

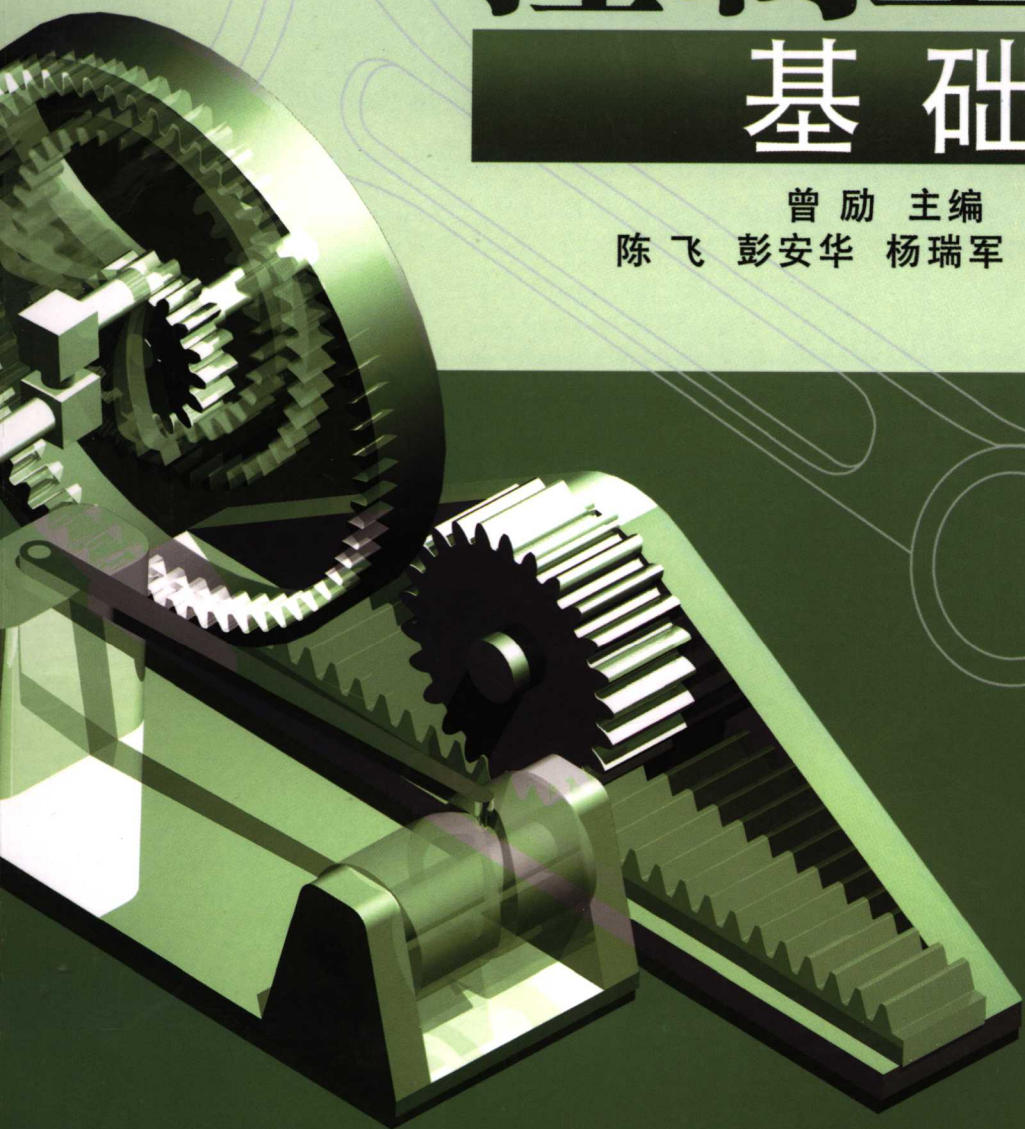
高等学校机电类规划教材

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

# 控制工程 基础

曾励 主编

陈飞 彭安华 杨瑞军 副主编



高等学校机电类规划教材

# 控制工程基础

曾 励 主 编  
陈 飞 彭安华 杨瑞军 副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

## 内 容 简 介

本书以分析工程控制系统的性能为目的,总结了近年来教学实践和教学改革的经验,并借鉴了国内外同类优秀教材编撰而成。书中以大量机电系统的实际例子渗透于各个章节,使读者掌握控制工程在工程实际中的应用。

全书共分 8 章,主要介绍了控制工程的基本概念和反馈控制的基本结构;控制系统的数学模型;控制系统时域分析法和控制系统的性能指标及其计算方法;控制系统频率分析法和闭环性能频域指标及其计算;控制系统的性能分析;控制系统的综合与校正;采样控制系统分析;基于 MATLAB 的控制系统的仿真。书中每章均配有有一定数量的典型例题和习题,便于读者学习和巩固所学知识。

