

普通高等教育“十二五”规划教材

机械控制 工程基础

第2版

朱骥北 徐小力 陈秀梅 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

机械控制工程基础

第2版

朱骥北 徐小力 陈秀梅 等编著
韩秋实 主审



机械工业出版社

本书介绍机械控制工程的基本原理、基础知识及其在机械工程中的应用。全书分为上、下两篇。上篇主要内容包括：物理系统的数学模型和传递函数、瞬态响应及误差分析、频率特性分析、控制系统的稳定性、控制系统的综合与校正、根轨迹法等；下篇主要内容包括：系统辨识及模型、离散控制系统、非线性控制系统、现代控制理论基础、智能控制理论基础、机械系统预测控制方法及应用等。

本书在力求讲清基本概念的基础上，阐述了近年来发展的相关理论方法和技术，介绍了在机械工程中的应用知识和有关实例。

本书可作为机械设计制造及其自动化、机械工程等专业的本科生和研究生的教材，也可供高等工科院校的教师及相关专业工程技术人员学习与参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械控制工程基础/朱骥北等编著. —2 版. —北京：机械工业出版社，2013. 5

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 111 - 41611 - 1

I. ①机… II. ①朱… 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 (2013) 第 035314 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：刘小慧 责任编辑：刘小慧 王 荣 卢若薇

版式设计：霍永明 责任校对：张晓蓉

封面设计：张 静 责任印制：邓 博

三河市国英印务有限公司印刷

2013 年 5 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 15.75 印张 · 384 千字

标准书号：ISBN 978 - 7 - 111 - 41611 - 1

定价：29.80 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

社服中心：(010)88361066 教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：(010)68326294 机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010)88379649 机工微博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

第2版前言

本书是在朱骥北教授主编的《机械控制工程基础》的基础上做了较大修订和补充而成的。本书第1版于1989年6月出版。从本书第1版正式出版以来,“机械控制工程”课程已在全国各高等院校的机械类、仪器类等非控制专业普遍开设。随着各高校对教材的需求量日益增大,20多年来,本书第1版经过多次印刷。机械工程控制论所提供的理论和方法,近年来也有很大发展,并越来越多地成为科技工作者及工程技术人员分析和解决问题的有效手段。

为了能够深入地掌握机械控制工程的知识,适应机械控制工程技术的快速发展,由近年来在教学和科研第一线工作的教师在原版基础上着手修订成为本书,力求对传统控制理论和现代控制理论有一个较为全面的介绍。

本教材将有关机械控制工程的内容分为上、下两篇。

上篇以第1版内容为主,并对第1版章节中的内容做了一些修改和补充。主要的变动包括:在第1版第二章中添加了信号流图和梅逊公式,另外,增加了机械系统的数学模型实例;在第1版第三章中增加了静态误差系数;将第1版第五章中的根轨迹内容改在第七章单独编写等。为了帮助读者学习,在上篇的每一章后面都增加了小结、思考题和习题。上篇有利于读者学习了解有关机械控制工程的经典控制基本理论与基本方法。

下篇以介绍近年来发展的相关新理论方法和新技术为主,作为第2版中增加的新内容。所增加的内容包括:离散控制系统、非线性控制系统、现代控制理论、智能控制理论及机械系统预测控制方法等,另外,增加了在工程中的应用背景及应用知识,补充了有关应用实例。下篇有利于读者进一步学习了解有关机械控制工程的现代新技术及工程应用。

本书可作为机电类专业的技术基础课教材,课程参考学时为32~56学时,也可根据内容取舍调整学时。本书力求在阐明机械控制工程的基本概念、基本知识和基本方法的基础上,进一步结合机械工程实际,为读者运用机械控制工程理论解决机械电子、机电一体化等领域实际问题打下基础;本书参考了国内外同类教材和其他有关文献,保持并突出了以下特点:

