

大型火电厂生产技术人员培训系列教材

火电厂过程控制

张栾英 孙万云 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

188417

TM621.6

Z138

大型火电厂生产技术人员培训系列教材

火电厂过程控制

张栾英 孙万云 编著

中国电力出版社
www.cepp.com.cn



内 容 提 要

本书围绕火力发电厂大型单元机组自动控制全面介绍机、炉协调控制系统，锅炉燃烧控制系统，汽温控制系统，给水控制系统以及汽轮机旁路控制系统。全书一方面基于物理概念阐述火电厂过程控制的本质和特点，另一方面又基于控制系统理论介绍了系统设计与分析的基本方法。全书分8章，附录部分为工程整定方法。

本书作为从事火力发电过程控制的工程技术人员的培训教材，也可作为高等学校自动化专业的专业课教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

火电厂过程控制/张栾英，孙万云编著. —北京：中国电力出版社，2000.6

大型火电厂生产技术人员培训系列教材

ISBN 7-5083-0290-7

I. 火… II. ①张…②孙… III. 火电厂-过程控制-技术培训-教材 IV. TM62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 06119 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京梨园彩印厂印刷

各地新华书店经售

*

2000年7月第一版 2000年7月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 10.25印张 230千字

印数0001—5000册 定价 20.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换)

序 言

随着科学技术的迅速发展,新技术、新材料、新工艺不断涌现并得到应用。电力生产是技术高度密集型产业,伴随科学技术及电力工业的发展,现代化电力生产也朝着“大容量、高参数、高自动化”的方向快速发展。快速发展的电力技术对电力生产技术人员和管理人员提出了更高的要求,迅速提高生产技术人员素质及观念,更新知识,已经成为当前电力生产的重要任务。

在职教育是提高劳动者素质的重要途径,高等学校发挥自身的人才优势,开展在职教育是现代高等教育发展的一大趋势。华北电力大学动力工程系经过十多年的努力与探索,在开展在职教育为电力生产企业培训高层次技术人才方面,取得了一定成绩,积累了丰富的实践经验。为满足电力生产企业培训及电力生产技术人员学习新技术、新知识的需要,华北电力大学动力工程系组织具有十多年为电力生产企业培训技术人员经验的教师,编写了这套《大型火电厂生产技术人员培训系列教材》。本套教材首批共7种:《火电厂锅炉设备及运行》、《火电厂汽机设备及运行》、《火电厂电气设备及运行》、《火电厂过程控制》、《火电厂开关量控制技术及应用》、《汽轮机控制、监视和保护》、《计算机控制系统及其在电厂中的应用》。

本套培训教材的特点:

- 一、力求反映当前电力生产的新知识、新技术。
- 二、力求理论结合实际,明确理论在生产过程、生产设备及系统中的作用。
- 三、注重解决生产过程中的实际问题。

本套教材可供电力生产企业培训生产技术人员使用,也可其他相关工程技术人员学习、参考。

这套教材的出版是编作者多年培训教学实践的积累,但不可避免地会存在一些问题和不足,热切地广大读者给予批评指正。

《大型火电厂生产技术人员培训系列教材》编委会

2000年7月

ABD84/05

前 言

随着科学技术的飞速发展，现代化火力发电生产过程控制技术与水平也得到相应的发展，以过程控制系统为核心的自动化系统已成为与主设备机、炉、电同等重要的组成部分。

火电厂过程控制是自动化专业的一门主干课，也是多年来大型火力发电厂机组自动化新技术培训的重要内容之一。本书是作者在教学、培训讲义基础上编写的，并引入了作者及同行在火电厂过程控制技术领域中的一些科研成果。

本书共分8章，由张栾英、孙万云编著。第一章概述了过程控制的基本知识。第2、3、4章讨论了以单元机组为多变量受控对象的负荷控制策略，即协调控制系统的设计、基本原理、结构及功能。第5、6、7章详细剖析了一台大型机组锅炉控制系统的组成、工作原理及特点。第8章介绍了汽机旁路系统及典型旁路控制系统的结构及工作原理。附录一、二介绍串级、导前微分控制系统的工程整定方法，供教学培训选用。

本书内容涵盖单元机组几乎全部的闭环控制问题。在阐述方法上注意深入浅出，讲清基本概念，并力求反映近年来火电厂过程控制的新发展。因此，本书可作为从事火电厂过程控制技术人员培训与参考。

