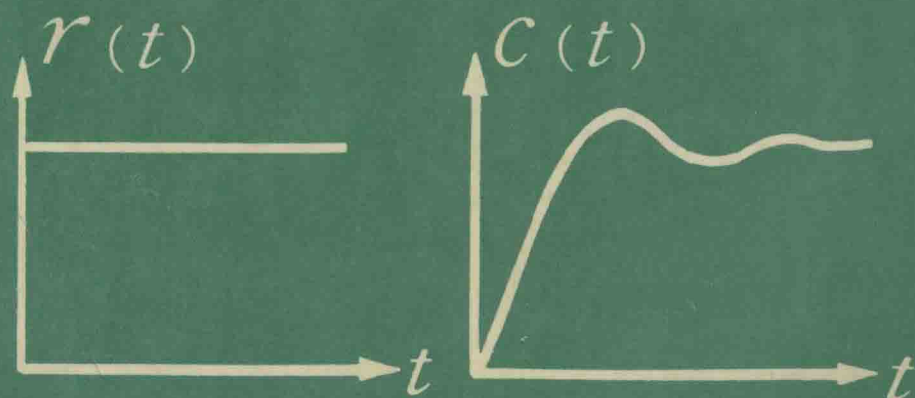
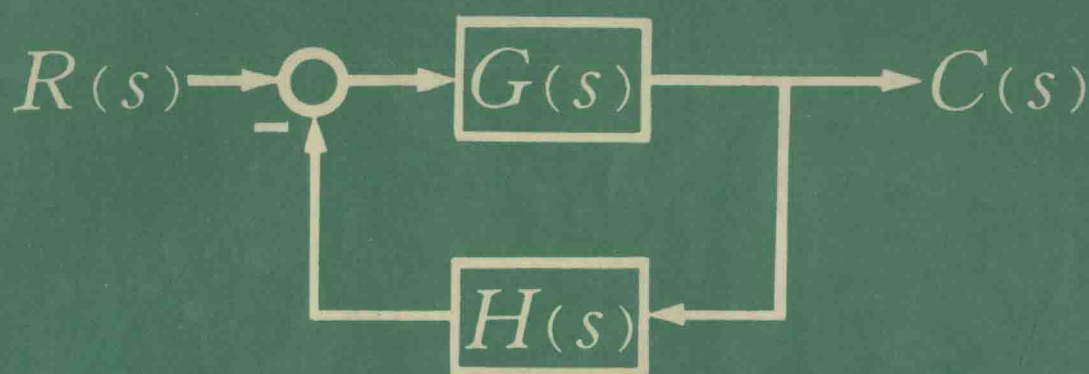


自动控制原理与系统

范玉璋 主编



河南科学技术出版社

自动控制原理与系统

范玉璋 主编

河南科学技术出版社

内 容 简 介

本书系统介绍了自动控制原理的基本概念和控制系统的数学模型,以经典控制理论常用的时域分析法和频域分析法为主线,阐述了控制系统的动态性能分析、稳态性能分析、稳定性分析以及系统的设计和校正。全书还结合单闭环直流调速系统、多闭环自动调速系统和位置随动系统等,分析了自动控制系统的工作原理、自动调节过程,并对自动控制系统的分析和调试方法作了较详尽的介绍。

该书理论联系实际,将自控原理与系统相结合,选有多种类型的实例和习题,以满足不同专业读者的需要。

本书可作为高等院校非自动化类专业的教材,也可作为高等专科学校、职工大学、业余大学自动化类专业的教材,还可供工程技术人员参考。

自动控制原理与系统

范玉璋 主编

责任编辑 吴润燕

河南科学技术出版社出版发行

(郑州市农业路73号 邮编 450002)

河南省实验小学印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:15 字数:360千字

1996年9月第1版 1996年9月第1次印刷

印数:1—3000册

ISBN7-5349-1949-5/T·403

定 价:19.50元

前 言

周三下午4点 409 (机电楼)

本书是为了满足高等工科院校非自动化类专业和自动化类(专科)专业自动控制原理和系统课程的教学需要而编写的。作者根据多年从事理论教学和工程实践的经验,确定以工业控制系统中应用最广泛的经典控制理论为核心,循序渐进,深入浅出,理论联系实际,原理联系系统,使学生通过本课程学习,掌握最基本的理论和分析方法,为解决工程中自动控制的技术问题和进一步学习高级控制理论,奠定一个较坚实的基础。本书结合工程实际,详略得当,也可供从事自动控制工程的各类技术人员自学和参考。

全书共分十一章。第一章至第六章主要讲述线性控制理论,以时域分析法和频域分析法为主线。第七章至第九章介绍了单闭环、多闭环自动调速系统和位置随动系统等典型自控系统的工作原理和自动调节过程分析。考虑到原理与系统的结合,把控制理论中的综合校正与自动控制系统的工程设计一起放在第十章。第十一章从工程实际出发,对自动控制系统的分析与调试进行了较详尽的介绍。各章都有一定数量的习题,可帮助读者巩固所学内容。

本书由郑州纺织工学院范玉璋主编,宋百平、张谦、范为福为副主编,无锡轻工业大学于力革、储伟参加编写。其中范玉璋编写绪论、第九章、第十一章,宋百平编写第七章、第八章;张谦编写第一章、第二章;范为福编写第四章、第十章第一至第六节;于力革编写第三章、第五章;储伟编写第六章、第十章的第七节;全书由范玉璋统稿。

本书由郑州工业大学吴天福教授主审。他仔细审阅了书稿并提出了许多宝贵的意见和建议,在此谨表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