本书主要面向机电类专业的“控制工程基础”本科生教学,也可供工程技术人员参考。对于专科生和少学时专业可适当调整学时数。读者通过对本课程的学习,不仅能掌握经典控制理论的基本分析和综合方法,而且基本能应用 MATLAB 软件分析和设计工程控制系统。

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

控制工程基础 / 曾励主编. —北京:电子工业出版社, 2007. 10  
高等学校机电类规划教材  
ISBN 978-7-121-04459-5

I. 控… II. 曾… 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(2007)第 143014 号

责任编辑:田领红 特约编辑:孙志明

印 刷:北京市海淀区四季青印刷厂

装 订:涿州市桃园装订有限公司

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:15 字数:380 千字

印 次:2007 年 10 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:25.00 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 zlls@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

控制工程是研究“控制理论”在实际工程中应用的科学。随着科学技术的发展,控制工程在信息学科、机械学科及电气学科等相关学科得到了广泛的应用。在此背景下,我们编写了本书。读者通过对本课程的学习,不仅能掌握工程实际中经典控制系统的分析和综合的基本方法,而且在使用计算机辅助工具——MATLAB 对控制系统进行分析和设计的能力方面也会有所提高。

全书共分 8 章,包括绪论、控制系统的数学模型、控制系统的时域分析、控制系统的频率特性分析、控制系统的性能分析、控制系统的综合与校正、采样控制系统分析基础及基于 MATLAB 语言的控制系统的分析等内容。本书在阐述上力求内容精简,重点突出,浅显易懂,并有创新,重点是系统性能分析和系统性能改进,而不是系统设计。因此,本书不仅有意识地将工程系统的稳定性、稳态性及动态性等性能问题结合于各章节中介绍,而且将控制系统性能分析独立成章(第 5 章)。此外,本书还以高性能的数值计算和可视化软件 MATLAB 为工具,阐述了基于 MATLAB 的控制系统的仿真分析。

本书由曾励主编,陈飞、彭安华、杨瑞军副主编,第 1 章、附录由王新琴编写,第 2 章由陈飞编写,第 3 章、第 5 章由曾励和彭安华编写,第 4 章、第 6 章由杨瑞军和陈季萍编写,第 7 章由张帆编写,第 8 章由曾励编写,参加编写工作的还有王张合、姜明明和崔云峰。全书由曾励和王张合修改、整理并统稿,由朱兴龙教授主审。

本书在编写过程中得到了扬州大学出版基金的资助,并参考了许多同类教材和著作,在此对有关人员表示衷心的感谢。限于编者的水平,书中错误疏漏之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

2007 年 5 月

## 反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396; (010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

## 《控制工程基础》读者意见反馈表

尊敬的读者：

感谢您购买本书。为了能为您提供更优秀的教材，请您抽出宝贵的时间，将您的意见以下表的方式（可从 <http://www.hxedu.com.cn> 下载本调查表）及时告知我们，以改进我们的服务。对采用您的意见进行修订的教材，我们将在该书的前言中进行说明并赠送您样书。

