



普通高等教育“十二五”规划教材

JIXIE KONGZHI GONGCHENG JICHU

机械控制工程基础

向玲 主编

唐中燕 张红莲 郑海明 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

JIXIE KONGZHI GONGCHENG JICHU

机械控制工程基础

主 编 向 玲
副主编 唐中燕 张红莲 郑海明
编 写 陶善宏
主 审 范孝良



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。本书共分8章，主要内容包括概述、拉普拉斯变换、物理系统的数学模型及传递函数、控制系统的时域分析、控制系统的频域分析、系统的稳定性、根轨迹法和控制系统的校正。本书在介绍基本概念、基本原理和基本方法的基础上，紧密结合控制工程和机械工程的应用实例，以期实现数理知识和专业知识之间的融会贯通。建议读者在学习过程中，采用 MATLAB 语言的控制工具箱和 Simulink 图形仿真工具对控制系统进行分析和研究。

本书可作为高等学校机械设计制造及其自动化专业、机械电子工程专业的本科教材，也可供其他专业师生和工程技术人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械控制工程基础/向玲主编. —北京: 中国电力出版社, 2011.5
普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-1658-4

I. ①机... II. ①向... III. ①机械工程—控制系统—高等学校—教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 083431 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011年6月第一版 2011年6月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 9.5印张 229千字
定价 16.8元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

自动控制在现代工业、农业、国防和科学技术方面起着十分重要的作用,应用自动控制技术能使空间技术、现代武器和自动驾驶等现代科技得以飞速的发展,使机器设备和管理机构高速、高效地运行。控制工程基础课程是机械类专业重要的学科基础课之一。本课程的任务是使学生获得控制工程基本理论和基本知识;掌握系统数学模型的建立方法,控制系统时域、频域分析方法;了解控制系统校正的基本概念和方法,为学习后续专业课程打下基础。

本书第1章介绍了控制系统的基本概念,主要包括控制系统的基本原理、组成、分类和性能要求等;第2章介绍了学习本门课程的数学工具——拉普拉斯变换;第3章介绍了控制系统的传递函数,主要有传递函数的概念、性质及其求解方法,典型环节的传递函数,系统传递函数的图解方法等;第4章介绍控制系统的时域分析,主要介绍一阶、二阶系统的阶跃响应分析、时域性能指标,系统稳态误差的概念及其物理意义等;第5章介绍控制系统的频域分析,主要介绍频率特性的概念及其物理意义,奈奎斯特图和伯德图两种图解方法,以及频域性能指标等;第6章介绍控制系统的稳定性,主要介绍稳定的条件,劳斯—胡尔维茨稳定性判据、劳斯稳定性判据和奈奎斯特稳定性判据等;第7章简要介绍了根轨迹的基本内容;第8章介绍控制系统的校正,主要有校正的概念、常用校正方法和系统校正设计等。各章节都选编了一定数量的习题。建议读者在学习过程中,采用 MATLAB 语言的控制工具箱和 Simulink 图形仿真工具对控制系统进行分析和研究。

本书由华北电力大学向玲任主编,唐中燕、张红莲、郑海明任副主编。具体编写分工如下:陶善宏编写第1章,向玲编写第2、第5、第7、第8章,唐中燕编写第3章,张红莲编写第4章,郑海明编写第6章。全书由向玲统稿。

本书由华北电力大学范孝良教授主审。审稿老师提出了很多宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中难免有不妥或错漏之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2011年6月

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 控制理论学科的发展概况	1
1.2 控制理论的研究对象	2
1.3 机械自动控制系统的工作原理及基本结构	4
1.4 自动控制系统的基本类型	6
1.5 研究与学习方法.....	11
习题	12
第 2 章 拉普拉斯变换	14
2.1 拉普拉斯变换的概念.....	14
2.2 拉普拉斯变换的性质.....	16
2.3 拉氏变换的反变换.....	22
习题	24
第 3 章 物理系统的数学模型及传递函数	25
3.1 系统的数学模型.....	25
3.2 传递函数.....	29
3.3 方框图.....	37
3.4 物理系统传递函数的推导.....	42
习题	48
第 4 章 控制系统的时域分析	51
4.1 时间响应的概念.....	51
4.2 一阶系统的时间响应.....	54
4.3 二阶系统的时间响应.....	56
4.4 瞬态响应的性能指标.....	61
4.5 稳态误差分析与计算.....	64
习题	71
第 5 章 控制系统的频域分析	73
5.1 频率响应与频率特性.....	73
5.2 频率特性的图示法.....	78
5.3 典型环节的频率特性.....	80
5.4 控制系统的开环频率特性.....	87
5.5 闭环频率特性.....	94
习题	95

第 6 章 系统的稳定性	97
6.1 系统稳定的条件	97
6.2 劳斯—胡尔维茨稳定性判据	99
6.3 奈奎斯特稳定判据	104
6.4 系统的相对稳定性	113
习题	116
第 7 章 根轨迹法	119
7.1 根轨迹与根轨迹方程	119
7.2 根轨迹的绘制	122
7.3 根轨迹法在性能分析中的应用	127
习题	130
第 8 章 控制系统的校正	131
8.1 校正的概述	131
8.2 串联校正	133
8.3 PID 校正	140
习题	145
参考文献	146

