工业锅炉丛书

锅炉自动调节

张子栋　王怀彬　李炳熙　编

哈尔滨工业大学出版社

(黑)新登字第 4 号

内 容 简 介

第一至五章为锅炉自动调节的基本理论，介绍自动调节的基本原理、调节对象的特性和调节器；第六至九章着重介绍锅炉给水、汽温和燃烧过程自动调节系统，并概要介绍单元机组的自动调节系统，第十章介绍工业锅炉微型计算机控制。

本书为大专院校（包括电大、夜大）热能工程专业教材；也可作为工业企业锅炉管理人员及工程技术人员的自学参考书。

DZ20/05

工业锅炉丛书
锅 炉 自 动 调 节
张子栋 王怀彬 李炳熙 编
*
哈尔滨工业大学出版社出版
新华书店首都发行所发行
哈尔滨市龙华印刷厂印刷
*
开本787×1092 1/16 印张 13.125 字数300 千字
1994年 4 月第 1 版 1994年 4 月第 1次印刷
印数 1—5 000
ISBN 7-5603-0412-5/TK·20 定价：8.00元

前　言

锅炉是重要的能源转换设备。据不完全统计，我国现有工业锅炉三十万台左右，经两部定点生产工业蒸汽锅炉的厂家共202家，经各省定点生产热水锅炉的厂家约500家。这些厂家急需补充锅炉专业毕业的大专、中专毕业生。与此相应，一些院校和省市教委相继开办了工业锅炉（或热能工程）大专班、业余大学和电视大学锅炉班。因此，编写一套适用于工业锅炉专业的大专教材，已成为当务之急。另外、在编写时也考虑了提高现有工业锅炉技术和管理干部专业知识水平的需要。

这套丛书的内容以锅炉基本理论和应用技术为主，同时介绍了国内外工业锅炉的发展远景，并提供工业锅炉设计和运行所需要的数据。

全部丛书分以下诸册陆续出版：

锅炉燃烧技术及设备；

锅炉结构与设计；

锅炉制造工艺与检验；

锅炉水动力学及锅内设备；

锅炉辅助设备；

锅炉热工测试技术；

锅炉自动调节。

本丛书可作为工业锅炉（或热能工程）大专、中专、业余大学和电视大学锅炉班的教材，也可供工业企业从事热工、锅炉和热能工程专业的工程技术人员参考。

本丛书由哈尔滨工业大学热能工程(原锅炉)教研室编写。由陈崇枢、秦裕琨、杨励丹、范柏樟和李之光等同志组成编委会，负责丛书的审校工作。

《锅炉自动调节》是这套丛书的分册之一。确保锅炉安全与经济运行的重要措施是实现锅炉自动调节。本书着重介绍锅炉自动调节的基本原理、锅炉自动调节系统及工业锅炉的微机控制。绪论、第一至九章由王怀彬、张子栋编写，第十章由李炳熙、张子栋编写，全书由陈崇枢审阅定稿。

工业锅炉丛书编委会

目　录

绪　论……（1）
第一章　锅炉自动调节的基本概念……（4）
§ 1-1　自动调节和自动调节系统……（4）
§ 1-2　自动调节系统的分类……（7）
§ 1-3　调节过程及其性能指标……（9）
第二章　自动调节系统的基本环节……（12）
§ 2-1　环节（或系统）动态特性的表达方式……（12）
§ 2-2　环节的基本连接方式与总传递函数……（19）
§ 2-3　基本环节及其动态特性……（25）
第三章　调节对象的特性……（37）
§ 3-1　调节对象的基本结构特性……（37）
§ 3-2　单容调节对象的特性……（39）
§ 3-3　多容调节对象的特性……（45）
第四章　自动调节器……（52）
§ 4-1　双位调节器……（52）
§ 4-2　比例调节器……（53）
§ 4-3　比例积分调节器……（54）
§ 4-4　比例微分调节器……（58）
§ 4-5　比例积分微分调节器……（61）
§ 4-6　自动调节器动态特性的实现……（63）
§ 4-7　自动调节器与执行器的分类……（68）
第五章　单回路反馈调节系统的分析与整定……（83）
§ 5-1　调节系统的稳定性……（83）
§ 5-2　单回路反馈调节系统的分析……（90）
§ 5-3　单回路反馈调节系统的整定……（100）
第六章　锅筒锅炉给水自动调节系统……（108）
§ 6-1　给水自动调节的任务和调节对象的动态特性……（108）
§ 6-2　单冲量给水自动调节系统……（111）
§ 6-3　双冲量给水自动调节系统……（113）
§ 6-4　三冲量给水自动调节系统……（116）
§ 6-5　串级三冲量给水自动调节系统……（122）
§ 6-6　位式给水自动调节系统……（125）