姓名：\_\_\_\_\_ 电话：\_\_\_\_\_

职业：\_\_\_\_\_ E-mail：\_\_\_\_\_

邮编：\_\_\_\_\_ 通信地址：\_\_\_\_\_

1. 您对本书的总体看法是：

很满意     比较满意     尚可     不太满意     不满意

2. 您对本书的结构（章节）： 满意     不满意    改进意见\_\_\_\_\_

3. 您对本书的例题： 满意     不满意    改进意见\_\_\_\_\_

4. 您对本书的习题： 满意     不满意    改进意见\_\_\_\_\_

5. 您对本书的实训： 满意     不满意    改进意见\_\_\_\_\_

6. 您对本书其他的改进意见：

7. 您感兴趣或希望增加的教材选题是：

请寄：100036 北京万寿路 173 信箱机电与交通分社 田领红收

电话：010-88254474    E-mail: tianlh@phei.com.cn

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	(1)
1.1 控制工程概述 .....	(1)
1.2 控制系统的结构 .....	(2)
1.2.1 开环控制系统 .....	(2)
1.2.2 闭环控制系统 .....	(3)
1.2.3 反馈控制系统的组成 .....	(5)
1.3 控制系统的基本类型 .....	(6)
1.3.1 按输入信号的特征分类 .....	(6)
1.3.2 按控制器的实现方式分类 .....	(7)
1.3.3 按有无误差分类 .....	(7)
1.4 对控制系统的基本要求 .....	(7)
1.4.1 稳定性 .....	(8)
1.4.2 快速性 .....	(9)
1.4.3 准确性 .....	(9)
习题 .....	(9)
<b>第 2 章 控制系统的数学模型</b> .....	(11)
2.1 控制系统的微分方程 .....	(11)
2.1.1 线性系统与非线性系统 .....	(11)
2.1.2 微分方程的建立 .....	(13)
2.1.3 微分方程的求解 .....	(17)
2.2 控制系统的传递函数 .....	(17)
2.2.1 传递函数的定义 .....	(18)
2.2.2 传递函数的特点 .....	(18)
2.2.3 传递函数的形式 .....	(19)
2.3 典型环节的传递函数 .....	(19)
2.3.1 比例环节 .....	(19)
2.3.2 微分环节 .....	(20)
2.3.3 积分环节 .....	(23)
2.3.4 惯性环节 .....	(24)
2.3.5 一阶微分环节 .....	(25)
2.3.6 二阶振荡环节 .....	(26)
2.3.7 二阶微分环节 .....	(27)
2.3.8 延时环节 .....	(28)
2.4 控制系统的函数方框图模型 .....	(29)
2.4.1 控制系统的基本连接方式 .....	(29)

2.4.2	扰动作用下的闭环控制系统 .....	(31)
2.4.3	函数方框图的绘制 .....	(32)
2.4.4	函数方框图的简化 .....	(33)
2.5	典型系统的数学模型分析 .....	(36)
2.5.1	机械系统 .....	(37)
2.5.2	电气系统 .....	(38)
2.5.3	机电液系统 .....	(39)
	习题 .....	(40)
<b>第3章</b>	<b>控制系统的时域分析 .....</b>	<b>(44)</b>
3.1	控制系统的瞬态响应 .....	(44)
3.1.1	典型输入信号 .....	(44)
3.1.2	时间响应及其组成 .....	(47)
3.1.3	控制系统的时域性能指标 .....	(48)
3.2	一阶系统的时间响应 .....	(50)
3.2.1	一阶系统的数学模型 .....	(50)
3.2.2	一阶系统的单位阶跃响应 .....	(51)
3.3	二阶系统的时间响应 .....	(56)
3.3.1	二阶系统的数学模型 .....	(56)
3.3.2	二阶系统的时间响应 .....	(59)
3.3.3	二阶系统的时域性能指标 .....	(63)
3.4	高阶系统的时间响应 .....	(68)
3.4.1	高阶系统的时间响应分析 .....	(68)
3.4.2	高阶系统的性能分析 .....	(69)
	习题 .....	(71)
<b>第4章</b>	<b>控制系统的频率特性分析 .....</b>	<b>(75)</b>
4.1	频率特性的基本概念 .....	(75)
4.1.1	频率响应 .....	(75)
4.1.2	频率特性及其求取方法 .....	(76)
4.1.3	频率特性的图形表示法 .....	(77)
4.2	典型环节的频率特性 .....	(79)
4.2.1	比例环节 .....	(79)
4.2.2	积分和微分环节 .....	(80)
4.2.3	一阶环节 .....	(81)
4.2.4	二阶环节 .....	(83)
4.2.5	延时环节 .....	(86)
4.3	控制系统的频率特性分析 .....	(87)
4.3.1	系统开环频率特性图 .....	(87)
4.3.2	系统开环对数频率特性图 .....	(91)
4.3.3	最小相位系统与非最小相位系统 .....	(94)



4.4	闭环系统的频域分析 .....	(96)
4.4.1	闭环系统的频率特性图 .....	(96)
4.4.2	由开环频率特性估计闭环频率特性 .....	(97)
4.4.3	闭环系统频域性能分析 .....	(98)
	习题 .....	(100)
<b>第5章</b>	<b>控制系统的性能分析 .....</b>	<b>(103)</b>
5.1	控制系统的稳定性分析 .....	(103)
5.1.1	控制系统稳定性的基本概念 .....	(103)
5.1.2	代数稳定判据 .....	(105)
5.1.3	控制系统稳定性的频域判据 .....	(112)
5.1.4	控制系统的相对稳定性分析 .....	(120)
5.2	控制系统的稳态性能分析 .....	(127)
5.2.1	系统误差和误差传递函数 .....	(127)
5.2.2	系统静态误差的计算 .....	(130)
5.2.3	动态误差分析 .....	(138)
5.2.4	系统开环对数幅频特性与闭环稳态误差的关系 .....	(141)
5.3	控制系统的动态性能分析 .....	(143)
5.3.1	系统动态性能与开环频率特性间的关系 .....	(143)
5.3.2	系统动态性能与闭环频率特性间的关系 .....	(145)
	习题 .....	(148)
<b>第6章</b>	<b>控制系统的综合与校正 .....</b>	<b>(154)</b>
6.1	控制系统校正概述 .....	(154)
6.2	控制系统的串联校正 .....	(155)
6.2.1	相位超前校正 .....	(155)
6.2.2	相位滞后校正 .....	(158)
6.2.3	滞后-超前校正 .....	(160)
6.2.4	PID 校正 .....	(163)
6.3	控制系统的并联校正 .....	(166)
6.3.1	反馈校正 .....	(166)
6.3.2	顺馈校正 .....	(167)
	习题 .....	(168)
<b>第7章</b>	<b>采样控制系统分析基础 .....</b>	<b>(170)</b>
7.1	概述 .....	(170)
7.2	信号的采样与复原 .....	(171)
7.2.1	信号的采样 .....	(171)
7.2.2	信号的复原 .....	(174)
7.3	$z$ 变换 .....	(175)
7.3.1	$z$ 变换的定义 .....	(175)
7.3.2	$z$ 变换的性质 .....	(177)

