



国家示范性高职院校建设项目成果
高等职业教育教学改革系列规划教材

自动控制原理 与系统

◎ 陈贵银 主编 ◎ 冯邦军 主审



• 系统 [redacted] 电机经典控制系统

← • 淡化理论，以实际应用为主，着重分析方法 →

← • 运用 MATLAB 仿真分析控制系统，生动形象，实例丰富

• 配有精品课网站，提供电子课件、习题答案等免费教学资源 →



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

国家示范性高职院校建设项目成果
高等职业教育教学改革系列规划教材

自动控制原理与系统

		陈贵银	主 编
付晓军	朱志伟	蒋英钰	副主编
		冯邦军	主 审

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书是高职高专示范性建设改革成果展示用书,是针对高职学生学习自动控制理论难、教师教学效果不好的实际情况,在全国示范性建设对示范性课程教学改革取得成效的基础上进行修订的,教学实施性强。

本书主要包括:自动控制系统的基本概念;控制系统数学模型的建立方法以及结构图的表示方法;线性控制系统的时域分析法、频域分析法及系统的校正方法基本控制理论;三大电动机调速系统,即步进电动机、直流电动机与交流电动机调速系统;MATLAB 在自动控制原理与系统中的应用。考虑到高职学生的计算能力相对欠缺,书中实例丰富,软件的学习以学生自学为主,教师主讲如何用软件解决系统分析问题。控制理论以将结论应用到系统中的分析为主,去掉了结论的推导过程,控制系统指标的计算以MATLAB 软件解决为主,解决了高职学生学习控制理论的瓶颈问题。

本书内容以便于教学实施为前提,可操作性强,可作为高职高专、应用型本科、职工大学的自动化类、电气类、机电一体化类和应用电子类专业的教材,也可作为自学考试用书,并可供工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理与系统/陈贵银主编. —北京:电子工业出版社, 2013.8

高等职业教育教学改革系列规划教材

ISBN 978-7-121-20506-4

I. ①自… II. ①陈… III. ①自动控制理论—高等职业教育—教材②自动控制系统—高等职业教育—教材 IV. ①TP13②TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第109271号

策划编辑:王艳萍

责任编辑:侯丽平

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

装 订:北京中新伟业印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:19 字数:486.4千字

印 次:2013年8月第1次印刷

印 数:3000册 定价:37.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

本书是为工科类高职生编写的自动控制原理与系统教材。依然保留经典控制理论的两种分析方法：时域分析法和频域分析法。两种分析法以“够用”为原则，深入浅出、循序渐进地引入到实际的系统中应用。全书共分 9 章：第 1 章介绍自动控制系统的基本概念。第 2 章介绍控制系统数学模型的建立方法以及结构图的表示方法。第 3 章至第 5 章系统地论述线性控制系统的时域分析法、频域分析法及系统的校正方法基本控制理论；控制理论以将结论应用到系统中的分析为主，去掉了结论的推导过程，控制系统指标的计算以 MATLAB 软件解决为主，解决了高职学生学习控制理论的瓶颈问题。第 6 章至第 8 章介绍目前控制系统中用得很多的三大电动机调速系统，即步进电动机、直流电动机与交流电动机调速系统。步进电动机调速系统对步进电动机组成结构、系统分析及控制系统调试过程中出现的问题都进行了介绍，实用性很强；直流电动机调速系统除了对晶闸管 BJT 单环、双环控制系统的构成及系统性能进行分析以外，还对直流脉宽调制（PWM）调速系统进行了分析；交流电动机调速系统中主要介绍了异步电动机调压调速系统。第 9 章主要介绍 MATLAB 在自动控制原理与系统中的应用，本章比较全面，考虑到高职学生的计算能力相对欠缺，实例编写很丰富，软件的学习以学生自学为主，教师主讲如何用软件解决系统分析问题，这也是本书的特点之一。

全书每章配有小结、习题，它们多为生产实际中的问题，小结概括了每章的基本内容和要求。书中的例题分析详细，理论联系实际，通俗易懂并切合实用，有利于学生自学能力、分析能力和实践能力的提高，此外也是为了帮助解决参考图书不足的困难。

本书编写的前提是针对高职学生学习自动控制理论难、教师教学效果不好的实际情况，在全国示范性建设对示范性课程教学改革取得成效的基础上进行修订的，教学实施性强。全书参考教学学时数为 48~60 学时，教学地点可采取多媒体教室、虚拟计算机平台及实训室一体化教室。编者在编写时，主要考虑全书的系统性和完整性，但教师和读者使用时，请注意抓住主干，选择要点，把主要精力放在对分析方法的掌握上。书中许多章节的内容与例子都相对独立，以便于不同的专业选用。

本书可作为高职高专院校、应用型本科、职工大学的自动化类、电气类、机电一体化类和应用电子类专业的教材，也可作为自学考试用书，并可供工程技术人员参考。

本书由陈贵银担任主编，冯邦军担任主审，付晓军、朱志伟、蒋英钰担任副主编。第 1、2、3、4、5、9 章及 7.1~7.3 节由陈贵银编写；第 6 章由付晓军编写；第 8 章及 7.4 节由蒋英钰编写；朱志伟参加了部分程序的调试编写工作并提出了诚恳的建议。在此向关心和支持本书编写工作的人士表示衷心的感谢。

