



高职高专“十三五”规划教材

ZIDONG
KONGZHI
YUANLI JI YINGYONG

自动控制

原理及应用

主编 李瑞福
主审 王秀丽



电子科技大学出版社

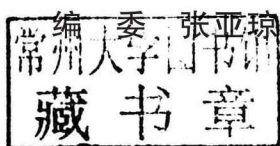


高职高专“十三五”规划教材

自动控制 原理及应用

ZIDONG KONGZHI
YUANLI JI YINGYONG

主 编 李瑞福
主 审 王秀丽
副主编 杨圣春 周红锴



电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理及应用/李瑞福主编. —成都: 电子科技大学出版社, 2017. 1
ISBN 978-7-5647-3971-3

I. ①自… II. ①李… III. ①自动控制理论 IV.
①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 240159 号

内 容 简 介

全书共分 6 章, 主要内容包括自动控制系统的基本概念、自动控制系统的数学模型、线性系统的时域分析法、控制系统的频域分析法、控制系统的校正与综合、自动控制应用。为加深对基础知识的理解, 本书精心挑选了大量的例题和习题, 并给出了部分习题的参考答案。

本书能够体现高职高专教学改革的特点, 突出理论知识的应用和实践能力的培养, 加强了实用性, 降低了理论难度。在内容编排上力求内容精炼, 通俗易懂, 由浅入深, 循序渐进; 在内容叙述上力求例题实用, 可读性强, 易于掌握。

本书适用于高职高专自动化技术、电气技术、机电一体化技术、应用电子技术、工业机器人、智能控制技术等专业使用, 也可作自学考试教材, 并可供工程技术人员学习参考或作为培训班的教材。

自动控制原理及应用

主 编 李瑞福

出 版: 电子科技大学出版社(成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)

策划编辑: 杨仪玮

责任编辑: 李燕芬

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮箱: usetcp@uestcp.com.cn

发 行: 全国新华书店经销

印 刷: 北京市彩虹印刷有限责任公司

成品尺寸: 185mm×260mm 印张 12.5 字数 286 千字

版 次: 2017 年 1 月第一版

印 次: 2017 年 1 月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-5647-3971-3

定 价: 32.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

◆本社发行部电话:(028)83202463,13911403936;本社邮购电话:(028)83201495。

◆本书如有缺页、破损、装订错误,请寄回印刷厂调换。

前言

本书在编写过程中,严格按照教育部高职高专规划教材的要求,遵循以应用为目的,以“必需、够用”为度的教学原则,努力做到理论联系实际、分析细致、通俗易懂和切合实用,突出高职高专培养应用型高技能人才的特色。

本书在编写中主要突出了以下 3 个方面的特点:

(1)在内容选取上,重视基本概念、基本分析方法的介绍,与传统教材相比,降低了理论难度,淡化了复杂的理论分析,力求由浅入深,循序渐进。

(2)在内容叙述上,力求简明扼要,通俗易懂,可读性强,使学生对基本理论能系统、深入地理解,为今后的学习奠定基础;同时注重分析问题、解决问题能力的培养。

(3)从培养应用型人才的角度出发,教材注重实用性,在侧重基本原理、基本概念阐述的同时,强调基本理论的实际应用,如以单闭环及双闭环直流调速系统的分析介绍了自动控制的实际应用。

全书共分 6 章,每章均列有内容提要,介绍每章需要了解和掌握的主要内容,便于指导学生自学。为便于学生对基础知识的掌握,书中配有大量的例题与习题。最后附有与本书配套的自我检测题两套,便于学生进行自我检测。

本书由辽宁石化职业技术学院李瑞福担任主编,由王秀丽教授担任主审,她对本书提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

作者在编写中虽然花了不少精力,但限于编者水平有限,书中疏漏和不妥之处在所难免,敬请使用本书的师生与读者批评指正。此外在本书的编写过程中参考了部分兄弟院校的教材和相关专家的资料,在此也表示真诚的谢意!

