



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

热工自动控制系统

(第二版)

文群英 主 编
潘汪杰 雷鸣雳 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

热工自动控制系统

(第二版)

主 编 文群英
副主编 潘汪杰 雷鸣雳
编 写 罗红星
主 审 高 伟 方 昆



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书内容共分两篇十章：第一篇（第一～第三章）为自动控制的基本知识，比较全面地介绍了自动控制的基本概念，单回路及复杂回路控制系统的组成、特点、工作原理及调节器参数的整定方法；第二篇（第四～第十章）为火电厂单元机组实际应用的自动控制系统，介绍了单元机组协调控制系统、汽包锅炉自动控制系统、直流锅炉自动控制系统、汽轮机控制系统、炉膛安全监控系统、顺序控制系统、火电厂集中控制和计算机控制系统。

本书可作为高职高专电厂集控运行、热动力设备、检测技术与应用、生产过程自动化技术等专业“热工自动控制系统”及同类课程的教材，也可供有关专业师生及从事热工自动化工作的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

热工自动控制系统/文群英主编. —2 版. —北京：中国电力出版社，2009

教育部职业教育与成人教育司推荐教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 9223 - 3

I. 热… II. 文… III. 火电厂—热力工程—自动控制系统—高等学校：技术学校—教材 IV. TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 128867 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 8 月第一版

2009 年 8 月第二版 2009 年 8 月北京第四次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.25 印张 374 千字

定价 25.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

《教育部职业教育与成人教育司推荐教材 热工自动控制系统（第二版）》在保持了第一版特色的基础上，紧扣高职高专的培养目标，坚持以“应用为主，够用为度，学有所用，用有所学”的定位原则，遵循“拓宽基础、培养能力、重在应用”的宗旨，完成第二次修订任务。

第二版主要调整的内容有：

- （1）第一章增加了自动控制系统的品质指标、阀门和风门挡板的特性试验内容。
- （2）第四章将协调控制的基本控制方式进行了综合整理。
- （3）在第七章汽轮机控制系统应用新实例进行分析说明。
- （4）在第八章炉膛安全监控系统中增加了等离子点火内容。
- （5）将第十章火电厂计算机控制系统的第一节删除，调整了第二节和第三节的内容。

其他章节的内容在原有基础上，尽量删繁就简，加强方法与能力的训练和培养；在分析问题突出主要矛盾和主要问题，忽略次要因素，注重应用性及概念的清晰；贯彻理论与实践相结合，以应用为目的，理论够用的原则，突出高职高专的教学特色。

本书由武汉电力职业技术学院文群英主编，并编写了第四章、第五章、第十章；武汉电力职业技术学院潘汪杰编写了第六章～第八章；西安电力高等专科学校雷鸣雳编写了第一章～第三章；江西电力职业技术学院罗红星编写了第九章。文群英负责全书的统稿工作。

全书由华中科技大学高伟教授和西塞山发电股份有限公司高级工程师方昆主审。编者对主审老师表示深深的谢意。同时，本书在编写过程中还得到了谢援朝副教授、林文孚副教授级高工、彭同明教授等的热心指导，在此一并表示感谢。

由于编写时间仓促，编者水平有限，书中难免有疏漏及不足之处，敬请使用本书的师生及读者批评指正。

编 者

2009.06

第一版前言

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材，是根据教育部审定的电力技术类专业主干课程的教学大纲编写而成的，并列入教育部《2004～2007年职业教育教材开发编写计划》。本书经中国电力教育协会和中国电力出版社组织专家评审，又列为全国电力职业教育规划教材，作为职业教育电力技术类专业教学用书。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标；符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求；具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性；符合职业教育的特点和规律，具有明显的职业教育特色；符合国家有关部门颁发的技术标准。本书既可以作为学历教育教学用书，也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

本书在全面地介绍了自动控制的基本概念，单回路及复杂回路控制系统的组成、特点、工作原理及调节器参数的整定方法的基础上，重点介绍了火电厂有关自动控制系统的构成，并在各章节中都加入了具体实例的分析，力求把生产过程中新技术、新方法和新内容融合到教材中去，并注重实用性和先进性，缩短理论到实践的差距。

本书由武汉电力职业技术学院文群英主编，并编写了第四章、第五章、第十章；武汉电力职业技术学院潘汪杰编写了第六章、第七章、第八章；西安电力高等专科学校雷鸣雳编写了第一章、第二章、第三章；江西电力职业技术学院罗红星编写了第九章。文群英负责全书的统稿工作。

全书由华中科技大学高伟教授和黄石发电股份有限公司高级工程师方昆主审。编者对主审老师对本书付出的心血表示深深的谢意。同时，本书在编写过程中还得到了谢援朝副教授、林文孚副教授级高工、彭同明副教授等的热心指导，在此一并表示感谢。