为便于教材的使用，本书还配有多媒体课件及习题答案，请有此需要的教师登录华信教育资源网（www.hxedu.com.cn）免费注册后再进行下载，如果有问题请在网站留言板留言或与编者联系（E-mail: cgy1974@163.com），读者也可以通过精品课网站 <http://219.140.188.180/zdkz> 浏览和参考更多的教学资源。由于编者水平有限，不妥之处在所难免，真诚希望广大读者批评指正。

编者

2013 年 3 月

目 录

第 1 章 自动控制系统的基本概念	1
1.1 概述	1
1.2 自动控制的基本方式	1
1.2.1 开环控制系统	2
1.2.2 闭环控制系统	3
1.2.3 控制系统的基本组成	6
1.3 自动控制系统的类型	8
1.3.1 线性系统和非线性系统	8
1.3.2 连续系统和离散系统	8
1.3.3 恒值系统、程序控制系统和随动控制系统	8
1.3.4 对控制系统的基本要求	9
1.4 本课程的基本任务、特点及学习方法	10
习题 1	10
第 2 章 控制系统的数学模型	13
2.1 控制工程数学基础	13
2.1.1 拉普拉斯变换的定义	13
2.1.2 典型试验函数的拉普拉斯变换	13
2.1.3 拉普拉斯变换的性质	16
2.1.4 拉普拉斯反变换	17
2.2 控制系统数学模型的建立	19
2.2.1 元件和系统微分方程式的建立	20
2.2.2 传递函数	24
2.2.3 系统结构图	26
2.2.4 典型环节的传递函数	28
2.3 结构图等效变换和系统传递函数	35
2.3.1 典型连接的等效传递函数	35
2.3.2 用梅逊公式求传递函数	40
2.3.3 系统传递函数	43
2.4 设计实例：低通滤波器设计	45
小结	46
习题 2	47
第 3 章 控制系统时域分析	52
3.1 时域性能指标	52

3.2	一阶系统的瞬态响应	53
3.3	二阶系统的阶跃响应	55
3.3.1	二阶系统的单位阶跃响应	57
3.3.2	二阶系统的瞬态响应性能指标	60
3.4	代数稳定判据	63
3.5	稳态误差	67
3.5.1	稳态误差及误差系数	67
3.5.2	扰动稳态误差	72
3.5.3	减小稳态误差的方法	73
3.6	设计实例:望远镜指向控制系统的设计	76
	小结	78
	习题 3	79
第 4 章	频域分析法	83
4.1	频率特性的基本概念与表示方法	83
4.1.1	频率特性的基本概念	83
4.1.2	频率特性的表示方法	86
4.2	典型环节的频率特性	88
4.3	开环系统频率特性的绘制	97
4.3.1	系统的开环幅相频率特性	97
4.3.2	系统的开环对数频率特性	101
4.4	用频率法分析控制系统的稳定性	105
4.4.1	用开环幅相频率特性判断闭环系统的稳定性	105
4.4.2	用开环对数频率特性判断闭环系统稳定性	109
4.4.3	系统的稳定裕量	110
4.5	开环系统频率特性和时域特性的关系	114
4.5.1	开环对数频率特性低频段与稳态误差	114
4.5.2	开环对数频率特性中频段与时域瞬态特性	116
4.5.3	闭环系统频率特性与时域性能的关系	121
4.6	设计实例:雕刻机位置控制系统	123
	小结	124
	习题 4	125
第 5 章	自动控制系统的校正	129
5.1	校正装置	129
5.1.1	无源校正装置	129
5.1.2	有源校正装置	130
5.2	PID 控制规律	132
5.3	串联校正(频率法)	136

5.3.1 串联超前校正.....	136
5.3.2 串联滞后校正.....	140
5.3.3 串联滞后-超前校正.....	144
5.4 反馈校正.....	147
5.5 顺馈补偿举例.....	152
小结.....	153
习题 5.....	154
第 6 章 步进电动机控制系统.....	156
6.1 环形分配器.....	157
6.1.1 硬件环形分配器.....	157
6.1.2 软件环形分配器.....	160
6.2 步进电动机控制系统.....	161
6.2.1 步进电动机驱动电源的功率放大电路.....	161
6.2.2 步进电动机控制系统组成.....	165
6.3 步进电动机控制系统的应用.....	166
6.3.1 步进电动机控制系统的应用.....	166
6.3.2 步进电动机控制系统使用中的常见问题.....	168
小结.....	172
习题 6.....	172
第 7 章 直流调速控制系统.....	173
7.1 转速负反馈晶闸管直流调速系统.....	173
7.1.1 系统的组成.....	173
7.1.2 系统的框图.....	176
7.1.3 系统的自动调节过程.....	177
7.1.4 系统的性能分析.....	178
7.2 小功率有静差直流调速系统实例分析（阅读材料）.....	181
7.2.1 系统结构特点和技术数据.....	181
7.2.2 定性分析.....	182
7.2.3 系统框图.....	186
7.2.4 系统的自动调节过程.....	186
7.2.5 系统性能分析.....	187
7.3 转速和电流双闭环直流调速系统.....	187
7.3.1 双闭环调速系统的组成.....	188
7.3.2 系统框图.....	189
7.3.3 双闭环调速系统的工作原理和自动调节过程.....	191
7.3.4 系统性能分析.....	192
7.3.5 双闭环调速系统的优点.....	193

