



十二五

普通高等教育机械类“十二五”规划系列教材

机械工程控制基础

JIXIE GONGCHENG KONGZHI JICHU

曾孟雄 刘春节 张 屹 赵千惠 等编著

方子帆 张发军 主 审



Mechanical
Engineering



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

普通高等教育机械类“十二五”规划系列教材

机械工程控制基础

曾孟雄 刘春节 张 屹 赵千惠 编著

方子帆 张发军 主 审

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书介绍控制理论的基本原理及基本知识与其在机械工程中的应用。内容包括机械控制的基本概念、控制系统的数学模型、控制系统的时域分析法、控制系统的频域分析法、控制系统的校正与工程设计、离散控制系统、MATLAB/Simulink 在控制工程中的应用等,每章都备有学习要点、本章小结及习题。

本书力求简明易懂,实用性强,可作为普通高等学校机械工程类专业,特别是机械设计制造及其自动化专业的本科、专科教材,也可供有关教师与工程技术人员作为参考资料。

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/曾孟雄等编著. —北京:电子工业出版社, 2011.5

普通高等教育机械类“十二五”规划系列教材

ISBN 978-7-121-13283-4

I. ①机… II. ①曾… 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 061891 号

策划编辑:李 洁

责任编辑:徐 磊

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司
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: 14.5 字数: 371 千字

印 次: 2011 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 29.00 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 zlt@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

随着现代科学和计算机技术的迅猛发展,控制理论应用于机械工程的重要性日益明显,并取得了很大发展。工程控制论所提供的理论和方法,越来越多地成为科技工作者分析和解决问题的有效手段,也成为机械工程类专业的重要基础理论之一。本书可作为普通高等学校机械工程类专业,特别是机械设计制造及其自动化专业的本科、专科教材,也可供相关教师与工程技术人员参考。

本书力求内容翔实,体系新颖,突出基础性、实用性、综合性和先进性。在编写过程中力求体现如下思路和特点:按认知规律编排教材内容和重难点布局,注重课程内容衔接与交叉引用,注重概念及工程性;全书围绕工程设计的基本要求“快速性、稳定性、准确性”开展系统分析与校正;坚持“系统”和“动态”两个观点,将分析研究的对象抽象为系统,运用控制理论的方法,解决机械工程中的稳态和动态实际问题;贯彻“时域”和“频域”两条分析主线,分别从时频两方面对系统性能进行分析和校正;注重控制工程仿真分析,强调 MATLAB/Simulink 建模仿真分析及优化。本书在文字叙述上力求深入浅出、循序渐进;在内容安排上既注意基础理论的系统阐述,同时也考虑到工程技术人员的实际需要,在介绍各种控制原理和方法时尽可能具体和实用。

本书介绍了机械程控制的基本理论和基本方法。全书共 7 章,第 1 章绪论介绍机械程控制的基本概念和本书结构体系与学习方法,第 2 章介绍控制系统的数学模型,第 3 章介绍控制系统的时域分析法,第 4 章介绍控制系统的频域分析法,第 5 章介绍控制系统的校正与工程设计,第 6 章介绍离散控制系统,第 7 章介绍 MATLAB/Simulink 在控制工程中的应用。全书在各章都备有学习要点、本章小结及习题,供读者参考练习。本书附录提供了全书主要符号说明和 Laplace 变换法与 Z 变换法,供读者参考。

本书由三峡大学曾孟雄、张屹、赵千惠和常州工学院刘春节共同编写。本书第 1~3 章和第 5 章的第 6 节由曾孟雄编写;第 4 章由张屹编写;第 5、6 章由刘春节编写;第 7 章由赵千惠编写;附录由曾孟雄和赵千惠编写。本书由三峡大学教材建设基金资助,全书由曾孟雄整理定稿,三峡大学方子帆、张发军审阅了全书书稿。

由于编者水平有限,书中难免存在错误和疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2010 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 机械工程控制概述	(1)
1.1.1 控制理论与机械工程控制	(1)
1.1.2 机械工程控制论的研究对象与任务	(2)
1.2 控制系统的分类及组成	(4)
1.2.1 控制系统的几种分类	(4)
1.2.2 控制系统的基本组成	(7)
1.3 控制系统的基本要求	(8)
1.4 控制工程的发展与应用	(9)
1.4.1 自动控制的发展阶段	(9)
1.4.2 控制理论在机械制造发展中的应用	(11)
1.5 本教材的结构体系	(12)
本章小结	(12)
习题	(13)
第 2 章 控制系统的数学模型	(16)
2.1 系统的数学模型	(16)
2.1.1 系统的数学模型及分类	(16)
2.1.2 列写系统数学模型的一般方法	(17)
2.2 系统的微分方程	(17)
2.2.1 列写微分方程的一般步骤	(17)
2.2.2 典型系统的微分方程	(18)
2.3 系统的传递函数	(21)
2.3.1 传递函数的基本概念	(22)
2.3.2 系统的特征方程、零点和极点及复域特征	(23)
2.3.3 典型环节的传递函数	(24)
2.3.4 系统传递函数的几个问题	(32)
2.4 系统的传递函数方框图	(34)
2.4.1 控制系统数学模型图形化的优点	(34)
2.4.2 方框图的结构要素及建立	(35)
2.4.3 传递函数方框图的等效变换	(39)
2.4.4 复杂传递函数方框图化简与直接列写	(41)
2.4.5 输入和干扰同时作用下的系统传递函数	(43)
2.5 控制系统职能框图到传递函数框图的转化	(45)
本章小结	(49)
习题	(49)

