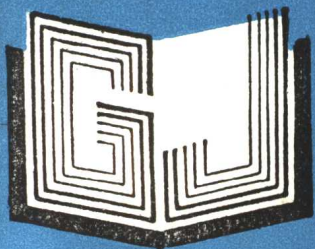


991116



高等学校教材

热工自动控制系统

华北电力大学 李遵基 主编

23
4



高等学校教材

热工自动控制系统

华北电力大学 李遵基 主编

中国电力出版社

内 容 提 要

本书比较全面地介绍了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整定方法。同时还介绍了大机组的多变量解耦控制、全程控制及协调控制。主要包括：自动控制系统的基本概念，对象动态特性，调节器调节规律，调节器参数整定方法，串级控制系统、导前微分控制系统、复合控制系统及比值控制系统的组成、特点、工作原理、整定方法、实例分析，大机组的多变量控制、全程控制以及协调控制。

本书为高等学校热能动力类工业过程自动化专业（本科）的教材，也可作为自动控制专业（专科、函授）的参考资料，同时也可供电力试验研究所、电力设计院、各大电厂从事热工过程自动控制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/李遵基主编. -北京:中国电力出版社, 1997

高等电力教材

ISBN 7-5083-1254-1

I. 热… I. 李… II. 热力工程-自动控制-控制系统-高等学校-教材 IV. TK323

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 04592 号

中国电力出版社出版、发行

北京三里河路 6 号 邮政编码 100044

三河市水利局印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1997 年 10 月第一版 1997 年 10 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.75 印张 380 千字

印数 0001—3470 册 定价 15.50 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)

前 言

本书是按照“高等院校热能动力类专业教学指导委员会”审定的工业过程自动化专业本科“热工自动控制系统”课程教学大纲要求编写的。它可用作高等院校工业过程自动化专业（本科）的必修课教材和其他有关专业的教学参考资料，同时也可供电力试验研究所、电力设计院、各大电厂从事热工过程自动控制工作的工程技术人员参考。

本书内容共分十一章。第一章～第四章介绍基本概念、单回路控制系统的组成及调节器参数的整定方法。第五章～第八章介绍了串级、导前微分、复合、比值控制系统，并有实例分析。第九章～第十一章介绍多变量控制、全程控制及协调控制。

在本书编写过程中，作者根据多年的教学经验和科研实践，打破了以往按热力设备进行章节划分的传统方法，大胆地采用按系统性质划分章节的方法，并在各章中都加入了具体实例的分析，力求把生产过程中的新技术、新方法、新内容融合到教材中去，因此，更加符合学生的学习思路，更加符合过程控制系统的发展趋势。同时，在编写过程中也注意到叙述过程循序渐进、分析方法深入浅出，缩短了理论到实践的差距。

全书由华北电力大学李遵基主编，华北电力大学张栾英、孙万云，武汉水利电力大学李杭生参加编写。孙万云编写第二章至第四章。张栾英编写第一章和第五章至第七章。李杭生编写第八章、第九章。李遵基编写了第十、十一章，并统编了全书。

本书由重庆大学徐盛仪教授主审。他对本书进行了严肃、认真、仔细的审阅，并提出了许多宝贵的意见和建议，在此表示衷心的感谢。同时本书也得到了华北电力大学动力系及热工教研室的大力支持，在此表示感谢。由于编者水平有限，书中难免存在不少缺点和不足之处，真诚希望读者提出批评、指正。

编 者

1997年1月

3417/00

目 录

前 言

第一章 概论	1
第一节 热工过程自动控制的发展	1
第二节 热工过程自动控制的内容和分类	2
第三节 热工自动控制系统的品质指标	5
第二章 热工对象的动态特性及其求取方法	8
第一节 影响对象动态特性的结构性质	8
第二节 有自平衡能力对象的动态特性	11
第三节 无自平衡能力对象的动态特性	17
第四节 由阶跃响应曲线求取对象传递函数的方法	21
第三章 调节器的调节规律及其对过渡过程的影响	31
第一节 概述	31
第二节 比例调节规律及其对控制过程影响	32
第三节 积分调节规律及其对过渡过程的影响	37
第四节 微分调节规律及其对过渡过程的影响	41
第四章 单回路控制系统	45
第一节 单回路控制系统分析	45
第二节 单回路控制系统的参数整定	48
第三节 单回路控制系统实例	59
第五章 串级控制系统	66
第一节 串级控制系统的组成	66
第二节 串级控制系统的特点	68
第三节 串级控制系统主副回路和主副调节器选择	73
第四节 串级控制系统实例分析——过热蒸汽温度串级控制	74
第六章 导前微分控制系统	84
第一节 导前微分控制系统的组成	84
第二节 导前微分控制系统的特点	85
第三节 导前微分控制系统的整定	90
第四节 导前微分控制系统实例——再热汽温控制系统分析	99
第五节 汽温分段控制系统	106
第七章 前馈-反馈复合控制系统	108
第一节 前馈控制系统的组成	108
第二节 前馈控制系统的特点	109
第三节 复合控制系统特性分析	110