山西阳泉电力公司张培华高级工程师认真审阅了全书，提出了详细修改意见，在此表示感谢。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。

作 者

2000年3月

主 要 符 号 表

K_P	比例系数	P_1	第一级压力
K	放大系数	N	功率
δ	比例带	NOT	非门
T_i	积分时间	AND	与门
T_d	微分时间	OR	或门
K_d	微分增益	$\int$	积分
C	容量系数	$\rhd$	上限
ϵ	飞升速度	$\lleftarrow$	下限
T_a	飞升时间	A	常数
ψ	衰减率	T	切换器
μ	阀门开度	XOR	异或
θ	温度	TRACK	跟踪
p	压力	$f(x)$	函数发生器
τ	迟延	RD	迫降
ω	角频率	RU	迫升
ξ	阻尼比	BI	闭锁增
$W_{T1}(s)$	主调节器的传递函数	BD	闭锁减
$W_{T2}(s)$	副调节器的传递函数	ULD	机组负荷命令
$W_D(s)$	对象传递函数	RCM	记忆组件
K_Z	执行机构系数	$F(x)$	超前、滞后模块
K_f	阀门系数	t_d	延时
K_m, r_1, r_2	变送系数	P_b	汽包压力
η	效率	$O_2\%$	烟气含氧量
T	时间常数, 温度	TD	汽机命令
G_j	减温水量	Z	扰动
W	给水量	SF	主蒸汽流量
D	蒸发水量	MFT	主燃料跳闸
H	汽包水位	ρ	自平衡率
δ_K	临界比例带	r	密度
T_K	临界振荡周期	A/M	主/自动平衡组件
M	燃烧率	HP	高压缸
P_T	主压力	LP	低压缸

序 言

前 言

主要符号表

第一章 概论	1
第一节 生产过程自动化的发展概况	1
第二节 生产过程自动控制的内容和分类	2
第三节 自动控制系统的品质指标	5
第四节 由阶跃响应曲线求对象传递函数	7
第五节 调节器的调节规律及调节器参数整定	9
第二章 单元发电机组及其负荷控制	13
第一节 单元发电机组的生产过程	13
第二节 单元机组的动态特性	14
第三节 单元机组负荷控制的基本方案	18
第三章 单元发电机组协调控制的基本原理	21
第一节 多变量控制系统的解耦设计	21
第二节 单元机组协调控制策略	25
第三节 单元机组协调控制系统	32
第四章 单元机组主控系统	35
第一节 负荷指令处理回路	35
第二节 负荷指令管理逻辑回路	40
第三节 机、炉主控制器	44
第四节 运行方式切换管理逻辑回路	50
第五节 汽机主站及其管理	54
第六节 滑压运行	56
第五章 锅炉燃烧控制系统	59
第一节 锅炉燃烧过程及其控制	59
第二节 燃料量控制系统	67

第三节	风量控制系统	70
第四节	炉膛压力控制系统	77
第六章	锅炉蒸汽温度控制系统	82
第一节	概述	82
第二节	主蒸汽温度的串级控制	84
第三节	主蒸汽温度的导前微分控制	90
第四节	再热蒸汽温度控制	95
第五节	锅炉主蒸汽温度控制系统实例	97
第六节	再热蒸汽温度控制系统实例	103
第七章	汽包锅炉给水控制系统	108
第一节	锅炉给水控制系统的任务	108
第二节	给水控制对象的动态特性	108
第三节	给水控制的基本方案	111
第四节	锅炉给水全程控制系统实例	116
第八章	汽轮机旁路控制系统	127
第一节	旁路系统及其控制	127
第二节	苏尔寿公司旁路控制系统	133
附录一	串级控制系统的整定	142
附录二	导前微分控制系统的整定	147
参考文献		156

概 论

第一节 生产过程自动化的发展概况

目前生产过程自动化的程度已成为衡量工业企业现代化水平的一个重要标志，这在电力行业更为突出。因为现代化大型火力发电机组普遍为高参数，大容量单元机组是由锅炉、汽轮发电机组及辅机组成的庞大的设备群，如果不配备与之相适应的自动化系统，其生产过程无法正常运行。可以说，自动化系统已成为与机、炉、电等主设备不可分割，而且同等重要的组成部分。