第 3 章 控制系统的时域分析法	(53)
3.1 系统响应的构成和系统动态特性的时域特征	(53)
3.1.1 时间响应及组成	(53)
3.1.2 典型输入信号	(55)
3.2 控制系统时域动态性能分析	(58)
3.2.1 控制系统时域分析的基本方法及步骤	(58)
3.2.2 一阶系统的时间响应	(58)
3.2.3 二阶系统的时间响应	(61)
3.2.4 控制系统的时域性能指标及计算	(65)
3.2.5 高阶系统的时域分析	(73)
3.3 控制系统稳定性时域分析	(76)
3.3.1 系统稳定性的概念	(76)
3.3.2 线性系统稳定性的充分必要条件	(76)
3.3.3 劳斯 (Routh) 稳定性判据	(77)
3.4 控制系统误差时域分析及计算	(81)
3.4.1 系统的误差与偏差	(82)
3.4.2 系统的稳态误差与稳态偏差	(82)
3.4.3 系统的型次与偏差系数	(83)
3.4.4 扰动作用下的稳态误差	(87)
3.4.5 提高系统稳态精度的措施	(88)
本章小结	(90)
习题	(90)
第 4 章 控制系统的频域分析法	(95)
4.1 频域特性的基本概念	(95)
4.1.1 频率特性	(95)
4.1.2 对数频率特性	(98)
4.2 典型环节及一般系统的频率特性	(100)
4.3 频率特性的性能指标	(110)
4.4 Nyquist 和 Bode 稳定判据	(112)
4.4.1 幅角原理	(112)
4.4.2 Nyquist 稳定判据	(113)
4.4.3 原点为开环极点时的 Nyquist 判据	(114)
4.4.4 根据 Bode 图判断系统的稳定性	(116)
4.5 控制系统的相对稳定性	(117)
本章小结	(120)
习题	(120)
第 5 章 控制系统校正与工程设计	(123)
5.1 控制系统的设计与校正概述	(123)
5.1.1 校正的概念	(123)
5.1.2 校正的方式	(124)

5.1.3	校正装置	(124)
5.2	控制系统的设计指标要求	(125)
5.2.1	控制系统时频性能指标及误差准则	(125)
5.2.2	频域性能指标与时域性能指标的关系	(128)
5.2.3	系统设计与校正的一般原则	(132)
5.3	串联校正	(133)
5.3.1	相位超前校正	(133)
5.3.2	相位滞后校正	(137)
5.3.3	相位滞后-超前校正	(140)
5.4	并联校正	(143)
5.4.1	反馈校正	(143)
5.4.2	顺馈校正	(145)
5.5	PID 校正	(145)
5.5.1	PID 控制规律	(146)
5.5.2	PID 控制器类型	(146)
5.5.3	PID 控制器设计	(149)
5.6	控制系统的工程设计实例	(153)
	本章小结	(158)
	习题	(159)
第 6 章	离散控制系统	(162)
6.1	离散控制系统概述	(162)
6.1.1	采样控制系统与数字控制系统	(162)
6.1.2	A/D 转换器与 D/A 转换器	(163)
6.1.3	离散控制系统的特点	(164)
6.2	信号采样与采样定理	(165)
6.2.1	信号采样	(165)
6.2.2	采样定理	(166)
6.2.3	采样信号的保持	(167)
6.3	离散控制系统的数学模型-差分方程	(169)
6.3.1	线性常系数差分方程	(169)
6.3.2	差分方程的解法	(170)
6.4	离散控制系统的传递函数	(171)
6.4.1	脉冲传递函数的定义与求解	(171)
6.4.2	脉冲传递函数的建立	(172)
6.5	离散控制系统分析	(174)
6.5.1	离散控制系统稳定性分析	(174)
6.5.2	离散控制系统动态性能分析	(178)
6.5.3	离散控制系统稳态性能分析	(180)
	本章小结	(182)
	习题	(183)

第 7 章 MATLAB/Simulink 在控制工程中的应用	(185)
7.1 MATLAB/Simulink 软件简介	(185)
7.1.1 MATLAB 工具箱及操作	(185)
7.1.2 Simulink 模块库及建模	(186)
7.2 数学模型的 MATLAB/Simulink 实现	(187)
7.3 基于 MATLAB/Simulink 的时间响应分析	(189)
7.4 基于 MATLAB/Simulink 的频域分析	(192)
7.5 基于 MATLAB/Simulink 的系统校正	(194)
7.5.1 控制系统的 Bode 图校正	(195)
7.5.2 控制系统的 PID 校正	(197)
7.6 基于 MATLAB/Simulink 的离散系统分析与校正	(203)
7.6.1 连续系统的离散化	(203)
7.6.2 离散系统的单位阶跃响应	(204)
7.6.3 离散系统的频域响应	(205)
本章小结	(206)
习题	(206)
附录 A 主要符号说明	(208)
附录 B Laplace 变换法	(209)
B.1 Laplace 变换的定义	(209)
B.2 典型函数的 Laplace 变换	(209)
B.3 Laplace 变换的主要定理	(212)
B.4 Laplace 逆变换	(214)
附录 C Z 变换与 Z 反变换	(218)
C.1 Z 变换的定义	(218)
C.2 Z 变换求法	(219)
C.3 Z 变换的基本定理	(220)
C.4 Z 反变换	(221)
参考文献	(223)