7.4 直流脉宽调制 (PWM) 调速系统	194
7.4.1 PWM 调速系统的工作原理	194
7.4.2 PWM 调速系统的主要特点	197
7.4.3 PWM 调速系统组成	197
7.4.4 PWM 调速系统的分析	200
小结	201
习题 7	203
第 8 章 交流调压调速系统	207
8.1 概述	207
8.1.1 交流调速系统的发展	207
8.1.2 交流调速系统的分类	208
8.2 异步电动机调压调速系统工作原理	209
8.2.1 调压调速的工作原理	209
8.2.2 交流调压器原理	210
8.3 异步电动机调压调速系统	212
8.3.1 调压调速的组成	212
8.3.2 调压调速的特性	212
8.3.3 调压调速的功率损耗	213
小结	215
习题 8	215
第 9 章 MATLAB 在自动控制原理与系统中的应用	216
9.1 学习自动控制原理的工具软件 MATLAB	216
9.1.1 先进的软件系统 MATLAB	216
9.1.2 MATLAB 的程序设计环境	217
9.1.3 基本操作	220
9.1.4 M 文件	222
9.1.5 MATLAB 的绘图功能	224
9.2 用 MATLAB 求拉氏变换与拉氏反变换	225
9.3 控制系统数学模型的 MATLAB 实现	228
9.3.1 数学模型的三种表示	229
9.3.2 结构图模型的简化	232
9.4 用 MATLAB 解决时域分析的问题	237
9.4.1 时域响应曲线的绘制	237
9.4.2 二阶系统性能指标的计算	240
9.4.3 代数稳定判据 MATLAB 的实现	242
9.4.4 稳态误差的计算	243
9.5 用 MATLAB 解决频率分析问题	246

9.5.1 频率特性曲线的绘制.....	246
9.5.2 利用频率特性计算系统的参数.....	248
9.5.3 频率特性曲线的性能分析及性能指标的计算.....	251
9.6 PID 校正设计 MATLAB 实现举例.....	256
9.7 用 MATLAB 实现频率法校正举例.....	259
9.8 用 MATLAB 仿真单闭环调速系统.....	267
9.9 用 MATLAB 仿真双闭环调速系统.....	274
小结	282
习题 9	282
附录 A MATLAB 中用到的参考函数程序.....	287
参考文献	291

第 1 章 自动控制系统的基本概念

内容提要：

本章通过开环与闭环控制具体实例，讲述自动控制系统的基本概念（如被控制对象、输入量、输出量、扰动量、开环控制系统、闭环控制系统及反馈的概念）、反馈控制任务、控制系统的组成及原理框图的绘制、控制系统的基本分类、对控制系统的基本要求。

1.1 概述

在科学技术飞速发展的今天，自动控制技术起着越来越重要的作用。**所谓自动控制，是指在没有人直接参与的情况下，利用控制装置使被控对象（机器设备或生产过程）的某个参数（即被控量）自动地按照预定的规律运行。**例如，数控车床按照预定程序自动地切削工件，化学反应炉的温度或压力自动地维持恒定，人造卫星准确地进入预定轨道运行并回收，宇宙飞船能够准确地在月球着陆并返回地面等，都是以应用高水平的自动控制技术为前提的。

自动控制理论是控制工程的理论基础，是研究自动控制共同规律的技术科学。自动控制理论按其发展过程分成经典控制理论和现代控制理论两大部分。

经典控制理论在 20 世纪 50 年代末已形成比较完整的体系，它主要以传递函数为基础，研究单输入、单输出反馈控制系统的分析和设计问题，其基本内容有时域法、频域法、根轨迹法等。

现代控制理论是 20 世纪 60 年代在经典控制理论的基础上，随着科学技术的发展和工程实践的需要而迅速发展起来的，它以状态空间法为基础，研究多变量、变参数、非线性、高精度等各种复杂控制系统的分析和综合问题，其基本内容有线性系统基本理论、系统辨识、最优控制等。近年来，由于计算机和现代应用数学研究的迅速发展，使控制理论继续向纵深方向发展。目前，自动控制理论正向以控制论、信息论、仿生学为基础的智能控制理论深入。