(1) 以机械系统作为主要受控对象,力求深入浅出地构建数学模型及分析系统动态特性。

(2) 着重阐明机械控制工程的基本概念及介绍其基本方法。

(3) 引入和编写了第1版中未包含的内容——梅逊公式、静态误差系数和根轨迹内容,便于各个院校的考研学生自学参考。

(4) 增加了离散控制系统、非线性控制系统、现代控制理论基础、智能控制理论等基础理论知识,便于读者了解近年来随着计算机数字化技术发展起来的若干先进机械控制理论与方法。

(5) 结合科研任务介绍机械系统预测控制的应用技术,以实例引导读者运用机械系统控制理论解决机械工程的现代实际问题。

本书第1版由朱骥北(原北京机械工业学院教授,北京机械工业学院于2008年更名为

北京信息科技大学) 主编完成; 在第2版出版之际, 谨对朱骥北教授在人才培养及专业建设中数十年辛勤耕耘所做出的贡献表示衷心的感谢。

本书由朱骥北教授委托徐小力负责实施, 主要由徐小力(北京信息科技大学教授)、陈秀梅(北京信息科技大学副教授)编著完成。徐小力确定了本书的编著方案及承担了再版组织及统稿工作, 并结合科研任务和工程应用完成了有关章节及内容的编著。陈秀梅承担了本书的统编工作, 对上篇主要章节进行了补充和编排, 并对下篇主要章节进行了撰写及修改。

本书由北京信息科技大学韩秋实教授审稿, 他对本书的编写提供了很大的帮助; 王红军教授也对本书的再版工作提供了热心帮助; 黄民教授对本书的编写提供了宝贵建议; 陈涛助理研究员对有关内容进行了编写; 任彬博士生进行了相关编辑工作; 孙再富研究生做了大量录入工作。在此对他们一并表示深深的感谢。

本书得到了国家自然科学基金项目(50975020、51275052)、北京市自然科学基金重点项目(3131002)、北京市引进国外技术重点项目(B201101010)、北京市教育委员会面上项目(KM200910772003)、北京市中青年骨干教师人才强教深化计划项目(PHR201008431)、北京信息科技大学教材建设项目等项目的资助和支持。

对于书中的缺点和错误, 敬请读者和专家批评指正, 不胜感谢。

徐小力、陈秀梅

于北京

第1版前言

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,教学总学时数为 46 学时。教材内容的取舍,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理论的核心。第七章系统辨识简介是由于机械工程实际问题的复杂性,即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。需要注意: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学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钺教授担任主审,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

1989 年 6 月于北京

目 录

第2版前言

第1版前言

上 篇

第一章 绪论	1
第一节 控制系统的基本工作原理	1
第二节 自动控制系统的分类	3
第三节 机械控制工程研究的对象与方法	6
第四节 控制理论发展简史	8
第五节 对控制系统性能的基本要求	9
第六节 本课程的学习方法	9
小结	10
思考题	10
习题	11
第二章 物理系统的数学模型及传递函数	12
第一节 系统的数学模型	12
第二节 传递函数	14
第三节 典型环节的传递函数	17
第四节 系统的框图及其连接	29
第五节 信号流程图及梅逊公式	36
第六节 物理系统传递函数的推导	38
小结	44
思考题	45
习题	45
第三章 瞬态响应及误差分析	49
第一节 时间响应及系统的输入信号	49
第二节 一阶系统的时间响应	52
第三节 二阶系统的时间响应	56
第四节 瞬态响应的性能指标	60
第五节 控制系统的误差分析与计算	66
小结	74
思考题	74
习题	75

第四章 频率特性分析	78
第一节 频率特性的基本概念	78
第二节 频率特性的图示法	82
第三节 系统的对数频率特性	95
第四节 频域性能指标及其与时域性能指标间的关系	99
第五节 频率实验法估计系统的数学模型	101
小结	102
思考题	103
习题	103
第五章 控制系统的稳定性	106
第一节 控制系统稳定性的条件	106
第二节 劳斯—胡尔维茨稳定性判据	108
第三节 奈奎斯特稳定判据及其应用	113
第四节 稳定性裕量	122
小结	126
思考题	126
习题	126
第六章 控制系统的综合与校正	129
第一节 概述	129
第二节 串联校正	131
第三节 并联校正	144
第四节 复合校正	146
小结	150
思考题	150
习题	151
第七章 根轨迹法	154
第一节 根轨迹法概述	154
第二节 根轨迹的基本作图	157
小结	164
思考题	165
习题	165

