

面向21世纪高等院校  
机械类专业规划教材  
电子科技大学“十五”规划精品教材



# 控制工程基础

姚伯威 孙 锐 主编

国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

面向 21 世纪高等院校规划教材  
电子科技大学“十五”规划精品教材

# 控制工程基础

姚伯威 孙锐 主编

国防工业出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书着重介绍经典控制理论的基本概念, 内容主要包括: 自动控制系统的一般概念, 线性控制系统的数学模型, 时域分析法, 根轨迹法, 频域分析法, 控制系统校正, 采样控制系统, 非线性控制系统, 状态空间分析及最佳控制简介。

书末附录中的拉普拉斯变换、Z 变换、信号流程图可供阅读时查询之用。

本书的特点是: 文字简练, 概念清晰, 避免了繁杂的数学推导, 便于自学。

本书适合于机械、电子、计算机应用技术、电子信息工程、工业工程等非自控专业及相关专业用作教材, 亦可供有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

控制工程基础/姚伯威, 孙锐主编. —北京: 国防工业出版社, 2004.5

面向 21 世纪高等院校规划教材

ISBN 7-118-03356-1

I. 控... II. ①姚... ②孙... 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 (2003) 第 110939 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 17 394 千字

2004 年 5 月第 1 版 2004 年 5 月北京第 1 次印刷

印数: 1—5000 册 定价: 23.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

# 前 言

本书为高等院校非自动控制专业及其他有关专业的本科生（兼顾大专生）教材。在编写过程中，我们总结了多年的教学经验，参考了国内外有关书籍和文献，在注重系统性的同时，力图贯彻“少而精”的原则，理论联系实际，注意工程背景，在叙述方法上，力求深入浅出，突出重点。

本书主要对经典控制理论的基本概念进行了阐述。全书共分九章，其中第一、二、三、五章是重点。第四章根轨迹法是一种常用的工程分析方法，使用十分简便，特别是用于多回路系统的研究，效果更加明显。第六章将工业现场的常规P、I、D控制规律与通用的系统校正网络的概念结合起来叙述，目的是让读者更容易了解校正的思想和熟悉最常用的工程校正方法。第七章简要地阐述了采样控制系统的基本概念，为今后进行计算机控制系统的分析和设计打下初步基础。机电控制系统中的非线性结构因素，如摩擦、齿隙等，对系统的性能影响严重，是控制工作者在实际工作中不可忽视的问题，在第八章中，安排了相当篇幅，并辅以实例进行讨论。第九章提到了状态空间分析及最佳控制的一些初步概念，作为一种引见，谨供参考。

考虑到有的读者对拉普拉斯变换及Z变换不熟悉或需要回顾，为方便阅读，在附录中简要地介绍了这部分内容。

本书由姚伯威编写第一、八章及附录，孙锐编写第二、三、四章，吕强编写第五、六章，徐俊编写第七章，武好明编写第九章。本书由姚伯威、孙锐主编，吕炳朝教授主审。同时，李学生、罗晶、唐扬眉、黄洪全同志参与了本书的录入、画图、校对、修订等工作，在此致以衷心的感谢。

本书在编写过程中，吸取了许多兄弟院校自动控制教材的优点，得到了许多老师的帮助，在此一并表示感谢。

限于编者水平，书中难免存在错误与不妥之处，殷切希望广大读者批评指正。

附：本书配有多媒体教学课件和例题习题解答，如有需要的读者请与电子科技大学机械电子工程学院孙锐联系。（邮编：610054；电话：028-83202572 或 028-83203324）

编 者

2003年10月

# 目 录

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 第一章 自动控制系统的一般概念 .....            | 1   |
| 1-1 引言 .....                     | 1   |
| 1-2 控制系统工作原理和组成 .....            | 1   |
| 1-3 自动控制系统的分类和对自动控制系统的基本要求 ..... | 6   |
| 习题 .....                         | 10  |
| 第二章 控制系统的数学模型 .....              | 12  |
| 2-1 物理系统的动态描述——数学模型 .....        | 12  |
| 2-2 建立系统数学模型的一般步骤 .....          | 13  |
| 2-3 传递函数 .....                   | 20  |
| 2-4 系统方框图及其简化 .....              | 32  |
| 2-5 控制系统的传递函数 .....              | 36  |
| 习题 .....                         | 39  |
| 第三章 时域分析法 .....                  | 43  |
| 3-1 概述 .....                     | 43  |
| 3-2 一阶系统的时域分析 .....              | 46  |
| 3-3 二阶系统的时域分析 .....              | 50  |
| 3-4 高阶系统的时域分析 .....              | 62  |
| 3-5 控制系统的稳定性 .....               | 65  |
| 3-6 控制系统的误差分析 .....              | 71  |
| 习题 .....                         | 84  |
| 第四章 根轨迹法 .....                   | 88  |
| 4-1 根轨迹法的基本概念 .....              | 88  |
| 4-2 绘制根轨迹的一般规则 .....             | 91  |
| 4-3 控制系统根轨迹分析 .....              | 104 |
| 4-4 广义根轨迹 .....                  | 112 |
| 习题 .....                         | 120 |
| 第五章 频域分析法 .....                  | 123 |
| 5-1 频率特性 .....                   | 123 |
| 5-2 典型环节的频率特性 .....              | 128 |
| 5-3 控制系统的开环频率特性 .....            | 140 |
| 5-4 闭环控制系统的频率特性 .....            | 143 |
| 5-5 用频率法分析系统的稳定性 .....           | 147 |

