



高等院校“十一·五”规划教材

自动控制原理

ZIDONG KONGZHI YUANLI

朱玉华 主编

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

高等院校“十一五”规划教材

自动控制原理

朱玉华 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书是工科院校“自动控制原理(经典控制)”课程的教材。根据教学要求,书中比较全面地介绍了经典控制理论的基本内容,力求从基本原理和概念出发,突出重点,淡化繁琐的理论推导,注重理论与实际的结合。全书共分八章,内容包括自动控制系统概述、控制系统的数学模型、时域分析法、根轨迹法、频率特性分析法、自动控制系统的校正、非线性控制系统及采样控制系统。

本书可作为高等学校自动化专业、电气工程及其自动化专业、测控技术与仪器专业及各相关专业本科生的教材,也可作为高职高专院校及成人院校相近专业学生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理 / 朱玉华主编. —北京: 中国石化出版社, 2010. 2
ISBN 978 - 7 - 5114 - 0259 - 2

I. ①自… II. ①朱… III. ①自动控制理论 - 高等学校 - 教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 017184 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010) 84271850

读者服务部电话: (010) 84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com.cn

全国各地新华书店经销

北京科信印刷厂印刷

*

787 × 1092 毫米 16 开本 10.5 印张 256 千字

2010 年 2 月第 1 版 2010 年 2 月第 1 次印刷

定价: 20.00 元

前 言

自动控制原理课程是高等工科院校电气信息类专业的一门重要的技术基础课程，其应用领域非常广泛，几乎遍及电类及非电类的各个工程技术学科。

本教材以经典控制理论及其应用为主要内容，全面阐述了自动控制的基本理论，系统地介绍了自动控制系统分析和综合的基本方法。在保证理论体系的系统性和完整性的前提下，内容编排上力求做到少而精，突出重点，强调物理概念，减少繁琐的数学推导，理论联系工程实际。

教材共分八章。第一章简要介绍自动控制的基本概念、自动控制理论的发展过程，进而引出自动控制系统的组成和分类方法，以及工程上对自动控制系统的基本要求；第二章系统地介绍了描述控制系统的三种数学模型，即微分方程、传递函数和系统框图及它们之间的相互关系，介绍了利用结构图等效化简和梅逊增益公式确定系统闭环传递函数的方法；第三章介绍了线性系统的时域分析，分析研究控制系统的动态性能和稳态性能，主要研究一阶系统、二阶系统的过渡过程及性能指标；第四章介绍了线性系统根轨迹分析方法，重点讨论了根轨迹的绘制法则以及利用根轨迹分析系统性能的方法；第五章频率特性分析法是工程上重点应用的方法，对频率域作图、分析的原理进行了详细讨论，介绍了频域稳定判据，给出了频域指标的计算及分析方法；第六章主要介绍系统校正的作用和方法，分析串联校正、反馈校正和复合校正对系统动、静态性能的影响；第七章介绍了工程实际中常见的非线性特性，讨论了非线性系统的描述函数法和相平面法；第八章介绍了采样系统的分析，详细讨论了 z 变换理论，采样系统的数学模型闭环脉冲传递函数。

本教材以最基本的内容为主线，注重基本概念和原理的阐述，突出工程应用方法，理论严谨、系统性强，便于读者自学；每章有本章总结，同时配有适量的例题和习题，以配合课堂教学，帮助读者准确理解有关概念，掌握解题方法和技巧。

本书可作为普通高校自动化、电气工程自动化、测控技术与仪器等专业的

教材，也可作为高职高专、成人教育和继续教育的教材。

本教材由朱玉华主编，参加编写的有庄殿铮、卢芳菲、沈怀洋等。本书在编写过程中，得到了学校领导的大力支持，同时许多兄弟院校的同行为本书的编写提出了宝贵意见并提供了帮助。在此，谨向关心并为本教材出版做出贡献的所有同志表示深深的谢意！

由于水平有限，书中难免有错误和不当之处，敬请同行与读者给予批评指正。

编者

目 录

第一章 自动控制系统概论	(1)
第一节 引言	(1)
第二节 自动控制系统的组成	(2)
第三节 控制系统的主要类型及控制方式	(5)
第四节 对控制系统的基本要求	(8)
本章小结	(10)
习题	(10)
第二章 控制系统的数学模型	(12)
第一节 控制系统的微分方程数学模型	(12)
第二节 传递函数	(15)
第三节 方块图	(21)
第四节 典型控制系统的传递函数	(32)
本章小结	(34)
习题	(34)
第三章 控制系统的时域分析	(37)
第一节 典型输入信号和时域性能指标	(37)
第二节 一阶系统的时域分析	(41)
第三节 二阶系统的时域分析	(44)
第四节 高阶系统的过渡过程	(52)
第五节 系统的稳定性分析	(54)
第六节 控制系统的稳态误差	(59)
本章小结	(64)
习题	(64)
第四章 根轨迹法	(68)
第一节 根轨迹法的基本概念	(68)
第二节 绘制根轨迹的基本法则	(71)
第三节 广义根轨迹和零度根轨迹	(78)
第四节 系统性能分析	(80)
本章小结	(83)
习题	(83)
第五章 频率特性分析法	(85)
第一节 频率特性的基本概念	(85)
第二节 对数频率特性	(87)
第三节 幅相频率特性(极坐标图)	(95)

