUANLI

# 自动控制原理 (第二版)

张建民 主 编  
曹 艳 副主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

# 自动控制原理

## (第二版)

主 编 张建民  
副主编 曹 艳  
编 写 薛 健 刘英晖 张晓丹  
主 审 李文秀



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。

本书阐述了经典控制理论的基本概念、原理和各种分析方法。全书共分七章，主要内容有系统数学模型的建立方法，线性连续系统的时域、根轨迹和频域理论，如系统的动态性能、静态性能、稳定性及校正方法；同时适当地介绍了离散控制系统的分析方法。本书力求突出物理概念，尽量减少繁琐的数学推导，内容叙述深入浅出、通俗易懂。书中对PID作了重点介绍，并用一定篇幅介绍了系统仿真软件的应用。

本书可作为应用型本科院校电气工程及其自动化、测控技术与仪器、自动化专业及相关专业的教材，也可作为从事自动化工作的工程技术人员参考用书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理/张建民主编. —2版. —北京: 中国电力出版社, 2017. 6

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5198-0294-3

I. ①自… II. ①张… III. ①自动控制理论—高等学校—教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 009541 号

---

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 罗晓莉 孙世通 (010-63412547)

责任校对: 常燕昆

装帧设计: 张 娟

责任印制: 吴 迪

---

印 刷: 北京市同江印刷厂

版 次: 2008 年 7 月第一版 2017 年 6 月第二版

印 次: 2017 年 6 月北京第三次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 15.75

字 数: 386 千字

定 价: 34.00 元

---

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

# 前 言

随着科学技术的迅猛发展,自动控制技术的应用领域日益广阔。它不仅大量应用于空间科技、冶金、轻工、机电工程及交通管理、环境保护等领域,而且正不断向生物、人类社会等其他领域渗透。自动控制技术的广泛应用,不但使得生产设备或生产过程实现自动化,大大提高了劳动生产率和产品质量,改善了劳动条件;同时,在人类征服大自然,改善居住、生活条件等方面也发挥了非常重要的作用。

自动控制技术的主要作用是不需要人的直接参与,而控制某些物理量按照指定的规律变化。由于自动控制技术在各个行业的广泛渗透,控制理论已逐渐成为许多学科共同的专业基础课,且愈来愈占有重要的位置。

自动控制技术的研究对象为自动控制系统。分析和设计自动控制系统的理论基础就是自动控制原理。自动控制原理一般分为“经典控制理论”和“现代控制理论”。本书主要介绍经典控制理论的内容。

根据应用型本科院校教学改革的方向,按以下思路安排章节次序:首先对自动控制系统的基本概念作了必要的叙述,继而讨论实际系统的数学模型的建立方法,在此基础上,用时域法引出系统稳定性、快速性、准确性的基本概念,并分析了低阶系统的各项性能指标。在编写中介绍了根轨迹法及工程上常用的频率特性法,并结合了工程实际介绍了自动控制系统的校正方法。由于计算机控制技术的发展,本书用适当的篇幅介绍了线性离散控制系统的分析方法。考虑到计算机仿真技术在自动控制系统分析中应用得越来越广泛,已成为分析自动控制系统的有力工具,在每章最后一节结合各章内容介绍了自动控制系统的计算机仿真方法。

本书在编写过程中,注意了应用型本科教育的特点,适当降低了理论深度,内容编写力求深入浅出、循序渐进,注意物理概念的阐述,尽量避免繁琐的数学推导,紧密结合具体的自动控制系统介绍经典控制理论的最基本的内容,使抽象的控制理论与系统分析、设计相结合,理论和实践相结合,为读者学习后续专业课程奠定基础。

本书由张建民教授主编并统稿,曹艳为副主编。参加本书编写的人员有张建民(第一章,第二章第三~六节,第三章)、曹艳(第二章第一、二节,第四章)、张晓丹(第五章)、刘英晖(第六章)、薛健(第七章、附录)。全书由李文秀教授主审。

刘书智参加了本书第一版第六章的编写,刘海波参加了本书第一版第七章的编写。

本书在编写过程中,参考了同行们的论著,在此,编者对他们表示由衷的谢意。

由于编者水平有限,书中一定存在疏漏和不妥之处,殷切期望使用本书的教师和读者提出批评指正。

编 者

2016年12月

# 目 录

## 前言

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 第一章 自动控制系统的基本概念          | 1   |
| 第一节 自动控制与自动控制系统          | 1   |
| 第二节 自动控制系统的类型            | 4   |
| 第三节 闭环控制系统的组成            | 8   |
| 第四节 自动控制系统的的基本要求         | 9   |
| 小结                       | 11  |
| 习题                       | 12  |
| 第二章 自动控制系统的数学模型          | 14  |
| 第一节 系统微分方程式的编写           | 14  |
| 第二节 传递函数                 | 19  |
| 第三节 系统动态结构图及其等效变换        | 26  |
| 第四节 信号流图                 | 34  |
| 第五节 自动控制系统的传递函数          | 38  |
| 第六节 利用 MATLAB 进行控制系统建模   | 44  |
| 小结                       | 48  |
| 习题                       | 49  |
| 第三章 自动控制系统的时域分析          | 53  |
| 第一节 自动控制系统的时域指标          | 53  |
| 第二节 一阶系统的动态性能分析          | 56  |
| 第三节 典型二阶系统的动态性能分析        | 59  |
| 第四节 高阶系统的动态性能分析          | 65  |
| 第五节 自动控制系统的代数稳定判据        | 67  |
| 第六节 控制系统的稳态误差            | 73  |
| 第七节 利用 MATLAB 进行控制系统时域分析 | 79  |
| 小结                       | 84  |
| 习题                       | 85  |
| 第四章 线性控制系统的根轨迹分析法        | 88  |
| 第一节 根轨迹的基本概念             | 88  |
| 第二节 根轨迹绘制的基本法则           | 90  |
| 第三节 广义根轨迹                | 101 |
| 第四节 系统性能分析               | 104 |