生产过程自动化的发展与生产过程本身有着极其密切的关系，它是从简单形式到复杂形式，从局部自动化到全局自动化的过程。

在我国，70年代前火力发电机组基本上以低参数，中、小容量机组为宜，它们对机组自动化水平的要求并不高。自动化系统的设计方法是将复杂的热工生产过程分解为若干简单过程，实施单输入—单输出控制；或加入串级控制、前馈补偿等较为复杂一点的回路，以保持生产过程平稳和安全为目标。自动化装置也都是以晶体管为核心器件的电动单元组合式仪表，该仪表自身的局限性也难以实现复杂的大型自动化系统功能。

随着科学技术的发展，汽轮发电机迅速向高参数、大容量发展，到80年代中后期，我国电力生产基本以300MW发电机组为主力。机组的大容量、高参数以及运行方式的单元化，使自动化技术受到严峻挑战；要求在局部自动化的基础上，对发电机组进行综合控制与管理，直至形成整个电网自动调度，即实现电力生产过程全局自动化。

生产过程自动化技术发展的里程碑是计算机的应用，特别是以微处理器为核心的新型装置—分散控制系统的成功应用。分散控制系统采用先进的控制功能分散、显示、操作与管理功能的集中原则，应用计算机技术、控制技术、通信技术和CRT显示技术，构成适合现代化生产过程控制的新一代自动化装置，为实现先进的单元机组自动化系统提供了物质保证。

目前就大型单元机组自动化系统而言，已形成如下的典型系统：

(1) 计算机监视系统。计算机监视系统又称数据采集系统，其基本功能是对机组整个生产过程参数进行在线检测，经处理运算后以CRT画面的形式提供给运行人员。该系统可进行自动报警、制表打印、性能指标计算、事件顺序记录、历史数据存储以及操作指导等。

(2) 汽轮机数字电液控制系统。汽轮机数字电液控制系统是汽轮机发电机组的重要组成部分，除完成汽轮机转速、功率及机前压力的控制外，还可实现机组起停过程及故障下的控制与保护。

(3) 汽轮机监视系统。汽轮发电机属高速运转的大型机械设备，对其运行参数的要求十分严格。大轴的振动、位移、挠度、热膨胀等参数直接影响到汽机的安全运行，必须精确测量并加以监视。以微处理器为核心的汽轮机监视系统，可有效地解决参数检测与处理方面的困难。

(4) 旁路控制系统。大型中间再热式机组一般都设置旁路热力系统，其目的是在机组起、停过程中协调机、炉的动作、回收工质、保护再热器等。完备的旁路控制系统是充分发挥旁路系统功能的前提。

(5) 锅炉炉膛安全监视系统。炉膛安全监视系统包括炉膛火焰监视、炉膛压力监测、炉膛吹扫、自动点火、燃烧器自动切换、紧急情况下的主燃料跳闸等。

(6) 协调控制系统。协调控制是基于机、炉的动态特性，应用多变量控制理论形成若干不同形式的控制策略，在机、炉控制系统基础上组织的高一级机、炉主控系统。它是单元机组自动控制的核心内容。

可见，大型机组的自动化系统已有全新的概念和更加广泛的内容。

正如参考文献 [1] 指出，工业自动化已进入计算机时代，进入所谓的计算机集成过程系统的时代。尽管有许多先进的控制理论，但缺乏可满足现代工业生产不断提出高要求的行之有效的控制方法。因此，结合生产实际形成既简单又实用的控制结构和算法将是过程控制的主要研究内容。

第二节 生产过程自动控制的内容和分类

一、生产过程自动控制的内容

(1) 自动检测：自动地检查和测量反映生产过程运行状况的各项物理参数、化学量（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，以监视生产过程的进行情况和趋势，称为自动检测。它所适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：按照生产过程工艺要求预先拟定的顺序，有计划、有步骤、自动地对生产过程进行一系列的操作，称为顺序控制。顺序控制也称自动操作，又称程序控制，在发电厂中主要用于主机或辅机的自动起动和停止，以及辅助系统的程序控制。如汽轮机的自动起停程序控制和磨煤机自动起停程序控制，定期排污和定期吹灰的程序控制等。

(3) 自动保护：在发生事故时，自动采取保护措施，以防止事故进一步扩大或保护生产设备使之不受严重破坏，称为自动保护。如汽轮机的超速保护，发电设备的过电压、过电流保护以及锅炉的超压保护等。