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| 5-6 控制系统的相对稳定性 .....                     | 155 |
| 5-7 频域性能指标与时域性能指标间的联系 .....              | 157 |
| 习题 .....                                 | 162 |
| <b>第六章 控制系统的校正</b> .....                 | 165 |
| 6-1 概述 .....                             | 165 |
| 6-2 PD 控制(比例 + 微分控制)和超前校正 .....          | 166 |
| 6-3 PI 控制(比例 + 积分控制)和滞后校正 .....          | 170 |
| 6-4 PID 控制(比例 + 积分 + 微分控制)和滞后-超前校正 ..... | 175 |
| 6-5 反馈校正 .....                           | 176 |
| 习题 .....                                 | 178 |
| <b>第七章 采样控制系统</b> .....                  | 180 |
| 7-1 概述 .....                             | 180 |
| 7-2 脉冲传递函数 .....                         | 183 |
| 7-3 采样控制系统分析 .....                       | 186 |
| 习题 .....                                 | 191 |
| <b>第八章 非线性控制系统</b> .....                 | 193 |
| 8-1 典型非线性特性 .....                        | 193 |
| 8-2 描述函数法 .....                          | 195 |
| 8-3 机-电控制系统中的结构因素影响 .....                | 204 |
| 习题 .....                                 | 218 |
| <b>第九章 状态空间分析及最佳控制简介</b> .....           | 220 |
| 9-1 概述 .....                             | 220 |
| 9-2 系统的状态空间分析法 .....                     | 220 |
| 9-3 最佳控制问题 .....                         | 234 |
| <b>附录 I 拉普拉斯(Laplace)变换</b> .....        | 242 |
| <b>附录 II Z 变换</b> .....                  | 252 |
| <b>附录 III 信号流图</b> .....                 | 260 |
| <b>参考文献</b> .....                        | 266 |

# 第一章 自动控制系统的一般概念

## 1-1 引言

自动控制在工业、农业、国防和科学技术的现代化中，起着重要的作用，并在国民经济和国防建设的各个领域得到了广泛应用。随着生产和科学技术的发展，特别是数字计算机的迅速发展和应用，自动控制技术更显示了越来越重要的作用和广阔的前景。

“自动化”这个词的意思是自己运动或者自己动作。“控制”这个词可以理解为命令、指挥、管理和调节等若干种含意。

所谓自动控制，就是在没有人直接参加的情况下，利用控制装置使被控制的对象（如机器、设备或生产过程等）自动地按照预定的规律运行。例如，化工生产中反应塔的温度和压力能够自动维持恒定不变；程序控制机床能够按预先排定的工艺程序自动地进行切削，加工出预期的几何形状；跟踪雷达和指挥仪所组成的防空系统能使火炮自动地瞄准目标；无人驾驶飞机能按预定航线自动飞行；人造地球卫星能够发射到预定轨道并能准确回收等，这些都是自动控制技术的应用。

自动控制的对象是系统。所谓系统，是由相互制约的各个部分组织成的具有一定功能的整体。例如，一部自动机器（工程系统）、一个生物体（生物系统）、一个经济协作区（经济系统）和一个社会组织乃至一个国家（社会系统）都是一个系统。能够对被控制对象的工作状态进行自动控制的系统，称为自动控制系统。它一般包括控制器和被控制对象两大部分。被控制对象（简称被控对象）是指要求实现自动控制的机器、设备或生产过程，例如飞机、锅炉、机床以及化工生产过程等。控制器则是指对被控对象起控制作用的设备总体。

一般情况，自动控制系统可分为开环控制系统和闭环控制系统。其主要区别仅在于，闭环控制系统用了反馈比较。

## 1-2 控制系统工作原理和组成

### 一、人工控制系统和自动控制系统

在各种生产过程及生产设备中，常常需要使其中某些物理量（如温度、压力、位置、转速等）保持恒定，或者让它们按照一定的规律变化。要满足这些要求，就应该对生产过程或生产设备进行及时的控制或调整。下面通过一个恒温控制系统的例子，分析如何

实现对恒温系统的自动控制。

要实现电炉恒温箱的控制，可以有两种方法：人工控制和自动控制。图 1-1 是电炉炉温人工控制系统，用电炉加热，使其温升到  $800^{\circ}\text{C}$ ，然后使炉子的温度保持  $800^{\circ}\text{C}$  不变。由于有很多干扰因素将使温度发生变化，如电源电压的波动、环境温度的变化等，为了抵消这些干扰因素的影响，可以由一名操作人员来调整调压器，改变电炉回路的电流值，从而达到所要求的控制炉温  $800^{\circ}\text{C}$  的目的。由温度计测量温度并显示给操作人员。