由于编写时间仓促，编者水平有限，书中难免有疏漏及不足之处，敬请使用本书的师生及读者批评指正。

编 者

2006年4月

目 录

前言

第一版前言

第一篇 自动控制的基本知识

第一章 概论	1
第一节 自动控制的基本概念	1
第二节 热工控制对象的动态特性及其求取方法	6
第三节 调节器的动作规律及其对过渡过程的影响	12
第四节 执行器	14
第五节 测量变送器和调节机构特性及其对调节品质的影响	17
本章小结	19
思考题及习题	20
第二章 单回路控制系统	21
第一节 单回路控制系统的结构	21
第二节 单回路控制系统工作原理分析	22
第三节 单回路控制系统的整定	24
本章小结	28
思考题及习题	28
第三章 复杂控制系统	29
第一节 串级控制系统	29
第二节 前馈-反馈复合控制系统	33
第三节 导前微分控制系统	37
本章小结	39
思考题及习题	40

第二篇 火电厂单元机组自动控制系统

第四章 单元机组协调控制系统	41
第一节 协调控制系统的基本概念	41
第二节 协调控制系统的组成与分析	45
第三节 600MW 机组协调控制系统实例	47
本章小结	58

思考题及习题	59
第五章 汽包锅炉自动控制系统	60
第一节 汽包锅炉给水自动控制系统	60
第二节 汽包锅炉蒸汽温度自动控制系统	76
第三节 燃烧过程自动控制系统	91
本章小结	115
思考题及习题	116
第六章 直流锅炉自动控制系统	118
第一节 直流锅炉控制的任务和特点	118
第二节 直流锅炉的动态特性	120
第三节 直流锅炉基本控制方案	122
第四节 直流锅炉自动控制系统举例	125
本章小结	127
思考题及习题	128
第七章 汽轮机控制系统	129
第一节 概述	129
第二节 汽轮机数字电液控制系统 (DEH)	133
第三节 旁路控制系统	155
本章小结	162
思考题及习题	163
第八章 炉膛安全监控系统	164
第一节 概述	164
第二节 炉膛安全监控系统的控制逻辑分析	174
本章小结	186
思考题及习题	186
第九章 顺序控制系统	188
第一节 概述	188
第二节 顺序控制系统功能组举例	197
本章小结	203
思考题及习题	203
第十章 火电厂计算机控制系统	205
第一节 分散控制系统 (DCS)	205
第二节 现场总线控制系统	226
本章小结	236
思考题及习题	236
附录 SAMA 标准功能图例	237
参考文献	238

第一篇 自动控制的基本知识

第一章 概 论

第一节 自动控制的基本概念

随着科学技术的发展和社会的进步,自动控制在工业生产、航空航天、电力等各领域发挥着更加重要的作用。一般来说,所谓自动控制,是指在没有人直接参与的情况下,通过控制设备使被控对象或生产过程自动地按照预定的规律运行。目前,自动化水平已经成为衡量一个国家生产技术和科学水平先进与否的一项重要指标。尤其在电力生产过程中,电厂热工自动化的地位更为突出,电厂热工自动化水平的高低是衡量电厂生产技术的先进与否和企业现代化的重要标志。

一、热工过程自动控制的发展

热工过程自动控制主要经历了以下几个发展阶段:

(1) 初级阶段:大约在 20 世纪 50 年代,热工生产过程主要是凭生产实践经验,局限于一般的控制元件及机电式控制仪器,采用比较笨重的基地式仪表实现机、炉、电各自独立的局部自动控制。机、炉、电各控制系统之间没有或很少有联系。过程控制的目的是几种热工参数,如温度、压力、流量及液位的定值控制,以保证产品质量和产量的稳定,所应用的理论为古典控制理论。

(2) 仪表化阶段:20 世纪 50 年代末及以后十多年间,先后出现了电动单元组合仪表和巡回检测装置,因而实现了把机、炉作为一个单元整体进行集中控制,仪表盘集中安装进行监视,使机、炉启停运行更为协调,对提高设备效率和强化生产过程有所促进,适应了工业生产设备日益大型化及连续化发展的需要。随着仪表工业的迅速发展,对过程控制及对象特性的认识,对仪表及控制系统的设计计算方法都有了较快的发展,而且随着机组容量的增大,集中控制机、炉又进一步发展为机、炉、电集中控制。此时所用的仪表有电动及组装仪表,所应用的理论为古典控制理论。

(3) 综合自动化阶段:20 世纪 70 年代至今,随着集成电路与计算机技术的迅猛发展,由分散的机组或车间控制,向全车间甚至全企业的综合自动化发展,实现了过程控制最优化与管理调度自动化相结合的分散计算机控制,这是过程控制发展的一个新阶段。对电厂而言,则是把火电厂的生产过程(包括主、辅机,全厂各辅助车间)作为一个整体来进行控制,此时所用的仪表有气动仪表、电动组合仪表、组装仪表及计算机。所用理论基础大多为古典控制理论,少量为现代控制理论。

