

中等专业学校教材

计算机控制技术

林 东 编

哈尔滨工业大学出版社

计 算 机 控 制 技 术

(修 订 本)

林 东 编

哈 尔 滨 工 业 大 学 出 版 社

内 容 简 介

本书以讲授计算机(微型机)控制技术为主,适当地介绍自动控制理论的基础知识及常用的自动控制元件,内容包括:自动控制系统的基本概念;传感器与执行元件;控制系统的数学模型;控制系统的分析方法;现代控制论简介;计算机控制的理论基础;计算机滤波与控制算法;计算机控制系统及其应用举例。

本书可作为中等专业学校“计算机及应用”和“自动控制”专业的教材,亦可供其他有关专业师生及从事自动控制的工程技术人员参考。

35172/69

计算机控制技术

Jisuanji Kongzhi Jishu

林 东 编

*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

肇 东 粮 食 印 刷 厂 印 刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 18.25 字数 420 千字

1995 年 10 月第 2 版 1998 年 4 月第 3 次印刷

印数 15 001—20 000

ISBN 7-5603-0239-4/TP·17 定价 16.80 元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的有关七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建设，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

机械电子工业部电子类教材办公室

前言

本教材系按机械电子工业部的工科电子类专业教材1986~1990年编审出版规划,由中专电子类教材编审委员会计算机专业教材编审小组征稿,推荐出版,责任编委为常州无线电工业学校凌林海。

本教材由福建电子工业学校林东编写,上海第二工业大学陈益康教授担任主审。

本教材是针对中等专业学校计算机专业的学生或技术人员,以扩展其在控制和测试领域中应用为目的而编写的,内容包括经典控制理论、现代控制论和计算机控制技术三部分,共九章。其中第一、三、四章介绍经典控制理论的基本部分,主要阐述自动控制系统的基本概念,讨论系统的数学模型和时域、频域分析方法;第五章简介现代控制理论的基础知识;第六~九章以计算机控制部分为重点内容,主要介绍作为计算机控制理论基础的离散控制系统的有关概念和基础知识,讨论计算机滤波与控制算法,介绍计算机(主要是微型机)控制系统的组成、设计方法和应用举例;此外,为了方便系统的组成,第二章和附录还介绍了一些常用的自动控制元件及工业控制机的功能模块和常用的通道芯片。为满足中专教学需要,本教材力求文字上通俗易懂,内容构成上适当拓宽知识面,阐述中注重物理概念,避免繁琐的数学推导,使必要的控制理论基础叙述得深入浅出,有关概念交待得清楚。除第九章外,每章末均附有习题,可用于巩固课堂知识。在确保常规控制内容的前提下,引用了较多的先进控制策略和系统,以充分展示出计算机用于控制和测试的威力,而且应用方法和应用实例占有相当大的篇幅,并含有很多工程实用数据,可供工程参考。本课程的参考学时数为60~80学时,其中打“*” (约20学时)者可作为选讲内容。

本教材在编写过程中,得到了陈益康教授的具体指导和北京无线电工业学校曾玉昆、上海电子技术学校周岳山及兄弟学校许多同志的支持和帮助,在此表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 自动控制系统的基本概念	(1)
§ 1-1 自动控制和自动控制系统	(1)
一、自动控制	(1)
二、开环控制系统	(1)
三、闭环控制系统	(2)
§ 1-2 自动控制系统的分类与组成	(4)
一、自动控制系统的分类	(4)
二、自动控制系统的组成	(4)
习题	(5)
第二章 传感器与执行元件	(7)
§ 2-1 引言	(7)
§ 2-2 常用传感器举例	(8)
一、运动和力的传感器	(8)
二、流体传感器	(11)
三、温度传感器	(15)
§ 2-3 执行电机举例	(17)
一、直流电动机	(17)
二、交流伺服电动机	(17)
三、直流力矩电动机	(18)
四、步进电动机	(19)
习题	(21)
第三章 控制系统的数学模型	(22)
§ 3-1 引言	(22)
§ 3-2 控制系统数学模型的建立	(23)
§ 3-3 传递函数	(29)
一、拉普拉斯变换	(29)
二、传递函数定义	(32)
三、控制系统的典型环节及其传递函数	(32)
§ 3-4 方块图	(35)

