

高等学校试用教材

机械控制工程基础

北京机械工业管理学院 朱骥北 主编



高等学校试用教材

机械控制工程基础

北京机械工业管理学院 朱骥北 主编



机械工业出版社

本书是根据全国高等学校“机械制造工艺及设备”专业教学指导委员会制订的“机械控制工程基础”课程大纲编写的。并推荐作为机械类各专业的教材。全书共七章：绪论；物理系统的数学模型及传递函数；瞬态响应及误差分析；频率特性分析；系统的稳定性；系统的综合与校正；系统辨识简介及附录拉氏变换。

本书力求讲清基本概念，并以适当的机械系统例子引导学生如何结合机械工程的实际，为将来运用控制理论解决机械及机械电子工程中实际问题打下基础。

图书在版编目(CIP)数据

机械控制工程基础/朱骥北主编. —北京：机械工业出版社，1999.10（2012.1重印）
高等学校试用教材
ISBN 978-7-111-02310-4

I. 机… II. 朱… III. 机械工程-自动控制-高等学校-教材 IV. TP13

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第14780号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑：王霄飞 蔡开颖 版式设计：霍永明
责任校对：陈立耘 责任印制：杨曦
北京中兴印刷有限公司印刷
2012年1月第1版第27次印刷
184mm×260mm·9.25印张·225千字
标准书号：ISBN 978-7-111-02310-4
定价：18.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010)88361066

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售一部：(010)68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售二部：(010)88379649

封面无防伪标均为盗版

读者购书热线：(010)88379203

前 言

本书是根据全国高等学校工科类1986~1990年教材编审、出版规划,以及机械制造工艺及设备专业教学指导委员会制订的“机械控制工程基础”课程教学大纲编写的。

本门课程确定为技术基础课,教学总时数为46学时。教材经内容的取舍,适用范围为40~54学时的课程。这本书不但适用于机制专业,也特别适合机械设计与制造、精密仪器等机械类各专业大学生使用。

在适当配合其他教学环节的条件下,本课程应达到的教学目的及要求是:学习运用经典控制理论的基本原理及思想方法,初步分析与研究机械及电气系统中信息的传递、反馈及控制,以及机械系统的动态特性。要求掌握有关的基本原理与方法,初步培养进行系统分析的能力。结合后续的专业课学习,为将来解决机械工程及机械电子工程中的实际问题具备一定能力。

本书共有七章:绪论;物理系统的数学模型及传递函数;瞬态响应及误差分析;频率特性分析;系统的稳定性;系统的综合与校正;系统辨识简介及附录拉氏变换。讲授时,应以第二、三、四章作为重点。其中,特别是第四章频域法是经典控制论的核心。第七章系统辨识简介是由于机械工程实际问题的复杂性,及计算机控制需要采用离散的差分方程模型而编写的,可按学时数多少而取舍。附录拉氏变换部分可根据学生的情况,作为复习内容。需注意:要突出基本概念,使学生觉得“实”,避免“玄”、“虚”、“空”;要阐明基本知识及方法;要结合机、电、液;要运用并巩固已学的理论知识及联系后续的专业课;还要层次清晰、深入浅出。本书也正是按以上原则来写的。

从1980年起,由于出版了清华大学张伯鹏教授主编的“控制工程基础”教材,国内各大学陆续在本科大学生中开设了此课。近10年来,这门新兴的学科又进一步发展,机械类专业大都开设了这门课程,积累了经验并编写了一些教材,其中由华中理工大学杨叔子及杨克冲教授主编的《机械工程控制基础》就是一本好教材。西安交通大学已故阳含和教授著的《机械控制工程》上册是一本好的学术专著。本书正是参考了以上一些著作,并吸取了1988年全国机械控制工程研究会讨论本教材编写提纲时提出的不少好建议,力争做到好教、好学而编写的。在此,谨向众多的教授、副教授及讲师们表示衷心的感谢。

本书由北京机械工业管理学院朱骥北教授主编,并编写了第一、二、七章及附录拉氏变换。陕西机械学院秦世良同志编写了第三、四、五、六章。

本书由西安交通大学何饴教授担任主审,参加审稿工作的有天津大学刘又午教授、大连理工大学刘能宏教授、浙江大学张尚才及华中理工大学杨克冲和杨叔子等教授。他们提出了许多宝贵意见,在此特表示衷心的感谢。此外,我的研究生们(讲师)在编写过程中也付出了劳动,在此也一并致谢。

限于编者水平,由于本课程是新的体系,许多问题有待于探讨与实践总结。因此,书中缺点与错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