第 1 章

绪 论

【学习要点】

了解控制理论及控制系统的发展概况，熟悉机械程控制的研究对象与任务，掌握反馈及反馈控制的基本原理及在控制系统中的应用，熟悉控制系统的基本组成及各部分的作用，掌握控制系统的基本分类及对控制系统的基本要求，了解本教材的体系结构和学习方法。

1.1 机械程控制概述

1.1.1 控制理论与机械程控制

机械程控制基础课程主要阐述的是有关控制系统的基础技术，其理论基础是工程控制论。

控制理论是自动控制、电子技术、计算机科学等多种学科相互渗透的产物，是关于控制系统建模、分析和综合的一般理论。其任务是分析控制系统中变量的运动规律和如何改变这种运动规律以满足控制需求，为设计高性能的控制系统提供必要的理论手段。控制理论主要研究两方面的问题：一是在系统的结构和参数已经确定的情况下，对系统的性能进行分析，并提出改善性能的途径；二是根据系统要实现的任务，给出稳态和动态性能指标，要求组成一个系统，并确定适当的参数，使系统满足给定的性能指标。控制理论的形成远比人类对自动控制装置的应用要晚，它产生于人们对自动控制技术的长期探索和大量实践，它的发展得到了数学、力学和物理学等其他学科的推动，近代更是受到计算机科学的大力促进。控制理论方法已广泛应用于工程制造、交通管理、生态环境、经济科学、社会系统等领域。控制理论的建立和发展，不仅促进了控制技术在广度和深度上的发展，也对其他邻近的科学和技术的发展，乃至对人类的日常生活都产生着深刻的影响，自动控制理论被认为是 20 世纪在技术科学上所取得的重大成就之一。

控制理论在日渐成熟的发展过程中推广到工程技术领域，体现为工程控制论，在同机械工业相应的机械程领域中体现为机械程控制论。在工程技术中的机械制造业是制造业的基础与核心，尽管当今信息科学迅猛发展，高新科技日新月异，但仍然改变不了制造业、机械制造业的基础地位。可以说，没有制造业就没有工业。因此，发展机械制造业是发展国民经济、发展生产力的一项关键性的、基础性的战略措施。要想更快更好地发展机械制造业，就必须研究机械制造技术发展的现状、特点和动向。机械制造技术发展的一个重要方向是越来越广泛而紧密地同信息科学交融，越来越广泛而深刻地引入控制理论，形成机械程控制这一新的学科分支。

通常把控制理论划分为经典控制理论和现代控制理论两部分。经典控制理论的研究对象是单输入、单输出的自动控制系统，特别是线性定常系统。经典控制理论主要研究系统运动的稳定性、时间域和频率域中系统的运动特性、控制系统的设计原理和校正方法。经典控制理论的特点是以输入输出特性（主要是传递函数）为系统数学模型，其数学基础是 Laplace 变换。经典控制理论对于解决简单

的自动控制系统的分析和设计问题是很有成效的,它在第二次世界大战期间及战后的火力武器和工业自动化方面发挥过重要的作用,至今仍不失其应用价值。早期,经典控制理论常被称为自动调节原理,随着以状态空间法为基础和以最优控制理论为特征的现代控制理论的形成,它才开始广为使用现在的名称。现代控制理论是指在 20 世纪 60 年代前后发展起来的控制理论部分,它是建立在状态空间基础之上的。现代控制理论的研究对象要广泛得多,包括单变量系统和多变量系统,定常系统和时变系统。其基本分析和综合方法是时间域方法,包括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。主要分支有线性系统理论、最优控制理论、随机控制理论等。

本书主要介绍经典控制理论。

1.1.2 机械工程控制论的研究对象与任务

机械工程控制论主要研究的是机械工程技术中广义系统的动力学问题。具体地说,是研究机械工程广义系统在一定外界条件下,从系统初始条件出发的整个动态过程,以及在这个过程中和过程结束后所表现出来的动态特性和静态特性,同时研究这一广义系统及其输入、输出三者之间的动态关系。以下具体阐释机械工程控制论的研究对象与任务。

1. 系统

学会以“系统”的观点认识、分析和处理客观现象,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。本课程的学习目的,就是要使读者逐步学会用“系统”、“动态”的观点,运用控制理论的方法,解决机械工程中的实际问题。随着生产的发展,生产设备、产品与工程结构变得越来越复杂,这种复杂性主要表现在其内部各组成部分之间,以及它们与外界环境之间的联系越来越密切,以至于其中某部分的变化可能会引起一连串的反应,即牵一发而动全身。在这种情况下,孤立地研究各部分已不能满足要求,必须将相关的部分联系起来作为一个整体加以认识、分析和处理。这个有机的整体称为“系统”。本课程所研究的系统就是由相互联系、相互作用的若干部分构成,而且有一定的目的或一定的运动规律的一个整体。

