



普通高等教育“十二五”机电类规划教材

重点推荐



机械工程控制基础

田 勇	陈大立	主 编	
王德胜	陈锡渠	付素芳	副主编
	房建峰	参 编	

- 精品课程配套教材
- 采用国家最新标准
- 配套习题、答案、课件等教学资源
- 教学资源请登录华信教育资源网 (www.hxedu.com.cn) 免费获取



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

普通高等教育“十二五”机电类规划教材

机械工程控制基础

田 勇 陈大立 主 编

王德胜 陈锡渠 付素芳 副主编

房建峰 参 编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

全书共分7章,主要介绍经典控制理论。第1章绪论,介绍了控制系统的基本概念,以及控制理论的产生与发展;第2章控制系统的数学模型,介绍了系统的微分方程的建立,拉氏变换及拉氏反变换,系统的传递函数,系统的方框图及其简化;第3章控制系统的时域分析,重点介绍了时间响应及典型输入信号,系统的时域分析,系统误差分析;第4章控制系统的频域分析,重点介绍了系统频率特性的基本概念及分析方法,频率特性的极坐标图、对数坐标图,频域性能指标与时域性能指标间的关系;第5章控制系统的稳定性分析,重点介绍了稳定性的基本概念,稳定性判据,系统的相对稳定性;第6章控制系统的校正,介绍了系统校正的基本概念和方法;第7章离散控制系统和现代控制理论简介,简要介绍了离散控制系统和现代控制理论的概念。

本书是普通工科院校机械类、动力与车辆工程、自动化类各专业教材之一,也适用于各类成人高校、自学考试等相关专业的学生,还可供从事机电控制技术的工程技术人员参考。

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

机械工程控制基础 / 田勇, 陈大立主编. —北京: 电子工业出版社, 2011.4
普通高等教育“十二五”机电类规划教材
ISBN 978-7-121-13151-6

I. ①机… II. ①田… ②陈… III. ①机械工程—控制系统—高等学校—教材 IV. ①TH-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第047686号

策划编辑: 李 洁 (lijie@phei.com.cn)

责任编辑: 侯丽平

印 刷: 北京京师印务有限公司

装 订:

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: 12.5 字数: 320千字

印 次: 2011年4月第1次印刷

印 数: 3000册 定价: 28.00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

随着 1999 年高校的逐年扩招,我国高等教育已经达到大众化阶段,近年来的教学经验和教训告诉我们,普通院校本科学生的整体素质重心明显下移。然而,过去高校精英式教育的培养模式并没有随之及时转变,教材编写思路和要求仍然偏重于理论知识的系统传授,对诸如工程中设计的一般过程、图表、手册的使用、系统的组成和匹配关系、能耗及环保方面的问题等工程应用能力的培养存在明显缺陷。随着新技术的发展,学生学习的课程种类和数量一直在增加,而各门课程的学时却不断缩减。这样势必造成学生理论学习不深不透,工程应用能力又不被重视,就业与社会需求的矛盾更加突出。所以,实事求是地根据应用型本科办学的定位,制定学生的培养方案,编写与之相配套的教材实乃当务之急。

本书是根据 2009 年电子工业出版社组织的“高等学校十二五机电类规划教材”出版交流研讨会的精神而编写的,适用于教学学时为 36~48 学时使用。本书是普通工科院校机械类、动力与车辆工程、自动化类各专业教材之一,也适用于各类成人高校、自学考试等相关专业的学生,还可供从事机电控制技术的工程技术人员参考。

全书共分 7 章,本教材主要介绍经典控制理论。在介绍了如何建立系统数学模型的基础上,介绍时域分析方法和频域分析方法,并在此基础上对系统的稳定性和校正等问题进行讨论,最后还简要介绍了离散控制系统和现代控制理论。

本书在编写过程中,力求贯彻少而精、理论与实践相结合的原则,针对机械类专业的需要,主要有以下特点:

(1) 按照减少学时、降低重心、拓宽思路、精选内容、更新知识的原则,本书在编写过程中,力求做到针对性强、适应性强、讲解清晰、利于教学和自学使用。

(2) 本教材定位于应用型大学对本科学习阶段的要求,不求理论全而深,要求学生在理解相关理论的基础上,能较好地分析系统,解决实际问题。

(3) 理论与实践相结合,例题丰富,边学边练,提高应用能力。

本书由河南工业大学田勇(第 1 章 1.1 节及 1.3~1.6 节、第 7 章)、陈大立(第 4 章)担任主编;河南理工大学王德胜(第 2 章)、河南科技学院陈锡渠(第 5 章)、河南科技学院付素芳(第 1 章 1.2 节、第 3 章)担任副主编;参编人员有洛阳理工学院房建峰(第 6 章)等。全书由田勇、陈大立负责统稿。