朱骥北
于北京

目 录

| | | | |
|------------------------------|----|-------------------------------------|-----|
| 第一章 绪论 | 1 | § 4-4 频域性能指标及其与时域性能指标 间的关系 | 78 |
| § 1-1 控制系统的基本工作原理 | 1 | § 4-5 频率实验法估计系统的数学模型 | 80 |
| § 1-2 自动控制系统的几种分类 | 3 | 习题 | 81 |
| § 1-3 机械控制工程研究的对象与方法 | 6 | 第五章 系统的稳定性 | 83 |
| § 1-4 控制理论发展简史 | 8 | § 5-1 系统稳定的条件 | 83 |
| § 1-5 本课程的学习方法 | 8 | § 5-2 劳斯—胡尔维茨稳定性判据 | 85 |
| 习题 | 9 | § 5-3 奈奎斯特稳定判据 | 89 |
| 第二章 物理系统的数学模型及传递函 数 | 10 | § 5-4 稳定性裕量 | 98 |
| § 2-1 系统的数学模型 | 10 | § 5-5 根轨迹简介 | 101 |
| § 2-2 传递函数 | 15 | 习题 | 105 |
| § 2-3 典型环节的传递函数 | 16 | 第六章 系统的综合与校正 | 107 |
| § 2-4 系统的方框图及其联接 | 26 | § 6-1 概述 | 107 |
| § 2-5 物理系统传递函数的推导 | 31 | § 6-2 串联校正 | 109 |
| 习题 | 36 | § 6-3 反馈和顺馈校正 | 119 |
| 第三章 瞬态响应及误差分析 | 40 | 习题 | 122 |
| § 3-1 时间响应的概念 | 40 | 第七章 系统辨识简介 | 125 |
| § 3-2 一阶系统的时间响应 | 42 | § 7-1 系统辨识概述 | 125 |
| § 3-3 二阶系统的时间响应 | 46 | § 7-2 线性差分方程 | 126 |
| § 3-4 瞬态响应的性能指标 | 50 | § 7-3 最小二乘法 | 127 |
| § 3-5 稳态误差分析与计算 | 56 | § 7-4 时间序列模型及其估计简介 | 129 |
| 习题 | 60 | 附录 拉普拉斯变换 | 131 |
| 第四章 频率特性分析 | 62 | § 1 拉氏变换 | 131 |
| § 4-1 频率特性的基本概念 | 62 | § 2 拉氏变换定理 | 133 |
| § 4-2 典型环节的频率特性 | 65 | § 3 拉氏反变换 | 139 |
| § 4-3 系统的对数频率特性 | 73 | 参考文献 | 143 |

第一章 绪 论

当前，机械制造一个新的发展方向，是综合运用控制理论、微电子学、计算机技术及机械工程等学科方面的理论与技术，来提高生产效能及质量并推出新的产品。

“机械控制工程”是一门技术科学，也是一门边缘科学。它是研究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。随着工业生产及科学技术的不断发展，越来越显示出它的重要性，为人们所瞩目。

控制理论之所以在机械工业中受到重视，不仅是自动化技术高度发展所需要，而且它是与信息科学、系统科学密切相关联的。尤其重要的是它提供了辩证的方法，不但从局部、而且从整体上来分析与认识一个机械系统，进而去改进一个机械系统，以满足生产实际的需要。

本书主要是介绍控制理论的基础内容，也就是在经典控制理论的范围内，怎样结合与应用于机械。重要的是从这个新的体系学习中，去建立基本的概念与掌握基本的方法，并能够进行运用。

§ 1-1 控制系统的基本工作原理

控制系统的控制，有人工控制与自动控制。自动控制就是在没有人的直接参与下，利用控制器(例如机械装置、电气装置或电子计算机)使生产过程或被控制对象(例如机器或电气设备)的某一物理量(温度、压力、液面、流量、速度、位移等)准确地按预期的规律运行。例如电冰箱自动地控制冰箱中的温度恒定，水箱控制液面的高度恒定，数控机床根据加工工艺的要求，能够自动地、按照一定的加工程序加工出我们所要求形状的工件来。总之，控制系统要解决的最基本问题就是如何使受控对象的物理量按照给定的变化规律变化。

自动控制往往是参考人工控制而建立起来的，以下举出一些简单的、典型例子，来说明控制系统的工作原理。

1. 机械加工

图 1-1 a 示出在车床上加工轴件的例子。操作工人转动带有刻度盘的手轮，丝杠带动刀架移动以控制刀具的切槽进给。在这个大家熟知而简单的例子中，被控对象是刀架，被控参数是切槽的进给，而控制器是刀架传动丝杠和刻度手轮。这个例子称为人工控制。

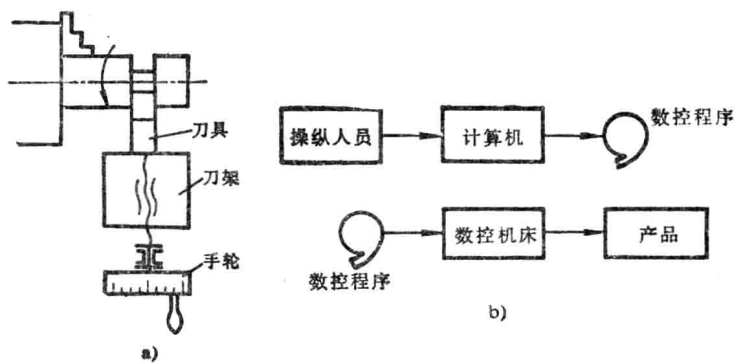


图1-1 机械加工控制系统
a) 车削加工 b) 数控机床加工

图1-1 b是数控机床加工的工作原理框图。工艺人员按加工工件的要求，预先编出数控程序，把数控程序输入数控机床，于是机床在数控程序的操纵控制下，自动地加工出复杂而精确的零件。此例的操作人员在加工过程中，不直接参与操作，与产品之间没有实时的联系，称为自动控制系统。

2. 恒温箱

图1-2是由人工控制的恒温箱。当箱中的温度受环境温度或电源电压波动等外来的干扰而变化时，为满足箱中温度的恒定要求，可由人工来移动调压器的活动触头，改变加热电阻丝的电流，以控制箱内的温度。箱内温度由温度计来测量。

这里，被控对象是恒温箱，被控量(参数)是温度，控制器是调压器。

恒温箱人工控制的过程如下：

由测量元件(温度计)观察出恒温箱的温度，与所要求的温度值(给定值)进行比较，二者之差称为偏差，因此得到了温度偏差的大小与方向，据此再来调节调压器，进行箱温的控制。例如当箱温低于所要求的温度值时，可人工移动调压器的触头向右，增加加热电阻丝的电流，使箱温上升到给定值。反之，当箱温高于所要求的温度值时，可人工移动调压器的触头向左，以减少加热电阻丝的电流，使箱温下降回到给定值。这种控制称为人工定值控制。