编者

1996年3月

目 录

绪论	(1)
第一章 自动控制系统的基本概念	(5)
第一节 开环控制与闭环控制	(5)
第二节 自动控制系统的分类	(8)
第三节 对自动控制系统的基本要求	(10)
第四节 自动控制理论概要	(10)
习题	(12)
第二章 控制系统的数学模型	(13)
第一节 系统微分方程式的列写与非线性方程的线性化	(13)
第二节 拉普拉斯变换与反变换	(15)
第三节 传递函数	(19)
第四节 控制系统的结构图	(25)
第五节 自动控制系统的的传递函数	(34)
第六节 控制系统数学模型建立实例	(35)
习题	(40)
第三章 自动控制系统的动态性能分析	(44)
第一节 线性系统时间响应的性能指标	(44)
第二节 二阶系统的时域响应	(46)
第三节 高阶系统的时域响应	(56)
习题	(59)
★第四章 频率特性	(62)
第一节 频率特性的基本概念	(62)
第二节 典型环节的频率特性	(66)
第三节 开环系统的频率特性	(73)
第四节 闭环频率特性	(81)
习题	(85)
第五章 自动控制系统的稳定性分析	(87)
第一节 系统稳定性概念	(87)
第二节 代数稳定判据	(88)
★第三节 奈氏稳定判据	(95)
第四节 对数频率稳定判据及系统的相对稳定性	(100)
习题	(104)
第六章 控制系统的稳态性能分析	(107)

第一节	稳态误差的概念	(107)
第二节	稳态误差的计算	(108)
第三节	减小或消除系统稳态误差的措施	(115)
习题		(121)
第七章	单闭环直流调速系统	(124)
第一节	调速系统的基本概念	(124)
第二节	转速负反馈单闭环有静差直流调速系统	(128)
第三节	电压负反馈直流调速系统	(134)
第四节	带电流截止环节的单闭环调速系统	(137)
第五节	单闭环无静差调速系统	(141)
习题		(145)
第八章	多闭环自动调速系统	(147)
第一节	最佳过渡过程的基本概念	(147)
第二节	转速、电流双闭环调速系统	(149)
第三节	电势与电流双闭环调速系统	(153)
第四节	电流自适应调节器	(156)
第五节	带有励磁控制的调速系统	(158)
习题		(160)
第九章	位置随动系统	(161)
第一节	位置随动系统概述	(161)
第二节	位置随动系统的典型部件	(164)
第三节	位置随动系统实例分析	(172)
习题		(180)
第十章	控制系统设计与校正	(181)
第一节	概述	(181)
第二节	串联超前校正	(183)
第三节	串联迟后校正	(185)
第四节	串联迟后-超前校正	(188)
第五节	按期望特性进行串联校正	(191)
第六节	反馈校正	(193)
第七节	双闭环调速系统调节器的工程设计	(197)
习题		(211)
第十一章	自动控制系统的分析与调试	(214)
第一节	自动控制系统的分析方法	(214)
第二节	自动控制系统调试的一般问题	(220)
第三节	自动控制系统的单元调试	(221)
第四节	自动控制系统的系统调试	(227)
习题		(229)
参考文献		(230)

绪 论

一、本课程研究的内容

《自动控制原理与系统》是自动控制原理和自动控制系统两门课程的综合。它是自动控制技术的理论基础和应用基础。

自动控制是指无人直接参与的情况下,通过控制装置使被控制量按照指定的规律变化。由被控对象加控制装置组成的能够自动完成控制任务的系统称为自动控制系统。

自动控制理论是研究在自动控制过程中存在的共同规律的一门技术学科。自动控制是社会生产力发展到一定阶段的产物。它集众多学科的成就,并渗透到了社会生活的各个领域。随着社会的进步与发展,自动控制的研究对象已不再局限于工程领域,现已涉及到社会学、经济学、生物医学等各种非工程领域。尽管控制理论发展迅速,但在工程实践中,经典控制理论仍然是分析和设计自动控制系统的基础。

本课程从自动控制的基本概念出发,由自动控制系统的微分方程、传递函数和动态结构图去建立系统的数学模型。采用经典线性控制理论常用的时域分析和频域分析的方法,阐述了自动控制系统的动态性能分析,稳态性能分析、稳定性分析及系统的设计和校正。结合单闭环直流调速系统、多闭环自动调速系统和位置随动系统,分析了自动控制系统的工作原理和自动调节过程。此外,还对自动控制系统的分析和调试方法作了较详尽的介绍,以培养学生分析和解决实际问题的能力。

二、自动控制理论及其发展

自动控制的发展历史漫长。据考证,二千多年前,我们祖先发明的指南车就是按扰动补偿原理工作的,公元 1086 年~1089 年我国的苏颂和韩公廉发明的水运仪象台则是按反馈控制原理工作的。然而,作为自动化技术学科的萌芽,在工业生产中的应用,则是第一次产业革命的产物。

1765 年,瓦特发明了蒸汽机,1784 年,他又用离心式飞锤调速器建立了转速自动控制系统。为了解决调速系统中出现的振荡问题,许多学者开始对自动控制理论进行探索和研究。1868 年,物理学家马克斯威尔通过线性常微分方程的建立和分析,对振荡现象作出了解释并提出了判据。1877 年和 1895 年,两位数学家劳斯和赫尔维茨分别独立地提出了可用于高阶控制系统的代数稳定判据。1892 年,俄国数学家李雅普诺夫用严格的数学分析方法全面论述了稳定性问题,为控制理论打下了坚实的基础。这一时期的控制理论,讨论的主要问题是系统的稳定性,所用的数学工具是微分方程解析法。它们是在时间域上进行讨论的,通常称为控制理论的时间域方法。