本书有配套习题、答案、课件等教学资源,可登录电子工业出版社的华信教育资源网 www.hxedu.com.cn,注册后免费下载。

由于编者水平有限,书中难免存在缺点和错误,敬请广大读者批评指正。

编 者

2011 年于郑州

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 控制工程概述	(1)
1.1.1 工程控制论的诞生及其意义	(1)
1.1.2 控制工程的基本概念	(2)
1.2 系统的分类	(5)
1.2.1 按反馈情况分类	(5)
1.2.2 按输入信号的变化规律分类	(7)
1.2.3 按系统内部的信号类型分类	(7)
1.2.4 按数学模型的类型分类	(8)
1.3 对控制系统的基本要求	(9)
1.3.1 稳定性	(9)
1.3.2 快速性	(9)
1.3.3 准确性	(9)
1.4 控制工程的发展	(10)
1.5 本课程的主要内容和学习方法	(11)
1.6 习题	(12)
第 2 章 控制系统的数学模型	(13)
2.1 系统的微分方程	(13)
2.1.1 列写微分方程的一般方法	(13)
2.1.2 非线性微分方程的线性化	(16)
2.2 拉氏变换及拉氏逆变换	(19)
2.2.1 复变函数	(19)
2.2.2 拉氏变换的定义和性质	(22)
2.2.3 拉氏逆变换	(26)
2.3 系统的传递函数	(32)
2.3.1 传递函数的定义	(32)
2.3.2 传递函数的基本性质	(32)
2.3.3 典型环节的传递函数	(34)
2.4 系统的方框图及其简化	(42)
2.4.1 绘制系统方框图的一般步骤	(42)
2.4.2 传递函数方框图的等效变换	(45)
2.4.3 反馈控制系统的传递函数	(50)
2.5 相似系统	(52)
2.6 习题	(54)
第 3 章 控制系统的时域分析	(57)
3.1 时间响应及典型输入信号	(57)

3.1.1	时间响应	(57)
3.1.2	典型输入信号	(58)
3.2	一阶系统的时域分析	(59)
3.2.1	一阶系统的数学模型	(59)
3.2.2	一阶系统的单位脉冲响应	(60)
3.2.3	一阶系统的单位阶跃响应	(60)
3.3	二阶系统的时域分析	(62)
3.3.1	二阶系统的数学模型	(62)
3.3.2	二阶系统的单位脉冲响应	(64)
3.3.3	二阶系统的单位阶跃响应	(65)
3.3.4	二阶系统响应的性能指标	(66)
3.4	高阶系统的时域分析	(71)
3.5	系统误差分析	(72)
3.5.1	误差和稳态误差	(72)
3.5.2	典型输入作用下的稳态误差	(73)
3.5.3	扰动作用下的稳态误差	(78)
3.6	习题	(80)
第 4 章	控制系统的频域分析	(83)
4.1	频率特性概述	(83)
4.1.1	频率特性的基本概念	(83)
4.1.2	频率特性的求取方法	(85)
4.1.3	频率特性分析法的特点	(88)
4.2	频率特性的极坐标图	(89)
4.2.1	极坐标图的基本概念	(89)
4.2.2	典型环节的极坐标图	(90)
4.2.3	Nyquist 图的一般形状	(94)
4.3	频率特性的对数坐标图	(96)
4.3.1	对数坐标图的基本概念	(97)
4.3.2	典型环节的对数坐标图	(98)
4.3.3	Bode 图的一般画法	(105)
4.3.4	最小相位系统和非最小相位系统	(107)
4.4	频域性能指标与时域性能指标间的关系	(110)
4.4.1	闭环频率特性及其性能指标	(110)
4.4.2	二阶系统时域响应与频域响应的关系	(111)
4.5	本章小结	(112)
4.6	习题	(113)
第 5 章	控制系统的稳定性分析	(115)
5.1	稳定性的基本概念和基本条件	(115)
5.1.1	稳定性的基本概念	(115)
5.1.2	稳定性的基本条件	(116)

5.2	稳定性判据	(118)
5.2.1	劳斯-胡尔维茨 (Routh-Hurwitz) 稳定性判据	(118)
5.2.2	奈奎斯特 (Nyquist) 稳定性判据	(125)
5.2.3	伯德稳定性判据	(130)
5.2.4	控制系统参数对系统稳定性的影响	(132)
5.3	系统的相对稳定性	(133)
5.3.1	相对稳定性的概念	(133)
5.3.2	幅值裕度和相位裕度	(134)
5.3.3	条件稳定系统	(138)
5.4	习题	(142)
第 6 章	控制系统的校正	(146)
6.1	系统校正的基本概念	(146)
6.1.1	系统的时域和频域性能指标	(146)
6.1.2	校正方式	(147)
6.2	系统的串联校正	(147)
6.3	系统的 PID 校正	(157)
6.4	系统的并联校正	(160)
6.5	习题	(162)
第 7 章	离散控制系统和现代控制理论简介	(164)
7.1	离散控制系统	(164)
7.1.1	离散控制系统的基本概念	(164)
7.1.2	信号的采样	(165)
7.1.3	Z 变换和 Z 反变换	(167)
7.1.4	线性离散系统的数学模型和稳定性分析	(175)
7.2	现代控制理论简介	(182)
7.2.1	控制系统的状态空间表达式	(182)
7.2.2	系统的能控性与能观性	(186)
7.3	习题	(190)
参考文献	(192)

第1章 绪 论

本章首先阐述了“机械工程控制基础”这门课程的重要意义，然后介绍了控制工程的基本思想、基本概念，控制系统的分类和基本要求，接下来对控制理论的发展进行了简单介绍，最后点明了本课程的主要内容和学习方法。

控制工程概述

1.1.1 工程控制论的诞生及其意义

人类的文明是从制造第一把石刀开始的。恩格斯在《自然辩证法》中说：“直立和劳动创造了人类，而劳动是从制造工具开始的。”制造工具一直是最重要的技术，并逐渐形成了一个庞大的行业——制造业。制造业是现代文明的支柱之一，也是生产力最集中的体现。