我们把人工控制的过程归纳如下：

- (1) 观察由测量元件测出的炉温；
- (2) 与要求的温度值进行比较，得到偏差；
- (3) 根据偏差的大小和方向进行控制。若炉温高于  $800^{\circ}\text{C}$ ，则朝着减小加热电流的方向转动调压器，从而使炉温下降；若炉温低于  $800^{\circ}\text{C}$ ，则朝着加大加热电流的方向转动调压器，使炉温上升；若炉温处于  $800^{\circ}\text{C}$ ，则不动调压器。

因此，人工控制过程就是“检测偏差和纠正偏差”的过程。而这个过程都是通过人实现的，人在此过程中，起到了测量、比较、判断、操作的作用。

对于图 1-1 系统，如果能够找到一个控制器代替人的职能，那么一个人工控制系统就可以变成一个自动控制系统了。图 1-2 为电炉炉温自动控制系统。

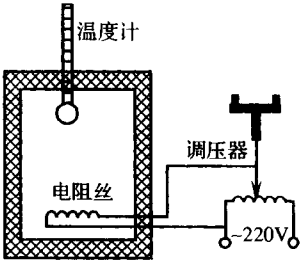


图 1-1 电炉炉温人工控制系统

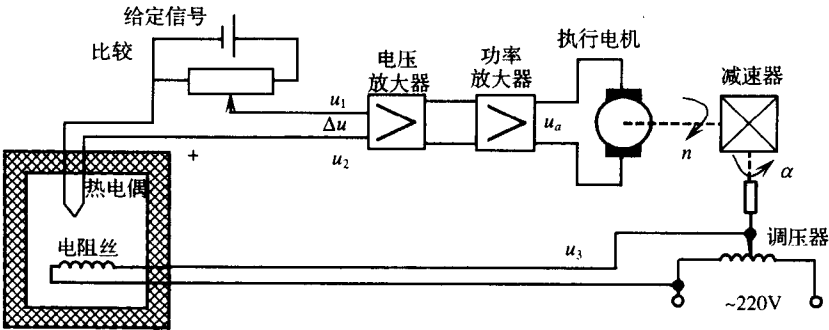


图 1-2 电炉炉温自动控制系统

图中电压  $u_1$  比拟于所要求的炉温值  $T_1 = 800^{\circ}\text{C}$ ，电压  $u_2$  比拟于炉内实际温度  $T_2$ ， $\Delta u = u_1 - u_2$  比拟于温度的偏差信号  $\Delta T = T_1 - T_2$ ，此  $\Delta u$  经过电压放大器、功率放大器放大后，控制电机的旋转速度与方向，并通过减速器带动调压器动作。



现在, 分析一下具体的控制过程。假如某种原因使炉温  $T_2$  高于要求的炉温值  $T_1$ , 即  $T_2 > T_1$ , 则有  $u_2 > u_1$ , 则得偏差信号  $\Delta u = u_1 - u_2 < 0$ 。偏差信号  $\Delta u$  经放大后, 将控制直流电机转动, 并通过减速器带动调压器朝减小电炉加热的方向转动, 使炉温  $T_2$  及反馈信号  $u_2$  下降, 进而使偏差信号  $\Delta u$  下降, 直到  $u_2 = u_1$ , 即偏差信号  $\Delta u = 0$  时, 电机停止转动, 电炉的温度恢复到要求的数值。反之亦然。

上述人工控制系统和自动控制系统是极相似的, 误差测量装置类似于操作者的眼睛 (测量作用), 自动控制器类似于操作者的头脑 (比较作用), 执行机构类似于操作者的肌体 (执行作用)。

为了便于研究问题, 把实际的物理系统 (见图 1-2) 按信号传递过程画成如图 1-3 所示的方框图 (或称方块图)。

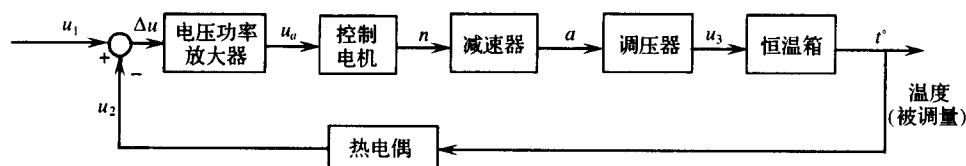


图 1-3 炉温自动控制系统方框图

图中用方框表示自动控制系统的组成元件, 并在方框中注明它的名称或功能。而图中的箭头表示信号的传递方向, 符号  $\oplus$  代表比较元件, 一般说, 它的输出信号等于各输入信号代数相加 (用+、-号表示)。

## 二、开环控制系统和闭环控制系统

工业上用的控制系统, 不论是自动的还是人工的, 根据有无反馈作用, 可以分为两类: 一类是开环控制系统, 另一类是闭环控制系统。由于各有特点, 在生产实践中都应用较广。

### 1. 开环控制系统

如果系统的输出、输入端之间不存在反馈回路, 输出量对系统的控制作用没有影响, 这样的系统为开环控制系统。

图 1-4 (a) 为一个开环控制系统。控制信号  $u_1$  通过放大器变为  $u_a$  加在执行电机的控制绕组上, 执行电机则带动负载转过一个角位移  $\theta_0$ , 这个系统对被控制量 (负载转角) 不进行任何检测, 且没有反馈, 不产生偏差信号。因此, 它无法对系统进行再控制。

