

核反应堆控制

张建民 编著

西安交通大学出版社

239

TU36
Z32

核反应堆控制

张建民 编著

西安交通大学出版社

内容简介

本书在论述自动控制基本理论的基础上,介绍了核反应堆控制的一般概念,核反应堆的动力学模型以及在时间域和频率域对反应堆及其控制系统的稳定性和动态特性的分析方法。特别着重介绍了压水堆核电厂功率分布控制及控制系统,并简要介绍了其他类型动力堆的控制系统。最后介绍了离散时间控制系统的描述和分析方法以及核电厂的计算机控制。

本书是高等院校核工程与核技术专业的本科生教材,也可供从事相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

核反应堆控制/张建民编著. —西安:西安交通大学出版社,2002.6
ISBN 7-5605-1533-9

I. 核… II. 张… III. 反应堆-控制系统
IV. TL362

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 014439 号

*

西安交通大学出版社出版发行
(西安市兴庆南路 25 号 邮政编码:710049 电话:(029)2668315)
西安建筑科技大学印刷厂印装
各地新华书店经销

*

开本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:17.75 字数:434 千字
2002 年 6 月第 1 版 2002 年 6 月第 1 次印刷
定价:20.00 元

发行科电话:(029)2668357,2667874

前 言

随着科学技术的发展,自动控制技术在核科学与技术领域中得到了广泛的应用,并且起着愈来愈重要的作用。因此核反应堆控制成为核工程中的重要组成部分和研究方向。

本教材是普通高等学校核工程与核技术专业的试用教材,是根据西安交通大学核工程与核技术专业 1999 版教学计划“核反应堆控制”课程的教学大纲编写的,为西安交通大学 1999—2000 年的重点教材。

为满足我国核事业的发展对高级专业人才基本知识结构的需要,以及核电厂和反应堆工程中自动控制技术的发展,本教材紧密结合实际深入浅出地介绍了经典自动控制理论及其在核动力厂控制系统的设计和分析中的应用、压水堆核电厂的控制,以及离散控制系统的基本理论和核电厂的计算机控制。

全书共分为 11 章。第 1 章阐述自动控制的一般概念和核反应堆控制的基础;第 2 章主要介绍控制系统数学模型的建立和点堆动力学模型;第 3 章介绍工业用自动控制器的规律和实现;第 4 章描述控制系统的时域分析方法和核反应堆的瞬态响应以及瞬态响应的 MATLAB 数值求解;第 5 章介绍根轨迹法及其在反应堆系统分析中的应用;第 6 章介绍控制系统的频域分析法和反应堆的频率特性,第 7 章讨论核反应堆和动力堆控制系统的稳定性分析;第 8 章着重介绍压水堆核电厂的功率分布控制和主要控制系统;第 9 章简要介绍几种不同类型动力堆控制系统;第 10 章主要介绍采样定理、差分方程、Z 变换和离散控制系统的稳定性分析;第 11 章介绍核电厂的集中型和集散型计算机控制。

本教材的推荐学时为 56 学时。如果教学学时少可选择其中部分内容。

桑维良教授长期从事核反应堆控制课程的教学,参与了本书的大纲制定和定稿的讨论,提出了许多建设性意见,在此表示诚挚的感谢。

刘文江教授详细审阅了本书书稿,并提出了许多宝贵意见,在此谨致以衷心的感谢。在本书出版的过程中,杨鸿森教授给予了帮助和支持,在此表示衷心的感谢。

由于作者学识水平有限,实践经验不足,书中错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者
2001 年 11 月
于西安交通大学

目 录

前言

第 1 章 核反应堆控制概述

1.1 引言	(1)
1.2 自动控制的一般概念	(1)
1.2.1 自动控制的基本术语	(1)
1.2.2 自动控制系统的分类	(2)
1.2.3 开环控制系统和闭环控制系统	(4)
1.2.4 典型输入信号	(5)
1.2.5 对自动控制系统性能的基本要求	(6)
1.3 核反应堆控制基础	(9)
1.4 反应性控制	(10)
1.4.1 中子吸收体移动	(11)
1.4.2 慢化剂液位控制	(12)
1.4.3 燃料控制法	(12)
1.4.4 反射层控制法	(12)
1.5 核电厂稳态运行方案	(13)
1.5.1 二回路蒸汽压力 P_s 恒定方案	(14)
1.5.2 冷却剂平均温度 T_{av} 恒定方案	(14)
1.5.3 冷却剂出口温度 T_h 恒定方案	(15)
1.5.4 冷却剂平均温度 T_{av} 程序方案	(15)
习题	(16)

第 2 章 核反应堆动力学模型

2.1 引言	(17)
2.2 物理系统的数学模型	(17)
2.3 传递函数	(21)
2.3.1 传递函数的定义	(22)
2.3.2 典型环节及其传递函数	(23)
2.4 方块图及其简化	(27)
2.5 点堆动力学模型	(31)
2.5.1 零功率反应堆的动态方程及传递函数	(31)
2.5.2 具有反馈的反应堆的传递函数	(34)