机械制造业是制造业中的一个分支，它是制造业的基础与核心，因为机械制造业生产的不是一般意义上的产品，而是生产其他产品的机器。马克思在《资本论》中说：“大工业必须掌握它特有的生产资料，即机器本身，必须用机器生产机器，这样大工业才建立起与自己相适应的技术基础，才得以自立。”我们都知道，生产力决定生产关系，正是生产力的发展，不断推动人类文明和人类社会向前发展。制造业正是生产力的代表，而且它所代表的是先进的生产力水平。那么，相对于一般制造业对产品的批量生产，机械制造业对生产产品的机器的批量生产，不正代表了更高、更先进的生产力水平吗？

钱学森在《工程控制论》的序中说：“为了极大地提高我国生产力水平，我们应该深入研究当前出现的几项技术革命的含义，探索正在酝酿、即将出现的技术革命，能动地推进技术革命，加速我国四个现代化的建设。”钱学森所说的“技术革命”是指什么呢？毛泽东主席对这一概念的阐述是：“对每一具体技术改革来说，称为技术革新就可以了，不必再说技术革命。技术革命指历史上重大技术改革，比如用蒸汽机代替手工，后来又发明电力，现在又发明原子能之类。”在毛主席所提到的几个例子中，无一不涉及新能源的发明。而对这些例子的深入分析表明，能源的发明本身并不是造成技术革命的直接原因，而是由于新能源的注入，使原有生产方式和生产组织形式发生了变化，产生了巨大的生产力，这才是产生技术革命的根本原因。马克思在逝世前，曾以极为喜悦的心情密切注视着电力的发明。恩格斯在1883年对电力的发展提出了一些极具前瞻性的预言：“如果在最初它只是对城市有利，那么到最后它终将成为消除城乡对立的最有利的杠杆。但是非常明显的是，生产力将因此得到极大的发展，以至于资产阶级对生产力的管理越来越不能胜任。”伟人们所说的这一切都充分说明：生产力的发展是以技术革命划分阶段的。

钱学森在《工程控制论》中谈到了对现代生产产生深远影响的几项技术革命，一是核能，二是电子计算机，三是航天技术，以及可能正在酝酿中的技术革命，包括激光技术、遗传工程等。钱学森指出：“所有这些科学技术的发展，所有这些技术革命都直接与控制论连在一起。控制论的发生可以追溯到电力驱动技术，即电力技术革命；而控制论的成长则同当代几项技术革

命是分不开的。可以预言，控制论的进一步发展也必将同我们以上论述的技术革命的进一步发展紧密相配合。”

同时，随着机械工程理论与实践的发展，许多问题也开始逐渐积累和表现出来。机械研究者越来越感到，人们的传统思想方法，以及由此而采用的认识、分析与解决问题的方式已经不适应当代科学技术的发展，甚至阻碍了机械设计与制造技术的进一步发展。在这种局面下，机械设计与制造技术与以计算机技术为代表的信息科技结合起来，相互交融，使这一矛盾表现得更加突出。广大机械工作者渴望冲破原来的形而上学的思想方法，呼唤能够有科学理论为机械设计与制造技术提供更科学的研究方法。

此时，控制论横空出世，介入到机械工程领域中，一下子就表现出强大的生命力。控制论将其辩证思维方法提供给机械工作者，还给他们带来了基于高等数学等相关理论的科学的研究方法。

1948年，诺伯特·维纳的《控制论》出版，首次提出了控制论的名称，并被认为是经典控制理论的形成。维纳把控制论看做是一门研究机器、生命社会中控制和通信的一般规律的科学，是研究动态系统在变化的环境条件下如何保持平衡状态或稳定状态的科学。

1954年，钱学森的《工程控制论》出版，创立了“工程控制论”这门学科，大大地推进了控制理论的应用。

1.1.2 控制工程的基本概念

1. 系统

控制理论研究的对象是系统。以系统的观点去认识、分析、处理客观对象，是控制论最基础的体现，是科学技术发展的需要，也是人类在认识论与方法论上的一大进步。

系统就是按一定的规律联系在一起的元素的集合，它是一个有机的整体。系统的概念中有两个关键点：一是元素，二是元素之间的联系。在研究系统时，既要对系统中的元素进行研究，但更重要的是对系统各元素之间的联系进行研究。孤立地研究系统中的各个部分，可能会导致分析的结果出现严重的偏差和错误，不能满足实际要求；必须把系统的各部分联系起来，作为一个整体加以认识、分析与处理。

在人类所处的自然界的各个范畴中，广泛地存在着各种各样的系统。有工程的系统，有生物学的系统，也有非工程的系统和非生物的系统。因此，系统可以是机械的、液压的、气动的、电的、磁的、光的、热的、生物医学的，甚至可以是经济学的、社会学的……。系统可大可小，有繁有简，或实或虚。系统的元素，既可以是简单的元件，也可以是下一级的系统，称为“子系统”；而整个系统又可以是上一层系统的子系统。必须注意，一个系统的特性并不能看成是组成它的元件或子系统的特性的简单总和。

以实现一定的机械运动，承受一定的机械载荷为目的，由机械元件组成的系统，称为机械系统。例如，各种工作机械、机床、动力设备、交通运输工具，以及某些工程结构等均是机械系统。

