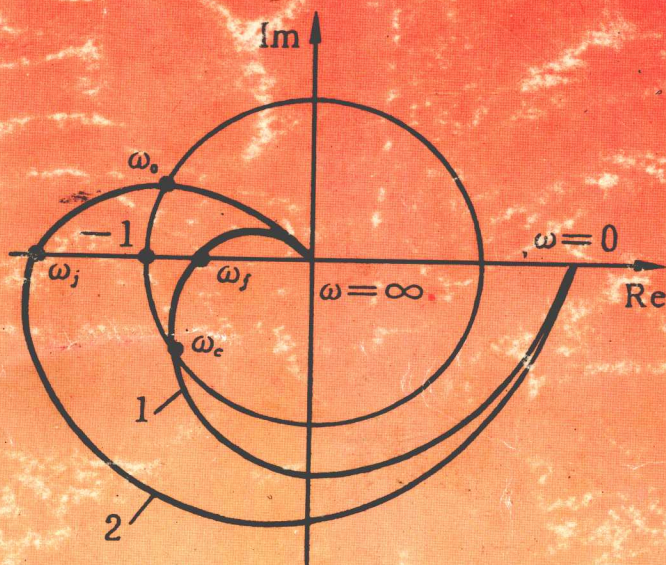


□ 湖北科学技术出版社



柳长智 主编
宋尔涛 主审

机械控制工程基础

鄂新登字 03 号

机械控制工程基础

© 柳长智 主编 宋尔涛 主审

*

湖北科学技术出版社出版发行

武汉工学院印刷厂印刷

850×1168 毫米 大 32 开本 12.125 印张 280 千字

1994 年 8 月第 1 版 1994 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 7-5352-1574-2/TH·26

印数:1-2 000 定价:8.90 元

前 言

在今后的教学工作中,多内容和少学时的矛盾会日渐突出。这是因为科学技术的发展速度很快,不断涌现的新理论、新方法和新技术冲击着我们的知识库;大学生应该掌握的知识结构在不断地发生变化,应该了解的知识面在日益加宽。为了使人才培养适应这种形势,除了坚持不懈地进行教学设备的更新、教学手段的完善和教学方法的改革之外,加强教材的建设也是一个很重要的方面。

目前,控制理论和微电子学,计算机技术在现代机械制造业中的重要作用已为人们所共识。《机械控制工程基础》已列为工科院校机类专业的一门技术基础课。然而,在经过了各专业的整体教改以后,分配给这门课的学时一般在40学时左右,有的可能更少。为了保证不降低教学大纲的基本要求又不突破所规定的时限,保质保量地完成这门课程的教学工作,我们在编写这本教材时,力求注意到以下几点:对教学内容进行精选、取舍;文字叙述上尽量做到由浅入深,层次分明,条理清晰;概念的建立与方法的介绍相结合,而方法又通过典型的例题来掌握;尽量避免冗繁的数学推导,但又把物理概念的明晰和数学结论的准确放在首位。

本书共分为九章。前五章为:绪论,物理系统的数学模型,时间响应分析,频率特性分析以及控制系统的稳定性分析。这几章包含了经典控制论的基本内容,可作为30学时安排的选材参考。第六章误差分析,第七章系统的设计和校正,再加上前五章,可作为40学时安排的选材参考。第八章非线性系统,第九章控制系统的计算机辅助分析,在少学时情况下一般不讲授,它主要作为学生毕业设计和做科研课题时学习和参考。

参加本书编写工作的有：柳长智(第一章、第八章)，黄雅伦(第四章、第五章)，王亚平、黎明发(第六章、第九章)，黄安贻(第二章)，肖峻(第七章)，陈怀峰(第三章)，李兰负责全书的图稿及符号处理。全书由柳长智统稿并任主编，黄雅伦任副主编。

