

普通高等教育“十二五”规划教材

自动控制原理

主 编 王勉华



煤炭工业出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

自动控制原理

主 编 王勉华

副主编 许 军

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理 / 王勉华主编. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2012

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5020-4046-8

I. ①自… II. ①王… 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 (2012) 第 083890 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn

北京房山宏伟印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*

开本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 19³/₄

字数 467 千字 印数 1—3 000

2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

社内编号 6869 定价 39.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

内 容 简 介

本书涵盖了经典控制理论的全部内容，主要包括自动控制的基本概念、控制系统的数学模型、线性系统的时域分析法、根轨迹分析法、频域分析法、自动控制系统的校正与综合、非线性控制系统的分析、离散控制系统的分析与校正。

本书可作为普通高等院校自动控制专业的必修课教材，也可作为相关专业自动控制原理课程的参考书。

前 言

为了适应我国煤炭工业建设和飞速发展的需要，适应我国高等教育突出特色的要求，满足高等院校培养人才的需求，编写了本教材。

本教材在编写过程中，吸收了多年来自动控制原理教学中积累的经验和体会，在体现理论知识的科学性、系统性、前瞻性的基础上，对知识点进行了合理调配和筛选，强调知识的统一性、逻辑性、层次性、实用性、配合性和联系性。例如，频率特性图示方法，根据数学表达式先讲对数坐标图，后讲极坐标图，便于掌握图形与数学表达式的对应关系；极坐标图绘制时强调幅值和幅角的作用，既便于图形绘制，又能方便把握图形的全貌；删除了根轨迹校正方法，增加了工程校正方法；在教材分析和设计的主要章节中加入了计算机仿真的内容。同时注重了煤炭行业特色，以煤炭行业特有控制对象为例说明其控制过程。

本书由王勉华任主编，许军任副主编。其中第一章由王勉华编写，第五、六、七章由许军编写，第二、三章及各章 MATLAB 仿真的内容由周奇勋编写，第四、八章由乐春峡编写。此外，本书在编写过程中，黄冲冲、刘璞迪、杨硕亮、张文峰、许昕琪等参与了绘图和书稿整理工作。

由于编者水平有限，书中可能存在缺点和错误，望读者批评指正。

编 者

2012 年 5 月

目 次

第一章 绪论	1
第一节 自动控制的一般概念	1
第二节 自动控制系统举例	6
第三节 自动控制系统的分类	8
第四节 自动控制系统的基本要求及其分析方法	9
第二章 控制系统的数学模型	12
第一节 控制系统时域数学模型	12
第二节 拉普拉斯变换和传递函数	18
第三节 控制系统的结构图与信号流图	28
第四节 MATLAB 在系统建模中的应用	40
第三章 线性系统的时域分析法	50
第一节 典型输入信号及系统暂态响应性能指标	50
第二节 一阶系统的时域分析	54
第三节 二阶系统的时域分析	57
第四节 高阶系统的时域分析	64
第五节 线性系统的稳定性分析	67
第六节 线性系统的稳态误差	72
第七节 MATLAB 在时域分析法中的应用	79
第四章 线性系统的根轨迹分析法	92
第一节 概述	92
第二节 绘制根轨迹的基本规则	95
第三节 控制系统根轨迹的绘制	103
第四节 根轨迹分析法	113
第五节 MATLAB 在根轨迹分析法中的应用	117
第五章 线性系统的频域分析法	124
第一节 频率特性	124
第二节 典型环节及控制系统的频率特性	128
第三节 控制系统频率域稳定判据	148

第四节	频率特性与时域响应的关系·····	157
第五节	系统频率特性仿真分析·····	163
第六章	自动控制系统的校正与综合·····	172
第一节	控制系统校正的一些概念·····	172
第二节	常用校正装置·····	176
第三节	自动控制系统的频率法校正·····	187
第四节	MATLAB 软件实现控制系统的频域法校正·····	202
第七章	非线性控制系统的分析·····	209
第一节	引言·····	209
第二节	描述函数的概念及常见非线性元件的描述函数·····	210
第三节	非线性控制系统的描述函数法分析·····	222
第四节	相平面的概念及相轨迹的作图方法·····	227
第五节	非线性控制系统的相平面法分析·····	240
第六节	非线性系统 MATLAB 仿真分析 ·····	250
第八章	离散控制系统的分析与校正·····	256
第一节	信号的采样与保持·····	256
第二节	z 变换理论 ·····	263
第三节	采样系统的数学模型·····	269
第四节	离散系统的时域分析法·····	277
第五节	离散控制系统的校正·····	294
第六节	用 MATLAB 进行采样系统分析 ·····	299
参考文献	·····	307