编者

2017 年元月

目 录

第 1 章 自动控制系统的基本概念 1

1.1 开环控制与闭环控制	(1)
1.2 自动控制系统的组成	(4)
1.3 自动控制系统的分类	(5)
1.4 对自动控制系统的性能要求	(6)
本章小结	(8)
习题	(9)

第 2 章 自动控制系统的数学模型 12

2.1 数学模型概述	(12)
2.2 控制系统的微分方程	(13)
2.3 拉普拉斯变换及其应用	(17)
2.4 传递函数	(22)
2.5 动态结构图	(33)
2.6 用梅逊公式求传递函数	(41)
2.7 反馈控制系统的传递函数	(43)
本章小结	(45)
习题	(47)

第 3 章 线性系统的时域分析法 51

3.1 典型输入信号	(51)
3.2 一阶系统的时域分析	(53)
3.3 二阶系统的时域分析	(56)
3.4 系统稳定性分析	(62)
3.5 系统稳态误差分析	(67)
本章小结	(71)

习题	(71)
----------	------

第 4 章 控制系统的频域分析法 74

4.1 频率特性的基本概念	(74)
4.2 典型环节伯德图	(78)
4.3 系统开环对数频率特性曲线的绘制	(84)
4.4 系统稳定性的频域分析	(91)
4.5 动态性能的频域分析	(96)
本章小结	(98)
习题	(99)

第 5 章 控制系统的校正与综合 102

5.1 控制系统校正基础	(102)
5.2 校正方式	(104)
5.3 线性系统的基本控制规律	(106)
5.4 常用校正装置	(110)
5.5 频率法串联校正	(117)
本章小结	(124)
习题	(124)

第 6 章 自动控制应用 126

6.1 直流调速系统概述	(126)
6.2 单闭环直流调速系统	(131)
6.3 转速、电流双闭环调速系统	(146)
本章小结	(151)
习题	(153)

附录 A 习题答案 156

附录 B 自我检测题 2 套 179

参考文献 192

第 1 章

自动控制系统的基本概念



内容提要

本章主要介绍了开环控制和闭环控制，自动控制系统的基本原理和组成，自动控制系统的类型和对自动控制系统的基本要求。

所谓自动控制，就是在没有人直接参与的情况下，利用控制装置，对生产过程、工艺参数等进行自动地调节与控制，使之按照预定的方案达到要求的指标。

自动控制技术已广泛地应用于工业、农业、国防、交通运输等各个领域。在发电厂，通过自动控制使发电电压保持恒定，尽量不受负荷变化和原动机转速波动的影响；在机械加工中，通过自动控制，保持工作台或刀具准确地跟随指令供给，从而获得高精度的加工质量；在军事和空间技术方面，宇宙飞船准确地飞行和返回地面、卫星按预定轨道飞行、导弹准确地击中目标等；其他诸如温度、湿度、流量、压力、转速及位置等方面的控制，都广泛地应用着自动控制技术。

自动控制技术的广泛应用有利于将人类从复杂、危险、烦琐的劳动环境中解放出来并大大提高工作效率。

自动控制系统种类繁多，其结构和用途各异，但基本原理是一样的。自动控制原理是以自动控制系统为研究对象，采用数学方法对自动控制系统进行分析与综合的一门科学。它是分析、设计和调试自动控制系统的理论基础。

1.1 开环控制与闭环控制

自动控制有两种基本的控制方式：开环控制和闭环控制，对应这两种控制方式的系统分别为开环控制系统和闭环控制系统。

1.1.1 开环控制系统

开环控制系统是指系统输出量对控制作用没有影响的系统，如图 1-1 所示为开环控

制系统的方框图。由图 1-1 可见，在开环控制系统中，既不需要对输出量进行测量，也不需要输出量反馈到系统的输入端与输入量进行比较。或者说，控制装置与受控对象之间只有顺向作用，没有逆向联系。例如，一般洗衣机就是开环控制系统的一个实例，在洗衣机中，浸湿、洗涤和漂洗过程都是按照一种时间顺序进行的，洗衣机不必对输出信号，即衣服的清洁程度进行测量。



图 1-1 开环控制系统

如图 1-2 所示为晶闸管直流调速开环系统原理图。该控制系统由电位器、放大器、触发器、晶闸管整流装置及直流电动机等组成。通过调节给定电压 u_r 来达到调节转速 n 的目的。由于该控制系统无反馈环节，只有输入量的前向控制作用，输出量并不反馈回来影响输入量的控制作用，因而为开环控制系统。该控制系统的控制对象是直流电动机，控制装置是晶闸管整流装置。