工程控制论所研究的系统是广义系统,这个系统可大可小、可繁可简、可虚可实,完全由研究的需要而定。比如,当研究某一产业集团应如何调整产品结构以适应市场变化的需要时,此集团就是一个广义系统;当研究某机械制造厂的某台机床在切削加工过程中的动力学问题时,切削加工本身就是一个广义系统;而当研究此台机床所加工的工件的某些质量指标时,工件本身可以作为一个广义系统;当研究此台机床的操作者在加工过程中的作用时,操作者本身或操作者的思维等都可以作为一个广义系统来研究。如果要研究所谓的“虚拟企业”或“动态联盟”围绕市场需求调整产品结构时,该虚拟企业也是一个广义系统。

机械工程控制论中研究的系统一般具有其固有特性,系统的固有特性由其结构和参数决定。

2. 系统的研究类型

在自然界、工程中存在着各式各样的系统,任何一个系统都处于同外界(即同其他系统)相互联系和运动中。系统由于其内部机制和与外界的相互作用,都会有相应的行为表现。这种外界对系统的作用和系统对外界的作用,分别以“输入”和“输出”表示,如图 1-1 所示。

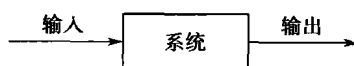


图 1-1 系统的输入和输出

研究系统，就是研究系统和输入、输出三者之间的相互关系。工程控制论对系统及其输入、输出三者之间动态关系的研究内容大致包括以下5种研究类型：

(1) 当系统已定，输入（或激励）已知时，求出系统的输出（或响应），并通过输出来分析研究系统本身的问题，这类研究称为系统分析。

(2) 当系统已定时，确定输入，且所确定的输入应使得输出尽可能符合给定的最佳要求，此即最优控制问题。

(3) 当输入已知时，确定系统，且所确定的系统应使得输出尽可能符合给定的最佳要求，此即最优设计问题。

(4) 当输出已知时，确定系统，以识别输入或输入中的有关信息，此即预测或滤波问题。

(5) 当输入输出均已知时，求出系统的结构与参数，即建立系统的数学模型，此即系统识别或系统辨识问题。

机械工程控制以经典控制理论为核心，主要研究线性控制系统的分析问题。

3. 外界条件

在进行系统分析时，由于系统自身无法体现自身性能，因此需要给系统施加一定的外界条件，以此产生系统的输出（或响应），通过系统输出的表现来反映和分析研究系统本身的性能。这里所指的外界条件是指对系统的输入（激励），包括人为激励、控制输入、干扰输入等。

系统的输入往往又称为“激励”。激励本质上是一个主客体的交互过程，即在一定的时空环境下，激励主体采用一定的手段激发激励客体的动机，使激励客体朝着一个目标前进。一个系统的激励，如果是人为地、有意识地加到系统中去的，往往又称为“控制”，控制信号通常加在控制装置的输入端，也就是系统的输入端；如果是偶然因素产生而一般无法完全人为控制的输入，则称为“扰动”，扰动信号一般作用在被控对象上。实际的控制系统中，给定输入和扰动往往是同时存在的。实际系统除了给定的输入作用外，往往还会受到不希望的扰动作用。例如，在机电系统中负载力矩的波动、电源电压的波动等。机械系统的激励一般是外界对系统的作用，如作用在系统上的力，即载荷等。而响应则一般是系统的变形或位移等。另外，系统在时间 $t=0_+$ 时的初始状态 $x(0_+)$ 也视为一种特殊的输入。

通常，把能直接观察到的响应叫输出。经典控制理论中，输出一般都能测量、观察到；而在现代控制理论中，状态变量不一定都能观察到。系统的输出是分析系统性能的主要依据。

4. 动态过程与特性

从时间历程角度来说，在输入 $x_i(t)$ 的作用下，系统输出 $x_o(t)$ 从初始状态到达新的状态，或系统从一种稳态到另一稳态之间都会出现一个过渡过程，一般称为动态过程或动态历程。因此，实际系统在输入信号的作用下，其输出过程包含动态过程和稳态过程两部分。一个典型的输出响应曲线如图1-2所示。

实际系统发生状态变化时总存在一个动态过程，其原因是系统中总会有一些储能元件（如机械系统中的阻尼器、弹簧），使输出不能立即跟随输入的变化而变化。在动态过程中系统的动态性能得到了充分体现，如输出响应是否迅速（快速性），动态过程是否有振荡或振荡程度是否剧烈（平稳性），系统最后是否收敛稳定下来（稳定性）等。动态过程结束后，系统进入稳态过程，也称为静态过程。系统的稳态过程主要反映系统工作的稳态误差（准确性）。快速性、稳定性、准确性是系统设计的三大指标要求。