下 篇

第八章 系统辨识及模型	166
第一节 系统辨识概述	166

第二节 线性差分方程	167	第五节 线性定常系统的综合	199
第三节 最小二乘法	168	第十二章 智能控制理论基础	202
第四节 时间序列模型及其估计简介	170	第一节 模糊控制系统	202
第九章 离散控制系统	172	第二节 专家控制系统	205
第一节 A-D 转换器与 D-A 转换器	172	第三节 神经网络控制系统	209
第二节 z 变换和 z 反变换	173	第十三章 机械系统预测控制方法及应用	215
第三节 离散控制系统的传递函数	174	第一节 机械系统预测控制概述	215
第四节 离散控制系统的性能分析	177	第二节 机械系统预测控制的典型现代方法	216
第十章 非线性控制系统	179	第三节 机械系统预测控制的实践与应用	225
第一节 非线性控制系统概述	179	附录	227
第二节 相平面法	184	附录 A 拉普拉斯变换	227
第三节 描述函数法	188	附录 B 常用函数 z 变换表	239
第十一章 现代控制理论基础	191	附录 C 常见非线性特性的描述函数及负倒描述函数曲线	240
第一节 系统的状态空间描述	191	参考文献	241
第二节 线性定常系统的状态方程的解法	193		
第三节 线性系统的能控性与能观性	196		
第四节 线性系统的稳定性与李雅普诺夫方法	197		

上 篇

第一章 绪 论

在科学技术飞速发展的今天,机械控制工程技术已经成为不可缺少的现代技术体系的主要内容,该项技术已经广泛地应用于机械、冶金、石油、化工、电子、电力、航空、航海、航天、核能等各个领域。随着现代机械制造业的发展,机械控制工程技术的研究越来越深入且应用越来越广泛。在机械制造过程中,通过综合运用控制理论、机械工程、计算机技术及微电子学等技术,能够明显地提高生产效能及质量,并不断研发出新型机电一体化产品。

本书所阐述的“机械控制工程”是一门技术科学,也是一门边缘科学。它主要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的需要,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,进而去改造它,以满足生产实际的需要。

本书旨在介绍机械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系统;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。

第一节 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(如机械装置、电器装置或电子计算机)使生产过程或控制对象(如机械或电器设备)的某一物理量(如温度、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、典型的例子,来说明控制系统的工作原理。

1. 机械加工

图1-1a示出在车床上加工轴类零件的例子。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手轮。这个例子为人工控制。

图 1-1b 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, 为自动控制系统。

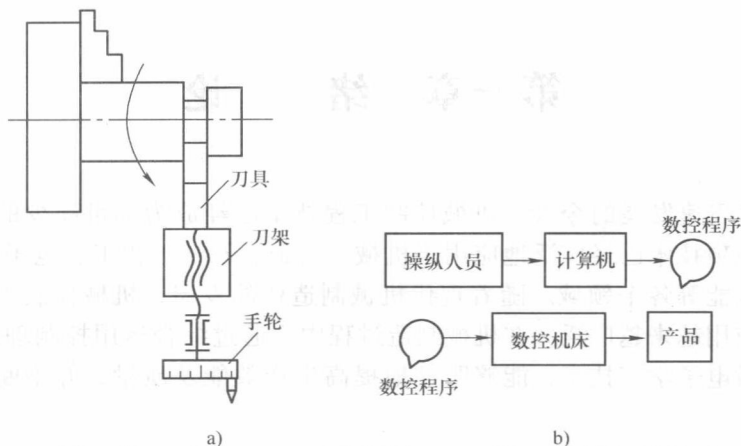


图 1-1 机械加工控制系统

a) 在车床上加工轴类零件 b) 数控机床加工的原理框图

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温要求, 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, 被控制对象是恒温箱, 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, 两者之差称为偏差, 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、电动机及减速器等装置。

