

中等专业学校教材

自动控制原理

第三版

西安电力学校 殷树德 编

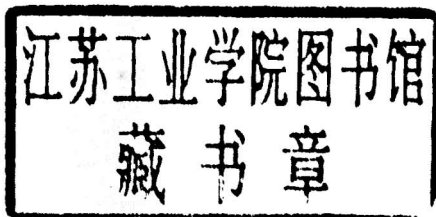


中等专业学校教材

自动控制原理

第三版

西安电力学校 殷树德 编



水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书讲述自动控制的基础理论知识。全书共分七章。第一、二章讲述基础知识，第三、四章针对热工过程控制的特点，对控制对象、控制器、控制过程进行瞬态响应分析，第五章讲述频率响应分析，第六章介绍单回路控制系统的几种整定方法，第七章讲述线性采样系统的基本知识和参数整定。每章末均有小结，并附有思考题及习题。

本书是中等专业学校“电厂热力过程自动化”专业和“热工计量与测试技术”专业的通用教材。也可供电力部门从事热工自动控制工作的技术人员阅读。此外，尚可供化工、冶金、石油、机械部门的中等专业学校相近专业作教学参考书，以及上述部门从事热工自动控制工作的技术人员阅读。

中等专业学校教材

自动控制原理

第三版

西安电力学校 殷树德 编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行，各地新华书店经售

北京市地矿局印刷厂印刷

*

787 × 1092毫米 16开本 17.75印张 399千字

1980年10月第一版 1985年10月第二版

1994年6月第三版 1994年6月北京第五次印刷

印数 39401—44400册

ISBN 7-120-01698-9/T P · 70

定价 8.20 元

第三版前言

本书第三版是根据能源部中电联热动类教研会热自专业组1990年8月杭州会议讨论通过的自动控制原理教材编写提纲编写的。

按照中电联对电力中等专业学校第三轮教材的要求，本书第三版在体系、内容、编写等方面都作了较大调整。贯彻了培养应用型人才，理论密切联系实际，科学性和思想性统一，精选内容，保留《自动调节原理》第二版中合适的内容并反映新技术等指导思想，同时仍保持了前两版强调物理概念，循序渐近，文字通俗易懂的特点。

第二章讲述系统及环节的数学描述，通过大量例子，使学员初步掌握由简单物理系统建立微分方程、传递函数和画方框图的方法；并使学员掌握用拉普拉斯反变换求解微分方程式的方法。力求达到能实际应用的程度。

第三章和第四章主要针对热工过程控制（和检测）的特点进行瞬态响应分析。这些内容与后续专业课及将来的工作实际紧密联系。

控制系统的参数整定，是热工过程控制系统设计和使用中的重要问题。第六章介绍了几种与本书前述内容联系密切的理论整定方法。至于工程整定法将在“热工过程自动控制系统”课中讲述。

热工过程控制很少应用系统校正，而且系统校正与系统整定（加上控制器选型）的内容大同小异，故第三版删去了系统校正一章。

根轨迹法和频率法是在传递函数基础上建立起来的两种分析研究自动控制系统的方法。第三版保留了根轨迹法，并增加了控制系统的根轨迹整定法内容。第五章及第六章中介绍的对数频率特性整定法已包含了频率法的基本内容。删去了《自动调节原理》第二版中闭环系统的频率特性及用频率法估算调节过程两节。

目前，热工过程控制已广泛采用带微处理器的控制器或计算机进行控制。故第七章介绍了线性采样控制系统的基本知识和数字控制器的参数整定。

东南大学陈来九教授对书稿进行了仔细的审阅，提出许多宝贵的意见和建议，对初稿的修改和提高帮助较大。热动类教研会热自专业组的老师们对本课程教学大纲和编写提纲提出了有益的建议。在此，谨向以上诸位同志表示衷心的感谢。

限于编者水平，书中难免有缺点和错误，竭诚欢迎批评指正。

殷树德

1992年3月

第二版前言

本书第一版自1980年发行以来，得到读者的肯定和鼓励。同时，也发现不少有待进一步修订提高的地方。根据1982年水电部部属中专电力学校“电厂热工测量及自动化”专业会议修改并通过的《自动调节原理》教学大纲，编者对本书第一版进行了修订。

修订版保持了第一版强调物理概念、文字通俗易懂的特点。

前四章讲述自动调节原理的基本概念及方法，用时域法（包括6-2节）研究调节对象和调节系统的过渡过程。其中第四章是用时域方法，采用有源校正装置（调节器）对系统进行分析、校正方面的内容。这四章，除新增信号流图一节外，部分内容重新编写，部分章节次序重新编排，与第一版比较，系统性、基本概念更为清晰，重点较为突出。