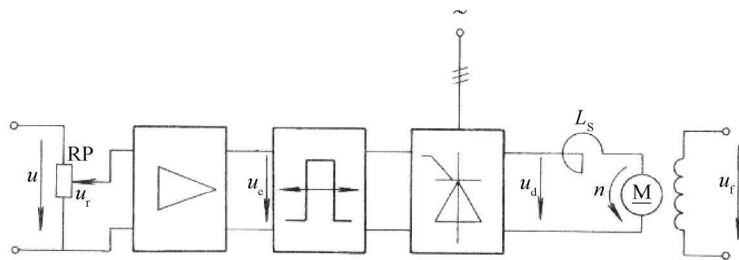


图 1-2 晶闸管直流调速开环系统原理图

开环控制系统的信号由给定值至被控量单向传递。因此这种控制的优点是结构简单，系统的稳定性好，调试方便，成本低；开环控制的缺点是当控制过程受到各种扰动因素影响时，将会直接影响被控量，而系统不能自动进行补偿。因此，系统的控制精度难以保证。开环系统抗干扰能力差，一般仅用于控制精度不高且对控制性能要求较低的场合。从另一种意义理解，开环系统对受控对象和其他控制元件的技术要求较高。如数控线切割机进给系统、包装机等多为开环控制。

1.1.2 闭环控制系统

若系统的输出量通过反馈环节返回来作用于系统的控制部分，形成闭合环路，这样的系统称为闭环控制系统，又称为反馈控制系统。在闭环控制系统中，控制装置与受控对象之间不仅有顺向作用，而且还有逆向联系。作为输入信号与反馈信号之差的误差信号被传送到控制装置，以便使系统的被控量达到较高的控制精度。

闭环控制系统的方框图如图 1-3 所示。

如图 1-4 所示为具有转速负反馈的闭环控制系统原理图，与图 1-2 相比，此系统增设了转速负反馈环节，测速发电机与电机同轴连接，将转速信号变成与转速成正比的电压信号 u_{fn} 反馈到系统的输入端参与控制。