第1章 概 述

生产过程的自动化能提高产品质量,增加产量,改善劳动条件。自动控制在现代工业、农业、国防和科学技术方面起着十分重要的作用,任何技术设备、机器和生产过程都必须按预定的要求运行。例如,要想使发电机正常发电,就必须保持其输出电压恒定,尽量不受负荷变化和原动机转速波动的影响;要想使数控机床加工出高精度的零件,就必须保证其刀架的位置准确地跟随指令进给;要想使热处理炉提供合格的产品,就必须严格控制炉温等。其中,发电机、机床、烘炉,就是工作的机器设备;电压、刀架位置、炉温,是表征这些机器设备工作状态的物理参量;而额定电压、进给的指令、规定的炉温,就是对物理参量在运行过程中的要求。

机械工业是一个国家的基础工业,控制理论应用到机械工程领域,体现为机械控制理论。这是一门新兴学科,也是一门边缘学科,它研究应用控制理论的基本原理来解决机械工程中的实际技术问题。传统的机械产品正在向机电一体化(Mechatronics)方向发展。机电一体化产品或系统的显著特点是控制自动化。机电控制型产品技术含量高,附加值大,在国内外市场上具有很强的竞争优势,形成机电一体化产品发展的主流。当前国内外机电结合型产品,如典型的工业机器人、数控机床、自动导引车等,都广泛地应用了自动控制理论。

1.1 控制理论学科的发展概况

控制理论的理论基础是工程控制理论。早在一千多年前,我国就先后发明了铜壶滴漏计时器、指南针、天文仪器等自动控制装置,这些发明促进了当时社会经济的发展。1788年瓦特(J. Watt)发明了蒸汽机飞球调速装置,至今控制工程已有二百多年的历史。然而,控制理论作为一门学科,它的形成及迅速发展却是最近几十年的事。

1868年,麦克斯威尔(J. C. Maxwell)发表论文《论调速器》,首先提出“反馈控制”的概念,对控制系统从理论上加以提高;劳斯(E. J. Routh)和胡尔维茨(A. Hurwitz)分别于1884年和1895年先后独立提出判别线形系统稳定的代数判据;1932年,奈奎斯特(H. Nyquist)提出了著名的奈奎斯特稳定性判据;此后,波德(H. W. Bode)总结出负反馈放大器,推动了控制理论的发展。

第二次世界大战前,控制系统的设计因缺乏系统的理论指导而多采用试凑法。第二次世界大战期间,军事工业飞速发展,相继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自动控制系统的需要,推动了控制理论的飞跃发展。1948年,威纳(N. Wiener)发表了著名的《控制论》(Cybernetics),基本形成经典控制理论,使控制工程有了理论支撑。1950年,埃文斯(W. R. Evans)提出了根轨迹法,进一步充实了经典控制理论。1954年,钱学森发表英文版《工程控制论》,奠定了工程控制理论的技术科学基础,使控制理论又向前大大发展了一步。经典控制理论以传递函数为基础,主要研究单输入—单输出系统的分析和控制问题。

20世纪50年代末至60年代,由于空间技术和导弹制导、数控技术、航空、航天的发展需要和计算机技术的成熟,产生了现代控制理论,并形成了一些体系和新的分支。现代控制理论以状态空间法为基础,在时间域内分析和研究多输入—多输出、时变、非线性系统的最优控制问题。

1.2 控制理论的研究对象

自动控制就是在没有人直接参与的情况下,利用外加的设备或装置,使机器、设备或生产过程某个工作状态或物理量自动地按预定的规律运行。

通常,在自动控制技术中,把这些工作的机器、设备或生产过程称为被控对象,把表征这些机器设备工作状态的物理量称为被控量,而对这些物理参数的要求值称为给定值或希望值(或输入量)。

1.2.1 控制理论的研究对象

自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学。它的发展初期是以反馈理论为基础的自动调节原理,主要用于工业控制。第二次世界大战期间,为了设计和制造飞机及船用自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达跟踪系统以及其他基于反馈原理的军用设备,进一步促进并完善了自动控制理论的发展。到战后,已形成完整的自动控制理论体系,这就是以传递函数为基础的经典控制理论。经典控制理论主要研究单输入—单输出,线性定常数系统的稳定性、时间域和频率域中系统的运动特性(见频率响应)、控制系统的设计原理和校正方法(见控制系统校正方法),它的数学基础是拉普拉斯变换。采用输入与输出间的数学关系(特别是传递函数)作为系统的数学模型,分析和综合系统的基本方法是频率响应和根轨迹法。经典控制理论包括线性控制理论、采样控制理论、非线性控制理论三个部分。早期,这种控制理论常被称为自动调节原理,对于解决简单的自动控制系统的分析和设计问题是很有成效的,在第二次世界大战期间及战后年代的火力武器和工业过程的自动化方面发挥过重要的作用,至今仍不失应用价值。

20世纪60年代初期,自动控制理论跨入现代控制理论。它主要研究具有高性能、高精度的多变量变参数的最优控制问题,基本的分析和综合方法是时间域方法,各类系统数学模型的建立及其理论分析涉及现代数学的大部分分支。

现代控制理论中首先得到透彻研究的是多输入多输出线性系统,其中特别重要的是控制系统基本理论的建立,如可控性、可观性、实现理论、典型型、分解理论等,使控制由一类工程设计方法提高为一门新的科学。同时,为满足从理论到应用,在高水平上解决很多实际应用中提出控制问题的需要,非线性系统、最优控制、自适应控制、辨识与估计理论、卡尔曼滤波、鲁棒控制等发展成为成果丰富的独立学科分支。