|                                              |     |
|----------------------------------------------|-----|
| 第五节 利用 MATLAB 绘制系统的根轨迹                       | 106 |
| 小结                                           | 111 |
| 习题                                           | 111 |
| <b>第五章 控制系统的频域分析法</b>                        | 113 |
| 第一节 频率特性的基本概念                                | 113 |
| 第二节 典型环节的频率特性                                | 115 |
| 第三节 系统开环频率特性                                 | 122 |
| 第四节 用开环频率特性分析系统稳定性                           | 130 |
| 第五节 用开环频率特性分析系统性能                            | 138 |
| 第六节 用闭环频率特性分析系统性能                            | 141 |
| 第七节 利用 MATLAB 进行控制系统频域分析                     | 142 |
| 小结                                           | 148 |
| 习题                                           | 148 |
| <b>第六章 自动控制系统的校正</b>                         | 152 |
| 第一节 校正的基本概念                                  | 152 |
| 第二节 串联校正                                     | 154 |
| 第三节 反馈校正                                     | 172 |
| 第四节 复合校正                                     | 174 |
| 第五节 控制系统的工程设计方法                              | 176 |
| 第六节 利用 MATLAB 进行控制系统校正                       | 181 |
| 小结                                           | 185 |
| 习题                                           | 186 |
| <b>第七章 线性离散控制系统的分析</b>                       | 190 |
| 第一节 离散控制系统概述                                 | 190 |
| 第二节 采样过程与采样定理                                | 193 |
| 第三节 $z$ 变换理论                                 | 199 |
| 第四节 线性离散系统的数学模型                              | 207 |
| 第五节 离散控制系统稳定性分析                              | 217 |
| 第六节 离散控制系统的动态性能分析                            | 223 |
| 第七节 离散 PID 控制算法                              | 226 |
| 第八节 利用 MATLAB 进行离散系统分析                       | 228 |
| 小结                                           | 233 |
| 习题                                           | 234 |
| <b>附录 I 部分习题参考答案</b>                         | 237 |
| <b>附录 II 常用函数的拉氏变换与 <math>z</math> 变换对照表</b> | 244 |
| <b>参考文献</b>                                  | 246 |

# 第一章 自动控制系统的概念

在科学技术飞速发展的今天, 自动控制技术也得到了迅猛的发展, 并且应用在各行各业。无论是在航空航天领域、军事领域, 还是民用领域、工业领域, 自动控制技术所取得的成就都是惊人的。自动控制技术的理论基础是自动控制理论, 而自动控制技术的发展反过来又促进了自动控制理论的进一步完善。

本章介绍自动控制的一些基本概念、自动控制系统的组成和分类、对控制系统的性能要求等内容。

## 第一节 自动控制与自动控制系统

### 一、自动控制与自动控制系统的含义

自动控制是指在没有人直接参与的情况下, 利用外加的设备或装置 (控制器或控制装置), 使机器设备或生产过程 (统称被控对象) 的某个工作状态或参数 (即被控量) 自动地按照预定的规律运行。

下面以炉温控制系统为例, 说明自动控制系统的结构特点。

图 1-1 是一个炉温控制系统图。该系统的控制目标是通过调整自耦变压器滑动端的位置, 来改变电阻炉的温度, 并使其恒定不变。因为被控制的设备是电阻炉, 被控量是电阻炉的温度, 所以该系统可称为温度控制系统。炉温的给定量由电位器滑动端位置所对应的电压值  $u_g$  给出, 炉温的实际值由热电偶测试出来, 并转换成电压  $u_f$ , 再把  $u_f$  反馈到系统的输入端与给定电压  $u_g$  相比较 (通过二者极性反接实现), 产生反映实际炉温与给定炉温偏差的信号。由于扰动 (例如电源电压波动或加热物件多少等) 影响, 炉温偏离了给定值, 其偏离电压经过放大, 控制可逆伺服电动机 M, 带动自耦变压器的滑动端, 改变电压  $u_c$ , 使炉温保持在给定温度值上。这样, 就实现了无人直接参与的自动炉温控制。

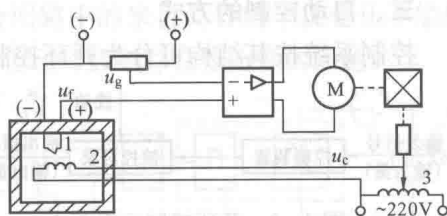


图 1-1 炉温控制系统图

1—热电偶; 2—加热器; 3—自耦变压器

当炉温降低时, 此炉温控制系统的自动调节过程如下

$$T_c \downarrow \rightarrow U_f \downarrow \rightarrow \Delta u = (U_g - U_f) \uparrow \rightarrow U_c \uparrow \rightarrow T_c \uparrow$$

