

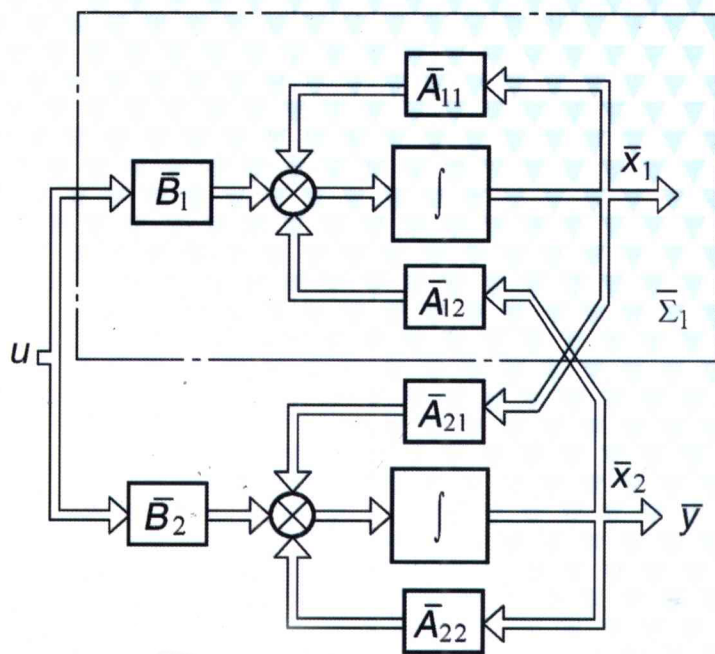


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

控制工程基础

第3版

燕山大学 孔祥东 王益群 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

控制工程基础

第3版

主编	孔祥东	王益群		
参编	高英杰	姚成玉	方一鸣	王洪斌
主审	王占林	范崇托		

机械工业出版社

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书主要介绍工程中广为应用的经典控制理论和现代控制理论中控制系统分析与综合的基本方法。全书共分十章：前六章属于经典控制理论中的线性定常连续控制系统问题，阐明了自动控制的三个基本问题，即模型、分析和控制；第七章和第八章分别为非线性系统及计算机采样控制系统；第九章为现代控制理论基础；第十章为典型控制系统的分析与设计实例。本书总结了编者多年教学经验，且参考国内外教材特点，精选内容；叙述透彻，易教易学；强调基本概念和工程背景，适应面宽；正文中穿插有较多的例题，附有大量的习题（部分有答案），便于读者自学。

本书配有多媒体教学课件，需要者请根据书末的“读者信息反馈表”索取。

本书适于作机械工程、电气工程、仪器科学与工程、动力工程、交通运输工程、生物医学工程以及材料加工等工学专业的教材，也可供有关科技人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

控制工程基础/孔祥东，王益群主编. —3版. —北京：

机械工业出版社，2008. 1（2008. 6重印）

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-07924-8

I. 控… II. ①孔…②王… III. 自动控制理论—高等学校—教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2007）第 163371 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：刘小慧 版式设计：霍永明 责任校对：陈延翔

封面设计 张 静 责任印制：李 妍

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2008 年 6 月第 3 版第 2 次印刷

184mm×260mm·17 印张·415 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-07924-8

定价：26.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

销售服务热线电话：（010）68326294

购书热线电话：（010）88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：（010）88379712

封面无防伪标均为盗版

第3版前言

本书在原普通高等教育机电类规划教材《控制工程基础》(王益群、孔祥东主编,机械工业出版社,2001)基础上,重新修订编写,是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书在编写过程中结合教学改革经验、反馈意见和科研积累,并参考同类教材和相关文献,从教学、考研及工程实用性需求等角度着眼,力求使教材内容概念表达准确、知识结构合理、教学安排层次清晰,并进一步突出“控制工程基础”的主要特点。

本书主要介绍经典控制理论和现代控制理论中系统分析与综合的基本方法。全书共分十章:前六章属于经典控制理论中的线性定常连续控制系统问题,阐明了自动控制的三个基本问题,即模型、分析和控制;第七章和第八章分别为非线性系统及计算机采样控制系统;第九章为现代控制理论基础;第十章为典型控制系统的分析与设计实例。

本书主要在以下几个方面进行了删改和补充:

一、调整知识构成体系。①增加了工程中也经常应用的根轨迹法。②增添了现代控制理论内容,如第九章“现代控制理论基础”。③突出机电系统作为主要控制对象,适当增加工程控制系统实际应用的例子,如第十章“典型控制系统的分析与设计实例”等。④精简了部分章节的内容。

二、调整章节结构体系。在本书经典控制理论部分中,以时域分析、根轨迹法、频率分析为主线,将原来独立成章的“控制系统的稳定性分析”和“控制系统的误差分析和计算”拆分,融入上述主线中,使知识构成和结构体系更合理,也便于学习和阅读。

三、调整增添例题、习题。对不够典型且已陈旧的例题和习题进行了删减,增加了与工程应用结合紧密、具有代表性的例题和习题,部分习题附有参考答案。

四、集中介绍软件应用。在附录“基于 MATLAB 的控制系统的分析与设计”中作为专题来论述 MATLAB 和 SIMULINK 软件在控制工程中的应用,便于读者查阅。