一、方块图	(35)
二、方块图的性质	(35)
三、方块图的变换和简化	(36)
§ 3-5 系统的相似与模拟	(38)
一、机械平移系统	(38)
二、RLC 电路系统	(39)
三、系统的相似与模拟	(40)
习题	(40)
第四章 控制系统的分析方法	(43)
§ 4-1 引言	(43)
§ 4-2 系统的时域分析	(46)
§ 4-2-1 一阶系统	(46)
一、一阶系统的数学模型	(47)
二、一阶系统的单位阶跃响应	(47)
三、一阶系统的单位斜坡响应	(47)
四、一阶系统的单位脉冲响应	(48)
§ 4-2-2 二阶系统	(48)
一、二阶系统的数学模型	(48)
二、二阶系统的单位阶跃响应	(49)
三、二阶系统暂态性能指标计算	(51)
四、二阶系统的单位斜坡响应	(55)
五、二阶系统的单位脉冲响应	(55)
§ 4-2-3 高阶系统的暂态响应与系统的稳定性	(56)
一、高阶系统的暂态响应	(56)
二、系统的稳定性与稳定条件	(57)
三、高阶系统的近似分析	(58)
*§ 4-2-4 稳态误差	(58)
一、稳态误差	(58)
二、给定输入的稳态误差	(59)
三、扰动输入的稳态误差	(61)
§ 4-3 频率响应法	(62)
§ 4-3-1 频率特性	(62)
一、频率特性	(62)
二、频率特性的图示方法	(64)
三、典型环节的频率特性	(67)
四、系统开环伯德图的绘制	(70)
§ 4-3-2 奈奎斯特稳定判据	(71)
一、奈奎斯特(对数频率)稳定判据	(72)

二、相位裕量和增益裕量	(72)
*§ 4-3-3 频域性能指标分析	(74)
一、闭环频率特性	(74)
二、频域性能指标	(75)
§ 4-4 控制系统的校正	(76)
一、串联校正和并联校正	(77)
二、PID 控制规律	(77)
三、校正装置	(81)
*§ 4-5 系统品质的计算机分析	(84)
一、用数字计算机分析系统的稳定性	(84)
二、用数字计算机分析系统的时域性能指标	(86)
习题	(86)
第五章 现代控制理论简介	(89)
§ 5-1 状态变量与状态方程	(89)
一、状态与状态变量	(89)
二、状态方程	(89)
三、状态方程的矩阵表示	(90)
四、状态变量的非唯一性和状态变换	(91)
§ 5-2 状态空间分析法	(92)
§ 5-2-1 状态方程的建立	(93)
一、由原始运动方程列写状态方程	(93)
*二、由高阶微分方程列写状态方程	(94)
*§ 5-2-2 状态方程的求解	(100)
一、齐次状态方程的解	(100)
二、非齐次状态方程的解	(104)
*§ 5-3 线性系统的能控性和能观性	(107)
一、能控性	(107)
二、能观性	(109)
§ 5-4 最优控制介绍	(111)
§ 5-4-1 基本概念	(111)
§ 5-4-2 最优控制问题的数学表示	(114)
*§ 5-4-3 最优控制举例	(115)
一、应用极大值原理求解最优控制问题	(115)
二、应用动态规划法求解最优控制问题	(117)
习题	(119)
第六章 计算机控制的理论基础	(121)
§ 6-1 离散系统的基本概念	(121)
一、采样过程及离散信号的数学描述	(121)