如上分析, 将被控对象和控制装置按照一定的方式连接起来, 组成一个整体, 从而实现各种复杂的自动控制任务, 就构成了自动控制系统。

### 二、常用术语

为了便于研究, 下面介绍一些自动控制的常用术语。

(1) 控制对象 (controlled plant)。指被控设备或物体, 也可以是被控过程。

(2) 控制器 (controller)。使被控对象具有所要求的性能或状态的控制设备。它接收输

入信号或偏差信号,按控制规律给出控制量,经功率放大后驱动执行装置以实现对被控对象的控制。

(3) 系统输出 (output) (被控制量)。它表征对象或过程的状态和性能,是实现控制的重点。

(4) 参考输入 (input)。人为给定,由它决定系统预期的输出。

(5) 干扰 (disturbance variable)。干扰并破坏系统,使系统不能按预期性能输出的信号。

(6) 偏差信号 (error)。参考输入信号与反馈信号之差。在加热炉实例中,控制对象为加热炉,控制器为电动机 M,系统输出为实际炉温,参考输入为希望炉温,干扰为炉门开关动作、电源电压波动及加热物件的数量等。

(7) 前向通道 (forward path)。由输入到输出的信号传输通道。

(8) 反馈通道 (feedback path)。由输出到输入的信号传输通道。

(9) 特性 (characteristic)。描述系统输出与输入的关系。可分为静态特性和动态特性,通常用特性曲线来描述。

1) 静态特性。当系统稳定后,输出与输入表现出来的关系。在系统中通常表现为静态放大倍数、稳态误差。

2) 动态特性。当系统由静止状态突加给定信号或运行期间出现干扰时,系统进行动态调节时输出与输入表现出来的关系。

### 三、自动控制的方式

控制系统按其结构可分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统。

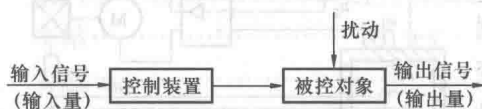


图 1-2 开环控制示意图

#### 1. 开环控制

若系统中的信号只从控制装置向被控对象传递,而无反向传递,则称其为开环控制,如图

1-2所示。

输出对输入无影响,一个确定的输入只对应一个确定的输出量,系统精度将取决于控制器及被控制对象参数稳定性。也就是说,欲使开环精度高,则系统各部分参数值必须保持事先校准的值上,于是对元件质量提出较高要求。另外,该系统不能克服干扰,当输出量波动时系统分不清是干扰引起的还是给定变化引起的。

图 1-3 所示的系统是一个炉温开环控制系统。该系统由自耦变压器和加热炉两部分组成,控制器是自耦变压器,参考输入(给定量)是自耦变压器的输出电压,被控对象是加热炉,被控制量(输出量)是加热炉的温度,工作原理为:自耦变压器滑动端的位置(按工艺要求设置)对应了一个电压值  $u_c$ ,也就对应了一个电阻炉的温度值  $T_c$ ,改变  $u_c$  也就改变了  $T_c$ 。当系统中出现外部扰动(如炉门开、关的频率变化)或内部扰动(如电源电压波动)时,  $T_c$  将偏离  $u_c$  所对应的数值。开环控制的炉温控制系统结构简单,调试容易,但当工作环境和系统本身的元器件性能参数发生变化时,输入量会偏离理想输入,输出量(温度)就会发生变化,实现不了保持炉温恒定的目的,也就是说开环控制系统的抗干扰能力差,故开环控制对环境和元件的要求比较严格。

#### 2. 闭环控制

通过测量装置检测输出量,并与输入信号进行比较,从而使控制装置按照二者差值来调

节被控对象的输出量。系统中存在信号的反向传递,通过测量装置使信号流构成了闭合回路,故名闭环控制,如图 1-4 所示。

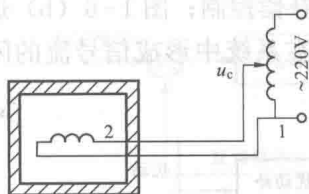


图 1-3 炉温开环控制系统

1—自耦变压器; 2—加热器



图 1-4 闭环控制示意图

在图 1-1 炉温控制系统中,热电偶作为测量装置,将炉温的实际值转换成电压后回送给输入端,形成闭合回路,构成闭环控制系统。该闭环控制系统由自耦变压器、加热炉和检测装置组成,与开环控制系统相比,闭环控制系统增加了一个测温电路,从闭环控制的原理中可知,无论是否出现扰动,都能使炉温保持恒定。

下面再举一个闭环控制的例子。在图 1-5 中测速发电机 TG 将电动机的转速  $n$  转换成电压  $u_f$ ,反馈到输入端并与给定电压  $u_n$  相比较得出偏差  $\Delta u = u_n - u_f$ 。其偏差经过运算放大器放大后,用来控制整流触发电路的输出电路  $u_d$  和电动机的转速  $n$ ,从而克服干扰的影响,减小或消除转速偏差,使电动机的转速近似保持为给定速度不变。