本书由湖北工学院宋尔涛教授主审。

在编写过程中还得到了黄新明、梁圣堂、江征风等同志的热心帮助，在此表示由衷的感谢。

由于编者水平所限，书中疏漏错误之处在所难免，恳请同行和读者给予指正。

编 者

1994 年元月

内 容 简 介

本书系统地阐述了经典控制理论的主要概念、基本理论、基本分析和设计的方法及其在机械工程中的应用。主要内容有:物理系统的数学模型,时间响应分析,频率特性分析,控制系统稳定性分析,误差分析,系统的设计和校正,非线性系统的分析和控制系统的计算机辅助分析等。书中还穿插了许多结合工程实际的典型例题,每章后面安排了适量的习题。

本书可作为机械制造、机械设计及机电工程等机类专业的本科生教材,也可作为职大、函大、夜大和电大学生的参考教材,而且还可供从事机械控制工作的技术人员参考。

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1-1 控制理论概述	(1)
§ 1-2 控制系统的工作原理	(3)
§ 1-3 自动控制系统的基本类型	(5)
§ 1-4 对自动控制系统的基本要求	(11)
§ 1-5 本课程学习的基本方法	(12)
习题一	(13)
第二章 物理系统的数学模型	(15)
§ 2-1 控制系统的运动微分方程	(16)
§ 2-2 系统非线性微分方程的线性化	(29)
§ 2-3 拉普拉斯变换与反变换	(36)
§ 2-4 传递函数的概念和定义	(57)
§ 2-5 典型环节及其传递函数	(60)
§ 2-6 系统方框图的简化和系统传递函数	(72)
习题二	(86)
第三章 瞬态响应分析	(94)
§ 3-1 时间响应以及输入信号	(94)
§ 3-2 一阶系统的瞬态响应分析	(97)
§ 3-3 二阶系统的瞬态响应分析	(99)
§ 3-4 二阶系统瞬态响应的性能指标	(107)
§ 3-5 例题	(113)
习题三	(116)
第四章 频率特性分析	(118)

§ 4-1	频率特性的基本概念和计算	(119)
§ 4-2	典型环节频率特性的极坐标图(Nyquist 图)	(129)
§ 4-3	极坐标图(Nyquist 图)的一般形状的规律	(136)
§ 4-4	系统的对数频率特性(Bode 图)	(146)
§ 4-5	最小相位系统和非最小相位系统	(161)
§ 4-6	闭环控制系统的频率特性	(169)
§ 4-7	频域性能指标及其与时域性能指标的关系 ...	(175)
§ 4-8	系统的传递函数的实验确定法	(177)
习题四		(185)
第五章 控制系统的稳定性分析		(188)
§ 5-1	系统稳定性的基本概念	(188)
§ 5-2	代数稳定性判据	(191)
§ 5-3	奈氏(Nyquist)稳定判据	(201)
§ 5-4	对数幅相频率特性的稳定性判据(Bode 判据)	(211)
§ 5-5	相对稳定性	(215)
习题五		(221)
第六章 控制系统的误差分析和计算		(223)
§ 6-1	稳态误差的基本概念	(223)
§ 6-2	控制系统稳态误差的计算	(225)
习题六		(238)
第七章 控制系统的设计及其校正		(241)
§ 7-1	概述	(241)
§ 7-2	串联校正	(244)
§ 7-3	并联校正	(261)
§ 7-4	复合控制系统	(264)
§ 7-5	典型控制系统举例	(269)

习题七.....	(278)
第八章 非线性控制系统.....	(280)
§ 8-1 概述	(280)
§ 8-2 描述函数法	(287)
§ 8-3 相平面分析法	(307)
习题八.....	(326)
第九章 控制系统的计算机辅助分析.....	(329)
§ 9-1 求算系统传递函数的计算机程序	(329)
§ 9-2 线性系统的仿真	(342)
§ 9-3 劳斯稳定判据程序	(354)
§ 9-4 控制系统频率特性计算机辅助分析	(361)
习题九.....	(377)