人在这种控制中的作用是观测、求偏差及进行纠正偏差的控制。或简称为“求偏与纠偏”的过程。如果将以上人工的作用由一个自动控制器来代替，于是一个人工的调节系统就成为一个自动控制系统。

图1-3是恒温箱的自动控制系统。在这个自动控制系统中，图1-2中的温度计由热电偶代替，并增加了电气、电机及减速器等装置。

在这个系统中，热电偶测量出的电压信号 V_2 ，是与箱内温度成比例的，因此，我们选取电压 V_1 代表箱温的给定信号，并使 V_2 能够反馈回去与 V_1 进行比较，当外界干扰引起箱内温度变化时，则比较的结果，产生了温度的偏差信号 $\Delta V = V_1 - V_2$ ，经电压及功率放大后，来控制电机的旋转速度及方向，又经传动机构及减速器使调压器的触头移动，使加热电阻丝的电流增加或减小，直至箱内温度达到给定值为止。这时偏差信号 $\Delta V = 0$ ，电机停止转动，完成控制任务。就是这样，箱内温度经自动调节，经常保持在给定值上，这个给定温度由设定 V_1 来得到。

将以上人工控制系统与这个自动控制系统对比，可以看出：

- (1) 测量 前者靠操纵者的眼睛，而后者由热电偶输出 V_2 来测量。
- (2) 比较 前者靠操纵者的头脑，而后者靠自动控制器。

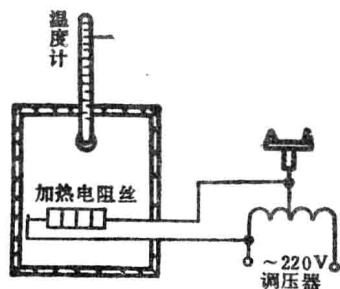


图1-2 人工控制的恒温箱

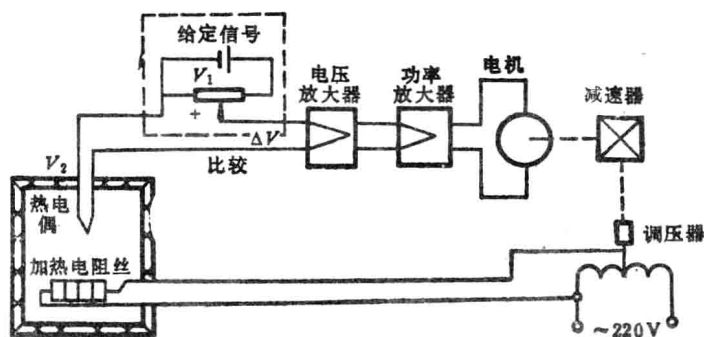


图1-3 恒温箱的自动控制系统

(3) 执行 前者靠操纵者的手, 而后者由电机等完成执行作用。

为了便于对一个自动控制系统进行分析以及了解其各个组成部分的作用, 经常把一个自动控制系统画成方框图的形式。

图1-3系统的方框图如图1-4所示。图中方框表示系统的各个组成部分, 直线箭头代表作用的方向; 在其上的标注表示对方框的输入及输出物理量; \otimes 代表比较元件。热电偶是置于反馈通道中的测量元件, 从系统的方框图, 可以明显地看出系统是有反馈的。反馈就是指将输出量(或通过测量元件及其它)反回馈送, 并与输入量相比较, 比较的结果称为偏差。

由图1-4还可以清楚地看出, 系统的输入量就是给定的电压信号, 系统的输出量(即被调节量)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(这在以后的章节中进一步讲述), 从而使输出量随输入量而变化。

一般在自动控制系统中, 偏差是基于反馈建立起来的。自动控制的过程就是“测偏与纠偏”的过程, 这一原理又称为反馈控制原理。利用此原理组成的系统称为反馈控制系统。

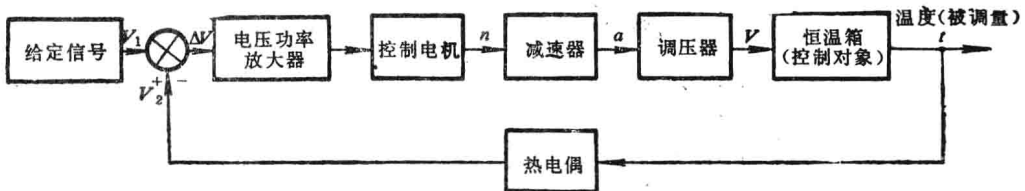


图1-4 恒温箱自动控制系统方框图

§ 1-2 自动控制系统的几种分类

自动控制系统的的应用很广, 因此, 按其结构及功能的分类方法也很多, 以下仅介绍自动控制系统的几种主要的分类方法。

一、按控制系统有无反馈来分

1. 开环系统

控制系统的输出量不影响系统的控制作用, 即系统中输出端与输入端之间无反馈通道时称开环系统。

图1-1 a 中普通车削加工的例子就是开环系统。系统的输入是工人转动手轮的转角; 系统的输出是刀架位移, 以得到切槽进给。系统输出与输入间是没有反馈通道的。

图1-5中所示的数控机床进给系统, 由于没有反馈通道, 故该系统也是开环系统。系统的输出对控制作用没有任何影响。系统的输出量受输入量的控制。而图中若四个方框的任一性能变化, 这称为系统内部存在扰动, 将影响输出量与输入量不一致, 也就是说扰动将影响输出的精度。



图1-5 开环系统的数控机床

2. 闭环系统

控制系统的输出与输入间存在着反馈通道,即系统的输出对控制作用有直接影响的系统,称为闭环系统。因此,反馈系统也就是闭环控制系统。

图1-4就是一个闭环控制系统,其工作原理已如前所述。

图1-6是数控机床进给系统采用闭环控制系统时的方框图。系统的输出(工作台的移动)通过检测装置(同步感应器或光栅等)把信号反馈到输入端,与输入信号一起通过控制装置对工作台的移动进行控制。