第七章　锅筒锅炉蒸汽温度自动调节系统……（131）
§ 7-1　过热蒸汽温度自动调节的任务和调节对象的动态特性……（131）
§ 7-2　单冲量汽温自动调节系统……（132）
§ 7-3　双冲量汽温自动调节系统……（133）
§ 7-4　串级汽温自动调节系统……（139）
第八章　锅筒锅炉燃烧过程自动调节系统……（144）
§ 8-1　燃烧过程自动调节的任务……（144）
§ 8-2　燃烧过程调节对象的动态特性……（145）
§ 8-3　有中间粉仓的并列运行锅筒锅炉燃烧过程自动调节系统……（148）
§ 8-4　煤粉直吹式锅炉的燃烧过程自动调节系统……（150）
§ 8-5　燃油（或燃气）锅炉燃烧过程自动调节系统……（156）
§ 8-6　小型工业锅炉的燃烧过程自动调节系统……（157）
第九章　直流锅炉、单元机组的自动调节系统……（159）
§ 9-1　直流锅炉调节的特点和调节任务……（159）
§ 9-2　直流锅炉的动态特性……（159）
§ 9-3　直流锅炉的自动调节系统……（162）
§ 9-4　单元机组的自动调节概述……（166）
第十章　工业锅炉微型计算机控制……（173）
§10-1　概述……（173）
§10-2　信号的采集与传递……（177）
§10-3　直接数字控制系统的设计……（184）
§10-4　锅炉汽包水位的微机控制……（190）
§10-5　锅炉燃烧系统的微机控制……（195）
参考文献……（202）

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

绪　论

现代锅炉的生产过程可以实现高度的机械化，这就为锅炉的自动化提供了有利条件。锅炉自动化是提高锅炉安全性和经济性的重要措施。目前，锅炉的自动化主要包括自动检测、自动调节、程序控制、自动保护和控制计算机五个方面。

一、自动检测

利用检测仪表自动检查和测量反映锅炉运行的各种参数，如温度、压力、流量、水位、烟气中的含氧量、汽水品质、转速、热膨胀等，监视锅炉的运行情况及过程的发展趋势，为自动调节提供依据，确保锅炉正常运行。

检测仪表相当于人和自动化装置的眼睛，它的精度等级、灵敏度和稳定性影响自动控制的水平。

大型锅炉机组常采用巡回检测方式，对各运行参数和设备状态进行巡测，以便进行显示、报警、工况计算以及制表打印。

近年来，工业电视作为辅助检测手段已逐渐应用于锅炉，它能将锅炉设备的运行情况直接显示出来。如应用工业电视来显示锅筒水位、监视炉膛燃烧过程、监视锅炉排烟状况和水泵运行等。

二、自动调节

利用自动化仪表和设备，自动地保持锅炉在所规定的工况下运行。

在锅炉运行过程中，不可避免地经常受到各种因素的干扰，使运行工况偏离规定值。这时，就要依靠自动调节系统进行必要的操作来抵消干扰的影响，以使运行工况恢复正常。锅炉自动调节是锅炉自动化的主要组成部分。通常，锅炉自动调节主要包括给水自动调节、汽温自动调节和燃烧过程自动调节等。

锅炉自动调节是通过一系列自动化仪表和设备来实现的。国内主要以电动单元组合仪表和气动单元组合仪表为主。一些大型电站锅炉机组已开始采用组件组装式仪表和具有逻辑控制功能的系统。目前，少数电厂已开始采用计算机实现大型锅炉及发电机组的综合调节。一些工业锅炉已经采用微机控制。