使用本书讲授课程约需 50 学时,实验约需 6 学时。凡有“*”号的章节,属加深扩宽的内容,各学校可根据教学学时数安排酌情讲授。

本书由燕山大学孔祥东教授、王益群教授主编。参加编写工作的有孔祥东教授(第一章、第二章)、高英杰教授(第三章、第五章)、姚成玉副教授(第四章、附录、习题及答案)、方一鸣教授(第六章、第七章、第八章)、王洪斌教授(第九章、第十章)。全书由孔祥东、王益群教授统稿,姚成玉副教授协助整理。研究生权凌霄、谷彦鹏、赵琳琳、李萍等为本书部分章节的文字和绘图工作给予了帮助。

本书由北京航空航天大学王占林教授、上海交通大学范崇托教授主审。燕山大学王跃灵、刘爽、魏立新副教授等提出了许多宝贵意见。在此表示衷心感谢!

由于编者水平所限,书中缺点和错误之处在所难免,欢迎读者批评指正。联系方式: control@ysu.edu.cn。

编 者

第2版前言

根据全国高校机械工程教学指导委员会1998年武汉会议的决定,编写了这本适应教学计划40~50学时的“控制工程基础”教材。

本书是在原《控制工程基础》(王益群、阳含和主编,机械工业出版社,1989)统编教材基础上,结合编者近些年教改实践和计算机技术的普及重新编写而成的。

本书以介绍工程上广为应用的经典控制论为主,以使读者能够学会信息处理和系统分析与综合的基本方法。在编写时,力求重点突出,使读者对经典控制论有较全面的了解。考虑到近些年计算机应用的推广和求解手段的进步,所以还简要介绍了计算机采样控制系统和控制系统计算机辅助分析的基本方法,以使读者建立起这方面的基本概念。

全书共分九章,包括绪论、数学模型、时间响应分析、频率特性、稳定性分析、误差分析、系统的综合与校正、非线性系统和计算机采样控制系统等,有*号的章节为加深拓宽的内容,可根据需要选讲。

在论述上力求做到概念准确,层次清晰,深入浅出,易教易学,适当结合机、电、液方面编入一些易于理解的例题和习题。本书适于作机械设计制造及其自动化、材料成型与控制工程专业及其他非电类专业的教材,也可供有关科技人员参考。

本书由燕山大学王益群教授、孔祥东教授主编。参加编写工作的有王益群(第一章)、孔祥东(第二章、第四章、第五章)、李久彤(第三章)、高英杰(第六章、附录)、焦晓红(第七章、第八章)、方一鸣(第九章)。

本书由西安交通大学史维祥教授主审。2000年4月在秦皇岛燕山大学召开了本书的审稿会,西安交通大学、北京航空航天大学、燕山大学和机械工业出版社的有关专家出席了会议并提出了许多宝贵意见,在此对上述单位及有关专家表示衷心感谢!

由于编者水平有限,有不当之处,恳请读者批评指正。

编者

2000年5月

第1版前言

根据全国高等学校工科机电类1986~1990年教材编审、出版规划,全国流体传动及控制教材编审组于1983年12月和1984年12月先后两次在西安开会,起草并通过了本教材的教学大纲。1986年10月在南京召开的流体传动及控制专业教材编审组会议上,根据加强基础、增强适应性的精神,对本教材的编写内容又作了进一步讨论。本教材就是按照上述会议所通过的大纲,结合作者多年的教学实践编写而成的。

本书以介绍工程上广为应用的经典控制论为主,以期读者能够学会信息的处理和系统的分析和综合,为学习专业课程和进一步学习控制理论打下基础。鉴于频域法是经典控制论的核心,故在阐述上以频域法为主线展开,同时还介绍了瞬态分析法、根轨迹法、控制系统的非线性分析等,力求重点突出,又能使读者对经典控制论有较全面的了解。考虑时延环节在工程上广泛存在,故增加一章介绍时延控制系统分析。又因多数院校在大学本科教学中现代控制理论未单独设课,故又增加现代控制理论概述这一章,凡是*号的章节,属加深拓宽的内容,各校可视具体情况进行适当增减。

本书在论述上力求做到概念准确,层次清晰,深入浅出,精讲多练,适当结合机、电、液方面编入一些易于理解的例题和一定数量的习题,以加深对基本概念的理解。本书适于作流体传动及控制专业及其他机械类专业的教材,也可供有关科技人员参考。

本书由东北重型机械学院(秦皇岛分校)王益群教授和西安交通大学阳含和教授主编。阳含和教授生前对本书的编写大纲提出过精辟、有益的见解。参加编写工作的有东北重型机械学院(秦皇岛分校)王益群(第三章、第四章、第八章、附录)、李久彤(第五章、第六章)、韩德才(第九章、第十章、第十一章);西安交通大学杨公仆(第一章、第七章)、王馨(第二章)。

本书由东北工学院周士昌教授主审。1988年8月在秦皇岛燕山大学(东北重型机械学院分校)召开了审稿会,东北工学院、北京理工大学、太原工业大学、甘肃工业大学、沈阳工业大学的代表参加了会议并提出许多宝贵意见。燕山大学徐征明教授审阅了本书的部分章节,编者和宋维公教授进行过讨论,祈晓野同志在计算机应用方面给予了积极的帮助。在此,对上述单位及有关人员一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限,缺点和错误在所难免,恳请广大读者批评指教。