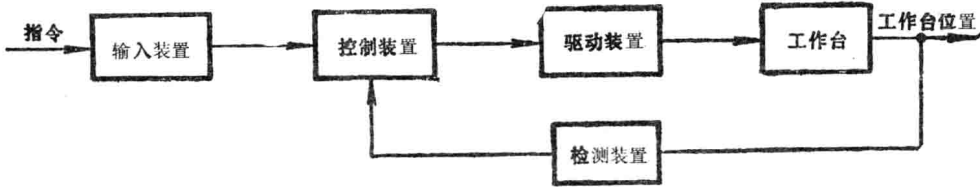


图1-6 闭环系统的数控机床

闭环系统的主要优点是存在有反馈,若内外有干扰而使输出的实际值偏离给定值时,控制作用将减少这一偏差,因而精度较高。缺点也正是存在有反馈,若系统中的元件有惯性,以及与其配合不当时,将引起系统振荡,不能稳定工作。

闭环与开环系统相比较,闭环系统抗干扰能力强,对外扰动(如负载变化)和内扰动(系统内元件性能的变动)引起被控量(输出)的偏差能够自动纠正。而开环系统则无此纠正能力,因而一般来说,闭环较开环系统的精度为高。但是,由于开环系统没有反馈通道,因而结构较简单,实现容易。闭环系统在设计时要着重考虑稳定性问题,这给设计与制造系统带来许多困难。闭环系统主要用于要求高而复杂的系统中。

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。但是,对于机械系统的动特性,除自激振荡外,大多为开环系统,因此开环系统的研究也是很重要的。

由于反馈控制系统是完整而典型的自动控制系统,继上面介绍的基本概念之后,这里再将其基本组成及有关名词术语叙述如下,以便加深及全面理解自动控制系统。

图1-7示出了典型反馈控制系统的组成图。一个系统主反馈回路(或通道)只有一个。而局部反馈可能有几个,图中画出一个。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任务。

控制元件 用于产生输入信号(或称控制信号)。如图1-3中的指令电位器就是控制元件。移动电位器滑臂的力即控制作用。

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,即输出为主反馈信号时(图1-3就是这样),称为单位反馈。

比较元件 用来比较输入及反馈信号,并得出二者差值的偏差信号。

放大元件 把弱的信号放大以推动执行元件动作。放大元件有电气的、机械的、液压的及气动的。

执行元件 根据输入信号的要求直接对控制对象进行操作。例如用液压缸、液压马达及

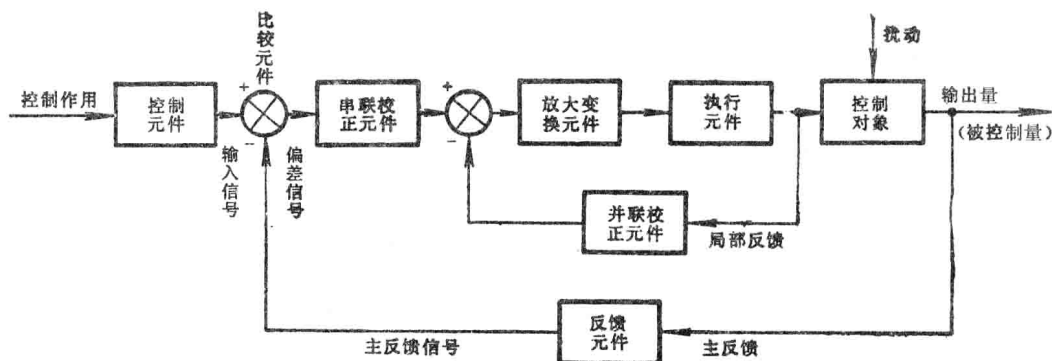


图1-7 典型反馈控制系统的组成

电机等。

控制对象 就是控制系统所要操纵的对象，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。从动力学的角度来理解，也可认为控制对象是负载，或是工作台上的负载。

校正元件 它不是反馈控制系统所必须具有的。它的作用是改善系统的控制性能。

以上介绍了系统的基本组成。以下介绍名词术语。

输入信号(输入量、控制量、给定量) 从广义上指输入到系统中的各种信号，包括扰动信号——这种对输出控制有害的信号在内。一般来说，输入信号是指控制输出量变化规律的信号。各种典型的输入信号将在以后的章节中介绍。

输出信号(输出量、被控制量、被调节量) 输出是输入的结果。它的变化规律通过控制应与输入信号之间保持有确定的关系。

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者，叫正反馈；反之，叫负反馈。主反馈一般是负反馈，否则偏差越来越大，系统将会失控。系统中的局部反馈，主要用来对系统进行校正等，以满足控制某些性能要求。

偏差信号 为输入信号与主反馈信号之差。

误差信号 指输出量实际值与希望值之差。常常希望值是系统的输入量。

须注意，误差和偏差不是相同的概念。只有当系统的输出量不是部分的而是全部的反馈时，误差才等于偏差。

扰动信号 人为的激励或输入信号，称为控制信号。偶然的无法加以人为控制的信号，称为扰动信号或干扰信号。根据产生的部位，分内扰与外扰。扰动也是一种输入量，一般对系统的输出量将产生不利的影响。

二、按控制作用的特点来分

即按照给定量的特点来分。

1. 恒值控制系统

前面介绍的恒温箱控制系统，它的特点是箱内的温度要求保持在某一给定值，这就是恒值控制系统。即当给定量是一个恒值时，称为恒值控制系统。这个恒值的给定量，也就是恒定值的输入信号，随着工作的要求，是可以调整变化的，但作调整后，又是一个新的恒值给