三、程序控制

程序控制是根据锅炉设备的具体情况和运行要求，按预先拟定的顺序，有计划有步骤地对一台或几台设备进行一系列自动操作。

程序控制的流程是根据操作次序和条件编制的，并用具体装置来实现，该装置称为程序控制装置。程序控制装置必须具备必要的逻辑判断能力和连锁保护功能。即当完成

每一步操作后，它必须能够判断操作已经实现，并具备下一步操作条件时，才允许设备自动进入下一步操作。否则中断程序，同时报警。

锅炉局部程序控制项目主要包括锅炉点火、制粉系统启停、风机启停和水处理设备的运行等。

采用程序控制可以大大提高锅炉的自动化水平。它可以简化操作步骤，避免误操作，减轻劳动强度，加快机组启停速率，简化控制盘，缩小监视面，便于监视和操作。

四、自动保护

当锅炉运行发生异常现象或某些参数超过允许值时，保护装置发出报警信号或自动采取保护措施，以防止设备发生事故，保证人身安全。自动保护是保障设备及人身安全的最后把关措施，一般不宜轻易动作，但在动作时必须快速可靠。

锅炉自动保护项目包括灭火自动保护，高、低水位自动保护，超温、超压自动保护等。

对于一台锅炉，具体要投入哪些自动保护，保护动作达到什么程度，应根据实际需要决定。

五、控制计算机

控制计算机是一种多功能的自动化装置。它不仅具备上述的自动检测、自动调节、程序控制和自动保护等功能，而且具有突出的计算功能。它可以对报警原因进行分析，指出故障部位和处理意见，指导操作；它能在事故发生后追忆打印，记录事故发生前的参数，供事故分析用；它还可以对锅炉启停及运行过程中的工况进行计算和监视，对主要参数的变化趋势进行分析，监视操作程序等。

国内一些大容量机组已开始应用计算机控制，主要用来作数据处理、运行监督指导及局部闭环控制等。

实现锅炉的自动化，对锅炉的结构设计有如下几点要求：

(1) 锅炉应具有良好的动态特性，即迟延小，反应快，并便于操作；

(2) 能精确测量所需参数；

(3) 执行机构操纵灵活，准确可靠；

(4) 阀门、挡板等调节机构应具有良好的调节性能。

实现锅炉自动化的意义在于：

1. 提高锅炉运行的安全性

锅炉是在高温高压条件下工作的，安全运行是锅炉运行的首要要求。锅炉实现自动化可以提高锅炉运行的安全性。这是因为：第一，自动检测仪表能把锅炉的运行状况随时提供给运行人员和自动调节装置。第二，自动调节装置可以及时对锅炉的运行工况进行调节，使锅炉在最佳工况下运行。第三，程序控制装置能避免误操作。第四，自动保护装置对异常情况能及时报警并采取必要的安全措施。第五，控制计算机能使锅炉的安全可靠性进一步提高，大大延长机组寿命。

2. 提高锅炉运行的经济性

由于自动化装置能确保锅炉在最佳状态下运行，故可以提高锅炉的热效率。

锅炉实现燃烧自动调节，可保证最佳的燃料和空气比，使锅炉的排烟损失、碳未完全燃烧损失和气体未完全燃烧损失之和最小，因而使锅炉热效率提高。一般可提高效率0.5%～3%。

锅炉实现给水自动调节，可保证锅炉稳定运行，同时也提高锅炉热效率。因为无水位自动调节的锅炉，水位波动范围较大，当给锅炉上水时，锅炉汽压降低，为保证锅炉出力，就必须增加燃料量，即加大了燃烧设备的热负荷，使碳未完全燃烧损失和气体未完全燃烧损失增加。同时，间断的给水也会使省煤器中的水温提高，降低温差，提高排烟温度，增加排烟损失，降低锅炉效率。