编者

1988年10月

目 录

第3版前言	
第2版前言	
第1版前言	
第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 自动控制系统的概念	2
第三节 控制工程基础的主要任务与研究内容	8
小结	9
习题	9
第二章 控制系统的数学模型	11
第一节 控制系统的微分方程及线性化方程	11
第二节 拉氏变换及反变换	18
第三节 传递函数及基本环节的传递函数	27
第四节 框图及其简化	31
第五节 信号流图及梅逊公式	36
小结	38
习题	39
第三章 控制系统的时域分析	46
第一节 时间响应及系统性能指标	46
第二节 一阶系统的时间响应	49
第三节 二阶系统的时间响应	51
* 第四节 高阶系统的时间响应	58
第五节 稳定性及其代数稳定判据	60
第六节 误差分析与计算	67
小结	75
习题	76
第四章 控制系统的根轨迹分析法	81
第一节 根轨迹的基本概念	81
第二节 常规根轨迹	82
* 第三节 广义根轨迹	91
* 第四节 增加开环零点、极点对系统根轨迹的影响	94
小结	95
习题	96
第五章 控制系统的频域分析	99
第一节 频率特性的基本概念	99
第二节 频率特性图形表示法	103
第三节 闭环频率特性	115
* 第四节 时域指标与频域指标的关系	120
第五节 几何稳定判据	122
第六节 相对稳定性	127
小结	132
习题	132
第六章 控制系统的综合与校正	137
第一节 概述	137
第二节 串联校正装置的形式及其特性	139
第三节 用频率特性法确定串联校正装置	143
* 第四节 反馈校正	148
第五节 复合校正	151
小结	154
习题	155
第七章 非线性系统	158
第一节 非线性系统的基本概念	158
* 第二节 描述函数法	160
* 第三节 相平面法	164
小结	169
习题	170
第八章 计算机采样控制系统	172
第一节 概述	172
第二节 信号的采样与保持	173
第三节 Z 变换和 Z 反变换	177
第四节 采样控制系统的数学模型	182
第五节 采样控制系统的性能分析	186
* 第六节 采样控制系统的设计	191
小结	194
习题	195
第九章 现代控制理论基础	197
第一节 概述	197

第二节 控制系统的状态空间描述	197	第五节 X-Y 绘图仪	232
第三节 控制系统的能控性和能观性	210	第六节 火星漫游车	234
* 第四节 稳定性与李亚普诺夫方法	216	第七节 雕刻机控制系统	236
* 第五节 线性定常系统的综合	218	附录	238
小结	221	附录 A 基本环节 (机、电、液)	238
习题	222	附录 B 机械网络	239
* 第十章 典型控制系统的分析与 设计实例	224	附录 C 电气校正网络	240
第一节 打印机传动带驱动器	224	附录 D 基于 MATLAB 的控制系统分析 与设计	243
第二节 工作台控制系统	227	部分习题参考答案	254
第三节 激光操纵控制系统	229	参考文献	260
第四节 哈勃太空望远镜指向控制	230	读者信息反馈表	

第一章 绪 论

第一节 概 述

控制工程基础，也称控制理论基础，主要阐述的是自动控制技术的基础理论。在现代的工业、农业、国防和科学技术等领域中，自动控制技术得到了广泛的应用。所谓自动控制，就是在没有人直接参与的情况下，采用控制装置使被控对象（如机器的运行或生产过程的进行）的某些物理量（如速度、位移、电压、电流、压力、流量、温度等）在一定精度范围内按照给定的规律变化。

在实际工程中，机械、电气、液压和计算机被广泛应用，向机电液一体化方向发展，这就需要自动控制技术与机电液系统结合，阐述工程上共同遵循的基本控制规律，即研究工程系统自动控制问题的基础理论，这是控制工程基础的一个特色。

控制理论的诞生源于解决机电液等工程问题的需要，即实际生产需求促进了理论的发展。控制理论与实际工程问题结合后产生了极其旺盛的生命力，并诞生了工程控制论这个研究领域，工程控制论的发展是伴随着控制论的发展同时进行的。

工程控制论的诞生以 1954 年我国科学家钱学森出版的《工程控制论》为标志，这部著作中首先提出了工程控制论的概念，并把控制论推广到工程领域。继而出现了生物控制论、经济控制论、社会控制论，将控制论推广应用到生物系统、经济运行及社会管理领域。

控制论（Cybernetics）是研究生物体、机器及各种不同系统控制和调节规律的科学。它不仅是一门极为重要的科学，而且也是一门卓越的方法论，具有适用于各门科学的思想和方法。

控制论的产生可追溯到 18 世纪英国第一次技术革命。1765 年瓦特（J. Watt）发明了蒸汽机离心式飞锤调速器，来自动调节蒸汽机的转速。调速器的振荡问题引发了工程界对系统稳定性的讨论，物理学家麦克斯维（J. C. Maxwell）在讨论这种反馈系统的稳定性问题时，于 1868 年发表论文《论调节器》，当属最早的研究论文。当时并没有提出反馈这一概念。