第四节	复合控制系统实例分析——三冲量给水控制系统	113
第五节	串级三冲量给水控制系统实例分析	129
第六节	带冲击负荷锅炉的给水控制系统	134
第八章	比值及锅炉燃烧控制系统	139
第一节	比值控制系统	139
第二节	燃烧过程控制系统的任务	143
第三节	汽包锅炉燃烧过程被控对象动态特性	144
第四节	燃烧过程控制系统基本方案	152
第五节	中储式锅炉燃烧控制系统	155
第六节	直吹式锅炉燃烧控制系统	161
第七节	燃烧控制系统的参数整定	171
第九章	多变量控制系统	181
第一节	多变量被控对象	181
第二节	解耦控制系统设计	186
第三节	直流锅炉的特点	194
第四节	直流锅炉动态特性	197
第五节	直流锅炉控制系统基本方案	200
第六节	直流锅炉自动控制系统	205
第十章	给水全程控制系统	207
第一节	概述	207
第二节	给水全程控制系统中的特殊问题	208
第三节	给水全程控制系统分析	218
第四节	给水全程控制系统参数整定方法	227
第十一章	单元机组协调控制系统	234
第一节	协调控制系统的基本概念	234
第二节	协调控制系统的基本方案分析	242
第三节	单元机组协调控制系统实例分析	247
第四节	协调控制系统的整定	257
参考文献		262

第一章 概 论

在生产和科学技术的发展过程中,自动控制起着重要的作用,目前已广泛应用于工农业生产、交通运输和国防建设。生产过程自动化是保持生产稳定、降低成本、改善劳动条件、促进文明生产、保证生产安全和提高劳动生产率的重要手段,是20世纪科学与技术进步的特征,是工业现代化的标志之一。可以说,自动化水平是衡量一个国家的生产技术和科学水平先进与否的一项重要标志。电力工业中电厂热工生产过程自动化技术相对于其他民用工业部门有较长的历史和较高的自动化水平,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。

第一节 热工过程自动控制的发展

热工过程自动控制的发展,经历了以下阶段:

(1) 初级阶段:本世纪50年代前后,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、电各自独立的分散的局部自动控制。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:50年代末及以后十年间,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、炉作为一单元整体来进行集中控制,仪表盘装在一起监视,从而使机、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与连续化发展的需要。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:70年代至今,由于集成电路及计算机技术的飞速发展,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,电厂热工过程控制又经历了以下几个计算机控制过程:

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。

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。

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。

第二节 热工过程自动控制的内容和分类

一、热工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进行情况的各项物理参数、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、打印和警报装置。

(2) 顺序控制：按照预先拟定的顺序，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启动和停止，以及辅助系统的程序控制。如汽轮机的自动启停程序控制和磨煤机自动启停程序控制，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。

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，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。

