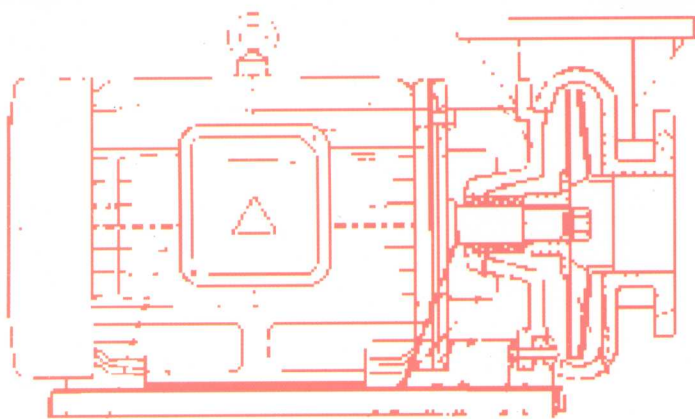


教育部人才培养模式改革和开放教育试点教材

机电控制工程基础

机械设计制造及其自动化专业系列教材

李建勇 主编



中央广播电视大学出版社

教育部人才培养模式改革和开放教育试点教材
机械设计制造及其自动化专业系列教材

机电控制工程基础

李建勇 主编

中央广播电视大学出版社

北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

机电控制工程基础 / 李建勇主编. —北京: 中央广播电视大学出版社, 2008. 6

教育部人才培养模式改革和开放教育试点教材. 机械设计制造及其自动化专业系列教材

ISBN 978 - 7 - 304 - 04095 - 6

I. 机… II. 李… III. 机电一体化—控制系统—
电视大学—教材 IV. TH - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 086067 号

版权所有, 翻印必究。

教育部人才培养模式改革和开放教育试点教材
机械设计制造及其自动化专业系列教材

机电控制工程基础

李建勇 主编

出版·发行: 中央广播电视大学出版社

电话: 发行部 010 - 58840200

总编室 010 - 68182524

网址: <http://www.crtvup.com.cn>

地址: 北京市海淀区西四环中路 45 号 邮编: 100039

经销: 新华书店北京发行所

策划编辑: 何勇军

版式设计: 张丽萍

责任编辑: 闫海新

责任校对: 陈玉玲

责任印制: 赵联生

印刷: 北京集惠印刷有限责任公司

印数: 0001~5000

版本: 2008 年 6 月第 1 版

2008 年 6 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 14.5 字数: 321 千字

书号: ISBN 978 - 7 - 304 - 04095 - 6

定价: 20.00 元

(如有缺页或倒装, 本社负责退换)

内容简介

本教材是在总结近年来教学实践经验并借鉴同类优秀教材的基础上，根据中央广播电视大学机械设计制造及其自动化专业“机电控制工程”教学大纲编写而成的。

本书较全面、系统地阐述了经典控制理论的基本概念、基本原理和自动控制系统的主要分析方法，主要内容包括：线性连续定常系统数学模型的建立，分析系统的时域法、根轨迹法和频率法，线性系统的校正和综合等问题，并在附录中介绍了拉氏变换等基础知识，各章均附有适当的习题。

本书可作为普通高等学校机电类专业的本科教材，也可作为成人教育和继续教育的教材，还可作为科技人员的参考书。

前 言

自动控制技术作为一种技术手段已广泛地应用于工农业生产、交通运输和国防建设等领域。指导自动控制系统分析和设计的控制理论也有了很大的发展。在 20 世纪 40 年代和 50 年代中发展起来的经典控制理论至今仍被成功地应用于单变量定常系统的分析和设计。为了适应广播电视大学机电类本科生教学的需要,根据相应的教学大纲和学时安排,遵循“必需”、“够用”的原则,选取了经典控制理论的基础部分作为主要内容,编写了本教材。

本书共安排 6 章内容:

第 1 章介绍了自动控制系统的基本概念,重点讨论了反馈控制系统的工作原理和组成,并初步介绍了控制系统的性能指标。

第 2 章介绍了自动控制系统的数学模型,包括微分方程、传递函数及图形化的数学模型——系统动态结构图,并介绍了利用结构图的等效变换来确定系统传递函数的方法。

第 3 章介绍了自动控制系统的时域分析,重点讨论了一阶系统、二阶系统的分析和计算,系统稳定性分析(劳斯判据),稳态误差的分析与计算。

第 4 章介绍了根轨迹法,包括根轨迹方程与根轨迹的绘制法则及利用根轨迹对系统的性能进行分析的方法。

第 5 章介绍了频率响应法,包括频率特性及其图示方法和物理意义,频域稳定判据及开、闭环频率特性与系统性能的关系。

第 6 章介绍了控制系统的校正与综合,主要有常用校正方案、根

轨迹校正法和频率校正法等。

本书可作为普通高等学校机电类专业的本科教材，也可作为成人教育和继续教育的教材，还可作为科技人员的参考书。

本书由北京交通大学的李建勇教授主编，参加编写的有北京交通大学的吴斌副教授、李长春副教授。李建勇教授和李长春副教授完成了第1章至第5章大部分初稿的编写；吴斌副教授完成了第6章和附录内容的编写，并对第1章至第5章内容按教学大纲的要求进行了修改。

本书在编写中参考了很多同类优秀教材，在此表示感谢。

由于时间仓促和水平有限，错误和不妥之处在所难免，恳请各位读者批评指正。

目 录

1 自动控制系统的基本概念	(1)
1.1 概 述	(1)
1.2 自动控制系统的基本环节及表达式	(7)
1.3 自动控制系统的分类	(9)
1.4 自动控制系统的基本要求	(15)
习 题	(18)
2 自动控制系统的数学模型	(20)
2.1 控制系统微分方程的建立	(20)
2.2 非线性数学模型的线性化	(23)
2.3 传递函数	(26)
2.4 系统动态结构图	(33)
习 题	(45)
3 自动控制系统的时域分析	(48)
3.1 自动控制系统的时域分析基础	(48)
3.2 一阶系统的阶跃响应	(52)
3.3 二阶系统的阶跃响应	(53)
3.4 高阶系统的阶跃响应	(65)
3.5 控制系统的稳定性分析	(67)
3.6 控制系统的误差分析	(74)
习 题	(89)
4 根 轨 迹 法	(93)
4.1 根轨迹的基本概念	(93)
4.2 根轨迹的绘制法则	(97)

4.3	典型系统的根轨迹	(103)
4.4	广义根轨迹	(109)
4.5	用根轨迹法分析系统的动态特性	(113)
	习 题	(119)
5	频率响应法	(121)
5.1	频率特性的基本概念	(122)
5.2	典型环节的频率特性	(128)
5.3	系统的开环频率特性	(137)
5.4	用频率特性分析系统的稳定性	(142)
5.5	频率特性分析	(153)
	习 题	(159)
6	控制系统的校正与综合	(164)
6.1	概 述	(164)
6.2	串联校正	(165)
6.3	基于频率法的串联校正	(174)
6.4	基于根轨迹法的串联校正	(181)
6.5	反馈校正	(185)
6.6	前馈校正	(188)
6.7	系统设计中常遇到的一些问题	(189)
	习 题	(191)
	机电控制工程基础实验指导	(192)
	实验1 典型环节的模拟研究	(192)
	实验2 动态系统的时域分析	(199)
	实验3 动态系统的数值模拟	(205)
	实验4 动态系统的频率特性研究	(205)
	实验5 动态系统的校正研究	(207)
	附录1 XMN-2型自动控制原理学习机系统使用手册	(210)
	附录2 拉普拉斯变换及反变换	(215)
	附录3 常见的无源及有源校正网络	(219)
	参考文献	(222)

1 自动控制系统的基本概念

【学习内容】

本章首先介绍了自动控制系统的两种基本方式，即开环控制系统和闭环控制系统，并分析了两者的特点：开环系统具有结构简单、稳定性好、抗干扰能力差的特点；闭环系统具有反馈环节稳定性差、抗干扰能力强的特点。然后，介绍了反馈控制系统的组成环节和系统的作用量：一般的自动控制系统由给定环节、比较环节、放大环节、被控对象、检测与反馈环节组成，性能要求较高的系统还具有校正环节；系统作用量包括给定量、输出量、反馈量和扰动量。最后，介绍了自动控制系统的性能评价指标，主要有3个：稳定性、快速性、准确性。