定量, 并且得到一个新的, 与之对应的恒值输出量。

对恒值控制系统, 要注意干扰对被控对象的影响, 研究怎样将实际的输出量保持在希望的给定值上。

2. 程序控制系统

输入量按预定程序变化的系统, 叫程序控制系统。例如, 数控机床工作台移动系统就是程序控制系统。程序控制系统可以是开环的, 也可以是闭环的。

3. 随动系统

输出量能够迅速而准确地跟随变化着的输入量的系统, 称为随动系统。具有机械量输出的随动系统, 又可称为伺服系统。

随动系统的应用很广。例如, 液压仿形刀架, 输入是工件的靠模形状, 输出是刀具的仿形运动。又如, 各种电信号笔式记录仪, 输入是事先未知的电信号, 输出是记录笔的位移。还有雷达自动跟踪系统及火炮自动瞄准系统都是随动系统。以上这些随动系统, 由于输出均是机械量, 故也都是伺服系统。

§ 1-3 机械控制工程研究的对象与方法

机械工程涉及到机械制造、交通运输、航天、能源、材料工程及生物工程等许多行业。由于科学技术的不断发展, 计算机的广泛运用, 尤其是机械与电子的结合, 很多机械产品开始把电子、控制、计算机及机械融为一体, 使古老的机械工程不断更新, 以崭新的面貌出现。

控制论这门基础科学理论, 来源于机械自动调节与控制技术的发展。由于生产的不断发展, 从控制论派生出来工程控制论、生物控制论、经济控制论及社会控制论等等技术科学。工程控制论的创始人钱学森同志, 在他的著名著作《工程控制论》中, 提出工程控制论是由工程技术实践中提炼出来的一般性理论, 并能够应用到工程中去解决实际问题。而机械控制工程则是工程控制论在机械工程中应用的一门技术科学。是在我国80年代后才兴起的。

怎样来阐明机械控制工程的研究对象与方法呢? 这当然随着社会的前进及生产实践的不断发展, 会得到越来越全面而科学的总结。“工程控制论”提出, “控制论的对象是系统”。此外, 大家知道美国是系统工程的原产地。“系统动力学”最早出现于1956年, 创始人为麻省理工学院的福雷斯特(Jay. W. Forrester)教授。后来研究社会、经济、工程及生物的系统动力学在世界范围内蓬勃发展, 并认为以上复杂系统具有共同的特点。这里我们勿须引证内容丰富的有关系统动力学的定义及其方法论。仅参考其主要论点, 来说明机械控制工程研究对象及特点是十分有益的。

机械控制工程的对象是系统这是毋庸置疑的。具体地说:

1. 研究自动控制系统

用自动控制理论, 包括经典控制理论和现代控制理论研究机电自动控制系统。经典控制理论, 主要研究单输入单输出系统。而现代控制理论以状态的概念, 研究复杂的多输入多输出系统及时变系统的最优控制和自适应控制。

虽然现代控制理论发展迅速, 然而经典控制理论本身已较成熟, 对于实际中的大部分控制系统, 仍是一种很有效的方法。本书内容限于经典控制理论。主要研究的内容有:

(1) 控制系统分析 就是对已知的系统,对它的静态及动态性能(一般可概括为稳、准、快)进行分析,看是否满足要求,并提出改进措施。

(2) 控制系统设计 也称为控制系统综合。就是根据所要求系统的性能指标,来设计控制系统。

以上两个方面,都是需要首先建立系统的数学模型。

2. 研究机械动力学系统

这是从一般自动控制理论的任务发展而成的,它也正是机械控制工程所具有的特点。

这里系统的定义是:一个由相互作用的各部分组成的具有一定功能的整体。

机械动力学系统,主要是指动态机械系统。研究机械动力学系统,就是研究机械系统的动态特性,这是“机械控制工程”主要任务之一。而目前关于研究广义的及有针对性的动力学系统,已形成“系统动力学”这样一门基础理论或技术科学。系统动力学具有以下特点:

(1) 研究问题强调从系统出发 建立数学模型时,应考虑系统的界限。系统的界限可以人为的划定,它服从于建模的需要。例如,上料—加工—停车—测量—卸件—上料的过程中,可以仅把“加工”作为一个系统来分析,也可以把以上整个过程作为一个系统来考虑。

(2) 系统有大有小、有虚有实 例如,一个切削过程是一个系统,一台机器是一个系统,有生产管理系统,人一机系统等等。

(3) 系统内存在信息反馈 或称系统存在内在反馈。系统内在反馈是动力学系统内部各参数相互作用而产生的反馈信息流。这是没有专设反馈通道的信息反馈,是根据系统动力学特性确定的反馈回路。它构成一个闭环系统,是一个动力学系统,而不是一个自动控制系统。例如,切削自激振荡、机床工作台低速运动出现爬行现象等各种机械系统产生的自激振荡,都是具有内在反馈的闭环系统,都是属于系统动力学范畴的。

我们以一个典型例子来说明动力学系统的含意与构成。

图1-8是驱动工作台移动的物理模型图。输入为 x_i , 输出为 x_o 是工作台的位移,传动刚度为 k , 工作台质量为 m , 与速度有关的摩擦系数为 $c(\dot{x}_o)$, $c(\dot{x}_o)\dot{x}_o$ 为摩擦力, $k(x_i - x_o)$ 为驱动力。因此,可写出系统的数学模型为

$$k(x_i - x_o) - c(\dot{x}_o)\dot{x}_o = m\ddot{x}_o \quad (1-1)$$

由系统的数学模型,可以画出系统的方框图,如图

1-9 所示。图中, $D = \frac{d}{dt}$ 为算子。可以看出,系统存在内在反馈,有两个反馈回路,是一个闭环系统,当运动速度较低时,这个动力学系统将会产生自激振荡(爬行)。