第五至八章，是用频率法分析和校正系统。在这几章中新增和加深了较多内容，使作为经典控制理论核心的频率法的体系较本书第一版完整，重点和应用更为突出。

第九章根轨迹法是新增内容。除扼要讲述了基本概念及作图法则外，还讲述了用根轨迹法对系统进行校正的方法。

本书由殷树德同志主编。其中，周仁同志编写第一、二、五章，其余为殷树德同志编写。

江西电力学校岳树棠同志对本书进行了审查，提出了许多宝贵意见，对于初稿的修改、提高帮助很大。

编写本书时，参阅了清华大学、东北工学院、华中工学院、哈工大、南京工学院、南京航空学院、西北工业大学、北京航空学院、河北工学院、北京轻工业学院、重庆大学、交通大学、水电部西安热工研究所及华北电力学院等有关同志编写的自动控制原理方面的书籍或讲义。在此，一并致以衷心的感谢。

限于编者水平，且编写时间紧迫，书中难免有缺点和错误，请读者批评指正。

编者

1984年3月

第一版前言

本书是根据电力工业部中等专业学校“电厂热工测量及自动化”专业“教学计划及教学大纲协调会议”所通过的《自动调节原理》教学大纲（草案）编写的，可作为中等专业学校“热自”专业四年制或三年制的教材。

随着火电厂机组朝着大容量、高参数方向发展，对电厂安全、可靠、经济运行的要求愈来愈高，从而对自动调节的要求也日益提高。为了适应电力工业发展的需要，从事“热自”专业的技术人员就有必要加强自动调节的基础理论知识的学习。《自动调节原理》在中专学校“热自”专业中是一门理论性较强、数学概念较深、内容比较抽象的课程。为此，在编写教材时，我们力求做到在加强数学分析的同时，对物理概念力求阐述清楚，用通俗的语言揭示问题的实质，使学生易于接受并加深理解。本书初稿曾在几所兄弟学校的教学中试用。

本书共分八章，由西安电力学校殷树德、周仁同志编写，周仁同志编写第一、二、六章，殷树德同志编写绪论及第三、四、五、七、八章并担任主编。参加审稿的单位有沈阳电力学校（主审）和重庆电力学校。

本书编写过程中，曾得到清华大学、西安交通大学、天津大学、南京工学院、浙江大学、西安热工研究所等单位有关老师的指导，参考并吸收了上述院校及华北电力学校、重庆大学等院校编写的讲义中的部分材料。对此，表示衷心的感谢。

编者水平有限，且编写时间紧迫，书中定会存在不少缺点，诚恳地希望使用本教材的师生及读者批评指正。

编者

1980年2月

目 录

第三版前言	
第二版前言	
第一版前言	
第一章 自动控制概述	1
第一节 自动控制的概	1
第二节 自动控制系统分类	3
第三节 元件与系统的特性	6
第四节 控制系统的性能指标	12
小 结	16
思考题与习题	17
第二章 系统及环节的数学描述	19
第一节 系统微分方程式的建立	19
第二节 拉普拉斯变换	25
第三节 用部分分式法求拉普拉斯反变换	30
第四节 用拉普拉斯变换求解常系数线性微分方程式	37
第五节 传递函数	39
第六节 基本环节	42
第七节 系统的方框图	54
小 结	66
思考题与习题	69
第三章 控制对象及控制器的动态特性	71
第一节 热工控制对象的特点	71
第二节 有自平衡热工控制对象的动态特性	72
第三节 无自平衡热工控制对象的动态特性	82
第四节 控制器的基本控制规律	85
第五节 实现控制器控制规律的基本方法	97
小 结	102
思考题与习题	106
第四章 控制系统的瞬态响应分析	107
第一节 自动控制系统的稳定性及其与特征方程式根的关系	107
第二节 二阶系统	110
第三节 高阶系统	120
第四节 稳定性的代数判据	123
第五节 基本控制系统分析	127
第六节 根轨迹法介绍	144
小 结	156
思考题与习题	158

第五章 频率响应分析	160
第一节 频率特性的概念	160
第二节 频率特性与传递函数的关系	163
第三节 基本环节的频率特性	165
第四节 对数频率特性	173
第五节 基本环节的对数频率特性	176
第六节 稳定性的频率判据	186
第七节 用对数频率特性分析闭环系统的稳定性	194
第八节 开环频率特性与瞬态性能的关系	199
小结	202
思考题与习题	206
第六章 单回路控制系统的整定	208
第一节 概述	208
第二节 闭环系统特征方程式系数整定法	209
第三节 对数频率特性(伯德图)整定法	212
第四节 根轨迹整定法	227
第五节 给定衰减指数整定法	237
小结	243
思考题与习题	244
第七章 线性采样控制系统	246
第一节 线性采样控制系统概述	246
第二节 Z变换	249
第三节 差分方程式	253
第三节 脉冲传递函数	256
第四节 采样控制系统的稳定性	262
第六节 数字控制器的参数整定	268
小结	270
思考题与习题	271
参考文献	273