【学习目标】

熟练掌握：开环系统与闭环系统的基本知识，闭环控制系统的基本概念。

掌握：自动控制系统性能指标的基本概念。

了解：相关的工程实例。

1.1 概 述

在工业、农业、国防和科学技术实现现代化的过程中，自动控制起着重要作用。除了在宇宙航行、导弹制导、飞机和舰艇的驾驶、雷达以及火炮瞄准等国防尖端技术中具有特殊的重要作用之外，自动控制还在国民经济各个领域得到了广泛的应用。例如，切削加工的自动控制，发电站电压和频率的自动控制，在生产过程中对温度、压力、流量、电流、电压、位置、速度和加速度的自动控制，交通运输的自动控制，以及工程机械、工业机器人和智能机器人的自动控制等，都广泛地应用着自动控制装置。随着生产和科学技术的发展，自动控制技术所起的作用越来越重要，自动化的水平也越来越高。

1.1.1 自动控制的基本概念

自动控制：它是相对于人工控制而言的，就是在没有人直接参与的情况下，利用控制装置使生产过程或被控对象的某一物理量(输出量)准确地按照给定的规律(输入量)运行或变化。因此，如何使输出量(或被控量)按照给定的变化规律而变化，这就是自动控制工程和理论所要解决的基本问题。

自动控制系统：是指能够对被控制对象的工作状态进行自动控制的系统，一般由控制装置和被控制对象组成。被控制对象(简称被控对象)是指要求实现自动控制的机器、设备或

生产过程，如飞机、锅炉、机床以及化工生产过程等。控制装置则是指对被控对象起控制作用的设备总体。例如，有用来测量温度、压力或飞行姿态等物理量的测量设备；有对位移、速度、压力或电压等物理量进行变换和放大的变换和放大设备；有操纵飞机舵面偏转的舵机、操纵反应塔流量的阀门等操纵设备。

我们所见到的自动控制系统，其功用及组成是多种多样的，结构有简有繁。它可以是只控制一个物理量，如温度、压力、电压的简单系统，也可以是包括一个企业、机构全部过程的大系统；可以是一个具体的工程系统，也可以是抽象的社会系统、生态系统或经济系统等。

自动控制理论：自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学。

1.1.2 自动控制的实例

在各种生产过程以及生产设备中，常常需要使其中某些物理量(如温度、压力、位置和转速等)保持恒定，或者让它们按照一定的规律变化。要满足这种需要，就应该对生产机械或设备进行及时的控制和调整，以抵消外界的扰动和影响。那么，控制系统是怎样实现对这些物理量的自动控制的呢？自动控制系统为什么能够保持温度、压力或转速恒定？火炮又为什么能够自动跟踪目标？要回答这些问题，我们还是先看看恒温控制系统这个例子，研究一下它是怎样实现恒温控制的，在这个基础上再总结出控制系统的共同规律。

实现恒温控制有两种方法：人工控制和自动控制，其中，很多自动控制都是受到人工控制的启发而实现的。图1-1所示为人工控制的恒温控制箱。人工控制的目的是克服外来干扰(如电源电压波动、环境温度变化等)，保持恒温箱的温度恒定，以满足物体对温度的要求。这可以通过移动调压器活动触头的位置来改变加热电阻丝的电流，以达到所要求的温度的目的。箱内温度是由温度计进行测量的。人工调节过程可以归纳如下：

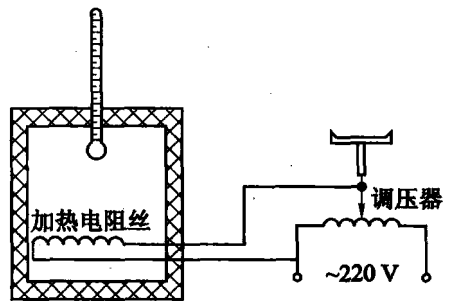


图1-1 人工控制的恒温控制箱

- (1) 观察由测量元件(温度计)测出的恒温箱的温度(被控制量)。
- (2) 与要求的温度值(给定值)进行比较，得出偏差大小和方向。
- (3) 根据偏差的大小和方向再进行控制。若恒温箱的温度高于所要求的给定温度值，就移动调压器将电流减小，使温度降到正常范围内；若恒温箱的温度低于给定的温度值，就移动调压器将电流增加，使温度升到正常范围内。