现代控制理论的出现丰富了自动控制理论的内容,也扩大了所能处理的控制问题的范围。在航空和航天技术中,现代控制理论获得了成功应用。

1.2.2 机械工程控制理论的研究对象与任务

在工程和科学的发展进程中,自动控制理论及其实践起着重要的作用,也同样促进了各种机械设备自动化的发展。机械控制系统由机械传动系统、工作机构、流体动力系统、电气系统及计算机组成。机械控制系统具有确定的功能,例如,按一定的精度要求控制机器工作

机构的位移、速度、运动轨迹等，为使机器满足某一目标函数，保持最优运行状态，调整机器的运行参数（速度、加速度、负载力或转矩、工作机构的进给量等）；为使机器具有对环境变化的自适应能力，实现自适应控制，需要自动调整控制器的结构参数，按预先设定的函数、运动规律控制机器或机组的运动，实现程序控制。随着计算机科学的发展，计算机已日益广泛地应用于各类机械控制系统中。将计算机引入机械系统，对机械科学的发展产生了深远的影响。它能够使机器充分发挥其生产能力，最大限度地降低能耗，提高机器的可靠性，实现机器工况的在线监视和故障诊断，促进了各类智能机器人的发展，是现代机械工程的发展方向。

以机械工程技术为对象的控制理论问题均属于机械控制工程所研究的对象。同其他技术科学一样，机械工程学的主要任务之一就是要了解和掌握机械工程系统及机械生产过程的内部规律，即系统和过程的动态特性；要研究其内部的信息传递、变化规律及受到外激励时的反应，从而决定控制它们的手段或策略，以便达到人们所期望的最佳状态。这些也正是机械控制工程所研究的主要内容。可见，机械控制工程的研究对象是机械工程控制系统（包括控制过程），它的研究内容主要是机械工程系统（过程）的动态分析和动态优化的方法。

现代化工业生产的主要方向是探求最大效率、最低成本、最高产品质量、最低能耗、最大可靠性等最佳状态，对于机械系统和过程（如生产过程、切削过程、锻压、焊接、热处理过程等）也要求最佳控制。因此，控制理论在机械系统及机械工业生产中得到了广泛的应用，从而形成了一门新型科学——机械控制理论（Mechanical Engineering Cybernetics），或称机械控制工程（Mechanical Control Engineering）。

机械控制理论的研究对象是机械工程技术中广义系统的动力学问题。具体地讲，机械控制理论是研究系统及其输入、输出三者之间的动态关系，也就是研究机械工程广义系统在一定的外界条件（输入或激励）作用下，从系统的一定初始条件出发，所经历的整个动态过程。这个动态过程取决于内部的固有特性（即由系统的结构与参数所决定的特性）。例如，在机床数控技术中，调整到一定状态的数控机床就是系统，数控指令就是输入，数控机床的加工运动就是输出。这里系统是由相互联系、相互作用的若干部分构成且有一定运动规律的一个有机整体。输入是外界对系统的作用，输出是系统对外界的作用。通常机械控制理论简称为机械控制工程，其所研究的系统可大可小、可繁可简，完全由研究的需要而定，因而称为广义系统。

由此可见，就系统及其输入、输出三者之间的动态关系而言，机械控制理论主要研究解决以下几个方面的问题。

(1) 当系统已定，输入已知时，求系统的输出（响应），并通过输出研究系统的各种性能，这是系统分析问题。

(2) 当系统已定，系统的输出也已给定时，要确定系统的输入，且所确定的输入应使出尽可能符合给定的最佳要求，这是最优控制问题。

(3) 当输入已知，输出也给定时，要确定系统，使系统输出尽可能符合给定的最佳要求，这是最优设计问题。

(4) 当输入与输出均已知时，求系统的结构和参数，即建立系统的数学模型，这是系统辨识或系统识别问题。

(5) 当系统已定输出已知时，要识别输入或输入中的有关信息，这是滤波与预测问题。

从本质上看,问题(1)是已知系统与输入求输出,问题(2)和(5)是已知系统与输出求输入,问题(3)和(4)是已知输入与输出求系统。

本书主要是以经典控制理论来研究问题(1),即通过已知系统与输入求输出,来进行系统分析方面的问题研究。

由于学时所限,本书主要介绍经典控制理论。对上述内容书中没有涉及的部分,请读者参看其他有关书籍。

1.3 机械自动控制系统的的工作原理及基本结构

1.3.1 反馈控制原理

下面举例来说明反馈控制这个控制理论最根本的思想及有关的基本概念。

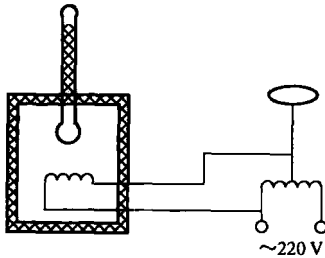


图 1-1 人工炉温控制系统原理图

图 1-1 所示为一个恒温炉人工控制系统的原理图。系统由调压器、恒温炉、温度计和人的眼、脑、手等部分组成,其功能是保持实际炉温等于期望炉温。图 1-2 所示为该系统的职能方块图,它可以清楚地表示各个组成部分的作用、相互连接关系、信息传递的路线和流向。恒温炉是被控对象。实际炉温是被控量,表示恒温炉状态的一种信息,称为系统的输出信号,或简称输出,即恒温炉的输出。期望炉温是一种控制信息,称为系统的输入信号,或简称输入,即对人脑