第二次世界大战前后,为了设计和制造飞机及船用自动驾驶仪、火炮自动定位系统、雷达跟踪系统等迫切需要,进一步促进并完善了自动控制理论的发展。这段时间的研究成果主要包括:1932 年奈奎斯特提出了稳定性的频率判据并解决了这一难题;1940 年伯德引入了对数坐标系,使频率法更适合于工程应用;1942 年哈里斯引入了传递函数的概念。这些内容最终构成控制理论的频率域方法。1948 年伊万思提出了根轨迹法。至此,以传递函数为工具在复数域

进行讨论的方法趋于成熟。

建立在时域法、频域法和根轨迹法基础上的控制理论构成了通常所谓的“经典控制理论”，它在 50 年代末已发展成熟，形成了完整的理论体系。到现在为止，经典控制理论仍然是我们分析设计控制系统的基本方法。

60 年代以后，随着生产水平的提高，特别是空间技术的发展，被控对象的结构越来越复杂，控制的参数越来越多，要求达到的性能指标越来越高，用经典控制理论已不能满足需要。同时，由于计算机的发展，提供了有力的工具，从而产生了现代控制理论并得到迅速发展。现代控制理论所研究的对象是多输入多输出的多变量系统。系统可以是线性的，也可以是非线性的；可以是定常的，也可以是时变的。系统的数学模型主要采用状态方程（一阶微分方程组），这是由于这种数学模型中各变量均为时间 t 的函数，概念清晰，且状态方程便于计算机求解，为系统的分析与综合带来了极大的方便。

现代控制理论是在经典控制理论基础上发展起来的，目前仍在不断向纵深发展，并形成很多独立的分支。现在很难给现代控制理论划一个确切的界限。一般来讲，最基本的范畴主要包括：系统数学模型与系统辨识；系统的能控制与能观测性；系统的稳定性分析；系统的最优控制；系统的自适应控制及自学习系统等。

概括来讲，现代控制理论是以贝尔曼的动态规划、庞特里亚金的极大值原理和卡尔曼滤波技术为基础，立足于状态空间变量法，借助于高速数字计算机来研究、设计复杂的动力学系统。

70 年代开始，控制理论在解决现代工业规模大、形式多样、因素繁多这样一类系统的控制问题的过程中，发展形成了继经典和现代控制理论之后的第三代控制理论，也就是所谓的“大系统理论”。

对于什么是“大系统”，目前尚无统一的确切性定义，一般是指具有高维数、多目标、关联性、分散性、不确定性和主动性的系统，但不一定指物理尺寸大。例如，一个大电网，包括许多电厂和变电站，每个电厂又有几个发电机组，每个机组均有自己的调节系统，如何管理好电网，以求整个电力网运行在最优状态，就属于大系统控制问题。而人的大脑尽管体积很小，但脑中 110 亿个细胞之间的关联复杂程度则是其它系统无法比拟的，因此，大脑也是一个复杂的大系统。

大系统理论涉及到大系统的建模与模型简化，大系统的结构与信息，大系统的稳定性和镇定以及大系统的递阶与分散控制。这些理论已成功地应用于工农业生产、社会经济、交通运输、环境保护等方面，作为一门新兴学科，大系统理论正逐步发展，日趋成熟。

然而，应该看到无论是经典控制理论还是现代控制理论与大系统理论，其分析与综合设计过程都是建立在严格和精确的数学模型基础之上的。而在科学技术与生产力高度发达的今天，实际的被控制系统往往存在着许多不确定性，高度非线性和时变时滞等因素，以及受控对象动态特性的突变性与复杂的信息模式等。使得建立精确和简单实用的数学模型非常困难，甚至是不可能的。因而使上述的控制理论的应用受到了极大的限制。但是，也应该看到，生产实践中许多难以自动实现目标控制的复杂的生产过程却可以由熟练的操作工、技术人员或专家操作，从而获得较满意的控制效果。将这些熟练操作工、技术人员或专家的经验知识与控制理论结合起来，作为解决复杂生产过程的一种补充手段，使控制理论产生了突破性的进展，这就是目前称之为“智能控制”的第四代控制理论。

智能控制主要是针对被控对象及其环境和任务的不确定性而提出来的。计算机科学、人工

智能、信息科学、思维科学、认识科学和人工神经网络及基因的连接机制等方面的新进展和智能机器人的工程实践,从不同角度为智能控制的诞生奠定了必要的理论和技术基础。

一般来讲,智能控制的内容可以确定为人工智能、运筹学和自动控制理论三门技术学科的交集。根据智能控制的基本控制对象的开放性、复杂性、多层次和信息模式的多样性、模糊性、不确定性等特点,智能控制的基本研究内容主要有以下几个方面:

1. 智能控制系统的特征模型的描述;
2. 智能控制系统的性能指标;
3. 智能控制系统的可控制问题;
4. 智能控制系统的稳定性问题。

目前,智能控制理论研究还不是太多,智能控制在工业实践中的应用还处在不断充实完善的阶段,如何从理论研究走向实用,是控制理论发展的一个重要发展方向。

综上所述,到目前为止控制理论的发展已经历了四个阶段,但仍在不断发展之中。其中经典控制理论作为控制理论的最基本内容,是每一位致力于控制理论学习与应用的读者所必须掌握的基础知识。本书着重讲述经典控制理论的主要内容。

三、自动控制系统

系统,从广义说可以定义为相互作用或依存的一组能形成统一整体的事物。在工程领域,系统可以是电的、机械的、热的、生物医学的或者是它们的综合。一般讲,一个系统有输入量(激励),也有输出量(响应)。二者之间可以是相同的物理量,也可以是不同的。但二者之间一定存在某种因果关系,建立其数学模型是研究系统性能的重要方法。