因此，人工控制的过程就是测量、求偏差、再控制以纠正偏差的过程。简单地讲，就是“检测偏差用以纠正偏差”的过程。显然，其中需要一个测量元件(温度计)和一个控制元件(如调压器)，并需要将控制量(恒温箱的温度)与给定温度进行比较，以及决定怎样去控制调压器，这些都是通过人来实现的。

对于这样简单的控制形式，如果能找到一个控制器来代替人的职能，那么人工调节系统就可以变成自动控制系统了。图 1-2 所示就是一个恒温箱自动控制系统。

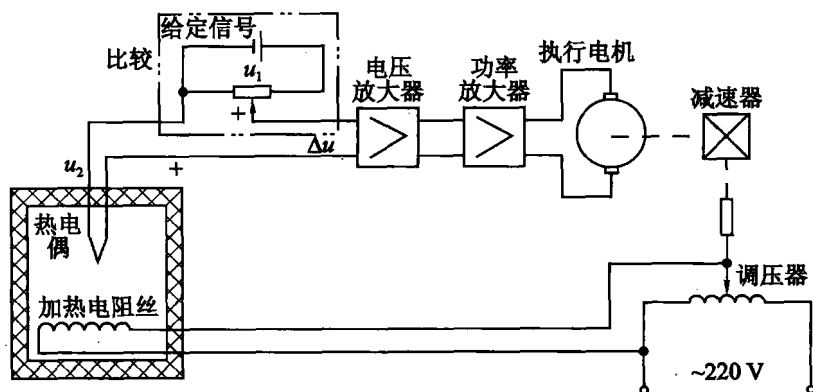


图 1-2 恒温箱自动控制系统

在这个控制系统中，恒温箱的温度是由给定信号电压 u_1 控制的。当外界因素引起箱内温度变化后，作为测量元件的热电偶将与温度相对应的电压信号 u_2 测出，并反馈回去与给定信号 u_1 进行比较，所得的结果即为温度的偏差信号 Δu ，经过电压放大器、功率放大器放大后，以控制电机的旋转速度与方向，并通过传动装置拖动调压器动触头。当恒温箱内温度偏高时，使调压器减小加热电流，反之加大电流，直到温度达到给定值为止。此时，偏差信号 $\Delta u = 0$ ，电机停止，这样就完成了所要求的控制任务。而所有这些装置便组成了一个自动控制系统。

上述的人工控制系统和自动控制系统是极其相似的。误差测量装置类似于操纵者的眼睛（测量作用）；自动控制器类似于操纵者的头脑（比较作用）；执行机构类似于操纵者的肢体（执行作用）。

通过上面的分析可以看出，不论是人工控制还是自动控制，它们都有两个共同点：一是要检测偏差，二是要用检测到的偏差去纠正偏差。可见，没有偏差便没有调节过程。通常在自动控制系统中，这一偏差是通过反馈建立起来的。给定量称为控制系统的输入量，被控制量称为系统的输出量。反馈就是指输出量通过适当的测量装置将信号的全部或部分返回输入端，使之与输入量进行比较，比较的结果叫做偏差。控制系统就是根据这一偏差的大小和方向进行工作的，以使偏差减小或消除，从而使输出量与输入量一致。因此，基于反馈基础上的“检测偏差用以纠正偏差”这一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。

现将图 1-2 画成图 1-3 所示的职能方框图形式。图中方框代表系统的各个组成部分， \otimes 代表比较元件，方框两边的直线及其标注代表该组成部分在控制过程中相互作用的物理量，箭头代表作用的方向。方框图对于了解系统的作用原理是显而易见的。同时还可以看出，被调节量（温度）是系统的输出量，给定的电压信号是系统的输入量。偏差是通过热电