由于引入负反馈,系统的被控信号对被包围在闭合回路中的来自外界的干扰变化不敏感,即闭环控制抗干扰性强,有可能采用成本低的元部件,但闭环控制存在稳定性的问题。

一般来说,若系统控制量的变化规律事先知道,并且对系统可能出现的干扰可以抑制时,采用开环控制具有优越性。特别是被控量不易测量时,如自动售货机,自动洗衣机及自动车库等。在系统的控制量和干扰量均无法预先知道的情况下,采用闭环控制具有优越性。

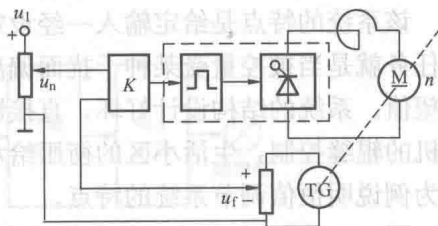


图 1-5 闭环调速系统

闭环控制系统具有如下特点:

- (1) 由于系统的控制作用是通过给定值与反馈量的差值进行的,故这种控制常称为偏差控制或反馈控制。
- (2) 这类系统具有两种传输信号的通道:前向通道和反馈通道。
- (3) 不论取什么物理量进行反馈,作用在反馈环内前向通道上的扰动所引起的被控量的偏差值,都会得到减小或消除,使得系统的被控量基本不受该扰动的影响。正是由于这种特性,使得闭环控制系统在控制工程中得到了广泛的应用。如加热炉和锅炉的温度控制,轧钢厂主传动和辅助传动的速度控制、位置控制等。

自动控制原理中所讨论的系统主要是闭环控制系统。

### 3. 复合控制

开环控制的缺点是精度低,优点是控制稳定,不会产生闭环控制的振荡及不稳定现象。而闭环控制(负反馈控制)优点是抗干扰能力强,控制精度高。这样,将两种控制作用以适当的方式结合到一起,就能发挥二者的优点而克服二者的缺点。在一个系统中同时引入开环

控制和闭环控制的系统,通常称为复合控制系统。

将给定或扰动直接折算到系统输入端对控制量的大小进行修正,这种控制方式称为补偿控制。图 1-6 (a) 中通过输入补偿装置来实现对输入信号的补偿控制;图 1-6 (b) 通过扰动补偿装置来实现对扰动信号的补偿控制。因这种控制没有在系统中形成信号流的闭合回路,所以是一种开环控制,又称为前馈控制。

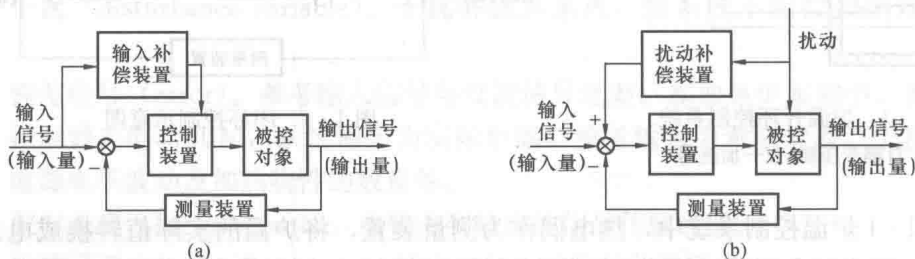


图 1-6 复合控制示意图

(a) 按给定补偿方式; (b) 按扰动补偿方式

## 第二节 自动控制系统的类型

自动控制系统按不同分类方法可分为多种类型。常见的分类方法有如下几种。

### 一、按给定信号形式分类

#### 1. 恒值调节系统

该系统的特点是给定输入一经设定就维持不变,希望输出维持在某一特定值上。系统主要任务就是当被控量受某种干扰而偏离期望值时,通过自动调节作用,使它尽可能地恢复到期望值。系统的结构设计好坏,直接影响到恢复的精度。例如轧钢厂里的钢板加热炉控制和轧机的辊缝控制,生活小区的衡压给水控制,自动调节水位控制等。下面以自动调节水位控制为例说明恒值调节系统的特点。

图 1-7 是一个自动调节水位的水箱液位自动控制系统,被控对象为水箱,被控量为水箱的实际水位  $c$ , 给定量为电位器设定的电位  $u_r$  (表征液位的希望值  $c_r$ ), 比较原件为电位器, 执行元件为电动机, 控制任务为保持水箱水面高度不变。工作原理为: 当电位器电刷位于中点 (对应  $u_r$ ) 时, 电动机静止不动, 控制阀门有一定的开度, 流入水量与流出水量相等, 从而使液面保持给定高度  $c_r$ , 一旦

流入水量或流出水量发生变化, 液面高度就会偏离给定高度  $c_r$ 。当液面升高时, 浮子也相应升高, 通过杠杆作用, 使电位器电刷由中点位置下移, 从而给电动机提供一定的控制电压, 驱动电动机, 通过减速器带动进水阀门向减小开度方向转动, 从而减少流入的水量, 使液面逐渐降低, 浮子位置也相应下降, 直到电位器电刷回到中点位置, 电动机的控