第四节 奈奎斯特稳定判据	(97)
第五节 控制系统的相对稳定性	(100)
第六节 开环频率特性与控制系统性能的关系	(103)
本章小结	(105)
习题	(105)
第六章 控制系统的校正	(110)
第一节 校正的基本概念	(110)
第二节 串联校正	(112)
第三节 反馈校正	(117)
第四节 复合校正	(118)
本章小结	(119)
习题	(120)
第七章 非线性控制系统	(122)
第一节 非线性系统概述	(122)
第二节 描述函数法	(125)
第三节 相平面法	(132)
本章小结	(137)
习题	(137)
第八章 采样控制系统	(140)
第一节 信号的采样与复现	(140)
第二节 z 变换与 z 反变换	(142)
第三节 脉冲传递函数	(146)
第四节 采样系统的分析	(150)
本章小结	(158)
习题	(158)
附录	(160)

第一章 自动控制系统概论

本章简要介绍自动控制的基本概念、自动控制理论的发展过程,进而引出自动控制系统的组成和分类方法,以及工程上对自动控制系统的基本要求,从而给自动控制原理课程的研究对象和学习目的提供一个较为清晰的轮廓。

第一节 引言

自动控制学科由自动控制技术和自动控制理论两部分组成。近几十年来,自动控制技术正在迅猛发展,并在工农业生产、交通运输、国防建设和航空、航天事业等领域中获得广泛的应用。随着生产和科学技术的发展,自动控制技术已渗透到各学科领域,成为促进当代生产发展和科学技术进步的重要因素。

一、自动控制相关概念

1. 自动控制

所谓自动控制,是指在没有人直接参与的情况下,利用自动控制装置(简称控制器)使被控对象(生产装置、机器设备或其他过程)的某些物理量(称为被控量)自动地按预定的规律运行或变化。

事实上,任何技术设备、工作机械或生产过程都必须按要求运行。例如,要想发电机正常供电,其输出的电压和频率必须保持恒定,尽量不受负荷变化的干扰;要想数控机床能加工出高精度的工件,就必须保证工作台或刀架的进给量准确地按照程序指令的设定值变化;要使烘烤炉提供优质的产品,就必须严格地控制炉温;导弹能准确地命中目标、人造卫星能按预定轨道运行并返回地面、宇宙飞船能准确地月球上着落并安全返回,以及工业生产过程中,诸如温度、压力、流量、液位、频率等方面的控制,所有这一切都是以高水平的自动控制技术为前提的。

自动控制技术的应用,不仅使生产过程实现自动化,从而提高了劳动生产率和产品质量,降低生产成本,提高经济效益,改善劳动条件,而且在人类征服大自然、探索新能源、发展空间技术和创造人类社会文明等方面都具有十分重要的意义。因此,掌握自动控制技术已经成为现代工程技术人员和科学工作者必须具备的一门技术。

2. 自动控制理论

实现自动控制技术的理论叫自动控制理论,它是研究自动控制共同规律的技术科学。

3. 自动控制系统

指能够对被控对象的工作状态进行控制的系统。

二、自动控制理论的发展状态

随着自动控制技术的广泛应用和迅猛发展,出现了许多新问题,这些问题要求从理论上加以解决。自动控制理论正是在解决这些实际技术问题的过程中逐步形成和发展起来的。它是研究自动控制技术的基础理论,是研究自动控制共同规律的技术科学。按其发展的不同阶

段, 可把自动控制理论分为经典控制理论、现代控制理论和大系统理论与智能控制理论三大部分。

1. 经典控制理论(也就是自动控制原理)

- 产生年代: 20 世纪 40 ~ 60 年代
- 研究对象: 单输入单输出(SISO)线性、定常系统
- 数学模型: 微分方程、传递函数
- 研究方法: 主要是频域法, 还有时域法、根轨迹法
- 主要内容: 系统的分析和综合(稳定性)
- 主要控制装置: 自动控制器

2. 现代控制理论

- 产生年代: 20 世纪 60 年代开始, 60 年代中期成熟
- 研究对象: 多输入多输出(MIMO)时变、非线性系统
- 数学模型: 状态方程
- 研究方法: 主要是时域分析法(状态空间分析法)
- 主要内容: 最优化问题
- 主要控制装置: 计算机