采用程序控制和计算机控制，使锅炉的启停实现了自动化，这样就大大地缩短了启停时间，因而减少了各种热损失及工质损失。

上述收到的经济效益是人工操作难于收到的，所以说锅炉实现自动化是提高锅炉热效率、节约能源的重要措施。

3. 改善劳动条件

锅炉实现生产过程自动化，可使运行人员从繁重的体力劳动和紧张的精神负担中解脱出来。

4. 减少运行人员，提高劳动生产率

实现自动化，原来由人直接完成的工作可由自动化装置来代替，从而可以减少运行人员，提高劳动生产率。在电厂，有的单元机组每班运行人员仅有2～3人。

总之，实现锅炉自动化是促进社会主义现代化的重要措施之一。

第一章　锅炉自动调节的基本概念

§1-1　自动调节和自动调节系统

一、人工调节和自动调节

人工调节是指锅炉运行人员根据对锅炉运行参数变化原因的分析，人工操作某一阀门或挡板的开度，改变流入量或流出量，使参数恢复到规定值。

现在我们以锅筒锅炉的给水(水位)调节为例，来说明人工调节过程，由图1-1可见，当锅炉蒸汽流量发生变化而给水流量不变时，锅筒中的水位就会升高或降低，偏离规定水位。这时，锅炉运行人员就要关小或开大给水阀门进行人工调节，直到水位符合规定值并保持稳定为止。在进行人工调节过程中，运行人员首先通过眼睛观察锅筒水位的变化情况，然后经过头脑思索，判断给水阀门应该开大还是关小，再用手去调节阀门，使水位恢复到规定值。人工调节过程可归纳为：观察了解情况、分析决策和执行操作这样的循环过程。

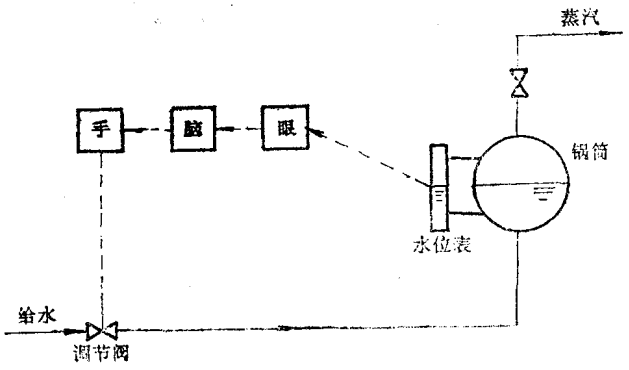

图1—1　水位人工调节

自动调节是指用一整套机械的或电气的装置来代替人工调节过程。

自动调节是在人工调节的基础上发展起来的。图1-2为锅炉水位自动调节示意图。图中，测量仪表代替了人的眼睛来观察了解情况，传送水位信号。调节仪表代替了人的大脑进行分析决策，它确定给水阀门的开关方向、大小及速度，并对执行机构发出指挥信号。执行机构带动给水阀门，改变其开度，从而达到调节水位的目的，这个过程就是自动调节过程。由此可见，自动调节既是模拟人工调节，又是人工调节的发展。

二、自动调节系统

自动调节系统是由起调节作用的自动化装置和被调节仪表控制的生产设备通过信号

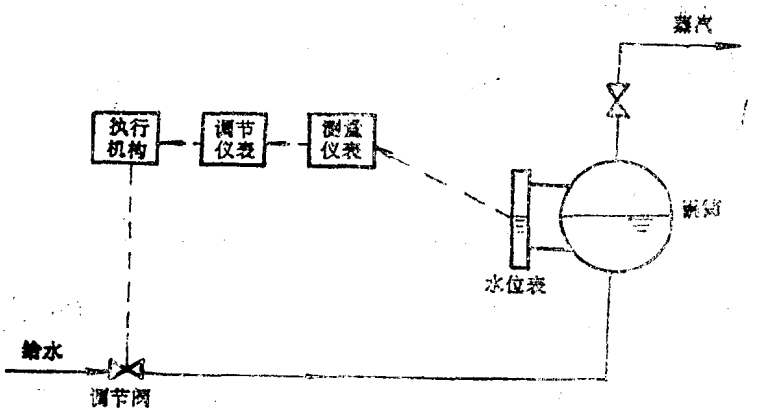

图1—2　水位自动调节

的传递、联系所构成的。例如，图 1-2 的水位自动调节系统中，当蒸汽流量（t/h)变化时，引起锅筒水位(mm)变化，测量仪表测量到水位的变化，并将其转换成电信号(mA)传递到调节仪表，这个信号在调节仪表中与标准水位的电信号(mA）进行比较后给执行机构发出调节信号(mA)，再由执行机构带动给水阀门，改变阀门开度(mm或%开度)，使给水流量(t/h)变化，最后使锅筒水位(mm)回到规定的位置。