二、信号复现及零阶保持器的数学描述	(122)
三、A/D 与 D/A 的数学描述	(123)
四、采样定理	(124)
§ 6-2 Z 交换	(124)
一、Z 变换的定义	(124)
二、Z 变换的求法	(125)
三、Z 变换的基本定理	(128)
四、Z 反变换	(130)
§ 6-3 离散系统的数学描述	(133)
一、差分方程	(133)
二、脉冲传递函数	(135)
三、闭环脉冲传递函数	(139)
习题	(141)
第七章 计算机滤波与控制算法	(143)
§ 7-1 开环数值控制算法	(143)
一、数值控制基本原理	(143)
二、逐点比较法	(144)
§ 7-2 数字 PID 控制算法	(149)
一、数字 PID 算式	(150)
二、PID 参数的整定	(151)
三、串级控制	(153)
四、前馈控制	(154)
§ 7-3 数字滤波器算法	(157)
一、冲激不变法	(157)
二、双线性变换法	(161)
§ 7-4 直接数字设计方法	(162)
一、参数最优化的低阶控制算法	(163)
二、最少拍系统设计	(165)
三、达林 Dahlim 算法	(168)
§ 7-5 预测控制算法	(170)
一、模型算法控制	(170)
二、外推数字预测算法	(173)
习题	(177)
第八章 计算机控制系统	(178)
§ 8-1 计算机控制系统的组成	(178)
一、计算机控制系统的典型应用方式	(178)
二、实时、在线概念	(180)
三、计算机实时控制系统的一般组成	(181)

§ 8-2 计算机控制系统的基本要求和结构特点	(183)
一、基本要求	(183)
二、硬件结构特点	(184)
三、软件设计特点	(185)
§ 8-3 计算机控制系统的设计	(186)
§ 8-3-1 微机控制系统设计的一般步骤	(186)
§ 8-3-2 硬件接口设计	(189)
一、系统总线负载的考虑	(189)
二、输入输出通道设计	(191)
*三、过程通道的抗干扰措施	(198)
§ 8-3-3 控制系统应用程序设计	(201)
一、什么是好的程序	(201)
二、结构程序设计	(202)
*三、控制程序的结构举例	(203)
§ 8-3-4 系统的调试与运行	(207)
一、硬件调试	(208)
二、软件调试	(208)
三、系统模拟	(209)
四、系统的运行与维护	(210)
*§ 8-4 计算机控制系统的研制工具	(210)
一、问题的提出	(210)
二、开发系统的组成与功能	(211)
三、开发系统举例	(212)
习题	(214)
第九章 计算机控制系统应用举例	(215)
*§ 9-1 线切割机的微机控制系统	(215)
一、线切割机的微机控制系统组成原理	(215)
二、微机控制台	(215)
§ 9-2 数据采集系统	(218)
一、64 路数据采集系统	(218)
二、数字滤波和标度变换	(224)
三、显示和打印数据的处理	(228)
§ 9-3 微机过程控制系统	(230)
一、合成氨工艺分析与控制方案	(230)
二、合成氨微机控制系统的组成	(233)
三、PID 调节软件	(238)
四、问题讨论	(242)
*§ 9-4 智能仪器、工业机器人、智能机器人简介	(244)

一、智能仪器	(244)
二、从工业机器人到智能机器人	(246)
实验指导	(249)
实验一：系统动态性能的时域测试	(249)
实验二：二阶系统频率特性的测试	(252)
实验三：自动控制系统的校正	(255)
实验四：控制系统品质的计算机分析	(256)
附录	(259)
附录 I 自动控制元件	(259)
一、自整角机	(259)
二、旋转变压器	(260)
三、感应同步器	(261)
四、光电传感器	(262)
五、应变传感器	(266)
附录 II 工业控制机功能模块介绍	(268)
附录 III 输入输出通道集成电路芯片	(271)
一、多路转换器	(271)
二、采样保持器	(273)
三、A/D 转换器	(274)
四、D/A 转换器	(278)
参考文献	(280)