开环控制系统仅仅是根据控制信号对负载进行控制。开环控制系统的精度主要取决于系统各部分的校准精度以及工作过程中元件和参数的稳定程度。如果系统不存在内部扰动和外部扰动, 以及元件参数比较稳定的话, 采用开环控制系统比较简单, 且可以保证足够的精度。但在系统存在扰动的情况下, 如果被控制的输出量偏离给定值时, 开环控制系统就没有纠正的能力了。

### 2. 闭环控制系统

凡是系统的输出、输入端间存在反馈回路, 即输出量对控制作用有直接影响的系统, 叫做闭环控制系统。对图 1-4 (a) 所示开环系统引入反馈回路, 即用电位器  $R_2$

直接检测被控制量（负载转角），然后反馈到输入端，就构成了闭环控制系统，如图 1-4 (b) 所示。

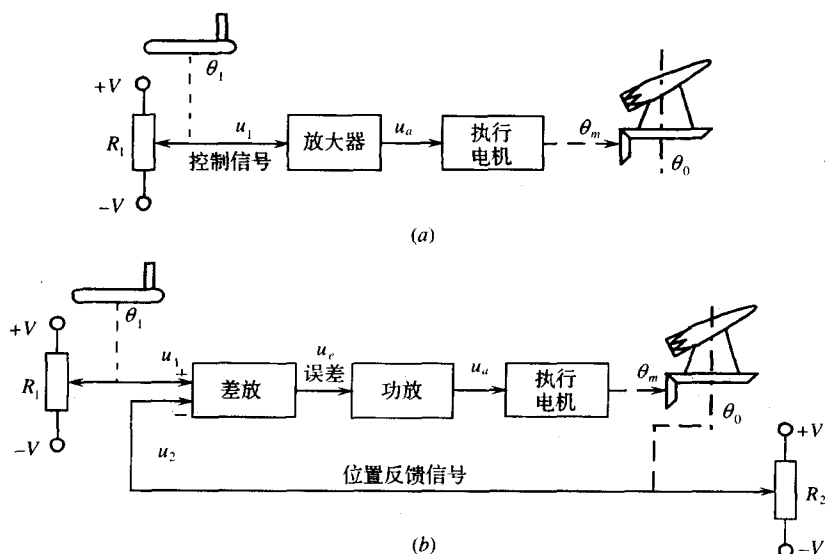


图 1-4 导弹发射架控制系统

（虚线为机械联接）

从图中可以明显看出，产生控制作用的关键是偏差信号，只有当偏差信号不为零时，才存在控制过程。当偏差信号为零时，控制过程就停止。而偏差信号是对被控制量不断测量、转换并反馈到系统的输入端与控制量相减（即负反馈）得到的。这种利用负反馈得到偏差信号从而产生控制作用，又去消除偏差的控制原理叫做反馈控制原理。由于有了负反馈，自动控制系统便形成了一个按偏差进行控制的闭环系统，也称反馈控制系统，就是应用反馈作用来减小系统的误差。

图 1-5 (a) 和 (b) 分别为开环和闭环控制系统的一般方框图。

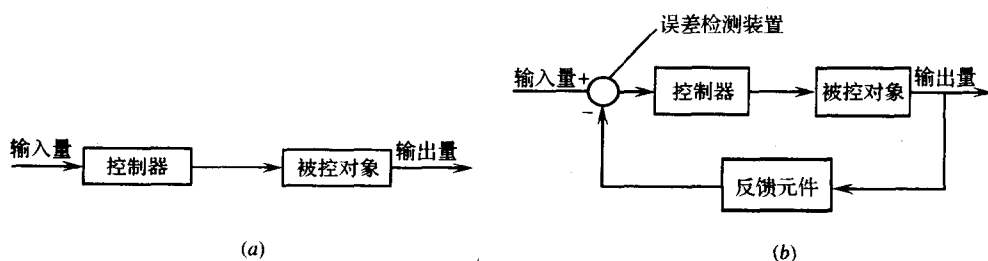


图 1-5 开环控制系统(a)和闭环控制系统(b)的一般方框图

### 3. 闭环与开环控制系统比较

闭环控制系统的优点是采用了反馈，因此对外扰动和系统内参数的变化引起的偏差能够自动地纠正。这样就可以采用精度不太高而成本比较低的元件组成一个精确的控制系统。而开环控制系统却相反，因为没有反馈，故没有纠正偏差的能力，外扰动和系统

内参数的变化将引起系统的精度降低。

从稳定性的角度看，开环控制系统容易解决。而闭环控制系统不然，稳定性始终是一个关键问题。因为参数如果选择不当，就会造成系统振荡，甚至使得系统不稳定，完全失去控制。

开环控制系统容易建造，结构简单，成本低，工作稳定。一般来说，当系统控制量的变化规律能预先知道，并且不存在外部扰动（或有办法抑制）时，采用开环控制较好。特别是被控制量很难进行测量时更是如此。如果系统的控制量和干扰量均无法事先预知时，或系统中元件参数不稳定时，采用闭环控制的优点就显得特别突出。