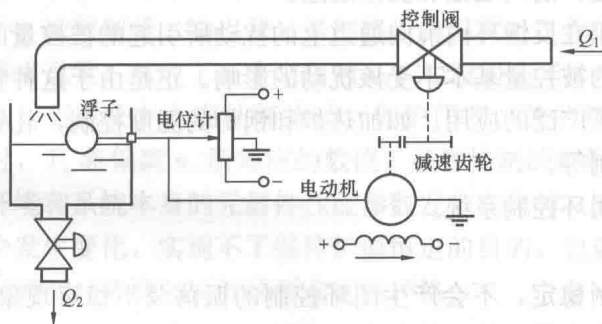


图 1-7 液位自动控制系统的示意图

制电压为零，系统重新处于平衡状态，水面恢复给定高度。图 1-8 是水箱水位系统结构图。

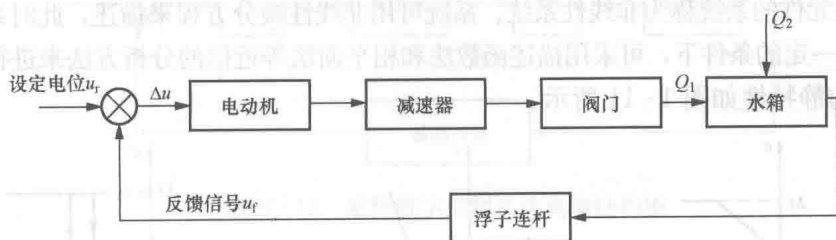


图 1-8 水箱液位系统结构图

## 2. 随动系统

随动系统的特点是给定信号的变化规律是不确定的信号。系统任务是使输出快速、准确地跟随输入量的变化，跟随性能是这类系统中要解决的主要矛盾。例如火炮自动瞄准系统就是典型的随动系统。

## 3. 程序控制系统

这种系统的输入信号是事先确定好的，使被控量按预定的规律变化。由于变化规律确定，故只适用于特定的生产工艺过程。典型的例子如数控车床、全自动洗衣机、楼道声控灯、水温控制等。

机械加工的数控机床中，系统按照被加工件的加工工艺，事先编制加工程序，机床就会在程序控制下，进行加工刀具的更换和钻孔、切削等不同的加工作。

楼道声控灯也属于程序控制系统，图 1-9 是其电路示意图，它的结构框图如图 1-10 所示。

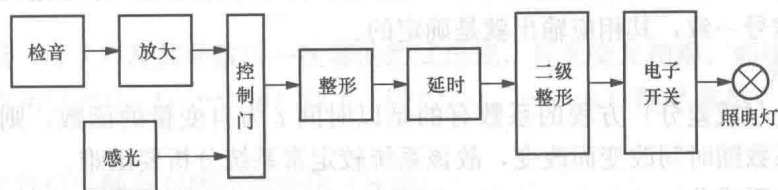


图 1-9 楼道声控灯电路示意图

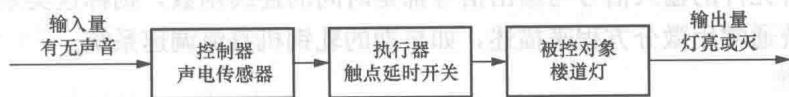


图 1-10 楼道声控灯结构框图

## 二、按元件特性分类

### 1. 线性系统

当系统各元件输出与输入满足线性关系，并可用线性微分（或差分）方程来描述时，则称这种系统为线性系统。通常构成线性系统的元件都是线性元件。线性系统的突出特点是满足叠加定理。叠加定理要求满足叠加性和齐次性。叠加性指当多个输入信号同时作用于系统时，其总输出等于各个输入信号单独作用时所产生输出的总和。齐次性指系统输入增大或缩小  $n$  倍，则系统输出也增大或缩小  $n$  倍。

## 2. 非线性系统

含有非线性元件的系统称为非线性系统。系统可用非线性微分方程来描述, 此时系统不再满足叠加定理。在一定的条件下, 可采用描述函数法和相平面法等近似的分析方法来进行研究。典型非线性元件的静特性如图 1-11 所示。

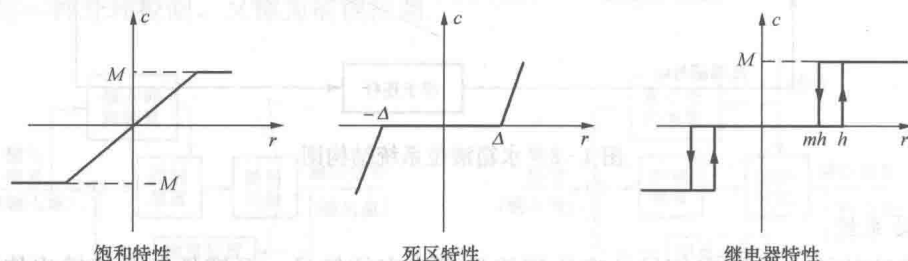


图 1-11 典型非线性元件的静特性

严格地说, 实际上是不存在线性系统的, 因为构成系统的实际元件, 都不同程度地存在非线性特性。例如, 系统中应用的放大器超过一定范围会出现饱和特性; 弹簧有非线性特性等。甚至有时为了改善系统的性能和节约费用, 有意采用非线性元件等。但是, 在工程上人们有时为了简化分析和设计工作, 对一些非线性元件, 在一定的条件下进行简化和近似处理后, 当作线性元件对待, 使系统成为工程意义上的线性系统。

## 三、按系统参数是否随时间变化分类

### 1. 定常系统

从系统的数学模型来看, 若系统微分(或差分)方程的系数均为常数, 则称其为定常系统。该系统输出只取决于具体的输入, 而与输入的时间起点无关, 即无论何时注入输入信号, 只要所加信号一致, 其相应输出就是确定的。