7.3.3	$z$ 反变换	(179)
7.4	线性离散系统的差分方程	(181)
7.4.1	差分方程的数学描述	(181)
7.4.2	差分方程的求解	(182)
7.5	脉冲传递函数	(183)
7.5.1	脉冲传递函数的定义	(183)
7.5.2	脉冲传递函数的求解方法	(184)
7.5.3	脉冲传递函数的连接方式	(184)
7.5.4	闭环系统的脉冲传递函数	(185)
7.6	采样控制系统的性能分析	(186)
7.6.1	采样控制系统的稳定性分析	(186)
7.6.2	采样控制系统的稳态性分析	(189)
7.6.3	采样控制系统的动态特性分析	(190)
	习题	(192)
<b>第 8 章</b>	<b>基于 MATLAB 语言的控制系统分析</b>	<b>(194)</b>
8.1	MATLAB 语言简介	(194)
8.1.1	基本操作及命令	(194)
8.1.2	MATLAB 函数	(196)
8.1.3	绘制响应曲线	(197)
8.1.4	MATLAB 语言的联机帮助功能	(199)
8.2	数学模型的 MATLAB 描述	(200)
8.2.1	连续系统数学模型的 MATLAB 表示	(200)
8.2.2	离散系统数学模型的 MATLAB 表示	(204)
8.2.3	模型之间的转换	(204)
8.2.4	控制系统的建模	(205)
8.2.5	simulink 建模方法——复杂系统的模型处理方法	(205)
8.3	控制系统的性能分析	(207)
8.3.1	控制系统的时域分析	(207)
8.3.2	控制系统的频域分析	(211)
8.3.3	控制系统的稳定性分析	(213)
8.4	控制系统的校正	(216)
	习题	(218)
<b>附录 A</b>	<b>拉普拉斯变换</b>	<b>(219)</b>
一、	拉普拉斯变换	(219)
二、	拉普拉斯变换的基本定理	(221)
三、	拉普拉斯反变换	(223)
四、	拉普拉斯变换应用举例	(227)
<b>参考文献</b>		<b>(229)</b>

# 第1章 绪 论

## 1.1 控制工程概述

---

控制工程是一门新兴的技术学科，也是一门边缘学科，它以控制理论为理论基础，以有关自动控制和系统动力学的理论及其在工程中的应用为主要研究对象。目前，精密仪器和机械制造工业发展的一个明显而重要的趋势是越来越广泛而深刻地引入了控制论。例如，数控机床、工业机器人、电气液压伺服系统、动态测试等都需要用到控制工程的基础知识。21世纪的机械产品将是整体最佳为目标、以自动控制为核心的高性能、多功能的机电一体化产品。因此，控制理论不仅是一门极为重要的学科，而且也是科学方法论之一。

所谓自动控制，就是在没有人直接参与的情况下，使生产过程或被控对象的某些物理量准确地按照预期的规律变化。例如，在发电厂的生产过程中，要想使发电机不受负载变化和原动机转速波动的影响而正常供电，就必须保持其输出电压恒定；食品厂在生产熟食时，就必须按照加工要求严格控制烘炉的炉温；在机械加工的过程中，只有机床工作台和刀架的位置准确地跟随指令进给，才能加工出高精度的零件；轮船、飞机在航行中，要保证能按制定的航线行驶，就必须采取一定的措施使其运动轨迹满足要求而不受其他因素的干扰等。所有这些系统都有一个共同点，即它们都是一个或一些被控制的物理量按照给定量的变化而变化，给定量可以是具体的物理量，如电压、位移、角度等，也可以是数字量。如何使被控量按照给定量的变化规律而变化，是控制系统所要解决的基本问题。