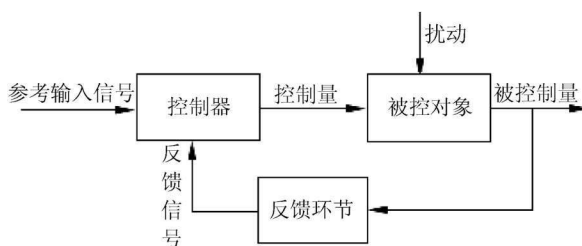


图 1-3 闭环控制系统的方框图

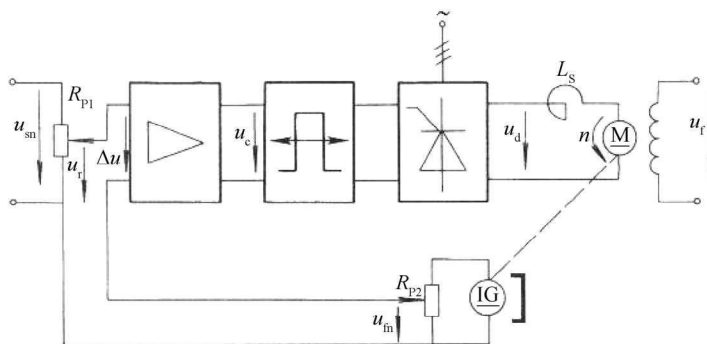


图 1-4 具有转速负反馈的闭环控制系统原理图

具有转速负反馈的闭环控制系统的方框图如图 1-5 所示。

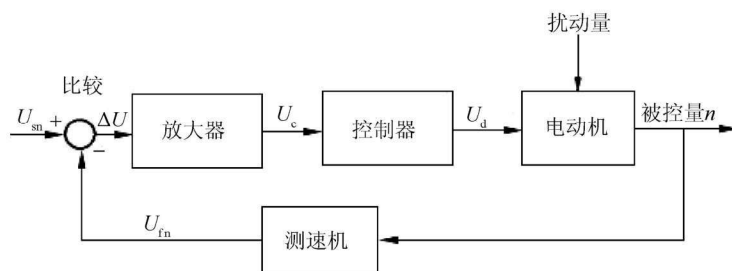


图 1-5 具有转速负反馈的闭环控制系统的方框图

由于增设了转速负反馈环节后，作用于放大器的电压不再是给定电压，而是给定电压 U_{sn} 与测速反馈电压 U_{fn} 的偏差电压 $\Delta U = (U_{sn} - U_{fn})$ 。当电动机的转速因某些扰动因素（如负载转矩增加）而降低时，则测速发电机电压 U_{fn} 将降低（ U_{fn} 与转速 n 成正比），偏差电压 ΔU 将升高，经放大后使晶闸管装置输出电压 U_d 增加，从而使转速 n 回升。其转速自动调节过程可用如下顺序表示

$$n \downarrow \rightarrow U_{fn} \downarrow \rightarrow \Delta U = (U_{sn} - U_{fn}) \uparrow \rightarrow U_c \uparrow \rightarrow U_d \uparrow \rightarrow n \uparrow$$

由以上分析可见，反馈控制可以自动进行补偿，这是闭环控制的一个突出优点。由于采用了反馈，系统可达到较高的控制精度和较强的抗干扰能力。这样，对于给定的控制对象，就有可能采用不太精密且成本较低的元件来构成比较精确的控制系统。这在开环情况下，是不可能做到的。

闭环控制要增加检测、反馈比较、调节器等部件，会使系统复杂，成本提高，而

且闭环控制可能引起过调误差，使系统的稳定性变差，甚至造成不稳定，这是采用闭环控制时必须重视并要加以解决的问题。

开环系统与闭环系统性能比较见表 1-1。

表 1-1 开环系统与闭环系统性能比较

系统项目性能	反馈系统	开环系统
控制精度	高	低
响应速度	慢	快
稳定性	可能不稳定	稳定

1.2 自动控制系统的组成

为了简单直观地表明自动控制系统的组成以及信号的传递情况，通常把系统各个环节用方块图表示，并用箭头标明各作用量的传递情况，如图 1-6 便是图 1-4 所示自动调速系统的方块图。

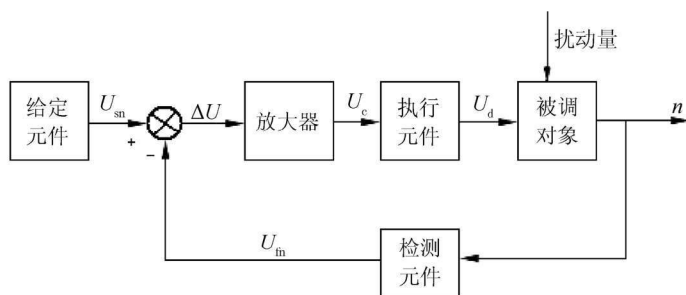


图 1-6 自动控制系统方块图

由图 1-6 可以看出，一般自动控制系统包括：

- (1) 给定元件：由它调节给定信号 (U_{sn})，以调节输出量的大小。此处为给定电位器。
- (2) 检测元件：由它检测输出量（如转速 n ）的大小，并反馈到输入端。此处为测速发电机。
- (3) 比较环节：在此处反馈信号与给定信号进行迭加，信号的极性以“+”或“-”表示。若为负反馈，则两信号极性相反。
- (4) 放大元件：由于偏差信号一般很小，所以要经过电压放大及功率放大，以驱动执行元件。此处为晶体管放大器或集成运算放大器。
- (5) 执行元件：是驱动被控制对象的环节。此处为晶闸管整流装置。
- (6) 控制对象：亦称被调对象。在调速系统中即为电动机。

(7) 反馈环节：由它将输出量引出，再回送到控制部分。一般的闭环系统中，反馈环节包括检测、分压、滤波等单元。反馈信号与输入信号极性相同则为正反馈，相反则为负反馈。

由图 1-6 可见，系统的各种作用量和被控制量有：

(1) 输入量：又称参考输入量或给定量，实际输入到系统的控制信号。它通常由给定信号电压构成，如图 1-6 中的给定电压 U_{sn} 。

(2) 输出量：又称被控制量，系统被控制对象的输出，是自动控制的目标。如图 1-6 中的转速 n 。

(3) 反馈量：与被控量成某种函数关系并反馈回到比较元件上的信号。如图 1-6 中的反馈信号 U_{fn} ， U_{fn} 是通过检测元件将输出量 n 转变成与给定信号 U_{sn} 数量级相同的电压信号。