第二次世界大战期间，雷达及火力控制系统有了迅速的发展，控制论的奠基人、美国数学家维纳（N. Wiener）在火炮自动控制的研究中发现了极为重要的反馈概念，他在总结前人成果的基础上，在 1948 年发表了著名的《控制论》（副标题为：关于在动物和机器中控制和通讯的科学）一文，揭示了机器系统、生命系统甚至社会和经济系统都有一个共同的特点，即通过信息的传递、加工处理和反馈来进行控制，即控制论所具有的“信息、反馈与控制”三个要素，亦即控制论的中心思想，奠定了控制论这门学科的基础，宣告了这门新兴学科的诞生。

随着科学技术的进步，特别是计算机技术的发展，控制理论日渐成熟，对促进生产的发展和社会进步产生了深远的影响。就其发展过程，大体可分三个阶段。

第一阶段：20 世纪 40 ~ 50 年代为“经典控制理论”（又称为古典控制理论）发展时期。经典控制理论的内容是以传递函数为基础，主要研究单输入-单输出（Single Input Single Output, SISO）控制系统的分析和设计问题，对线性定常系统，这种方法是成熟而有效的。

第二阶段：20 世纪 60 ~ 70 年代为“现代控制理论”发展时期。这期间随着计算机技术的发展和空间技术的进步，产生了把经典控制理论中的高阶常微分方程转化为一阶微分方程组来描述系统的方法，即所谓状态空间法，这种方法可以解决多输入-多输出（Multiple Input Multiple Output, MIMO）、非线性及时变系统的分析和设计问题。

现代控制理论的奠定人是美国科学家卡尔曼（R. E. Kalman），他提出的状态空间法及前苏联学者庞特里亚金（Понтрягин 或 Pontryagin）提出的极大值原理和其他学者提出的动态规划等方法，形成了最优控制、系统辨识、自适应控制等现代控制理论的研究方向。

第三阶段：20 世纪 70 年代末至今，控制理论向着“大系统理论”和“智能控制理论”的方向发展。前者是控制理论在广度上的开拓，后者是控制理论在深度上的挖掘。“大系统理论”是用控制和信息的观点研究大系统的结构方案、总体设计中的分析方法和协调问题。“智能控制理论”是通过研究与模拟人类活动的机理，研究具有仿人智能的工程控制和信息处理问题。目前智能控制理论已经形成了模糊控制、神经网络控制和专家控制等重要的分支。

从控制理论的发展中可以看出，经典控制理论是基础，现代控制理论、智能控制理论是经典控制理论的延伸和拓展，它们对解决实际工程问题都扮演着重要的角色，相当多的工程问题都需要用它们来解决。

回顾控制理论的发展历程，它反映了人类社会由机械化步入电气化，继而走向自动化、信息化和智能化的时代特征。

第二节 自动控制系统的基本概念

在各种生产设备和生产过程中，常常要求某些物理量保持恒定，或者按照一定的规律变化，这就需要有自动控制系统来进行控制和调整。下面介绍自动控制系统如何对这些物理量实现自动控制。

一、自动控制系统工作原理

首先研究恒温系统。实现恒温控制有两种办法：人工控制和自动控制。图 1-1 所示为人工控制的恒温控制箱。人们可以通过调压器改变电阻丝的电流，以达到控制温度的目的。箱内温度是由温度计检测的。人工调节过程可归结如下：

- 1) 观测由检测元件（温度计）测出的恒温箱的温度（被控制量）。
- 2) 与要求的温度值（期望值）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：当恒温箱温度高于所要求的给定温度值时，就移动调压器使电流减小，温度降低；若温度低于给定的值，则移动调压

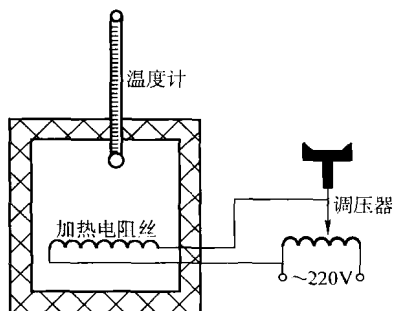


图 1-1 人工控制的恒温箱

器,使电流增加,温度升高。

因此,人工控制的过程就是检测、求偏差、再控制,以纠正偏差的过程。简单地讲就是“检测偏差用以纠正偏差”的过程。对于这样简单的控制形式,如果能找到一个控制器代替人的职能,这样一个人工调节系统就可以变成自动控制系统了。

图 1-2 就是一个自动控制系统。其中,恒温箱的温度是由给定信号电压 u_1 控制的。当外界因素引起箱内温度变化时,作为检测元件的热电偶,把温度转换成对应的电压信号 u_2 并反馈回去与给定信号 u_1 相比较,所得结果即为温度的偏差信号 $\Delta u = u_1 - u_2$ 。经过电压、