随着计算机技术的迅速发展,热工过程控制又经历了以下几个计算机控制过程。

(1) 集中型计算机控制:它是用一台计算机对整个生产过程进行整体控制,因此对计算机的可靠性要求很高,一旦计算机出现事故,将使整个生产受到影响。

(2) 分散型计算机控制:随着微机的大批生产,成本的不断降低,逐渐把集中控制改为用微机进行局部控制,克服了集中控制的一些缺点,但此时各系统之间很难协调起来。

(3) 计算机分散控制:它把各系统之间,厂级管理、调度等用一台功能很强的计算机进行上位管理,而把各子系统用微机控制,充分发挥了集中控制和分散控制各自的优点,是一

种比较合理的控制方法。

(4) 现场总线控制：随着网络技术的发展和运用，利用现场总线这一开放的，具有可互操作的网络将现场各控制器及仪表设备互连，构成现场总线控制，同时控制功能彻底下放到现场，降低了安装成本和维护费用。因此，现场总线控制实质是一种开放的、可互操作的、彻底分散的分布式控制系统，有望成为 21 世纪控制系统的主流产品。

二、火电厂热工自动控制的主要内容

火电厂热工自动控制主要包含以下内容。

(1) 自动检测：自动地检查和测量反映生产过程运行情况的各项物理参数、化学量（例如温度、压力、液位、化学成分等）及各项生产设备的工作状态参数，以监视生产过程的运行情况和趋势，称为自动检测。它所使用的检测设备有常规的模拟量仪表、巡回检测数字式仪表，还有计算机图像显示、自动记录、打印和报警装置。

(2) 顺序控制：根据预先拟定的顺序和条件，自动地对设备进行一系列操作，称为顺序控制。顺序控制又称程序控制，在发电厂中主要用于主机或辅机的自动启动和停止，例如汽轮机的自动启停程序控制以及磨煤机的自动启停程序控制等。

(3) 自动保护：在运行参数和设备状态异常或系统局部故障时，自动采取保护措施，以防止故障进一步扩大和避免事故发生，保护生产设备使之不受严重破坏，称为自动保护。例如汽轮机的超速保护、锅炉的超压保护以及发电机的过电压、过电流保护等。

(4) 自动调节：自动地克服干扰影响，维持生产过程在规定的工况下运行，称为自动调节。

生产过程中必须保证产品满足一定的数量和质量要求，同时也要保证生产的安全和经济，这就要求生产过程在预期的工况下运行。然而，生产过程总是由于经常会受到各种因素的干扰和破坏，其运行工况偏离正常情况，必须通过自动调节随时消除各种干扰，保证正常运行。

更为严重的是有时自动控制系统本身也要发生故障，这就要求在设计控制系统时，考虑可能发生的故障，并加以自动保护。因而，现代的自动控制系统常包含有自动保护、自动检测、自动报警、顺序控制等内容。有时，它们有机地组合成一个不可分割的整体，以确保控制系统的安全可靠。

三、电厂热工自动控制系统组成

自动控制是相对人工控制（手动控制）而提出的，要了解自动控制系统的组成，可从人工控制过程的分析入手，下面以火电厂锅炉汽包水位控制为例加以说明。

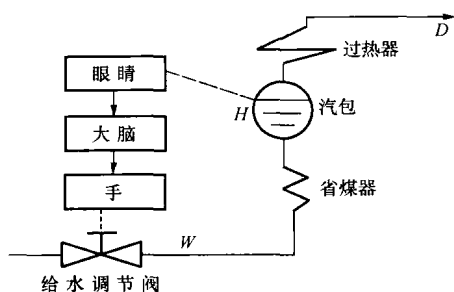


图 1-1 锅炉汽包水位人工控制示意图

在火力发电厂中，锅炉汽包水位控制的主要任务是维持汽包水位始终稳定在一定的范围内，从而保障锅炉安全运行。

1. 锅炉汽包水位人工控制系统

图 1-1 所示为火电厂锅炉汽包水位人工控制系统。在人工控制系统中，操作人员主要通过眼睛观察汽包水位，获取信息，感知汽包的水位值；大脑对眼睛所观察到的水位值进行逻辑思维判断，将实际水位值 H 与所期望的汽包水位值 H_0 进行

比较,求取偏差,根据偏差的大小发出指令信号;手根据大脑给出的指令信号按一定的规律操作阀门,对汽包水位进行调节。

可见,在人工控制系统中,运行人员的眼、大脑、手分别承担着不同的任务,三个器官相互配合,共同完成水位控制任务。其原理方框图如图 1-2 所示。图中:眼睛——观察汽包水位值,获取信息;大脑——将获取到的信号与给定值进行比较,进行逻辑思维判断,发出操作指令信号;手——根据大脑发出的指令信号,对阀门进行操作,调节汽包水位值。

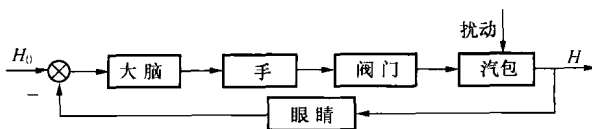


图 1-2 锅炉汽包水位人工控制原理方框图

2. 锅炉汽包水位自动控制系统

用自动控制设备和仪表分别代替人工控制系统中运行人员的眼、大脑、手,就构成自动控制系统。

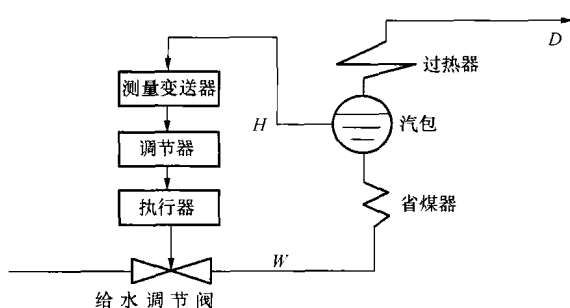


图 1-3 锅炉汽包水位自动控制示意图

转换成统一的电信号;