3. 大系统理论与智能控制理论

- 它是 20 世纪 70 年代后, 控制理论向广度和深度发展的结果
- 大系统: 指规模庞大、结构复杂、变量众多的信息与控制系统
- 智能控制系统: 是指具有某些仿人智能的工程控制与信息处理系统, 如智能机器人

自动控制技术的应用, 推动了控制理论的发展; 而自动控制理论的发展, 又指导了控制技术的应用, 使其进一步完善。随着科学技术的发展, 自动控制技术及理论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、核反应堆等各个学科领域。近年来, 控制科学的应用范围还扩展到生物、医学、环境、经济管理和其他许多社会生活领域, 并为各学科之间的相互渗透起了促进作用。可以毫不夸张地说, 自动控制技术和理论已经成为现代化社会的不可缺少的组成部分。尽管自动控制装置是各式各样的, 它们的用途和具体结构也各不相同, 但是它们的基本原理是一样的。自动控制原理阐述的是建立在各种自动控制装置基础之上的统一理论, 是研究自动控制共同规律的基础理论。本书介绍经典控制理论的有关内容, 以求为进一步深入学习自动控制有关课程及其他相关科学奠定良好的基础。

第二节 自动控制系统的组成

一、控制系统的组成

在许多工业生产过程或生产设备运行中, 为了维持正常的工作条件, 往往需要对某些物理量(如温度、压力、流量、液位、电压、位移、转速等)进行控制, 使其尽量维持在某个数值附近, 或使其按一定规律变化; 要满足这种需要, 就应该对生产机械或设备进行及时的操作和控制, 以抵消外界的扰动和影响。在自动控制领域, 为了提高控制质量, 一般采用反馈的措施, 所以通常的自动控制系统都是指有反馈的系统。

图 1-1 所示是一个蒸汽加热器温度控制系统。用蒸汽加热冷流体，工艺要求热流体出口温度保持一定。若忽略热损失，当蒸汽带进的热量与热流体带出的热量相等时，热流体出口温度保持在规定的数值上。由于冷流体流量、冷流体入口温度和蒸汽阀前压力等因素的波动，将会使出口温度下降或上升。为此，设置一个温度控制系统，来控制蒸汽加热器出口温度。温度检测元件安装在蒸汽加热器热流体出口处，检测出口温度高低，检测信号经过温度变送器送至控制器。当出口温度与规定温度之间出现偏差时，控制器就立刻根据偏差数值和极性进行控制——开大或关小蒸汽阀门，使出口温度保持规定数值。

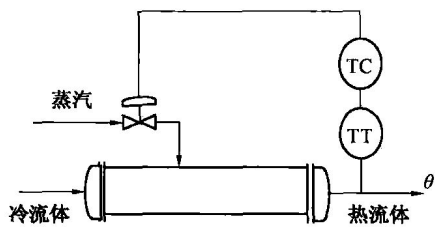


图 1-1 蒸汽加热器温度控制系统

上述蒸汽加热器温度控制系统的控制过程为：加热器的温度通过温度计测量出来经温度变送器 TT 送至温度控制器 TC，与给定值比较，按比较的结果（偏差）进行一定的计算，然后带动控制阀移动，改变蒸汽量，以消除干扰使加热器的温度保持在给定值。

1. 自动控制系统中常用的名词术语

- 被控对象：要求实现自动控制的机器、设备或生产过程，如蒸汽加热器。
- 被控变量：被控对象内要求实现自动控制的物理量，如蒸汽加热器出口温度。
- 控制量（操纵变量）：作为被控量的控制信号，加给自动控制系统的输入量，或消除干扰的影响，实现控制作用的参数，如蒸汽流量。

• 扰动信号：简称扰动或干扰、它与控制作用相反，是一种不希望的、影响系统输出的不利因素。扰动信号既可来自系统内部，又可来自系统外部，前者称内部扰动，后者称外部扰动，如冷流体温度、流量的变化等。

- 执行机构：是使被控变量达到要求的装置。
- 测量元件（检测装置）：用来检测被控量将其转换成与给定值相同的物理量。
- 控制装置：即控制器，对被控对象起控制作用装置的总称。