如果把锅筒叫做被调对象，那么由被调对象、调节仪表等用传递信号按一定顺序连接起来而形成的一个完整整体，就称为自动调节系统。通常，自动调节系统用方框图表示。上述水位自动调节系统的方框图如图 1-3 所示。

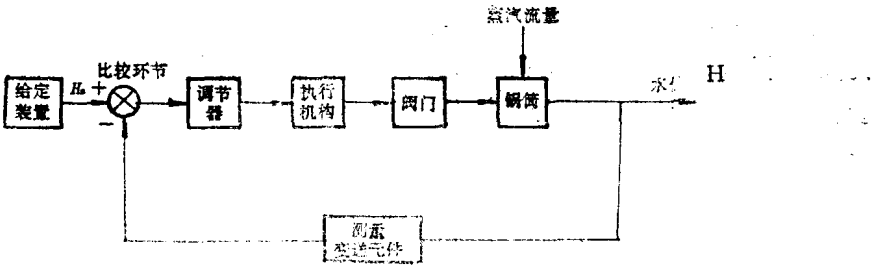

图1—3　水位自动调节系统方框图

自动调节系统方框图，是系统中每个器件或设备的功能、信号传递关系的图解表示。每个方框表示一个器件或一个设备、或几个设备的组合体，或一个局部生产过程。通常称之为环节。简单地说，自动调节系统是由环节构成的。

自动调节系统的方框图可简可详，应根据我们对调节系统研究的需要而定。

三、自动调节的常用术语

1．调节对象

被调节的生产设备或生产过程叫调节对象。如图 1-3 中的锅筒是水位调节系统的调节对象。调节对象，有时简称对象。

2．测量元件和变送器

测量元件的功能是感受并测量被测量的大小。如果测量元件输出的信号与后面的仪

表所要求的信号类型不同，则要增加一个能把测量信号变换为后面仪表可以接受的类型的装置，该装置称为变送器。在水位自动调节系统中，测量元件是水位表，变送器为差压变送器。

3．给定元件

给定元件是给出调节对象中被调节量的标准值的装置，该标准值称为给定值，是调节器动作的根据之一。如图1-3中的给定装置，它给出锅筒所要保持的标准水位值H_0。

4．调节器

调节器是用来实现调节对象进行自动调节的装置，是调节系统的指挥机构，能代替部分人脑的作用。它把从测量元件和给定元件来的信号加以比较，得出偏差，并根据偏差的大小按一定规律进行运算后，将相应的信号输出给执行机构，即指挥执行机构动作。在调节系统方框图上，为了清楚起见，有时把比较功能单独画出，构成比较环节。

5．执行机构

执行机构是接受调节器输出的信号来改变调节机构（如阀门等）开度，从而改变物料或能量进出量的机构。常用的执行机构有电动执行机构、气动执行机构等。

6．被调量

调节对象中要求等于或接近给定值的物理量。如图1-3中的水位H。

7．给定值

给定值是被调量的标准值，被调量必须等于或接近它。如图1-3中的H_0。

8．扰动

使被调量发生变化的因素称为扰动。发生在调节系统内部和外部的扰动，分别称为内扰和外扰。上述水位自动调节系统中，给水量、给水压力的变化称为内扰。而蒸汽流量、燃料量的变化则称为外扰。热工调节对象中，常发生阶跃扰动和脉动扰动，如图1-4所示。