(2) 调节器(控制器):对测量变送器的输出信号与被控参数给定值的差值信号进行运算,输出控制指令信号给执行器;

(3) 执行器:根据调节器输出的控制指令信号去对调节机构(如阀门)进行调节;

(4) 被控对象:被控制的热工生产过程或设备(如汽包等)。

通过上述实例可以概括出自动控制中的一些常用术语。

(1) 被控量:表征生产过程是否符合要求而需要加以控制的物理量,也叫被控参数(如锅炉汽包水位控制系统中的汽包水位)。

(2) 给定值:按生产要求被控量必须维持的希望值,简称给定值。

(3) 调节量:由控制作用来改变并对被控量进行调节的物理量(如锅炉汽包水位控制系统中的给水流量)。

(4) 调节机构:根据控制作用对调节量进行改变的具体设备(如锅炉汽包水位控制系统中的给水调节阀)。

(5) 扰动:引起被控量偏离其给定值的各种原因称为扰动。不包括在控制回路内部(如外界负荷)的扰动,称为外扰。发生在控制回路内部的扰动,称为内扰。其中,由于调节机

锅炉汽包水位自动控制系统示意图如图 1-3 所示,原理框图如图 1-4 所示。图中:测量变送器——代替人眼;调节器——代替人脑;执行器——代替人手。

通过对以上实例的分析可见,一个完整的自动控制系统主要由以下几部分组成:

(1) 测量变送器:对现场的被控参数(如汽包水位)进行测量,并将测量信号

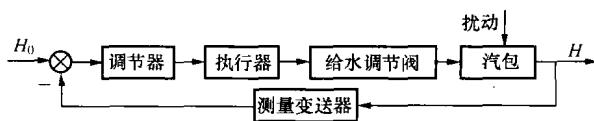


图 1-4 锅炉汽包水位自动控制原理方框图

构开度变化造成的扰动,称为基本扰动。变更控制器的给定值的扰动称为定值扰动,有时也称控制作用扰动。

四、电厂热工自动控制系统分类

根据不同的应用需要,通常可将自动控制系统按以下方式进行分类。

1. 按控制系统所采用的控制方式进行划分

(1) 开环控制系统:开环控制系统也叫前馈控制系统,是控制设备和控制对象在信号关系上没有形成闭合回路的控制系统,即被控量没有反馈到控制设备的输入端。该系统的特点是根据扰动大小对被控量进行控制,控制作用及时,结构简单,但控制精确度差,只能克服单一扰动。

(2) 闭环控制系统:闭环控制系统也称为反馈控制系统,是将被控量反馈到控制设备的输入端,形成反馈回路的控制系统。与前馈控制系统相比,该系统的特点是根据被控量与给定量之间的偏差进行控制,控制精确度高,可以克服各种扰动对被调节量的影响,但由于控制作用落后于干扰,因而控制不及时。

(3) 复合控制系统:复合控制系统也称为前馈-反馈复合控制系统,是由开环控制和闭环控制组合而成的一种控制系统。

2. 按控制系统中所包含的闭合回路数目进行划分

(1) 单回路控制系统:单回路控制系统是指系统中只有一个闭合回路,即是将被控量反馈到控制设备的输入端形成的闭合回路。

(2) 多回路控制系统:多回路控制系统是指系统中存在两个或者两个以上闭合回路,例如后面介绍的串级控制系统和导前微分控制系统就是双回路控制系统。

3. 按控制系统的给定值进行划分

(1) 定值控制系统:控制系统中,若送入控制设备输入端的被控量的给定值为常数,且不随时间发生变化,则称这样的系统为定值控制系统。电厂中常见的热工控制系统多为定值控制系统,例如主汽温度控制系统、汽包水位控制系统都是定值控制系统。

(2) 随动控制系统:控制系统中,若送入控制设备输入端的被控量的给定值随时间发生变化,且变化规律是事先无法确定的,则称这样的系统为随动控制系统。

(3) 程序控制系统:控制系统中,若送入控制设备输入端的被控量的给定值随时间发生变化,且变化规律是事先确定的,则称这样的系统为程序控制系统。

五、自动控制系统的品质指标

1. 调节品质指标的确定

对任何一个设计并安装完成的自动控制系统,都希望它能具有良好的工作质量。如何来判断一个控制系统的工作好坏呢?最直观的方法是看系统受到扰动作用后,被控量随时间而变化的状况——控制过程。因为一个原来处于平衡状态的调节对象,一旦受到扰动作用,被控量就会偏离规定值。这时,要通过自动控制作用才能使被控量重新稳定并回到规定值。这一过程称为调节过程,调节过程可直接反映了控制系统工作的好坏。