的输入。实际炉温由温度计测出,并由人眼返回传递到系统的输入端(人脑),再输入到系统中去。信息的这种由输出端返回到输入端的传递方式称为信息的反馈。反馈到输入端的信息称为反馈信号,简称反馈。在人脑中,反馈与输入相比较即相减,这种与输入相减的反馈称为负反馈。比较的结果称为偏差信号,简称偏差,即偏差等于输入(期望炉温)减去反馈(对本例而言就等于实际炉温)。偏差由人脑输出并控制手去调整调压器。如果实际炉温较低,即偏差为正,则适当右移调压器手柄以提高加热电阻丝两端的电压,从而使实际炉温升高;反之,则向相反方向调整调压器。如果实际炉温等于期望炉温,即偏差为零,则不移动调压器手柄。因此,无论是由于哪一种扰动因素,如环境温度变化、电源电压波动或系统内部参数不稳定等引起的,只要是实际炉温不等于期望炉温,就会产生纠正偏差的控制作用,直至实际炉温等于期望炉温,即偏差消失为止。这种建立在负反馈基础上的利用偏差去纠正偏差的控制原理称为反馈控制原理。

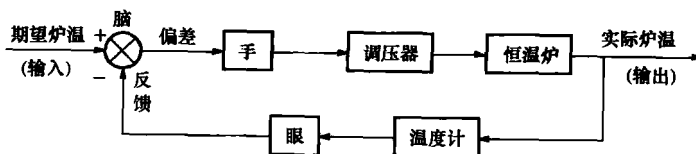


图 1-2 人工炉温控制系统方块图

如果用控制器来代替人的作用,就可以得到一个如图 1-3 所示的恒温炉自动控制系统。热电偶将实际炉温转换为电压 U_0 并反馈到系统的输入端。给定电位器的电压 U_i 作为系统的

输入,按实际炉温等于期望炉温时进行整定。因为 U_i 和 U_b 的电路反接,所以它们是相比较(相减)的关系,比较的结果即为偏差电压, $U_e=U_i-U_b$ 。当实际炉温不等于期望炉温时, $U_e \neq 0$,经过放大器放大后使电动机转动,并通过机械传动链使调压器滑臂移动,调整加热电阻丝两端的电压,使实际炉温趋于期望炉温,偏差电压 $U_e \rightarrow 0$ 。可见,这个恒温炉自动控制系统也是利用反馈控制的原理。

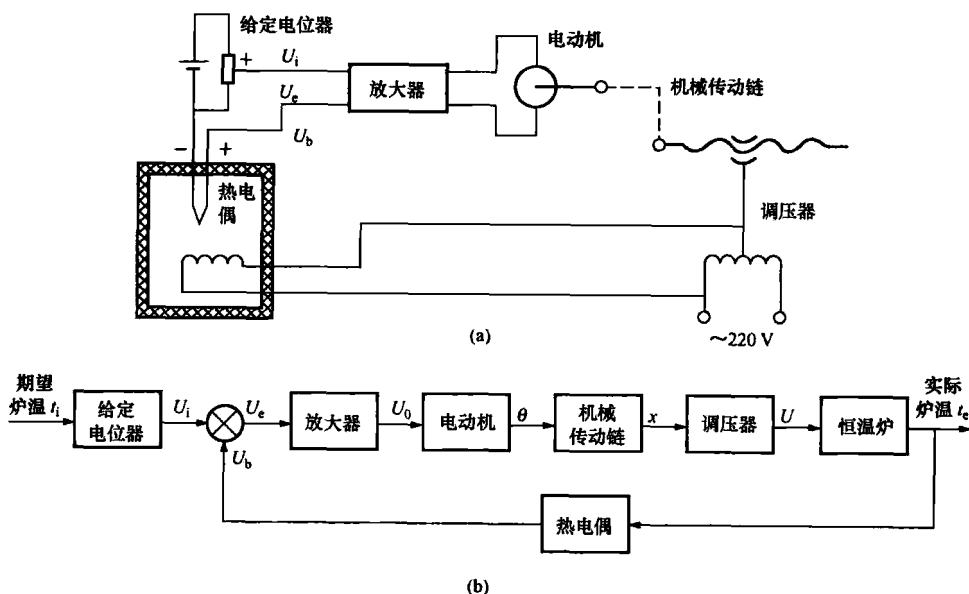


图 1-3 恒温炉自动控制系统
(a) 系统原理图; (b) 职能方块图

如果上例中的反馈不存在,或者是调配不当的负反馈,甚至是反馈与输入是相加强的关系,实际炉温将会出现什么情况?