如果要求实现复杂而准确度较高的控制任务，则可将开环控制与闭环控制结合起来一起应用，组成一个比较经济而又性能较好的复合控制系统。

三、反馈控制系统的基本组成

1. 基本组成

对于一个控制系统来说，不管其结构多么复杂，用途各种各样，但它都是由一些具有不同职能的基本元件或基本环节所组成。基本元件包括：

测量元件：也叫反馈元件，对输出信号进行测量。

比较元件：对系统输出量与输入量进行代数运算，给出偏差信号。比较元件在多数控制系统中是和测量元件结合在一起的。

变换放大元件：对微弱的偏差信号进行放大和变换，输出足够功率和要求的物理量。

执行元件：根据放大后的偏差信号，对被控对象执行控制任务，使被控制量与希望值趋于一致。

被控对象：自动控制系统中需要进行控制的机器、设备或生产过程。

校正元件：参数或结构便于调整的元件，用于改善系统性能。串联在系统前向通路内的校正元件称为串联校正元件，接成反馈形式的校正元件称为反馈校正元件。

图 1-6 为一个典型的反馈控制系统。

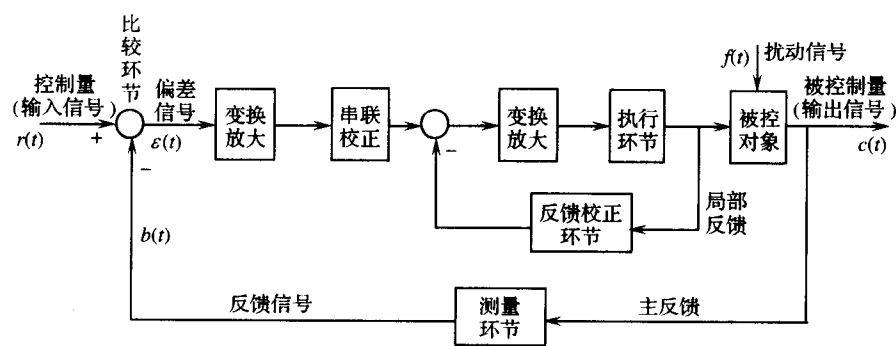


图 1-6 典型反馈控制系统一般组成

2. 名词术语

输入信号  $r(t)$ ：又称输入量、控制量或给定量，是控制输出量变化规律的信号。往往把输入到控制系统中的信号（包括扰动信号）广义地叫做输入量。

输出信号  $c(t)$ ：又称输出量，被控制量或被调整量。它的变化规律是要加以控制的，应保持与输入信号之间有一定的函数关系。

反馈信号  $b(t)$ ：或称反馈量。从系统（或元件）输出端取出信号，经过变换后加到系统（或元件）输入端，这就是反馈信号。当它与输入信号符号相同时，能加强输入信号的作用，叫正反馈。反之，符号相反，抵消输入信号作用时，叫负反馈。直接取自系统最终输出端的反馈叫主反馈。主反馈一定是负反馈，否则偏差越来越大，直至系统失去控制。除主反馈外，有的系统还有局部反馈，这主要是为对系统进行校正、补偿或线性化而加入的。

偏差信号  $\varepsilon(t)$ ：或称偏差，是控制信号与主反馈信号之差。

误差信号  $e(t)$ ：或称误差，是系统输出量的实际值与希望值（图中未标出）之差。这里要注意，误差和偏差不是同一概念，只有在全反馈系统中，误差才等于偏差。

扰动信号  $f(t)$ ：又称扰动或干扰。除控制信号以外，对系统输出量产生影响的因素都叫扰动。如果扰动产生在系统内部，称为内扰；产生在系统外部，则称为外扰，外扰动也是系统的一种输入量。

## 1-3 自动控制系统的分类和对自动控制系统的基本要求

### 一、自动控制系统的分类

人们往往从各种角度赋予控制系统各种名称，大范围如工程系统、生物系统、经济系统、社会系统，小范围如机电系统、液压系统、气动系统等，还有如数字系统、分布参数系统、集中参数系统、自适应系统、自学习系统等。因此，要对自动控制系统统一分类，是很困难的。分类方法也很多，例如，根据系统元件特性是否线性，可分为线性系统和非线性系统；根据元件参数是否随时间变化，可分为时变系统和定常系统；根据系统内信号传递方式的不同而分为连续系统和断续系统；根据被调量是否存在稳态误差可分为有差系统和无差系统；根据被调量所遵循的运动规律，可分为恒值系统、随动系统和程序系统。

下面我们仅就几种系统作简单说明。

#### 1. 随动系统

在闭环系统中，如果控制信号为一任意时间函数（随机信号），其变化规律无法预先确定，而输出量能随输入量的变化而变化的系统称为随动系统。

图 1-7 为雷达天线随动系统的工作原理图。在此工作状态下，输入信号  $\theta_i(t)$  为随机信号，输出信号  $\theta_o(t)$  能始终自动而准确地复现控制量（输入信号） $\theta_i(t)$  的变化规律。