2.6	反应性方程	(36)
2.7	氙的效应和动态方程	(38)
	习题	(41)
第3章 自动控制器		
3.1	概述	(43)
3.2	控制器的基本控制规律	(44)
3.3	控制规律的实现	(48)
	习题	(51)
第4章 控制系统的时域分析		
4.1	引言	(52)
4.2	一阶系统	(52)
4.3	二阶系统	(54)
4.3.1	二阶系统的瞬态响应	(54)
4.3.2	二阶系统瞬态响应性能指标的计算	(58)
4.4	脉冲响应函数与二阶系统的脉冲响应	(62)
4.4.1	脉冲响应函数	(62)
4.4.2	二阶系统的脉冲响应	(62)
4.5	线性系统的稳定性	(63)
4.6	劳斯稳定判据	(65)
4.7	控制系统的稳态特性	(68)
4.8	核反应堆的瞬态响应	(70)
4.8.1	考虑六组缓发中子的瞬态响应	(70)
4.8.2	等效单组缓发中子近似的瞬态响应	(72)
4.8.3	常源近似	(74)
4.8.4	瞬跳近似	(75)
4.9	时域响应的数值解法	(75)
	习题	(78)
第5章 根轨迹法		
5.1	根轨迹法的基本概念	(80)
5.2	绘制根轨迹图的一般规则	(81)
5.3	核反应堆系统的根轨迹	(87)
5.3.1	等效单组缓发中子模型反应堆系统根轨迹图的绘制	(88)
5.3.2	瞬跳近似模型反应堆系统根轨迹图的绘制	(90)
5.4	反应堆功率控制系统的根轨迹分析	(92)
	习题	(96)

第6章 控制系统的频域分析

6.1 频率特性的基本概念	(97)
6.2 幅相频率特性	(99)
6.2.1 极坐标图	(99)
6.2.2 典型环节的频率特性	(99)
6.3 对数频率特性	(102)
6.3.1 对数坐标图	(102)
6.3.2 典型环节的对数频率特性	(102)
6.4 系统开环频率特性的绘制	(107)
6.5 闭环控制系统的频率特性	(109)
6.6 二阶系统的频域指标	(111)
6.7 核反应堆的频率特性	(112)
6.7.1 零功率反应堆的频率特性	(112)
6.7.2 具有温度反馈的反应堆系统的频率特性	(114)
习题	(116)

第7章 核反应堆的稳定性分析

7.1 奈魁斯特稳定判据	(117)
7.1.1 映射的基本原理	(117)
7.1.2 映射定理在闭环系统稳定性分析中的应用	(119)
7.1.3 奈魁斯特稳定判据	(120)
7.1.4 对数稳定判据	(122)
7.2 控制系统的相对稳定性	(124)
7.3 核反应堆的稳定性分析	(125)
7.3.1 两路并联反馈反应堆系统的稳定性	(125)
7.3.2 两路串联温度反馈反应堆系统的稳定性	(129)
7.4 动力堆控制系统的稳定性分析与设计	(132)
7.4.1 反应堆系统的稳定性分析	(133)
7.4.2 不带位置反馈控制系统的稳定性分析与设计	(135)
7.4.3 具有位置反馈控制系统的稳定性分析与设计	(137)
习题	(141)

第8章 压水堆核电厂控制

8.1 概述	(143)
8.1.1 压水堆核电厂	(143)
8.1.2 压水堆核电厂的控制系统	(143)
8.1.3 反应堆自稳自调特性	(146)
8.1.4 压水堆核电厂的运行模式	(147)
8.2 压水堆功率控制原理	(148)

8.3	压水堆功率分布控制	(149)
8.3.1	轴向功率分布的描述	(150)
8.3.2	限制功率分布的有关准则	(151)
8.3.3	保护梯形与运行梯形	(152)
8.3.4	模式 A 运行梯形	(154)
8.3.5	模式 G 运行梯形	(155)
8.4	控制棒	(159)
8.4.1	控制棒棒束组件	(159)
8.4.2	控制棒的微分价值和积分价值	(162)
8.4.3	控制棒驱动机构与移动程序	(163)
8.4.4	控制棒棒位	(166)
8.5	压水堆功率控制	(168)
8.5.1	功率控制系统	(168)
8.5.2	冷却剂平均温度控制系统	(172)
8.5.3	控制棒联锁系统	(176)
8.5.4	硼浓度控制	(177)
8.6	控制棒位置监测	(182)
8.6.1	棒位探测器	(182)
8.6.2	棒位监测系统	(184)
8.7	过程变量控制	(185)
8.7.1	稳压器压力和液位控制	(185)
8.7.2	蒸汽发生器液位控制	(192)
8.7.3	蒸汽排放控制	(196)
	习题	(201)

第 9 章 其他类型动力堆控制系统

9.1	重水动力反应堆控制系统	(202)
9.2	沸水反应堆控制系统	(210)
9.3	气冷反应堆控制系统	(212)
9.3.1	改进型气冷反应堆控制系统	(212)
9.3.2	高温气冷反应堆控制系统	(213)
9.4	钠冷快中子增殖反应堆控制系统	(214)