（1）阶跃扰动

如图1-4（a）所示。阶跃扰动时间曲线呈阶梯形，表示扰动在某一时刻突然发生，并且跃变，此后则保持跃变后的值不变。如果跃变值为1，就叫单位阶跃扰动。

（2）脉动扰动

如图1-4（b）所示。脉动的发生与阶跃扰动一样，但到某一时刻后扰动又突然消失。

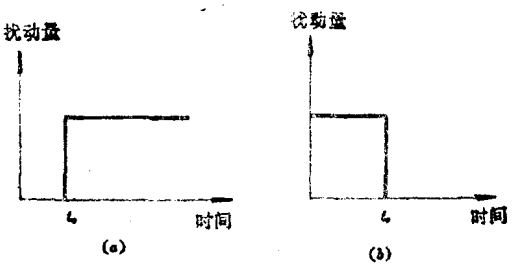

图1—4　扰动的两种形式

（a）阶跃扰动　（b）脉动扰动

9．反馈

由图1-3可见，调节器一方面通过调节阀把调节作用施加到调节对象（锅筒）上，使被调量（水位）回到给定值，这个信号的传递通道称为主回路。另一方面，调节对象又将被调量的信号通过变送器送回到调节器输入端——比较元件中去，它可以使调节器感受到是否存在偏差，并以此作为调节的依据，又可以使调节器在发生调节作用后了解到调节效果，即偏差是否消失，是否还要继续调节。这条将被调量的信号反回来送到调节器

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

的比较元件中去的通道，称为反馈回路，简称反馈。而主回路与反馈回路又是首尾相接，形成一个闭合回路，所以常把这类调节系统称为闭环反馈调节系统或称闭环调节系统。调节系统的反馈都是负反馈，即给定值和被调量的信号在进入调节器时，在方向上是相反的。

§1-2 自动调节系统的分类

自动调节系统的分类方法较多，这里仅介绍其中的几种。

一、按给定值变化的规律，自动调节系统可有如下三种分类方法

1. 定值调节系统

在整个生产过程中，被调量的给定值始终保持恒定不变，也就是被调量保持为某一固定数值的系统，叫做定值调节系统。锅炉的水位、汽温、汽压等自动调节系统均属于定值调节系统。

2. 程序调节系统

在整个生产过程中，被调量的给定值是时间的已知函数的调节系统，叫做程序调节系统。在程序调节系统中，给定值的变化是预先安排好的、有规律的。通过系统中的程序给定装置，使给定值按工艺要求的预定程序变化，从而使被调量也跟随给定值的程序变化。锅炉按一定的升温、升压曲线启动时，汽温和汽压的调节系统均属于程序调节系统。

3. 随动调节系统

在整个生产过程中，被调量的给定值是时间的未知函数的调节系统，叫做随动调节系统。在随动调节系统中，给定值是按事先不能确定的某些随机因素而变化的，要求调节系统必须跟随这种变化进行调节。锅炉的负荷调节系统即属于随动调节系统，它必须随时满足外界负荷的需要。

二、按调节系统的结构，也有如下三种分类方法

1. 闭环调节系统

闭环调节系统是指调节器和调节对象之间存在正向作用和反向联系的系统。由于它是按反馈原理工作的，故亦称反馈调节系统，如图1-3所示。闭环调节系统是自动调节中最基本的调节系统。在闭环调节系统中，信号是沿着调节系统的闭合回路传递的，只要被调量不等于给定值，调节器就会连续不断地发生调节作用，通过不断反馈、调节，要到被调量符合要求为止。

2. 开环调节系统

开环调节系统是指调节器与调节对象之间只有正向作用，而没有被调量的反馈回路的系统，如图1-5所示。在开环调节系统中，输出量对系统的调节作用没有影响，调节器仅根据直接或间接反映扰动输入的信号进行调节。这种调节方式也称为前馈调节。由于在开环系统中没有被调量的反馈，对调节后的被调量数值，既不能检查，也不能纠

正，因此开环系统一般只用在对被调量要求不严格，或者测量被调量较难而测量扰动作用较方便的生产过程。在锅炉燃烧系统中，要经常调节送风量，而其依据是炉膛烟气含氧量（O_2%），但测量含氧量较困难，因此调节系统就按主要扰动量——燃料量的变化来调节送风量，使燃料量和送风量保持一定比例，此即采用了开环调节系统，如图1-6所示。