偶将输出量反馈到输入端与输入量比较而得到的。

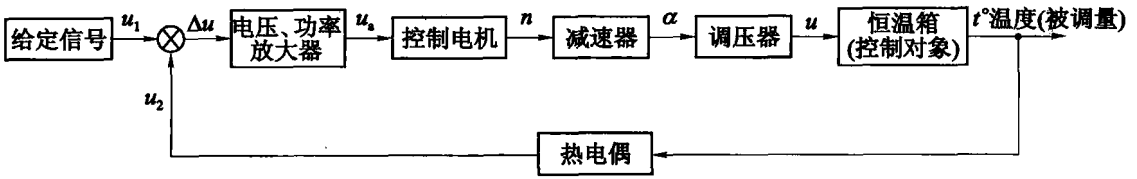


图 1-3 恒温箱温度自动控制系统方块图

从以上举的例子可以看出，反馈控制有两个最主要的特点：一是有反馈存在，二是按偏差进行控制。实现自动控制的装置可以各不相同，但反馈控制原理却是相同的。反馈控制是实现自动控制最基本的方法，并得到了广泛应用。它不仅可以实现对物理量的恒值控制，而且还可以实现被控制量复现控制量的变化规律的随动控制。

1.1.3 自动控制的优点

在国民经济各部门中，由于广泛地应用了自动控制技术，因此，在改善劳动条件、提高产品质量和劳动生产率、实现企业管理自动化等各个方面，都取得了明显的效果。在宇宙航行、导弹制导等科学技术领域中，自动控制技术具有特别重要的作用。特别是近 20 多年来，电子计算机已成为自动控制技术不可分割的重要组成部分，并为自动控制技术的发展和应用的开辟了广阔的新天地。

在许多场合，自动控制比人工操作能够更好地完成生产任务，甚至能够完成人工操作所不能完成的任务。具体地说，自动控制技术具有以下优点：①极大地提高了劳动生产率；②提高了产品的质量；③减轻了人们的劳动强度，使人们从繁重的劳动中解放出来，去从事更有效的劳动；④由于近代科学技术的发展，许多生产过程依靠人们的脑力和体力直接操作是难以实现的，还有许多生产过程因人的生理所限而不能由人工操作，如原子能生产、深水作业以及火箭或导弹的制导等，在这种情况下，自动控制更加显示出其巨大的作用。

1.1.4 自动控制的基本方式

控制系统按其结构形式可分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统 3 种。

1. 开环控制系统

如果系统的输出端和输入端之间不存在反馈回路，输出量对系统的控制作用就没有影响，这样的系统称为开环控制系统。图 1-4 所示为一开环速度控制系统。它根据控制信号的大小和方向来控制负载转速的大小和方向，原理很简单，控制信号通过放大器放大，输出一电流给电液伺服阀，电液伺服阀供给一定流量给液压马达，液压马达带动负载以一定的转速运动。这个系统对被控制量（负载转速）不进行任何检测，因为没有反馈也谈不上与控制信号进行比较，以产生偏差信号来对系统进行再控制，它仅根据控制信号来对负载进行控制。因此，开环控制系统的精度主要取决于系统的校准精度，取决于工作过程中的校准值以

及组成系统的元件特性和参数值的稳定程度。

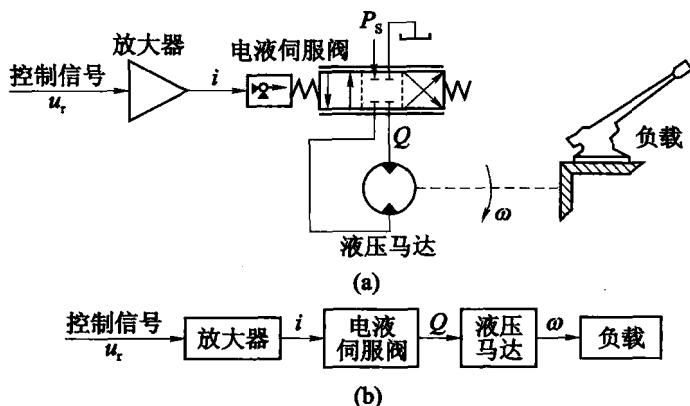


图 1-4 开环速度控制系统

(a) 系统原理图; (b) 原理方框图

在系统不存在内扰动和外扰动, 并且元件参数比较稳定的情况下, 开环控制系统比较简单并且可以保证足够的精度。但在系统存在扰动的情况下, 如果被控制的输出量偏离给定量时, 开环控制系统就没有纠正的能力了。如图 1-4 所示的系统, 当负载力矩增加时, 由于电液伺服阀的流量随负载压力的增加而减小, 以及液压系统内漏损增加等原因, 就会造成液压马达转速降低。因为没有反馈比较, 就没有办法自动校正输出量到给定值, 从而使开环系统精度降低。为了对其进行补偿, 就必须借助人工作改变输入量。