第一章 自动控制概述

本章介绍自动控制的基本概念,常用术语,自动控制系统的分类,元件或系统的特性,以及控制系统的性能指标,为学习后面章节提供初步概念。

第一节 自动控制的概念

自动控制是指在没有人直接参与的情况下,使被控制的设备或生产过程的工况自动地达到预期效果的一切技术手段。

发电厂热工过程自动控制主要包括下面几个内容:

(1) 自动检测。利用检测仪表自动地检测、显示反映生产过程或设备运行情况的各种参数,以监视生产过程的进行情况和发展趋势;积算和记录参数,为统计、管理提供依据。当参数越限时发出报警信号。事故时追忆事故发生前的参数和状态,供分析、研究用。

(2) 连续控制。生产过程中,不可避免地经常受到各种因素的干扰,使表征生产过程进行情况的参数偏离其希望值,即运行工况偏离了规定工况。这时,通过仪表和设备自动地进行控制操作使运行参数回到其希望值(即设定值)。这种控制称为连续控制,也称为自动调节。

(3) 断续控制。指由开关元件组成的断续控制作用。开关元件只有通和断两种状态,不能连续反映输入信号的变化,因此它能实现的控制必然是断续的。断续控制又称开关量控制。开关量控制在电厂中日益得到重视,主要应用于顺序控制(包括联动控制)、检测报警、热工保护及逻辑监控等。

顺序控制是根据事先拟定的程序和条件,自动地对生产过程进行一系列操作。采用顺序控制可以简化操作步骤,避免误操作,减轻劳动强度,减少运行人员;加快机组启停速率;简化控制盘台,缩小监视面,便于监视和操作。

(4) 自动保护。当设备运行发生严重异常或事故时,自动保护装置发出报警信号,同时采取保护措施(如限制负荷、切换运行方式、自动停机等),以防止事故扩大,保护设备不受破坏及保证人身安全。

本书主要讲述热工自动连续控制(包括采样控制)的经典基础理论,其他内容在有关专业课中讨论。下面通过一个实例说明自动控制的概念及常用术语。

图1-1是锅炉汽包水位人工控制的示意图。为了锅炉及整个单元机组的安全运行,运行中必须保持汽包水位为给定数值(通常在汽包几何中心稍靠下的地方)。但当蒸汽流量、给水流量、锅炉燃烧率等任一因素发生变化时,就会引起汽包水位变化。这时,值班操作员根据水位计的指示值与标尺上的给定值之差(偏差),操作给水控制阀的开度,改变给水流量,使汽包水位回到其给定值。通常,一次操作不能达到预期的效果。每次操作效果

(即给水流量的改变量是否合适)可以从水位表指示值(水位)的变化得知,这就是给操作员的反馈信号。操作员根据水位表指示值与给定值偏差的大小及方向,不断修正给水控制阀的开度,直到最后消除偏差为止。这时,汽包水位控制系统达到一新的平衡状态,控制过程宣告结束。

如果用一套仪器、设备来代替人的作用,就可实现自动控制。仍以图1-1所示的锅炉汽包水位控制为例,改为自动控制后的示意图如图1-2所示。

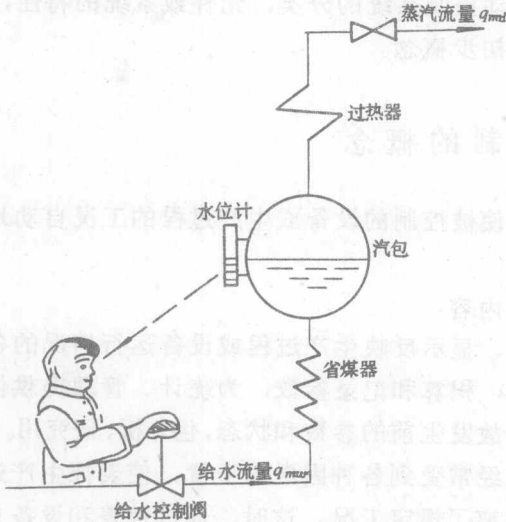


图 1-1 锅炉汽包水位人工控制示意图

汽包水位 h 经测量变送器(相当于人的耳目)测量出来并转换成一定函数关系(通常为比例关系)的电信号 h_1 (电流或电压),与水位给定值 h_g 进行比较,二者之差 ($h_g - h_1$) 送入控制器(相当于人的头脑)。控制器根据偏差的正负及大小,发出一定规律的输出控制信号 T , 指挥执行器(相当于人的手)去操作给水控制阀的开度,改变给水流量 q_{mw} , 从而改变汽包水位。水位的变化由测量变送器测出反馈回来与给定值比较,控制器根据偏差的正负及大小不断校正执行器的动作,直到最后水位等于给定值为止。这时由汽包和控制器等组成的自动反馈控制系统达到一个新的平衡状态,控制过程结束。