除了工程上的许多系统是利用反馈控制的原理以外,还有许多生物系统、经济系统和社会系统也都存在着反馈控制的情况,因此,它们都能用控制理论的原理和方法进行研究。

1.3.2 有关概念和术语

(1) 控制:指根据某种原理或方法使被控对象的被控量按预期规律变化的操纵过程。

(2) 系统:指由相互制约的各个部分组成的具有一定功能的整体。系统的组成部分可以是具体的结构,也可以是抽象的概念或关系。这里所指的系统是广义的系统。广义系统可能是十分具体的系统,也可能是比较抽象的过程或现象。系统各组成部分之间的相互制约关系,或者说它们之间所具有的一定规律的联系,实质上就是系统各组成部分之间有着某种信息的转换、传递和反馈。正因为如此,系统在输入的作用下才表现出一定的运动状态,形成系统及其输入、输出三者之间一定的动态关系。

为了实现某种控制目的而构成的系统称为控制系统。人不直接参与操纵过程的控制系统称为自动控制系统。

(3) 信息:指能表达一定含义的信号、消息、情报、密码和图像。

(4) 输入:指系统接受到的对其状态或被控量有影响或控制作用的信息。对控制系统而言,又可称为控制输入、参考输入或给定量。控制输入是期望输出的函数(如恒温炉自动控

制系统中的整定电压), 当函数关系等于 1 时, 控制输入就等于期望输出 (如恒温炉人工控制系统中向人脑输入的期望炉温)。

(5) 输出: 指系统表现出来的受输入影响或控制的状态。输出也是一种信息, 常称为响应。对控制系统而言, 输出就是被控量。

输入和输出的概念也可用于系统中的组成部分。如图 1-3 所示, 放大器的输入是偏差电压 U_e , 输出是放大后的电压 U_o ; 而对放大器和电动机而言, 虽然输入仍是 U_o , 但输出则是电动机轴的角位移 θ 。

(6) 扰动: 指对系统的输出产生不利影响的信息。由系统内部参数变化引起的扰动称为内扰, 由系统外部环境、负载或能源变化产生的扰动称为外扰。外扰也可以认为是一种输入。其实, 若系统有几个输入, 则根据讨论的需要, 除了认定是输入的以外, 其余的就都可以当做是扰动。

(7) 反馈: 指输出的全部或一部分, 直接或经过转换后返回传递到输入端, 再向系统输入的信息。反馈是输出的函数, 并与输入的量纲相同。

与输入保持相比较或相减关系的反馈称为负反馈, 反之称为正反馈。实质上, 负反馈是减弱输入的作用, 而正反馈则相反。由系统的输出端返回到系统输入端的反馈称为主反馈, 否则称为局部反馈。

(8) 固有反馈 (内在反馈): 指由于系统本身固有的内在相互作用而形成的反馈。这种反馈不是为了某种控制目的而特意设置的, 因此往往不易被察觉。如图 1-4 所示的车削过程, 从其系统原理图 1-4 (a) 上看, 似乎不存在反馈。但是, 如果以名义进给量 s 为输入、径向切削力 P_y 为输出, 在深入分析后可知, 由 P_y 及其反作用引起的机床—刀具—工件的弹性变形 y 就是一种固有反馈。因为影响 P_y 的实际切削厚度 a 在数值上等于 $s - y$, 即影响输出 P_y 的不仅有输入 s , 还有由输出 P_y 经过转换后反馈回来的 y 。这一点在画出系统的职能方块图 1-4 (b) 后便可清楚地显示出来。由于切削过程中存在着这种固有反馈, 所以在一定条件下将导致径向切削力持续周期变化, 从而引起所谓的切削过程自激振动, 使加工表面质量恶化。上例主要只是为了说明固有反馈的概念, 因此作了较大程度的简化。对切削过程固有反馈的深入分析请参阅有关文献。

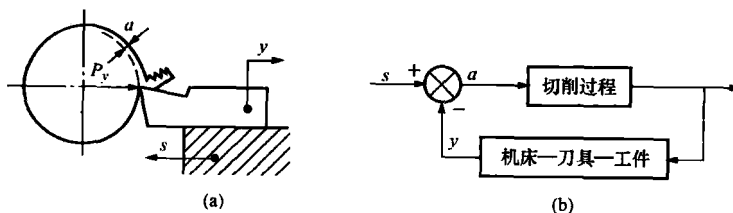


图 1-4 车削过程示意图
(a) 系统原理图; (b) 职能方块图

1.4 自动控制系统的基本类型

由前述可知, 自动控制系统是利用控制器在无人直接参与的情况下, 使被控对象的被控量按预期规律变化的控制系统。其分类方法很多, 下面介绍几种常见的分类方法。

1.4.1 按反馈的情况分类

1. 闭环控制系统

控制系统里,把输出量直接或间接地反馈到输入端,形成闭环,参与系统的控制,称为闭环控制系统或反馈控制系统。根据控制对象和使用的元件不同,控制系统有各种不同的形式,但概括起来,主要由以下基本环节组成,如图1-5所示。

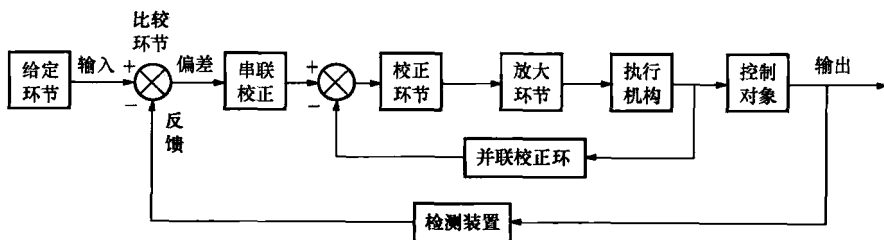


图 1-5 闭环控制系统组成

(1) 控制对象。控制对象也称调节对象,是指要进行控制的设备或过程。相应地,控制系统所控制的某个物理量,就是系统的输出量或被控制量,如炉温。闭环控制系统的任务就是控制这些系统输出量的变化规律,以满足生产工艺的要求。如图1-3(a)所示,恒温炉是被控对象,实际炉温则是被控量。