根据控制理论的内容和发展的不同阶段，控制理论可分为“经典控制理论”和“现代控制理论”两大部分。

经典控制理论是一种单回路线性控制理论，只适用于单输入/单输出控制系统。主要研究对象是单变量常系数线性系统，系统数学模型简单，基本分析和综合方法是基于频率法和图解法。经典控制理论的研究对象、数学方法和计算手段与当时社会需要和技术水平密切相关。尽管如此，经典控制理论不仅推动了当时自动化技术的发展和普及，而且在今天许多工程和技术领域中仍然继续得到应用。

随着电子计算机、自动检测等技术的发展及工业生产要求的不断变化，经典控制理论在20世纪50年代末到60年代初得到了飞速发展，产生了现代控制理论。它的主要内容是以状态空间法为基础，研究多输入、多输出、变参数、非线性、高精度、高效能等控制系统的分析和设计问题。最优控制、最佳滤波、系统辨识、自适应控制等理论都是这一领域主要的研究内容。特别是近年来，由于计算机技术和现代应用数学的迅速发展，又使现代控制理论在大系统理论和人工智能控制等方面有了很大发展。

纵观控制工程理论的发展历程，它是与控制理论、计算机技术、现代应用数学等的发



展息息相关的。目前，控制理论正在与模糊数学、遗传算法、神经网络等学科的交叉渗透中不断向前发展着。

## 1.2 控制系统的结构

控制系统一般由控制器和被控对象两部分组成。其中被控对象是指系统中需要加以控制的机器、设备或生产过程；控制器是指能够对被控对象进行控制的设备的总体。控制系统的任务就是要使生产过程或生产设备中的某些物理量保持恒定，或者让它们按照一定的规律变化。为完成控制系统的分析和设计，首先必须对控制对象、控制系统结构有个明确的了解。一般，可将控制系统分为两种基本形式：开环控制系统和闭环（反馈）控制系统。

### 1.2.1 开环控制系统

若控制系统的输出端和输入端之间没有反馈回路，输出量对系统的控制作用没有影响，即在控制器和控制对象间只有正向控制作用的系统称为开环控制系统，如图 1.1 所示。

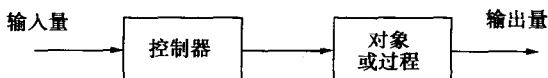


图 1.1 开环控制系统

图 1.2 所示为一人工控制的恒温箱控制系统。这是一个典型的开环控制系统。在这个控制系统中，恒温箱是被控对象，恒温箱内的温度是被控量，要求恒温箱内温度保持在允许的偏差范围内。首先根据箱内要求保持的温度值（即被控制量的给定值）调节调压器，使加热电阻丝发热，以达到预定的目的。但这是个不精确的控制系统，在干扰（如环境温度发生变化或者电源电压发生波动）作用下，恒温箱内的温度将偏离原标定值（给定值），一旦超过了允许的偏差，系统将无法纠正偏差。

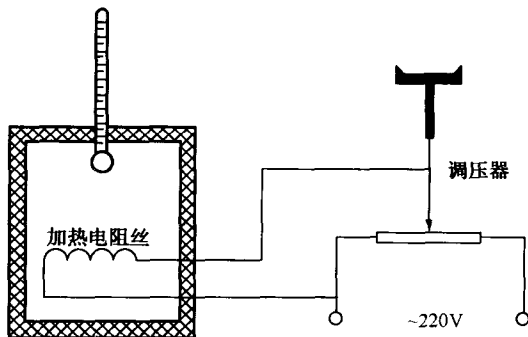


图 1.2 人工控制的恒温箱

图 1.3 所示为数控机床进给系统框图，没有反馈通道，因此是一个开环控制系统。

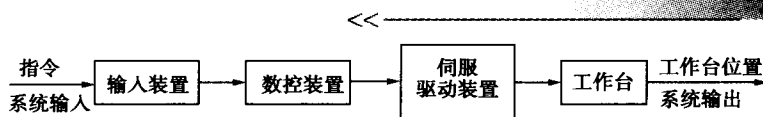


图 1.3 数控机床的开环控制系统

开环控制系统用一定输入量产生一定输出量，若由于某种干扰作用使输出量偏离原始值，它没有自动纠正偏差的能力。如果要进行补偿，必须再借助人工改变输入量。因此，开环控制系统的精度较低。但是如果组成系统的元件特性和参数值比较稳定，且外界干扰也比较小，则这种控制系统也可以保证一定的精度。开环控制系统最大的优点是系统简单，一般都能稳定可靠地工作，对于要求不高的系统可以采用。