2. 闭环控制系统

凡是系统的输出端与输入端间存在反馈回路, 即输出量对控制作用具有直接影响的系统, 就称为闭环控制系统。所以, 反馈系统也就是一个闭环控制系统。换句话说, “闭环”的含义就是应用反馈作用来减小系统的误差。如果对图 1-4 所示的开环控制系统引入反馈回路, 即用测速发电机直接检测被控制量(负载转速), 然后反馈到输入端, 则构成了闭环控制系统, 如图 1-5 所示。

闭环控制系统的突出优点是精度高, 只要被控制量的实际值偏离给定值时, 闭环控制就会产生控制作用来减少这一偏差。但是, 闭环控制系统也有它的缺点。由于闭环控制系统是以偏差消除偏差的, 即系统要工作就必须有偏差存在, 因此, 这类系统的精度也是有限制的, 也就是说, 这类系统有其自身的矛盾。当然, 通过适当的措施可以使误差减到极小。另外, 由于组成系统的元件的惯性, 传动链的间隙等因素的存在, 如果配合不当, 将会引起反馈控制系统的振荡, 从而使系统不能稳定工作。因此, 精度和稳定性之间的矛盾始终是闭环控制系统存在的主要矛盾。

3. 复合控制系统

复合控制是闭环控制和开环控制相结合的一种方式。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)的顺馈通路, 对该信号带来的干扰进行补偿, 如图 1-6 所

示。它与仅用负反馈的控制系统相比，具有反应快、精度高而且工作可靠等优点，具体内容详见第3章。

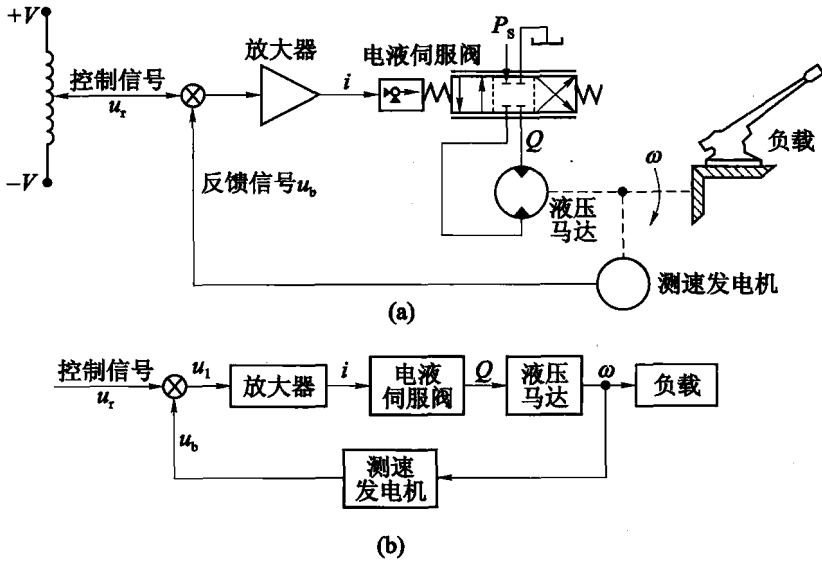


图 1-5 闭环速度控制系统
(a) 系统原理图；(b) 原理方框图

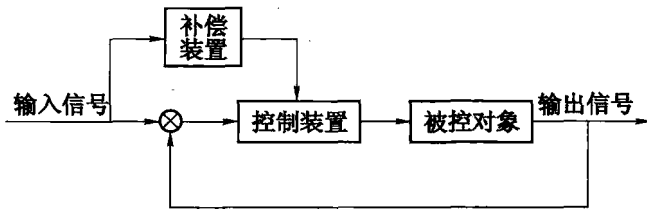


图 1-6 复合控制系统原理方框图

对于闭环控制系统与开环控制系统的特点归纳如下：

闭环控制系统的优点是采用了反馈，因此，对外扰动和系统内参数的变化所引起的偏差能够自动地纠正，这样就可以采用精度不太高而成本比较低的元件组成一个精确的控制系统。而开环控制系统却相反，因为没有反馈，故没有纠正偏差的能力，外扰动和系统内参数的变化将引起系统的精度降低。