(2) 执行机构。执行机构一般由传动装置和调节机构组成,直接作用于控制对象,使被控制量达到所要求的数值。如图1-3(a)所示的电动机及机械传动链。

(3) 检测装置。检测装置用来检测输出量(即被控制量),并将其转换为与输入量同一物理量的装置,如图1-3(a)所示的热电偶。检测装置的精确度和特性直接影响控制系统的控制品质,是构成自动控制系统的关键性元件,一般要求反馈元件的测量精度高,反应灵敏,性能稳定。

(4) 给定环节。给定环节是设定被控量给定值的元件,如图1-3(a)所示的给定电位器。给定环节的精确度对被量的控制精确度有较大影响,在要求控制精确度高时,常用数字给定装置。

(5) 比较环节。比较环节是将给定量与所反馈的被控制量进行比较,确定两者之间的偏差。如图1-3(a)所示的输入电压 U_i 和反馈电压 U_b 的反接电路。该偏差量由于功率较小或者由于物理性质不同,还不能直接作用于执行机构,所以在执行机构和比较环节之间还有中间环节。另外,从广义上讲,这类元件是对信息进行合成的元件,所以在方块图中又常称其为相加点。

(6) 中间环节。中间环节一般是放大元件,将偏差信号变换成适于控制执行机构工作的信号,如图1-3(a)所示的放大器。根据控制的要求,中间环节可以是一个简单的环节,如晶体管放大器和可控硅装置;或者是将偏差信号变换为适于执行机构工作的物理量,如液压伺服放大器。常常除了要求中间环节能将偏差信号放大以外,还希望它能按某种规律对偏差信号进行运算,用运算的结果控制执行机构,以改善控制量的稳态和暂态性能,这种中间环节称为校正环节,如电子调节器、气动调节器等。

在控制系统中,常把比较环节、放大装置、校正环节合在一起称为控制装置。

图1-5所示的系统结构图中,清楚地表明了各环节之间的关系和信号传递方向,在正

向通道里，总是前一环节的输出量影响后一环节，而后一环节的输出量不影响前面的环节。如果在实际的环节中存在输出对输入的影响，那么这一影响可以用反馈的形式表示出来，这种反馈称为局部反馈，而系统输出量的反馈称为主反馈。由输入端至输出端的信息通路称为前向通路，由输出端通过反馈元件又返回到输入端的信息通路称为反馈通路。前向通路和反馈通路连起来便形成信息传递的闭合回路，简称回路。若主反馈通道中不设检测装置，即输出为主反馈信号，称为单位反馈。有时，为了改善系统中某些环节的特性，如改善环节的非线性特性、减少环节的延迟等，在部分环节之间附加局部反馈。

图 1-5 所示为按照偏差原则构成的系统的典型结构图，不管外部扰动或内部扰动什么时候发生，只要出现偏差量，系统就利用这一偏差量取纠正输出量的偏差。

闭环控制系统的特点就是引入主反馈利用输出来影响控制作用。这里，主反馈是负反馈，信息传递构成闭合回路，所以是闭式控制方式。因此，当实际输出由于扰动而偏离期望输出时，闭环控制系统本身就可能有自行纠偏的能力，所以可采用精确度不太高、价格比较低的元件来构成精确的控制系统。

但是闭环控制系统的组成一般比较复杂，一旦参数调配不当，由于存在信息传递的主回路，就会引起输出持续振荡甚至发散的不稳定现象。

闭环控制系统常用于实际输出不难测得，而扰动较大且不能预知其变化规律或不可测的场合。特别是当期望输出不能预知时，就只能采用闭环控制系统。至于它的稳定性问题，则可应用控制理论进行分析并指出解决的途径。

2. 开环控制系统

开环控制系统的特点就是输出不影响输入，信息传递不构成闭合回路。因此，当实际输出由于扰动而偏离期望输出时，开环控制系统本身不可能有自行纠偏的能力。但是它的组成一般比较简单，且不存在像闭环系统那样的由于有了主回路而带来的较为复杂的稳定性问题。

开环控制系统常用于预知期望输出且扰动很小，或扰动虽大但预知其变化规律从而能够加以补偿的场合。按扰动补偿的原理，将扰动测出并经过适当变换后再输入系统，这样就可以利用扰动产生的控制作用来抑制扰动对输出的不利影响，见图 1-6。注意，这种将扰动测出又再输入系统的信息通路不是反馈通路，并没有形成信息传递的闭合回路，所以仍然属于开式控制方式。