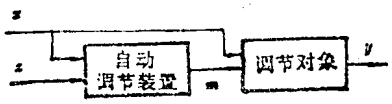

图1—5　开环调节系统方框图

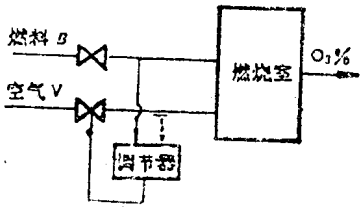

图1—6　开环调节系统举例

3. 复合调节系统

复合调节系统是在闭环调节系统中加入开环调节系统而构成的。因此也称前馈-反馈调节系统。如图1-7所示。在复合调节系统中，前馈部分提供一个时间上超前的输入作用，进行粗调，以提高调节的速度和精度。反馈部分进行细调和校正。复合调节比一般的闭环调节效果好，因此应用较广。

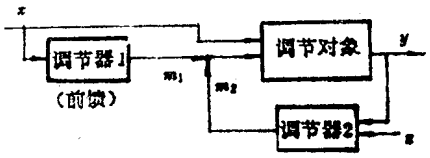

图1-7　复合调节系统方框图

三、按系统的输入和输出信号的数量，自动调节系统可有两种分类方法

1. 单输入单输出系统

只有一个输入信号和一个输出信号的系统，叫做单输入单输出系统。单输入单输出系统可以是只有一个闭合回路的调节系统，也称单回路系统，如图1-3所示，也可以是有几个闭合回路组成的调节系统，也称多回路系统，如图1-8所示。

2. 多输入多输出系统

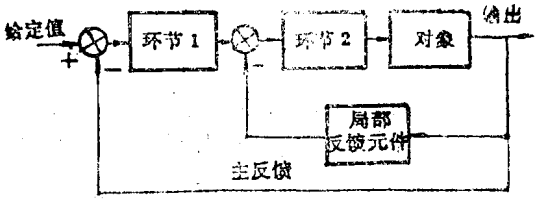

图1—8　多回路系统

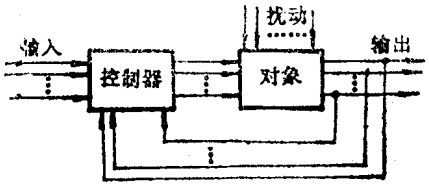

图1—9　多输入多输出系统

有两个或两个以上输入信号和输出信号的系统，叫做多输入多输出系统，也称为多变量系统，如图1-9所示。通常，多变量系统需要借助计算机进行分析研究。电厂中大型单元机组协调控制的主控系统即属于多输入多输出系统。

四、按调节系统的特性，可有两种分类方法

1. 线性调节系统

用线性微分方程描述的调节系统，叫做线性调节系统。线性系统具有齐次性和叠加性。

2. 非线性调节系统

用非线性微分方程描述的调节系统，叫做非线性调节系统。非线性系统不能应用叠加原理。工程中常把非线性特性在工作点附近用泰勒级数展开，进行线性化处理，然后再用线性调节理论进行分析。

在锅炉自动调节中，最基本的是单输入单输出的单回路、线性调节系统。

§1-3 调节过程及其性能指标

一、调节过程（也称过渡过程）

当处于平衡状态的调节对象受到扰动作用时，被调量与给定值间就会出现偏差。根据这个偏差，调节器指挥执行机构动作，从而使被调量恢复到给定值，达到新的平衡。这种通过调节作用而使系统达到新的平衡状态的过程，称为调节过程，或过渡过程。在这一过程中，被调量是随时间而变化的，如图 1-10 所示。

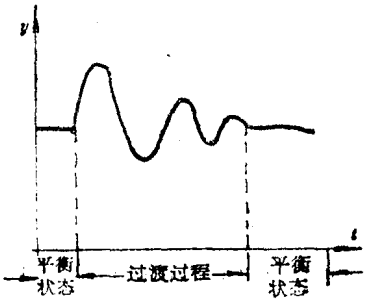

图1—10 过渡过程

在生产过程中，可能遇到的扰动形式是多种多样的。不同形式的扰动作用，其调节过程是不一样的。因此，必须在同一扰动作用下来比较调节系统工作品质的好坏。通常选定典型的输入信号，如阶跃函数、斜坡函数、脉动函数，加速度函数和正弦函数等，作为研究调节系统工作品质的标准输入信号。在典型的输入信号作用下，比较输出信号的过渡过程曲线所表现出来的特征，即可评价调节系统的优劣。