2. 自动控制系统的组成

一般来说，一个简单控制系统由两大部分、四个环节组成。

- 两大部分：自动化装置（控制器、控制阀、测量元件及变送器）、被控对象。
- 四个环节：被控对象、控制器、控制阀、测量元件及变送器。

典型控制系统的方块图如图 1-2 所示。

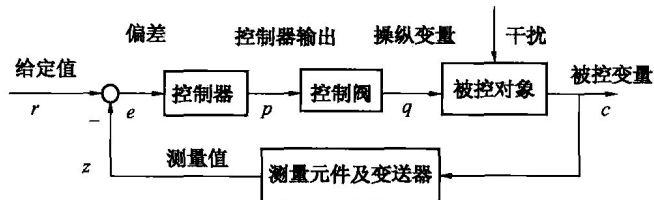


图 1-2 典型控制系统方块图

实践证明：按反馈原理组成的控制系统，往往不能完成任务，因为系统的内部存在不利控制因素。由于有非线性惯性的存在破坏系统正常工作，因此要加校正元件，如图 1-3 所示。

图 1-3 所示各元件的职能如下:

测量反馈元件——用以测量被控量并将其转换成与输入量同一物理量后,再反馈到输入端以作比较;

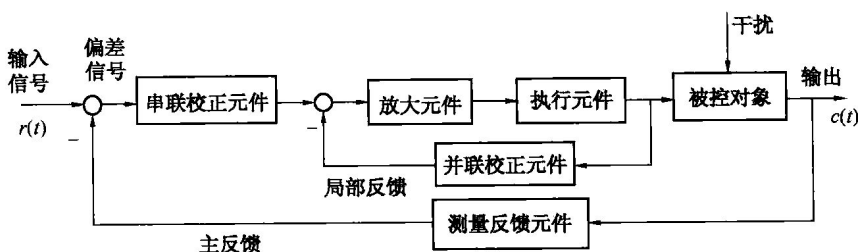


图 1-3 具有局部反馈控制系统结构图

放大元件——将微弱的信号作线性放大;

校正元件——按某种函数规律变换控制信号能,并产生反映两者差值的偏差信号以利于改善系统的动态品质或静态性;

执行元件——根据偏差信号的性质执行相应的控制作用,以便使被控量按期望值变化;

被控对象——又称控制对象或受控对象,通常是指生产过程中需要进行控制的工作机械或生产过程。出现于被控对象中需要控制的物理量称为被控量。

二、控制系统的方块图

在研究自动控制系统时,为了更清楚地表示出一个自动控制系统中各个组成环节之间的相互关系和信号联系,便于对系统分析研究,一般采用方块图来表示控制系统的组成。控制系统的方块图是用来描述控制系统的一种方法,它是将系统中各个环节用带信号线来表示的直观图形。

例如图 1-1 蒸汽加热器温度控制系统可以用图 1-2 的方块图来表示。每个方块表示组成系统的一个部分,称为“环节”。两个方块之间用一条带有箭头的线段表示其信号的相互关系,箭头指向方块表示为这个环节的输入,箭头离开方块表示这个环节的输出。线旁的字母表示相互之间的作用信号。

用方块图表示系统的一个主要优点是它能定量地描述各个信号间的相互关系。定量的数学关系式常用传递函数,用符合 $G(s)$ 表示,并有注脚说明所属的组件,传递函数是用拉氏变换形式表示的输入对输出影响的关系式。图 1-4 是用传递函数表示蒸汽加热器温度控制系统的方块图。

用方块图表示系统时,一般将系统的正向通路表示在上面,将系统的反馈回路表示在下面,如果一串信号的箭头都是从输入指向输出的,这一通路就叫做正向通路。如果是从输出

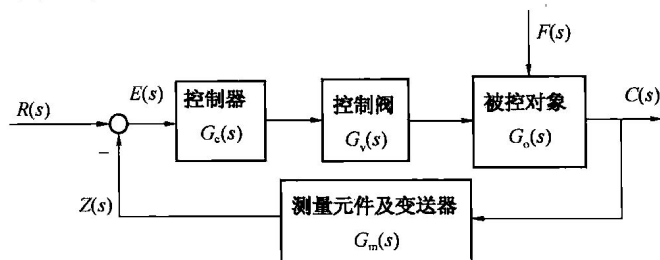


图 1-4 温度控制系统方块图

指向输入的,亦即从输出返回到输入的,就叫做反馈回路。对于图 1-4 来说,系统的输出 $C(s)$ 经过测量而得到信号 $Z(s)$,并被送至比较元件与给定值进行比较的这一通路,就是系统的反馈回路。图中反馈信号 $Z(s)$ 旁边的“-”负号表示这是一个负反馈系统,若为“+”号,则为正反馈系统。一般只有负反馈才有可能改善控制系统的质量,正反馈是有害的。

在方块图中带箭头的直线代表信号。信号具有方向性,而且具有单向性。方块图中的每个环节都用带箭头的直线表示输入信号(指向环节)和输出信号(指离环节),前一环节的输出信号作为后一环节的输入信号。对每一个方块或系统,输入和输出的因果关系是单方向的,即只有输入影响输出的变化,输出不会影响输入的变化。