第 10 章 离散时间控制系统和 Z 变换

10.1	概述	(215)
10.2	连续信号的采样及其重构	(217)
10.2.1	连续信号的采样	(217)
10.2.2	采样信号的重构	(219)
10.3	Z 变换的定义及性质	(223)

10.3.1	Z 变换定义	(223)
10.3.2	求 Z 变换的方法	(223)
10.3.3	Z 反变换	(224)
10.3.4	Z 变换性质和定理	(226)
10.4	离散系统的差分方程及其解	(226)
10.4.1	用差分方程描述离散系统	(227)
10.4.2	差分方程的解法	(227)
10.5	线性离散控制系统的 Z 传递函数	(228)
10.6	线性离散控制系统的稳定性分析	(230)
10.6.1	S 平面与 Z 平面的映射关系	(230)
10.6.2	稳定判据	(231)
	习题	(235)
第 11 章 核电厂的计算机控制		
11.1	概述	(236)
11.1.1	计算机控制的特点	(236)
11.1.2	计算机控制系统的组成	(237)
11.1.3	计算机控制的分类	(239)
11.1.4	数字 PID 控制器	(240)
11.1.5	核电厂计算机控制的发展和现状	(241)
11.2	核电厂的集中型计算机控制	(243)
11.2.1	计算机控制系统的主要功能和设计要求	(243)
11.2.2	坎杜堆核电厂计算机控制系统的组成	(244)
11.2.3	坎杜堆核电厂计算机控制软件	(247)
11.3	核电厂的集散型计算机控制	(249)
11.3.1	集散型计算机控制概述	(249)
11.3.2	核电厂集散型计算机控制系统	(250)
11.3.3	核电厂集散控制总线系统	(256)
	习题	(258)
	参考文献	(259)
附录 1	缓发中子份额和先驱核衰变常数	(261)
附录 2	拉氏变换的定义及其性质和定理	(264)
附录 3	核反应堆的传递函数	(267)
附录 4	核反应堆的对数频率特性曲线图	(269)

第 1 章 核反应堆控制概述

1.1 引言

在工程和科学发展中,自动控制技术起着十分重要的作用。同时由于科学技术的发展也推动了自动控制技术的发展。目前,自动控制已广泛应用于宇宙飞船、导弹制导和飞机自动飞行等国防建设和航空航天事业中,也在工农业生产、交通运输以及人们日常生活中起着非常重要的作用。在核工程领域中,自动控制技术更是具有特殊的地位,没有自动控制,反应堆中的自持核裂变反应就无法进行下去,就不可能实现原子能的和平利用。所谓自动控制,是指在没有人参与的情况下,利用控制器的作用使生产过程或控制对象的一个或多个物理量能维持在某一给定水平或按照期望的规律变化。

在一般工业生产过程中,对压力、温度、流量、液位、功率和频率的控制以及原料和燃料成分比例的控制等,如果单靠人工控制,许多情况下难于或根本不可能满足要求,因而自动控制成为生产过程中的重要组成部分。自动控制技术的广泛应用,不仅使生产过程实现了自动化,极大地提高了生产效率,同时也减轻了人们的劳动强度。更重要的是对一些对人有毒、有害的生产过程或由于各种原因人根本不能靠近的设备和对象采用了自动控制,解决了在这样的特殊环境下的控制难题。例如,放射性对人体是有害的,核反应堆运行过程中,在其周围有强度很高的放射性,人们是不可能接近它的,所以反应堆运行过程中的所有物理参数的测量和控制都是靠仪控系统自动完成的。压水堆核电厂中主要的控制系统有:反应堆功率(中子通量密度水平)控制、一回路压力控制、稳压器液位控制、蒸汽发生器液位控制、蒸汽排放控制和核电厂负荷控制等。

自动控制理论是研究自动控制技术的基础理论。随着科学技术的发展,自动控制理论也在不断地发展,特别是计算机科学技术的发展使得自动控制理论在古典控制理论和现代控制理论的基础上产生了新的飞跃。模糊逻辑控制、专家系统和智能控制以及神经网络系统辨识与控制等是当今自动控制领域的研究热点。它是相关学科相互结合与渗透的产物。目前已用于各种工业过程自动化,如航空航天飞行器对接、冶金和化工过程控制、电力系统、智能化仪器仪表与核电安全运行等。

1.2 自动控制的一般概念

1.2.1 自动控制的基本术语

为了便于理解有关控制的基本思想、理论基础,进一步掌握控制系统的组成、作用及功能等,本节将简要地介绍一些常用的术语。

控制对象 被控制的设备或生产过程称为控制对象或被控制过程。

被控制量 被控制量也称为被调量,为控制对象的输出量。表征生产过程是否符合期望规律的物理量。

给定值 希望被控制量应该具有的量值称为给定值或设定值。给定值可以是常量也可以是随时间任意变化的量。

控制量 可由控制作用改变的,且能使被控制量跟踪给定值的物理量称为控制量。

扰动 扰动是一种对系统的输出量产生相反作用的信号。如果扰动产生在系统的内部,称为内扰;扰动产生在系统外部,则称为外扰。扰动可看作是系统的输入量。

系统 系统这个术语已经在各个领域用得非常广泛,以致很难给它下一个定义,一方面要使这个定义足以概括它的各种应用,另一方面又要能简明地把这个定义应用于实际。所谓系统是指相互联系又相互作用着的对象的有机组合。对自动控制中的系统,则是一些部件的组合,这些部件组合在一起,完成一定的任务。控制系统包括了控制器和控制对象等。