(4) 扰动量：所有妨碍输入量对被控量按要求进行正常控制的因素。来自系统外部的称为外扰动，例如电动机负载转矩的变化，电网电压的波动，环境温度的变化等。图 1-6 中的负载转矩 T_L 就可以看成是一种来自系统外部的扰动量。来自系统内部的扰动称为内扰动。如系统元件参数的变化，运放器的零点漂移等。

(5) 中间变量：它是系统各环节之间的作用量。它是前一环节的输出量，也是后一环节的输入量。如图 1-6 中的 ΔU 、 U_c 、 U_d 等就是中间变量。

由图 1-6 可以看到，方块图可以直观地将系统的组成、各环节间的相互关系以及各种作用量的传递情况简单明了地概括出来。

综上所述，要了解一个实际自动控制系统的组成，画出系统的方框图，必须明确如下问题：

- (1) 哪个是控制对象？被控量是什么？影响被控量的主要扰动是什么？
- (2) 哪个是执行元件？
- (3) 哪个是反馈检测元件？
- (4) 输入量是由哪个元件给定的？反馈量与给定量是如何进行比较的？
- (5) 此外还有哪些元件？它们在系统中处到什么地位？起什么作用？

1.3 自动控制系统的分类

自动控制系统可以从不同的角度进行分类。

1. 按信号流向划分可分为开环控制系统和闭环控制系统。

2. 按输入量变化的规律可分为以下三类。

(1) 恒值控制系统系统的输入量是恒值，并且要求系统的输出量相应地保持恒定。

恒值控制系统是最常见的一类自动控制系统，如自动调速系统、恒温控制系统等。此外许多稳压、稳流、恒频的自动控制系统也都是恒值控制系统。

(2) 随动控制系统（又称伺服系统）的输入量是变化着的（有时是随机的），要求

系统的输出量能跟随输入量的变化而做出相应的变化。

这种控制系统可实现用功率很小的输入信号操纵功率很大的工作机械、还可实现远距离控制等。

随动系统在工业和国防上应用很广，例如机器人控制系统、雷达天线位置自动跟踪系统和高炮自动瞄准系统等就是典型的随动系统。

(3) 过程控制系统生产过程通常是指把原料放在一定的外界条件下，经过物理或化学变化而制成产品的过程。例如石油、化工、造纸中的原料生产；冶炼、发电中的热力过程等。在这些过程中，往往要求自动提供一定的外界条件，如压力、流量、温度、浓度、液位等参量在一定的时间内保持恒值或按一定的程序变化。对其中的每一个局部，它们可能是一种随动控制系统，或者是按程序指令变化的恒值控制系统。

3. 按系统的输出量和输入量间的关系分为以下两类。

(1) 线性系统。线性系统全部由线性元件组成，它的输出量和输入量间的关系用线性微分方程来描述，线性系统最重要的特性是可以应用叠加原理。叠加原理说明，两个不同的作用量，同时作用于系统时的响应，等于两个作用量单独作用响应的叠加。

(2) 非线性系统。非线性系统中存在有非线性元件（例如出现饱和、死区、摩擦等），要用非线性微分方程来描述。非线性系统不能应用叠加原理进行分析，分析非线性系统的工程方法常用相平面法和描述函数法。

4. 按照系统中信号的类型分为以下两类。

(1) 连续控制系统中所有元件的信号都是随时间连续变化的，信号的大小均是可任意取值的模拟量，连续控制系统又称为模拟控制系统。

(2) 离散控制系统中有的信号是脉冲序列或采样数据量或数字量。通常采用数字计算机控制的系统都是离散控制系统，离散控制系统又称为采样数据系统。

1.4 对自动控制系统的性能要求

对自动控制系统性能的基本要求可以归纳为三点：稳定性、快速性和准确性。

1.4.1 系统的稳定性

当扰动或给定值发生变化时，输出量将会偏离原来的稳定值，这时，由于反馈环节的作用，通过系统内部的自动调节，系统可能回到（或接近）原来的稳定值或跟随给定值稳定下来，如图 1-7（a）所示。但也可能由于内部的相互作用，使系统出现发散而处于不稳定状态，如图 1-7（b）所示。显然，不稳定的系统是无法进行工作的。因此，对任何自动控制系统，首要的条件便是系统能稳定正常运行。