1.2 自动控制的基本方式

在工业生产过程中，为了提高产品质量和劳动生产率，对生产设备、机器和生产过程需要进行控制，使之按预定的要求运行。例如，为了使发电机能正常供电，就必须使输出电压保持不变，尽量使输出电压不受负荷的变化和原动机转速波动的影响；为了使数控机床能加工出合格的零件，就必须保证数控机床的工作台或者刀架的位移量准确地跟随进给指令进给；为了使加热炉能保证生产出合格的产品，就必须对炉温进行严格的控制。其中，发电机、机床、加热炉是工作的机器装备；电压、刀架位移量、炉温是表征这些机器装备工作状态的物理参量；额定电压、进给的指令、规定的炉温是在运行过程中对工作状态物理参量的要求。

被控制对象或对象：将这些需要控制的工作机器装备称为被控制对象或对象，如发电机、机床。

输出量（被控制量）：将表征这些机器装备工作状态需要加以控制的物理参量称为被控制量（输出量），如前述的电压、刀架位移量、炉温等。

输入量（控制量）：将要求这些机器装备工作状态应保持的数值，或者说为了保证对象的行为达到所要求的目标而输入的量，称为输入量（控制量），如前述的额定电压、进给指令、规定的炉温。

扰动量：使输出量偏离所要求的目标，或者说妨碍达到目标所作用的物理量，称为扰动量，如前述负荷的变化和原动机转速波动等。

控制的任务：实际上就是形成控制作用的规律，使不管是否存在扰动，均能使被控制对象的输出量满足给定值的要求，即 $x(t)$ 输入量 $\approx y(t)$ 输出量。

1.2.1 开环控制系统

以直流电动机的转速控制系统为例来说明开环控制系统（Open Loop Control System）的工作原理。

用一台直流电动机 D 来驱动一个需要以恒速转动的负载，如图 1-2-1 所示。电动机电枢的两端加电压 U_a ，可控硅功率放大器整流输出电压 U_a 的大小由电位器 R 的给定电压 U_r 来调节。当电位器给出一定电压 U_r 后，经放大器、触发器和可控硅功率放大器输出电压 U_a 加在电动机 D 两端，电动机便以相应的转速驱动负载转动。如果要求负载以某一恒定转速转动，则只要给定一个相应的固定电压 U_a 即可。若改变电位器滑动端的位置，就相应地改变了给定电压 U_r ，那么可控硅整流器的输出电压 U_a 也相应改变，从而电动机 D 的转速也就随着改变了。由此可知，对应电位器滑动端的某一个位置，电动机 D 就运行在某一个对应的转速 n 上。从而达到了控制电动机转速的目的。假如电动机的负载发生变化，电动机转速将偏离给定的转速值。如要维持给定的转速不变，就必须由操作人员检测出电动机的实际转速并与给定值进行比较，判断出偏离的值，操作人员相应地调节电位器滑动端位置，使电动机转速恢复到给定值。

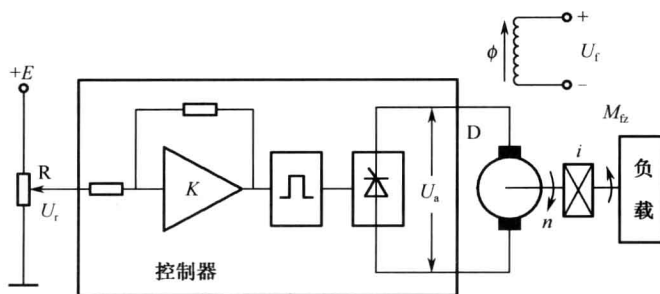


图 1-2-1 直流电动机调速开环控制系统

在这个转速控制系统中，电动机 D 是被控制对象；转速 n 是被控制量；电压 U_r 是控制量；负载波动、可控硅电源电压变化等是扰动量。在此系统中，放大器、触发器、可控硅整流器称为控制器。

由上分析： $M_L \uparrow \rightarrow n \downarrow$ ，则要人为调节使 $U_r \uparrow \rightarrow U_a \uparrow \rightarrow n \uparrow$ 。即给定量直接经过控制器作用于被控制对象，被控制量 n 不能反过来影响给定量 U_r 。这种只有给定量影响输出量（被控制量），被控制量只能受控于控制量，而被控制量不能反过来影响控制量的控制系统称为开环控制系统。

开环控制系统可以用结构示意图表示,如图 1-2-2 所示。

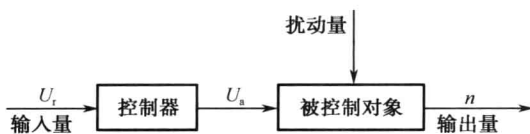


图 1-2-2 开环控制系统结构示意图

结构图可以表示这种系统的输入量与输出量之间的关系。由图可知,输入量直接经过控制器作用于被控制对象,所以只有输入量影响输出量。当出现扰动时,没有人的干预,输出量不能按照输入量所期望的状态去工作。