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：

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。

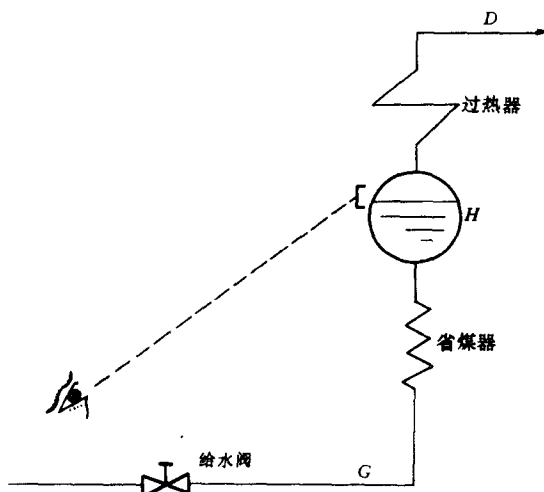


图 1-1 锅炉汽包水位人工控制示意图

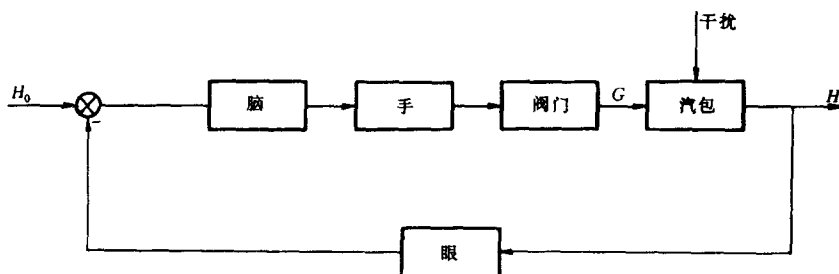


图 1-2 人工控制原理框图

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。

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：表征热工生产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：由控制作用用来改变并去控制被调量变化的物理量（如给水量 G ）。

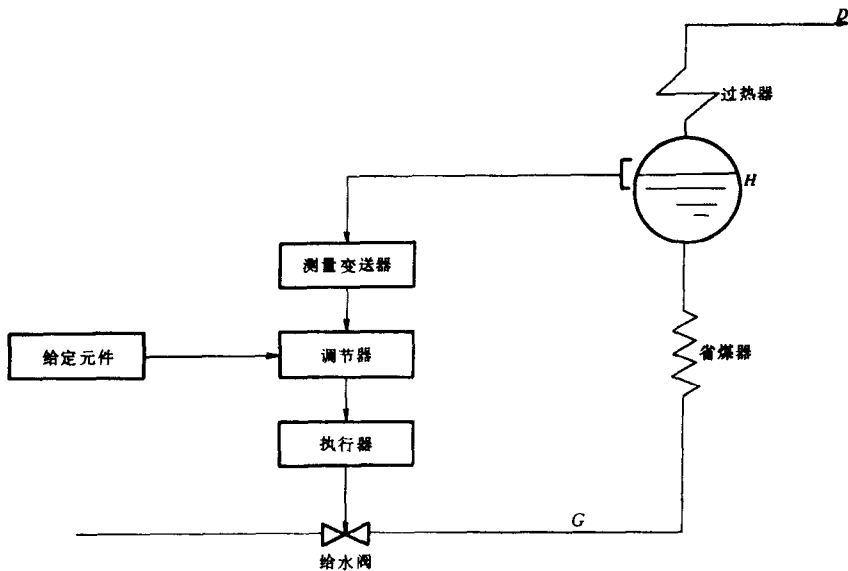


图 1-3 汽包水位自动控制系统示意图

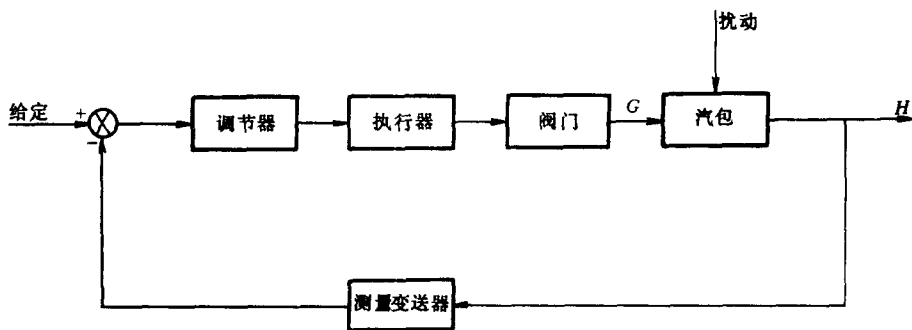


图 1-4 汽包水位自动控制系统原理框图

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 $W_t(s)$]。

三、自动控制系统的分类

(一) 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。只要被控量与给定值之间有偏差，控制设备就要对控制对象施加作用，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。