第一章 绪 论

第一节 自动控制的一般概念

自动控制是一个较宽泛的概念，一般包括自动控制理论、自动控制技术、自动控制过程、自动控制装置和自动控制系统，这里主要讨论自动控制理论的问题。一般将自动控制理论分为经典控制理论和现代控制理论。本门课程仅介绍经典控制理论，常称为自动控制原理，讨论的问题仅限在经典控制理论的范畴之内，从理论和原理的角度出发，说明自动控制系统分析和设计的方法。

一、自动控制的定义及其作用

自动控制是指在没有人经常直接参与的情况下，利用设备或装置使机器、设备或生产过程的某个工作状态或参数自动按照预定规律运行的过程。如产品能在流水线上自动加工，飞机可以自动驾驶，车辆能够自动导航，采煤机能够在无人工作面自动采煤等，都是在没有人的直接参与下由自动控制的设备和装置自动完成预定运行规律和任务的。

今天，随着自动控制理论、计算机技术和电子技术等的迅速发展，自动控制技术不仅广泛应用在航空航天、工业生产、医药医疗、资源开发、交通管理、生态保护等领域，而且它的概念和分析方法也渗透到经济、政治、管理、社会、人口、心理等领域。自动控制的广泛应用不仅使生产过程实现自动化，极大地提高了劳动效率和产品的质量，改善了劳动条件，而且在人类征服大自然、探索新能源、发展空间技术和改善人们生活方面也起着十分重要的作用。

二、自动控制的发展历史

人们在长期的生产实践中通过不断的摸索与总结，发现了可以在无人参与的情况下利用适当的设备或装置完成人们预定任务，于是人们根据经验设计制造和应用了自动装置。例如，公元前 1400 年至公元前 1100 年，在中国、埃及和古巴比伦，人们用漏壶、沙漏来自动计时。公元 132 年张衡创造了世界上第一台地动仪，监测地震发生的方向。公元 235 年马钧制造的指南车，为旅途的人们辨明方向。

第二次工业革命时期，随着大机器生产的出现，自动控制技术得到了前所未有的发展。1784 年瓦特发明了飞球离心调速器，调节汽轮机的旋转速度，对保证轧花机的匀速运行提供了技术保证。但使用调速器的系统经常出现持续振荡，有时甚至不能稳定工作。人们试图从调速器的制作材料、机械结构和制造工艺上寻找办法，没有想到从理论上解决问题，因此均未成功，其实这就是自动控制系统的稳定性问题。直到 1868 年麦克斯韦指出，微分方程的解中含有不衰减项就会出现不稳定现象，并给出了判别低阶系统稳定性的代数判据，为自动控制理论的发展提供了方向。此后，自动控制理论的发展进入到快速发

展时期。1876 年维什聂格拉茨基发表了调节器的一般理论。1877 年劳斯提出了判别高阶系统稳定性的代数判据，现在称为劳斯稳定判据。1892 年李亚普诺夫发表了运动稳定性的一般问题，把微分方程解的稳定性与具有特殊性质函数（现称为李雅普诺夫函数）的存在性联系起来，奠定了常微分方程稳定性理论的基础，也为判别自动控制系统稳定性提出了两种具体的方法（李雅普诺夫第一法和第二法）。1895 年胡尔维茨提出了判别系统稳定性的代数判据，现在称为胡尔维茨稳定判据。1927 年伯莱克提出了反馈放大器理论。1932 年奈奎斯特提出了研究控制系统的频域分析理论，并给出了判别稳定性的频域判据。1945 年伯德提出了频域图解法分析和线性控制系统的综合法，构成了自动控制理论的频域法。1948 年伊万斯提出了根轨迹法。至此，以根轨迹法和频率法为基础的控制理论基本形成，该理论现在称为经典控制理论。

1948 年维纳发表了《控制论：关于在动物和机器中控制和通信的科学》，首创“控制论”概念，并着重论述了从统一观点来考察各种系统的控制与通信问题，指出控制工程和通讯工程的密切关系，强调了信息与反馈的普遍意义，预言控制论不仅可用于物理系统，而且可以推广到生物系统、经济领域和社会过程中去，使控制理论得到了更大的发展。特别在进入 20 世纪以来，科学技术的发展突飞猛进，控制理论对于科学技术和生产力的发展起到了巨大的推动作用，因此相对论、量子力学和控制论被认为是 20 世纪上半叶科学技术的三大成果或三大飞跃。