1.2.2 闭环控制系统

图 1-2-3 所示的系统是直流电动机调速闭环控制系统 (Closed Loop Control System)。图中 CF 为测速发电机,测速发电机测量直流电动机的转速,并将转速转换为相应的电压 U_{cf} ,故测速发电机输出电压 U_{cf} 比例于电动机的转速 n 。 U_{cf} 反馈到输入端与给定电压 U_r 相比较,所得电压差 $U_e = U_r - U_{cf}$,称为**偏差电压**。偏差电压 U_e 通过控制器控制电动机 D 的转速。当电位器滑动端在某一位置时,电动机就以一个给定的转速转动。如果由于外部或内部扰动,比如负载突然增加,使电动机转速下降,电动机转速的变化,将由测速发电机检测出来。此时反馈电压 U_{cf} 降低,偏差电压 U_e 增大,使整流电压 U_a 升高,电动机转速上升,从而减小或消除电动机转速偏差。

由上分析: $M_{Lz} \uparrow \rightarrow n \downarrow \rightarrow U_{cf} \downarrow \rightarrow U_e = U_r - U_{cf} \uparrow \rightarrow U_a \uparrow \rightarrow n \uparrow$,不需要人为调节。即为了实现闭环控制,必须对输出量进行测量,并将测量的结果反馈到输入端与输入量相减得到偏差,再由偏差产生直接控制作用去消除偏差。因此,整个控制系统形成一个闭合环路。这种输出量直接或间接地反馈到输入端,形成闭环,参与控制的系统,称作**闭环控制系统**。由于系统是根据负反馈原理按偏差进行控制的,所以也叫作**反馈控制系统 (Feedback Control System)**或**偏差控制系统**。

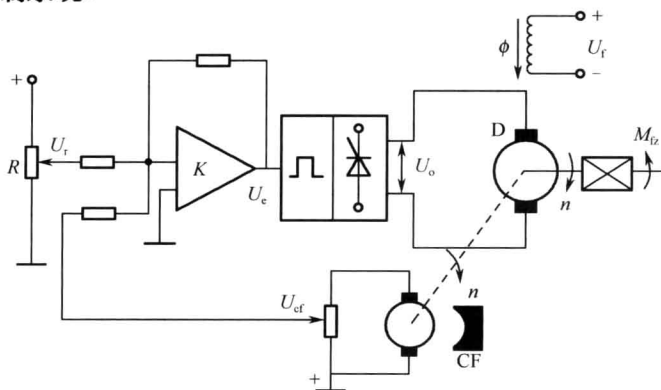


图 1-2-3 直流电动机调速闭环控制系统

闭环控制系统中各元件的作用和信号的流通情况,可用结构图 1-2-4 表示。

在结构图中,从输入端到输出端的信号传递通道叫**前向通道**;从输出端到输入端的信号传递通道,使输出信号也参与控制,该通道称为**反馈通道**。把系统输出的全部或部分返回输入端叫**反馈**;把输出量反馈到系统的输入端与输入量相减称为**负反馈**,反之为**正反馈**。

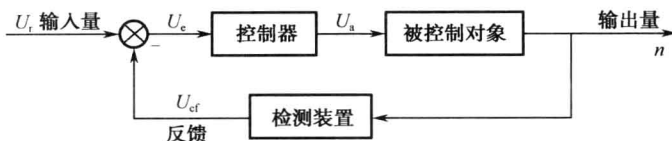


图 1-2-4 闭环控制系统结构图

最后，归纳开环与闭环控制系统各自的特点如下：

(1) 开环控制系统中，只有输入量对输出量产生控制作用；从控制结构上来看，只有前向通道，控制系统结构简单，实现容易。

闭环控制系统中除前向通道外，还有反馈通道。闭环控制系统就是由前向通道和反馈通道组成的，控制系统结构复杂。

(2) 闭环控制系统能抑制内部和外部各种形式的干扰，对干扰不敏感。因此，可采用不太精密和成本较低的元件来构成控制精度较高的系统。

开环控制系统的控制精度完全由采用高精度元件和有效的抗干扰措施来保证。

(3) 对闭环控制系统来说，系统的稳定性始终是一个首要问题。稳定是闭环控制系统正常工作的必要条件。对于开环控制系统，要么不存在不稳定问题，要么容易解决。

反馈控制系统广泛地应用于各工业部门。在有些系统中，将开环与闭环结合在一起，这种系统称为**复合控制系统**，其结构图如图 1-2-5 所示。在本书中，重点研究闭环控制系统。