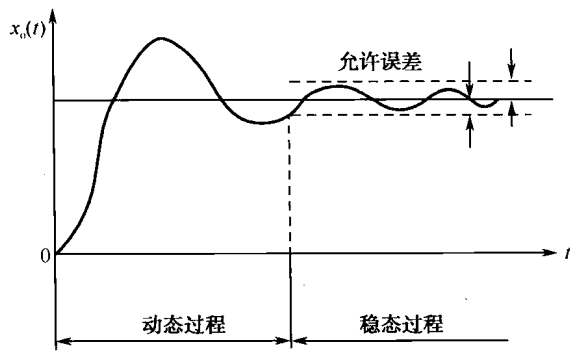


图 1-2 典型输出响应曲线

1.2 控制系统的分类及组成

1.2.1 控制系统的几种分类

实际生产过程中，为了实现各种复杂的控制任务，采用的控制系统类型多种多样。从不同角度可以将控制系统分为不同的类型。

1. 按输入量的变化规律分类

按输入量的变化规律分，控制系统可分为恒值控制系统、程序控制系统和随动系统。

恒值控制系统的输入量在系统运行过程中始终保持恒定。其任务是保证在任何干扰作用下维持系统输出量为恒定值。恒温、压力、液面等恒值参数控制均属恒值控制系统。如图 1-3 所示是一个水位控制系统，其任务是保持水箱水位高度在设定值。出水水流使水位高度偏离设定值时，浮球检测实际水位高度，根据水位偏差通过杠杆机构控制调节阀的开度变化，使水位维持在设定值。对于恒值控制系统，分析的重点是克服扰动对被控量的影响。

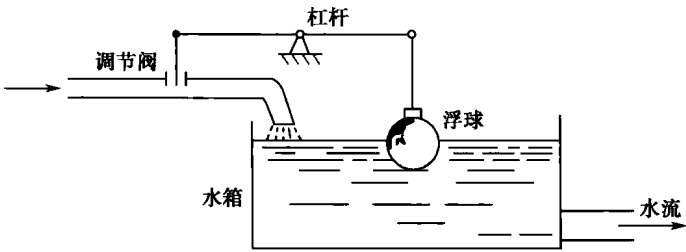


图 1-3 水位控制系统

程序控制系统的输入量是事先设定好的不为常数的给定函数，变化规律预先可知，其任务是保证在不同运行状态下被控量按照预定的规律变化。工业生产中常按生产工艺的要求，预先把输入量的变化规律编成程序，由程序发出控制指令，在输入装置中再将控制指令转换成控制信号，经过系统作用，使被控对象按指令的要求而运动。图 1-4 是一个用于机床切削加工的程序控制系统。其中，指令脉冲是由输入装置根据编制的程序发出的。

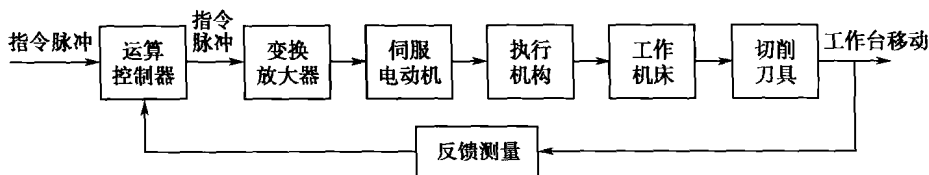


图 1-4 机床切削加工的程序控制系统

随动控制系统的输入量不是恒定的，也不是按已知规律变化的，而是按事先不能确定的一些随机因素而改变的，因此被控量也是跟随这个预先不能确定的输入量而随时变化的。其任务是当输入量发生变化时，要求输出量迅速而平稳地跟随着变化，且能排除各种干扰因素的影响，准确地复现控制信号的变化规律。控制指令由操作者根据需要随时发出，也可以由目标物或相应的测量装置发出，如火炮自动瞄准系统、导弹目标自动跟随系统，以及机械加工中的仿形机床等均属随动系统。在工业生产中，随动系统大多用来控制机械位移及速度，故也把随动系统称为伺服控制系统。

2. 按反馈分类

按控制系统的结构中有无反馈控制作用分，控制系统可分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统。

开环控制系统是指系统的输出量对控制作用没有影响的系统。开环控制系统用一定的输入量产生一定的输出量，既不需要对输出量进行测量，也不需要将输出量反馈到输入端进行比较，对于每一个参考输入量有一个固定的工作状态与之对应。如果由于某种扰动作用使系统的输出量偏离原始值，开环系统没有纠偏的能力。要进行补偿，只能再借助人工改变输入量，所以开环系统的控制精度较低。如果组成系统的元件特性和参数比较稳定，外界干扰影响较小，则用开环控制可保证一定的精度，对那些负载恒定、扰动小、控制精度要求不高的实际系统，是有效的控制方式。但为了获得高质量的输出，就必须选用高质量的元件，其结果必然导致投资大、成本高。图 1-5 (a) 是一个开环控制的电加热炉示例，给定电源电压可使加热炉电阻丝获得相应的发热量。