## 1.2.2 闭环控制系统

若控制系统的输出端和输入端之间有反馈回路，输出量对系统的控制作用有直接影响，这种系统称为闭环控制系统。这里，闭环的作用就是应用反馈来减少偏差，因此，反馈控制系统必定是闭环系统。闭环控制系统在控制器和被控对象之间不仅存在正向作用，而且存在反向作用，将检测出来的输出量送回到系统的输入端，并与输入信号比较，称为反馈。因此，闭环控制又称为反馈控制，其结构如图 1.4 所示。图中， $\otimes$  表示比较元件，箭头表示作用的方向。在这样的结构下，系统的控制器和控制对象共同构成了前向通道，而反馈装置构成了系统的反馈通道。

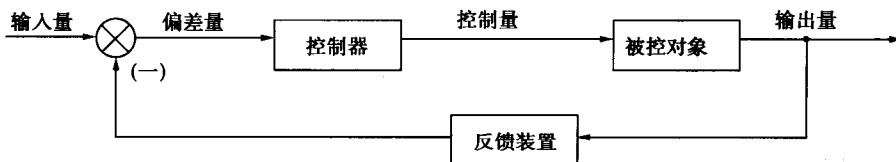


图 1.4 闭环控制系统

在控制系统中，反馈的概念非常重要。在图 1.4 中，如果将反馈环节取得的实际输出信号加以处理，并在输入信号中减去这样的反馈量，再将结果输入到控制器中去控制被控对象，称这样的反馈为负反馈；反之，若由输入量和反馈量相加作为控制器的输入，则称为正反馈。

在一个实际的控制系统中，具有正反馈形式的系统一般是不能改进系统性能的，而且容易使系统的性能变坏，因此不被采用。而具有负反馈形式的系统，它通过自动修正偏差量，使系统趋向于给定值，并抑制系统回路中存在的内扰和外扰的影响，最终达到自动控制的目的。通常反馈控制就是指负反馈控制。

与开环控制系统比较，闭环控制系统的最大特点是检测偏差，并纠正偏差，即检测偏差并用以消除偏差。从系统结构上看，闭环系统具有反向通道，即反馈；其次，从功能上看，由于反馈环节的存在，系统的控制精度提高，抑制扰动和由于器件的老化而引起的结构及参数的不稳定性增强，并可以较好地改善系统的动态性能。

当然，如果引入不适当的反馈，如正反馈，或者参数选择不恰当，不仅达不到改善系统性能的目的，而且会导致一个稳定的系统变为不稳定的系统。

在实际系统中，反馈控制系统的形式是多样的，但一般均可化为图 1.4 的形式。下面以恒温箱自动控制系统为例说明闭环控制系统的工作原理。

恒温箱自动控制系统如图 1.5 所示，系统的任务是克服外来干扰（电源电压波动、外部环境变化等），使恒温箱内的温度保持恒定。在这一自动控制系统中，恒温箱的温度是由电压信号  $u_1$  给定的，当外界条件引起箱内温度变化时，作为测量元件的热电偶把温度转换成对应的电压信号  $u_2$ ，并反馈回去与  $u_1$  相比较，所得结果即为温度偏差信号  $\Delta u = u_1 - u_2$ 。偏差信号经过电压、功率放大后，用以改变电动机的转速和转向，并通过传动装置拖动调压器的调节触头。当温度偏高时，动触头向着减小电流的方向运动；反之，加大电流，直到温度达到给定值为止。此时偏差信号  $\Delta u = 0$  时，电动机停止转动，控制调节过程结束，系统达到新的稳定状态。由于干扰因素是经常出现的，因而控制调节过程也是不断进行的。