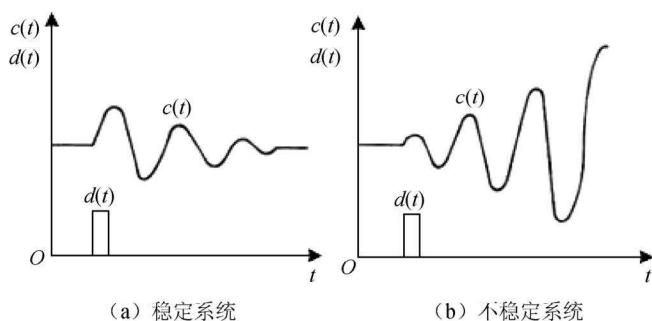


图 1-7 稳定系统和不稳定系统

1.4.2 系统的动态性能指标

由于系统的对象和元件通常都具有一定的惯性（如机械惯性、电磁惯性、热惯性等），系统中各种量值（如速度、位移、电流、温度等）的变化不可能是突变的。因此，系统从一个稳态过渡到新的稳态都需要经历一段时间，亦即需要经历一个过渡过程。表征这个过渡过程性能的指标叫作动态指标。现在以系统对突加给定信号的动态响应来介绍动态性能指标。

图 1-8 为系统对突加给定信号的动态响应曲线。

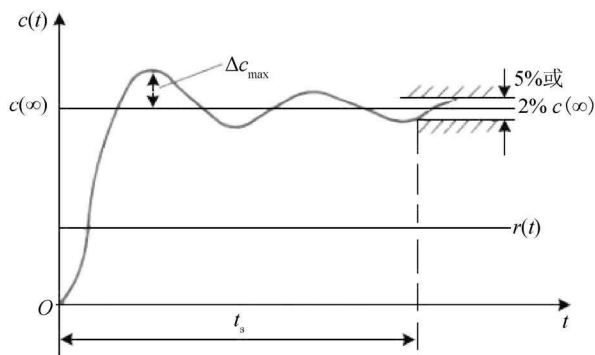


图 1-8 系统对突加给定信号的动态响应曲线

动态指标通常用最大超调量（ σ ）、调整时间（ t_s ）和振荡次数（ N ）来衡量。分别介绍如下。

（1）最大超调量（ σ ）

最大超调量是输出量 $c(t)$ 与稳态值 $c(\infty)$ 的最大偏差 $\Delta c_{\max}$ 与稳态值 $c(\infty)$ 之比。即

$$\sigma = \frac{\Delta c_{\max}}{c(\infty)} \times 100\%$$

最大超调量反映了系统的动态精度，超调量越小，则说明系统过渡过程进行得越平稳。不同的控制系统，对最大超调量的要求也不同，例如，对一般调速系统， σ 可允

许 10%~35%；轧钢机的初轧机要求 σ 小于 10%；对连轧机则要求 σ 小于 2%~5%；而对于张力控制的卷取机等则不允许有超调量。

(2) 调整时间 (t_s)

调整时间 (t_s) 是从给定量作用于系统开始到输出量进入离稳态值 $\pm 5\%$ (或 $\pm 2\%$) 区域的一段时间, 如图 1-8 所示, 它反映了系统的快速性。调整时间 t_s 越小, 系统快速性越好。例如连轧机 t_s 为 0.2~0.5s; 造纸机为 0.3s。

(3) 振荡次数 (N)

振荡次数是指在调整时间内, 输出量在稳态值上下摆动的次数。如图 1-8 所示, 振荡次数为二次。振荡次数 N 越少, 表明系统稳定性越好。例如, 普通机床一般可允许振荡 2~3 次, 龙门刨床与轧钢机允许振荡一次, 而造纸机传动则不允许有振荡。