从稳定性的角度看，开环控制系统比较容易建造，结构也比较简单，因为开环控制系统不存在稳定性问题。而闭环控制系统则不然，其稳定性始终是一个重要问题，因为参数如果选的不适当，将会造成系统振荡，甚至使系统完全失去控制。

应当指出，如果系统的输入量能预先知道，并且不存在外扰动时，最好采用开环控制。如果系统存在无法预计的扰动，或系统中元件参数不稳定时，闭环控制的优点将显得特别突出。

当对整个系统的性能要求比较高时,为了解决闭环控制时精度和稳定性之间存在的矛盾,往往将开环控制和闭环控制结合在一起应用,即采用复合控制系统是比较适宜的。

我们主要研究的是闭环控制系统,即着重研究实现反馈控制的理论和方法。

1.2 自动控制系统的基本环节及表达式

1.2.1 基本组成

对于一个控制系统来说,其结构和用途是各不相同的,但概括起来它们都是由一些具有不同职能的基本元件所组成的。图 1-7 所示就是一个典型的反馈控制系统,它表示了这些元件在系统中的位置和其相互间的联系。作为一个典型的反馈控制系统,应该包括检测偏差所必需的反馈元件、控制元件、比较元件以及用以纠正偏差所必需的放大变换元件和执行元件等。

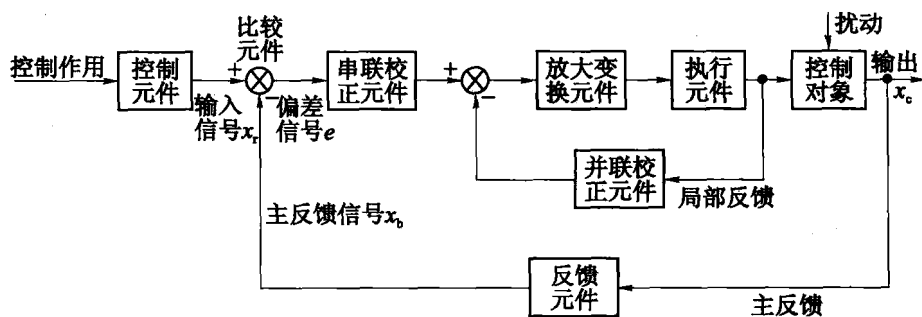


图 1-7 典型反馈控制系统原理方框图

控制元件: 主要用于产生控制信号。引起控制信号变化的原因称为控制作用。如图 1-2 中的调压器就是控制元件,而控制作用乃是引起调压器滑臂移动的力。

反馈元件: 它产生与被控制量有一定函数关系的反馈信号。这种反馈信号可以是被控制量本身,也可以是它的函数或导数,如图 1-2 中的热电偶。此外,自整角机、回转变压器等测量元件都可以做反馈元件。

比较元件: 是指用来比较控制信号和反馈信号并产生反映两者差值的偏差信号的元件,如图 1-2 中的比较电路。此外,机械式差动装置、工作在变压器状态下的自整角机等都可做比较元件。

放大变换元件: 指把偏差信号放大并进行能量形式(电气、机械、液压)转换使之达到足够幅值和功率的元件,如图 1-2 中的两级放大器等。

执行元件: 是指根据控制信号的运动规律直接对控制对象进行操作的元件,如图 1-2 中的执行电机。常作为执行元件的有液压马达和伺服电机等。

控制对象: 简称对象,就是控制系统所要操纵的对象,即负载,它的输出量即为系统的被控制量,如图 1-2 中的恒温箱等。

以上是构成反馈控制系统最基本的不可缺少的部分。此外，还有：

校正元件：或称校正装置，它是为了改善系统的控制性能而加入系统里的。串联在系统前向通路内的校正装置称为串联校正装置。接成反馈形式的校正装置称为并联校正装置（或称为局部反馈）。

1.2.2 名词术语

输入信号（又称输入量、控制量或给定量）：它是控制输出量变化规律的信号。而输入量则又广义地泛指输入到控制系统中的信号，如扰动信号，也包括给定信号。

输出信号（又称输出量、被控制量或被调整量）：它的变化规律是要加以控制的，应与输入信号之间保持一定的函数关系。

反馈信号（或称反馈）：从系统（或元件）输出端取出信号，经过变换后加到系统（或元件）输入端，这就是反馈信号。当它与输入信号符号相同，即反馈结果有利于加强输入信号的作用时叫正反馈。反之，符号相反抵消输入信号作用时叫负反馈。直接取自系统最终输出端的反馈叫主反馈。主反馈一定是负反馈，否则偏差会越来越大，直至使系统失去控制。除主反馈外，有的系统还有局部反馈，局部反馈主要是为对系统进行校正、补偿或线性化而加入的。