工程控制论研究工程技术中广义系统的动力学问题。

详细地说，工程控制论研究的是工程技术中的广义系统，从一定的初始状态出发，受到一定的外界条件作用，经由系统的固有特性所决定的动态历程。简单地说，工程控制论研究的是系统及其输入、输出三者之间的关系，如图 1.1

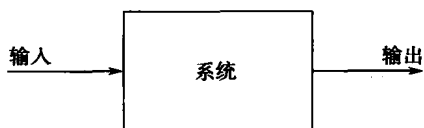


图 1.1 系统框图

所示。工程控制论在与机械工业相应的机械工程领域中体现为机械工程控制论。

2. 反馈

机械工程控制论中有一个最基本、最重要的概念——反馈。系统的输出，部分或全部地被反过来用于控制系统的输入，称为反馈。

反馈是指系统的输出通过一定的渠道，返回到输入端并以一定的方式改变输入，进而影响系统功能的过程；也可以说，是将系统的输出量通过恰当的检测装置返回到输入端，并与输入量进行比较的过程。

根据反馈的作用，可分为负反馈和正反馈。负反馈使输出起到与输入相反的作用，使系统输出与系统目标的偏差减小，使系统趋于稳定；而正反馈使输出起到与输入相同或相似的作用，使系统偏差不断增大，使系统产生振荡，有时可以放大控制作用。对负反馈的研究是控制论的核心问题。

反馈还可以分为外反馈和内反馈。外反馈也称反馈控制，其反馈路线是为了达到一定的控制目的而人为设计和实现的，基本思想就是检测偏差并利用偏差达到纠正或消除偏差的目的，因此反馈控制一般都是负反馈。另外，系统中广泛地存在着各种自然形成的反馈，称为“内反馈”。内反馈来自系统内部各元素之间的联系，是系统自身的固有特性。它是系统产生动态历程的内因，也是决定性的因素，因此对系统的动态性能有非常重要的影响，而且很难加以控制。外界的作用即输入，包括有目的性的控制输入和自然产生的干扰输入，是系统产生动态历程的外因。唯物辩证法中说：“外因是变化的条件，内因是变化的根据，外因通过内因起作用。”

3. 自动控制系统的工作原理

目前，自动控制系统广泛地应用于工业、农业、国防，以及人们的日常生活之中，比如恒温控制系统。

恒温控制系统有很多种，传统的恒温控制系统不是自动控制系统，而是靠人的观测和调节来实现恒温的，如图 1.2 所示。温度计（测量元件）测量并显示出恒温箱内的温度，人观测到恒温箱中的温度（被控量）之后，与要求的温度值（目标）进行比较，得出差值（偏差），然后根据偏差的大小和方向对调压器进行调整（反馈）。若实际温度高于要求的温度值，则减小输入电压，使温度降低；若实际温度低于要求的温度值，则增大输入电压，使温度升高（负反馈）。

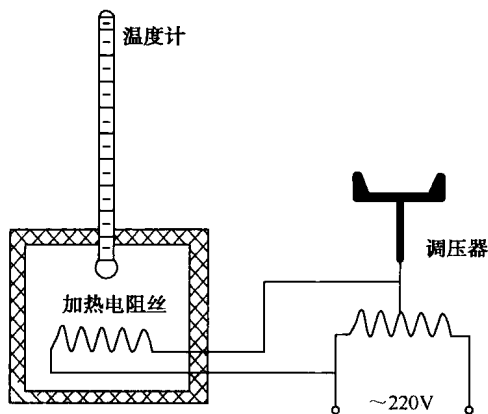


图 1.2 人工控制恒温箱

上述控制过程显然就是自动控制系统所应具备的功能，也体现了反馈所应当实现的功能，即检测偏差，并利用偏差达到纠正或消除偏差的目的。上述系统已经具备了自动控制系统所需要的很多条件（测量元件、被控量、目标等），也采纳了自动控制的思想（偏差、负反馈等）。如果能够用具备自动控制功能的控制器，来代替上述系统中的人，就可以把上述的人工控制系统变成自动控制系统，如图 1.3 所示。