图 1-3 中, 热电偶测量出的电压信号 u_2 , 是与箱内温度成比例的。设定电压 u_1 为给定

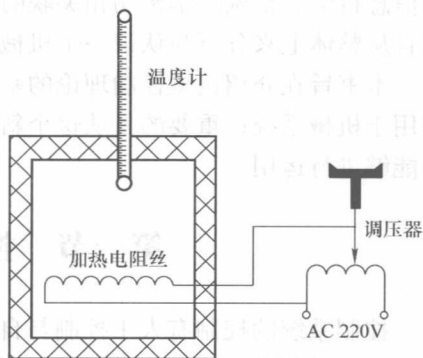


图 1-2 人工控制的恒温箱

的箱温,并使 u_2 能够反馈回去与 u_1 进行比较,当外界干扰引起箱内温度变化时,比较的结果产生了温度的偏差信号 $\Delta u = u_1 - u_2$,经电压及功率放大后,控制电动机的旋转速度及方向,再经传动结构及减速器的触头移动,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 $\Delta u = 0$,电动机停止转动,完成控制任务。就是这样,箱内温度经自动调节,经常保持在给定温度上,这个给定温度由设定电压 u_1 来得到。

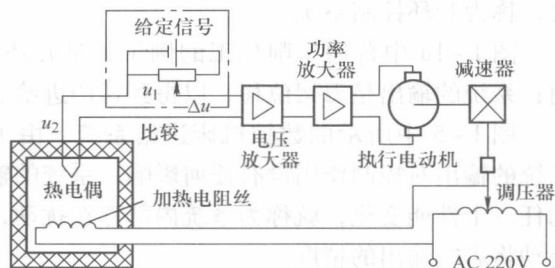


图 1-3 恒温箱的自动控制系统

通过上面人工控制系统与自动控制系统对比,可以看出:

- 1) 测量:前者靠操纵者的眼睛,后者由热电偶输出 u_2 来测量。
- 2) 比较:前者靠操纵者的头脑,后者靠自动控制器完成比较作用。
- 3) 执行:前者靠操纵者的手,而后者由电动机等完成执行作用。

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框图的形式。

图 1-3 系统的框图如图 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;箭头上的标注表示框的输入及输出物理量;⊗表示比较元件。热电偶是置于反馈通道中的测量元件,从系统的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他)返回到输入端,并与输入量相比较,比较的结果称为偏差。

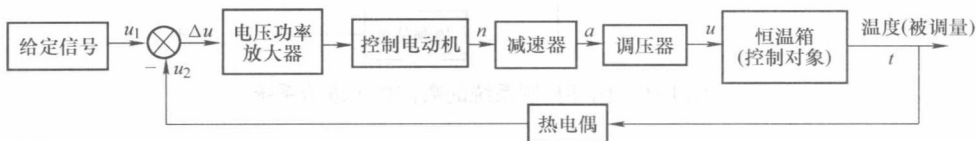


图 1-4 恒温箱自动控制系统框图

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)就是被控制物理量——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。

第二节 自动控制系统的分类

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分类方法。

一、按控制系统有无反馈分类

1. 开环控制系统

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,称为开环控制系统。

图1-1a中普通车削加工的例子就是开环控制系统。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,故该系统是开环控制系统。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,若四个方框的任一个性能变化,就称为系统内部存在扰动,这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 开环控制系统的数控机床进给系统

2. 闭环控制系统

控制系统的输出与输入存在着反馈通道,即系统的输出对控制作用有直接影响的系统,称为闭环控制系统。因此,反馈控制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的框图。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。