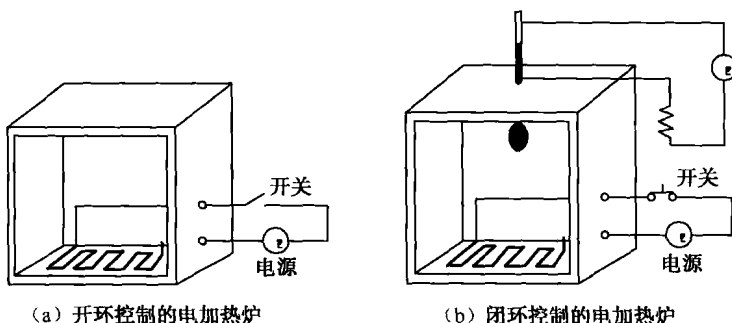


图 1-5 具有不同控制系统结构的电加热炉

凡是系统输出量与输入端之间存在反馈回路的系统，就叫闭环控制系统。反馈是把输出量送回到系统的输入端并与输入信号进行比较的过程。若反馈信号与输入信号的差值越来越小，则称为负反馈；反之，称为正反馈。显然，负反馈控制是一个利用偏差进行控制并最后消除偏差的过程，同时，由于有反馈的存在，整个控制过程是闭合的，所以闭环控制系统也叫反馈控制系统。闭环控制系统由于有反馈作用的存在，因此具有自动修正被控制量出现偏差的能力，可以修正元件参数变化及外界扰动引起的误差，所以其控制效果好、精度高。其实，只有按反馈原理组成的闭环控制系统才能真正实现自动控制的任務。闭环控制系统也有不足之处，除了结构复杂和成本

较高以外,一个主要的问题是由于反馈的存在,控制系统可能出现“振荡”。严重时,会使系统失去稳定而无法工作。在控制系统的研究中,一个很重要的问题就是如何解决好“振荡”或“发散”问题。图 1-5 (b) 是闭环控制的电加热炉示例,通过温度计检测炉内温度反馈回电源控制端,从而调节电源电压纠偏炉内温度。

在工业生产过程中,常将开环控制和闭环控制配合使用,组成复合控制系统,也称前馈-反馈控制系统,如图 1-6 所示。当发生扰动,但被控量 $x_o(t)$ 还没反应时,前馈控制器(补偿器)先按扰动量的大小和方向进行“粗略”调整,尽可能使控制作用 $u_1(t)$ 在一开始就基本抵消扰动对被控量的影响,使被控量不致发生大的变化。被控量出现的“剩余”偏差则通过闭环回路来进行微调(校正作用)。因此这类控制系统对扰动作用能够得到比简单闭环控制系统更好的控制效果。

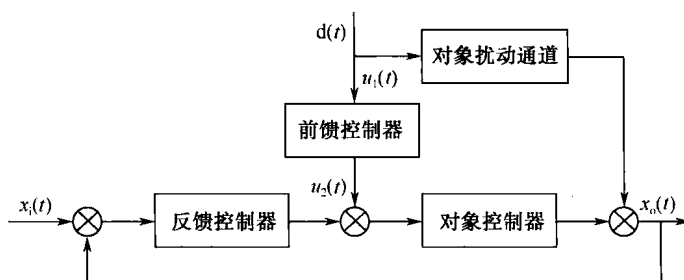


图 1-6 复合控制系统

3. 控制系统的其他分类

按系统中传递信号的性质分,控制系统可分为连续控制系统和离散控制系统。系统中各部分传递的信号都是连续时间变量的系统称为连续控制系统,其控制规律多采用硬件组成的控制器实现。描述连续控制系统的数学工具是微分方程和 Laplace 变换。连续控制系统的特点是控制系统中所有环节之间的信号传递是不间断的,而且各个环节的输入量与输出量之间存在的都是连续的函数关系,因而控制作用也是连续的。在某一处或数处的信号是脉冲序列或数字量传递的系统称为离散控制系统,因而其控制作用是不连续的,其控制规律一般是用软件实现的,描述此种系统的数学工具是差分方程和 Z 变换。在离散控制系统中,数字测量、放大比较、给定等部件一般由微处理器实现。

按系统的数学描述,控制系统可分为线性控制系统和非线性控制系统。系统中所有的元件、部件都是线性的,输入与输出之间可以用线性微分方程来描述的控制系统称为线性控制系统。线性系统的重要特点是满足叠加原理,这对于分析多输入多输出的线性系统具有重要意义。当控制系统中存在非线性元件、部件时,该系统称为非线性系统,其输入输出关系需要用非线性微分方程来描述。

按系统输入输出信号的数量,控制系统可分为单变量系统和多变量系统。所谓单变量是从系统外部变量的描述来分类的,不考虑系统内部的通路与结构。单变量系统只有一个输入量和一个输出量,但系统内部的结构回路可以是多回路的,内部变量也可以是多种形式的。多变量系统有多个输入量和多个输出量。一般来说,当系统输入与输出信号多于一个时就称为多变量系统。多变量系统的特点是变量多,回路也多,而且相互之间呈现多路耦合,研究起来比较复杂。单变量系统是经典控制理论的主要研究对象,以传递函数为基本数学工具,主要讨论线性定常系统的分析和设计问题。多变量系统是现代控制理论研究的主要对象,在数学上以状态空间法为基础,讨论多变量、变参数、高精度、高能效等控制系统的分析和设计。