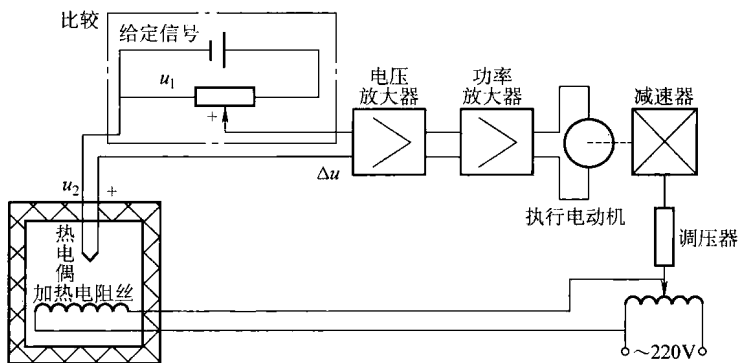


图 1-2 恒温箱自动控制系统

功率放大后,用以改变电动机的转速和方向,并通过传动装置拖动调压器动触头。当温度偏高时,动触头向着减小电流的方向运动,反之则加大电流,直到温度达到给定值为止。即只有在偏差信号 $\Delta u = 0$ 时,电动机才停转。这样就完成了所要求的控制任务。而所有这些装置便组成了一个自动控制系统。

图 1-3 所示为一台反馈控制的液压压下板带轧机原理图。由于板带轧制的速度和精度要求越来越高,现代化轧机的压下机构已经由电液伺服系统代替了旧式的机械式压下机构。图中,板带出口厚度 h 由检测元件测出并反馈到电液伺服系统中,伺服系统发出控制信号以驱动液压缸,从而调节轧制辊缝,使得板带出口厚度 h 保持在要求的误差范围内。

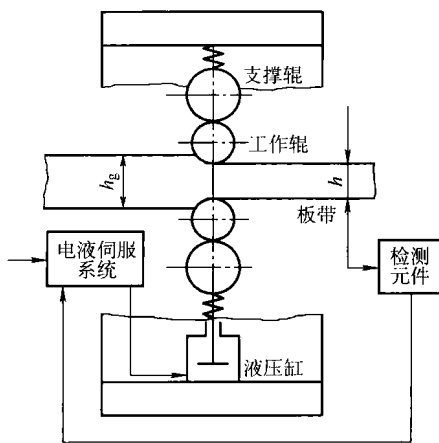


图 1-3 板厚控制简图

人工控制系统和自动控制系统是极其相似的。执行机构类似于人手,检测装置相当于人的眼睛,控制器类似于人脑。另外,它们还有一个共同的特点,就是都要检测偏差,并用检测到的偏差去纠正偏差,可见没有偏差便没有调节过程。在自动控制系统中,这一偏差是通过反馈建立起来的。给定量也叫控制系统的输入量,被控制量称为系统的输出量。反馈(Feedback)就是指输出量通过适当的检测装置将信号全部或一部分返回输入端,使之与输入量进行比较。如果反馈信号与系统的输入信号的方向相反,则称为负反馈(Negative Feedback)。比较的结果即为偏差。因此基于反馈基础上的“检测偏差用以纠正偏差”的原理又称为反馈控制原理。利用反馈控制原理组成的系统称为反馈控制系统。实现自动控制的装置可各不相同,但反馈控制的原理却是相同的。可以说,反馈控制是实现自动控制最基本的方法。

二、开环控制与闭环控制

工业上用的控制系统,根据有无反馈作用可分为两类:开环控制与闭环控制。

1. 开环控制系统 如果控制器和被控制对象之间只有顺向作用而没有反向联系,即输出端和输入端之间不存在反馈回路,输出量对系统的控制作用没有影响,这样的系统称为开环控制系统。图 1-4 所示的电动机转速控制系统就是开环控制的。当给定电压改变时,电动机转速也跟着改变,但这个控制系统经受不住负载力矩变化对转速的影响,即负载力矩改变时,转速也要随之改变。

2. 闭环控制系统 即反馈控制系统。这种系统的特点是系统的输出端和输入端之间存在反馈回路,即输出量对控制作用有直接影响。闭环的作用就是利用反馈来减少偏差。

闭环控制突出的优点是精度高,出现干扰时,只要被控制量的实际值偏离给定值时,闭环控制就会产生控制作用来减小这一偏差。图 1-5 所示的闭环调速系统就能大大降低负载力矩对转速的影响,例如负载加大,转速就会降低,但有了反馈,偏差就会增大,电动机电压就会升高,转速又会上升,并在一定误差范围内保持在设定值。

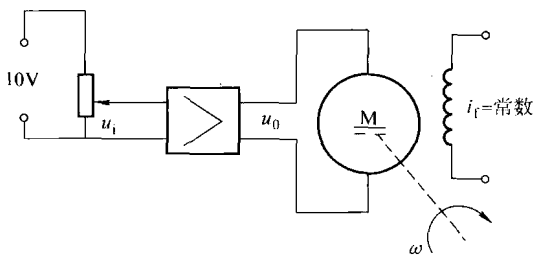


图 1-4 电动机转速控制系统

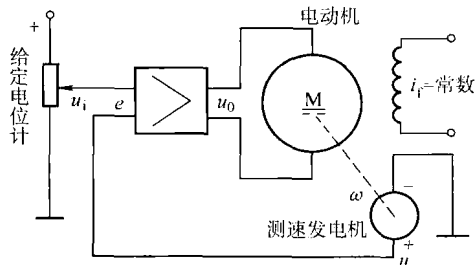


图 1-5 闭环调速系统原理图

闭环系统也有它的缺点,这类系统是检测偏差用以纠正偏差,或者说是靠偏差进行控制。在工作过程中系统总会存在着偏差,由于元件的惯性,调节不好容易引起振荡,使系统不稳定。因此精度和稳定性是闭环系统存在的一对矛盾。