### 2. 时变系统

若系统微分(或差分)方程的系数有的是以时间  $t$  为自变量的函数, 则称其为时变系统。因为方程系数随时间改变而改变, 故该系统较定常系统分析要困难。

## 四、按信号形式分

### 1. 连续系统

若系统中各元件的输入信号与输出信号都是时间的连续函数, 则称这类系统为连续控制系统。这类系统通常用微分方程来描述, 如早期的轧钢机直流调速系统。

### 2. 离散系统

当系统中的信号含有脉冲或数码形式时, 称这种系统为离散系统。离散系统使用差分方程来描述, 如全数字直流调速系统。工程实践中的另一类控制系统中, 其信号仅定义在离散时间上, 称为离散系统。离散系统的主要特点是在系统中使用脉冲采样开关, 将连续信号转变为离散信号, 对离散信号取脉冲形式的系统, 称为脉冲控制系统; 对离散信号以数码形式传递的系统, 称为采样数字控制系统。

典型的采样数字控制系统的结构图如图 1-12 所示。

## 五、其他分类方法

### 1. 集中参数系统和分布参数系统

一般我们讨论的都是集中参数系统, 它可以用常微分方程来表述。分布参数系统通常用



图 1-12 采样数字控制系统典型结构图

偏微分方程来描述，研究分布参数系统时必须考虑分布参数。

## 2. 单变量系统 (SISO) 和多变量系统 (MIMO)

单变量系统只有一个输入量和一个输出量，是古典控制理论主要研究的类型，本书讨论的就是这类系统。当系统中输入量和输出量不止一个时，称为多变量系统。多变量系统由于各输入量和输出量间都存在耦合，分析起来具有一定的难度。一些复杂控制，如航空航天系统、导弹制导系统、生物系统、经济系统等就属于这类系统。有关多变量系统的知识主要在现代控制理论中研究。

## 3. 有差系统和无差系统

按系统的静态特性指标稳态误差  $e_{ss}$  是否等于零来划分，可将系统分为两类， $e_{ss}=0$  的系统称为无差系统，否则称为有差系统。

线性定常连续系统的微分方程为：

$$a_0 \frac{d^n c(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} c(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_n c(t) = b_0 \frac{d^m r(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} r(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_m r(t)$$

其中， $c(t)$  表示系统输出， $r(t)$  表示系统输入。从微分方程中可知，线性连续系统具有如下特点：

- (1) 各变量 ( $r, c$ ) 及其导数以一次幂的形式出现，且无交叉相乘，即线性。
- (2) 各系数  $a_i (i=0, 1, \cdots, n)$  及  $b_j (j=0, 1, \cdots, m)$  都是常数，即定常（非时变）。

(3) 系统中各信号随着时间连续变化（连续）。

线性定常连续系统包括恒值控制系统（恒温、恒速等）、随动系统、程序控制系统。

**【例 1-1】** 分析下列微分方程所表示系统的类型。

$$(1) c(t) = t \frac{d^2 r(t)}{dt^2} + r^2(t) + 5$$

$$(2) \frac{d^3 c(t)}{dt^3} + 3 \frac{d^2 c(t)}{dt^2} + 6 \frac{dc(t)}{dt} + 8c(t) = r(t)$$

$$(3) t \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = r(t) + 3 \frac{dr(t)}{dt}$$

$$(4) c(t) = r(t) \cos \omega t + 5$$

**解** (1) 为非线性、时变系统，因为有  $r^2(t)$  项，且系数不全都为常数。

(2) 为线性、定常、连续系统。

(3) 为线性、时变系统。

(4) 为非线性、时变系统。

线性定常离散系统表达式为

$$a_0 c(k+n) + a_1 c(k+n-1) + \cdots + a_{n-1} c(k+1) + a_n c(k) = \\ b_0 r(k+m) + b_1 r(k+m-1) + \cdots + b_{m-1} r(k+1) + b_m r(k)$$

其中,  $r$  为输入采样序列,  $c$  为输出采样序列。不论是线性定常连续系统还是线性定常离散系统, 均具有齐次性和叠加性。

### 第三节 闭环控制系统的组成

闭环控制又称反馈控制, 是自动控制中最经典的应用, 也是最实用的一种控制方式。

#### 一、系统组成

这种控制基于偏差控制原理, 即根据实际输出与期望设定值间的偏差去不断修正输出, 从而控制输出保持在期望值上。故不管具体的控制任务, 这种闭环控制都可以抽象成图 1-13 所示的组成形式。



图 1-13 闭环系统组成方框图

图 1-13 所示闭环系统主要由给定环节、检测装置、比较环节、放大环节、校正环节、功放环节及执行机构等组成。

##### 1. 给定环节

为控制系统设定一输入信号, 以决定系统的期望输出。不同类型的系统给定方式可能不同。如恒值控制系统通常用电位器给定, 程序控制系统则是通过程序产生一特定的给定序列值。因系统中给定元件相对简单, 故系统框图中一般不单独将其列出。

##### 2. 检测装置 (反馈元件)

该装置检测被控量, 并将其数值传给比较环节。通常检测装置还要完成量纲的转换。如被控量是转速, 其量纲是  $r/min$ 。此时检测装置检测该转速的同时还将其转换为电压值, 因为通常比较环节比较的是电压值。