为便于研究控制问题,下面介绍几个常用术语。

为便于研究控制问题,下面介绍几个常用术语。

(1) 被控量。表征生产过程是否符合规定工况的物理量,也就是控制作用要维持为给定数值的参数,如图1-2中的汽包水位。

(2) 被控量的给定值。按生产和管理的要求,被控量必须维持的希望值。该值也叫做

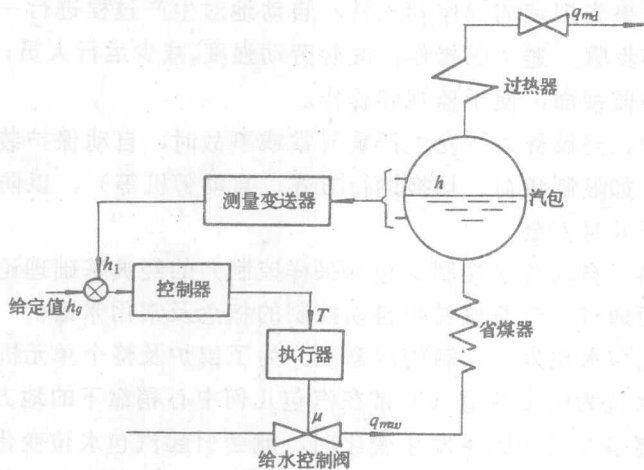


图 1-2 锅炉汽包水位自动控制示意图

设定值、目标值。

(3) 扰动。引起被控量偏离其给定值的各种原因,如图1-2中的蒸汽流量 q_{md} 的变化。控制阀开度的变化是一种控制作用,但广义地说,它也是一种扰动,通常称为基本扰动。

(4) 控制。使过程按预期工况进行所施加的干预。

(5) 控制量。由控制机构(阀门、挡板等)改变的、用以控制被控量变化的物理量(物质流量或能量),如图1-2中的给水流量 q_{mw} 。

(6) 控制对象。被控制的生产过程或设备,简称对象,如图1-2中的汽包(确切说,还应包括给水管道,加热和蒸发受热面,过热受热面等)。由控制量变化到影响被控量变化的途径,叫做对象的控制通道;由外部扰动变化到影响被控量变化的途径叫做对象的扰动通道。

第二节 自动控制系统分类

生产过程及科学技术领域对自动控制系统功能的要求是多种多样的,因而自动控制系统的类型也是多种多样的。为便于研究,通常按工作原理、给定值特征、信号数量、数学描述方法及控制器类型等进行分类。但一个具体控制系统可能几方面的特征都兼而有之。

(一) 按工作原理分类

1. 反馈控制系统

这种控制系统的基本工作原理是根据被控量与其给定值之间的误差(即偏差)进行控制,最后消除误差。简单说就是“按误差控制”。为了取得误差信号,必须要有被控量测量值的反馈信号,从而将系统构成一个闭合回路,如图1-3所示。这种系统也称为闭环控制系统。图1-2所示汽包水位控制系统是反馈控制系统的一例。控制器根据水位与其给定值的误差控制给水流量,以改变水位(以上称为前向通道)。水位测量值反馈回到控制器构成闭环。控制器再根据误差 h_g-h_l 校正给水流量,最后消除误差。

若系统只有被控量测量值反馈一个反馈回路,则称为单回路(反馈)系统。若系统有两个及以上反馈回路,则称为多回路(反馈)系统。

2. 前馈控制系统

这种控制系统的基本工作原理是根据扰动信号进行控制,即利用扰动信号产生的控制作用去补偿(抵消)扰动对被控量的影响。简单说,就是“扰动补偿”。

最简单的前馈控制系统如图1-4所示。扰动 x 是引起被控量 y 变化的原因。当 x 变化时,

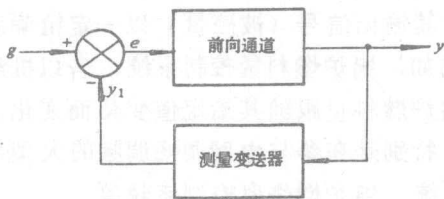


图 1-3 反馈控制系统
⊗—信号相加点; ↓—信号分支点

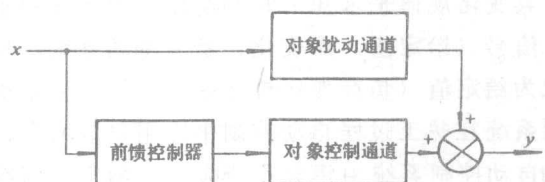


图 1-4 前馈控制系统

一方面通过对象扰动通道去影响被控量 y ；另一方面又通过前馈控制器、对象控制通道去控制被控量，以抵消（补偿）扰动 x 对被控量的影响（两种作用在相加点代数相加）。如果前馈控制器的特性及参数选择合适，则被控量就可保持不变（或基本不变），称为完全补偿（或基本补偿）。在前馈控制系统中，没有被控量的反馈信号，所以系统是不闭合的，属于开环控制系统。