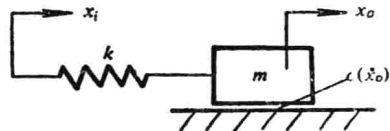


图1-8 工作台驱动系统

当运动速度 \dot{x}_o 较低,处于摩擦力下降区时(图1-10),其特性是速度 \dot{x}_o 增加,摩擦力 $c(\dot{x}_o)\dot{x}_o$ 下降。这时式(1-1)中,这一项的符号由“-”变为“+”号,也就是摩擦系数变为负摩擦系数[如若把式(1-1)中的变量换为增量形式,可看得更清楚],图1-9中 $c(\dot{x}_o)D$ 的负反馈变为正反馈(图中,括号中“+”号)。即相当于向系统中输入能量,于是系统将产生时走时停或时快时慢的爬行现象。

由此例可知,采用控制理论的方法去研究动力学系统,较之古典力学,方法简便、概念清晰。不仅如此,利用控制理论的有关建模方法、传递函数、频率特性、稳定性理论、状态空间、最优控制、信息处理、滤波及预报、系统辨识以及自适应控制等理论与方法,使机械

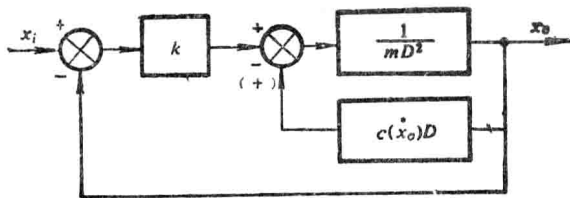


图1-9 工作台驱动系统方框图

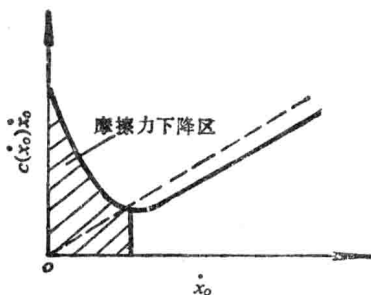


图1-10 摩擦力与速度关系

工程的设计与研究，从经验阶段提高到理性阶段；从静态阶段提高到动态阶段，对于复杂的、过去无法解决的实际问题，逐渐揭示了其客观规律。

§ 1-4 控制理论发展简史

我国很早就发明了自动定向指南车及各种天文仪器等自动装置。1788年瓦特发明了蒸汽机飞球调速装置。这就是一个自动调节系统。以后又不断出现各种自动化装置，自瓦特发明几十年后，1868年麦克斯威尔(J. C. Maxwell)发表了“论调速器”文章，对控制系统从理论上加以提高，首先提出了“反馈控制”的概念。之后，劳斯(E. J. Routh)及其他学者，提出了有关线性系统稳定性的判据，推动了自动控制的发展。

20世纪30年代以来，奈奎斯特(H. Nyquist)提出了适用的稳定性判据，波德(H. W. Bode)总结出负反馈放大器。二次世界大战期间，由于军事工业的飞速发展及带动，相继出现了各种自动控制系统，不断改善飞机、火炮及雷达等军事装备的性能，工业生产自动化程度也得到提高。1948年维纳(N. Wiener)发表了著名的《控制论》(Cybernetics)，基本上形成了经典控制理论。1954年钱学森同志英文版《工程控制论》的发表，奠定了工程控制论这一技术科学的基础，使控制论又向前大大地发展了一步。

现代控制理论始于50年代末60年代初。这是由于空间技术发展及军事工业的需要，如航空、航天、导弹等对自动控制系统提出了很高的要求。加之新技术的发展，计算机技术也日趋成熟，使得现代控制理论发展很快，并逐渐形成一些体系与新的分支。现代控制理论主要是在时域内，利用状态空间来分析与研究多输入多输出系统的最优控制问题。

§ 1-5 本课程的学习方法

机械控制工程是利用控制论的理论与方法解决机械工程实际问题的一门技术科学。机械工程中的机械设计与制造，一方面这个学科的专业性比较强，另一方面这个学科中的实际问题技术性比较复杂。而本课程是安排在专业课之前。另外，在课程内容处理基础理论与专业技术关系上，绝不能削弱基础理论。因此，本课程是一门技术基础课。它的先修课程有：理论力学、机械原理、机械零件及一定的机械制造基础知识。在学习本课程时，需注意以下几点：

(1) 内容主要是控制理论的基本理论与方法。由于还没有学习充分的专业课,因此课程中举的专业例子,都比较简单。虽然如此,但重点在于与机械工程的结合上。希望在学习后续的专业课程时,注意运用这些基本理论与方法去分析与解决有关机械工程专业中的复杂实际问题。

(2) 课程中运用数学工具较多,几乎涉及到过去所学的全部数学知识,要注意复习巩固及怎样应用这些数学知识。此外,课程还涉及到力学、电工、机械原理及机械零件等多门课程,注意这些课程的综合应用。

(3) 本课程具有比较抽象及概括的特点,给学习带来一定的困难。因此,在学习中要特别注意数学结论的来由及物理概念,既要结合实际又善于逻辑思维。

控制理论不仅是一门学科,而且是一门卓越的方法论。它分析解决问题的思想方法是符合唯物辩证法的。例如,它看问题是从整体即系统为出发点的,认为系统及其中的部分均不是静止的,而是在运动中。而产生运动的根本原因是“内因”,即系统本身固有的性能,“外因”,即各种输入,是产生运动的条件。

(4) 控制理论的书籍很多,要学会看参考书,以加深理解。

(5) 重视实验及习题。

习 题

1-1 试举例说明日常生活中开环和闭环控制系统的工作原理。

1-2 说明蒸汽机离心调速器的工作原理(图1-11)。

1-3 图1-12是仓库大门垂直移动开闭的自动控制系统原理图。试说明自动控制大门开闭的工作原理,并画出系统的方框图。

1-4 说明负反馈工作原理。在1-2及1-3习题中怎样实现负反馈控制?在什么情况下会成为正反馈?对系统工作有何影响?