在第二次世界大战期间，特别是战后的年代，由于战争和军备竞赛及航天技术的发展，控制系统更加复杂，控制变量增多，而当时的经典控制理论难以解决这些问题，科学家们又在寻求新的方法。1954 年钱学森发表了《工程控制论》，引起了控制领域的轰动，并形成了控制科学在 20 世纪 50 年代和 60 年代的研究高潮。1956 年庞德里亚金提出了极大值原理，形成了最优控制理论的发展基础。1957 年贝尔曼提出了动态规划，把多阶段过程转化为一系列单阶段问题，利用各阶段之间的关系逐个求解，解决了动态过程优化的问题。1961 年卡尔曼提出了滤波理论，使受噪声干扰的状态量按某种统计观点进行估计，并使估计值尽可能准确地接近真实值，在控制工程中获得了广泛的应用。至此，以时间域状态空间为基础的控制理论迅速形成，该理论现在称为现代控制理论。

自动控制理论是研究自动控制的理论基础，是一门理论性较强的工程科学课程，一般将自动控制理论分为经典控制理论和现代控制理论两个部分。经典控制理论的内容主要以传递函数为研究基础，以频率法和根轨迹法为研究手段，常适用于最小相位系统，主要研究单输入、单输出自动控制系统的分析与设计问题。由于经典控制理论计算量小、物理意义强、数学模型容易通过实验建立，且相当成功地解决了大量工程实际问题，因此它是研究自动控制系统的重要理论基础。

现代控制理论以时域微分方程为研究基础，以状态空间法为研究手段，主要研究多输入、多输出，定常数或变参数，线性或非线性自动控制系统的分析和设计问题。因此它也是研究庞大的系统工程和模仿人类的智能控制等方面必不可少的理论基础。需要强调的是，目前频率域的经典控制理论也能够研究多输入、多输出系统，它与时间域的现代控制理论在数学模型上可以相互转换，但它们却不能完全互相取代。本书只讨论经典控制理论的内容。

三、自动控制系统的基本控制方式

为了保证生产的安全性、经济性和产品及生产过程的质量，人们需要对生产设备或工艺过程进行控制，以使被控制的物理量按要求的规律变化。被控制的设备或过程称为被控对象或被控过程，被控制的物理量称为被控量，被控量要求的变化规律称为期望值、给定值或输入量。但在实际运行中，被控量总是要受到各种因素的影响而偏离期望值，使被控量偏离期望值的因素称为干扰或扰动。为了克服干扰的不良影响，需要对被控量进行控制，以使其按要求的规律变化。如果控制作用是人工加入的称为人工控制，如果用设备或装置代替人的控制作用则称为自动控制。把为完成一定任务的一些部件按一定规律组合成一个有机的整体称为系统，能对被控对象的工作状态进行自动控制的系统则称为自动控制系统，它一般由控制装置（控制器）和被控对象两大部分组成。自动控制系统有两种最基本的控制方式，即开环控制和闭环控制。

（一）开环控制

在控制器与被控对象之间，只有正向流动的控制信号和控制作用，即系统中控制信号的流动未形成闭合回路，只有输入给定量对输出被控量的控制作用，没有输出量的反作用，称为开环控制。

1. 按给定量控制的开环控制系统

按给定量控制的开环控制系统如图 1-1 所示，预先设定一个给定量，这个给定量可以是恒定的量值，也可以是某种预定的规律或函数，给定量经控制器对被控对象的被控量进行控制。一般被控对象的运行环境都存在干扰影响，由于没有输出被控量的反向作用，控制器不可能对干扰做出反应从而进行控制和调节，输出被控量将会偏离给定量。因此按给定量控制的开环控制系统一般是一个不精确的控制系统。大多数开环控制系统都属于此类。

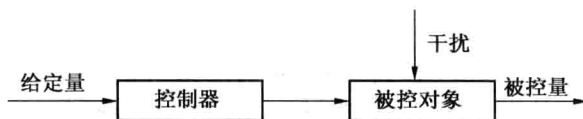


图 1-1 按给定量控制的开环控制系统方框图

图 1-2a 所示晶闸管供电直流电动机调速系统就是一个开环控制系统的例子。其中 u_r 为系统的输入量，电动机的转速为系统的输出量。输入量控制着脉冲发生器的脉冲位置来改变三相全控桥的输出整流电势 e_d ，从而改变电动机的转速即系统的输出量 n （图 1-2b）。改变 u_r 可以改变输出量为任意期望值。但由于环境和负载等干扰的影响，使被控量偏离原来的期望值，特别是负载变化的干扰影响最为明显。当负载增大时，转速下降，反之转速上升，因此它是一个不精确的控制系统。开环控制系统对于干扰没有修正能力，一般