从稳定性的角度看,开环系统比较容易构建,结构也比较简单,因为开环系统一般不存在稳定性问题。

三、闭环控制系统的基本组成

图 1-6 就是一个典型的闭环控制系统,该图表示了这些元件在系统中的位置和它们相互间的关系。由图可以看出,作为一个典型的闭环控制系统应该包括反馈元件、给定元件、比较元件、放大元件、执行元件及校正元件等。

1) 给定元件:主要用于产生给定信号或输入信号。例如,调速系统的给定电位计。

2) 反馈元件:检测被控量或输出量,产生反馈信号,该信号与输出量存在着确定的函数关系(通常为比例关系)。例如,压力传感器、温度传感器、调速系统的测速发电机。

3) 比较元件:用来比较输入信号和反馈信号大小,得到偏差。可以是一个差接的电路。自整角机、旋转变压器、机械式差动装置、运算放大器等都可以作为物理的比

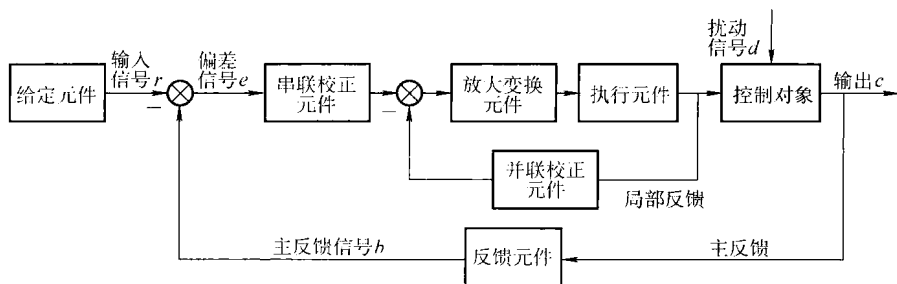


图 1-6 典型的闭环控制系统框图

较元件。

4) 放大元件：对偏差信号进行信号放大和功率放大的元件。例如伺服功率放大器、电液伺服阀等。

5) 执行元件：直接对控制对象进行操作的元件。例如执行电动机、液压马达、液压缸等。

6) 控制对象：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，例如机床、工作台等。

7) 校正元件：或称校正装置，用以稳定控制系统，提高控制性能。有反馈校正和串联校正等形式。

四、自动控制系统的基本类型

自动控制系统的类型很多，它们的结构类型和所完成的任务也各不相同。根据不同的分类方法，自动控制系统的类型可以概括如下：

1. 按给定量的运动规律分

(1) 恒值调节系统 系统输入量为常值，或者随时间缓慢变化。系统控制器的基本任务是当出现扰动时，使系统的输出量保持恒定的期望值，例如稳压电源、恒温系统等。对于这类系统，分析的重点在于克服扰动对输出量的影响。

(2) 程序控制系统 又称为过程控制系统。系统输入量为已知给定的时间函数时，系统的控制过程按预定程序进行。近年来，由于微处理器的发展，大量的数字程序控制系统投入了运行。

(3) 随动（伺服）控制系统 又称为跟踪系统。系统的输入量是时间的未知函数，即给定量的变化规律事先无法确定，要求输出量能够准确、快速地复现给定量，如火炮自动瞄准敌机的系统、轧机板厚自动控制系统。

2. 按系统线性特性分

(1) 线性系统 组成系统的元器件特性均为线性（或基本为线性），能用线性常微分方程描述其输入与输出关系的系统。线性系统满足叠加原理，其时间响应的特征与初始状态无关。

(2) 非线性系统 只要有一个元器件特性不能用线性方程描述，即为非线性系统。描述非线性系统的常微分方程中，输出量及其各阶导数不全是一次的，或者有的输出量导数项的系数是输入量的函数。非线性系统不能应用叠加原理，其时间响应的特征与初始状态有很

大关系。

严格地讲,实际上不存在线性系统,因为各种物理系统总是不同程度地具有非线性。但只要非线性不严重,能用线性系统理论和方法对待的系统均可称为线性系统。

3. 按参数是否为常数分

(1) 时变系统 又称非定常系统,当系统数学描述中显含时间 t 时,即数学描述中的系数是包含 t 的函数时,称相应的系统为时变系统。

(2) 定常系统 又称时不变系统,定常系统的特点是系统数学描述中不显含时间 t 。定常系统在物理上代表了结构和参数都不随时间变化的一类系统。

如果系统既是线性的,又是定常的,则称为线性定常系统 (Linear Time Invariant System, LTIS)。

4. 按系统信号类型分

(1) 连续控制系统 系统中各个参量的变化都是连续进行的,是时间的连续函数 (也称模拟量)。前面讲的恒温箱自动控制系统就属于连续控制系统。

(2) 离散控制系统 系统中某一处或数处的参量是脉冲序列或数码的形式,这种信号是离散的,即数值上和时间上不连续。

在系统中使用采样开关,将连续函数形式的信号转变为离散的脉冲序列形式的信号去进行控制的系统,通常称为采样控制系统或脉冲控制系统。

如用数字计算机或数字控制器,其离散信号是数码形式传递的系统,则称为采样数字控制系统,简称为数字控制系统 (也称计算机控制系统)。数字控制系统的给定量、反馈量、偏差量都是数字量。