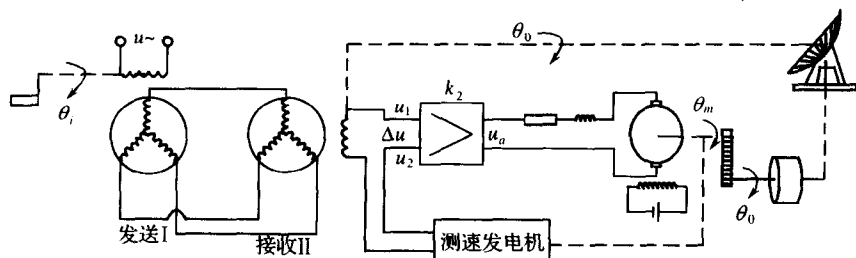


图 1-7 雷达天线随动系统

下面我们来说明一下随动系统的工作原理。图 1-7 中“发送 I”为自整角发送机，它的转子轴与系统输入轴相固联，“接收 II”为自整角接收机，它的转子轴与天线轴相固联，此轴为系统的输出轴（虚线表示机械联接）。这一对自整角机组成测角线路，测量出系统的输出轴与输入轴之间的角差，并转换成相应的电压，其输出电压的大小由角差的大小决定，而输出电压的相位由角差的符号决定，即

$$u_1 = k_1(\theta_i - \theta_o) = k_1 \cdot \Delta\theta$$

式中  $k_1$ ——自整角接收机的传递系数（V/rad）。

系统的执行元件为一直流伺服电机，由功率放大器  $k_2$  的输出信号  $u_a$  来控制，直流电机的转轴经减速器带动被控制对象（雷达天线）运动。

假设随动系统业已调好，处于平衡状态， $\theta_i = \theta_o = 0^\circ$ ，故  $u_1 = 0$ ，又  $u_2 = 0$ ，从而  $u_a = 0$ ，直流执行电机不动，雷达天线亦不动。

在工作过程中若  $\theta_o \neq \theta_i$ ，则  $\Delta\theta \neq 0$ ，则  $u_1 \neq 0$ ，只要  $\Delta u = u_1 - u_2 \neq 0$ ， $u_a \neq 0$ ，则直流执行电机便带动雷达天线转动。

自整角发送机的转子可以由雷达操纵员摇动装在轴上的手柄，使其转动（称为手控状态），亦可用其他电机带动发送机转子转动（称为自动搜索状态）。

此时，随动系统的方框图如图 1-8 所示。

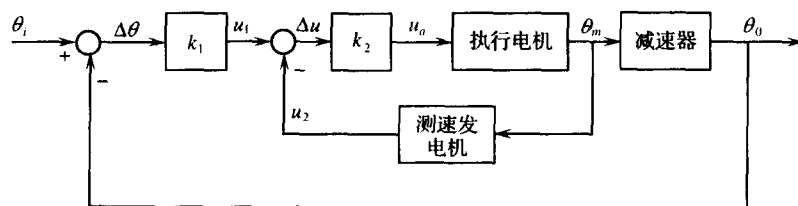


图 1-8 雷达天线随动系统原理方框图

## 2. 恒值系统

输出量以一定精度等于给定值，而给定值一般不变或变化很缓慢（扰动可随时变化）的系统称为恒值系统。

图 1-9 表示一个压力控制系统。炉内的压力  $P$  由挡板 4 的位置控制，并且由压力测量元件 1 进行测量。测出的压力信号传递到控制器 2 中，与希望值进行比较。若有偏差存在，则执行机构 3 便相应地转动挡板，调节炉内压力，以消除偏差。