(二) 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。

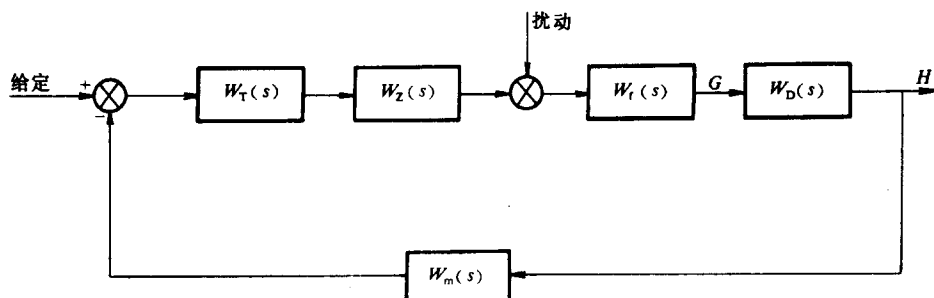


图 1-5 单回路控制系统的原理框图

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控制系统都是双回路控制系统。

（三）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。例如汽轮机启动过程中，要求汽轮机的转速按一定程序升降等。

第三节 热工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 所示的四种情况：

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。

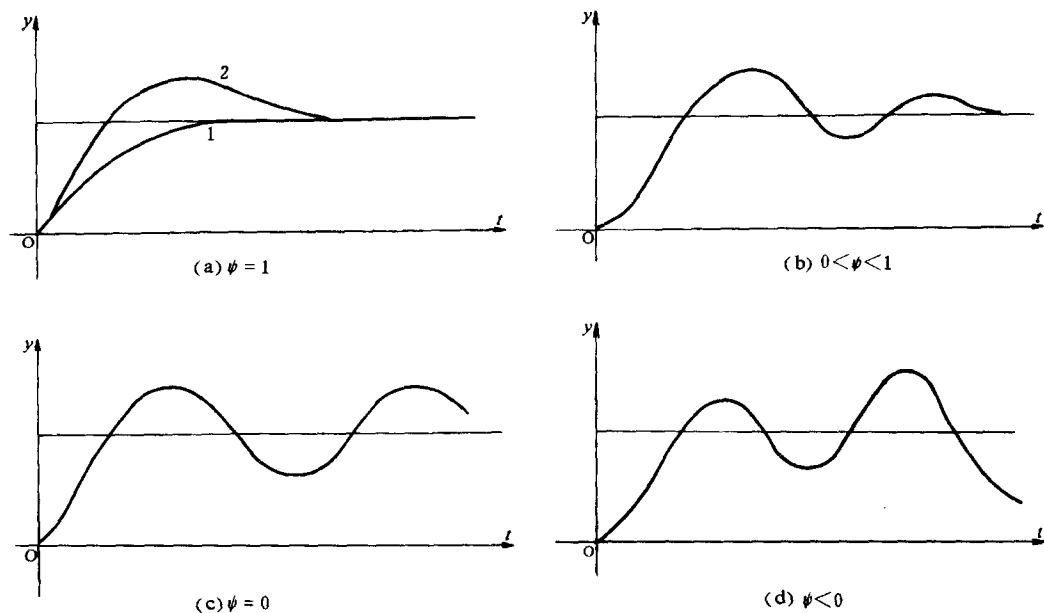


图 1-6 几种典型的过渡过程形式

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。

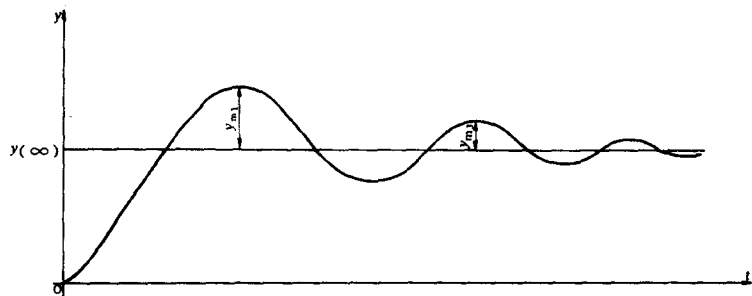


图 1-7 典型过渡过程曲线

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：

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

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 $\psi = 0.75 \sim 0.9$, 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。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 $\pm 2\%$) 范围内就算基本稳定了。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。