第一章 自动控制系统的基本概念

随着生产和科学技术的发展,自动控制技术近几十年来得到了迅速发展,并广泛地应用于工农业生产、交通运输、国防建设和宇宙航行等领域。自动控制原理是研究自动控制技术的基础理论和自动控制共同规律的技术科学。根据自动控制技术发展的阶段不同,自动控制原理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(又称古典控制理论)以单变量系统为主要对象,用频域法分析和综合这类控制系统的动态特性。现代控制理论的对象不限于单输入-单输出系统,它以时域法为主要分析方法,研究的基本内容是系统辨识、最优估计、最优控制及自适应控制等。随着科学技术的进步和人们认识能力的提高,经典控制理论和现代控制理论的内容和方法已开始互相渗透。就现代控制理论的发展来看,它一开始就与计算机技术息息相关,因此这种渗透现象已使整个控制理论与计算机技术紧密联系起来。控制理论和计算机技术的结合在不同领域引起了一系列的变革,到处都可见到这种结合产生的硕果。其发展前景十分可观。可以认为,计算机控制理论和技术集中地体现了这两者的结合。

因此,本书首先从自动控制理论入手,介绍有关经典控制理论和现代控制理论的基础知识,然后讨论、研究计算机(主要是微型机)实时控制领域中的基本问题。

本章主要论述自动控制系统的一些基本概念,以便为后面几章的进一步学习奠定基础。

§ 1-1 自动控制和自动控制系统

一、自动控制

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对象自动地按照预定的规律运行或变化。而能够对被控制对象的工作状态进行自动控制的整个系统称为自动控制系统。它一般由被控制对象(简称控制对象或对象)和控制装置组成。

控制对象,是指要求实现自动控制的机器、设备和过程。例如导弹、飞船、加热炉、机床以及化工过程等。

控制装置,是指对被控对象起控制作用的设备的总体。

自动控制系统可以按照多种方式组成,但总的归纳起来有两种,即开环控制系统和闭环控制系统。

二、开环控制系统

图 1-1 所示电阻丝加热炉的炉温控制就是一个开环控制系统。

这里炉子是控制对象，炉温 T 是要求实现自动控制的物理量，称为被控量（或称输出量）；调压变压器作为控制器，转动调压器的滑动臂 K ，可以改变加在电阻丝两端的电压 V_i ，从而调节炉温 T 。对应于滑动臂 K 的每一个位置，都有相应的不同炉温。若滑动臂 K 的位置作为控制输入量，那么给定一个输入量，系统便有相应的输出（炉温）。所以系统的输出又叫做系统对输入的响应，它是时间的函数（时间响应）。

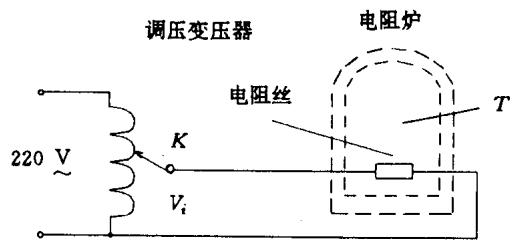


图 1-1 电阻丝加热炉炉温控制

当工作条件变化时，例如炉门开闭次数变化、外界环境温度变化、电源电压波动，都会使被控量（炉温）不能保持在预定的（或希望的）值上。这些使控制量偏离希望值的作用，称为扰动（或干扰）作用。

一般来说，控制系统要受到两种作用，即有用信号的作用和扰动作用，它们都称为系统的输入信号。系统的有用输入信号，使系统具有预定的（或希望的）输出，称为控制输入或给定输入；而扰动作用信号干扰和破坏系统具有预定的输出，称为扰动输入。扰动输入可以作用于系统中的任意部位。自动控制就是为了达到一定目的，保证系统尽量不受扰动的影响，使输出具有给定输入指定的数值。