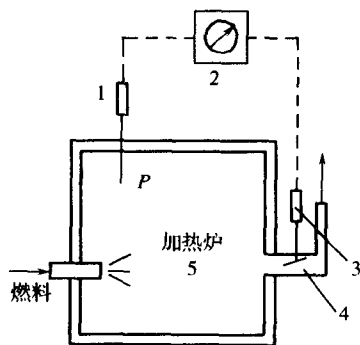


图 1-9 压力控制系统

压力测量元件可以选用压电式变换器，它是一种发电变换器，利用某些物质的压电效应制成。它可以把压力信号转换成相应的电压信号，实现对压力的测量。

压力控制系统的方框图如图 1-10 所示，其中  $U$  为给定电压信号。

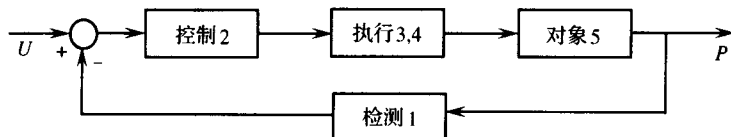


图 1-10 图 1-9 的原理方框图

### 3. 程序控制系统

如果控制信号  $r(t)$  的变化规律为已知时间函数，即事先确定的程序，这类控制系统称为程序控制系统。

图 1-11 是数字程序机床控制系统原理方框图，可以构造开环控制系统或闭环控制系统（虚线所示）。

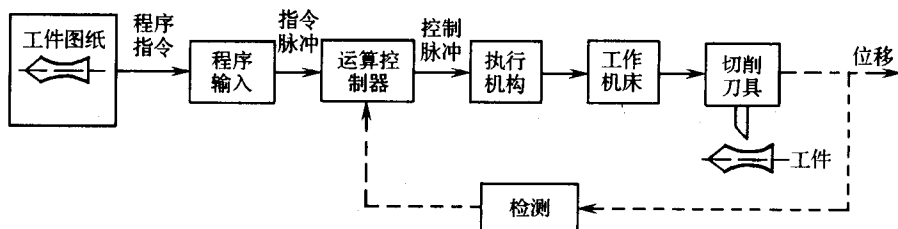


图 1-11 数字控制系统

所谓数字控制，是一种用数字信息来控制机器部件运动的方法。例如工作台的运动可以由程序指令（二进制信息）来控制。系统由程序输入设备、运算控制器和执行机构所组成。首先，根据加工图纸的要求，选定加工过程，编制程序指令（即要求机床实现的加工命令），然后输出控制脉冲给执行机构，从而驱动机床运动，完成程序指令的要求。执行机构可以选用步进电机，运算控制器可以用微型计算机。

数字程序控制机床闭环系统简化方框图如图 1-12 所示。

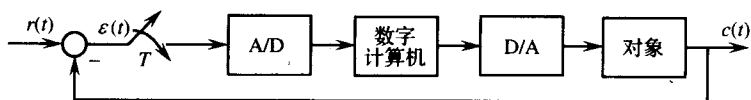


图 1-12 数字闭环控制系统框图

由于控制量  $r(t)$ 、被控制量  $c(t)$  和偏差  $\varepsilon(t)$  均为模拟量，而数字计算机只能处理数字的离散信号，因此，系统中需用采样开关（ $T$  为采样周期）、模拟-数字转换器（A/D）、数字-模拟转换器（D/A），这就是采样控制系统。采样控制系统将在第七章叙述。

### 4. 有差、无差系统

按系统在输入量的作用下是否存在稳态误差而分为有差系统和无差系统。

我们知道，恒值系统的主要任务是当存在扰动时，保证输出量维持在希望值上。也

就是说,要在存在扰动的情况下,保持输出量不变。如果某个系统的扰动作用经过一段时间而趋于某一恒定的稳态值,而被调量的实际值和希望值之差也逐渐趋于某一不为零的恒值(这个值取决于扰动作用的大小),那么,这个系统称为对扰动有差的系统。

如果一个系统的扰动作用经过一段时间而趋于某一恒定的稳态值,而被调量的实际值和希望值之差逐渐趋于零,且与扰动作用的大小无关,那么这个系统就称为对扰动无差的系统。

在随动系统中,我们主要关心的是确定系统对给定输入有差还是无差。

图 1-13 是一个简单的液面自动控制系统,其中  $h_1$  为给定值,液面高度  $H$  为被调量,液体流出量  $Q_2$  为扰动作用。设在一定的流量  $Q_2$  下,水位是  $H$ ,这时进水阀门有一定的开启程度,且流入量  $Q_1$  和流出量  $Q_2$  相等。如果流出量  $Q_2$  增加,液面就降低,浮筒位置下降,通过杠杆作用而使阀门动作,使进水阀门开口加大而增加流入量,以使液面稳定。当流入量再次等于流出量时,就重新达到平衡。流出量愈大,阀门就必须开得愈大,因而稳态面也就愈低。这种系统在不同的扰动作用下,被调量的值相应地也不同,所以这是一个有差系统。

图 1-14 所示为另一种液面系统。它和图 1-13 不同的是,当流出量  $Q_2$  增加时,浮筒下降,通过杠杆使上接点闭合,这时电机开始转动,升高阀门,使流量增加,促使液面回升,反之亦然。只有当液面高度等于给定值时,接点不闭合,电机才不转。所以不论流出量  $Q_2$  的大小如何,被调量液面高度  $H$  的稳态值只可能发生在液面的给定值上,即相应于图 1-14 中接点的中性位置,这是一个无差系统。

应该强调指出,同一系统可能对扰动输入是有差的,而对给定输入量是无差的,或者相反。因此,研究一个自动控制系统是有差的还是无差的,必须指出是对扰动而言,还是对给定输入而言。