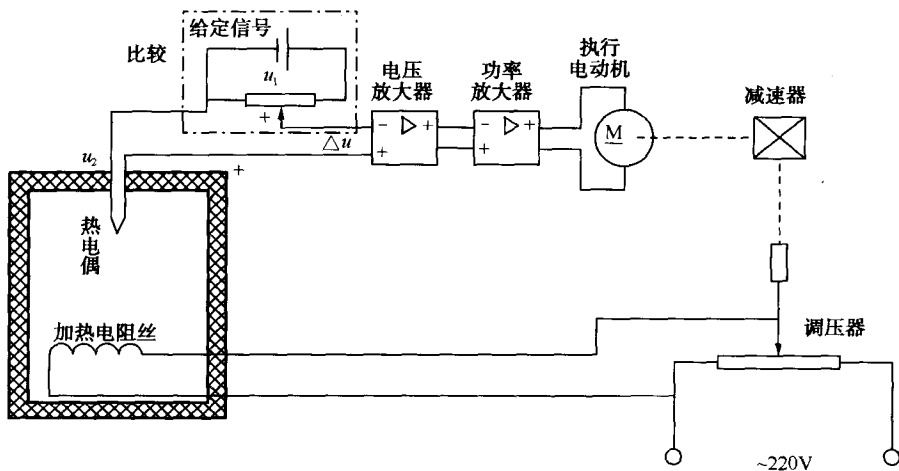


图 1.5 自动控制的恒温箱

从上述恒温箱工作过程的分析中可以看出，自动控制系统的点就是要先检测偏差，再用检测到的偏差去纠正偏差。因此，可以说，若没有偏差的存在，就没有控制调节过程。

在控制系统中，给定量即为系统的输入量，被控制量为系统的输出量。输出量的返回过程即为反馈，它表示输出量通过测量装置将信号的一部分或全部返回输入端，使之与输入量进行比较，比较产生的结果称为偏差。在自动控制系统中，偏差则是通过反馈，由控制器进行比较、计算产生的。因此，基于反馈基础上的“检测偏差用以纠正偏差”的原理又称为反馈控制原理；利用反馈控制原理组成的系统称为反馈控制系统。

恒温箱温度的自动控制系统可由图 1.6 所示的控制系统职能框图清晰形象地表示。从图中可以看到反馈作用的基本原理，各职能环节的作用是单向的，每个环节的输出都受到输入的控制。总之，实现自动控制的装置可以不同，但反馈控制的原理却是相同的，反馈控制是实现自动控制最基本的方法。

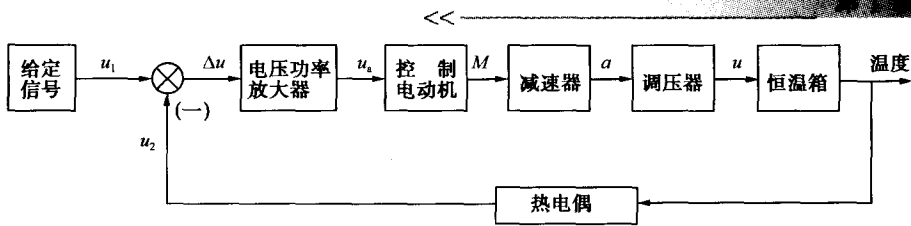


图 1.6 恒温箱温度自动控制系统职能框图

除上述的开环控制系统和闭环控制系统外，还有半闭环控制系统。如果控制系统的反馈信号不是直接从系统的输出端引出，而是间接地从中间的测量元件得到，如在数控机床的进给伺服系统中，若将位置检测装置安装在传动丝杠的端部，间接测量工作台的实际位移，则这种系统即为半闭环控制系统。

半闭环控制系统可以获得比开环控制系统更高的控制精度，但比闭环控制系统要低；与闭环控制系统相比，半闭环控制系统更易于实现系统的稳定。

### 1.2.3 反馈控制系统的组成

上述的闭环系统，只是闭环控制系统的基本组成形式，要想获得理想的控制效果，还必须增加其他有关元件。一个典型的反馈控制系统如图 1.7 所示，它应该包括给定元件、反馈元件、比较元件（或比较环节）、放大元件、执行元件及校正元件等。

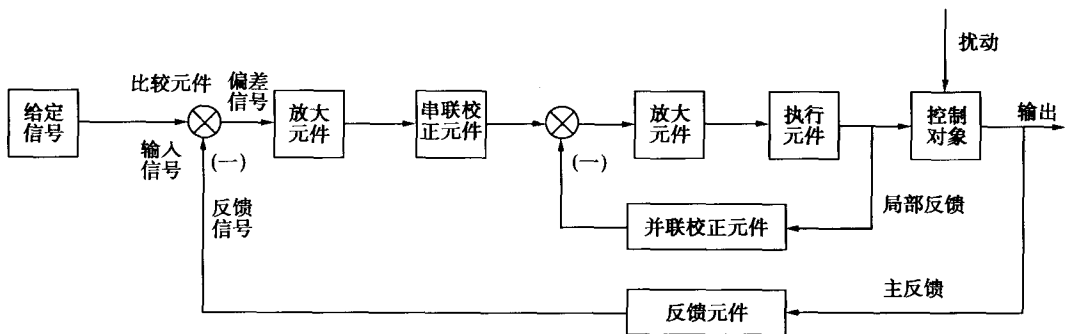


图 1.7 典型闭环控制系统职能方框图

#### 1. 给定元件

给定元件主要用于产生给定信号或输入信号，如调速系统中的给定电位计。

#### 2. 反馈元件

反馈元件用于测量被测量或输出量，产生反馈信号，该信号与输出量之间存在确定的函数关系。一般来说，为了传输方便，反馈信号多为电信号。因此，反馈元件通常是一些用电量来测量非电量的元件。例如，用热电偶将温度转换为电信号。