因为检测装置的误差无法通过闭环控制得到修正, 故实际系统对检测装置的精度有较高的要求。温度控制系统中的热电偶、速度控制系统中的测速发电机等都是检测装置 (传感器)。

##### 3. 比较环节

比较环节将给定元件输出的给定值与检测装置测得的输出值 (反馈值) 进行比较, 从而产生期望值与实际值的偏差。通常是用给定值减去反馈值, 以使闭环系统构成负反馈。

##### 4. 放大环节

将比较环节输出的偏差信号进行放大, 以满足后续环节的需要。

##### 5. 校正环节

按某种规律对偏差信号进行运算, 用运算的结果控制执行机构, 以改善被控制量的稳态和暂态性能。在控制系统中, 常把比较环节、放大环节及校正环节合在一起称为控制器。

## 6. 执行机构

控制被控对象的行为,以改变其输出值的机构,称为执行机构。

## 7. 功放环节

执行机构直接作用于被控对象,而被控对象可能是一些大型设备或机器,因此驱动执行机构的信号也需要较大的功率。功放环节的作用就是提升控制信号的功率,以推动执行机构。

这些环节并非在任何系统中都孤立存在,可能某一部件承担几种作用。如图

1-14所示,是进行一般分析时常采用的方框图。



图 1-14 简化的闭环系统组成方框图

## 二、系统中的信号名称

### 1. 输入信号 $r(t)$

由给定元件提供,作为系统的给定信号,决定系统的期望输出。对于不同类型系统,形式不尽相同。如恒值系统中该信号是一常数。输入信号常称为输入量。

### 2. 反馈信号 $f(t)$

测量元件的输出,反映被控制量的实际值。送给比较元件,以修正控制量。

### 3. 偏差信号 $\epsilon(t)$

$\epsilon(t) = r(t) - f(t)$ , 反映当前控制存在的偏差。该值越大,被控量实际值与期望值相差越大,同时控制器的调节作用越强,以便被控量尽快接近期望值。

### 4. 控制信号 $u(t)$

通常是放大元件或校正元件的输出,也是整个控制器的输出。该信号反映了对被控制量进行调节的规律。该信号经功率放大后,即可驱动执行元件来调节被控对象。

### 5. 输出信号 $c(t)$

被控对象的输出量,也称被控量。

### 6. 干扰信号 $N(t)$

自动控制系统的任务是使输出信号达到或接近输入信号对应的输出期望值。任何影响这一任务的信号都可以称为干扰信号。只不过有的影响大一些,有的影响小一些。对于影响小的通常在系统分析时忽略不计,对于影响大的信号才定量分析其影响。一个系统克服干扰影响的能力,称为系统的抗干扰能力。

### 7. 误差信号 $e(t)$

$e(t) = c(\infty) - c(t)$ , 其中  $c(\infty)$  为系统输出信号的期望值。 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = e_s$  误差反映了系统实际输出值与期望值间的差值。要注意与偏差的区别与联系。区别是数学定义不同,联系是当系统是单位负反馈系统时,  $e(t) = \epsilon(t)$ 。由于误差在实际中很难测量,因此在分析系统时,误差就用偏差来代替。

## 第四节 自动控制系统的基本要求

在控制过程中,一个理想的控制系统,始终应使其被控量(输出)等于给定值(输入)。

但是, 由于机械部分质量、惯量的存在, 电路中储能元件的存在以及能源功率的限制, 使得运动部件的加速度受到限制, 其速度和位置难以瞬时变化。所以, 当给定值变化时, 被控量不可能立即等于给定值, 而需要经过一个过渡过程, 即动态过程。所谓动态过程就是指系统受到外加信号 (给定值或扰动) 作用后, 直输出量到达稳定值之前被控量随时间变化的全过程。而把被控量处于相对稳定的状态称为静态或稳态。

对恒值控制系统与随动控制系统的具体要求是不同的, 但共同的基本要求是一样的, 即稳定性、快速性、准确性。实际应用中又以二阶系统应用最广泛, 且许多高阶系统都可以用二阶系统来近似分析, 下面以二阶系统为例来分析基本要求。

### 1. 稳定性

稳定性是表示系统受到外作用后, 其动态过程的振荡倾向和系统恢复平衡的能力。如果系统受外力作用后, 经过一段时间, 其被控量可以达到某一稳定状态, 则称系统是稳定的, 否则称为不稳定的。稳定性是系统工作的先决条件, 是大前提, 实用的系统必须是稳定的。