一般说来,同样是闭环控制系统,数字控制的精度高于连续控制,因为数码形式的控制信号远比模拟控制信号的抗干扰能力强。所以目前在要求控制精度高的场合,大量使用数字控制系统。

5. 按系统输入输出变量数量分

(1) 单变量系统 单输入单输出系统亦称单变量系统,其输入量和输出量各为一个,系统结构较为简单。

(2) 多变量系统 多输入多输出系统亦称多变量系统,其输入量和输出量多于一个,系统结构较为复杂,回路多。一个输入量对数个输出量都有控制作用,反之,一个输出量往往受多个输入量控制,也就是说输入输出之间有相互耦合作用。

显然,多变量系统的分析与设计远比单变量系统复杂。

6. 按系统结构和参数在工作过程中是否确定分

(1) 确定系统 若系统的结构和参数是确定的、已知的,系统的输入信号 (包括参考输入及扰动) 也是确定的,可以用解析式或图表确切表示,则这种系统称为确定系统。若系统输入信号基本上是确定的,但夹杂有不严重且其影响可忽略不计的噪声时,则此系统也可视为确定系统。

(2) 不确定系统 当系统本身或作用于该系统的输入信号不确定时称为不确定系统。例如系统的输入信号混杂有随机噪声,系统使用的元器件的特性有随机干扰等就构成简单的不确定系统。若随机噪声等能用统计特性表示其特征时,可用概率论对不确定系统加以研究。

7. 按系统能否用常微分方程描述分

(1) 集中参数系统 能用常微分方程描述的系统称为集中参数系统。这种系统中的参量或是定常的,或是时间的函数,系统的各状态(输入量、输出量及中间量)都只是时间的函数,因此,可以用时间作为变量的常微分方程描述其运动规律。

(2) 分布参数系统 不能用常微分方程,而需要用偏微分方程描述的系统称为分布参数系统。在这种系统中,可能是一部分环节能用常微分方程描述,但至少有一个环节需要用偏微分方程来描述其运动。这个环节的参量不只是时间的函数(也许与时间无关,对于时间而言是定常的),而是明显地依赖这一环节状态。因此,系统的输出将不仅是时间的函数,而且还是系统内部状态变量的函数,所以需要偏微分方程描述系统。

按系统组成元件的物理性质又可分为电气控制系统、液压控制系统和气压控制系统等。按被控量的不同又可分为温度控制系统、速度控制系统和张力控制系统等。

五、对控制系统的基本要求

对控制系统的基本要求一般可归结为稳定性、快速性、准确性三个方面。

(1) 稳定性 由于系统存在着惯性,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。稳定性就是指动态过程的振荡倾向和系统能否恢复平衡状态的能力。稳定性是系统工作的首要条件。

(2) 快速性 快速性是指当系统输出量与给定量之间产生偏差时,消除这种偏差过程的快慢程度。

(3) 准确性 准确性是指在调整过程结束后输出量与给定量之间的偏差,或称为静态精度,这也是衡量系统工作性能的重要指标。例如数控机床精度越高,则加工精度也越高。

综上所述,对控制系统的基本要求是稳、快、准。

由于受控对象的具体情况不同,各种系统对稳、快、准的要求各有侧重。例如,随动系统对快速性要求较高,而调速系统则对稳定性提出较严格的要求。

同一系统稳、快、准是相互制约的。快速性好,可能会有强烈振荡;改善稳定性,控制过程又可能过于迟缓,精度也可能变坏。分析和解决这些矛盾,也是本学科讨论的重要内容。

对于自动控制系统而言,在保证稳定的前提下,对其快速性和准确性方面的性能指标可按如下类型给出:

(1) 以时域形式给出,即时域性能指标 它包括瞬态性能(快速性与平稳性)指标和稳态性能(准确性)指标。

(2) 以频域形式给出,即频域性能指标 它不仅反映系统在频域方面的特性,而且当时域性能无法求得时,一般可先用频率特性实验来求出该系统在频域中的动态性能,再由此推出时域中的动态性能。

前两种形式的指标之间有确定的关系,因此是等价的,它们都是常规性能指标。

(3) 综合性能指标 它是衡量设置系统的某些重要参数后如何才能保证系统获得一些最优综合性能的测度,即若对这个性能指标取极值,则可获得有关重要参数值,这些参数值可保证这一综合性能为最优,即最优性能指标。

第三节 控制工程基础的主要任务与研究内容

一、主要任务

控制工程基础主要研究工程系统中状态的运动规律和改变这种运动规律的可能性和方法,建立和揭示系统结构、参数、行为和性能间的确定的和定量的关系。通常,研究系统运动规律的问题称为分析问题,研究改变运动规律的可能性和方法的问题则为综合问题。前者属于认识系统,后者则为改造系统。