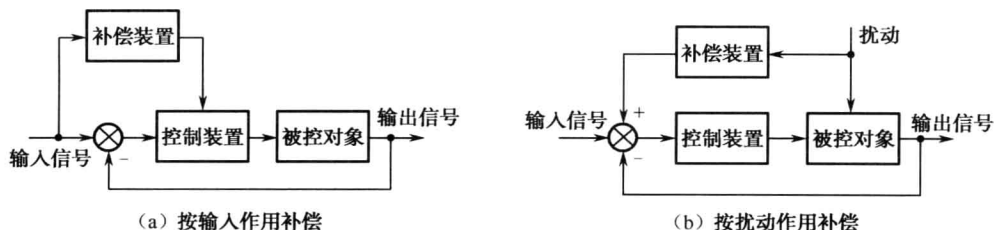


图 1-2-5 复合控制系统结构图

复合控制实质上是在闭环控制的基础上，附加一个输入信号（给定或扰动）的前馈通道，对该信号实行加强或补偿，以达到精确的控制效果。

例 1-2-1 液面控制系统如图 1-2-6 所示。要求在运行中容器的液面高度保持不变。试简述其工作原理，并画出系统原理结构图。

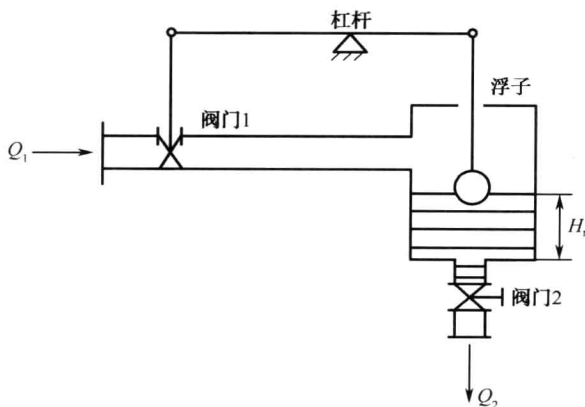


图 1-2-6 液面控制系统

解：被控对象是容器，其液面高度 H 为输出量。浮子跟随液面上下浮动，可以反映出液面的实际高度 H ，也可以表明实际高度对输入高度的偏差 $H_r - H$ ，相当于测量元件。

浮子带动杠杆，杠杆联动阀门 1 以调节进入容器的流量，进而控制液面高度，故杠杆相当于放大和执行元件。

由以上分析可画出系统的原理结构图如图 1-2-7 所示。

明显看出，控制量是 H_r ，测量的是 $H_r - H$ ，故系统属于反馈控制方式。

假定在额定需用流量 Q_2 下，容器的液面高度 H 恰好等于输入值 H_r ，而由阀门 1 的开度决定进入容器的液体流量 Q_1 也恰恰等于 Q_2 ，则系统处于要求的工作状态。

若需用流量发生变化，如关小阀门 2， Q_2 减小，这时进入容器的液体流量 Q_1 还没改变，则 $Q_1 > Q_2$ ，液面高度上升，而 H 变化将使浮子上升，杠杆联动阀门 1 关小，使 Q_1 减少，直到 $Q_1 = Q_2$ ，液面高度又保持常值。

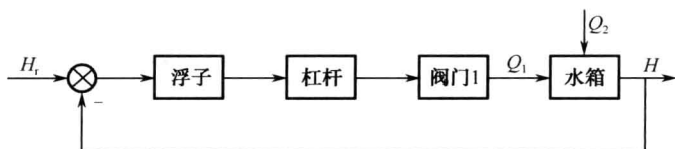


图 1-2-7 液面控制系统的原理结构图

移动杠杆的支点，加大杠杆传动比，可强化控制效果，浮子移动很小就会使 Q_1 变化很大，从而保证液面高度 H 的波动量在允许的误差范围内。但是，系统从根本上讲，需用流量改变以后，容器的液面高度 H 再也不能恢复到输入值 H_r 。这和控制装置各部件的特性有着密切的关系。因此，不能认为采用反馈控制的系统，最终一定能使输出量等于输入值，完全消除偏差。是否完全消除偏差还取决于系统内部其他方面的规律。

例 1-2-2 炉温控制系统。图 1-2-8 (a) 所示是炉温控制系统工作原理图，图 1-2-8 (b)* 所示是该系统的方框图。试简述其工作原理。

解：控制的任务是保持炉温 T 恒定。系统的输入量 u_r 由电位器 A 滑动端给出，炉温 T 是系统输出量。当 u_r 给定后，炉温 T 就确定了。该系统能克服内外扰动的影响，保持炉温 T 恒定。自动控制的原理如下：

假定炉温已达到给定值，经事先整定，这时反馈电压 u_f 应等于给定电压 u_r ，即偏差电压 $\Delta u = u_r - u_f = 0$ ，放大器 A 的输出电压 u_d 等于零，执行电动机静止不动，调压器滑动臂处在某一位置，使调压器提供的电能维持炉温在规定的状态。

如果系统受到扰动（如炉内负荷增大，或调压器电源电压降低等）。使炉温 T 下降，将导致反馈电压 u_f 下降，这时因给定电压 u_r 没变，则偏差电压 $\Delta u = u_r - u_f > 0$ ， Δu 经放大器放大后，使执行电动机转动，并带动调压器向增加输出电压的方向转动，从而使调压器提供的电能让炉温回升，直到炉温等于给定炉温为止。反之亦然。

例 1-2-3 图 1-2-9 是数控机床工作台闭环进给控制系统。图中， x_r 为输入位移指令，是输入量； x_c 为工作台位移量，是输出量；工作台是被控对象；直流电动机齿轮传动及丝杠螺母是执行机构；磁尺用来测量工作台的位移量，是测量元件。试简述其工作原理，并画出系统原理结构图。

解：为了保证工作台能根据输入量做随从运动，控制器同时接收输入量 x_r 和磁尺测量出的代表工作台位移的量 x_c ，并比较得出差值 $\Delta x = x_r - x_c$ ，由差值 Δx 控制直流电动机驱动齿