手动控制 被控制量在运行中总要经常受到许多因素的影响而偏离所要求的值,因此运行人员就要根据观察随时加以控制为手动控制,也称为人工控制。

自动控制 采用机械或电气等装置来代替人工控制,就是自动控制。自动控制没有人的参与。

控制器 能按预期要求产生控制信号以改变控制量的设备或装置称为控制器。

反馈 系统的输出量若全部或部分回送到输入端,称为反馈,它与输入量共同影响系统的输出。

反馈控制 反馈控制是这样一种控制过程,它能在有扰动的情况下,力图减小系统输出量与参考输入量之间的偏差,而且其工作也正是基于这一偏差基础之上的。在这里,反馈控制仅仅是对无法预计的扰动而设计的,因为对于可以预计的或者是已知的扰动来说,总是可以在系统中加以校正的,因而对于它们的测量是完全不必要的。

远距操作 远距操作也称远动。它是利用辅助能源对远离主控室的设备进行操作的过程,如气动阀和电动阀的开、关操作,泵和风机的启、停操作等。控制各项操作的指挥信号通常是集中到一个控制台上。

自动检测和远距操作是实现生产过程自动化的必备手段。当自动控制系统发生故障时,仍可由操作人员在控制室进行远距操作,保证生产过程的继续进行。

1.2.2 自动控制系统的分类

所谓控制就是为了达到一定的目的,对作为生产过程的设备进行的操作。由实现控制目的的设备 and 部件构成的系统称为控制系统。而由自动控制装置,包括测量部件、控制器和执行机构等,与控制对象连接在一起就构成了自动控制系统,如图 1.2-1 所示。各单元是通过信号的传递相互连接起来的。

在自动控制系统中,被控制量信号与给定值信号相比较,得到一个偏差信号 e 。然后按控制器的运算规律对偏差信号进行运算,得到所需的控制信号,该控制信号被送到执行器,驱动调节单元,调节控制对象的输入量,以达到调节被控制量的目的。

随着现代生产规模的扩大和生产技术水平的不断提高,自动控制系统更复杂,功能更强,控制精度更高,设计更趋合理。为了各种不同的控制目的,就有各式各样的自动控制系统出现。自动控制系统的分类方法很多,下面介绍几种常用的分类方法。

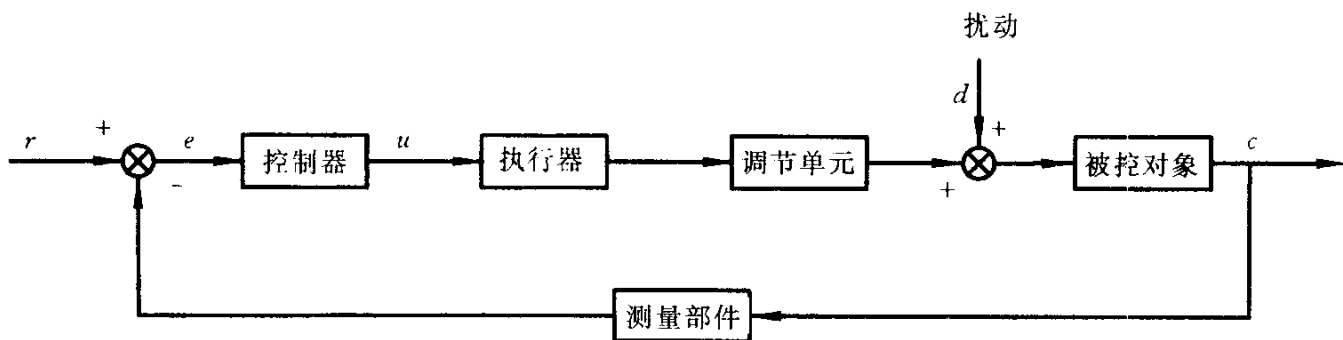


图 1.2-1 自动控制系统方块图

1. 按给定值变化规律分类

自动控制系统按给定值变化规律可以分为恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统。

(1) 恒值控制系统 在恒值控制系统中,输入信号所保持的恒定值,通常称为控制器的给定值。它和被控制量所要求的值是相对应的。对于恒值控制系统,一般分析和设计的重点是考虑存在扰动情况下,如何将系统的被控制量维持在恒值。如研究性反应堆功率控制系统、压水堆核电站稳压器的压力控制系统等都是恒值控制系统。

(2) 随动控制系统 在随动控制系统中,控制信号是时间的未知函数,即给定值的变化规律事先是不确定的,要求输出量能够准确、迅速的复现给定值的变化。随动控制系统一般分析和设计的重点是考虑输出量能迅速、准确地跟踪输入量变化,即研究其快速性和准确性。雷达高射炮的角度控制系统必须保证使炮的瞄准目标时刻跟踪目标的飞行位置,而目标的飞行速度和方向是不能预先知道的,所以高射炮的角度控制系统是一个典型的随动控制系统。