控制系统是依靠调节输入,使输出受到控制的系统。通常它由控制器、被控对象、反馈测量装置等部分组成。控制就是按照预先给定的目标,改变系统的性能或行为。一般情况下,这种控制都是自动进行的。所以也把能对被控对象的工作状态进行自动控制的系统叫自动控制系统。例如,发电机自动稳压系统、轧钢机自动稳速系统、炉温自动调节系统、机床进给自动跟随系统等。

按照有无反馈测量装置分,系统可分为闭环控制系统和开环控制系统两类。闭环控制系统也叫反馈控制系统,它具有控制精度高、稳态性能好、抗干扰能力强的优点。在工业和国防等要求较高的应用领域,绝大多数自动控制采用反馈控制结构,是我们研究的主要对象。

按照控制系统中控制器处理信号的不同型式,自动控制系统可以分为模拟控制系统和数字控制系统。由于微处理器的迅速发展,计算机直接用于系统的自动控制,从而提高了控制性能,可以实现较复杂控制规律的控制。

自动控制理论和技术的发展,使得工业自动控制系统型式繁多,性能完善,可以从不同角度将其分类,这些将在第一章中详细介绍。

自动控制系统所适用的对象很广泛,工程中电力拖动自动控制系统占有重要的地位。

由于电力电子技术和微电子技术的发展,直流调速技术性能进一步完善,控制部件和功率器件的集成化和模块化,提高了系统的可靠性。直流电机可通过电枢电压控制和弱磁控制以实现低于和高于基速的转速调节。常用晶闸管相控整流或斩波器控制两种方法,提供可调的直流电压。直流拖动控制系统的理论和实践比较成熟,但是直流电动机的致命弱点使其应用受到限制。一直为直流电动机调速系统占领的调速领域,正被日益发展的交流调速技术所取代。

交流调速,主要指交流电动机变频调速。变频器按其主电路区分,有交—交变频器和交—

直—交变频器两种,应用多的是后者。按照作为负载的电源来分,交—直—交变频器又分为电流型和电压型两种。变频器的控制系统,已经发展到以单片微机为核心的控制系统。高性能的变频器交流电动机调速系统,已经可以与直流调速系统媲美。交流调速作为一门技术学科发展迅速,有其一定的独立性,有关内容,在“交流调速系统”课程中叙述。本书涉及到的自动调速系统一般为直流调速系统。

作为另一类应用广泛的自动控制系统——程序控制系统,随着微计算机的发展,应用日益广泛。计算机数字控制和顺序控制,是两种典型的控制系统。在工业上,可编程控制器(PLC)的应用,促进了机电一体化技术的发展,提高了生产过程的自动化程度。这类控制系统,分别在“数控技术”和“可编程控制器及应用”等课程中介绍。

四、本课程的特点与学习方法

自动控制原理是技术基础课,自动控制系统是专业课,本课程是这两门课的综合。其所以放在一起,是为了满足非自动化、自动控制专业学生学习自动控制技术的需要。把抽象的控制理论学习与实在的控制系统分析结合起来,理论联系实际,使读者较好地掌握经典控制理论的主要内容,用来分析和研究工程实践中遇到的自动控制问题。

控制理论是以数学、物理、电路、电子技术等课程为理论基础的,其内容相当广泛。它不仅是一门重要的基础学科,也是一门卓越的方法论。本书从工程实际出发,主要讲述以反馈控制为主的经典控制理论。它抽象和概括了工程中常见的大多数控制系统。打好这个基础,对于分析和解决实际问题,学习新的控制理论是十分重要的。

学习中应注意:一是抓住控制理论的基本概念和数学分析方法。采用记忆、对比的办法,牢固掌握典型的单元特性和重要的规则及分析估算步骤,做到数学结论准确,物理概念明晰。

二是多作习题、多分析。除独立完成作业外,对工程中遇到的实际系统,运用所学理论进行分析,以加深对理论知识的理解,培养分析和计算能力。

三是重视实践,通过课程实验和调试实际的自动控制系统,验证和巩固所学理论,训练解决实际问题的能力。实验和调试中能对可能的结果有预计,对提高和改善系统的性能有解决方法。

第一章 自动控制系统的基本概念

第一节 开环控制与闭环控制

控制技术的作用是控制实际系统中某些物理量按照指定的规律变化。要实现这一目标,通常采用的控制方式有开环控制和闭环控制。

一、开环控制系统

图 1-1 所示是直流电动机转速控制系统原理图。

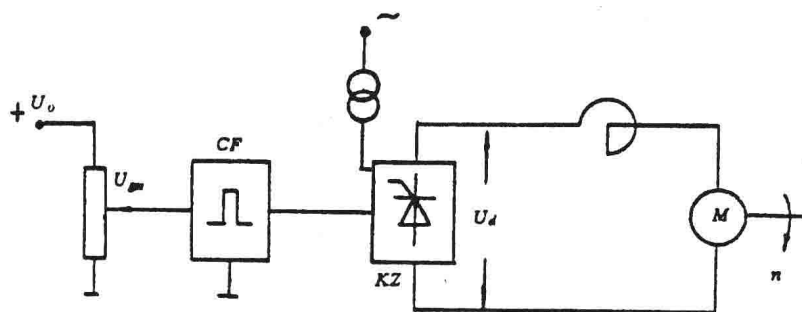


图 1-1 电动机转速控制系统原理图

该系统中,直流电动机称为被控对象,电动机的转速称为系统的输出量,也即被控量,给定电压 U_{gn} 作为系统的输入量。改变 U_{gn} 的大小可以改变触发环节 CF 所产生的触发脉冲的相位,从而改变晶闸管整流装置 KZ 的输出电压 U_d 。由于直流电动机转速 n 和外加电压 U_d 的关系式为 $n = \frac{U_d - I_d R_d}{C_e \Phi}$, 因此,改变 U_d 可以达到调节电机转速的目的。