第二章 热工对象的动态特性 及其求取方法

热工对象是热工自动控制系统的重要组成部分，要设计一个合理的控制系统，必须了解对象的动态特性，要确定出控制器的最佳整定参数，也必须了解对象的动态特性。了解了对象的动态特性，还可以对新设计的工艺设备提出要求，使之满足所需要的动态特性，为设计满意的控制系统创造先决条件。因此，研究对象的动态特性对实现生产过程的自动化具有重要的意义。

在过程控制的对象中，一般总有某些物质（或能量）输入，同时又有某些物质（或能量）输出。而对象一般具有储存物质（或能量）的能力，储存量的多少通过被控参数表示出来。因此，被控参数是反映对象的输入量和输出量之间平衡状态的物理量（或化学量）。所谓对象的动态特性，就是对象的某一输入量变化时，其被控参数随时间变化的规律。

对象的动态特性取决于工艺设备的结构、运行条件和内部物理的（或化学的）过程，可以用机理分析的方法导出对象的动态特性，即理论建模。然而生产过程往往很复杂，要准确地得到描述它的动态特性的数学表达式比较困难，即使得出也由于动态方程过于复杂而难以求解。因此，工程中很少采用理论建模。

用试验的方法获取对象的动态特性，即试验建模，是工程中常用的建模方法。目前有时域法、频域法和相关统计法等。时域法是在对象的输入端加一阶跃扰动，记录响应曲线，经数据处理求得对象的传递函数，这种方法的特点是简单适用，因此目前为工程中所广泛采用。但是，用通过试验求得对象的频率特性来研究对象的动态特性，对一些惯性大的对象则因试验时间很长而影响生产的正常进行，因此这种频域法用的较少。相关统计法是在对象的输入端加一伪随机信号，用相关计算求得对象的脉冲响应函数，这种方法的最大优点是不影响生产，因而越来越受到人们的重视。

第一节 影响对象动态特性的结构性质

在热工生产过程中，被控对象（以下简称对象）在结构上是多种多样的，而影响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、阻力和传递迟延可以称为大多数对象所共有的结构性质。

一、容量系数

众所周知，电容器可以储存电荷，水箱可以储存水，锅炉的汽包也可以储存水。热工生产过程中大多数对象具有储存物质（或能量）的能力，容量系数就是衡量对象储存物质（或能量）能力的一个特征参数。

图 2-1 是水箱示意图，流入水箱的水量为 Q_1 ，流出水量为 Q_2 。某一时刻后流入量 Q_1 等

于流出量 Q_2 ，水箱的水位 h 将稳定在某一值。设某种原因引起 $Q_1 \neq Q_2$ ，水箱内储水量就要发生变化，而这种变化则由水箱水位的变化表现出来。在 dt 时间内，水箱内储水量的变化为 $dG = (Q_1 - Q_2) dt$ ，显然不平衡流量越大，储水量的变化量就越大，对于一个截面积为 A 的圆柱形水箱，其水位的变化速度就越快。即：

$$Q_1 - Q_2 = C \frac{dh}{dt} \quad (2-1)$$

式中 C ——比例系数。

由于 $dG = (Q_1 - Q_2) dt$ ，则 C 又可表达为：

$$C = \frac{dG}{dh} \quad (2-2)$$

上式表明，比例系数 C 是被控参数 (h) 变化一个单位时需要对象物质储存量 (G) 的变化量， C 就称为对象的容量系数。

水箱的截面积为 A ，则 $dG = Adh$ ，因此容量系数 C 在数值上等于 A 。这意味着水箱的截面积越大，在同样大小的不平衡流量作用下，水位变化速度就越小，即抵抗扰动的能力越强。从这一方面来说，容量系数描述了对对象抵抗扰动的能力。对电容器，其储存的电荷量 q 的多少是由其端电压 U 来表现，即电容器的容量系数为：

$$C = \frac{dq}{dU} \quad (2-3)$$

二、阻力

我们知道，电路中电流会受到电阻的阻力，流体在管路中流动受到阀门等给予的阻力等。就是说，物质（或能量）在传输过程中总是要遇到或大或小的阻力，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）。