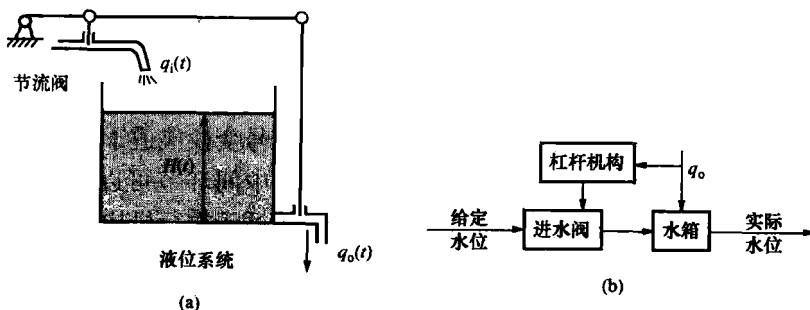


图 1-6 水箱开环控制原理图

开环控制系统的精确度，取决于系统的校准精确度和各组成元件性能参数及外界条件的

稳定程度，还取决于对扰动采取补偿措施的效果。不能不加分析地一概认为开环控制系统的精确度就一定不高。

如果开环控制系统和闭环控制系统都能满足控制性能的要求，则应根据经济性或其他方面的考虑来决定究竟选用哪一种系统。

1.4.2 按期望输出的情况分类

1. 自动调节系统

如果期望输出是常量，系统在有扰动的情况下能使实际输出相当精确地保持等于期望输出，则这种系统称为自动调节系统或恒值控制系统。例如，对温度、压力、流量、液面、转速、电压、电流等的恒值控制。显然，自动调节系统应该是闭环控制系统。

2. 随动系统

如果期望输出经常发生变化且不能预知其变化规律，系统能使实际输出以一定的精确度及时跟随期望输出，则这种系统称为随动系统。随动系统的输出一般都是机械量，如位移、速度和加速度，在这种情况下，又常称其为伺服系统。例如，舰船操舵系统、火炮瞄准系统、雷达跟踪系统等。显然，随动系统必须是闭环控制系统。

3. 程序控制系统

如果期望输出经常发生变化但能预知其变化规律，系统能使实际输出准确可靠地复现期望输出，则这种系统称为程序控制系统。例如，数控机床系统、过程控制系统、仿形控制系统等。过程控制系统的被控量是温度、压力、流量、液面、浓度等变量。根据具体情况，程序控制系统可以是闭环控制系统，也可以是开环控制系统。对于输出是机械量，如位移、速度和加速度的闭环控制系统，也可称为随动系统或伺服系统。

1.4.3 按通过系统的信号是否连续分类

1. 连续控制系统

如果通过系统各处的信号均为时间的连续函数，则这种系统称为连续控制系统。连续控制系统的参数是分布参数时，要用偏微分方程来描述；当其可简化为集中参数时，就可用常微分方程（简称微分方程）来描述。

2. 离散控制系统

通过系统的信号只要有一处是脉冲序列或数字信号，则这种系统称为离散控制系统或数字控制系统。离散控制系统可用差分方程来描述。

1.4.4 按系统组成元件的输入输出特性分类

1. 线性系统

系统中各组成元件的输入输出特性都是线性的，因而系统可以用线性方程来描述时，这种系统称为线性系统。如果线性方程中的系数都是常数，则由该方程所描述的系统称为线性定常系统。如果线性方程的系数中只要有一个是时间（自变量）的函数，则由该方程所描述的系统称为线性时变系统。例如，下面描述某线性系统输入 $x_i(t)$ 和输出 $x_o(t)$ 之间动态关系的线性微分方程

$$a_2 \frac{d^2 x_o(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dx_o(t)}{dt} + a_0 x_o(t) = b_1 \frac{dx_i(t)}{dt} + b_0 x_i(t) \quad (1-1)$$

如果系数 a_0 、 a_1 、 a_2 和 b_0 、 b_1 全都是常数，则由该方程所描述的系统就是（集中参数的连续的）线性定常系统。如果系数中只要有一个是时间 t 的函数，如 $a_1 = f(t)$ ，则由该

方程所描述的系统就是（集中参数的连续的）线性时变系统。

线性系统的基本特点就是具有线性性质，即齐次性和叠加性。

(1) 齐次性：当系统的输入变化多少倍时，系统的输出也相应变化多少倍。

(2) 叠加性：当有几个输入同时但不一定在同一处作用于系统时，系统的总输出等于各个输入单独作用时的输出之和。

通常，将齐次性和叠加性合起来称为叠加原理。因此，又可以说，线性系统的基本特性就是满足叠加原理。

如果某线性系统在输入 $x_{11}(t)$ 单独作用下的输出为 $x_{o1}(t)$ ，而在输入 $x_{12}(t)$ 单独作用下的输出为 $x_{o2}(t)$ ，设 a 、 b 为常数，则根据叠加原理，该系统在输入 $ax_{11}(t)$ 和 $bx_{12}(t)$ 同时作用下的总输出为 $ax_{o1}(t) + bx_{o2}(t)$ 。

2. 非线性系统

系统中只要有一个组成元件的输入输出特性是非线性的，因而系统需要用非线性方程来描述时，这种系统称为非线性系统。例如，用以下微分方程描述的是非线性系统

$$\left[\frac{dx_o(t)}{dt} \right]^2 + x_o(t) \frac{dx_o(t)}{dt} + x_o(t) = A \sin(\omega t)$$

实际上，组成系统的机械、液压、气动、电气以及其他元件的输入输出特性，总是不同程度地存在着非线性关系。因此，严格来说，实际系统都是非线性系统。图 1-7 所示为几种典型的非线性特性。