前馈控制的特点是直接根据造成被控量变化的扰动来进行控制的，控制动作快于按误差的控制。这是由于控制对象都具有一定容量，当扰动出现后，要经过一定时间积累，被控量的误差才会增大到使控制器动作。因此，前馈控制可以有效地制止该扰动下被控量的变化。但是，只有当扰动可以测量，而对象的特性准确知道时才能使被控量不变。实际上对象往往有很多扰动，而且有些扰动是不可测量的；此外，对象的特性也不能准确获得。因此前馈控制不能保证稳态时被控量等于给定值。又由于无被控量反馈信号，无法消除误差，所以前馈控制一般不能单独使用。

3. 前馈 - 反馈控制系统

在反馈控制的基础上加入前馈控制，组成前馈 - 反馈控制系统，如图1-5所示。将经常发生的主要扰动（如负荷变化）作为前馈信号组成前馈控制。当此扰动出现后，它快于误差信号，故可实现“超前”控制，有效地制止被控量不变（完全补偿时）或减小被控量的变化幅度（不完全补偿时）。由于系统有反馈控制，因此，前馈控制器的特性和结构可以简单些，只实现近似补偿即可。动态中被控量将不会出现大的误差。反馈控制保证稳态时被控量等于给定值。当未纳入前馈控制的其他扰动出现时，仍由反馈控制消除被控量误差，使稳态时被控量回到给定值。

由于前馈 - 反馈控制效果好，在热工过程自动控制中得到了广泛应用。

（二）按给定值信号的特征分类

1. 定值控制系统

这种控制系统在运行中被控量的给定值保持恒定，被控量的稳态值不变，也保持恒定。这是热工过程自动控制中广泛应用的一种自动控制系统。例如，单机运行时汽轮机的转速控制系统、锅炉汽包水位控制系统及炉膛负压控制系统等。

2. 随动控制系统

这种控制系统的被控量给定值不是预先设定的，而是受某些外来的随机因素控制而变化，其变化规律是未知的的时间函数。此系统要求其输出信号（被控量）以一定精确度跟随输入信号（给定值）而变化，故名随动系统。例如，锅炉燃料量控制系统，若以机组负荷要求为给定值（负荷变化规律是未知的），要求锅炉燃料量跟随其给定值变化而变化。随动控制系统在热工过程自动控制中应用日益增多，特别是在参与电网调峰调频的大型单元机组的自动控制系统中得到广泛应用。如主控制系统、锅炉燃烧率控制系统等。

3. 程序控制系统

这种控制系统的被控量给定值是预定的时间函数。例如，在汽轮机自启动过程中，预

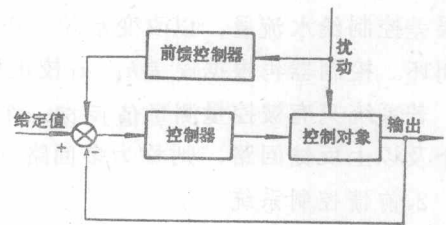


图 1-5 前馈 - 反馈控制系统

先拟定转速给定值随时间变化的规律，要求升速过程中汽轮机的转速按此规律变化。

不论是定值控制系统，还是随动控制系统或程序控制系统，它们的基本原理都是相同的。

(三) 按系统输入和输出信号的数量分类

1. 单输入单输出控制系统

这种系统中的对象只有一个控制输入信号和一个输出信号，系统中只有一个主反馈（从系统输出端引至系统输入端的反馈）回路。但有时为了改善控制系统的性能，还可加局部反馈，如图1-6所示。所以，单输入单输出反馈控制系统可以是单回路的，也可以是多回路的。

2. 多输入多输出控制系统

被控对象有两个或两个以上输入信号和输出信号的系统叫多输入多输出控制系统，如图1-7所示。由于信号（变量）多，且每个输入信号对任一输出信号都有影响，故称为多变量控制系统。例如，锅炉是一个多变量控制对象，因此锅炉自动控制系统便是多变量控制系统。

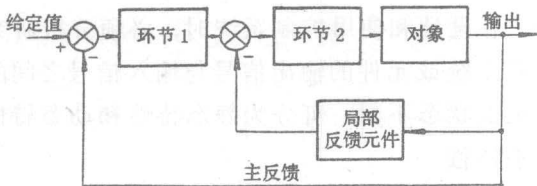


图 1-6 单输入单输出控制系统

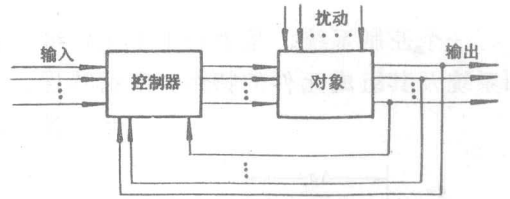


图 1-7 多输入多输出控制系统

(四) 其他分类

自动控制系统还可根据其他特点分类，例如：

1. 时间连续和离散控制系统

当系统中所有信号都是时间的连续函数时，这种系统称为时间连续控制系统。在这种控制系统中被控量被连续地测量，控制器根据被控量与给定值的误差连续地进行控制。采用模拟式控制器的系统都属此类。