(4) 自动调节：自动地维持生产过程在规定的工况下进行，或者说自动地维持各被调量为设定参数值或按一定规律变化。

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进行。但是，生产过程往往受到各种扰动而偏离正常工况，必须通过自动控制随时消除各种干扰，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，这就要求在设计自动控制系统时，考虑各种可能发生的故障，并加以自动保护。因此，现代的自动控制系统往往包含自动保护、自动检测、自动报警、顺序控制等内容。有时，它们有机结合成一个不可分割的整体，以确保控制系统的安全可靠。

二、自动控制系统的组成

把工业生产过程中的温度、压力、液位、浓度等状态参数作为被控参数的控制系统叫过程控制系统。

为了了解自动控制系统组成的一般概念，首先以人工控制锅炉汽包水位为例（如图 1-1 所示），来分析完成一个控制任务，需要哪些功能以及这些功能在自动控制系统中又是如何实现的。

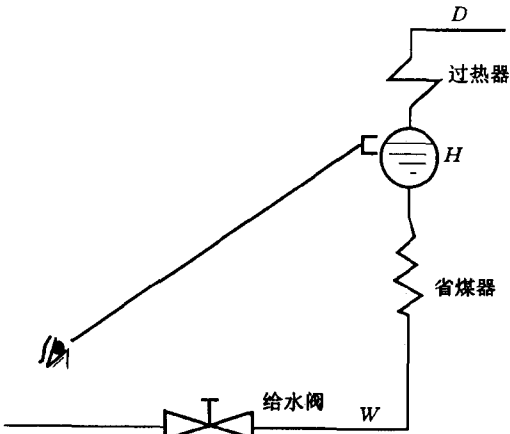


图 1-1 锅炉汽包水位人工控制示意图

为了保证锅炉的安全运行，操作人员应该设法使汽包中的水位稳定在一定的范围内。某些因素的干扰使汽包水位发生变化时，运行人员的手动干预过程如下：

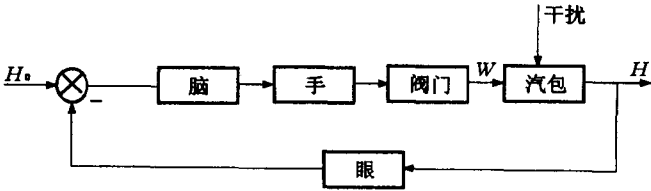


图 1-2 人工控制原理框图

首先，运行人员通过指示仪表，用眼观察被调量是否正常或发生变化。然后，用脑思考所观察的结果，即将观察到的实际水位 H 与给定值 H_0 进行比较（看是否有偏差，以及偏差的大小与方向），并作出判断（是否要求对给水阀门进行操作，往哪个方向操作，应按什么动作规律去操作等）。最后手根据脑的指挥命令，按照所规定的规律去操作给水阀门，所以说，运行人员的眼、脑、手三个器官，分别起着观察、运算和执行三个作用，从而完成水位控制，其原理框图如图 1-2 所示。