轮丝杠传动机构，带动工作台移动去减小差值，其结构图如图 1-2-10 所示。

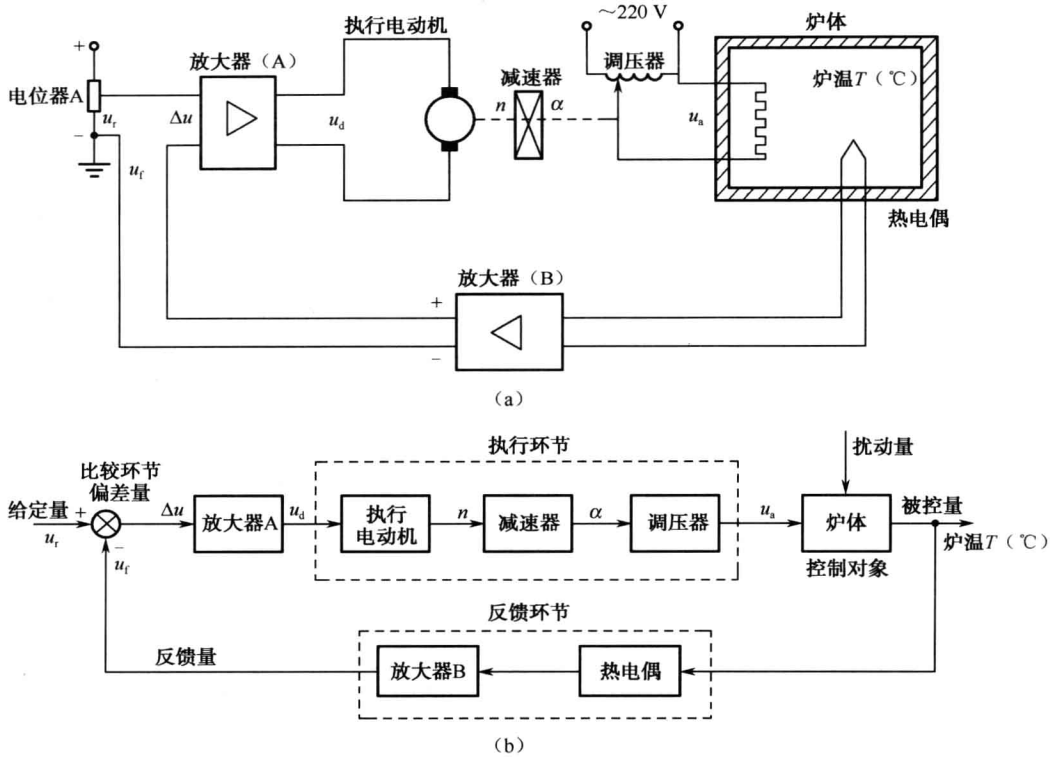


图 1-2-8 炉温控制系统工作原理图及方框图

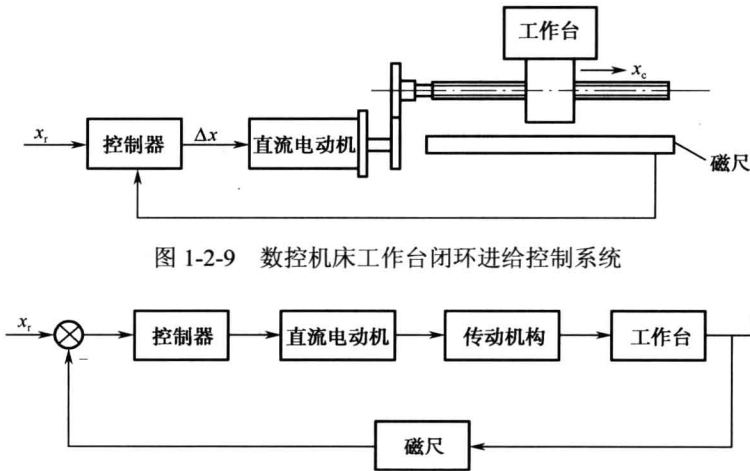


图 1-2-10 工作台闭环进给控制系统结构图

1.2.3 控制系统的基本组成

反馈控制是自动控制理论研究的核⼼。根据控制对象和使用元件的不同，自动控制系统有各种不同的形式。但是从控制功能的角度来看，自动控制系统一般均由以下基本环节（基本元件）组成。

(1) 被控对象或调节对象：是指要进行控制的设备或过程。如前所述的发电机、机床、加热炉等。

(2) 比较环节（比较元件）：用来实现将所检测到的输出量和输入量进行比较，并产生偏差信号的元件。在多数控制系统中，比较元件常常和测量元件或测量电路结合在一起。常用的电量比较元件有差动放大器、电桥电路等。

(3) 放大环节（放大元件）：由于偏差信号一般比较微弱，不能直接用于驱动被控对象，需要进行放大。因此控制系统必须具有放大环节。常用放大元件有放大器、可控硅整流器、液压伺服放大器等。