自动控制理论研究信号在系统中传递与变换的规律,以满足对系统提出的性能指标要求。为了描述简单,通常将控制系统抽象成为数学方程来研究,并采用直观的图形来表示系统的组成,这种图形称之为方块图,也称为职能方块图。例如,图 1-1 所示系统可用图 1-2 来表示。

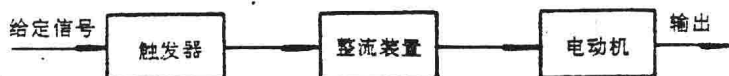


图 1-2 转速控制系统对应职能方块图

一般来讲,方块图由图 1-3 所示的四种基本单元组成。图中带箭头的直线称为信号线,箭头表示信号传递方向;方框表示系统中具有一定功能的部分,也称为环节,表示对信号进行数学变换,方框内标出该环节的名称或数学特征(传递函数);进入方框的信号称为该环节的输入量,离开方框的信号称为该环节的输出量;符号“○”表示信号综合点,也叫比较点,对进入该点

的两个以上的信号进行代数运算,约定:进入比较点的信号为负时,用“-”号注明,信号为正时不加符号;信号引出点如图 1-3(c)所示,表示信号引出或测量的位置,从同一位置引出的信号数值性质完全相同。

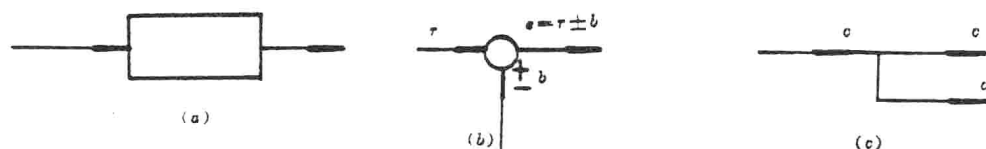


图 1-3 方块图基本组成单元

方块图形象地描述了系统的结构、信号的流向及控制关系。如果图中每个环节都用其特性表示出来,建立环节的数学关系式,不仅可以定性而且可以定量地描述系统的结构和控制关系,这种图叫做系统的结构图。结构图是一种描述系统的图形方法,用结构图分析系统性能非常方便。任何系统只要其结构图相同,其控制特性也相同。

图 1-4 所示是恒温箱温度控制系统,工作原理是:移动调压器活动触头位置,可以改变加在加热电阻两端的电压,从而改变通过电阻的电流,使发热功率变化,以达到改变温度的目的。该系统方框图如图 1-4(b)。

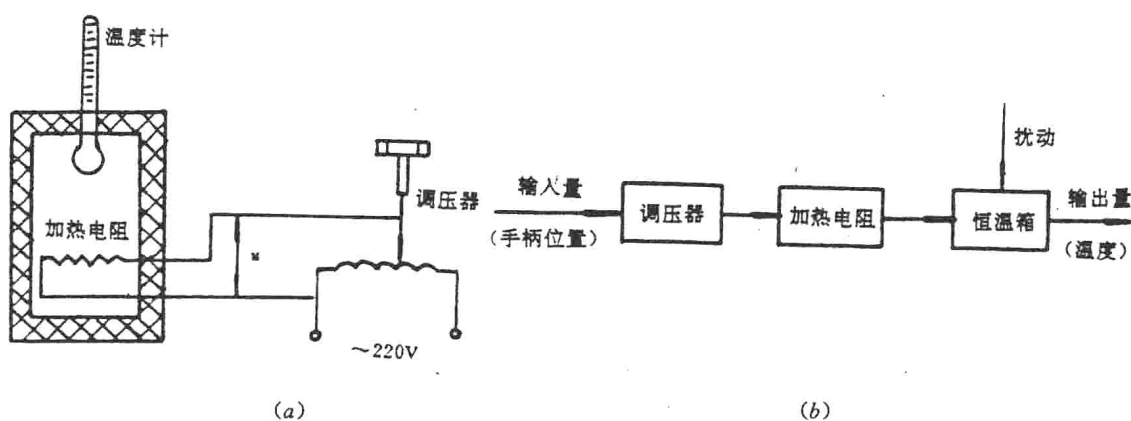


图 1-4 恒温箱的温度控制系统

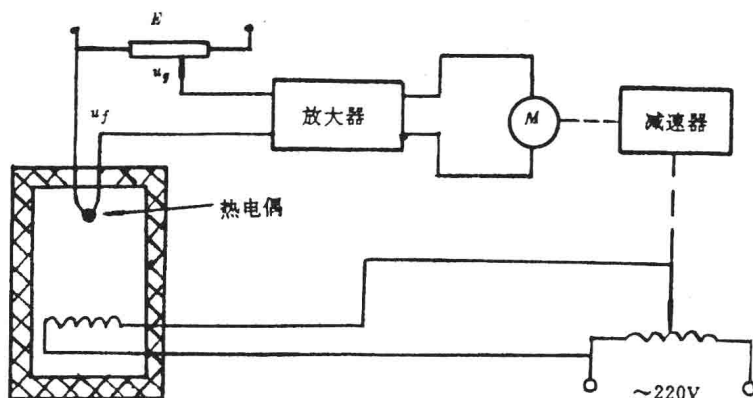
上述两种系统的特点是:系统的输出量不回送到系统的输入端,控制装置与受控对象之间只有顺向作用而无反向联系。每一个输入量均有一输出量(或工作状态)与之对应,这类系统称之为开环控制系统。类似的系统诸如自动洗衣机、交通红绿灯、流水生产线等。