必须指出，在机械、液压、气动、机电、电机等系统中存在着内在反馈。这是一种没

有专设反馈元件的信息反馈，是系统内部各参数互相作用而产生的反馈信息流，如作用力与反作用力之间的直接反馈。内在反馈回路由系统动力学特性决定，它所构成的闭环系统是一个动力学系统。例如，机床工作台低速爬行等自激振荡现象，都是由具有内在反馈的闭环系统产生的。

### 3. 比较元件

比较元件用来比较输入信号与反馈信号之间的偏差，它可以是物理比较元件（如旋转变压器等），也可以是差接电路，所以又称为比较环节。

### 4. 放大元件

放大元件对偏差信号进行信号放大和功率放大的元件。如伺服功率放大器、电液伺服阀等。放大元件的输出一定要有足够的能量，才能驱动执行元件，实现控制功能。

### 5. 执行元件

执行元件直接对控制对象进行操作的元件，如执行电动机、液压马达等。

### 6. 控制对象

控制对象是控制系统要操纵的对象。它的输出量就是系统的被控量，如机床工作台等。

### 7. 校正元件

校正元件为保证控制质量，使系统具有良好的静、动态性能而加入系统的元件。校正元件又称为校正装置，有串联校正和并联校正两种形式。

除被控对象外，上述的给定元件、反馈元件、比较元件、放大元件、执行元件、校正元件等一起组成了控制系统的控制部分（控制装置）。因此，可以说控制系统是由控制部分和被控对象两大部分组成的。

## 1.3 控制系统的基本类型

控制系统种类繁多，为了研究方便，常按照它们的结构特征、输入信号特征、实现方式等将其进行分类。现以常见的分类方式为例进行介绍。

### 1.3.1 按输入信号的特征分类

#### 1. 恒值控制系统（镇定系统）

这类系统的输入量是一个不变化的恒值，系统的基本任务是排除各种干扰因素的影响，使被控制量（输出量）以一定精度保持希望值。工业生产中要求速度、压力、流量等数值恒定的控制系统都属此类控制系统。

#### 2. 伺服跟踪系统（随动系统）

这类系统的输入量是变化的，且不能预先确定的，当输入量发生变化时，要求输出量排除各种干扰因素的影响，快速、平稳地随之发生变化，准确地重现输入信号的变化规律。



机械加工中的仿形机床和武器装备中的火炮自动跟踪系统均为随动系统。

### 3. 程序控制系统

这类系统的输入量是预先确定的，系统预先将输入量的变化规律编制成程序，由该程序发出控制指令，并在输入装置中将控制指令转换成控制信号，经过控制系统的作用，使被控对象按照指令的要求动作。

#### 1.3.2 按控制器的实现方式分类

##### 1. 连续模拟式控制系统

连续模拟式控制系统中各部分的信号均为连续变化的模拟信号。离心调速器、液压伺服系统等大多数的闭环控制系统都属于此类。连续控制系统又可以分为线性系统和非线性系统两大类，其中能用线性微分方程描述的系统称为线性系统；不能用线性微分方程描述、存在非线性部件的即为非线性系统。

##### 2. 离散数字式控制系统

离散数字式控制系统中的信号成分一般比较复杂，包含有各种信号形式：连续模拟信号、离散信号、数字信号等，并进行数字信号间的转换，但起直接控制作用的一定是数字信号。

#### 1.3.3 按有无误差分类

闭环控制系统是按偏差进行调节的，系统的被控量若因干扰因素的影响，偏离了稳态值，产生了误差，系统通过检测偏差，进而纠正偏差的动态调节过程再次达到稳定状态。因此，闭环控制系统按照稳定后被控量与期望值相比有无误差，可分为以下两种形式。

##### 1. 无差系统

若控制系统通过动态调节达到稳定后，被控量能恢复原值，即被控量与期望值一致，误差为零，则称这种系统为无差系统。

##### 2. 有差系统

若经过调节过程，被控量接近但不能恢复原值，即被控量与期望值之间存在误差，则称这种系统为有差系统。能否消除偏差，取决于闭环控制系统的结构和参数。

此外，控制系统还有其他多种分类方式。按控制方式分类，可分为开环系统、闭环系统和半闭环系统；按稳定性分类，可分为稳定系统和不稳定系统；按系统的数学描述分类，可分为线性系统和非线性系统；按系统部件的物理属性分类，可分为机械、电气、机电、液压、气动等控制系统。

## 1.4 对控制系统的基本要求

不同的控制系统，由于其工作场合及要完成的任务等方面的差异，其性能指标也各不