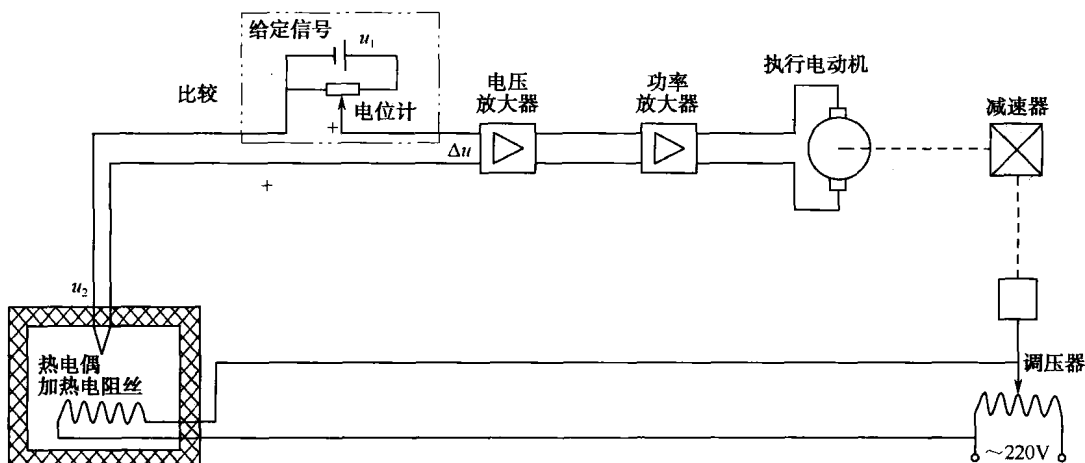


图 1.3 恒温箱的自动控制系统

在图 1.3 中，为了适应自动控制系统的需要，测量元件变成了热偶。恒温箱所要求的温度由电压信号 u_1 给定。热偶将所测量到的温度转换成电压信号 u_2 ，通过反馈与 u_1 进行比较，所得结果即为偏差 $\Delta u = u_1 - u_2$ 。偏差信号经过电压放大器和功率放大器放大后，可以调整执行电动机的转速和旋转方向，进而通过传动装置改变调压器滑动触点的位置，改变输入电压，达到调节恒温箱内温度的目标，自动实现负反馈控制的整个过程。

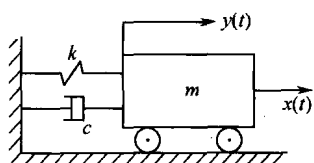


图 1.4 质量-阻尼-弹簧单自由度系统

在上面的例子中用到了反馈控制，但是，自动控制系统多种多样，也存在不利用反馈控制的例子。

图 1.4 给出了一个质量-阻尼-弹簧单自由度系统。图中， m 表示质量， c 表示黏性阻尼系数， k 表示弹簧刚度。图 1.4 中，作用在小车上的外力 $x(t)$ 是系统的输入，在外力的作用下，又受到弹簧和阻尼的制约，质量 m 产生的位移 $y(t)$ 为系统的输出。

通过力学分析和整理，我们可以得到系统的动力学方程为

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = x(t) \quad (1.1)$$

此外，需给出系统的初始条件 $y(0)$ 和 $\dot{y}(0)$ 的值，即可确定系统的动态历程。

在系统的动力学方程中，将与输出 $y(t)$ 有关的项放在方程左侧，与输入 $x(t)$ 有关的项放在方程右侧，体现了由输入而引起输出的思想。

若将方程改写为如下几种形式：

$$ky(t) = x(t) - m\ddot{y}(t) - c\dot{y}(t) \quad (1.2)$$

$$c\dot{y}(t) = x(t) - m\ddot{y}(t) - ky(t) \quad (1.3)$$

$$m\ddot{y}(t) = x(t) - c\dot{y}(t) - ky(t) \quad (1.4)$$

则按这三种形式分别画出表示系统内信息传输与交换的方框图，如图 1.5 (a)、图 1.5 (b)、图 1.5 (c) 所示。

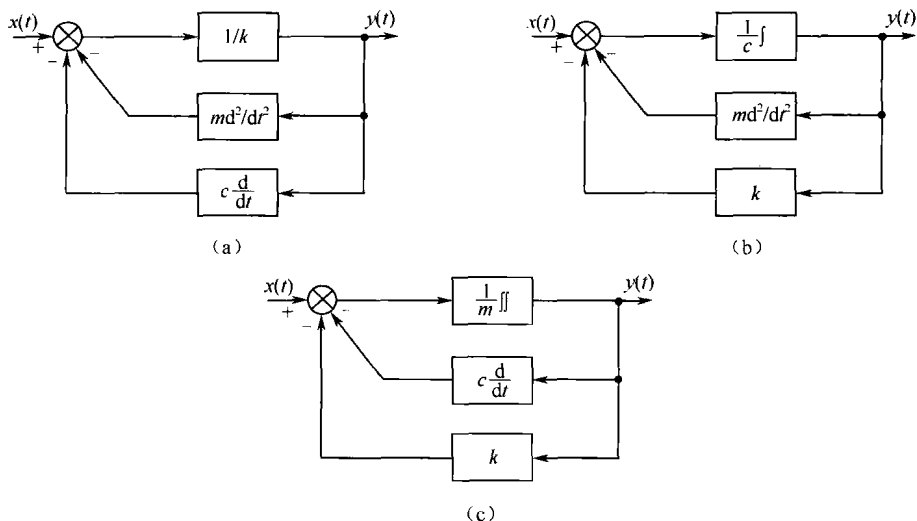


图 1.5 系统内信息传输与交换的方框图

图 1.5 (a) 表示了式 (1.2)。其中方程左侧仍代表系统的输出，那么它是由什么引起的呢？从方程右侧来看，首先仍然是与输入有关的项 $x(t)$ ，即输出仍然是由输入引起的。但是，与输入有关的项先减去了 $m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t)$ ，然后才产生了方程左侧的输出。因此根据式 (1.2) 和图 1.5 (a) 可以认为，输出被反过来传输到输入端，部分地用于控制系统的输入，形成了反馈。

这种反馈作用在式 (1.1) 中并不存在，而在式 (1.3) 和式 (1.4) 中则表现出不同形式的反馈，对应图 1.5 (b)、图 1.5 (c)。可以说，这种反馈显然不是人为设计和加以利用的反馈控制，而是自然存在于系统中的内反馈，它的实质就是系统内元素之间的联系。这种联系作为系统的组成要素之一，自然地存在于系统之中，至于人们是否注意到它们，以何种方式去分析它们，完全取决于研究者的角度。

以微分方程的形式将系统的动力学方程表达出来，揭示了系统自身状态变量之间的联系，也体现了系统自身所存在的反馈。微分方程的解体现了由于系统自身反馈的存在，以及外界对系统的作用而产生的系统的动态历程。