第三节 控制系统的主要类型及控制方式

一、自动控制系统的分类

自动控制系统的种类繁多,应用范围很广泛,它们的结构、性能乃至控制任务也各不相同。因而分类方法很多,不同的分类原则会导致不同的分类结果。为便于学习,现仅介绍几种常见的分类方法。

1. 按描述元件的动态方程分类

可分为线性系统和非线性系统,其中:

线性系统的特点在于组成系统的全部元件都是线性元件,它们的输入—输出静态特性均为线性特性。这类系统的运动过程可用线性微分方程(或差分方程)来描述。

非线性系统的特点在于系统中含有一个或多个非线性元件。非线性元件的输入—输出静态特性是非线性特性。例如饱和限幅特性、死区特性、继电特性或传动间隙等,凡含有非线性元件的系统均属非线性系统。这种系统的运动过程需用非线性微分方程(或差分方程)。

2. 按信号的传递是否连续分类

可分为连续系统和离散系统。若系统各环节间的信号均为时间的连续函数,则这类系统称为连续系统。

在信号传递过程中,只要有一处的信号是脉冲序列或数字编码时,这种系统就称为离散系统。离散系统的特点是信号在特定离散时刻 T 、 $2T$ 、 $3T$ 、……是时间的函数,而在上述离散时刻之间,信号无意义(不传递)。离散系统的运动规律需用差分方程描述。

3. 按系统的参数是否随时间变化分类

可分为定常系统和时变系统。如果系统中的参数不随时间变化,则这类系统称为定常系统,多数是属于这类系统,或可以合理地近似成这类系统;如果系统中的参数是时间的函数,则这类系统称为时变系统。

4. 按给定值特征分类

(1) 定(恒)值控制系统(又称自动调整系统)

给定值是恒定不变,故称为恒值。由于扰动出现,将使被控量偏离期望恒值而出现偏差,但定值系统能根据偏差的性质产生控制作用,使被控量以一定的精度回复到期望值附近。水位控制系统及转速闭环控制系统均为恒值控制系统。此外,生产过程中广泛应用的温度、压力、流量等参数的控制,多半是采用恒值控制系统来实现的。

- 特点:控制信号是常量

- 目的：补偿干扰，使系统输出保持恒值

(2) 随动系统(又称伺服系统)

给定值是随时间变化的未知函数。控制系统能使被控量以尽可能高的精度跟随给定值的变化。随动系统也能克服扰动的影响，但一般说来，扰动的影响是次要的。许多自动化武器是由随动系统装备起来的，如鱼雷的飞行、炮瞄雷达的跟踪、火炮、导弹发射架的控制等等。民用工业中的船舶自动舵、数控切割机以及多种自动记录仪表等，均属随动系统之列。

- 特点：使被控对象跟踪给定值的变化。
- 目的：解决跟踪

(3) 程序控制系统

给定值是随时间变化的已知函数。加热处理炉温度控制系统中的升温、保温、降温等过程，都是按照预先设定的规律(程序)进行控制的。又如间歇反应、机械加工中的程序控制机床、加工中心均是典型的例子。

随着计算机应用技术的迅猛发展，为数众多的自动控制系统都采用数字计算机作为控制手段，当计算机引入控制系统之后，控制系统就由连续系统变成离散系统了。因此，随着数字计算机在自动控制中的广泛应用，离散系统理论得到迅速发展。

二、控制的基本方式

1. 开环控制

指组成系统的控制装置与被控对象之间只有正向控制作用，而没有反向联系的控制。即系统的输出量对控制量没有影响。若系统的被控制量对系统的控制作用没有影响，则此系统叫开环控制系统。

例如炉温控制系统如图 1-5 所示，电加热系统的控制目标是，通过改变自耦变压器滑动端的位置，来改变电阻炉的温度，并使其恒定不变，从而使炉温保持在希望的范围内。开环控制系统的方块示意图如图 1-6 所示，图中输出量亦称输出信号，是被控对象的某一被控参数。输入量亦称输入信号，它是用来控制系统输出量的控制信号。而控制量是控制器的输出量，同时也是被控对象的输入量。系统的输入量是通过改变控制量而实现对系统的输出量进行控制的。

若工作条件变化大，如炉门的开闭引起炉温降低偏离期望值，所以炉温偏差一般无法自

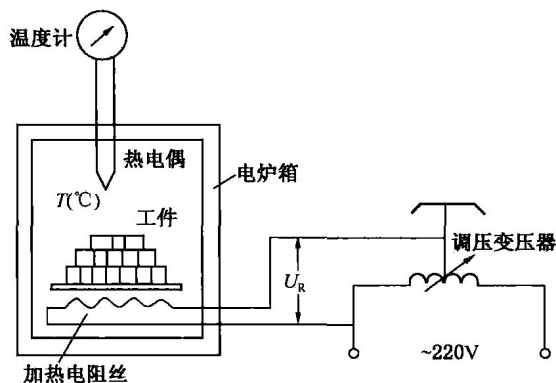


图 1-5 炉温自动控制系统示意图



图 1-6 开环控制系统方块图

动修正。

- 特点：系统结构和控制过程简单，稳定性好，调试方便，成本低。在开环控制系统中，对于每一个输入量，就有一个与之对应的输出量。系统的控制精度完全取决于组成系统的各个元器件的精度。当系统所受到的干扰影响不大，并且控制精度要求不高时，可采用开环控制方式。