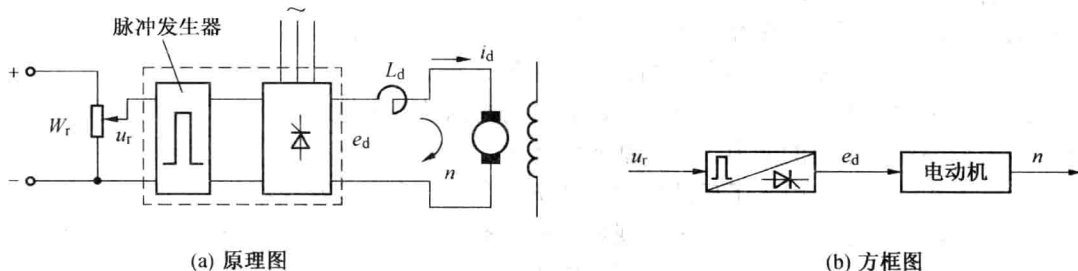


图 1-2 晶闸管供电直流电动机调速开环控制系统

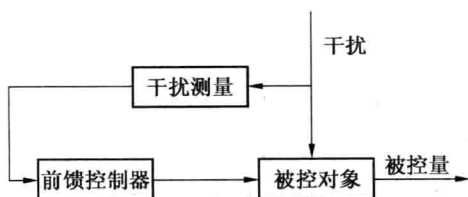


图 1-3 按干扰补偿控制的开环控制系统方框图

(二) 闭环控制

控制器和被控对象之间既有控制量对输出量的控制作用，又有输出量对控制量的反作用，即系统中控制信号的流动形成了闭合回路，称为闭环控制。以晶闸管供电直流电动机调速系统为例（图 1-4a），当系统干扰使电动机转速 n 下降时，测速发电机转速也下降，其输出电压 u_b 随之减小，并与给定电压 u_r 进行比较，误差 $e(e = u_r - u_b)$ 增大，放大器（控制器）的输出 u_k 增大，使脉冲发生器脉冲前移，晶闸管整流器输出电压 e_d 增大，使电动机转速 n 上升，自动维持电动机的转速恒定。其示意框图如图 1-4b 所示。

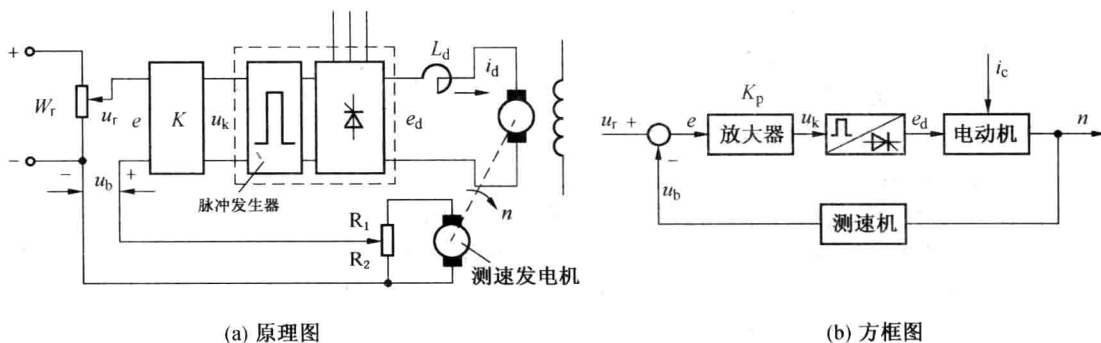


图 1-4 晶闸管供电直流电动机调速闭环控制系统

在闭环控制系统中，把输出量引回到输入端并与输入量进行比较的过程称为反馈，反馈信号与输入信号符号相反称为负反馈，符号相同称为正反馈。在自动控制系统中通常采用负反馈。从输入端到输出端的信号传递通道称为前向（正向、顺向）通道，从输出端引回到输入端的信号传递通道称为反向（反馈、逆向）通道。符号“○”表示比较元件（或比较环节），比较元件的输出是输入量 u_r 与反馈量 u_b 之差，常取 u_r 为“+”， u_b 为“-”，表示负反馈。有时比较环节可以有多个输入量。

闭环控制常称为反馈控制，反馈控制是自动控制的基本控制之一，其特点是具有自动修正被控量偏离给定值的能力，可以抑制闭环内、系统内部和外部干扰引起的误差，具有较强的抗干扰能力。但引入了反馈作用，系统就容易产生振荡甚至不稳定，使系统无法工作，这是闭环控制系统中非常突出的现象，也是本课程要解决的主要问题之一。

将前馈控制和反馈控制结合起来可以构成复合控制。复合控制又分为按参考输入前馈控制的复合控制和按扰动前馈控制的复合控制（图 1-5）。为了提高控制精度，减小误

用于控制精度要求不高的场合。

2. 按干扰补偿控制的开环控制系统

按干扰补偿控制的开环控制系统（图 1-3）也称为前馈控制，是利用干扰测量元件和前馈控制器产生控制作用信号加到系统的输入端，用于补偿干扰对输出被控量的不良影响。由于该系统也是开环控制，没有输出被控量的反向作用，不能补偿未被测量扰动量的影响，因此其控制精度也受到了限制。