系统的分类

控制系统的种类有很多，从不同的角度，可以对控制进行多种分类。除了下面介绍的几种分类方法，还有很多种分类，比如根据系统元件的物理性质，将控制系统划分为机械控制系统、液压控制系统、气动控制系统和电气控制系统等。

1.2.1 按反馈情况分类

如前所述，有的控制系统利用了反馈控制，而有的控制系统则没有利用反馈控制，基于这种不同，可以将控制系统分为开环控制系统和闭环控制系统。

1. 开环控制系统

如果系统的输出端与输入端之间，不存在人为设计和利用的反馈回路，称为开环控制系统。

在开环控制系统中，不存在人为设计和利用的反馈回路，输出量对系统的输入不产生影响，也可以说输出是直接由输入作用而产生的。开环控制缺乏自动纠正偏差的能力。如果系统因某种非预期的干扰输入而使输出偏离原值时，开环系统自身不能够自动抵抗这种影响，必须靠人工改变输入量的方法进行修正。因此，开环控制系统的控制精度相对较低，但是系统结构简单，因此仍然有大量的应用。

前面的图 1.4 所示系统，即为一个非常简单的开环控制系统。图 1.6 所示为数控机床的开环控制系统。

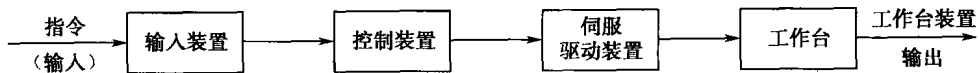


图 1.6 数控机床的开环控制系统

2. 闭环控制系统

如果系统的输出端与输入端之间，存在人为设计和利用的反馈回路，称为闭环控制系统。

在闭环控制系统中，人为地设计和利用了反馈来达到一定的控制目的。如前所述，反馈控制的基本思想是检测偏差并利用偏差达到纠正或消除偏差，因此闭环系统具有比开环系统更强的抗干扰能力。不论是什么原因、何种干扰造成系统的输出产生偏差，系统都能自动地检测到这种偏差，并通过反馈对此偏差进行修正。

在一般情况下，反馈控制的能力是有一定限度的，当偏差超出所能接受的范围时，会引起系统输出的振荡，造成系统的不稳定；修正偏差的速度也是反馈系统的重要性能指标之一，当偏差产生的速度超过其调整速度时，系统也就对它无能为力了。这些内容将在以后的学习中深入分析。

前面图 1.3 所示的自动恒温箱就是典型的闭环控制系统。图 1.7 所示为数控机床的闭环控制系统。

应当指出的是，开环控制系统和闭环控制系统之间的区别并不是绝对的，而是取决于人们研究的角度。对于闭环控制系统，如果简单地研究其输入到输出的流程，不关注中间过程中输出对输入的反馈作用，则可将该系统看做是开环控制系统。

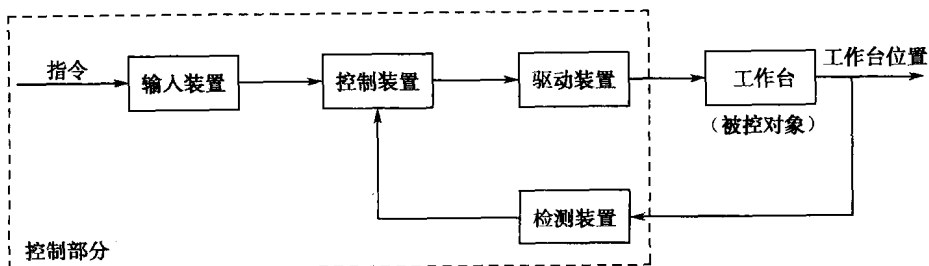


图 1.7 数控机床的闭环控制系统

1.2.2 按输入信号的变化规律分类

在实际应用中，人们根据自动控制系统中输入信号的类型不同，对控制系统提出了不同的工作要求，下面介绍几类常见的控制系统。

1. 恒值控制系统

恒值控制系统的输入量为恒定值，要求系统的输出也为恒定值。如果系统是简单的单输入-单输出系统，那么，恒定的输入产生恒定的输出是极容易的事情。但实际上，系统都不可避免地受到各种外界干扰因素的影响，如果我们仍按单输入-单输出系统来分析，则当系统的输入在一定范围内变化时，要求系统产生相对恒定的输出。

前述自动恒温箱系统就是典型的恒值控制系统，实际上在自然界和人类生活中，广泛地运用着各种恒值控制系统，如人的体温调节系统、电源稳压器、水库蓄水工程等。

2. 随动系统

随动系统也称伺服系统，系统的输入量是未知的，可在一定范围内任意变化，且变化规律也是无法预知的。当输入变化时，要求系统的输出迅速而平稳地跟随其进行变化，准确地复现输入信号的变化规律。随动系统是恒值控制系统的推广，但它不是要使输出保持简单的恒定，而是输出与输入的差值保持相对的恒定，因此比恒值控制系统要更复杂和困难。

随动系统首先是在军用方面发展起来的，如火炮自动瞄准系统、导弹自动导航系统等，后来也应用于民用方面，如仿形机床、伺服电机等。

3. 程序控制系统

程序控制系统的输入量为预先给定的时间函数，系统的输出也按预定的规律发生变化。由于输入和输出均是预知的，因此其变化规律也是预先规定好的，故可以事先编制出相应的控制程序，用程序的运行来控制系统输出量与输入量之间的关系。