第一章 绪 论

§ 1-1 控制理论概述

控制论、微电子学和计算机技术在现代化机械制造业中的重要作用已成为人们的共识。邓小平同志在1978年的全国科学大会上明确指出：“现代科学技术正在经历着一场伟大的革命……特别是由于电子计算机、控制论和自动化技术的发展，正在迅速提高生产自动化的程度。”他在这里特别提到的控制论，十几年来已在我国产生了巨大的影响。从工矿企业的技术改造，生产过程的自动化，各种机电一体化产品的出现到机器人的投入运行，航空航天事业的飞速进步都反应了控制论在不同领域中的应用成果。

控制论是本世纪人类伟大的科学成果之一。控制论的思想方法是唯物的，分析方法是辩证的；控制论认为信息是物质的一种属性，信息过程是认识客体的前提，控制过程则是改造客体的途径，信息和控制是一对孪生兄弟，反映了客观世界的可知性和可改造性。

控制论可以粗分为三大分支：工程控制论，生物控制论和经济控制论。工程控制论(*Engineering Cybernetics*)的主体理论部分叫自动控制理论(*Automatic Control Theory*)，它利用反馈原理实现对系统的自动控制。反馈控制就是在存在干扰的情况下企图把系统的输出信号(反馈信号)和参考的输入信号之间的差(误差信号)抵消到零的一种控制方式。所谓自动控制并不能排除人的因素，只是在没有人直接参与的情况下，利用控制器使生产过程或被控制对象的某些物理量准确的按照预期的规律变化。火炮跟踪目标，数

控机床依照图纸自动完成对复杂零件的加工,轧钢机的压下机构自动调整辊缝轧制出要求的钢板形状和厚度,各种机器人能按照预期的要求进行各种操作,恒温箱、电冰箱及空调器能自动调节温度等等都是在不同的层次上利用了反馈控制的原理。它们的共同点是被控制量必须按照控制量的变化规律而变化。

根据控制论发展的不同阶段,控制论可分为经典控制论和现代控制论。经典控制理论的形成体系是在本世纪40年代末50年代初,它以维纳(Norbert Wiener)等人的著作《控制论:或在动物和机器中的通信和控制》的发表为主要标志,1954年钱学森同志发表了工程控制论,使控制论应用于工程系统。经典控制论的核心是频率响应法,它采用拉氏变换求解微分方程,自然引入传递函数及其一整套研究方法,最适用于单输入单输出的线性定常系统。随着工业、科学技术的不断发展,控制对象越来越复杂,有可能是多输入多输出系统,也可能是时变系统。这样,对自动控制的要求就不再只是保持个别变量的调节和稳定,而是要实现多个变量的最优控制。60年代初诞生了现代控制理论,它是在状态空间法、矩阵理论和计算机技术发展的基础上建立起来的。状态空间法也是利用变换的思想把高阶微分方程变为一阶微分方程组,并在模型中加入了反映系统内部状态的所谓状态变量;通过矩阵运算,采用计算机求解方程组处理多输入多输出系统的问题,步骤清晰,形式简单、直观,而且容易推广到非线性系统和系统参数随时间变化的所谓时变系统。70年代以后,现代控制理论又出现了许多分支,并正在朝大系统理论和人工智能理论等方面深入地发展。

由于学时所限,根据教学计划的安排,本书主要介绍经典控制理论的基本内容及其在机械工程中的应用,其它内容将在后续课程和研究生课程中讲授。

§ 1-2 控制系统的工作原理

如前所述,在各种生产过程和设备中,常常需要保持某些物理量的恒定或令其按一定的规律变化。要实现这种要求就必须对机械和设备进行控制、调整以抵消外部的干扰。我们先看一个简单的例子,说明控制系统的基本规律。

对于一个恒温箱来说,要实现恒温控制有两种办法:人工控制和自动控制。而自动控制系统是参照人工控制系统建立起来的。图 1-1 所示为人工控制的恒温控制箱。人工控制的任务是克服外来干扰(如电源电压波动,环境温度变化等)保持恒温箱的温度恒定,以满足对温度的要求。具体的做法是人工观察温度计所显示的温度值,通过移动调压器触头的位置来改变加热电阻丝的电流,达到控制温度的目的。人工调节过程可以归纳如下:

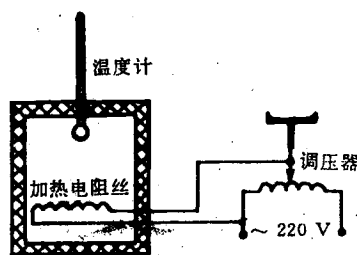


图 1-1 人工控制的恒温箱

度变化等)保持恒温箱的温度恒定,以满足对温度的要求。具体的做法是人工观察温度计所显示的温度值,通过移动调压器触头的位置来改变加热电阻丝的电流,达到控制温度的目的。人工调节过程可以归纳如下:

1. 观察温度计(测量元件)测出的恒温箱的温度(被控制量)。
2. 将测出的温度与要求的温度值(给定值)进行比较,得出偏差的大小和方向。
3. 根据偏差的大小和方向再进行控制。即恒温箱温度高于所要求的给定值时,就移动调压器触头将电流减小,使恒温箱温度降至正常范围内;若低于给定的温度值,则使电流增加,使温度升至正常范围内。

由于干扰和系统本身的惯性,这种调节过程始终存在,反复进

行,故人总是不能离开操作岗位。

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。简言之,就是“检测偏差用以纠正偏差”的过程。

参照人工控制的规律,将以上系统改造成一个自动控制系统并非难事。改造后的系统如图 1-2 所示:其中测量元件用热电偶(热电偶一般用铂铑铂金属组成热端,测量范围在 -20°C 至 1600°C)代替温度计,测出的恒温箱温度所对应的电压为 u_2 ,而设定温度对应的电压值为 u_1 ,由一个称为比较器的简单电路对两个电压值进行比较,求出差值 $\Delta u = u_2 - u_1$,再经过电压放大和功率放大后,输入到执行电机,控制其转子的转向和转速,再经过传动装置拖动调压器触头,改变加热器的电压(对应加热电流)。当恒温箱内温度偏高时,使调压器减小加热电流,反之则加大电流,直到温度达到给定值为止。此时偏差信号 $\Delta u = 0$,电机停止转动。由于干扰始终存在,实际上电机停止的时间是很少的(视所要求的控制精度而定)。自动控制系统与人工控制系统一样,一是要检测偏差,二是要用检测到的偏差去纠正偏差。

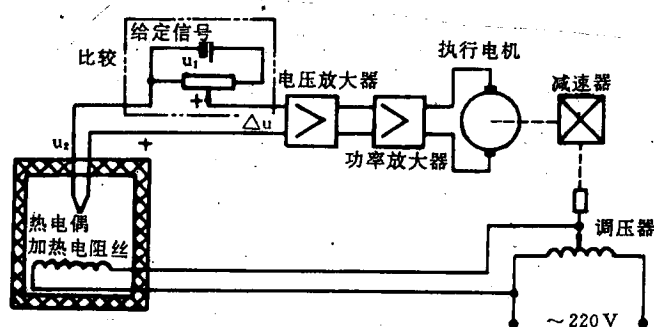


图 1-2 恒温箱的自动控制系统

为了便于对自动控制系统进行分析以及了解其各个组成部分的作用,我们用职能方框图的形式来表示自动控制系统。图 1-3 表

示恒温箱自动控制系统的方框图。

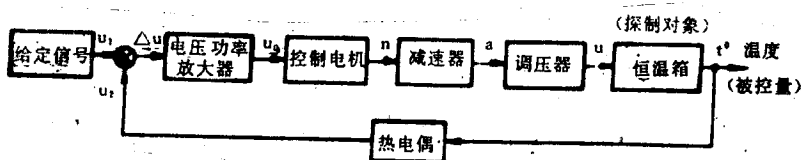


图 1-3 恒温箱温度自动控制系统职能方框图

图中的方框表示系统的各个组成部分，直线箭头代表作用方向；在其上面标注的符号对应方框的输入及输出的物理量； $\otimes$ 代表比较元件。热电偶是置于反馈通道中的测量元件，从图中可以看出系统是有反馈的。反馈就是将输出量（通过测量元件及其它方式）反反馈送到输入端，并与输入量相比较，比较的结果称为偏差。