显然,一个控制系统在不同形式和幅度的扰动作用下,其调节过程是不一样的。在实际生产过程中可能遇到的扰动形式是多种多样的,为了比较调节工作品质的好坏,分析系统工作品质能否满足生产过程的要求,通常要选定一种最典型或最经常出现的扰动形式,作为研究控制系统工作品质的标准输入信号。在热工过程自动控制中,最常用的是单位阶跃输入。

闭环控制系统在阶跃扰动作用下,被控量的调节过程可能有图 1-5 所示的几种不同形状。其中 (a)、(b)、(c) 三种过程中,被控量最后能重新达到平衡。这新的平衡状态的被控量数值,可能就是扰动前的数值,也可能是一个新的数值。具有这种调节过程的系统是稳定的。图 (a) 是单调变化的非周期过程,图 (b) 是有单峰值的非周期过程,图 (c) 是衰减振荡过程,图 (d) 是等幅振荡过程。控制系统受扰动作用后不能达到新的平衡,被控量和调节作用都作等幅振荡,这种情况称为“边界稳定”,图 (e) 为扩大振荡发散过程。控制系统受扰动作用后,不但不能达到新的平衡,而且偏差时正时负,振幅越来越大,直到发生破坏作用或受到限幅保护装置的干涉为止,这种控制系统是不稳定的。

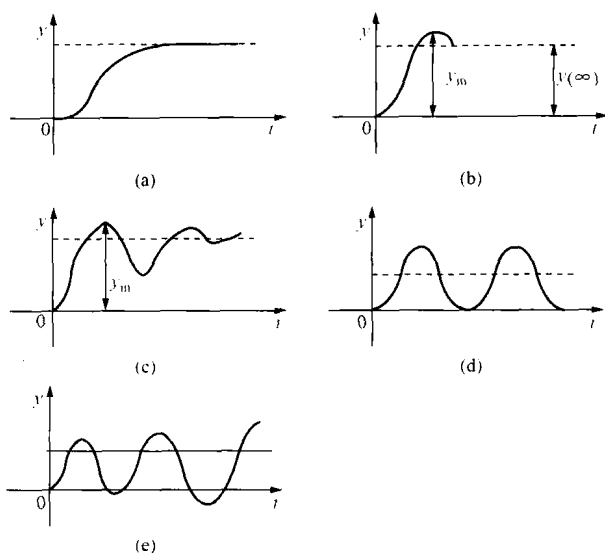


图 1-5 几种典型的控制过程曲线

- (a) 单调变化的非周期过程; (b) 有单峰值的非周期过程;
(c) 衰减振荡过程; (d) 等幅振荡过程;
(e) 扩大振荡发散过程

从生产过程的要求来看,希望自动控制系统能随时保持被控量和规定值相等,不受任何扰动的影响。实际上调节过程中被控量总是要发生变化,产生偏差。那么怎样来衡量一个调节过程(即控制系统工作品质)的好坏呢?一般从三个方面,即稳定性、准确性和快速性来衡量。

(1) 稳定性。调节过程的稳定性是对控制系统最基本的要求。不稳定的系统在生产上是不能采用的;边界稳定的系统一般也不能符合生产的要求(只有在个别情况下可以允许有振幅不大、频率不高的持续振荡);只有稳定的系统才能完成正常的调节任务。在实际生产过程中,不但要求系统是稳定的,而且还要求有一定的“稳定性裕度”,以保证在每次调节过程中振荡次数不致过多(2~3次)。

衰减率 ψ 是判定控制系统稳定性的主要指标,检验一个调节过程的品质,用衰减率比较形象和直观,也能方便地从响应特性曲线上得到它的数值,如图 1-5 (c) 所示:

$$\psi = \frac{y_1 - y_2}{y_1}$$

热工控制对象的调节过程的衰减率通常选择 $\psi = 0.75 \sim 0.9$ 。

(2) 准确性。准确性是指被控量偏差的大小,它包括动态偏差 y_m 和静态偏差 $y(\infty)$ [见图 1-5 (c)]。

动态偏差 y_m 是指调节过程中被控量偏离规定值的最大偏差值。通常要求控制系统保证被控量的动态偏差,即指在可能出现的最大扰动作用下,也不超过生产过程所允许的变化范围。

静态偏差 $y(\infty)$ 是指调节过程结束后被控量的残余偏差。最大静态偏差往往出现在负荷变动幅度最大的时候(如由满负荷跌到最低负荷)。一般应使最大静态偏差不超过生产所允

许的变动范围。但有时为了提高生产设备对变动负荷的适应能力，有意造成静态偏差（即不同负荷下被控量保持不同的稳定值）。

（3）快速性。快速性是指调节过程持续时间的长短。一般希望尽可能短，以保证下一次扰动发生之前，这次扰动所引起的调节过程已经结束。

不同的生产过程，对这三方面的要求和排列主次地位是不同的，对于一个控制系统同时要求这三方面都达到很高的质量往往是困难的，也是不必要的。一般总是首先满足稳定性要求，再兼顾到准确性和快速性。

应当指出，对控制系统除了上述三方面基本要求之外，还应使它满足与运行条件有关的其他一些要求，例如有些生产过程对被控量的变化速度有一定限制，有的对调节作用的变化速度（开、关速度）和动作方式有一定限制等。这些限制条件对控制系统的工作往往有重大的影响。