为了清楚地说明系统的信号传递关系，常用方框图来表示系统。图 1-2 即为图 1-1 系统的方框图。图中每个方框都对应表示系统的一个组成部分，称为元件。每个方框的输入就是输入至该元件的作用量，方框的输出则为该元件受到输入信号作用后的响应。

在图 1-2 中，作用信号是单方向传递的，这种输出对输入没有反作用的控制系统，称为开环控制系统。



图 1-2 开环控制系统方框图

开环控制系统装置简单，成本低，但控制精度也低，抗干扰性能差。

三、闭环控制系统

为了改善开环控制的精度，需要根据系统的实际输出修正输入，以使输出有准确的值。

例如，上述炉温调节，为了使炉温准确，需要在电阻炉上安装温度检测元件（比如热电偶）来测量炉温，并将炉温 T 转变成相应的电信号（毫伏级），再由温度指示仪显示对应的温度值。通过人工对温度指示仪的监视，根据实际炉温与希望炉温的偏差值，及时修正调压器滑动臂 K 的位置，以调节控制电压，克服各种扰动，使炉温靠近希望值，如图 1-3 所示，这时输出信号通过人工控制反过来影响控制输入信号，这就构成了输出信号的反馈（负反馈）。形成了一个人工闭环控制系统。

在自动控制系统中,上述人工操作全部用自动控制装置来代替。例如图 1-4 所示,炉温通过热电偶转换成电输出信号,和对应于希望值的给定电信号 V_{ab} 进行比较,得到一个偏差信号 e ,经电压和功率放大后驱动电动机去调节调压器的滑动臂 K ,使炉温维持在希望值。

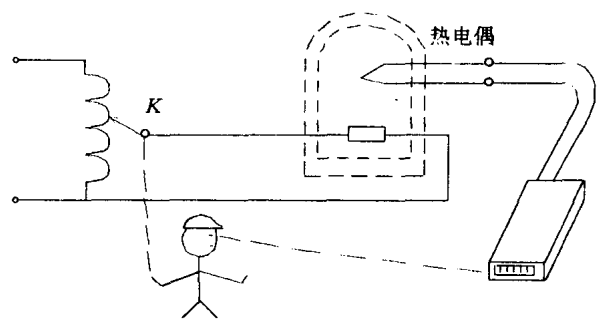


图 1-3 炉温人工闭环控制系统示意图

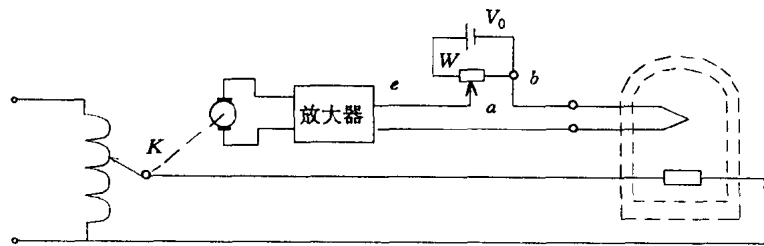


图 1-4 炉温自动闭环控制系统示意图

比较图 1-1 和 1-4 发现,闭环控制系统与开环控制系统的最大差别在于,闭环控制系统存在一条从被控制量经检测元件到输入端的通道,称为反馈通道。图 1-4 系统可以用图 1-5 的方框图来表示。图中“ $\otimes$ ”表示比较器(或称比较环节),输入信号与反馈信号在此进行比较,其差值输出即为偏差信号 e 。