1.4.3 系统的稳态性能指标

当系统从一个稳态过渡到新的稳态, 或系统受扰动作用又重新平衡后, 系统会出现偏差, 这种偏差称为稳态误差 (e_{ss})。系统稳态误差的大小反映了系统的稳态精度, 它表明了系统的准确程度。稳态误差 e_{ss} 越小, 则系统的稳态精度越高。 $e_{ss} \neq 0$, 系统为有静差系统, 如图 1-9 (a) 所示; $e_{ss} = 0$ 则为无静差系统, 如图 1-9 (b) 所示。

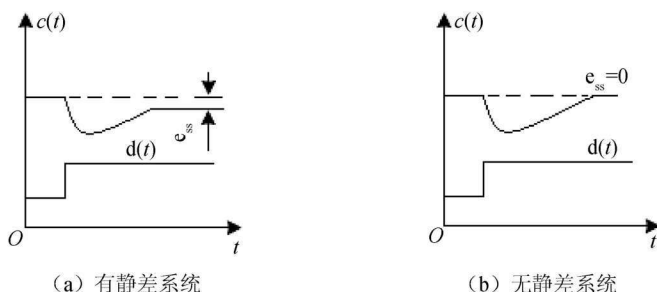


图 1-9 自动控制系统的稳态性能

在上述指标中, 最大超调量和振荡次数反映了系统的稳定性, 调整时间反映了系统的快速性, 稳态误差反映了系统的准确性。总之, 希望系统能达到稳、准、快。

在同一个控制系统中, 这些性能指标往往是相互矛盾的。这就需要根据具体对象所提出的要求, 对其中的某些指标有所侧重, 同时又要注意兼顾其他性能指标。此外, 在考虑提高系统性能指标的同时, 还要考虑到系统的可靠性和整个装置的经济性。

本章小结

1. 自动控制就是在没有人直接参与的情况下, 利用控制装置, 对生产过程、工艺参数等进行自动地调节与控制, 使之按照预定的方案达到要求的指标。按照控制系统

有反馈环节，控制系统可分为开环控制和闭环控制。

2. 开环控制系统结构简单，稳定性好，但不能自动补偿扰动因素对输出量的影响。当扰动量无法预计或控制系统要求较高时，则应采用闭环控制。闭环控制系统能够依靠反馈环节进行自动调节，补偿扰动对系统产生的影响，提高系统精度。

3. 对自动控制系统性能指标的要求是稳、准、快。动态指标 σ 和 N 反映了系统的相对稳定性， t_s 反映了系统的快速性，而稳态指标 e_{ss} 反映了系统的准确性。

习 题

1-1. 什么是开环控制与闭环控制？比较开环控制系统和闭环控制系统的特点。

1-2. 自动控制装置一般包括哪几部分？论述各部分的作用。

1-3. 对自动控制系统的性能有哪些要求？自动控制系统有哪些性能指标？

1-4. 自动控制系统有哪些分类？

1-5. 如图 1-10 所示直流电动机调速系统，分析系统的工作原理，画出方框图，指出系统的结构特点。

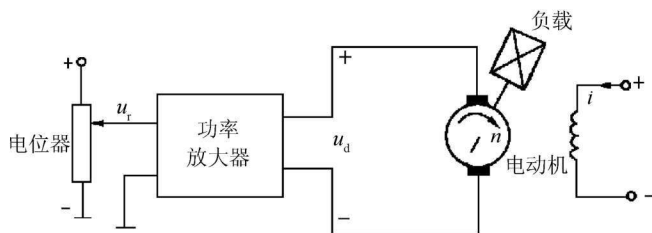


图 1-10 直流电动机调速系统

1-6. 图 1-11 所示为一转速负反馈的自动调速系统。

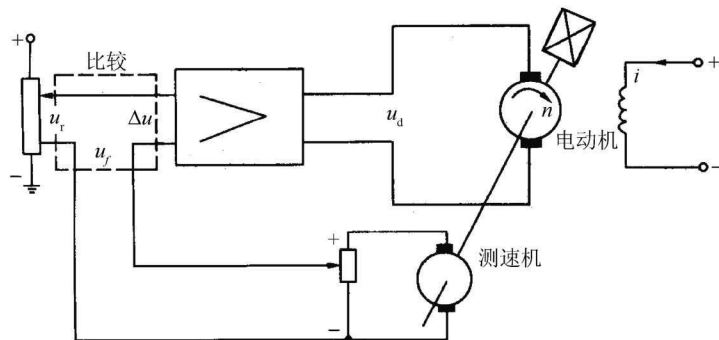


图 1-11 转速负反馈的自动调速系统

- (1) 你能说出该系统是如何实现调节转速的，又是如何实现抗扰自动稳速的吗？
- (2) 画出系统的方框图，指出系统的给定量、反馈量、偏差量、输出量及扰动量。
- (3) 说明该系统为什么属于恒值控制系统。