2. 模拟量控制系统试验指标

（1）投入运行的模拟量控制系统应定期做扰动试验。扰动试验分为内扰试验和外扰试验。除定期试验外，出现下列情况时也应做扰动试验。

- 1) 设备大修；
- 2) 控制策略变动；
- 3) 调节参数有较大修改；
- 4) 模拟量控制系统发生异常。

（2）试验前应编写试验措施，经审批后方可执行；试验结束后，应填写试验报告；试验结果如达不到规定的调节品质要求，应分析原因，提出解决对策。

（3）内扰试验（包括定值扰动）。内扰试验应在 70% 负荷以上进行，扰动量宜为被调介质满量程的 10%。调节过程衰减率应在 0.7~0.9，被调节量的峰值不应达到保护动作值（对于主蒸汽压力和负荷控制系统，衰减率应在 0.9~0.95）。

（4）评价标准。机组主要参数变化范围见表 1-1。

表 1-1 机组主要参数变化范围

负荷状态	给定负荷变化速率		
	稳态 ($<3\%P_e/\text{min}$)	慢速变化 ($3\%P_e/\text{min}$)	快速变化 ($5\%P_e/\text{min}$)
主汽压力 (MPa)	± 0.3	± 0.5	± 0.8
汽包水位 (mm)	± 25	± 40	± 60
新蒸汽温度 ($^{\circ}\text{C}$)	± 4	± 8	± 10
在热汽温度 ($^{\circ}\text{C}$)	± 5	± 10	± 12
炉膛压力 (Pa)	± 100	± 200	± 250

第二节 热工控制对象的动态特性及其求取方法

控制系统主要由控制对象和控制设备组成。只有熟悉现场中控制对象的特性，才能很好地选择并确定相应的控制规律，完成对被控量的控制。因而，控制对象和控制设备的动态特性分析是控制系统的一个非常重要的基础内容。本节就控制对象的动态特性展开讨论，关于

控制设备的有关内容在下节讲述。

一、控制对象的基本概念

控制对象也叫被控对象，是指现场中被控制的生产过程或设备，例如电厂主汽温度控制系统中的控制对象是过热器；给水控制系统中的控制对象是锅炉汽水系统的生产过程。

(一) 控制对象的分类

通常，可以按以下两种方法对现场中的控制对象进行分类：

(1) 依控制对象有无自平衡能力划分，可分为有自平衡能力被控对象和无自平衡能力被控对象。

自平衡能力是指对象在受到扰动后，仅依靠自身能力而不依靠任何外加的调节作用就能使被控量趋于某一稳定值的能力。

1) 有自平衡能力被控对象。有自平衡能力的被控对象称为有自平衡能力被控对象，简称有自平衡对象，图 1-6 所示水箱就是一个有自平衡对象，该对象具有自平衡能力。

若设水箱水位 H 为该被控对象的被控量，假设水箱在 $t = t_0$ 时刻以前处于平衡状态，即水箱的流入量等于流出量， $q_i = q_o$ ；水箱水位等于恒定值， $H = H_0$ 。在 $t = t_0$ 时刻流入量突然增加，导致水箱水位升高，使得水箱底部所承受的压力增加，从而导致调节阀 2 前后差压增加，流出量 q_o 变大，流出量 q_o 的增加又影响水位上升的速度，使得水位增加的速度降低，是一个负反馈作用，这样，经过一段时间的自调整，水箱水位又重新达到某一稳定值。可见，水箱具有自平衡的能力。

2) 无自平衡能力被控对象。无自平衡能力的被控对象称为无自平衡能力被控对象，简称无自平衡对象。无自平衡对象在受到扰动后，其被控量不能依靠自身能力趋于某一稳定值，必须借助外加的调节作用才能恢复到稳定值，例如图 1-7 所示水箱就是一个无自平衡对象，该对象无自平衡能力。

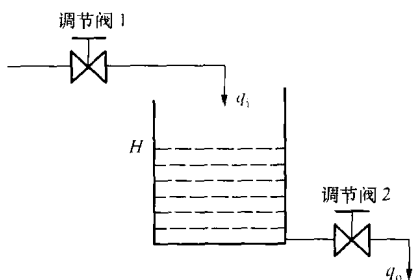


图 1-6 有自平衡能力控制对象举例

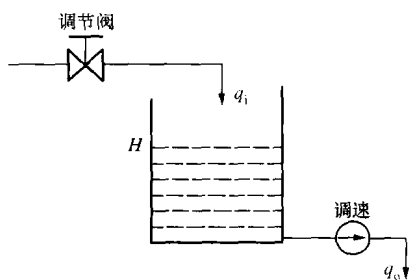


图 1-7 无自平衡能力控制对象举例

若设水箱水位 H 为该被控对象的被控量，假设水箱在 $t = t_0$ 时刻以前处于平衡状态，即水箱的流入量等于流出量， $q_i = q_o$ ；水箱水位等于恒定值， $H = H_0$ 。在 $t = t_0$ 时刻流入量突然增加，导致水箱水位升高，这时，水箱水位升高也使得水箱底部承受压力增加，但流出量由调速泵决定，不受水箱底部压力变化的影响，因而流出量仍为定值，不发生变化。如此，水箱水位将会持续上升，再也不可能稳定下来。可见，水箱水位不断升高，无法恢复到稳定值，对象无自平衡能力，是无自平衡对象。