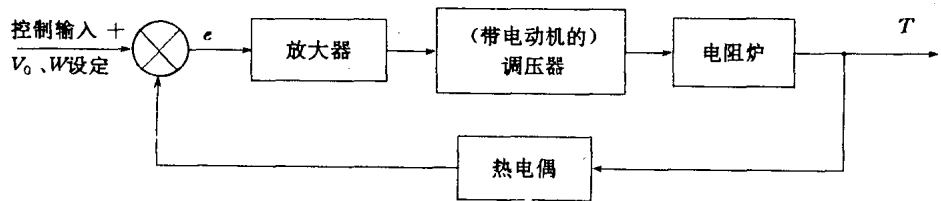


图 1-5 炉温自动闭环控制系统方框图

综上所述,闭环控制系统是一种反馈控制系统。它下面三个机能:(1) 测量被控制量;(2) 将测定的被控制量的值和给定的希望值进行比较(代数运算);(3) 根据比较的结果(偏差 e)对被控制量进行修正,它的特征是:作用信号按闭环传递,系统的输出对控制作用有直接影响。

采用负反馈的闭环控制系统,不论造成偏差的因素是外来的扰动还是内部参数的变化。控制作用总是使偏差趋向下降,即所谓“检测偏差,纠正偏差”,因而具有自动修正被控制量偏离的能力,控制精度较高,并使系统元件参数变化或非线性的影响大大降低。

但是,实际系统一般都具有质量、惯性或延滞,是一个动态系统,因此采用了负反馈后,系统可能产生振荡,故调试比较复杂。

§ 1-2 自动控制系统的分类与组成

一、自动控制系统的分类

上节曾按信号传递路径把控制系统分为开环系统与闭环系统。为了研究方便，常常还将反馈控制系统按照一定的原则分成各种类型。

通常系统的输入作用有两类，给定输入和扰动输入，如果按照输入作用的变化情况，可以将反馈控制系统分成定值控制系统和随动系统两大类。

1. 定值控制系统

在这类系统中，给定输入为常值，或随时间缓慢地变化，但由于扰动的存在，将使被控制量偏离希望值。系统的基本任务是根据偏差产生控制，以保证在任何扰动作用下使输出保持恒定的希望的数值，所以称之为定值控制系统或自动镇定系统。恒温、恒压、恒速、恒定水位、恒定电压、恒定电流、恒定频率等自动控制系统都属于这一类。

2. 随动系统

这类系统又分为两类，其中一类称为自动跟踪系统，给定输入是一预先未知的随时间任意变化的函数，系统的任务是在各种情况下，保证被控制量（即输出）以一定精度跟随着给定输入的变化而变化。运动目标的跟踪、瞄准和拦截系统以及自动测量仪器系统等均属于这一类。

还有一类称为程序控制系统，给定输入是一个已知的时间函数，系统的任务是使被控制量（即输出）按一定精度跟随输入而变化。在很多机械加工工业和化学、食品工业的过程控制中，广泛应用程序控制系统。仿形控制系统、机床数控加工系统、加热炉自动温度控制系统等都属于这一类。

如果考虑控制对象的情况，常把输出量是温度、流量、压力和液面等生产过程参数的自动控制系统称为过程控制系统。因为这种系统的控制对象往往是整个生产过程或其中一些装置。

反馈控制系统还有其他的分类方法。例如根据系统的输入和输出信号的数量，分为单输入单输出系统和多输入多输出系统；根据系统中是否包含非线性元件而分为线性系统和非线性系统；根据控制作用和时间关系，分为连续系统和离散系统；以及根据控制系统的结构参数在工作过程中是否恒定不变，而分为定常系统和时变系统等等。现代科学和生产的发展，对控制技术的要求愈来愈高，因而出现了许多新的、更加复杂、性能更好的自动控制系统。例如，使用计算机完成控制或处理数据的计算控制系统；按某方面要求实现性能最优的最优化控制系统；能不断改变自身结构和参数以适应环境和内部参数变化的自适应系统；以及具有判别、积累经验和学习能力的自学习系统等等。