差，可用按参考输入前馈控制的复合控制系统。当扰动可以测量时，利用前馈控制可以消除干扰对系统的影响，而且它可以在扰动产生不利影响以前产生补偿作用。但由于前馈控制是开环控制，会受到系统结构精度的限制，为解决这一缺点可以用反馈控制加以克服，所以，研究人员集中两者之优点构成了既有前馈控制又有反馈控制的复合控制。

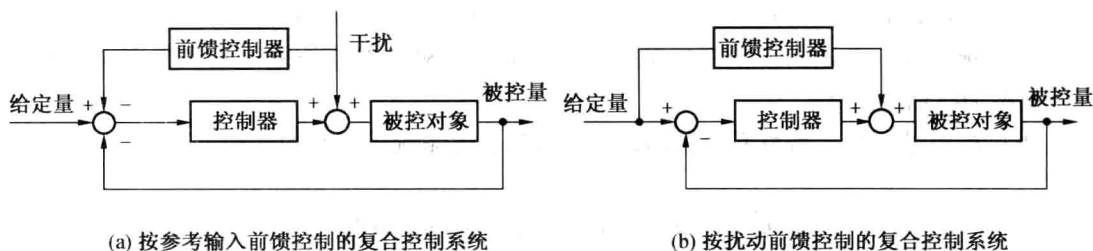


图 1-5 复合控制系统方框图

四、自动控制系统的基本组成

1. 自动控制系统的结构

不论哪一种自动控制系统，一般都可以把组成系统的元件（这里所说的元件并非具体的物理元件，是一个广义的概念，是指能够完成系统功能的各种装置、设备或者元件）按功能分为给定元件、比较元件、控制元件、执行元件、反馈元件和被控对象（图 1-6）。

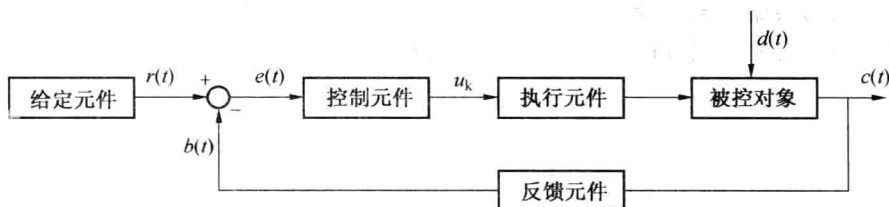


图 1-6 典型自动控制系统结构方框图

(1) 给定元件（给定装置）。能够给出与期望被控量对应的系统输入量（参考量、输入信号、给定值）的元件。

(2) 比较元件。常用“○”符号表示。能够完成各输入量的代数和运算，一般将给定值与反馈值进行比较，输出为两者之差，相当于加法器。

(3) 控制元件。能够对输入信号进行放大、转换和运算，产生系统所需要控制信号的装置。

(4) 执行元件。能够按照控制信号执行控制作用，驱动被控对象，使被控量按照预定规律运行的装置或设备。

(5) 反馈元件。能够将被控量进行测量并转换成与输入信号相同量纲的装置或元件。

(6) 被控对象。被系统控制的，能够完成预定动作和任务的机械、设备或过程。

2. 自动控制系统的信号

自动控制系统中是通过各种信号产生控制作用的，控制系统中常用以下信号：

- (1) 参考输入 $r(t)$ 。简称输入，是指输入到控制系统的给定信号。
- (2) 主反馈 $b(t)$ 。简称反馈，是指与输出量成正比或成某种函数关系，量纲与参考输入信号相同的信号。
- (3) 作用误差 $e(t)$ 。简称误差或偏差，是参考输入与主反馈的差值信号。
- (4) 控制量 $u_k(t)$ 。控制元件的输出量，作用到被控对象的信号。
- (5) 扰动或干扰 $d(t)$ 。除了系统输入的控制信号外，对系统输出量产生影响的其他因素都称为扰动或干扰。
- (6) 被控量 $c(t)$ 。或称系统输出，简称输出，是系统被控制的物理量。