当系统中某一处或几处的信号是以脉冲序列或数码的形式传递时，这种系统称为时间离散控制系统。这种控制系统使用脉冲开关或采样开关，将连续的被控量测量信号变为时间上离散的信号，控制器输出时间上离散的控制信号，然后通过保持器变为时间连续信号去控制生产过程。时间离散控制系统常称为采样控制系统。采样控制系统的工作原理与时间连续控制系统基本相同。

2. 线性控制系统和非线性控制系统

可以用线性微分方程式来描述的系统称为线性控制系统。线性微分方程式是指方程中输出函数 $y(t)$ 及其各阶导数都是一次的（无高次项出现）。线性系统可以用拉普拉斯变换、传递函数等数学工具分析研究。系统可以应用叠加原理，即作用于线性系统的几个输入信号的总响应（输出），等于各输入信号单独作用时的响应之和。若线性微分方程中各系数都是常数，例如：

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x$$

式中, a_2, a_1, a_0, b_1, b_0 都是常数, 称为线性定常系统。这是自动控制理论中最常研究的系统。

如果系统中有一个(或以上)非线性元件, 系统就是非线性的。非线性系统用非线性微分方程式描述。非线性微分方程式的输出信号及其各阶导数不都是一次的, 或有的项的系数是输入信号的函数。非线性系统不能应用叠加原理和拉普拉斯变换。因此, 非线性系统的分析研究相当困难, 工程上常在一定工作范围内进行简化, 用线性系统模型来近似非线性系统。

此外, 还有其他的分类方法, 不再一一叙述。热工过程自动控制中最基本的是单回路线性定常反馈控制系统, 应用最多的是前馈-反馈、定值或随动控制系统。

第三节 元件与系统的特性

一个控制系统, 是由若干个元件组成的。在设计和使用控制系统时, 必须分析研究控制系统及其组成元件的特性。所谓特性, 是指系统或元件的输出信号与输入信号之间的关系。按所讨论的状态不同, 可分为静态特性和动态特性。

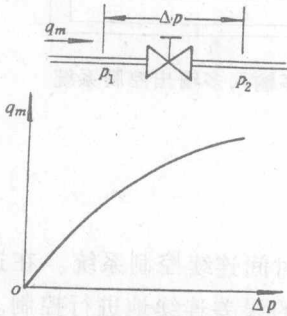


图 1-8 阀门的静态特性

一、静态特性

稳态时, 系统或元件的输入信号和输出信号都不随时间变化, 二者之间的关系称为静态特性(或称稳态特性)。静态特性可用代数方程式表示, 也可用输入和输出信号为轴的直角坐标图上的曲线表示。

下面通过几个例子说明元件或系统的静态特性。

【例 1-1】 图1-8表示安装在管道上的控制阀。其输入信号为阀门前后的压差 $\Delta p = p_1 - p_2$, 输出信号为管道中的流体流量 q_m 。讨论它的静态特性。

解 在阀门开度不变时, 输出信号与输入信号有下列关系:

$$q_m = a \sqrt{\Delta p} \quad (1-1)$$

式中 a ——与阀门局部阻力有关的系数。

式(1-1)就是阀门静态特性的数学表达式。其静态特性曲线如图1-8所示, 它是一条二次曲线。

【例 1-2】 图1-9为测量介质温度的热电偶。输入信号为介质温度 $\theta^\circ\text{C}$, 输出信号为热电偶的电动势 $e\text{mV}$ 。

解 平衡状态时输入与输出之间的关系为

$$e = r\theta \quad (1-2)$$

式中 r ——特性常数, 其值决定于热电偶的种类。

式(1-2)就是热电偶的静态特性数学表达式。如果 r 不随温度而变, 即 $r = \text{常数}$, 则式

(1-2)表示一条直线，如图1-9所示。直线的斜率就是常数 r 。

了解元件的静态特性有重要的意义。首先，不了解元件的静态特性就无法正确地使用它。例如，不了解测量元件的静态特性，就无法用它来测量需要监视或控制的参数。再者，元件的静态特性对系统性能有很大的影响。例如，若控制阀的调节范围很窄，就不能适应控制的要求。因此，要求系统中各元件具有良好的静态特性，是实现自动控制的前提。