按系统闭环回路的数目分,控制系统可分为单回路控制系统和多回路控制系统。单回路控制

系统只有被控量的一个量反馈到控制器的输入端，形成一个闭合回路。如果除被控量反馈到控制器输入端之外，还有另外的辅助信号也作为反馈信号送入控制系统的某一个入口，形成一个以上的闭合回路，即形成多回路控制系统。

1.2.2 控制系统的基本组成

1. 控制系统的基本结构

如图 1-7 所示为一个典型的反馈控制系统结构框图。该框图表示了控制系统各元件在系统中的位置和相互之间的关系。作为一个典型的反馈控制系统应该包括给定环节、反馈环节、比较环节、放大环节、执行环节及校正环节等。

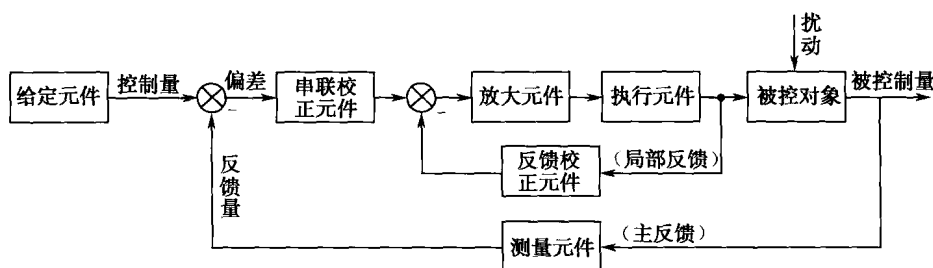


图 1-7 典型负反馈控制系统结构框图

2. 控制系统中的基本环节（元件、装置）

(1) 给定环节：用于产生控制系统的输入量（给定信号），一般是与期望的输出相对应的。输入信号的量纲要与主反馈信号的量纲相同。给定元件通常不在闭环回路中，可以是各种形式，以电类元件居多，在已知输入信号规律的情况下，也可用计算机软件产生给定信号。

(2) 测量环节：用于测量被控制量，产生与被控制量有一定函数关系的信号。测量元件一般是各种各样的传感器，起反馈作用，一般为非电量电测。测量元件的精度直接影响控制系统的精度，应使测量元件的精度高于系统的精度，还要有足够宽的频带。

(3) 比较环节：用于比较控制量和反馈量并产生偏差信号。电桥、运算放大器可作为电信号的比较元件。有些比较元件与测量元件是结合在一起的，如测角位移的旋转变压器和自整角机等。在计算机控制系统中，比较元件的职能通常由软件完成。

(4) 放大环节：对偏差信号进行幅值或功率的放大，以足够的功率来推动执行机构或被控对象，以及对信号形式进行变换。

(5) 执行环节：其职能是直接推动被控对象，使其被控量发生变化，如机械位移系统中的电动机、液压伺服电动机、温度控制系统中的加热装置。执行元件的选择应具有足够大的功率和足够宽的工作频带。

(6) 校正环节：为改善或提高系统的动态和稳态性能，在系统基本结构基础上增加的校正元件。校正元件根据被控对象特点和性能指标的要求而设计。校正元件串联在偏差信号与被控制信号间的前向通道中的称为串联校正；校正元件在反馈回路中的称为反馈校正。

(7) 被控对象：控制系统所要控制的对象，它的输出量即为控制系统的被控量。例如，水箱水位控制系统中的水箱、房间温度控制系统中的房间、火炮随动系统中的火炮、电动机转速控制系统中电机所带的负载等。设计控制系统时，认为被控对象是不可改变的。

应注意的是上述环节（元件、装置）在具体实现时不一定是各自独立的，可能是一个实际元

件同时担负几个环节的作用,如系统中的运算放大器,往往同时起着比较环节、放大环节及校正环节的作用;反之,也可能是几个实际元件共同担负一个环节的作用,如电冰箱中的电动机、压缩机、冷却管、节流阀及蒸发器共同起着执行环节的作用。

3. 控制系统中的量

为便于定量分析系统,通常给出控制系统中的量。

- (1) 被控量:也称输出量、被控参量,是在控制系统中按规定的任务需要加以控制的物理量。
- (2) 控制量:也称给定量、控制输入,是根据设计要求与输出量相适应的预先给定信号。
- (3) 干扰量:也称扰动量,干扰或破坏系统按预定规律运行的各种外部和内部条件,一般是偶然的、无法人为控制的随机输入信号。
- (4) 输入量:是控制量与干扰量的总称,一般多指控制量。
- (5) 反馈量:由输出端引回到输入端的量。
- (6) 偏差量:控制量与反馈量之差。
- (7) 误差量:实际输出量与希望输出量之差值。

1.3 控制系统的基本要求

控制系统应用于不同场合和目的时,要求也往往不同。评价一个控制系统的好坏,其指标是多种多样的,但对控制系统的基本要求(即控制系统所需的基本性能)一般可归纳为稳定性、快速性和准确性。