(3) 程序控制系统 所谓程序控制系统是指系统的输入信号,按已知的运动规律变化的系统。程序控制系统可以是开环控制系统,也可以是闭环控制系统。对于开环控制的程序控制系统,如果能设法使它既不丢失脉冲,也不受干扰脉冲的影响,同时采用精密的传动,那么开环控制系统就可以达到不低于闭环控制系统所具有的控制精度。例如,在汽轮机自动启动过程中,汽轮机的转速随时间按一定的关系变化要求采用程序控制系统。

2. 按照控制作用与时间的关系分类

控制系统按照控制作用与时间的关系可分为连续控制系统和离散(断续)控制系统。

(1) 连续控制系统 连续控制系统是指输入和输出信号都是时间的连续函数,即模拟量。连续控制系统动态特性用微分方程描述。

(2) 离散控制系统 离散控制系统的主要特点是系统中采用了采样开关或数字计算机。如果采用了采样开关,将连续信号转变为离散的脉冲形式信号,这种控制系统被称为采样控制系统或脉冲控制系统。如果采用的是数字计算机或数字控制器,离散信号是以数码形式传递的,此类系统被称为数字控制系统。如果控制对象的输出和驱动机构的输入是模拟量,在数字控制系统中,要有能将模拟量转换为数字量的模-数转换器(A/D)和能将数字量转换为模拟量的数-模转换器(D/A)。数字控制系统的控制精度高,抗干扰能力强。离散控制系统的动态特性采用差分方程描述。

3. 按自动控制系统的特性分类

按自动控制系统的特性可以把自动控制系统分为线性控制系统和非线性控制系统。

(1) 由常系数线性微分方程式所描述的系统称为线性定常控制系统。实际上,有许多物

理系统的方程式的系数都不是常数,而是自变量时间 t 的函数。由如此变系数线性微分方程式所描述的这类系统,称为变系数线性控制系统。虽然这种系统仍然是一个线性系统,但其分析远比线性定常控制系统复杂得多。组成线性系统的元件都是线性的。线性系统具有两个重要特征,即齐次性和叠加性。所谓齐次性,是指对于任何输入量,当输入量增大 K 倍,输出量也增大 K 倍。所谓叠加性,是指有几个输入量作用于系统,则系统由所有输入量引起的总响应是每一个输入量分别作用于系统引起的响应的总和。当然,在考虑某一个输入量作用于系统的同时,其他所有的输入量作为零来考虑。信号的幅值超过了元件的线性范围,则该系统就不再作为线性系统对待。

(2) 凡是用非线性微分方程式所描述的系统称为非线性控制系统。非线性控制系统不具备叠加性。对于许多非线性控制系统,在有限的工作范围内也可以用线性微分方程式近似描述。

4. 按照系统的输入和输出信号的数量分类

控制系统按照系统的输入和输出信号的数量可分为单输入单输出控制系统和多输入多输出控制系统。

(1) 单输入单输出控制系统 单输入单输出控制系统重点研究系统或对象的一个输出相对一个输入的响应特性。系统可以是单回路的,也可以是多回路的。图 1.2-2 所示为一般的多回路单输入单输出控制系统。

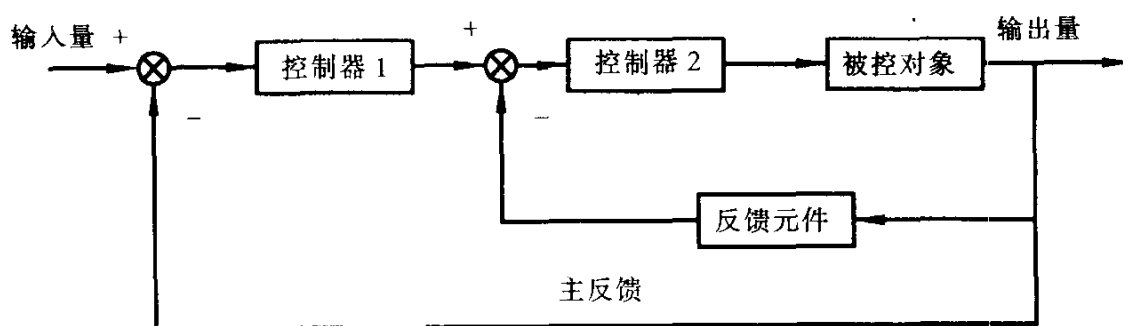


图 1.2-2 多回路单输入单输出控制系统方块图

(2) 多输入多输出控制系统 多输入多输出控制系统中,有多个输入量和多个输出量,而且相互之间耦合。由于这种系统变量多,因此也称为多变量控制系统。实际上,核反应堆或核电厂都是复杂的多变量控制系统。图 1.2-3 所示为一般的多输入多输出控制系统。