如图 1-3 还可以清楚地看出，恒温箱自动控制系统的输入量就是给定的电压信号，输出量就是被控物理量——温度。控制系统是按偏差的大小与方向来工作的，最后使偏差减小或消除，从而使输出量随输入量而变化。

一般在自动控制系统中，偏差是通过反馈建立起来的。自动控制的过程就是“检测偏差用以纠正偏差”的过程，这一原理称为反馈控制原理，利用此原理组成的系统称为反馈控制系统。

§ 1-3 自动控制系统的基本类型

自动控制系统的种类很多，应用范围也很广，它们的结构性能和完成的任务也各不相同。以下只介绍自动控制系统的几种主要分类方法。

一、按系统有无反馈来分

1. 开环系统

如果输出端和输入端之间不存在反馈通道,输出量不影响系统的控制作用时,这种系统称为开环控制系统。图 1-4 中所示的数控机床进给系统,由于没有反馈通道,故该系统是开环系统。系统的输出对控制作用没有任何影响。开环系统因无反馈,不能建立起输出量与控制量之间的偏差,在存在干扰或元件参数变化时无法纠正偏差,系统不能达到很高的精度。当然,如果干扰很小和内部元件参数稳定时,开环系统就显得结构简单而又经济适用。

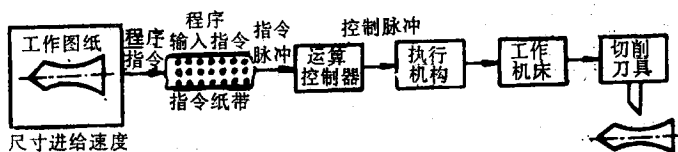


图 1-4 数字程序控制机床(开环系统)

2. 闭环系统

控制系统的输出端与输入端之间存在反馈通道,即输出量对控制作用有直接影响的系统,称为闭环系统。所以反馈控制系统就是闭环控制系统。图 1-5 是数控机床进给系统采用闭环控制时的方框图。

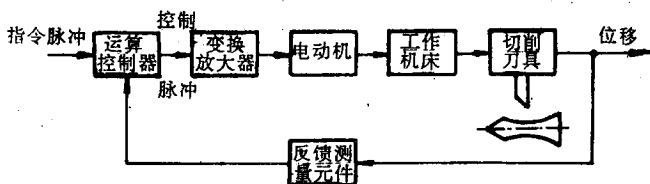


图 1-5 数字程序控制机床(闭环系统)

闭环控制系统的突出优点是控制精度高,不论什么干扰,只要被控制量的实际值偏离给定值时,闭环系统就会产生控制作用来减少这一偏差。但这种系统是靠偏差进行控制的,工作过程中系统

总会存在偏差,由于元件的惯性,很容易引起振荡,使系统不稳定。因此精度和稳定性之间的矛盾始终是闭环系统存在的主要矛盾。为了解决这一矛盾,往往采用闭环控制和开环控制结合在一起的系统,称为复合控制系统。

闭环系统与开环系统相比较,闭环系统抗干扰能力强,对外部扰动(如负载变化)和内部扰动(系统元件性能参数的改变)引起的被控制量(输出)的偏差能够自动纠正。而开环系统则无此纠正能力,故一般情况下闭环系统比开环系统的精度要高。但开环系统因无反馈通道,所以结构简单,容易实现。闭环系统在设计时要着重考虑稳定性问题,给设计和制造系统带来一定的困难。