1-5 根据已学的课程,举例说明机械动力学系统与自动控制系统的异同点。

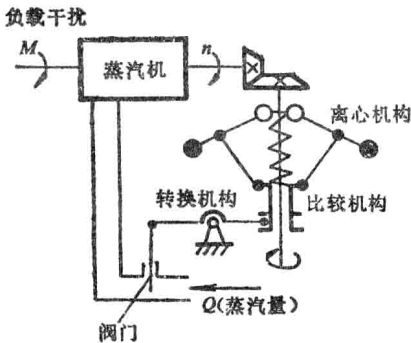


图1-11 蒸汽机离心调速器

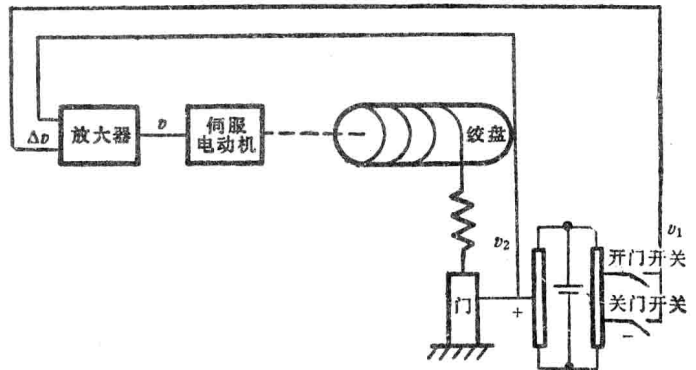


图1-12 仓库大门自动开闭控制系统

第二章 物理系统的数学模型及传递函数

§ 2-1 系统的数学模型

一、数学模型

数学模型是定量地描述系统的动态性能，揭示系统的结构、参数与动态性能之间的数学表达式。例如，微分方程、差分方程、统计学方程、传递函数、频率特性式以及各种响应式等等都称为数学模型。显然，对于以上式中的输出变量，是用以描述系统输出的性质。

无论自动控制系统，或动力学系统，一旦建立起其数学模型，就可以对它进行分析与研究。

这里所讲的应为基本的数学模型，主要是指微分方程，以下研究怎样列写出系统的微分方程。

二、建立数学模型(建模)的方法

我们所研究的物理系统，可能是机械的、液压的、气动的、电气的、热力学的等等。这些系统都可以通过微分方程来描述。微分方程的解就是系统在外部作用(输入)下的输出(响应)。列写这些微分方程，是应用不同学科中的一些定律及基本原理。例如，力学中的牛顿定律、质量守恒定律，电学中的基尔霍夫定律和马克斯韦尔方程等等。

实际上，我们所遇到的系统往往比较复杂，一方面导致数学模型的阶数较高，这就给分析与设计系统带来困难，因此就提出了对模型进行简化的问题。另一方面，在建模时可能要忽略掉一些非线性参数及分布参数，或者是所遇到的系统，对其结构、参数以及作用机理还不太清楚，建模时需要作些假定与近似。总之，在建模时将会遇到模型简化与模型精度间的矛盾问题。解决这个问题，必须对系统作全面的了解，这需要有丰富的实践经验，才能分出系统中各部分结构及参数的作用及影响的主次，建立一个既简化又有一定准确度的适用模型。

怎样才算是一个适用的模型，这只能通过实验来验证。因此，对于比较复杂的系统，往往通过理论与实验结合起来，以获得适用的模型。

系统的数学模型建立起来后，就可用各种分析方法或通过计算机来对系统进行分析与综合了。

三、非线性系统的线性化

1. 线性系统

线性系统的线性性质有两个重要条件。其一是叠加性。就是当系统同时有多个输入时，可以对每个输入分别考虑、单独处理以得到相应的每个响应，然后将这些响应叠加起来，就得到系统的响应。其二是均匀性。即当输入量的数值成比例增加时，输出量的数值也成比例增加。而且输出量的变化规律只与系统的结构、参数及输入量的变化规律有关，与输入量数值的大小是无关的。

线性微分方程用来描述线性系统。若微分方程的系数是常数，称线性定常系统，或线性

时不变系统。这是经典控制论主要研究的对象，因为它可以方便地进行拉氏变换，并求得传递函数。

2. 非线性系统

元件或系统的输出与输入间的关系不满足叠加原理及均匀性原理的，称非线性元件或系统。它的输出量的变化规律还与输入量的数值有关，这就使得非线性问题的求解非常复杂而困难。系统中只要含有一个非线性性质的元件，就成为一个非线性系统。机械系统的基本特点之一，是各物理量之间的许多关系都不是线性的，而是非线性的。因此，研究机械系统的一些动态性能时，必须考虑系统中非线性特性。

对于许多机电系统、液压系统、气动系统等系统中变量间的关系，例如：元件的死区、传动间隙及摩擦、在大输入信号作用下元件的输出量的饱和、以及元件的其它非线性函数关系等都是非线性关系。这里元件的其它非线性函数关系，指的是输出输入间的关系，例如，不是一次的幂函数，是二次或高次幂函数，是周期函数或超越函数等等。判别系统的数学模型微分方程是否是非线性的，可视其中的函数及其各阶导数，如出现高于一次的项，或者导数项的系数是输出变量的函数，则此微分方程是非线性的。

机械系统中常见的一些非线性特性举例如下：

(1) 传动间隙 由齿轮及丝杠螺母副组成的机床进给传动系统中，经常存在有传动间隙 Δ (图2-1)，使输入转角 x_i 和输出位移 x_o 间有滞环关系。若把传动间隙消除， x_i 与 x_o 间才有线性关系。