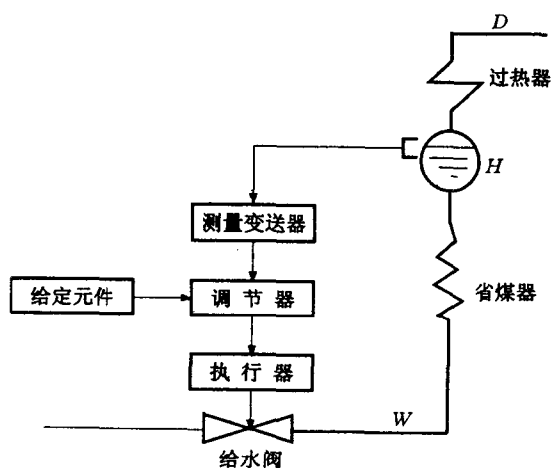


图 1-3 汽包水位自动控制系统示意图

如果用自动化装置代替上述人工操作来完成控制任务，就形成自动控制系统，如图 1-3 所示。图 1-3 的原理框图如图 1-4 所示。

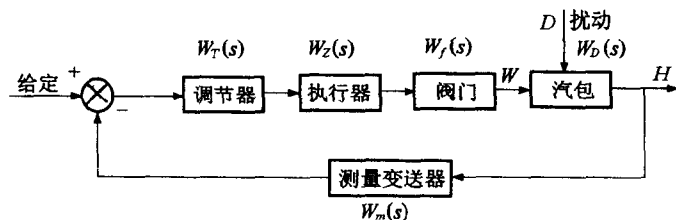


图 1-4 汽包水位自动控制系统原理框图

从图 1-3 和图 1-4 可以看出，一个自动控制系统由以下几部分组成。

测量变送器：用来测量被调量，并把被调量转换为与之成比例的某种便于传递和综合的信号 [用 $W_m(s)$ 表示]。

调节器：接受被调量信号和给定值信号比较后的偏差信号，输出一定规律的控制指令给执行器 [用 $W_T(s)$ 表示]。

给定元件：用来设置被调量的给定值或与该给定值对应的电信号。

执行器：根据调节器送来的控制指令去推动调节机构，改变调节量 [用 $W_Z(s)$ 表示]。

控制对象：被控制的热工生产过程或设备 [用 $W_D(s)$ 表示]。

被调量：表征热工过程是否符合规定工况的物理量（如汽包水位 H ）。

扰动：生产过程中引起被调量偏离其给定值的各种因素（如蒸汽量 D 变化）。

调节量：由控制作用来改变并去控制被调量变化的物理量（如给水量 W ）。

调节机关：接受控制作用去改变调节量变化的具体设备 [如给水调节阀 $W_f(s)$]。

三、自动控制系统的分类

1. 按控制方式分

按控制方式分类有开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统等。

开环控制系统（也称前馈控制系统）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。也就是说，其被控量没有反馈到控制设备的输入端。它的特点是按扰动进行控制，结构简单，精度差，只能克服单一扰动。

闭环控制系统（也称反馈控制系统），它的被控量信号反馈到控制设备的输入端，成为控制设备产生控制作用的依据。只要被控量与给定量之间有偏差，控制设备就要对被控对象施加作用，直到被控量符合要求为止。它的特点是基于偏差，消除偏差，可以克服各种扰动对被控量的影响。由于控制作用落后于干扰，因此相对来讲控制不及时。

复合控制系统，它是开环控制和闭环控制组合的一种控制系统。

2. 按闭合回路的数目分

按控制系统的闭合回路数分类有单回路控制系统和多回路控制系统。

单回路控制系统只有一个被控量信号反馈到控制器的输入端，形成一个闭合回路，如图 1-5 所示。

多回路控制系统具有一个以上的闭合回路，控制器（调节器）除接受被控量反馈信号外，还有另外的输出信号直接或间接地反馈到控制输入端。例如串级控制系统和导前微分

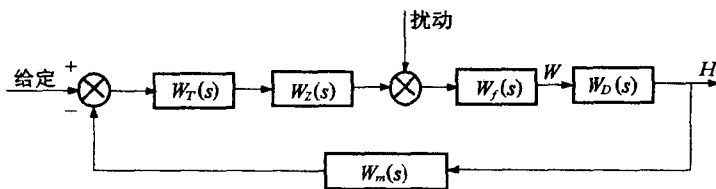


图 1-5 单回路控制系统的原理框图

控制系统都是双回路控制系统。

3. 按给定值分

按控制系统的给定值分类有恒值控制系统、程序控制系统和随动控制系统。

恒值控制系统的给定值保持不变，从而被控量也应保持不变，主要矛盾是克服扰动对被控量的影响，最终使给定值与被控量相等。

随动控制系统的给定值按预先不能确定的一些随机因素而变化，因而被调量也跟随给定值而随机变化。

程序控制系统的给定值按已知的时间函数变化。控制的任务是使被控量尽快与给定值相等。例如汽轮机起动过程中，要求汽轮机的转速按一定程序升降等。

第三节 自动控制系统的品质指标

自动控制系统控制品质的优劣，直接表征了控制系统克服外界干扰能力的大小。因而，讨论自动控制系统的品质指标也就显得尤为重要。为此先给出静态和动态的概念。

静态：被控参数不随时间而变化的平衡状态叫静态或稳态。

动态：被控参数随时间而变化的不平衡状态叫动态。

一旦给定值有了变化或有干扰进入系统，这时平衡状态被破坏，被控参数开始偏离给定值，调节器、调节阀相应动作以改变调节量的大小而使被控参数回到给定值上。可见，控制的过程就是克服干扰的过程。一个系统的优劣在稳态下难以判别，只有在过渡过程中才能得以鉴别。