对于分析问题而言,主要是研究当系统和输入已知时,求出系统的输出,并通过输出来研究系统本身的问题,即分析系统的稳定性、快速性和准确性。

对于综合问题而言,主要是研究确定出一种合适的控制规律,使系统输出尽可能符合给定的要求,或在某种程度上满足最佳性能指标(最优控制)。

无论解决哪类问题,都必须具有丰富的控制理论知识,同时能以系统的而不是孤立的、动态的而不是静态的观点和方法来处理问题,才能达到预期的目的。

二、研究内容

控制工程基础实际上是研究工程系统的动力学问题。具体地说,它研究的是工程系统在一定的输入作用下,从系统一定的初始状态出发,所经历的由系统结构与参数决定的整个动态历程,即研究系统、输入及输出三者之间的动态关系。下面以一个机械系统为例说明这一问题。

图 1-7 是一个质量-弹簧-阻尼系统。图中 m 、 k 和 f 分别代表运动体质量、弹簧刚度和粘性阻尼系数(由介质粘性等因素形成的干摩擦、库仑摩擦引起的阻尼,与速度成正比)。当质量块受到外力 $F(t)$ 时,位移为 $x(t)$,则根据牛顿第二定律可得出系统的动力学方程为

$$m \ddot{x}(t) + f \dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (x(0) = x_0, \dot{x}(0) = \dot{x}_0)$$

该系统可以抽象为图 1-8 所示的工程系统模型。可见,对于图 1-7 系统而言,输入为 $F(t)$,输出为 $x(t)$,而由质量、弹簧和阻尼的参数 m 、 k 和 f 及其结构就构成了系统。

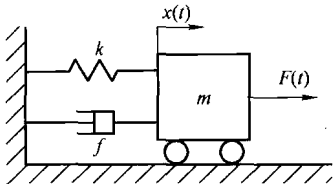


图 1-7 质量-弹簧-阻尼系统

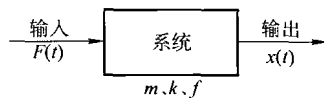


图 1-8 工程系统模型

控制工程基础在研究工程系统、输入和输出之间的动态关系时,可将其动力学问题大致归纳为如下五个方面:

1) 当系统已定、输入已知时,求出系统的输出(响应),并通过输出来研究系统本身的有关问题,即系统分析问题。

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, 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, 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, 即滤波与预测问题。

5) 当输入与输出均已知时, 求出系统的结构与参数, 建立系统的数学模型, 即系统辨识问题。

小 结

本章介绍了控制工程基础的基本概念及控制理论发展历程; 论述了自动控制系统的工作原理、开环控制与闭环控制的概念、闭环控制系统的基本组成、自动控制系统的基本类型及对控制系统的基本性能要求; 最后阐述了控制工程基础的主要任务和研究内容。

习 题

1-1 思考以下问题:

- (1) 什么是反馈控制原理?
- (2) 闭环控制系统的基本组成及各部分的职能。
- (3) 什么是开环控制系统? 什么是闭环控制系统? 试比较开环控制和闭环控制的区别及其优缺点。
- (4) 按不同的划分方法, 自动控制系统可分为哪些类型? 什么是单变量线性定常系统? 什么是非线性系统? 什么是离散系统? 什么是多变量系统? 线性系统有哪些性质?
- (5) 评价控制系统的三大基本性能要求是什么? 这些要求之间是否存在相互影响?
- (6) 什么是分析问题? 什么是综合问题? 自动控制系统需要分析和设计的问题有哪些?
- (7) 试列举几个身边控制系统的例子, 说明其基本原理。

1-2 试判别以下方程所描述的系统的类型(线性或非线性, 定常或时变, 动态或静态)。

- (1) $c(t) = r^2(t)$ (2) $\dot{c}(t) + 5c(t) = e^{-t} + r(t)$
- (3) $\ddot{c}(t) + 2\dot{c}(t) + 5c(t) = 3\dot{r}(t)$ (4) $\ddot{c}(t) + e^{-t}\ddot{c}(t) + 2\dot{c}(t)c(t) = t\dot{r}(t) + r(t)$
- (5) $\ddot{c}(t) + c(t)\cos\omega t = r(t)$ (6) $\ddot{c}(t) + 4c(t) = \begin{cases} 4r(t) & 0 \leq c(t) < 1 \\ r(t) & c(t) \geq 1 \end{cases}$
- (7) $c(t) = r(t)\cos\omega t + 5$ (8) $5\dot{c}(t) + c(t) = 3\dot{r}(t) + 2r(t) + 3\int_0^t r(t)dt$
- (9) $c(t) = 3r(t)$ (10) $\ddot{c}(t) + \dot{c}(t) + 5c(t) + 10 = 3r(t)$
- (11) $c(t) = r(t)\sin t$ (12) $t\dot{c}(t) + 2c(t) = t\dot{r}(t) + 2r(t)$
- (13) $\ddot{c}(t) + 2\dot{c}(t) + c^2(t) = r(t)$ (14) $\ddot{c}(t) + \dot{c}(t) + 5c(t) + \int_0^t c(t)dt = 8\dot{r}(t) (c(t) = 0, t \leq 0)$

1-3 在给出的几种答案里, 选择出正确的答案。

- (1) 以同等精度元件组成的开环系统和闭环系统, 其精度比较_____。
(A) 开环高 (B) 闭环高 (C) 相差不多 (D) 一样高
- (2) 系统的输出信号对控制作用的影响_____。
(A) 开环有 (B) 闭环有 (C) 都没有 (D) 都有