(2) 死区 在死区范围内，有输入而无输出动作，如图2-2所示。死区的例子如负开口的液压伺服阀。

(3) 摩擦力 机械滑动运动副，如机床滑动导轨运动副、主轴套筒运动副、活塞液压缸运动副等，在运动中都存在摩擦力。若假定为干摩擦力(也称库伦摩擦力)，如图2-3所示。其大小为 f ，方向总是和速度 \dot{x} 的方向相反。

实际上，运动副中的摩擦力是与运动速度大小有关的(图1-10)，再考虑到二者的方向，可如图2-4所示。图中的曲线可大致分段如下：起始点的静动摩擦力，低速时混合摩擦力(摩擦力呈下降特性)，以及粘性摩擦力(摩擦力随速度的增加而增加)。

由以上各种非线性性质可以看出，在工作点附近存在着不连续直线、跳跃、折线，以及非单值关系等严重非线性性质的，称为本质非线性性质。在建立数学模型时，为得到线性方程，只能略去这些因素，得到近似的解。若这种略去及近似带来的误差较大，那就只能用复杂的非线性处理方法来求解了。

不是像以上所说的严重非线性性质，称为非本质非线性性质。对于这种非线性性质，就可以在工作点附近用切线来代替。这时的线性化只有变量在其工作点附近作微小变化，即变量发生微小偏差时，误差才不致太大。非线性经线性化处理，就变成线性微分方程了，可以采用普通的线性方法来分析和设计系统。因而线性化这种

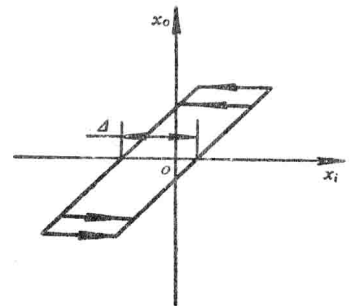


图2-1 间隙

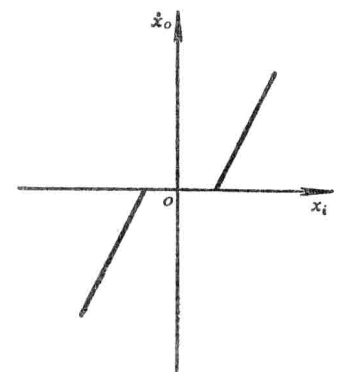


图2-2 死区

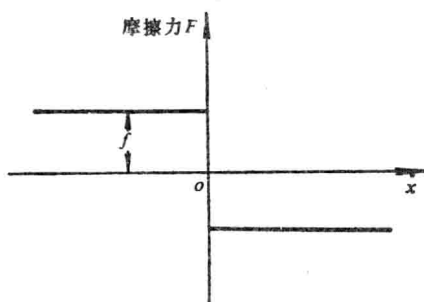


图2-3 干摩擦力

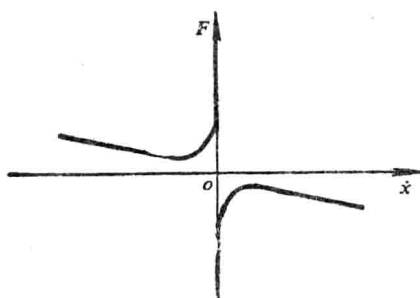


图2-4 粘性摩擦力

近似，给我们带来了很大方便。

3. 线性化方法

就是采用以上所讲的切线法，或称微小偏差法。对于非本质非线性性质的函数，都可以用这种方法。

通常系统在正常工作状态时，都有一个预定工作点，即系统处于这一平衡位置。当系统受到扰动后，系统变量就会偏离预定点，也就是系统变量产生了不大的偏差。自动调节系统将进行调节，力图使偏离的系统变量回到平衡位置。因此，只要非线性函数的这一变量在预定工作点处有导数或偏导数存在，则就可以在预定工作点附近将此非线性函数展成台劳级数。

例如，对于1个及2个变量的非线性函数 $f(x)$ 及 $f(x, y)$ ，假定系统的预定工作点为0，在该点附近将函数展成台劳级数，并认为偏差是微小的，因而略去高于一次微增量的项，所得到的近似线性函数如下

$$f(x) \approx f(x_0) + \left(\frac{df}{dx} \right)_0 \Delta x \quad (2-1)$$

$$f(x, y) \approx f(x_0, y_0) + \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_0 \Delta x + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)_0 \Delta y \quad (2-2)$$

以上两个式中减去静态方程式，得以增量表示的方程为

$$\Delta f(x) \approx \left(\frac{df}{dx} \right)_0 \Delta x \quad (2-3)$$

$$\Delta f(x, y) \approx \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_0 \Delta x + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)_0 \Delta y \quad (2-4)$$

式(2-3)及(2-4)就是非线性函数的线性化表达式。在应用中需注意以下几点：

(1) 式中的变量不是绝对量，而是增量。公式称为增量方程式。

(2) 预定工作点(额定工作点)，若看作是系统广义坐标的原点，则有 $x_0 = 0$ ， $y_0 = 0$ ， $f(x_0, y_0) = 0$ ， $\Delta x = x - x_0 = x$ ， $\Delta y = y - y_0 = y$ ，因而式(2-3)、(2-4)中的 Δ 去掉，增量可写为绝对量，公式中的变量为绝对量了。

(3) 若预定工作点不是系统广义坐标的原点，这是普遍的情况。又系统的非线性微分方程 $f(x) = f_1(x) + f_2(x)$ (假定变量只有一个 x)中仅 $f_2(x)$ 为非线性项，那么当把 $f_2(x)$ 应用式(2-3)线性化后，由于成为增量式子，则 $f(x)$ 及 $f_1(x)$ 也必须把其变量改为增量，以组成系统的线性化微分方程。