一般说来，一个控制系统在受到干扰作用时的过渡过程可能有如图 1-6 所示的 4 种情况。衡量一个控制系统的指标一般可归纳为三个方面，即稳定性、准确性和快速性。

一、稳定性

通常所说的控制系统是稳定的，是指控制系统在受到干扰作用后，系统的平衡被破坏，在控制设备的控制作用下，控制系统能恢复到一个新的平衡状态，称为稳定的控制系统。稳定的控制系统被控参数和控制参数的过渡过程曲线最后趋向平衡；不稳定的控制系统过渡过程曲线则是渐扩的，无法恢复平衡。现场中希望过渡过程曲线如图 1-7 所示。

控制系统稳定程度可以用衰减率 ψ 这个指标来衡量，定义如下

$$\psi = \frac{y_{m1} - y_{m3}}{y_{m1}} = 1 - \frac{y_{m3}}{y_{m1}}$$

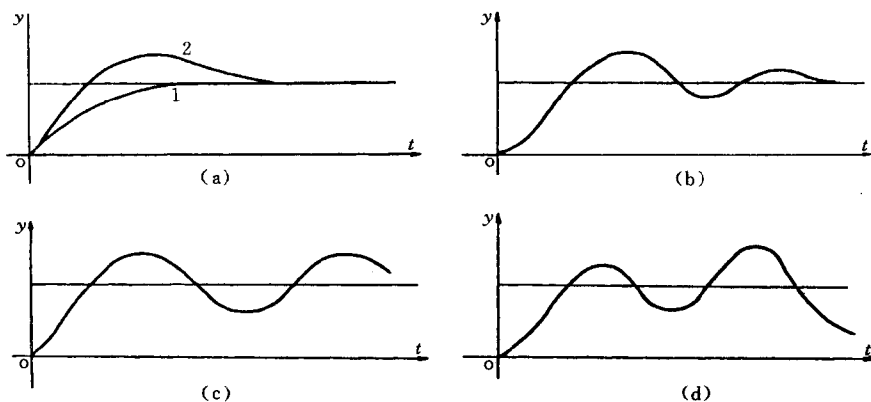


图 1-6 几种典型的过渡过程形式

(a) $\psi=1$; (b) $0<\psi<1$; (c) $\psi=0$; (d) $\psi<0$

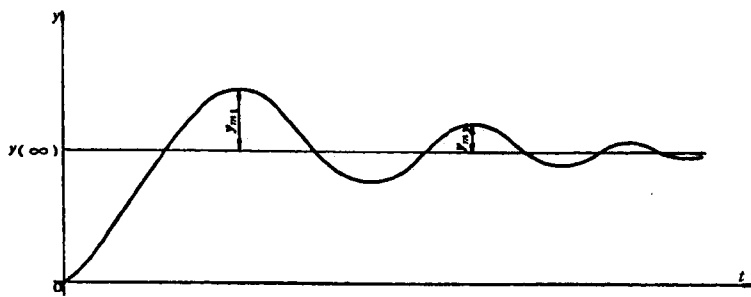


图 1-7 典型过渡过程曲线

式中 y_{m1} 和 y_{m3} 是被控参数从新稳定值 $y(\infty)$ 量起的第一和第三波峰值。

衰减率 ψ 和系统稳定性之间的关系如下：

- (1) $\psi=1$ (即 $y_{m3}=0$)，过渡过程为不振荡的过程，如图 1-6 (a) 所示。
- (2) $\psi=0$ (即 $y_{m1}=y_{m3}$)，过渡过程为等幅振荡过程，如图 1-6 (c) 所示。
- (3) $0<\psi<1$ (即 $y_{m1}>y_{m3}$)，过渡过程为衰减振荡过程，如图 1-6 (b) 所示。
- (4) $\psi<0$ (即 $y_{m1}<y_{m3}$)，过渡过程为渐扩振荡过程，如图 1-6 (d) 所示。

多数热工生产过程要求 $\psi=0.75\sim0.9$ ，即第一峰与第三峰之比值在 4:1 到 10:1 之间。

二、准确性

准确性是指被控参数的实际值与给定值之间的动态偏差和静态偏差。最大动态偏差是指整个过渡过程中被控参数偏离给定值的最大差值。静态偏差是过渡过程结束后被控参数与给定值之间的差值。现场中希望两个偏差越小越好。