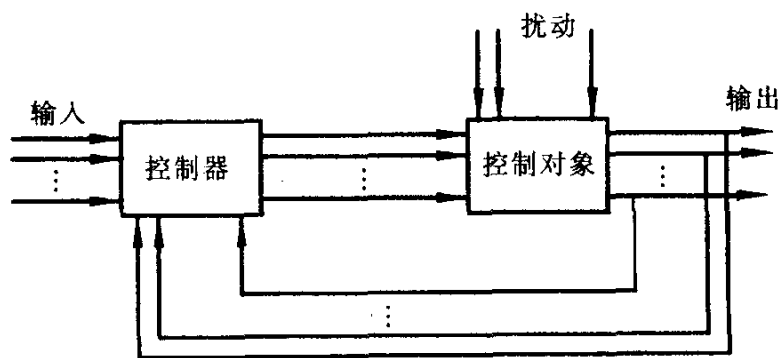


图 1.2-3 多输入多输出控制系统方块图

1.2.3 开环控制系统和闭环控制系统

若系统的输出量对系统的控制作用不发生影响,则称为开环控制系统。换句话说,开环控

制系统是在系统的输出端和输入端之间,不存在反馈回路的系统,如图 1.2-4 所示。开环控制系统的工作原理简单,控制精度差。在控制过程中,对于控制结果可能出现的偏差,系统没有进行自动修正的能力,其精度主要是由校准的精度以及工作过程中各组成元件的参数和特性的稳定程度而定。

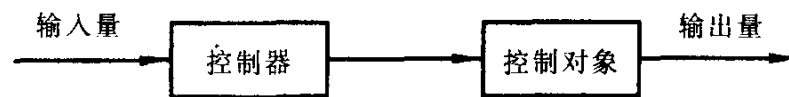


图 1.2-4 开环控制系统方块图

凡系统输出量通过反馈回路对系统的控制作用能产生直接影响,则称为闭环控制系统。闭环控制系统的实质是一个反馈控制系统,如图 1.2-1 所示。输入信号与反馈信号之差 e ,称为偏差信号。偏差检测器中的负号表示负反馈。偏差信号加到控制器上,以减小系统的偏差,使输出量(被控制量)趋于期望的给定值。不论何种原因引起被控制量偏离其给定值而发生偏差时,就一定有相应的控制作用产生,使偏差得以消除。闭环控制系统具有抑制内部和外部各种扰动对系统输出的影响的能力。

闭环控制系统具有如下特征:

- ① 对输出量不断测量,并反馈到输入端,与给定值进行比较,产生偏差信号;
- ② 将偏差信号经控制器运算,产生控制信号,作用于控制对象;
- ③ 控制作用的效果是力图消除偏差,使被控制量尽量地与给定值相符合。

闭环控制系统突出的优点是精度高。闭环控制系统能够抑制被反馈回路所包围的元件参数的变化或由外部干扰所引起被控制量的偏移。闭环控制系统应用更为广泛,例如核电厂中稳压器的压力和液位控制系统、蒸汽发生器液位控制系统等。

在实际应用中,控制对象往往需要高精度的、快速的控制系统。在这种情况下,若采用开环控制系统,它虽有较高的灵敏性和快速性,但它的抗干扰能力很低,不能适应高精度的要求。而闭环控制系统按偏差调节,有较高的精确度,但又难于满足快速性的要求。为此,可以把两者结合起来,采用复合控制系统,既利用了开环控制系统的快速性,又应用了闭环控制系统的精确性。压水堆核电厂模式 G 功率控制系统中,功率补偿棒控制系统是开环控制系统,温度调节棒控制系统为闭环控制系统。开环控制系统只是简单地根据负荷的情况给出功率补偿棒在堆芯的位置,使反应堆功率能快速跟踪负荷的变化。闭环控制系统通过平均温度的偏差对反应堆的功率进行精确的调节。由于功率补偿棒控制系统和温度调节棒控制系统的共同作用,实现了压水堆核电厂功率快速和高精度的调节。

1.2.4 典型输入信号

控制系统的输出响应,不仅取决于系统的结构和参数,而且是与输入信号有关的。为了求得系统的输出响应,输入信号必须是已知的。但是,控制系统的实际输入往往是无法事先准确知道的。为了便于研究和分析各种系统的特性,有必要假定一些基本的典型输入信号。这些信号是比较简单的,但它们具有一定的代表性,足以使我们对系统进行分析。在对各种系统作性能指标的比较时,要选用同一种典型输入信号作为输入,给比较带来极大方便,同时只有把在同一种输入信号下得到的输出响应进行比较才是有意义的。

常用的典型输入信号有以下几种：

1. 脉冲信号

理想单位脉冲信号 $\delta(t)$ 如图 1.2-5(a) 所示, 它的含义为

$$\begin{cases} \delta(t) = \begin{cases} 0 & t \neq 0 \\ \infty & t = 0 \end{cases} \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1 \end{cases} \quad (1.2-1)$$

理想单位脉冲面积积分是 1。如果面积为 A , 脉冲函数就表示为

$$\begin{cases} A\delta(t) = \begin{cases} 0 & t \neq 0 \\ \infty & t = 0 \end{cases} \\ \int_{-\infty}^{+\infty} A\delta(t) dt = A \end{cases} \quad (1.2-2)$$