第二节 自动控制系统举例

一、恒值控制系统

恒值控制系统常称为自动调节系统，这类系统要求被控量尽可能保持在恒定期望值附近，因此系统输入信号是恒定不变的常数。图 1-7 所示是一个电炉温度控制系统，电位器给定电压 u_r 代表电炉需要保持的温度，测温热电偶电压 u_f 代表实际炉温， $\Delta u = u_r - u_f$ 为误差电压。 Δu 经放大后送给脉冲触发器对晶闸管调功器进行调节，调功器控制加热元件的电压，加热元件加热被控对象电炉的温度。当给定温度高于实际温度时， $u_r > u_f$ 且 $\Delta u > 0$ ，调功器输出电压升高，加热元件温度升高；当实际温度高于给定温度时， $u_r < u_f$ 且 $\Delta u < 0$ ，调功器输出电压降低，加热元件温度下降。由此可知，系统的控制作用形成了闭合回路，被控对象的温度保持在预期的恒定值上。

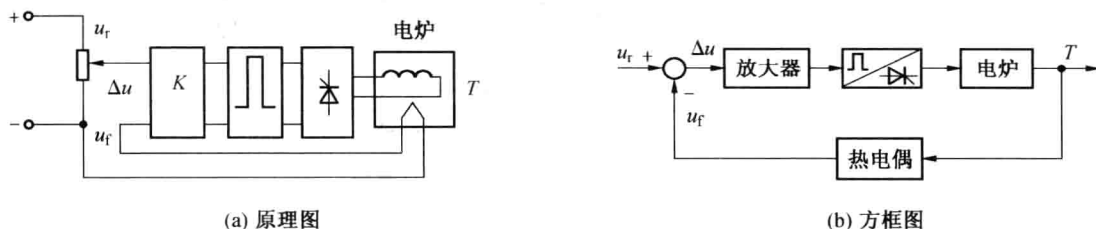


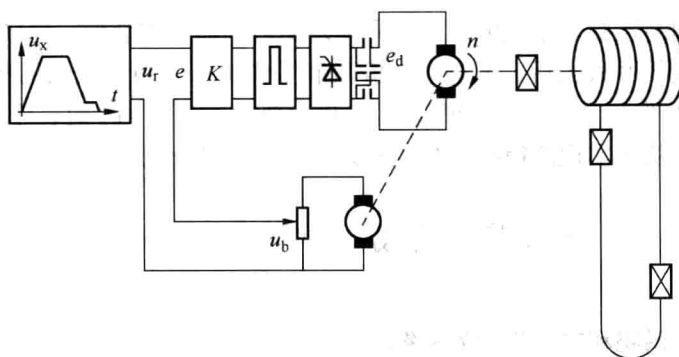
图 1-7 电炉温度控制系统

二、程序控制系统

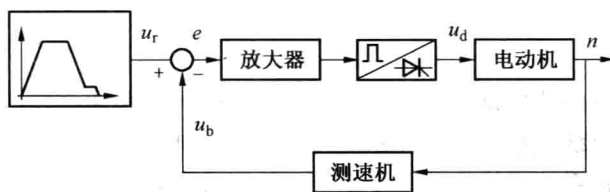
程序控制系统要求被控量按照预期设定的程序或某种规律变化。图 1-8 所示是一个典型的按 5 阶段速度图运行的矿井直流提升机控制系统。给定装置输出电压 u_r 代表提升机驱动电动机转速，该转速是按照预先设计好的速度图变化的，提升机完全按照速度图运行，完成一次提升过程。通过电源反向接触器将晶闸管输出电压极性反向，使电动机反转，即可按照预定速度图完成下次提升。

三、随动控制系统

随动控制系统也称为伺服控制系统，要求系统的被控量紧密跟踪输入信号。系统输入



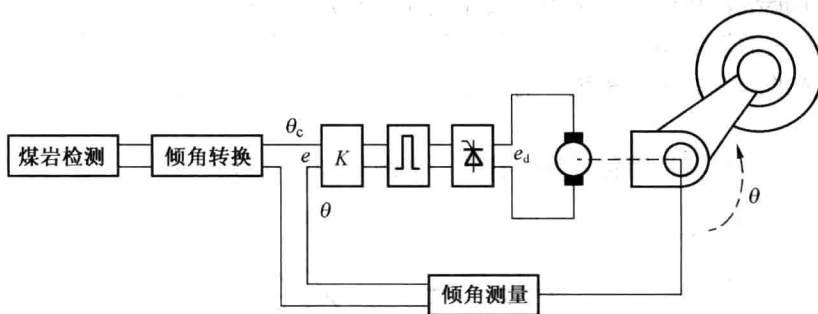
(a) 原理图



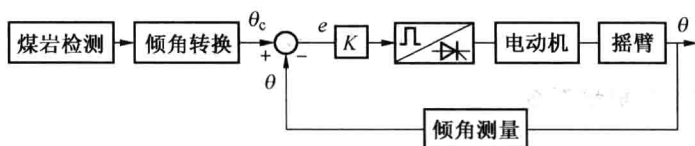
(b) 方框图

图 1-8 矿井直流提升机控制系统

的则是随时间任意变化的信号。图 1-9 所示是一个采煤机滚筒摇臂自动调高控制系统，采煤机工作时，滚筒摇臂的高度应该与煤层相适应，摇臂高了，采煤机就会截割岩石，造成过载甚至损坏采煤机；摇臂低了，煤层没有割净，浪费了资源。煤层的形成与赋存形式没有规律，煤岩界面与地质构造有关，但没有规律，是随机性的，因此有必要对采煤机滚