在图 2-1 所示的水箱系统中，流出侧有阀门 2，在阀门 2 的开度一定时，流出水量 Q_2 的大小就取决于水箱水位 h 的高低。换言之，水箱流出水量每变化一个单位需要水位变化的多少，则取决于流出侧阀门 2 的阻力。阻力表达式为：

$$R = \frac{dh}{dQ} \quad (2-4)$$

电路中的阻力

$$R = \frac{dU}{di} \quad (2-5)$$

式中 U ——电位差；

i ——电流。

在图 2-1 所示的水箱系统中，设某一时刻流入量 Q_1 阶跃增加 ΔQ_1 ，随即有不平衡水量

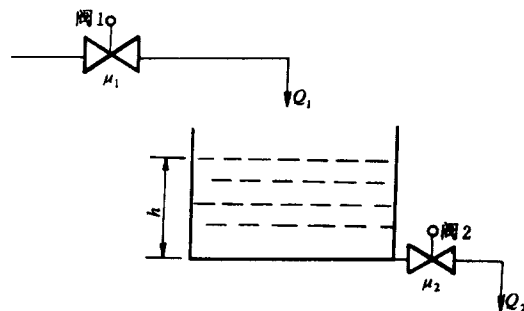


图 2-1 单容水箱示意图

dG 出现, 水箱水位 h 开始增加。在阀门 2 开度一定, 即流出侧阻力为 R_2 时, 水位 h 的增加引起流出水量 Q_2 的增加。这样, 不平衡水量 dG 随时间增加而逐渐减小, 水位 h 的增加速度越来越小, 最终为零, 这时水箱水位 h 稳定在一个新的数值上。本来被调量 h 的变化是由不平衡流量 $(Q_1 - Q_2)$ 引起的, 由于流出侧阻力的存在, 水位变化反过来又影响不平衡流量的变化, 最终使被调量进入新的稳定状态。这种不需要外来作用只依靠对象自身来恢复平衡的现象称为对象的自平衡。显然, 对象的阻力使之在动态过程中表现出自平衡能力。

三、传递迟延

图 2-2 也是一个水箱系统, 它与图 2-1 所示的水箱系统的不同之处就是控制流入水量的阀门 1 与水箱之间有一段距离 (不容忽略的)。在图 2-2 中, 设某一时刻控制阀门 1 阶跃开大 $\Delta\mu_1$, 则其流出量 Q_1 随即阶跃增加 ΔQ_1 , 然而因水流过一段距离需要时间, 所以流入水箱引起水位变化的流入量 Q'_1 并不能立即变化, 显然被调量水箱水位 h 的变化也要顺延一段时间。

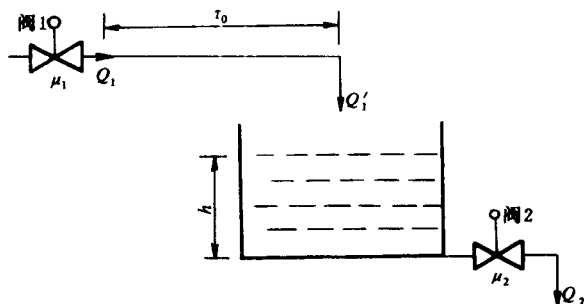


图 2-2 有迟延单容水箱示意图

上述被调量变化的时刻落后于扰动发生的时刻的现象称为对象的传递迟延。由于迟延是物质 (或能量) 在传输过程中因传输距离的存在而产生, 所以又称为传输迟延或纯迟延。

对具有传递迟延的对象, 为分析方便往往将引起迟延的因素从对象中分离出来, 而作为一个独立的环节。在图 2-2 所示系统中, 设进入水箱的流入量 Q'_1 与水位之间具有的传递函数为 $W'(s)$, Q'_1 与 Q_1 之间存在传输时间 τ_0 , 即:

$$\frac{Q'_1(s)}{Q_1(s)} = e^{-\tau_0 s} \quad (2-6)$$

则整个水箱系统的传递函数:

$$W(s) = W'(s)e^{-\tau_0 s} \quad (2-7)$$

传递迟延可能发生在流入侧 (即控制阀), 也可能发生在流出侧 (即负荷侧), 或两侧都存在。迟延发生在流入侧, 控制作用将不能及时影响被调量; 迟延发生在流出侧, 将造成调节器在被调量发生变化时不能立即动作。总之, 在设计主设备及其控制系统时, 应尽量避免或减小对象的传递迟延。