- 缺点：对无法预测的干扰难以控制；要求部件质量高时，难以保证。

开环系统的控制精度将取决于控制器及被控对象的参数稳定性。也就是说，欲使开环控制系统具有满足要求的控制精度。则系统各部分的参数值，在工作过程中，都必须严格保持在事先要求的量值上。这就必须对组成系统的元部件质量提出严格的要求。当出现干扰时，开环控制系统就不能完成既定的控制任务，因为开环控制系统不能辨认是起控制作用的控制信号，还是起妨碍控制作用的干扰信号，只要有外加的输入信号就会引起被控制信号的变化（系统内部参数的变化同样会引起不需要的被控制信号的变化），这就是说开环控制系统没有抗干扰能力。

2. 闭环控制

指组成系统的控制装置与被控对象之间，不仅存在着正向控制作用，而且存在着反向联系的控制，即系统的输出量对控制量有直接影响。

- 反馈：将检测出来的输出量送回到系统的输入端，并与输入信号比较的过程称为反馈。

- 负反馈：若反馈信号与输入信号相减，则称为负反馈。

- 正反馈：反之，若相加，则称为正反馈。

闭环控制系统的偏差信号作用于控制器上，使系统的输出量趋于要求的数值。闭环控制的实质就是利用负反馈的作用来减小系统的误差，因此闭环控制又称为反馈控制。

闭环控制系统如图 1-7 所示。图中，偏差量为输入量与反馈量之差。

闭环系统的特点是对扰动有补偿、抵抗的能力，能用精度低的元件组成精度较高的控制系统。

从系统的稳定性来考虑，开环控制系统容易解决，因而不是十分重要的问题。

但对闭环控制系统来说，稳定性始终是一个重要问题。因闭环控制系统可能引起超调，从而造成系统振荡，甚至使得系统不稳定。

开环控制系统结构简单，容易建造，成本低廉，工作稳定。一般说来。当系统控制量的变化规律能预先知道，并且对系统中可能出现的干扰，可以有办法抑制时，采用开环控制系统是有优越性的，特别是被控制量很难进行测量时更是如此。目前，用于国民经济各部门的一些自动化装置，如自动售货机、自动洗衣机、产品生产自动线及自动车床等，一般都是开环控制系统。用于加工模具的线切割机也是开环控制的很好一例。只有当系统的控制量和干扰量均无法事先预知的情况下，采用闭环控制才会有明显的优越性。如果要求实现复杂而准确度较高的控制任务，则可将开环控制与闭环控制适当结合起来，组成一个比较经济且性能较好的控制系统。