(a) 原理图



(b) 方框图

图 1-9 摇臂自动调高控制系统

筒摇臂进行自动调高控制。系统的给定信号来自煤岩界面检测装置，经转换给出摇臂倾角 θ_0 。与实际倾角 θ 比较并放大后，通过电动机调节摇臂倾角达到调节滚筒摇臂高度的目的。煤岩界面变化时 θ_0 发生变化， θ 将跟随 θ_0 变化而变化。当 $\theta = \theta_0$ 时，作用误差 $e = 0$ ，滚筒调高电机停转，从而实现滚筒摇臂自动跟踪煤岩界面变化的目的。

第三节 自动控制系统的分类

一、线性控制系统和非线性控制系统

按照系统数学模型描述的不同，可将自动控制系统分为线性控制系统和非线性控制系统。

1. 线性控制系统

当组成系统的元件的特性都是线性的，其输入、输出关系能用线性微分方程描述的系统称为线性控制系统或线性系统。线性系统可以使用叠加原理。当线性微分方程的系数均为常数时称为线性定常系统或线性时不变系统，当微分方程的系数是时间的函数时，称为线性非定常系统或线性时变系统。线性定常系统的响应只与输入信号有关，与初始条件无关。严格地讲，实际的物理系统中不存在线性系统，总是或多或少存在着不同程度的非线性特性。为研究问题方便，当非线性特性不显著或者系统非线性特性区域的工作范围不大时，可将其视为线性的，或将它们线性化后按线性系统处理。

2. 非线性控制系统

当组成系统的元件中存在非线性特性时，其输入、输出关系用非线性微分方程描述的系统称为非线性控制系统或非线性系统。将可以线性化的非线性元件称为非本质非线性特性元件，将不能线性化的元件称为本质非线性特性元件。系统中只要包含一个本质非线性特性元件，系统的性能即由非线性微分方程描述。非线性系统中不能使用叠加原理。非线性微分方程式的求解尚无完整统一的方法，非线性系统的响应既与输入量有关，也与初始条件有关。

典型本质非线性特性简称非线性特性，如图 1-10 所示。

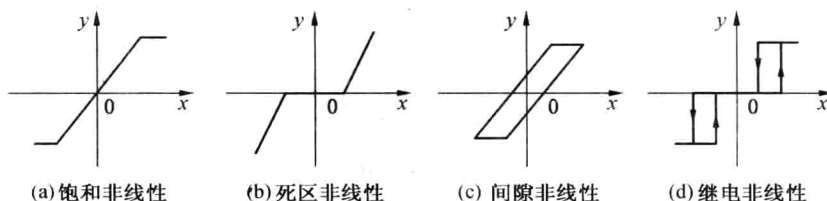


图 1-10 几种非线性特性

二、连续系统与离散系统

按照系统中所传递信号的性质不同，可分为连续控制系统和离散控制系统，简称连续系统和离散系统。

1. 连续系统

当系统中传递的全部信号都是连续时间函数形式的模拟量时，称为连续控制系统或称连续数据系统，连续系统的性能用微分方程描述。

2. 离散系统

当系统中部分信号以离散的脉冲序列或数码的形式传递时，称为离散系统或离散数据系统。

离散系统是一个总称，如果系统中使用了采样开关，将连续函数形式的信号转变为离散脉冲序列形式的信号进行控制，这样的系统通常称为采样控制系统或脉冲控制系统。如果使用了数字计算机或数字控制器，离散信号以数码形式传递，这样的系统称为数字控制系统，简称数字系统。离散系统的性能用差分方程描述，如果差分方程是线性的称为线性离散系统，如果差分方程为非线性的称为非线性离散系统。

三、随动控制系统和恒值控制系统

按照系统输入信号变化规律的不同，可分为随动控制系统和恒值控制系统。

1. 随动控制系统

当系统的输入信号预先不能确定且任意变化，系统的输出量以一定的精度跟随输入信号的变化，要求系统具有很好的跟踪能力，这样的系统称为随动控制系统、跟踪控制系统或伺服控制系统。