(4) 执行环节（执行元件）：用来实现控制动作，直接操纵被控对象的元件。常用执行元件有交/直流伺服电动机、液压电动机、传动装置等。

(5) 检测环节（测量元件）：是用来测量被控制量的元件。由于测量元件的测量精度直接影响到系统的控制精度，因此应尽可能采用高精度的测量元件和合理的测量电路，常用的测量元件有测速发电机、编码器、自整角机等。

(6) 校正环节（校正元件）：对控制性能要求比较高的系统或者比较复杂的系统，为了改善系统的控制性能，提高控制系统的控制质量，需要在系统中加入校正环节。工程上称为**调节器**，常用串联或反馈的方式连接在系统中。简单的校正元件可以是一个 RC 网络，复杂的校正装置可含有微型计算机。

由上述元件构成的闭环控制系统，就其信号传递和变换的功能来说，都可抽象出如图 1-2-11 所示的闭环控制系统结构图。

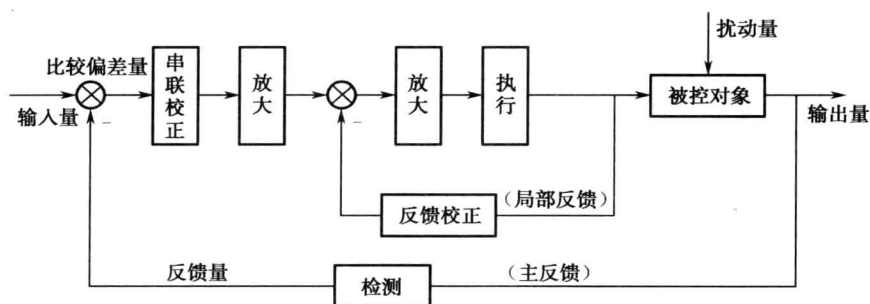


图 1-2-11 闭环控制系统结构图

分析自动控制系统时，弄清楚以下问题是分析自动控制系统工作原理的有效方法。

(1) 受控对象是什么？控制装置是什么？被控量是什么？作用在受控对象上的主要干扰有哪些？

(2) 给定值或参考输入由哪个装置提供？

(3) 依靠操纵哪个机构来改变被控量？

(4) 有哪些测量元件？是否测量了被控量？测量了哪些干扰？

(5) 如何实现给定量与反馈量的综合计算？如何判断偏差？

(6) 控制作用通过什么部件去执行？

1.3 自动控制系统类型

自动控制系统的种类繁多, 很难确切地对自动控制系统进行分类。现在将经常讨论的几种自动控制系统的类型概括如下。

1.3.1 线性系统和非线性系统

按组成自动控制系统主要元件的特性方程式的性质, 可以分为线性系统和非线性系统。

线性系统是由线性元件组成的系统, 系统的运动方程式可用线性微分方程式或线性差分方程式来描述。

线性系统的主要特点是具有叠加性和齐次性。就是说对于线性控制系统, 几个输入信号同时作用在系统上所引起的输出等于各自输入时系统输出之和。

如果微分方程式或差分方程式的系数不随时间的变化而变化, 即是常数, 则称这类系统为**线性定常系统**, 或称为常参数系统。

如果线性微分方程式或差分方程式的系数随时间的变化而变化, 则称这类系统为**线性时变系统**。

非线性系统是由非线性微分方程式来描述的系统。在自动控制系统中, 若有一个元件是非线性的, 这个系统就是非线性系统。典型的非线性环节特性如图 1-3-1 所示。

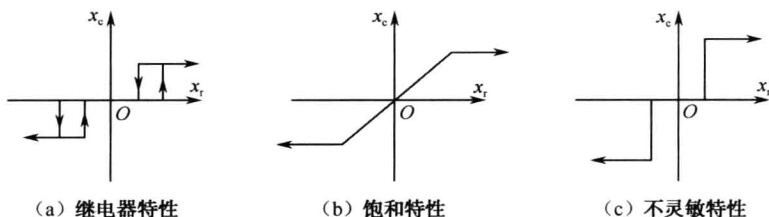


图 1-3-1 典型非线性环节特性

1.3.2 连续系统和离散系统

连续系统: 控制系统中各元件的输入、输出信号都是时间 t 的连续函数时, 则称此系统为连续数据系统 (或称连续系统)。连续系统一般由微分方程式来描述。

离散系统: 是指系统的某一处或几处信号是以脉冲序列或数码的形式传递。

离散系统的主要特点是: 在系统中使用脉冲开关或采样开关, 将连续信号转变为离散信号。离散信号取脉冲形式的系统, 称为**脉冲控制系统**; 离散信号以数码形式传递的系统, 称为**数字控制系统**。

1.3.3 恒值系统、程序控制系统和随动控制系统

在生产中应用最多的闭环控制系统, 往往要求输出量保持在恒定值。由于要求输出量是常值, 则系统的输入量也应该是常值。但也有的系统要求输出量按某一规律变化。按输入量的特征, 可将系统分成以下三种类型。

恒值系统: 这种系统的输入量保持不变, 如恒速、恒温、恒压等自动控制系统。