1. 稳定性

稳定性是对控制系统的首要要求。一个控制系统能起控制作用,系统必须是稳定的,而且必须满足一定的稳定裕量,即当系统参数发生某些变化时,也能够使系统保持稳定的工作状态。

由于控制系统都包含有储能元件,存在着惯性,因此当系统的各个参数匹配不当时,将会引起系统的振荡而失去工作能力。稳定性就是指系统动态过程的振荡倾向和系统能否恢复平衡状态的性能。如图 1-8 所示为一个控制系统受到给定值为阶跃函数的输入扰动后,被控量的响应过程可能具有的几种不同振荡形式。(a)图是振荡衰减控制过程曲线,被控量经过一定的动态过程后重新达到新的平衡状态,系统是稳定的;(b)图是被控量等幅振荡的控制过程曲线,系统受到扰动后不能达到新的平衡,系统处于临界稳定状态,在工程上视为不稳定,在实际中不能采用;(c)图为被控量发散振荡的控制过程曲线,此时系统是不稳定的。

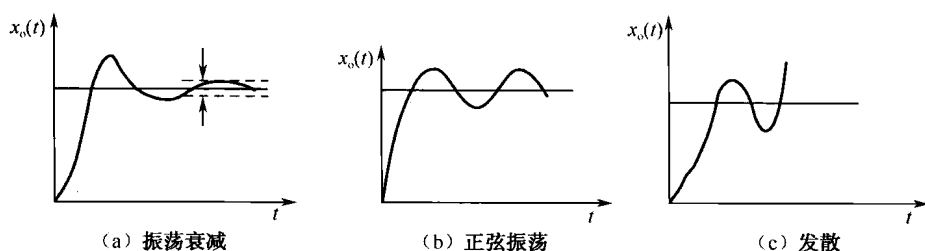


图 1-8 几种不同的振荡形式

控制系统的稳定性问题是由闭环反馈造成的,而稳定是一个闭环控制系统正常工作的先决条

件。对工业控制对象而言,尤其是动力控制对象,被控量对控制作用的反应总是比较迟缓,因此在负反馈情况下,由于反馈“过量”,即控制作用“过大”、“过小”或控制速度“过快”、“过慢”,有可能使系统发生振荡。改变反馈作用的强弱,就可能出现图 1-8 所示的各种类型的控制过程。

2. 快速性

快速性是在系统稳定性的前提下提出的,反映对控制系统动态过程持续时间方面的要求。快速性是指当系统输出量与给定的输入量之间产生偏差时,消除这种偏差的快速程度。

由于实际系统的被控对象和元件通常都具有一定的惯性,如机械惯性、电磁惯性、热惯性等,再加上物理装置功率的限制,使得控制系统的被控量难以瞬时响应输入量的变化。因此,系统从一个平衡状态到另一个平衡状态都需要一定的时间,即存在一个动态过程或称过渡过程。

一般希望系统从扰动开始到系统达到新的平衡状态的过渡过程尽可能短,以保证下一次扰动来临时,上一次扰动所引起的控制过程已经结束。快速性好的系统,消除偏差的时间就短,也就能复现快速变化的输入信号,因而具有较好的动态性能。

3. 准确性

准确性反映系统的控制精度,一般用系统的稳态误差来衡量。稳态误差是指系统稳定后的实际输出与期望输出之间的差值。稳态误差反映了动态过程后期的性能,是衡量系统品质的一个重要指标。稳态精度当然是越高越好。

有时为了提高生产设备对变动负荷的适应能力和稳定性,有意保持一定的动态误差和稳态误差,即在不同负荷下保持不同的稳态值。例如,火力发电机组为了能较快响应外界负荷的要求,当负荷指令发生变化时,允许主蒸汽压力在一定范围内变化(降低准确性要求),以利用锅炉蓄热,快速响应负荷变化。

要求一个控制系统的稳定性、快速性和准确性三方面都达到很高的质量往往是不可能的,三者之间往往是相互制约的。在设计与调试过程中,若过分强调系统的稳定性,则可能会造成系统响应迟缓和精度较低;若过分强调系统响应的快速性,则又会使系统的振荡加剧,甚至引起不稳定。不同的生产过程对稳定性、快速性和准确性的具体要求和主次地位是不同的,设计时,一般总是在满足稳定性的要求后,对准确性和快速性进行综合考虑。

1.4 控制工程的发展与应用

1.4.1 自动控制的发展阶段

控制理论是关于控制系统建模、分析和综合的一般理论,也可看做是控制系统的应用数学分支,但它不同于数学,是一门技术科学。控制理论的发展是与控制技术的发展密切相关的。

根据控制理论的发展历史,大致可将其分为以下 4 个阶段。

1. 经典控制理论阶段

18 世纪,瓦特(J.Watt)为控制蒸汽机速度而设计的离心调节器,是自动控制领域的一项重大成果。麦克斯威尔(J.C.Maxwell)于 1868 年从理论上分析飞球调节器的动态特性,发表了对离心调速器进行理论分析的论文。1922 年米罗斯基(N.Minorsky)给出了位置控制系统的分析,并对 PID 三作用控制给出了控制规律公式。1932 年奈奎斯特(Nyquist)提出了负反馈系统的频