开环控制系统的优点是结构简单、调整方便、成本低,但存在的明显不足是控制精度低,在系统受外界干扰信号作用时,无修正被控量偏差的能力。例如,图 1-1 所示的调速系统,当电动机的负载加大时,转速会下降,负载的改变相当于对原来的稳定系统施加了一个干扰信号,而此时加在电动机电枢两端的电压却不会改变,所以转速不会回到原来的转速。又如图 1-4 所示温度系统,当温箱门由于某种原因开个缝,则箱内温度就不会维持原来的恒定值,肯定要下降,而且不会恢复到原来的温度。根据开环系统的这些特点,开环系统只在干扰作用不大的场合才得到应用。

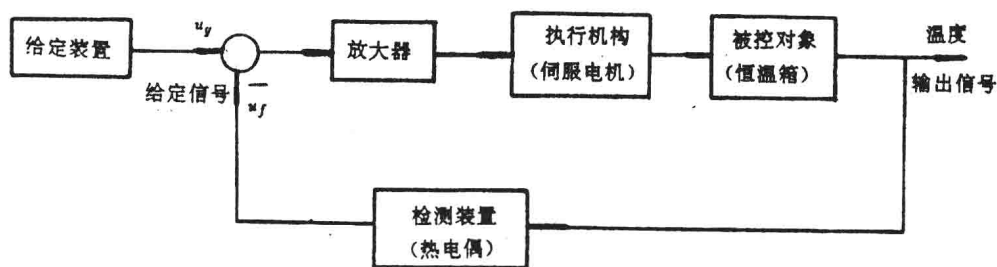
二、闭环控制系统(偏差控制系统)

在许多实际控制系统中,各种干扰信号的作用总是不可避免的,而且往往是无法预计的。为了能使系统在随机扰动的作用下仍能保持原来的输出,需要采用闭环控制方式。通常是引入反馈来实现的,也称为反馈控制。

在闭环控制系统中,输出量直接或间接地反馈到输入端,参与系统的控制。例如,图 1-5 (a)所示的恒温箱温度自动控制系统,恒温值由给定电压 u_g 确定,改变给定电位器动触点的位置就可以改变 u_g ,从而调节输出(温度)的高低。当系统受到扰动的作用(如开门或电源电压波动)使恒温箱中温度偏离给定值时,通过热电偶检测出温箱中实际温度(输出量),并转换成电压量 u_f ,反馈到输入端与给定电压 u_g 比较,得出一个偏差信号(电压),将其放大后控制伺服电动机,移动调压器手柄的角位置,改变调压器的输出电压,以控制箱中温度,消除偏差,使箱中温度维持在给定值上。系统的方块图如图 1-5(b)。



(a) 原理图



(b) 方块图

图 1-5 恒温箱温度自动控制系统

三、闭环控制系统的基本组成

根据控制对象及使用元件设备的不同,闭环系统具有不同的形式。按照组成系统各部分的作用,可将它们分为以下几部分:

被控对象——自动控制系统需要进行控制的工作设备或生产过程。

给定环节——给出与期望的被控量相对应输入量的装置。

比较环节——用来比较控制信号与反馈信号并产生反映两者差值的偏差信号的装置。

校正环节——也称为控制器或调节器,是一种用于调整系统参数或结构的装置。其作用是改善系统性能。

测量反馈环节——用于测量被控量并将其转换成与控制量相同的物理量,同时反馈到输入端的装置。

执行结构——直接对被控对象进行操作,使被控量发生变化的装置。

典型的闭环控制系统方块图如图 1-6 所示。各环节中的内容根据实际系统的组成不同来具体确定。例如,图 1-5 所示温度控制系统中,给定环节由滑动电位器构成,比较环节由放大器的功能实现,测量反馈环节由温度传感器热电偶实现,执行机构由伺服电机与减速器实现,被控对象是恒温箱,该系统没有校正环节。

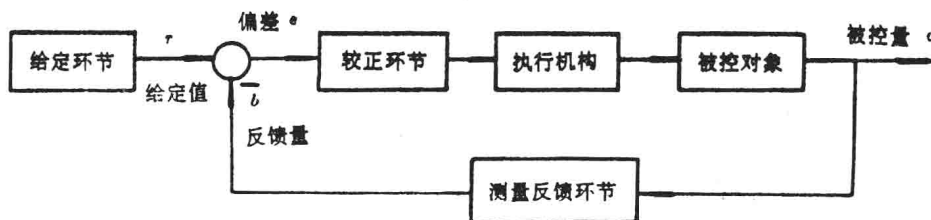


图 1-6 典型闭环控制系统方块图

第二节 自动控制系统的分类

自动控制系统种类很多,应用范围极其广泛,其结构性能与完成的任务也各不相同。因此,系统分类方法也很多。前面所讨论的开环控制系统与闭环控制系统是按照控制方式分类的,除此之外,通常还有以下几种基本的分类方法。

一、按照输入作用的特点将控制系统分为三种类型

1. 恒值控制系统(也称自镇定系统): 此类系统中,给定值在某种工作状态下一经给定就不再变化,控制系统的任务是排除各种干扰因素的影响,维持被控量恒定不变。如前例中的温度控制系统。