偏差信号（或称偏差）：它是控制信号与主反馈信号之差，有时也称为作用误差。

误差信号（或称误差）：它是指系统输出量的实际值与希望值之差。在很多情况下，希望值就是系统的输入量。

这里要注意，误差和偏差不是同一个概念，只有在全反馈系统中误差才等于偏差。

扰动信号（又称扰动或干扰）：除控制信号以外，对系统输出量产生影响的因素都叫扰动。如果扰动产生在系统内部，则称为内扰动；如果扰动产生在系统外部，则称为外扰动。外扰动也是系统的一种输入量。

1.2.3 自动控制系统的表达式

在工程应用上，对自动控制系统只作上述定性的描述和分析是远远不够的，还必须作数学描述，进行定量分析，这就要求建立系统的数学表达式。通常，自动控制系统用动态结构图（也称函数方框图，简称方框图）表示。函数方框图除了与纯数学表达式（通常是一组微分方程）等效之外，还具有简明表示系统实际运行过程的优点。此外，对于我们要着重研究的线性系统来说，只要把组成系统的每个元件或部件的方框图按信号的传递顺序连接起来，就能够很容易地构成整个系统的总方框图。下面将介绍控制系统的基本方框图。

比较元件的作用是从输入量 R 中减去反馈信号 C ，设其偏差信号为 E ，则这个运算的数学关系式为

$$E = R - C$$

这种关系在方框图中用图 1-8(a) 表示。图中用圆圈或叉圈符号表示信号的加减运算；

指向圆的箭头表示输入量，离开圆的箭头表示输出量。每个箭头上的“+”号或“-”号，表示相加或相减。“+”号可以省略。

送入控制装置的信号 E 和被控变量(系统输出量) C 之间的关系可用下式表示，即

$$C = G(s) \cdot E$$

式中， $G(s)$ 为控制装置的传递函数(详见第2章)。

这种数学关系用图1-8(b)所示的方框图来表示。图中的方框表示控制装置，方框里填以描述装置的函数式。任何线性系统的数学表达式都可以用方框图的形式来表示。

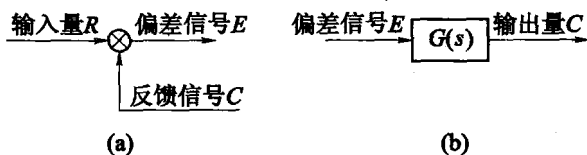


图1-8 方框图

把图1-8中(a)图和(b)图相对应的量连接起来，就构成了单位反馈系统的完整方框图，如图1-9所示。

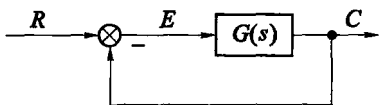


图1-9 单位反馈系统的完整方框图

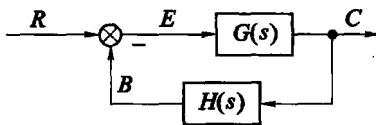


图1-10 反馈控制系统方框图

当描述反馈装置的函数为 $H(s)$ 时，就构成一般形式的反馈控制系统方框图，如图1-10所示。反馈信号 B 为

$$B = H(s) \cdot C$$

与原理方框图相比，函数方框图具有定量描述系统的意义。系统的函数方框图有自己的运算规律，我们将在第2章中详述。

1.3 自动控制系统的分类

自动控制系统的种类很多，应用的范围也很广，它们的结构性能和完成的任务也各不相同，因此，控制系统的分类方法也很多，下面介绍几种主要的分类方法。

1.3.1 按照控制作用的特点分类

按照控制作用的特点(即按给定量的运动规律)来分，自动控制系统可以分为以下几类。

1. 恒值控制系统(或称自动稳定系统)

当给定量是一个恒值时，称为恒值控制系统，或称自动稳定系统。图1-2所示的恒温