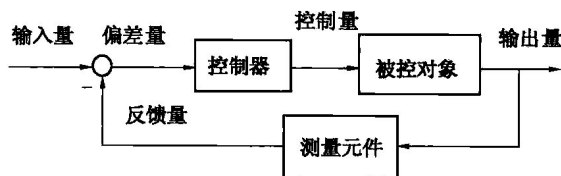


图 1-7 闭环控制系统方块图

【例1】 图1-8为工业炉温闭环控制系统的工作原理图。分析系统的工作原理，指出被控对象、被控量和给定量，画出系统方框图。

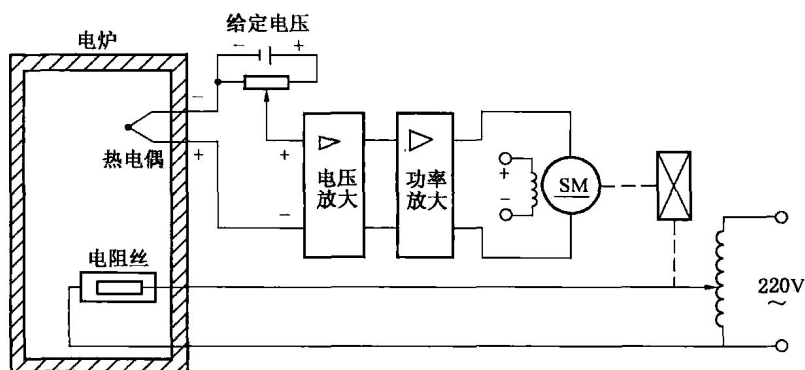


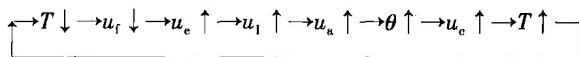
图1-8 炉温自动控制系统原理图

解：加热炉采用电加热方式运行，加热器所产生的热量与调压器电压 u_c 的平方成正比， u_c 增高，炉温就上升， u_c 的高低由调压器滑动触点的位置所控制，该触点由可逆的直流电动机驱动。炉子的实际温度用热电偶测量，输出电压 u_f 。 u_f 作为系统的反馈电压与给定电压 u_r 进行比较，得出偏差电压 u_e ，经电压放大器、功率放大器放大成 u_a 后，作为控制电动机的电枢电压。

在正常情况下，炉温等于某个期望值 T ，热电偶的输出电压 u_f 正好等于给定电压 u_r 。此时， $u_e = u_r - u_f = 0$ ，故 $u_1 = u_a = 0$ ，可逆电动机不转动，调压器的滑动触点停留在某个合适的位置上，使 u_c 保持一定的数值。这时，炉子散失的热量正好等于从加热器吸取的热量，形成稳定的热平衡状态，温度保持恒定。

当炉膛温度 T 由于某种原因突然下降（例如炉门打开造成的热量流失），则出现以下的控制过程：

控制的结果是使炉膛温度回升，直至 T 的实际值等于期望值为止。



系统中，加热炉是被控对象，炉温是被控量，给定量是由给定电位器设定的电压 u_r （表征炉温的期望值）。系统方框图见图1-9。

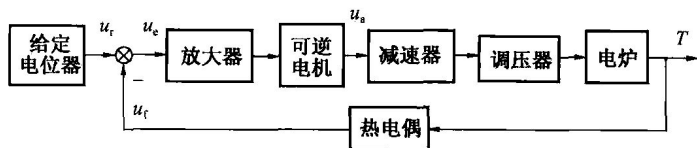


图1-9 炉温自动控制系统方框图

第四节 对控制系统的基本要求

一、对自动控制系统的基本要求

要提高控制质量，就必须对自动控制系统的性能提出一定的具体要求。由于各种自动控制系统的被控对象和要完成的任务各不相同，故对性能指标的具体要求也不一样。但总的来

说,都是希望实际的控制过程尽量接近于理想的控制过程。工程上把控制性能的要求归纳为稳定性、快速性和准确性三个方面,即客观上要求三个字稳、快、准。

对反馈控制系统最基本的要求是工作的稳定性,同时对准确性(稳态精度)、快速性及阻尼程度也要提出要求。上述要求通常是通过系统反应特定输入信号的过渡过程,及稳态的一些特征值来表征的。过渡过程是指反馈控制系统的被控制量 $c(t)$, 在受到控制量或干扰量作用时,由原来的平衡状态(或叫稳态)变化到新的平衡状态时的过程。

1. 稳定性

稳定性是指系统重新恢复平衡状态的能力。任何一个能够正常运行的控制系统,必须是稳定的。由于闭环控制系统有反馈作用,故控制过程有可能出现振荡或不稳定。一般来讲控制系统要求动态过程震荡要小,过大波动,会导致运动部件超载,松动和破坏。

在单位阶跃信号作用下,控制系统的过渡过程曲线如图 1-10 所示。如果系统的过渡过程曲线 $c(t)$ 随着时间的推移而收敛(振荡收敛见图中的曲线①;单调收敛见图中的曲线②)则系统稳定;若发散,单调发散见图中的曲线④;振荡发散见图中的曲线③),此时系统便不可能达到平衡状态,把这类系统叫做不稳定系统。显然,不稳定系统在实际中是不能应用的。

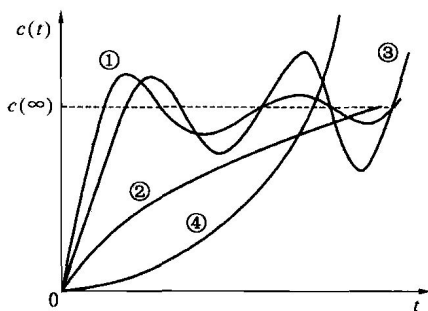


图 1-10 控制系统的过渡过程曲线

2. 快速性

快速性指动态过程进行的时间(过渡过程时间),如果控制系统动态过程进行的慢,则系统长久出现大偏差,影响质量,也说明系统响应迟钝。

由于系统的对象和元件通常具有一定的惯性,并受到能源功率的限制,因此,当系统输入(给定输入或扰动输入)信号改变时,在控制作用下,系统必然由原先的平衡状态经历一段时间才过渡到另一个新的平衡状态,这个过程称为过渡过程。过渡过程越短,表明系统的快速性越好。快速性是衡量系统质量高低的重要指标之一,在现代化军事设施中尤其显得重要。