实际应用中, 理想脉冲是不存在的。经常用一定宽度的实际脉冲近似表示理想脉冲。

2. 阶跃信号

阶跃信号如图 1.2-5(b) 所示, 其数学表达式为

$$r(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ A & t \geq 0 \end{cases} \quad (1.2-3)$$

式中 A 为常数。当 $A=1$ 时, 称它为单位阶跃信号, 记作 $1(t)$ 。单位阶跃信号的一次微分是单位脉冲信号。

3. 斜坡信号

斜坡信号如图 1.2-5(c) 所示, 其数学表达式为

$$r(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ Rt & t \geq 0 \end{cases} \quad (1.2-4)$$

它用来表示随时间匀速变化的输入信号。式中 R 为常数。当 $R=1$ 时, 称为单位斜坡信号。单位斜坡信号的一次微分是单位阶跃信号。

4. 抛物线信号

抛物线(加速度)信号如图 1.2-5(d) 所示, 其数学表达式为

$$r(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \frac{1}{2} Ct^2 & t \geq 0 \end{cases} \quad (1.2-5)$$

式中 C 为加速度增值系数。当 $C=1$ 时, 为单位抛物线信号。单位抛物线信号的一次微分是斜坡信号。

5. 正弦信号

正弦信号的数学表达式为 $r(t) = R \sin \omega t$ 。式中 R 为幅值, ω 为角频率。

1.2.5 对自动控制系统性能的基本要求

由于自动控制系统的目的不同, 所以它们的结构, 控制对象和工作方式各不相同, 对系统具体的性能要求也不一样。但用自动控制理论分析和研究控制系统, 对系统的基本性能有一个共同的要求, 即系统的稳定性、稳态性能和动态性能。

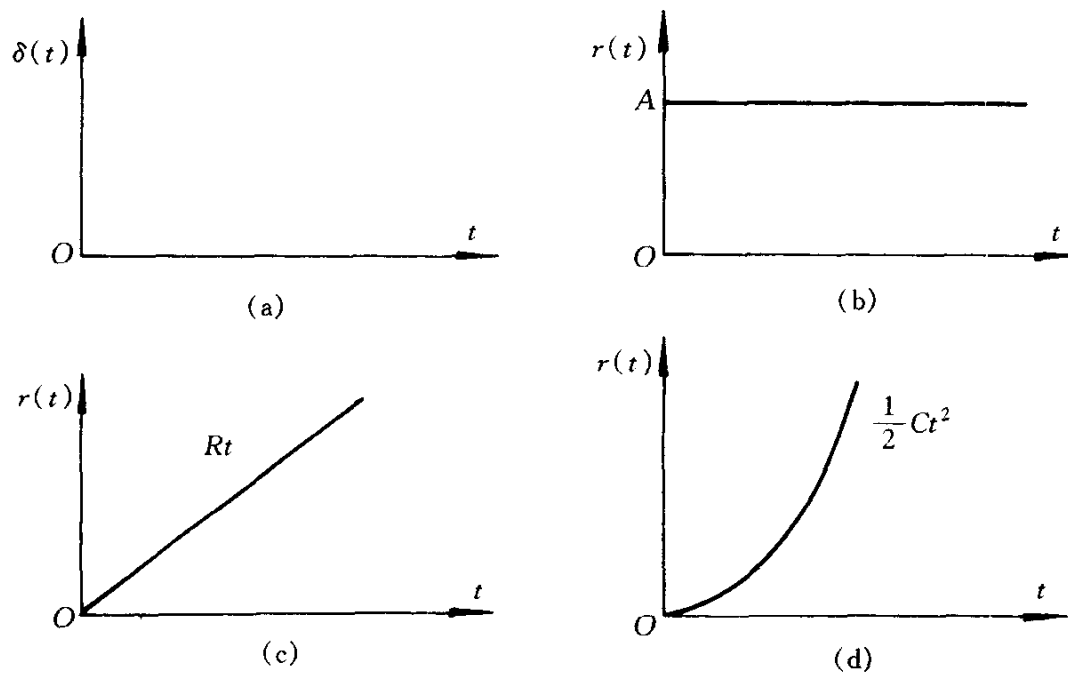


图 1.2-5 典型输入信号

(a) 脉冲信号; (b) 阶跃信号; (c) 斜坡信号; (d) 抛物线信号

1. 稳定性

所谓系统的稳定性是指一个系统如果原来处于平衡状态,由于外界扰动信号的作用,使系统偏离了平衡状态,输出产生了一定的偏差。当扰动消除后,经过一段时间,系统能够回到原来状态,则称该系统是稳定的,否则系统是不稳定的。自动控制系统是否稳定是系统能否工作的前提,是所有控制系统的最低要求,因为不稳定系统是无法工作的。在系统设计中,为了防止系统在工作过程中由于某些参数的变化导致系统出现不稳定状态,自动控制系统必须满足一定的稳定裕度的要求。

2. 稳态特性

稳态特性是描述系统在动态过程结束后,系统的稳定输出相对于输出期望值的偏离程度,通常用稳态误差表示。稳态误差是在稳定状态下衡量控制系统工作性能的重要指标,是控制系统准确度的一种度量。控制系统的稳态特性与系统的结构和物理参数及其输入信号的类型有关。对于同一系统,输入信号的类型不同,其稳态特性也不同。