第二节 有自平衡能力对象的动态特性

热工过程中的受控对象大多数都比较复杂,为了便于描述它们的动态特性,对于稍为简单的对象则近似看作由一个集中容积和阻力组成,称为单容对象;而较复杂的对象则近似看作由多个集中容积和阻力组成,称为多容对象。

一、单容对象的动态特性

图 2-3 是一个有自平衡能力单容对象的示意图。

图中水箱的截面积为 A ; 流入量为 Q_1 , 由流入侧控制阀 1 控制; 流出量为 Q_2 , 流出侧阀门 2 的阻力为 R_2 ; 水箱水位为 h 。

1. 阶跃响应

设 t_0 时刻前, 水箱系统处于平衡状态, 即此刻的流入量 Q_{10} 等于流出量 Q_{20} (注脚“0”表示起始状态, 以下同), 水位稳定在某一值 h_0 , 流入侧控制阀开度为 μ_{10} 。

t_0 时刻, 控制阀门 1 阶跃开大 $\Delta\mu$, 即: $\mu_1 = \mu_{10} + \Delta\mu$; 流入侧阀门的开大使流入量随即阶跃增加 ΔQ_1 , 即 $Q_1 = Q_{10} + \Delta Q_1$; 流出侧阀门 2 的开度不变, 即 $Q_2 = Q_{20}$ 。这样 t_0 时刻的不平衡流量 $\Delta Q = Q_1 - Q_2 = Q_{10} + \Delta Q_1 - Q_{20} = \Delta Q_1$, 水箱水位在不平衡流量 ΔQ_1 的作用下开始上升, 其上升速度与 ΔQ_1 成正比。水箱水位的上升要造成流出量 Q_2 的增加, 设增加量为 ΔQ_2 , 而且随着水位的上升, ΔQ_2 越来越大, 即不平衡流量由 $\Delta Q = \Delta Q_1$ 变为 $\Delta Q = \Delta Q_1 - \Delta Q_2$ 而且越来越小, 因此水位 h 的上升速度也就越来越小。直到 t_s 时刻, $\Delta Q_2 = \Delta Q_1$, 使 $\Delta Q = 0$, 水位 h 不再上升而稳定在一个新的数值上。

单容水箱的阶跃响应曲线如图 2-4 所示。

由图可以看出, 水箱水位在受到流入侧的流入量阶跃扰动后, 开始上升速度较大, 随后速度越来越小, 最后变化速度为零。从水位 h 的数值上看, 在扰动开始后并没有立即上升, 而是经过一段时间慢慢上升到稳态值。从反应扰动的观点看, 单容水箱具有惯性; 从受到扰动后无需外部干预水位仍能恢复到稳定状态来

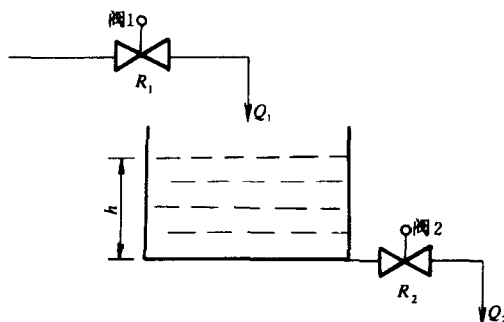


图 2-3 有自平衡能力单容对象

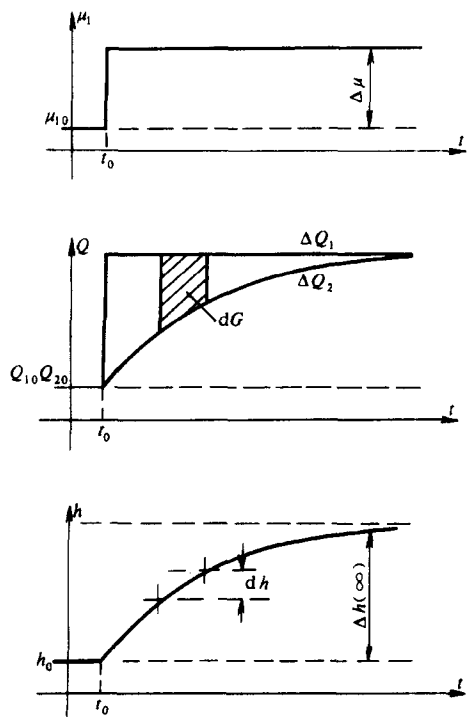


图 2-4 阶跃响应曲线