3. 准确性

准确性指误差,它反映系统的稳态精度,说明了系统的准确程度。控制系统的稳态精度表征系统的稳态品质。我们把被控制信号的期望值 $c(t)$ 与稳态值 $c(\infty)$ 之差叫做稳态误差。稳态误差和静差是表征系统稳态精度的一项性能指标。

二、衡量控制系统工作质量的指标

控制系统在单位阶跃信号作用下的衰减过渡过程曲线如图 1-11 所示。

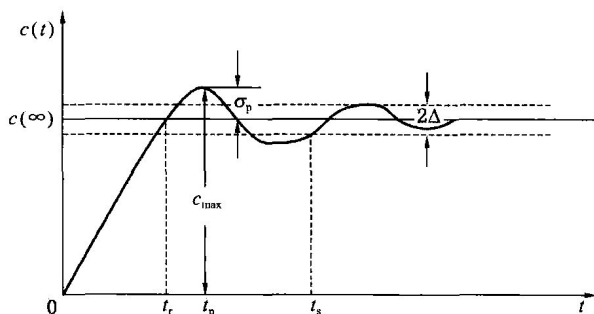


图 1-11 单位阶跃信号作用下衰减过渡过程曲线

衡量控制系统稳定性性能的指标主要有超调量 σ_p 和衰减比 n 及振荡次数 N 。

σ_p 定义如下式

$$\sigma_p = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)}, \text{ 而 } \sigma_p \text{ 越小, 说明在过渡过程中引起的超调越小。}$$

值得注意的是超调现象严重不仅使组成系统的各个元件处于恶劣的工作条件下,而且过渡过程在长时间内不能结

束,致使系统的误差不能很快地减小到允许范围之内。

定义在 $0 < t < t_s$ 时间内, $c(t)$ 穿越 $c(\infty)$ 水平线的次数的一半为控制系统过渡过程的振荡次数 N 。 N 的数值越小,说明控制系统的阻尼性能越好。

衰减比 n 指过渡过程曲线同方向相邻两个波峰之比,衰减比 n 越大,振荡越小,控制系统的稳定性越好。

衡量控制系统快速性的指标主要有过渡过程时间 t_s , 上升时间 t_r 及超调时间 t_p (t_p 也称为峰值时间)。

t_s 越小,说明系统从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态所需的时间越短,反之则越长。因此, t_s 是表征系统反应输入信号速度的性能指标。

有时还通过过渡过程达到第一个极值所需要的时间 t_p (t_p 称为峰值时间)以及上升时间 t_r 来衡量控制系统进行的快慢。 t_r 和 t_p 越小,说明系统的快速性越好。

衡量控制系统准确性的指标只有稳态误差 e_{ss} , 而且是唯一的一个静态指标。对一个稳定的系统而言,当过渡过程结束后稳态误差,它是衡量系统稳态精度的重要指标。系统输出量的实际值与期望值之差称为稳态误差,稳态误差 e_{ss} 越小系统的准确性越高。

对于同一系统,稳、快、准是相互制约的。过分提高过程的快速性,可能会引起系统强烈的振荡。而过分追求稳定性,又可能使系统反应迟钝,最终导致准确度变坏。一般来讲对随动控制系统要求要快,调速系统要稳。如何分析与解决这些矛盾,这便是本学科研究的重要内容。

本章小结

(1) 自动控制就是在没有人直接参与的情况下,利用控制装置使被控对象的某些物理量自动地按照预定的规律运行或变化。能实现自动控制的系统称为自动控制系统。自动控制系统涉及的范围很广。凡是没有人直接参与的控制系统都称为自动控制系统。它可以是一个物理系统,也可以是一个经济系统或社会系统。

(2) 自动控制系统由两大部分组成,即被控对象和自动化装置。可以用方块图来描述控制系统的组成。

(3) 控制系统按照不同的分类标准可分成不同的类型,如按给定值的不同分成定值控制系统、随动控制系统、程序控制系统等。

(4) 开环控制和闭环控制是自动控制的两种基本方式。它们的本质区别在于开环控制系统的输出量对控制量无影响,而闭环控制系统的输出量对控制量产生影响。

由于闭环控制系统(反馈控制系统)的控制精度比开环控制系统高得多,因此闭环控制系统得到了广泛的应用。

(5) 稳定性、平稳性、快速性和准确性是对自动控制系统的基本要求。

习 题

1-1 什么是自动控制?什么是自动控制系统?

1-2 自动控制系统通常由那些环节组成?并用系统的方块图来表示控制系统的组成,说明各环节在控制过程中的功能?

1-3 图 1-12 为一反应器温度控制系统示意图。A、B 两种物料进入反应器进行反应,