(2) 依控制对象包含容积的数目多少划分，可分为单容被控对象和多容被控对象。

1) 单容被控对象。单容被控对象比较简单，被控对象只包含一个容积，图 1-6、图

1-7所示对象均为单容被控对象。

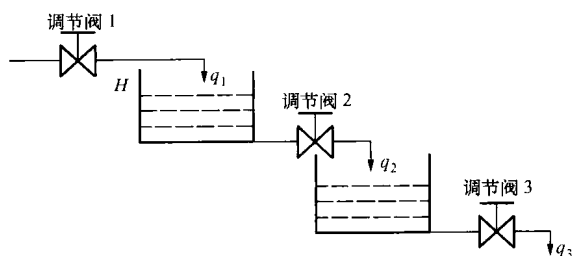


图 1-8 双容被控对象

2) 多容被控对象。多容被控对象相对来说比较复杂,被控对象包含两个或两个以上容积,图 1-8 所示被控对象为由水箱构成的双容被控对象。

在热工现场中,被控对象通常是从有无自平衡能力和包含容积数目的多少两个方面同时进行考虑的,因而就有单容有自平衡控制对象、多容有自平衡控制对象、单容无自平衡控制对象和多容无自平衡控制对象四类。它们的传递函数以及单位阶跃响应曲线如表 1-2 所示。

表 1-2

被控对象的数学模型及动态特性

对象类别	传递函数	单位阶跃响应曲线
单容有自平衡能力被控对象	$W(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{k}{Ts+1}$ 式中 k—单容被控对象的比例系数; T—单容被控对象的时间常数。	
单容无自平衡能力被控对象	$W(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Tas}$ 式中 Ta—单容无自平衡对象的时间常数(积分时间)。	
多容有自平衡能力被控对象	$W(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{k}{(Ts+1)^n} \approx \frac{k}{Ts+1} e^{-\sigma}$ 其中 $n \approx 24 \times \frac{0.12 + \tau/T_c}{2.93 - \tau/T_c}$ $T \approx \frac{\tau + 0.5T_c}{n - 0.35}$ 式中 k—被控对象的比例系数; T—多容被控对象的惯性时间常数; n—多容被控对象的容积数目; τ—迟延时间。	
多容无自平衡能力被控对象	$W(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ta s (Ts+1)^n} \approx \frac{1}{Ta s} e^{-\sigma}$ 其中 $Ta = \frac{1}{0H\tau}$ $n = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{0H}{c(\tau)} \right]^2 - \frac{1}{6}$ 式中 Ta—积分时间; T—多容被控对象的惯性时间常数, $T = \frac{1}{n}\tau$; n—多容被控对象的惯性环节数目; τ—迟延时间。	

由表 1-2 可知,热工对象具有以下特点:被控量的变化大多是不振荡的;被控量在干扰发生的开始阶段有迟延和惯性;在响应曲线的最后阶段,被控量可能达到一个新的平衡态

(有自平衡能力的被控对象),也可能不断变化而无法进入平衡态(无自平衡能力的被控对象)。

(二) 影响对象动态特性的特征参数

在热工生产过程中,描述对象动态特性的主要特征参数有容量系数、阻力和传递迟延。容量系数、阻力和传递迟延表征大多数对象所共有的结构性质。

1. 容量系数

大家都知道,电容器可以储存电荷,水箱可以储存水,也就是说,电容和水箱具有储存物质(能量)的能力,同样,热工生产过程中大多数对象也具有储存物质(能量)的能力。通常用容量系数来衡量对象储存物质(能量)的能力。下面通过一个具体的例子讲解容量系数的含义。

单容水箱如图 1-6 所示,设流入水箱的流量为 q_i ,流出水箱的流量为 q_o 。某一时刻 $q_i = q_o$,水箱的水位 H 稳定在某一值,此时有某种原因使得 $q_i \neq q_o$,水箱内储存的水量 G 就要发生变化,这种变化导致水箱的水位 H 发生变化。可以用数学关系式描述:

$$dG = (q_i - q_o)dt \quad (1-1)$$

$$q_i - q_o = C \frac{dH}{dt} \quad (1-2)$$

式中 C ——比例系数。

由式 (1-1) 可求得 $q_i - q_o = \frac{dG}{dt}$,代入式 (1-2) 可得

$$C = \frac{dG}{dH} \quad (1-3)$$

上式表明,比例系数 C 是水箱水位变化一个单位时需要水箱储存水量的变化量,称为水箱的容量系数。若水箱的截面积为 A ,则水箱储存水量的变化量为 $dG = AdH$,可求得水箱的容量系数是 A ,即 $C = A$ 。显然,水箱的截面积越大,在同样大小的不平衡流量作用下,水位变化的速度就越小,即抵抗扰动的能力就越强,容量系数描述了对象抵抗扰动的能力。