若将单位阶跃信号作用于某恒值系统, 那么它的理想输出应该也是一个阶跃信号。如图 1-15 (a) 所示。

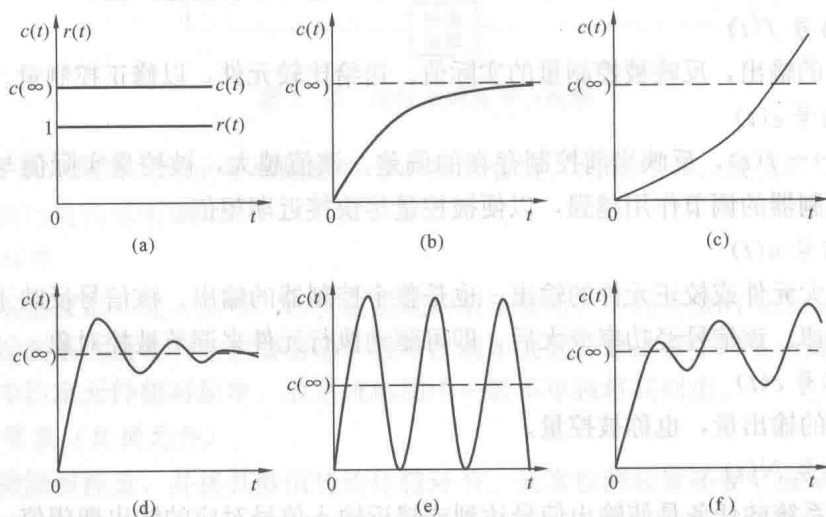


图 1-15 系统单位阶跃响应曲线

(a) 输出理想阶跃信号; (b) 无振荡稳定系统; (c) 无振荡不稳定系统;

(d) 振荡稳定系统; (e) 振荡且振幅稳定下的不稳定系统; (f) 振荡且振幅不稳定下的不稳定系统

可是由于系统具有惯性、能量有限等因素;  $c(t)$  不可能达到图 1-15 (a) 的效果。一般会出现如图 1-15 (b) ~ (f) 所示的几种动态过程。

图 1-15 (b) 中,  $c(t)$  没有发生振荡, 而是随  $t$  的增长呈指数曲线趋近于  $c(\infty)$ , 即理想的输出值, 这种情况我们称系统是稳定的。

图 1-15 (c) 中,  $c(t)$  也没有发生振荡, 但是随  $t$  的增长而不断增长, 并没有向  $c(\infty)$  趋近。这种情况下, 系统是不稳定的。

图 1-15 (d) 中,  $c(t)$  发生振荡, 但振幅随  $t$  的增长逐渐衰减, 并且  $c(t)$  逐渐趋近于  $c(\infty)$ 。这种情况下, 我们称系统是稳定的。

图 1-15 (e) 中,  $c(t)$  出现了振荡, 且振幅恒定。图 1-15 (f) 中,  $c(t)$  也发生振荡, 且

振幅随  $t$  的增长越来越大, 在图 1-15 (e)、(f) 这两种情况下, 系统都是不稳定的。

综上分析, 系统是否稳定不取决于  $c(t)$  是否出现振荡, 而仅取决于  $c(t)$  是否趋近于  $c(\infty)$ , 若  $c(t)$  能趋近于  $c(\infty)$ , 则系统是稳定的, 否则系统就是不稳定的。

需要注意, 系统是否稳定仅取决于系统的元件参数, 也就是其固有特性, 而与输入信号的形式无关。另外, 系统是稳定, 但稳定的程度不高, 这样的系统也无实用价值。因系统所处环境因素影响系统元件性能参数, 性能参数的改变可能使系统由稳定变为不稳定。

### 2. 快速性

稳定性是首要的、必须的。在满足稳定性的前提下, 实际系统还要满足一定的快速性。快速性是由动态过程长短来表征的, 它反映的就是  $c(t)$  趋向于  $c(\infty)$  所用的时间。时间越短, 快速性越好。如轧钢中的线材轧制, 线材以每秒十几米的速度进料, 快速性差的系统根本无法满足生产和工艺要求。

快速性反映系统的动态性能, 反映系统输出对输入响应及输出对干扰反映的快慢程度。

### 3. 准确性

如某一系统可以趋近于  $c(\infty)$ , 而最终它趋近于  $c(\infty)$  的程度反映的就是系统的准确性。准确性是由输入给定值与输出响应的终值之间的差值来表征的, 它反映的是系统的静态性能。

这三个基本要求只是定性的描述, 在性能指标中将给出定量的描述。另外, 对于同一控制系统, 这三个要求通常是相互制约的。例如, 提高了快速性, 通常会导致振荡加剧, 而降低了稳定性。而单纯提高准确性, 又会导致快速性下降。所以, 在实际系统设计时, 三方面性能要有所侧重, 折中考虑。

## 小 结

1. 所谓自动控制, 就是在没有人直接参与的情况下, 利用控制器来调节被控对象, 使其按照预先给定的规律运行, 与其对应的是人工控制。人工控制精度低, 自动控制精度高。

2. 自动控制按其控制方式不同可分为开环控制、闭环控制和复合控制等。开环控制是指输出信号不会反过来影响控制器的给定值, 即信号是单向流动的。闭环控制则存在信号的反向流动, 输出信号会参与系统的调节过程。开环控制与闭环控制按特定方式结合便构成了复合控制, 适用于特殊场合。

3. 闭环控制常见的是反馈控制, 又称偏差控制, 即将输出信号与输入信号进行比较, 产生偏差。利用该偏差去调节控制器的输出, 从而调节被控对象的输出实际值接近期望值。偏差越大, 控制作用越强。自动控制原理中主要讨论闭环控制方式, 其主要特点是抗扰能力强, 控制精度高, 但存在能否稳定的问题。

4. 不同的分类方法, 对应地可把系统划分为多种类型, 便于对不同类型的系统采用不同的分析方法。常见的分类如恒值给定系统、随动系统与程序控制系统; 线性系统与非线性系统; 定常系统与时变系统; 连续系统与离散系统等。

5. 对控制系统的三个基本要求是稳定性、快速性和准确性。稳定性是前提, 不稳定则