下面再举一例说明控制系统的静态特性。

【例 1-3】 汽轮机转速控制系统的原理结构如图1-10所示。以汽轮机功率 P 为输入信号，汽轮机转速 n 为输出信号。讨论它的静态特性。

解 汽轮机转速控制系统的工作过程如下：设比较杠杆2处于图1-10中实线位置 aob 时，整个控制系统处于平衡状态。此时错油门3的两个滑阀正好把油口 c 、 d 盖住，油动机4的活塞不动。设在某时刻电网负荷减小，电网中各并网运行的汽轮发电机组的转速将升高，离心调速器1的飞锤张角增大，将滑环位置由 a 提升到 a' ，比较杠杆 aob 以 b 为支点顺时针转到 $a'b$ 的位置。这时，错油门3的滑阀被向上提起，压力油经油口 c 进入油动机4的上腔，其下腔的油经油口 d 排出至回油管。油动机活塞上下压力差增大，推动活塞下行，关小汽轮机控制汽阀，减小汽轮机功率。当油动机活塞下行 Δz 时，比较杠杆的 b 点下降到 b' ，即比较杠杆以 a' 为瞬时支点由位置 $a'b$ 顺时针转到位置 $a'b'$ 。错油门滑阀重新将上、下油口盖住。如果这时汽轮机的实际功率正好等于电网的负荷要求，则整个控制系统达到一个新的平衡状态（事实上通常要经过2~3次调节才能达到新的稳态）。新平衡状态与初始平衡状态比较，汽轮机的功率减小了，而转速升高了。电网负荷增大的控制过程与上述相反，当达到新平衡状态时转速下降。由此可知，图1-10所示转速控制系统的静态特性是：高负荷低转速，低负荷高转速。即具有向右向下倾斜的静态特性。

汽轮机转速控制系统的静态特性与组成元件的静态特性密切相关。用四象限图能清楚

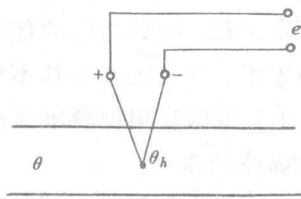


图 1-9 热电偶的静态特性

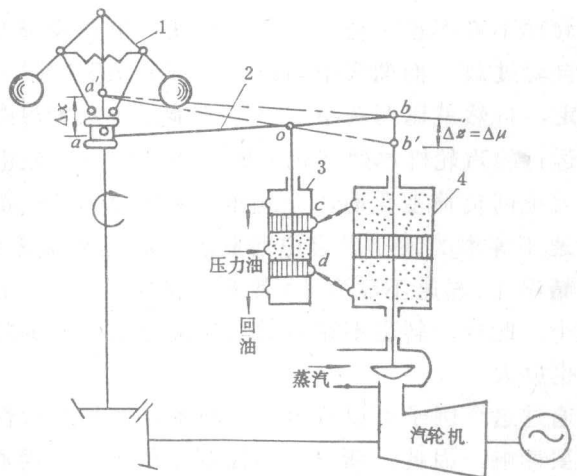


图 1-10 汽轮机转速控制系统的原理结构图

1—离心式调速器；2—比较杠杆；
3—错油门；4—油动机

地表示出这种关系，如图1-11所示。图中第二象限为离心调速器的静态特性，它表示转速与调速器滑环行程之间的关系。第三象限为传动放大机构（杠杆、错油门、油动机）的静态特性，表示调速器滑环行程与油动机（或控制汽阀）行程之间的关系。第四象限为配汽机构的静态特性，表示汽轮机功率与油动机（或控制汽阀）行程之间的关系。根据这三条静态特性曲线，按投影作图的方法（图上 A_3, A_2, A_1 点确定 A 点； B_3, B_2, B_1 点确定 B 点），就可在第一象限内画出汽轮机功率与转速的关系曲线，即汽轮机转速控制系统的静态特性曲线。由此可知，转速控制系统的静态特性取决于组成系统的各元件的静态特性。元件的静态特性一般可通过试验或计算求得。在设计控制系统时，必须使元件的特性满足控制系统静态特性的要求。如果不能满足，就必须修改某些元件的特性。

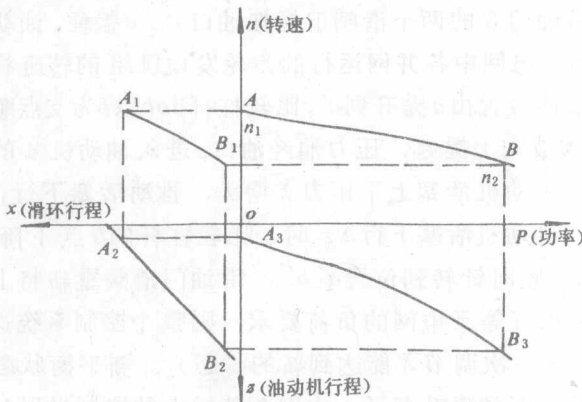


图 1-11 汽轮机转速控制系统的静态特性

由图1-11汽轮机转速控制系统的静态特性线 AB 看出，当汽轮机功率由空载变到满负荷时，其转速由 n_1 下降到 n_2 。通常把转速差 $n_1 - n_2$ 与额定转速 n_0 比值的百分数称为转速控制系统的转速不等率，以 δ 表示，即

$$\delta = \frac{n_1 - n_2}{n_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