(4) 习题 1-6 和习题 1-7 的调速有什么不同之处？

1-7. 如图 1-12 所示为工业炉温自动控制系统，画出系统方框图，指出检测元件、给定元件、执行元件及被调参数。说明系统的自动控温过程。

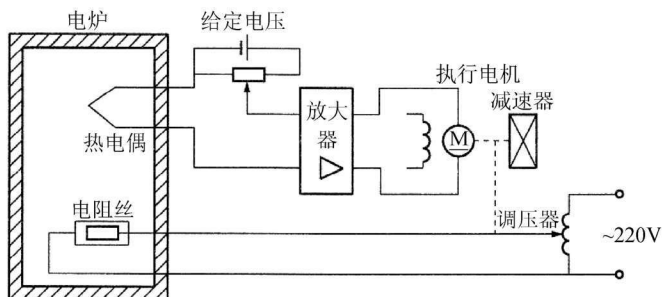


图 1-12 工业炉温自动控制系统

1-8. 如图 1-13 所示为用于工业生产中炉温控制的微机控制系统，具有精度高、功能强、显示醒目、读数直观、灵活性和适应性好等优点。用微机控制系统代替模拟控制系统是今后工业过程控制的发展方向。画出系统的方框图，并说明系统是如何实现炉温的自动控制。

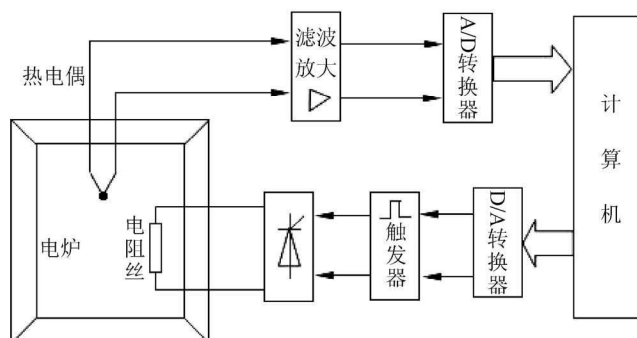


图 1-13 炉温控制的微机控制系统

1-9. 根据图 1-14 所示的电动机速度控制系统工作原理图，完成：

- (1) 将 a, b 与 c, d 用线连接成负反馈状态；
- (2) 画出系统方框图。

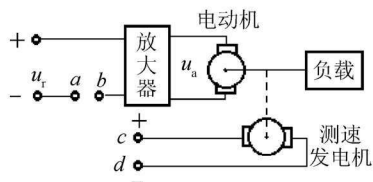


图 1-14 电动机速度控制系统

1-10. 图 1-15 是仓库大门自动控制系统原理示意图。试说明系统自动控制大门开、闭的工作原理，并画出系统方框图。

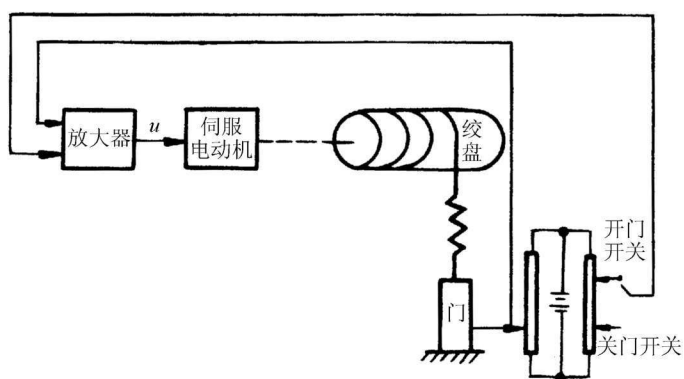


图 1-15 仓库大门自动控制系统原理