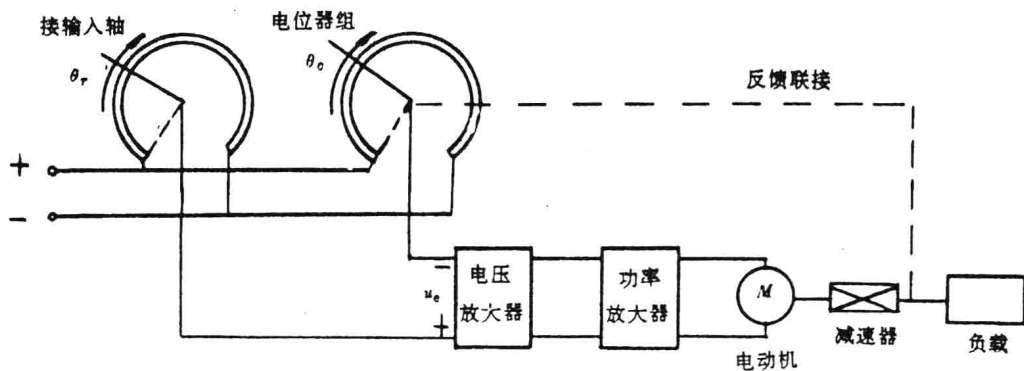
2. 随动系统(也称自动跟踪系统或伺服系统): 此类系统中,给定值是预先未知的随时间变化的任意函数。控制系统的作用是使被控量以尽可能小的误差跟随给定值的变化,且能排除各种干扰的影响。图 1-7 所示是一位置随动系统原理图与方块图。当操作者移动指令电位器的滑臂(即输入一个角度 θ_r),则滑臂的角度位置被转换成电压 u_r ,被控对象的位置(即输出角度 θ_c)由反馈电位器检测并转换成反馈电压 u_f ,当 θ_c 与 θ_r 不等时,两个电位器组成的桥式电路得到一个偏差电压 $u_e = u_r - u_f$, u_e 经放大后使执行电动机连同工作机械和输出电位器的滑臂一起跟随输入的给定值 θ_r ,直到 $\theta_c = \theta_r$ 时,电动机停转。系统在新的位置上达到平衡状态。

3. 程序控制系统: 此类系统中,给定值按预先给定的规律变化,如自动洗衣机,数控机床等。

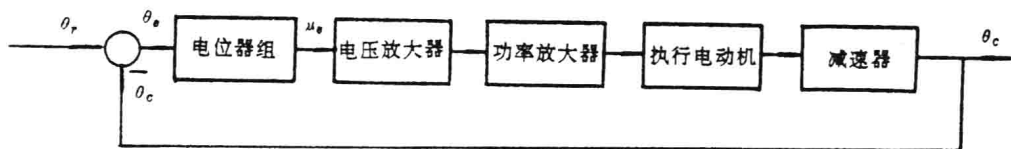
二、按系统的反应特性将系统分为四类

1. 线性系统与非线性系统：输入输出关系能够用线性微分方程来描述的系统称为线性系统。这类系统中，各组成部分均为线性环节。线性系统是控制理论研究的主要对象，系统的主要特点是满足齐次性与叠加性。

(1) 齐次性：当输入量的数值成比例增加时，输出量数值也成相同比例增加。



(a) 原理图



(b) 方框图

图 1-7 位置随动系统

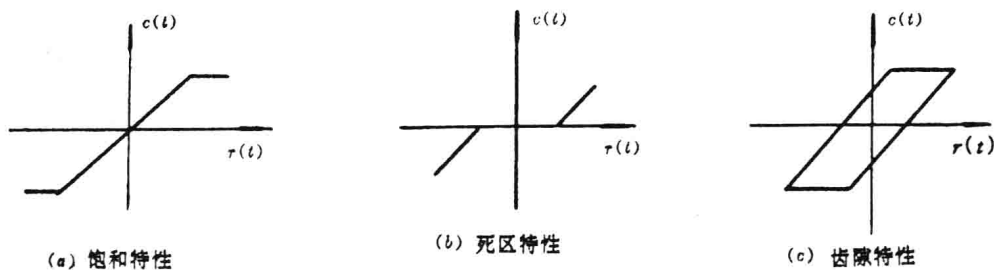


图 1-8 常见非线性环节

(2) 叠加性：两个不同的输入函数同时作用于系统时，系统输出响应等于两个输入单独作用时的响应之和。

当组成系统的环节中有一个或多个非线性环节时,系统的输入输出之间的关系必须用非线性微分方程来描述,这类系统称为非线性系统。常见的典型非线性环节如图 1-8 所示。

实际的工程系统中,理想的线性系统是不存在的,各系统组成环节或多或少存在不同程度的非线性。为了分析方便,对于非线性程度比较小的系统,人们往往将它们作为线性环节处理,因为非线性问题求解非常复杂。

2. 定常系统与时变系统: 描述系统的动态特性微分方程中所有系数均为常数的系统称为定常系统。这类系统的性质不随时间变化,对它进行观察和研究不受时间限制。

当描述系统的动态特性微分方程中系数是时间的函数时,系统称为时变系统。时变系统的性质随时间而变化,不允许用此时刻测得的系统性能去代替另一时刻系统的性能。

三、按系统中信号的形式分为连续控制系统与离散控制系统

系统中各部分信号均是连续函数的模拟量,这类系统称为连续控制系统。如前例中的直流电动机转速控制及温度控制系统。连续系统通常采用微分方程描述。

控制系统中一处或数处的信号为脉冲序列或数码传递的系统称为离散控制系统,也称为采样控制系统或数字控制系统。例如,控制器采用数字计算机实现的系统。离散系统采用差分方程来描述。