三、快速性

快速性是指过渡过程的持续时间，即从干扰发生起至被控参数又建立新的平衡状态为止的过渡过程时间 t_s 。一般认为被控参数进入偏离给定值 $\pm 5\%$ (或 $\pm 2\%$) 范围内就基本稳定了。当然，过渡过程时间越短，控制过程进行的就越快，系统品质也就越好。

以上三方面的品质指标有时往往是相互矛盾的，在实际调试过程中应统筹兼顾。

第四节 由阶跃响应曲线求对象传递函数

一、有自平衡对象

1. 一阶对象

已知对象在阶跃扰动下的响应曲线如图 1-8 所示。

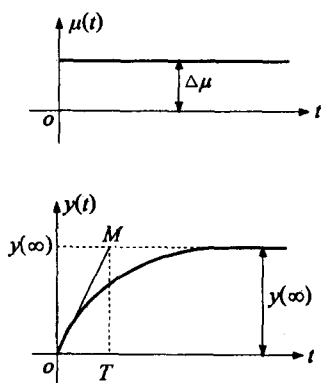


图 1-8 有自平衡一阶对象

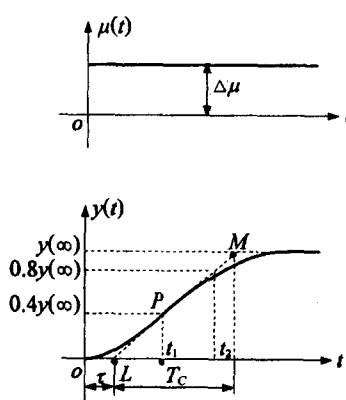


图 1-9 有自平衡高阶对象

其传递函数形式为

$$W(s) = \frac{y(s)}{\mu(s)} = \frac{K}{Ts + 1}$$

式中 T ——时间常数；

K ——放大系数。

特征参数 T 和 K 的求法如下：

(1) 作稳态值的渐近线 $y(\infty)$ ，则

$$K = \frac{y(\infty)}{\Delta\mu}$$

(2) 作响应曲线起始点的切线交 $y(\infty)$ 于 M 点，则线段 oM 在 t 轴上的投影即为时间常数 T 。

2. 高阶对象

已知对象在阶跃扰动下的响应曲线如图 1-9 所示，从图中可以看出此对象的传递函数为

$$W(s) = \frac{y(s)}{\mu(s)} = \frac{K}{(Ts + 1)^n}$$

(1) 切线法。过响应曲线拐点 P 作曲线切线，切线交 $y(\infty)$ 水平线于 M 点，交时间轴于 L ，则

$$\tau = OL$$

线段 OM 在时间轴上的投影为 T_c ，则

$$\left. \begin{aligned} n &\approx 24 \times \frac{\frac{\tau}{T_c} + 0.12}{2.93 - \frac{\tau}{T_c}} \\ T &\approx \frac{\tau + 0.15T_c}{n - 0.35} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

根据上述近似公式，可制成表 1-1 所示的 T_c 、 τ 与 n 、 T 的关系表及图 1-10 所示的 τ/T_c 、 τ/T 与 n 的关系曲线。

表 1-1 时间常数 T_c 、滞后时间 τ 与阶跃 n 、时间常数 T 的关系

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	14	25
τ/T_c	0	0.104	0.218	0.319	0.410	0.493	0.570	0.642	0.710	0.773	1.000	1.50
τ/T	0	0.282	0.805	1.430	2.100	2.810	3.560	4.310	5.080	5.860	9.120	18.50
T_c/T	1	2.712	3.692	4.480	5.120	5.700	6.250	6.710	7.160	7.580	9.100	12.33

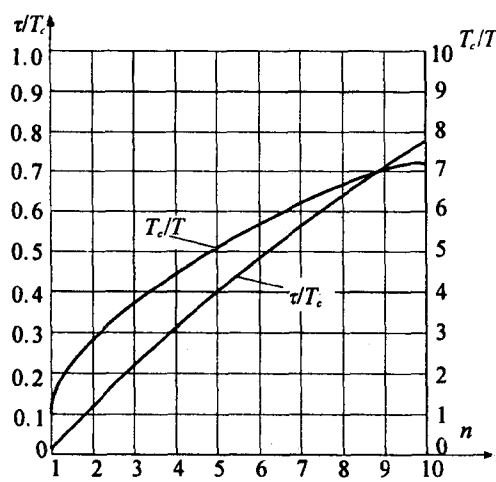


图 1-10 τ/T_c 、 T_c/T 与 n 的关系曲线

当 n 为小数时， $n = n_1 + \alpha$ (1-2)