从自动控制理论的角度,主要是研究闭环控制系统,也就是研究反馈控制理论与方法。

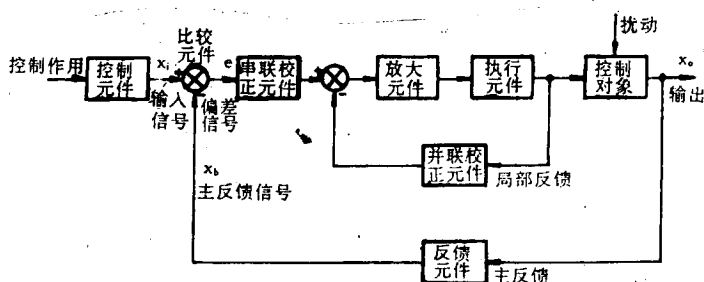


图 1-6 典型反馈控制系统方框图

对于一个典型的反馈控制系统,除了上面介绍的基本概念之外,再将其基本组成和有关各词语简述如下,以便加深及全面理解自动控制系统。图 1-6 是典型反馈控制系统的组成方框图。一个系统中主反馈回路只有一个,而局部反馈回路可能有几个。各种功能不同的元件,从整体上构成一个系统来完成一定的控制任务。其中:

控制元件:用于产生输入信号(或称控制信号)。引起控制信号变化的原因称为控制作用。如图 1-7 中的指令电位器就是控制元件,移动电位器滑臂力即控制作用。

反馈元件:主要指置于主反馈通道中的元件。反馈元件一般用检测元件。若在主反馈通道中不设反馈元件,而是将输出信号直接反馈到输入端时,称为单位反馈。

比较元件:它是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。

放大元件:把微弱的偏差信号放大并进行能量形式(电气、机械、液压)的转换使之达到足够的幅值和功率的元件。

执行元件:根据输入信号的要求直接对控制对象进行操作的元件。例如液压缸,液压马达及电机等。

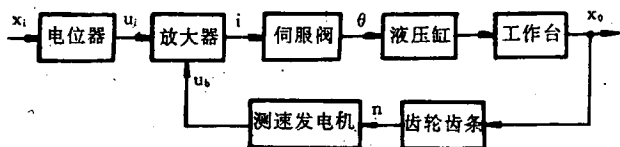


图 1-7 工作台速度控制系统方框图

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。例如数控机床的工作台等。(图 1-7)

以上是构成反馈控制系统的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)。为了便于学习,下面再介绍一些名词术语。

输入信号(输入量、控制量、给定量):它是控制输出量变化规

律的信号。而输入量又可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(输出量、被控制量或被调整量):输出是输入的结果,它的变化规律是要加以控制的,应保持与输入信号之间有一定的函数关系。

反馈信号:输出信号经反馈元件变换后加到输入端的信号称反馈信号。若它的符号与输入信号相同,叫正反馈;反之,叫负反馈。主反馈一定是负反馈,否则偏差会越来越大,系统将会失控。除主反馈外,有的系统还有局部反馈,主要是用来对系统进行校正、补偿或线性化而加入的。

偏差信号(或称偏差):是输入信号与主反馈信号之差。

误差信号(或称误差):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。

要注意,误差和偏差不是同一概念。只有在全反馈系统中,误差才等于偏差。

扰动信号(又称为干扰),除控制信号外,对系统输出产生影响的因素都叫扰动。如果扰动产生在系统内部,称为内扰;产生在系统外部,则称外扰。扰动也是系统的一种输入量。

二、按控制作用的特点来分

1. 恒值控制系统(或称自稳定系统)

当给定量是一个恒值时,称为恒值控制系统。例如稳压电源,恒温系统等。其主要任务是,在存在干扰的情况下,如何将实际的输出量与给定值保持一致。

2. 程序控制系统

当控制作用按预先给定的规律(又称程序)变化时,也就是当输入量为已知确定的时间函数时,称为程序控制系统。机械加工中的程序控制机床,就是一个很好的例子。

3. 随动系统