恒值控制系统和随动系统一般都是闭环控制系统（当然也有例外），而程序控制系统既可以是开环控制系统，也可以是闭环控制系统。程序控制系统可以简单，也可以复杂，甚至可以由恒值控制系统和随动系统形成复杂的复合系统。

随着计算机技术逐渐成熟和广泛应用，程序控制系统充满了人们的生活，比如当前人们使用的家用电器，许多都具有程序控制系统的功能。

1.2.3 按系统内部的信号类型分类

要对控制系统进行更深入的定量研究，必须对系统建立起相应的数学模型。数学模型是按照系统内部信号的变化规律来建立的。根据系统内部信号的特征，可以将控制系统分为连续控制系统和离散控制系统。

1. 连续控制系统

当系统中传递的信号均为连续时间变量（也称为模拟信号变量）时，称为连续控制系统。或者说，能够用连续函数描述的系统称为连续控制系统。

2. 离散控制系统

当控制系统中的全部或部分物理量随时间变化的规律不能用连续函数描述，而是离散信号（也称数字信号）时，这种系统称为离散控制系统。

计算机技术应用于控制系统之中，其强大的处理功能为控制系统带来了非常广阔的发展空间。但计算机所处理的信号是离散信号，而不是一般系统所使用的连续信号。因此，必须对连续信号进行采样和量化（即 A/D 转换），得到离散的数字信号之后传递给计算机进行处理，处理结果再变成模拟信号（即 D/A 转换）传递到系统。当然，如果系统在整个控制过程中使用的信号均为数字信号，这样的系统是更纯粹的离散控制系统。

1.2.4 按数学模型的类型分类

对于控制系统来说，根据其动力学方程是否满足线性要求，还可将连续控制系统分为线性系统和非线性系统。

1. 线性系统

能够用线性微分方程描述的系统，称为线性系统。

前面研究过的图 1.4 所示系统的微分方程为 $m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = x(t)$ ，即为典型的线性系统。

一般系统的微分方程可表示为如下形式：

$$a_n y^{(n)} + a_{n-1} y^{(n-1)} + \cdots + a_1 \dot{y} + a_0 y = b_m x^{(m)} + b_{m-1} x^{(m-1)} + \cdots + b_1 \dot{x} + b_0 x \quad (1.5)$$

且 $y(0) = y_0, \dot{y}(0) = \dot{y}_0, \cdots, y^{(n-1)}(0) = y_0^{(n-1)}$ ，均为已知。

当上面微分方程的系数 $a_n, a_{n-1}, \cdots, a_0, b_m, b_{m-1}, \cdots, b_0$ 均不包含输出信号 $y, \dot{y}, \cdots, y^{(n)}$ 以及输入信号 $x, \dot{x}, \cdots, x^{(m)}$ 时，微分方程中所有的项均为输入信号（及其微分）或输出信号（及其微分）的一次项，该微分方程称为线性微分方程，用该微分方程描述的系统称为线性系统。

线性系统最重要的特点是满足叠加性（也称叠加原理）。因此，也可以用是否满足叠加原理作为系统是否属于线性系统的判断标准。

叠加原理可表述如下：若对一线性系统输入 $x_1(t)$ 时输出为 $y_1(t)$ ，输入 $x_2(t)$ 时输出为 $y_2(t)$ ，则对该系统输入 $ax_1(t) + bx_2(t)$ 时（式中 a, b 均为常数），系统的输出为 $ay_1(t) + by_2(t)$ 。

线性系统还可以分为线性定常系统和线性时变系统。

当式 (1.5) 所给系统为线性系统时，如果这些系数 $a_n, a_{n-1}, \cdots, a_0, b_m, b_{m-1}, \cdots, b_0$ 也满足均与时间 t 无关，即它们都是固定的常数，则该系统称为线性定常系统。

反之，若线性系统的系数 $a_n, a_{n-1}, \cdots, a_0, b_m, b_{m-1}, \cdots, b_0$ 中包含时间 t 的函数，即某些系数会随时间 t 的变化而变化，则该系统称为线性时变系统。

2. 非线性系统

不能用线性微分方程描述的系统，称为非线性系统。

非线性系统不满足叠加原理，而且在本质上与线性系统有很大的区别，会产生一些线性系统中没有的现象，如极限环、跳跃谐振等，线性系统的分析方法完全不能用于对非线性系统进行研究。

然而，实际存在的系统没有绝对的线性系统，其中或多或少都存在一些非线性因素，但在

一定范围内,可忽略掉次要的非线性因素,或对局部非线性因素进行线性化处理,把系统转化成线性模型来进行研究。而对于本质非线性的系统必须用非线性理论进行研究。

连续控制系统可以分为线性系统和非线性系统,线性系统又包括线性定常系统和线性时变系统。经典控制理论主要研究线性定常系统,在本书的前6章中,若无特别说明,所研究的对象均为线性定常连续系统。