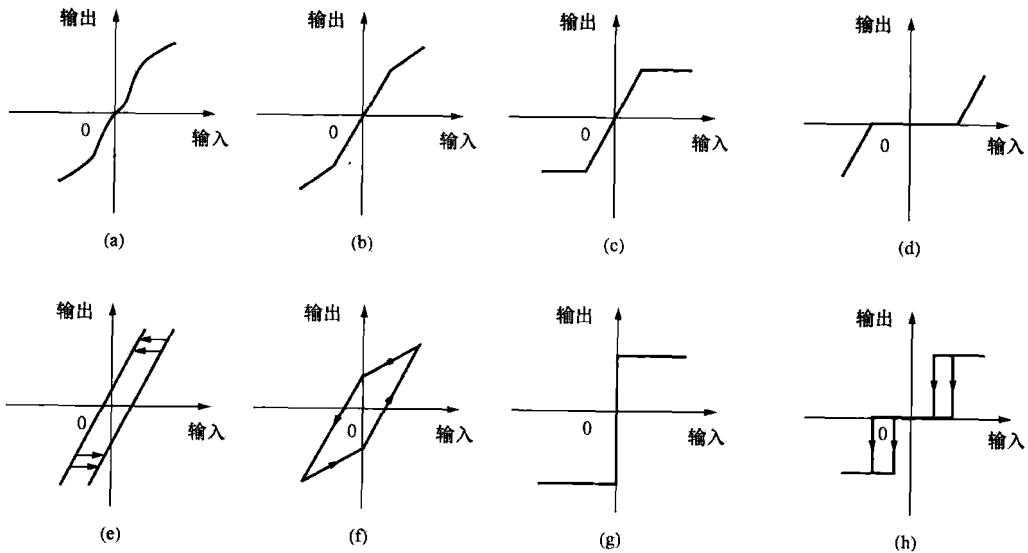


图 1-7 典型的非线性特性

- (a) 曲线特性；(b) 折线特性；(c) 饱和特性；(d) 死区特性；(e) 间隙特性；
(f) 滞环特性；(g) 库仑摩擦或继电器特性；(h) 具有死区和滞环的继电器特性

由于非线性系统的数学处理比较困难，而对线性系统的分析则有较为成熟的理论和办法，所以在有可能的情况下，一般都希望将非线性系统近似简化为线性系统来研究。

一种情况是非线性因素的影响不大。例如，间隙、死区很小或非线性程度很小，这时就可以忽略这些非线性因素。另外一种情况是在系统的工作范围内，非线性特性不存在折线、

死区、跃变或多值对应关系，即不存在本质非线性因素——也就是在系统的工作范围内，非线性特性是可导的连续函数关系，即是非本质非线性因素。在这种情况下，就可应用小偏差法将非线性系统线性化为线性系统。

在上述情况下，将非线性系统近似当做线性系统来处理，能够解决许多实际系统的分析和研究问题。但是，对某些系统，包括为了改善系统性能而特意引入非线性因素的系统，由于不满足上面的条件，就必须采用现在已有的处理非线性系统的方法，如描述函数法、相平面法、李雅普诺夫直接法、计算机仿真法等来进行研究。读者在需要时可参阅其他有关文献。

自动控制系统除了按上述几种方法进行分类以外，还可按其他方法分为确定型系统和随机型系统，单变量（单输入单输出）系统和多变量（多输入多输出）系统，机械系统、液压系统、气动系统、电气系统及联合控制系统等。

本书的讨论对象主要是确定型、单变量、集中参数、连续的线性定常系统，以后就简称为线性定常系统。

1.5 研究与学习方法

1.5.1 课程的性质和作用

1. 本课程是一门技术基础课

本课程作为一门技术基础课，主要介绍控制系统的基本概念、性质、分析和校正方法。机械控制理论是利用控制理论的原理和方法来解决机械工程问题的一门技术学科。机械工程中的机械设计与制造和机电一体化，专业性都较强，涉及的实际问题也较为复杂。本课程的学习是在数理基础课和专业课之间架起一座桥梁，并将两者紧密结合起来。相比其他技术基础课程要抽象一些，涉及的知识范围更广，综合性也更强。

学习本课程时，需要复习有关的基础知识，应具有较好的数学、力学、电学基础知识，还要有一定的机械工程方面的专业知识。特别要理解各种概念和方法的物理意义。在数学推理上不追求纯数学意义上的严密性，但要注意结论的准确性及其适用对象、条件和范围。考虑到接触专业课较少，本书中的例子都作了相当的简化，但都具有代表性，是今后解决复杂问题的基础，应认真理解和掌握。本书前后内容联系紧密，需要前后反复贯穿起来学习。此外，还需要随时关注控制理论的应用和发展。目前，控制主要应用在自动化装置设计、动态过程建模与分析、测控信号处理、故障诊断等方面，随着控制理论的发展，它的应用将更加活跃和深入。

2. 本课程是一门重要的方法论课

专业课重在培养应用能力，基础（技术基础）课则重在培养认识能力。随着认识方法从低层次向高层次转化，普适性加大，认识能力增强，深入研究和横向跨越的能力也有所扩大。因此，学习本课程时要掌握控制理论的基本思想，理解基本概念和方法的内涵与哲理性，要大胆思考，敢于提问，积极发现，努力探讨，不要被书本所束缚。

要真正了解一门学科，总是要通过自己的基础和其他知识及实践，对教材和有关的参考文献进行个人的选择和再综合，并随着知识、经验的积累和认知领域的不断扩大，才会越来越好地理解和运用该学科的概念和方法。另外，还应重视实验和习题，独立完成作业，这有