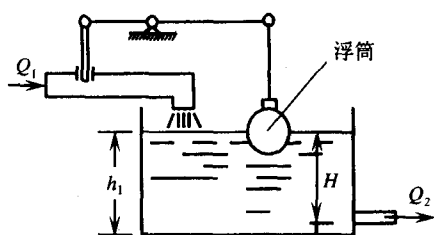


图 1-13 有差系统

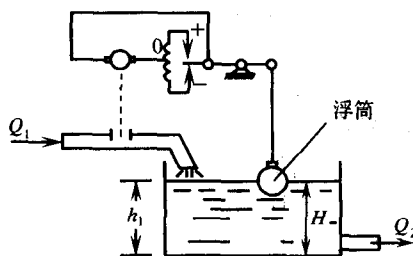


图 1-14 无差系统

## 二、对自动控制系统的基本要求

工程技术应用中,对控制系统都有一定的具体要求,但由于控制对象不同,工作的方式不同,完成的任务不同,因此对系统品质指标的要求也往往不一样。

但是自动控制技术是研究各类控制的共同规律的一门技术。所以反映反馈控制系统的主要性能指标是一样的,一般可归纳为:稳定性、快速性和准确性(稳态精度),即稳、快、准。

图 1-15 所示为典型二阶系统在阶跃信号输入时,系统输出响应  $c(t)$  随时间的变化情

况，可以用作分析系统性能的依据。

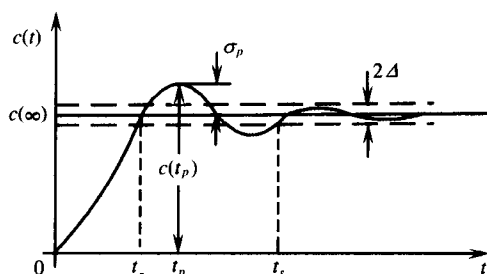


图 1-15 典型二阶系统阶跃响应曲线

### 1. 稳定性

由于系统存在惯性，当系统的各参数配合不当时，将会引起系统振荡，而失去工作的能力。因此，任何一个控制系统要想令人满意地工作，首先应该是稳定的。也就是说，应该具有这样的性质：输出量偏离给定输入量的初始值应该随着时间增长逐渐趋近于零。因此，稳定性的要求是控制系统正常工作的首要条件，而且是最重要的条件。必须指出，稳定性的要求应该考虑到满足一定的稳定裕度，以便照顾到系统工作时参数可能发生的变化。

### 2. 快速性

所谓快速性，就是指当系统的输出量与给定的输入量之间产生偏差时，消除这种偏差过程的快慢程度。可见，快速性是衡量系统性能的一个很重要的指标。在分析和研究控制系统时，在阶跃信号作用下，快速性就是系统跟随的瞬态响应时间（调整时间）。如图 1-15 所示的  $t_s$ ，一般是指被控量达到稳态值 95%（或 98%）所需的时间。它指出振荡衰减的快慢，即表现了瞬态过程结束的迅速程度。图中  $\Delta$  为允许误差值，一般取  $0.05c(\infty)$ ，或者  $0.02c(\infty)$ 。另外，快速性也表现为系统对给定信号的响应速度，即表现为输入信号加上后，系统的输出量跟随输入量变化的迅速程度。系统的快速性主要取决于系统的惯量及阻力作用的强弱等。

### 3. 准确性

就是指在调整过程结束后，实际输出量与希望输出量之间的误差，又称之为稳态误差或稳态精度。这也是衡量系统工作性能的重要指标，我们总是希望由一个稳态过渡到另一个稳态，输出量尽量接近或复现给定的输入量，或者说要求稳态精度要高。

对于同一系统，输入信号变化规律不同，稳态精度也不同。

按图 1-15 曲线定义的性能指标  $\sigma_p$ 、 $t_r$ 、 $t_p$ 、 $t_s$  等，将在第三章详细讨论。

## 习 题

1-1 试比较开环控制系统和闭环控制系统的优缺点？

1-2 日常生活中有许多闭环和开环控制系统。试举几个具体例子，并说明它们的



工作原理，画出结构方框图。

**1-3** 图 1-16 是一个水位自动控制系统，要求：

- (1) 试叙述它的工作原理。
- (2) 什么是给定输入？被调量？误差？
- (3) 指出系统可能存在的扰动。
- (4) 画出系统的结构方框图。

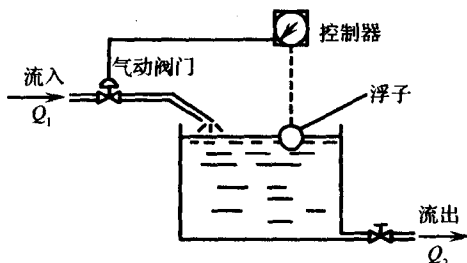


图 1-16 水位自动控制系统

**1-4** 汽车在公路上运行被当作闭环控制的例子。试画出这种“控制系统”的方框图。

**1-5** 教师-学生的教学过程可以视为一个试图将误差减至最小的反馈过程。学生学习可以被当作过程，预期的输出量就是所获得的知识，试建立这个教学过程的方框图。

**1-6** 图 1-17 为控制导弹发射架位置的系统，试说明其工作过程，画出方框图，并指出：

- (1) 给定输入、被调量各是什么？
- (2) 控制对象是什么？
- (3) 执行元件、放大元件、比较元件各是什么？

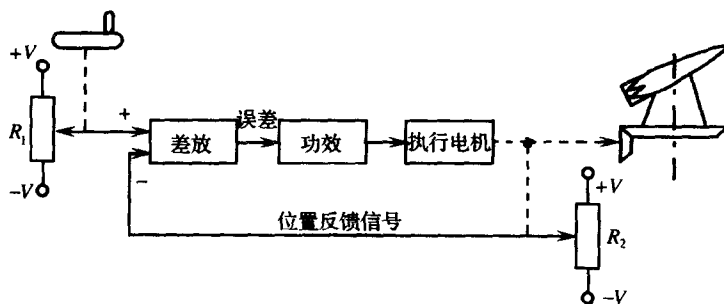


图 1-17 导弹发射架控制系统