离散系统也可以分为线性离散系统(包括线性定常离散系统和线性时变离散系统)和非线性离散系统,在7.1节中,我们将会对线性定常离散系统进行初步的分析。

对控制系统的基本要求

控制系统是多种多样的,要评价一个控制系统的好坏,也有很多不同的标准和指标。但是,一般控制系统都应当满足下面三条基本要求:稳定性、快速性和准确性。

1.3.1 稳定性

稳定性是指系统抵抗动态过程的振荡倾向和系统能够恢复平衡状态的能力。稳定性是对控制系统的首要要求,也是控制系统工作的必要条件。

由于控制系统及其元件都存在惯性,内部能量转换过程比较复杂,在发生运动的动态历程中会引起一定的振荡,当系统的各个参数分配不当时,将会引起系统的过度振荡,甚至越来越远离平衡位置,而失去正常工作的能力。因此,只有具备稳定性的系统才能够正常工作,它是系统能否实际应用的前提,下面的快速性和准确性都是当系统稳定时提出的。

1.3.2 快速性

快速性是指当系统的输出量与输入量之间产生偏差时,消除这种偏差的快速程度。

由于系统存在惯性,而且又受到能量限制,任何系统都不可能具有无限的调节能力,系统的各种量值(如位移、电流、温度等)的变化一般不可能发生突变,因此,系统从一个平衡状态变化到另一个平衡状态,需要一定的过渡过程,过渡过程时间的长短就用于衡量系统的快速性。

1.3.3 准确性

准确性是指当系统调整的过渡过程结束后,系统输出量的实际值与期望值之间的偏差程度。

系统的准确性一般用稳态误差来衡量,反映了系统的稳态精度。理想的系统,其稳态误差可能为0,但这对实际系统来说是不可能的。

不同的控制系统,其各项基本要求的侧重点也各不相同。例如,随动系统一般要求较高的快速性,而调速系统则更重视稳定性的要求。同时,对于同一个系统,其稳定性、快速性和准确性之间也是相互关联、相互制约的。提高系统的快速性,可能会使系统造成较严重的振荡;提高系统的稳定性,则可能影响系统的快速性和准确性。

控制工程的发展

控制工程作为一门学科，它的形成和迅速发展，只是近六七十年的事。但是，早在控制理论形成之前，人们已经在科学实践中利用了自动控制的原理。

公元1027年，宋代燕肃所造的指南车就是一个典型的运用了自动控制原理的恒值控制系统。当指南车向左或向右转弯时，通过车上的传动装置，车上的木仙人会自动向相反方向转弯，其转角恰能抵消指南车转弯的影响，从而使木仙人所指的方向保持不变。这是一个很有特点的恒值控制系统，利用了开环的顺馈控制原理来实现恒值控制。当然，由于该系统没有利用反馈控制，因此抗干扰能力较差。

公元1086—1089年，苏颂和韩公廉制成了一座水运仪象台。该装置利用水作为动力驱动，为了保证枢轮做恒速回转，利用了张衡的铜壶滴漏原理，通过反馈控制的原理实现了恒值控制系统。

19世纪，欧洲的工业革命促进了自动控制技术的发展，也使得经典控制理论逐步形成。1788年，瓦特（James Watt）发明了蒸汽机离心调速器，这是一个典型的反馈控制的恒值控制系统。1868年，麦克斯韦尔（J. C. Maxwell）发表了《论调速器》一文，首次提出了“反馈控制”的概念。劳斯（E. J. Routh）和赫尔维兹（A. Hurwitz）分别于1884年和1895年提出了有关线性系统稳定性的代数判据，使自动控制技术前进了一大步。1923年，海韦斯德（Heaviside）提出设计系统的算子法。1932年，奈奎斯特（H. Nyquist）研制出电子管振荡器，同时提出了著名的Nyquist稳定性判据。随后，伯德（H. W. Bode）总结出负反馈放大器，并将Nyquist判据引申为Bode判据。

第二次世界大战期间，由于建造飞机自动驾驶仪、雷达跟踪系统、火炮瞄准系统等军事装备的需要，推动了控制理论的发展。美国MIT伺服机构实验室对自动调节器与反馈放大器进行了总结，提出了反馈控制的数学基础；与此同时，随动系统在军事部门中迅速发展。1945年，第一本经典控制理论的著作《伺服机构》出版。与此同时，诺伯特·维纳（Norbert Wiener）参加了自动控制的研究工作，他将火炮自动打飞机的行为与猎人狩猎的行为进行对比，得到了反馈的重要概念。1948年，他的名著《控制论：或关于在动物和机器中控制和通信的科学》（常简称为《控制论》）出版，标志着形成了完整的经典控制理论。1950年，伊文斯（W. R. Evans）提出了根轨迹法，能简便地寻找特征方程的根，进一步充实了经典控制理论。

20世纪50年代，随动系统理论从军用逐步向民用方面转移，控制理论得到进一步应用。例如，在化工、炼油、冶金等部门，实现了对过程的控制，解决了压力、温度、流量与化学成分的控制问题。我国学者钱学森在20世纪50年代初期，出版了《工程控制论》，从控制论这一总题目中，将已被当时科学技术与工程实践所证明了的部分分离出来，创立了“工程控制论”这门学科。

20世纪50年代及其之前的控制理论属于经典控制理论（也称古典控制理论）。它主要是在复域和频域内利用传递函数或频率特性来研究与解决单输入-单输出线性系统的稳定性、快速性与准确性的问题。

20世纪50年代末到60年代初，一方面由于空间技术的发展与军事工业的需要，对自动控制系统的要求越来越高；另一方面由于电子计算机技术逐渐成熟，并与控制理论相互融合，从而诞生了现代控制理论。本请在线购买：www.ertongbook.com