一般 δ 的范围为4%~6%，常用 $\delta = 4.5\% \sim 5.5\%$ 。实际上，控制系统的静态特性并非是一条直线，所以

按式(1-3)定义的转速不等率只是一个平均值。实际静态特性曲线在不同区段有不同的斜率，这是为保证汽轮机稳定、安全、经济运行而设计的。在空负荷附近，局部转速不等率可设计得大些，这是为了提高机组在空负荷时的稳定性，以便于机组顺利并网。在额定负荷附近的局部不等率也可适当大些，以使机组在经济工况附近稳定运行，提高运行的经济性且不易自动过载。而曲线中间段（即部分负荷工况）的转速不等率，由于总的平均不等率已被确定，自然就比两头小。但也不能过小（即静态特性线过平），否则在电网频率变动（即并列运行的汽轮机转速变化）时，将会引起汽轮机功率较大幅度的摆动。

当电网负荷变化时，分配给网中每台机组的负荷大小取决于各台汽轮机转速控制系统的转速不等率的大小。当电网负荷变化，电网频率随之变化时，网中并列机组在相同转速变化的情况下，转速不等率小（其静态特性线较平）的负荷变化较大，转速不等率大的负荷变化较小。此外，转速不等率对汽轮机甩负荷时的超速量也有影响， δ 愈大，汽轮机的动态超速也愈大。

通过这个例子可以看出，控制系统的静态特性对机组的安全、经济运行及控制质量都有重要影响。因此，所设计的控制系统静态特性必须满足生产过程的要求。

二、动态特性

在变动状态时，元件或系统的输入信号与输出信号都是时间的函数。这时，一对输入信号与输出信号之间也存在着必然的关系，这个关系就是元件或系统的动态特性。在瞬态

响应分析中，动态特性常用微分方程式、传递函数及阶跃响应曲线表示（详见第二、三章）。在频率响应分析中，动态特性常用频率特性表示（详见第五章）。这些表达方式之间可以互相转化。

热工过程自动控制系统经常受到的扰动是负荷变化。负荷变化是随机性质的。这种情况下，难于用解析方法找出系统输出信号与输入信号之间的动态关系，即难于识别系统的动态特性。为此，通常选定几种确定的函数作为输入信号，以便于得到系统的动态特性及比较不同系统的性能。最常用的典型输入是阶跃函数，其次是斜坡函数、脉冲函数和正弦函数。选用这些函数作为典型输入信号的好处是：

(1) 在现场或实验室中，这些形式的输入信号易于产生；

(2) 对任意形式的输入信号，可看成是由这些典型输入信号叠加组合而成的，根据线性系统的叠加原理，易于得出输出函数；

(3) 典型输入函数的数学表达式简单，便于理论分析计算。

1. 阶跃函数

阶跃函数的数学表达式为

$$x(t) = \begin{cases} 0, & t < t_0; \\ x_0, & t \geq t_0 \end{cases} \quad (1-4)$$

它表示在 $t = t_0$ 时出现幅值为 x_0 的阶跃变化函数，如图1-12所示。实际系统中，如负荷突然增大或减小，给定值突然改变，控制阀突然开大或关小等都可近似看成阶跃函数的形式。

幅值 $x_0 = 1$ 时叫单位阶跃函数，用 $1(t)$ 表示。于是幅值是 x_0 的阶跃函数 $x(t)$ 也可写成 $x(t) = x_0 1(t)$ 。

2. 斜坡函数

斜坡函数的数学表达式为

$$x(t) = \begin{cases} 0, & t < t_0; \\ vt, & t \geq t_0 \end{cases} \quad (1-5)$$

它表示在 $t = t_0$ 时刻开始以等速率 v 变化的函数，如图1-13所示。实际系统中，有时需要对某种信号（如负荷）的变化速率加以限制，将阶跃信号通过限速单元后便得到规定速率的斜坡信号。

$v = 1$ 的斜坡函数叫单位斜坡函数。

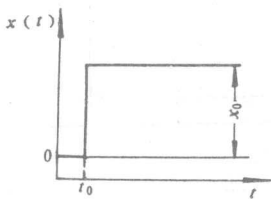


图 1-12 阶跃函数

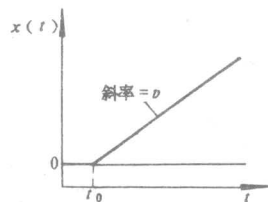


图 1-13 斜坡函数