二、自动控制系统的组成

尽管各种控制系统不同，复杂程度各异，但一般总是由控制对象和控制装置所组成。根据不同控制系统的性能要求，控制装置一般包含下列基本元件：

1. 检测元件：用于测量被控制量的实际值，如图 1-4 中的热电偶。
2. 整定元件：用于给定被控制量希望值所对应的控制输入信号，也叫给定元件。图 1-4 中的电源 V_0 和电位器 W 均起这个作用，端电压 V_{ab} 就是对应于被控制量炉温希望值的给定输入，这个值叫做控制量的整定值（或给定值，期望值等）。
3. 比较元件：用于对被控制量的给定值和测量值进行比较综合（代数运算），产生偏差（或称误差）信号 e 。比较元件在多数控制系统中常和检测元件或线路结合在一起，如图 1-4 中，因为热电偶作为检测元件得到的是由温度转换来的直流毫伏信号，与直流电压 V_{ab} 只要反向连接就形成偏差电压 e ，所以不需要专门的比较元件。在有些情况下，常用差动放大器或机械差动元件及电桥等作为比较元件。
4. 放大元件：用于偏差放大，使误差信号具有一定功率，如图 1-4 中的电压和功率放大器。
5. 执行元件：用于直接推动控制对象，以改变被控制量，如图 1-4 中的带电机的调压器。
6. 校正元件：其参数和结构便于调整，用于改善系统的性能。最简单的校正元件可以是一个电阻电容网络，复杂的可以是计算机。

当然，在实际系统中，不一定每一个控制装置都具备上述元件，例如图 1-4 中就没有校正元件，而且同一个元件或部件有时也可以兼备几种职能。通常还把自动控制系统中的放大元件、执行元件、校正元件等合称为控制器，于是典型闭环控制系统的方框图可以描述成如图 1-6 所示。

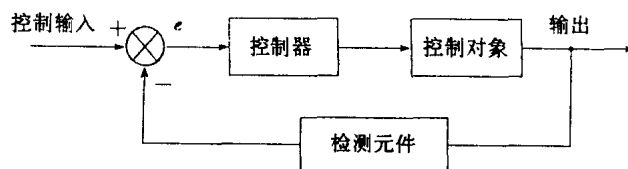


图 1-6 典型闭环控制系统方框图

习 题

- 1-1 试举开环与闭环控制系统的例子，画出它们的方框图，并说明它们的工作原理。
- 1-2 比较开环与闭环系统的结构特点，并说明其优缺点。
- 1-3 图 1-7 是液位自动控制系统原理示意图，在任何情况下都希望液面高度 c 维持不变，试说明系统是怎样实现负反馈控制的？
- 1-4 试说明图 1-8 所示自动温度控制系统的工作原理，它属于哪种类型（ a 点位置可以上下改变，是可动触点）？

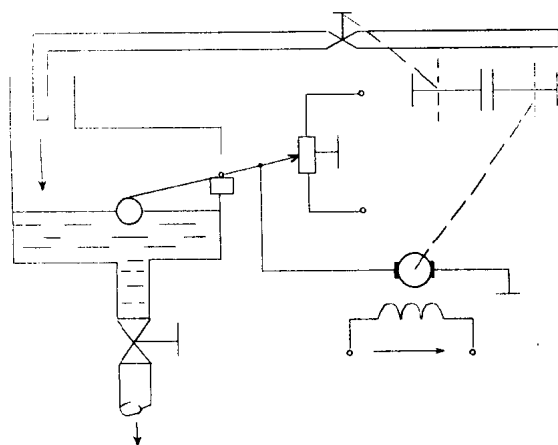


图 1-7 液位自动控制系统示意图

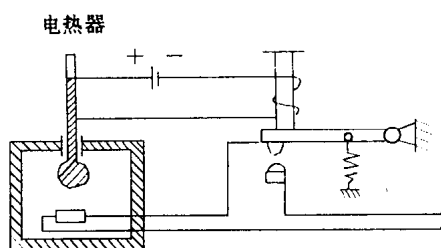


图 1-8 自动温度控制系统示意图