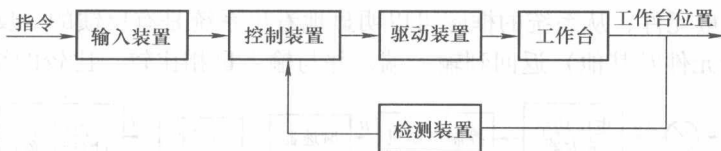


图1-6 闭环控制系统的数控机床进给系统

闭环控制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。

必须指出,在系统主反馈通道中,只有采用负反馈才能达到控制的目的。若采用正反馈,将使偏差越来越大,导致系统发散而无法工作。

闭环控制是最常用的控制方式,通常所说的控制系统,一般都是指闭环控制系统。闭环控制系统是本课程讨论的重点。

3. 开环控制系统与闭环控制系统的比较

闭环控制系统与开环控制系统相比较,闭环控制系统的抗干扰能力强,对外扰动(如负载变化)和内扰动(如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,而开环控制系统则无此纠正能力,因而一般来说,闭环控制系统比开环控制系统的精度高。但是,由于开环控制系统没有反馈通道,因而结构较简单,实现容易;闭环控制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,因而闭环控制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来说,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,大多为开环控制系统,因此对开环控制系统的研究也是很重要的。

4. 反馈控制系统的基本组成及有关名词术语

由于反馈控制系统是完整而典型的自动控制系统,下面介绍其基本组成及有关名词术语,以便加深及全面理解自动控制系统。

(1) 反馈控制系统的基本组成

图1-7示出了典型反馈控制系统的组成图。一个系统的主反馈回路(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)。图1-3中的调压器就是控制元件,移动调压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,称为单位反馈。

比较元件 用来比较输入及反馈信号,并得出两者差值的偏差信号。

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、液压马达及电动机等。

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。

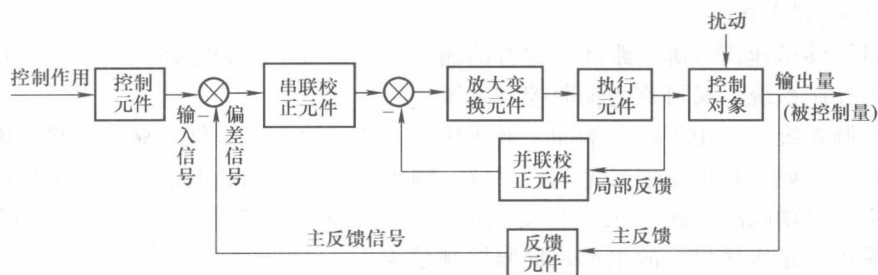


图 1-7 典型反馈控制系统的组成

(2) 反馈控制系统的有关名词术语

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,称为正反馈;反之,称为负反馈。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。通常，希望值是系统的输入量。

需要注意的是，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。根据信号产生的部位，分为内扰与外扰。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

按照给定量（即输入量）的特点不同，可将控制系统划分为恒值控制系统、程序控制系统和随动控制系统。

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，这就是恒温控制系统。即当给定量（即输入量）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，但做调整后，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，要注意干扰对被控制对象的影响，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

对系统的给定量（即输入量）按预定程序变化的系统，叫做程序控制系统。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. 随动控制系统

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

随动控制系统的应用很广。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控制系统。以上这些随动控制系统，由于输出均是机械量，故也都是伺服控制系统。

第三节 机械控制工程研究的对象与方法

机械工程涉及机械制造、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，计算机的广泛应用，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技术科学。工程控制论的创始人钱学森在他的著名著作《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,我国是在20世纪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”。“系统动力学”最早出现于1956年,创始人为美国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。这里我们仅参考其主要论点,来说明机械控制工程的研究对象及特点。

机械控制工程的控制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:已知控制系统,对它进行静态及动态性能(一般可概括为稳、准、快)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

这是由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”的主要任务之一。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,一台机器也是一个系统,还有生产管理系统、人一机系统等。

(3) 系统内存在信息反馈

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。它构成一个闭环控制系统,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控制系统,都是属于系统动力学范畴的。

下面以一个典型例子来说明动力学系统的含意与构成。

图 1-8 是工作台驱动系统的物理模型图。输入 x_i 为位移, 输出 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 $B(\dot{x}_o)$, $B(\dot{x}_o)\dot{x}_o$ 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