3. 动态特性

对于稳定的控制系统,在有一个输入信号时就会产生一个相应的输出响应。输出响应包括动态响应和稳态响应。动态响应是指系统从初始状态到达最终状态的响应过程,也称过渡过程。要使控制系统能很好地工作,控制系统仅仅满足稳定性要求是不够的,还必须对其过渡过程的形式和快慢提出要求。控制系统的过渡过程特性称为动态特性。实际应用中,是通过控制系统的动态性能指标来表达控制系统的动态特性的优劣。

控制系统的动态性能指标常以时域指标形式给出,亦称动态响应时域指标。设计一个控制系统,对它的动态响应指标有一定要求,通常要求不仅响应快,而且响应过程要平稳。对于动态特性好的系统受到扰动时,既能很快消除偏差,又能使响应过程不会有太强烈的振荡。

控制系统的动态响应时域指标是以系统对单位阶跃信号输入具有衰减振荡响应的情况来定义的。系统对单位阶跃信号的响应与初始条件有关。为了便于比较各种系统的动态特性,通常情况下是采用初始条件全部为零,即系统最初处于平衡状态,而且输入量和输出量对时间

的各阶导数也为零。

图 1.2-6 给出了系统对单位阶跃信号的动态响应曲线(初始条件全部为零)。下面描述控制系统时域性能指标的定义。

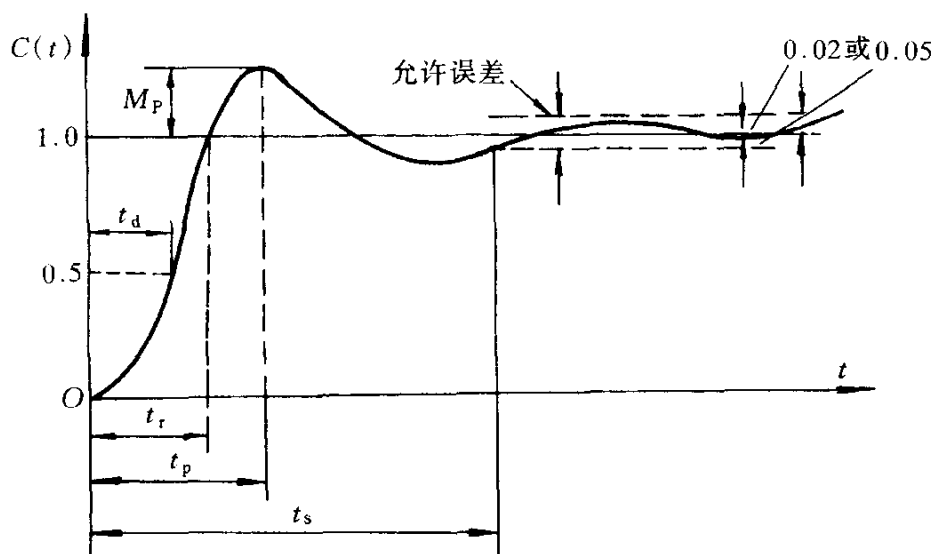


图 1.2-6 单位阶跃输入下系统输出的响应曲线

(1) 延迟时间 t_d 响应曲线第一次达到稳态值的一半所需要的时间。

(2) 上升时间 t_r 对于欠阻尼系统,通常采用从 0 上升到稳态值的 100% 所用的时间;对于过阻尼系统,通常采用从稳态值的 10% 上升到它的 90% 所用的时间。

(3) 峰值时间 t_p 响应曲线达到第一个峰值所需要的时间。

(4) 最大超调量 M_p 用下式定义系统的最大超调量:

$$M_p = \left(\frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \right) \times 100\% \quad (1.2-6)$$

式中 $c(t_p)$ 是输出量在过渡过程中的第一个峰值; $c(\infty)$ 是输出量的稳态值。 M_p 的大小说明了系统过渡过程进行的平稳程度, M_p 愈小愈平稳, M_p 过大将使系统中各元件处于恶劣的工作条件, 且又使系统的调整时间 t_s 延长。

(5) 调整时间 t_s 系统受到扰动或输入信号作用后, 响应曲线进入稳态值的允许误差范围内并永远保持在这一允许误差范围内时, 把响应曲线进入该误差范围所用的时间称为调整时间。 即有

$$|c(t_s) - c(\infty)| \leq \Delta \quad (1.2-7)$$

式中 Δ 是给定的允许误差值, 根据不同系统的不同要求, 通常定为 $0.05c(\infty)$ 或 $0.02c(\infty)$ 。

t_s 大小表明系统从一个稳定状态过渡到另一个稳定状态的快慢程度。 t_s 愈小, 过程进行得愈快, 反之较慢。

上述时域性能指标是非常重要的, 因为大多数控制系统都在时域工作。 应当指出, 当这些时域性能指标给定以后, 响应曲线的形状就可以确定了。 当然在实际应用中, 这些时域性能指标并非在任何情况下都必须全部采用。 例如, 在过阻尼系统中, 就无需采用峰值时间和最大超调量。