式中 n_1 —— n 的整数部分；

α —— n 的小数部分。

则可得如下形式的传递函数

$$W(s) = \frac{K}{(Ts + 1)^n} \approx \frac{K}{(1 + Ts)^{n_1}(1 + \alpha Ts)}$$

(2) 两点法。作 $y(\infty)$ 水平线，并找出对应 $0.4y(\infty)$ 和 $0.8y(\infty)$ 两点对应的时间 t_1 和 t_2 ，利用下面公式求出 n 和 T

$$\left. \begin{aligned} n &\approx \left(\frac{1.075t_1}{t_2 - t_1} + 0.5 \right)^2 \\ T &\approx \frac{t_1 + t_2}{2.16n} \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式 (1-3) 适合于 $0.32 \leq \frac{t_1}{t_2} \leq 0.46$ 的范围。

由式 (1-3) 可制成表 1-2，供使用时查阅。

表 1-2 阶数 n 与 t_1/t_2 的关系

n	1	2	3	4	5	6	7
$\frac{t_1}{t_2}$	0.317	0.460	0.534	0.584	0.618	0.640	0.666
$\frac{t_1}{t_2}$	0.317~0.402	0.402~0.501	0.501~0.560	0.560~0.601	0.601~0.635	0.638~0.656	0.656~0.678

二、无自平衡能力对象

无自平衡能力对象的阶跃响应曲线如图 1-11 所示。从图中可以看出输入—输出之间的关系为

$$W(s) = \frac{y(s)}{\mu(s)} = \frac{1}{T_a s (1 + T_s)^n} \quad (1-4)$$

(1) 一阶近似。此时有

$$W(s) = \frac{1}{T_a s} e^{-\tau s} \quad (1-5)$$

其中

$$\tau = t_a \quad T_a = \frac{1}{\epsilon}$$

$$\epsilon = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\Delta \mu} = \frac{1}{\Delta \mu} \times \frac{oh}{t_a} = \frac{1}{\Delta \mu} \times \frac{oh}{\tau} \quad (1-6)$$

(2) 高阶近似。 n 、 T 、 T_a 的计算公式可由下式得出

$$\left. \begin{aligned} T_a &= \frac{1}{\epsilon} \\ T &= \frac{1}{n} t_a \\ n &= \frac{1}{2\pi} \left[\frac{oh}{y(t_a)} \right]^2 - \frac{1}{6} \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

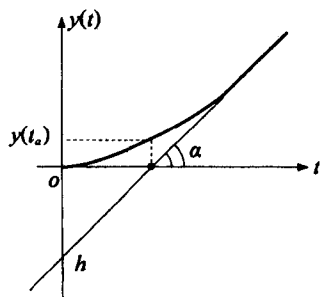
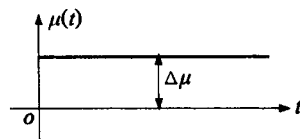


图 1-11 无自平衡能力对象

第五节 调节器的调节规律及调节器参数整定

一、调节器的调节规律

$$\left. \begin{aligned} (1) \text{ 比例调节器 P: } W_T(s) &= \frac{1}{\delta} = K_p \\ (2) \text{ 比例积分调节器 PI: } W_T(s) &= \frac{1}{\delta} \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \\ (3) \text{ 比例微分调节器 PD: } W_T(s) &= \frac{1}{\delta} (1 + T_d s) = K_p (1 + T_d s) \\ (4) \text{ 比例积分微分调节器 PID: } W_T(s) &= \frac{1}{\delta} \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

式中 δ ——比例带；

K_p ——比例系数；

T_i ——积分时间；

T_d ——微分时间。

二、调节器参数整定

1. 临界比例带法

临界比例带法又称边界稳定法，其要点是将调节器设置成纯比例作用，将系统投入自运行并将比例带由大到小改变，直到系统产生等幅振荡为止。这时控制系统处于边界稳定