2. 阻力

在电路中,电流进行流动时会受到电阻的阻力,电阻表征了电路中阻力的大小,可以用下式计算电流流经电阻时所受到的阻力:

$$R = \frac{dU}{dI} \quad (1-4)$$

流体在管路中流动会受到阀门等给予的阻力,就是说,物质(或能量)在传输过程中总是要遇到大或小的阻力,因此需给予推动物质(或能量)流动的压差(如电位差、水位差、温度差等)。那么对于图 1-6 所示的水箱来说,当流出侧调节阀 2 开度为定值时,流出量 q_o 的大小就取决于水箱水位的高低,也就是说,水箱水位越高,则水箱中的水对箱底产生的压力就越大,调节阀 2 前后的压差就越大,因而流量就越大。可以用下式描述调节阀 2 的阻力 R 、水箱水位 H 和流量 q 之间的关系:

$$R = \frac{dH}{dq} \quad (1-5)$$

3. 传递迟延

传递迟延是指被控量变化的时刻滞后于引起被控量发生变化的扰动发生的时刻,将这种时间上的滞后现象称为对象的传递迟延。传递迟延用迟延时间描述,迟延时间越长,说明对

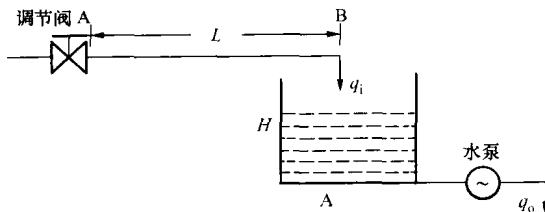


图 1-9 传递迟延举例

象的传递迟延越严重。例如汽包水位控制系统中，给水调节阀开度发生变化使得给水量变化到对汽包水位产生影响就存在传递迟延，迟延时间的长短与给水管道的特性有关。图 1-9 所示水箱系统中，流入侧管道有一定的长度，即从调节阀（图中 A 点）到水管出口（图中 B 点）存在一定的管长

L ，这就使得在调节阀动作的同时，流入水箱的流量 q_i 并不能同时发生变化，而是要在时间上滞后一段时间 τ 后才能发生变化，滞后时间 $\tau=L/v$ (v 为水的平均流速)。

传递迟延的存在使得对象惯性增大，从而对控制系统的控制性能产生不利的影响。在控制系统的设计时要充分考虑到这一点。

二、热工对象传递函数的近似求取

获取热工对象的数学模型是进行控制系统设计的先决条件，只有得到被控对象的数学模型，才能分析对象的动态特性，进而设计出合理的控制系统。通常将获取对象数学模型的过程称为建模。常用的建模方法有两种，即理论建模法和实验建模法。理论建模主要是通过对象机理的分析，并在一定的假设条件下求出其动态方程，然后进行线性化处理。该方法比较复杂，一般只用于描述新研制对象的动态特性。对于热工被控对象，较多的采用实验的方法测定其动态特性，然后根据其动态特性求取其数学模型，这也是工程中常用的行之有效的方法。

目前应用较多的是阶跃响应曲线法，求取对象阶跃响应曲线的实验框图如图 1-10 所示，即当对象处于稳定状态时，在对象的输入端人为地加入阶跃扰动输入信号，同时观察被控量的响应特性曲线，然后由该曲线求出被控对象的传递函数。

在利用阶跃响应曲线法求对象传递函数时，必须清楚对象内部存在两路基本通道，一路是调节作用和调节量之间的信息通道，称为调节通道，其传递函数用 $W_{ob}(s)$ 表示；另一路是扰动和被控量之间的信息通道，称为扰动通道，其传递函数用 $W_n(s)$ 表示。若对象存在多个扰动，那么将存在多个扰动通道（如图 1-11 所示）。显然，被控对象可以看作是一个多输入、单输出的复杂系统，当选择不同的输入信号时，被控对象的传递函数表达式是不同的，这就要求在进行试验前，必须确定求取的是哪一个信号输入作用下的阶跃响应曲线。

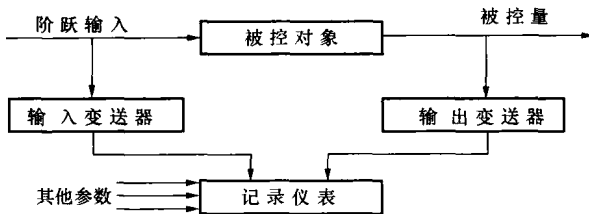


图 1-10 求取对象阶跃响应曲线实验框图

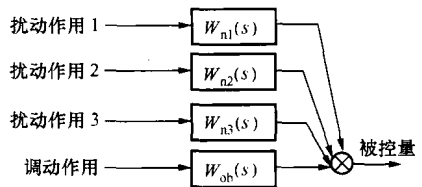


图 1-11 多扰动作用的对象

由阶跃响应曲线求取对象的近似传递函数有切线法、两点法、半对数法等多种方法，每种方法都具有各自的特点，应根据实际情况使用。限于篇幅，在这里简单介绍切线法求对象的近似传递函数，具体求法如表 1-3~表 1-5 所示。