除上述分类方法外,还可采用其它分类方法。例如,根据被控对象的特征,可分为传动控制系统与过程控制系统。传动控制系统的被控对象为各类电动机,过程控制系统的被控对象为生产过程的参数,如温度、压力、流量、液位等。根据所使用的元器件不同又可分为机电系统、液压系统、气动系统等。

本课程主要研究恒值线性定常连续(或可线性化)定常系统。

第三节 对自动控制系统的基本要求

自动控制系统正常工作必须满足生产过程所提出的一系列性能指标的要求。对于不同的生产过程和应用场合,要求的性能指标可能并不相同,但以下三点是共同的和基本的,即稳定性、快速性和准确性。

稳定性是指系统输入量(包括控制输入和扰动输入)发生变化但趋于某一稳定值后,系统的输出量也跟着变化且最终也能趋于某一稳态值,不出现持续或发散型振荡。

快速性是指当系统的被控制量与输入量之间的偏差发生变化时,调整到新的稳定状态所需要的时间。快速性是在系统稳定前提下提出的指标。

准确性是指在调整过程结束后,系统输出的实际值与给定值之间的误差,也称为静态误差或稳态精度。

稳定、快速、准确是对系统的基本要求,从这三点要求出发,建立了自动控制的普遍理论。

第四节 自动控制理论概要

自动控制系统虽然有不同的类型,但具有相似的研究方法。自动控制原理就是研究各类系统共同规律的一般理论。概括来讲,它包括系统分析与系统综合两部分内容。

已知系统的结构和参数,研究系统在某种典型输入信号作用下被控量变化的全部过程,从

中得出评价系统的性能指标,以及讨论性能指标与系统的结构、参数的关系这些内容均属于系统分析的范畴。

分析系统的目的是了解与认识系统,进而设计系统。当系统的主要元件和结构形式被确定后,为满足暂态性能指标和稳态误差的要求,必须通过附加的校正装置来改变系统原有的某些参数,这种方法称为系统校正。寻找改善参数或附加校正装置的过程称为系统综合。

无论是系统分析还是系统综合,其研究基础是系统的数学模型。所谓数学模型是指将一个具体的系统抽象化,用数学方程表示出来。这部分内容将在第二章中讲述。

研究和评价系统的特性时,需要在系统的输入端外施一个典型的外作用信号,然后计算系统输出。选择典型外作用信号的依据和标准为:信号应能代表系统工作中的大部分情况;对系统的作用是恶劣的;信号的数学描述即函数关系简单,以便进行数学分析。在上述标准下,通常选用的外作用输入函数有阶跃信号、斜坡信号、脉冲函数信号和正弦函数信号等。

1. 阶跃函数: 阶跃函数如图 1-9 所示。其数学表达式为

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ R, & t \geq 0 \end{cases}$$

$t=0$ 时, $f(t)$ 的值不定。 $f(t)$ 也可用 $R \cdot 1(t)$ 表示, 其中 R 表示阶跃信号幅值, 如 $R=1$, $f(t)=1(t)$ 称为单位阶跃函数。 $t=t_0$ 时刻开始出现的阶跃可用下式表示

$$f(t-t_0) = \begin{cases} 0, & t < t_0 \\ R, & t \geq t_0 \end{cases}$$

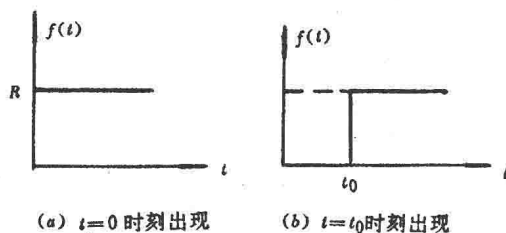


图 1-9 阶跃函数

阶跃函数是控制系统在实际情况下常见的一种外作用形式。例如,对恒值系统来讲,突加给定、给定值的突变及突变的干扰输入量都可以近似看成阶跃信号。对于随动系统来讲,阶跃输入相当于加一个突变的给定位置信号。因此,在系统分析时,一般用系统对阶跃函数的响应来评价系统的暂态性能。

2. 斜坡函数: 斜坡函数如图 1-10 所示,其数学表达式为

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ Kt, & t \geq 0 \end{cases}$$

$K=1$ 时 $f(t)=t$ 称为单位斜坡函数。上式表示在 $t=0$ 时刻加入一个随时间以恒定速率增长的外作用。

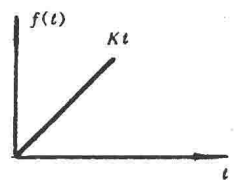


图 1-10 斜坡函数

3. 脉冲函数(也称冲激函数): 脉冲函数如图 1-11 所示,其数学表达式定义为

$$f(t) = \lim_{t_0 \rightarrow 0} \frac{A}{t_0} [1(t) - 1(t-t_0)]$$

由定义,脉冲函数是矩形脉冲函数(图 1-12)宽度 t_0 趋于 0 时的极限。这是一个宽度为 0、幅值为无穷大、面积为 A 的极限脉冲,脉冲函数的强度用其面积 A 表示。这种函数属于数学上的一种假设,实际中不会存在这种理想的信号。引入这种数学形式的外作用主要是作为一种数学工具为系统的分析带来方便。当 $A=1$ 时, $f(t)$ 用 $\delta(t)$ 表示,称为单位脉冲函数。其数学表达式为

4. 抛物信号 $f(t) = \begin{cases} 0 \\ \frac{K}{2}t^2 \end{cases}$

5. 正弦信号 $f(t) = A \sin \omega t$