2. 恒值控制系统

当系统的输入量保持恒定或只随时间做缓慢变化时，要求系统具有很好的抗干扰能力，以使输出量维持恒定或随时间做缓慢变化，这样的系统称恒值控制系统或自动调节系统。

此外，在实际应用中为了突出系统在某方面的作用，还有其他分类的方法。按照系统有无误差可分为有静差系统和无静差系统，按系统功能可分为温度控制系统、位置控制系统等，按系统设备元件类型可分为机电系统、液压系统、气动系统、生物系统等，按系统输入输出信号数量可分为单输入、单输出系统和多输入、多输出系统，按照不同的控制理论基础设计的控制系统可分为最优控制系统、自适应控制系统、预测控制系统、模糊控制系统、神经网络控制系统等。

第四节 自动控制系统的基本要求及其分析方法

一、对自动控制系统的基本要求

1. 稳定性

稳定性是自动控制系统最基本的要求，不稳定的控制系统是不能工作的。自动控制系统的输入量和扰动量都恒定不变时，被控量也恒定不变，这种状态称为平衡状态或静态、稳态。当输入量和扰动量发生变化时，反馈量与输入量之间将产生新的误差，在该误差的作用下通过控制使被控量恢复到原来的数值或者达到新的平衡。由于系统总是存在着惯性，因此需经一定过程才能达到新的平衡状态。系统从一个平衡状态到另一个平衡状态必然有过渡过程或动态过程，稳定性与动态过程紧密相关。动态过程的形式不但与系统的结

构和参数有关，还与输入量或外扰函数的形式有关。当初始条件为零，扰动量为零，输入量为单位阶跃函数时，输出的过渡过程称为单位阶跃响应。自动控制系统的单位阶跃响应是最常用的描述其动态过程的方法之一。根据系统的结构和参数的不同，单位阶跃响应有如图 1-11 所示的几种形式。由图可知，图 1-11a、图 1-11b 所示的输出量趋于新的平衡状态，是稳定的；图 1-11c、图 1-11d 所示为等幅振荡或发散，不趋于新的平衡状态，它们是不稳定的。不稳定的系统不可能完成预定任务，因此首先要求自动控制系统必须是稳定的。

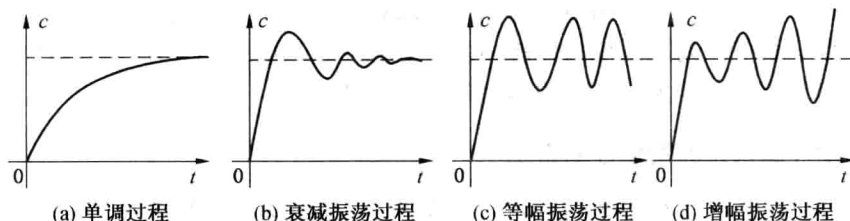


图 1-11 自动控制系统的动态过程

2. 动态性能

系统的稳定仅仅满足了最基本的要求，要完成预定任务，只要求系统稳定是不够的。一般来说，自动控制系统如果设计合理，其动态过程就如图 1-11a 和图 1-11b 所示的衰减收敛情况。为了满足生产过程的要求，要求控制系统的动态过程不仅是稳定的，并且希望过渡过程的时间（又称调整时间）越短越好，振荡幅度越小越好。从图 1-11a 和图 1-11b 可看出，虽然它们都是稳定的，但其过渡过程的速度性和平稳性却不相同。因此设计者必须根据预定任务提出相应要求，并且将这些要求用动态过程中的一些特征量，如超调量、调节时间、峰值时间等来描述。这些特征量称为动态性能指标，它们可以评价系统动态性能的优劣。自动控制系统必须满足一定的动态性能指标的要求。

3. 控制精度

当输出量的过渡过程结束后系统进入稳态，此时要求系统的输出量（被控量）应以一定的精度达到期望值（给定值），它们之间的误差称为稳态误差。稳态误差是衡量系统控制精度的指标，对于好的自动控制系统来说，一般要求稳态误差越小越好，最好稳态误差为零。但在实际生产过程中，往往做不到完全使稳态误差为零，只能要求稳态误差越小越好。一般要求稳态误差控制在被控量期望值的 2% ~ 5%。

综上所述，对自动控制系统的基本要求可以概括为稳、快、准。

二、自动控制系统的分析方法

自动控制原理的基本内容可分为系统的分析和系统的设计。所谓系统的分析，是在已知系统结构和参数的情况下，确定系统的稳态和动态性能以及分析系统的抗干扰能力；所谓系统的设计，是按照给定的控制任务，设计一个满足稳态和动态性能要求以及抗干扰性能要求的控制系统，并确定其结构和参数。

对于线性定常系统，分析的方法通常有以下 3 种：

(1) 建立在微分方程基础上的时域分析法。此法物理概念直观，分析计算准确，但