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

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, 是一个闭环控制系统, 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)。

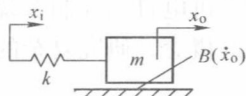


图 1-8 工作台驱动系统

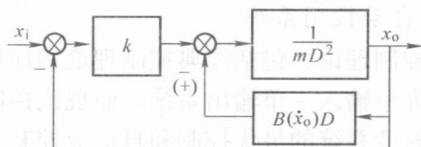


图 1-9 工作台驱动系统框图

当运动速度 $\dot{x}_o$ 较低, 处于摩擦力下降区时(见图 1-10), 其特性是速度 $\dot{x}_o$ 增加, 摩擦力 $B(\dot{x}_o)\dot{x}_o$ 下降, 式(1-1)中这一项的符号由“-”变为“+”, 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, $B(\dot{x}_o)D$ 的负反馈变为正反馈。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。

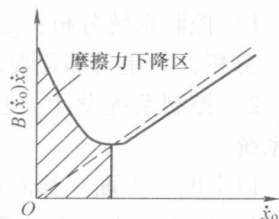


图 1-10 摩擦力与速度的关系

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。

第四节 控制理论发展简史

控制理论是在人类征服自然的生产实践活动中随着社会生产和科学技术的进步而不断发展、完善起来的。

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。如北宋时代(公元 1086—1089 年), 苏颂和韩公廉利用天衡装置制造的水运仪象台, 就是一个按负反馈原理构成的闭环非线性自动控制系统。

1681 年, 法国物理学家 Dennis Papin 发明了用做安全调节装置的锅炉压力调节器; 1765 年, 俄国人普尔佐诺夫(I. Polzunov)发明了蒸汽锅炉水位调节器等; 1788 年, 英国人瓦特(James Watt)发明了蒸汽机离心调速器, 解决了蒸汽机的速度控制问题。以后又不断出现各种自动装置, 自瓦特发明蒸汽机几十年后, 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,英国数学家劳斯(E. J. Routh)及其他学者,提出了有关线性系统稳定性的判据,这些方法奠定了经典控制理论中时域分析法的基础,从而推动了自动控制的发展。

20世纪30年代以来,美国物理学家奈奎斯特(H. Nyquist)研究了长距离电话线信号传输中出现的失真问题,运用复变函数理论建立了以频率特性为基础的稳定性判据,奠定了频率响应法的基础。随后,美国著名科学家伯德(H. W. Bode)和美国Taylor仪器公司工程师尼柯尔斯(N. B. Nichols)在20世纪30年代末和40年代初进一步将频率响应法加以发展,形成了经典控制理论的频域分析法。

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,美国数学家维纳(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20世纪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。

第五节 对控制系统性能的基本要求

不同的控制对象、不同的工作方式和控制任务,对控制系统的品质指标要求也往往不相同。一般说来,对控制系统品质指标的基本要求可以归纳为:稳定性、准确性、快速性。

稳定性:稳定性是指动态过程的振荡倾向和系统能够恢复平衡状态的能力。任何一个能够正常工作的控制系统,首先必须是稳定的。稳定性是控制系统正常工作的首要条件。

准确性:准确性是对控制系统稳态(静态)性能的要求。对一个稳定的系统而言,过渡过程结束后,系统输出量的实际值与期望值之差称为稳态误差,它是衡量系统控制精度的重要指标。稳态误差越小,表示控制系统的准确性越好,控制精度越高。

快速性:快速性是对控制系统动态性能(过渡过程性能)的要求。快速性指控制系统运动到新的平衡状态所需要的时间。

由于被控对象的具体情况不同,各种系统对三项性能指标的要求各有侧重。例如恒值系统一般对稳态性能限制比较严格,随动系统一般对动态性能要求较高。

同一个系统,上述三项性能指标之间往往是相互制约的。提高过程的快速性,可能会引起系统强烈振荡;改善控制系统的稳定性,控制过程又可能很迟缓,甚至精度也可能变差。分析和解决这些矛盾,将是本课程讨论的重要内容。

第六节 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