闭环调节系统在阶跃扰动作用下，被调量的调节过程可能有如图 1-11 所示的几种不同形式。其中(*a*) 为非周期衰减过程，(*b*) 为非周期扩散过程，(*c*) 为衰减振荡过程，(*d*) 为等幅振荡过程，(*e*) 为扩散振荡过程。可以把这五种过渡过程分为不稳定的过渡过程、稳定的过渡过程和介于稳定和不稳定之间的过渡过程。

1. 不稳定的过渡过程

自动调节系统受到扰动后，被调量不能达到稳定的数值，而且逐渐远离给定值，其过渡过程呈非周期扩散或扩散振荡的形式，这就叫做不稳定的过渡过程，如图 1—11 (*b*)、(*e*) 所示。在生产过程中，不稳定的过渡过程是不能采用的。

2. 稳定的过渡过程

自动调节系统在任何扰动作用下，被调量均能够达到稳定的数值，而且与给定值一致（或误差在允许的范围内），其过渡过程呈非周期衰减或衰减振荡形式，这种过程称为稳定的过渡过程，如图 1-11 (*a*)、(*c*) 所示。对于锅炉调节而言，应根据具体要求来选定调节过程形式。对于燃烧过程，稳定性要求较高，应采取接近图 1-11 *a* 的形式；对于给水调节过程，快速性要求较高，故应采取图1-11(*c*)的形式。

3. 介于稳定和不稳定之间的过渡过程

自动调节系统受到扰动作用后，被调量不能达到稳定的数值，而且等幅振荡，永远不等于给定值。这种过程介于稳定与不稳定之间，也称为边界稳定。严格地说，它属于不稳定的范畴。图1-11（d）所示的过程就是等幅振荡过程。这种调节过程，如果在调节质量要求不高、波动未超出被调量允许范围时，是可以采用的。

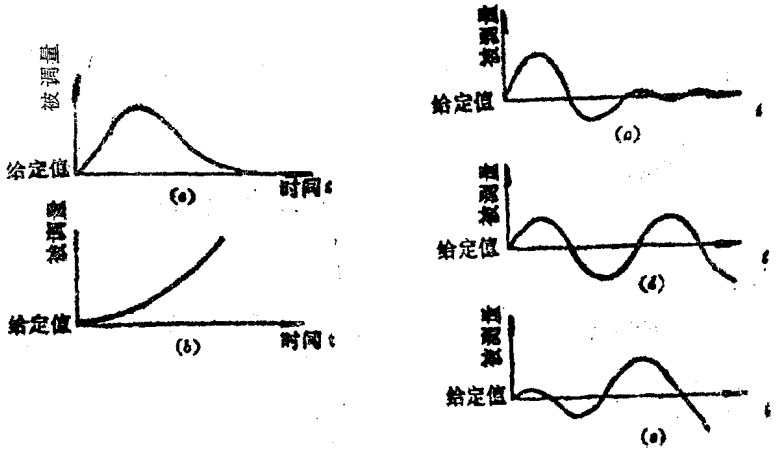

图1—11 过渡过程的几种基本形式

二、性能指标

调节过程的质量可以根据不同的指标来评价。所谓性能指标，就是指衡量系统性能好坏的一些特征量。一般从稳定性、准确性和快速性三个方面来衡量调节过程的质量。

1. 稳定性

调节过程质量的好坏，稳定性是对调节系统的基本要求，只有稳定的调节系统才能完成正常的调节任务。调节系统的稳定性，一般可用衰减率ψ表示。衰减率是指每经过一个周期，被调量波动幅值衰减的百分数，在图1-12中为同方向的两个相邻波幅之差与第一个波幅的比值，即

$$\psi=\frac{y_1-y_3}{y_1}=1-\frac{y_3}{y_1} \tag{1-1}$$

式中 y_1——第一个波的幅值；

y_3——第三个波的幅值。

根据ψ的数值，就可以判别调节过程的性质。

如果$\psi=1$，则为非周期衰减过程，如图1-11(a)所示；

如果$1>\psi>0$，则为衰减振荡过程，如图1-11(c)所示；

如果$\psi=0$，则为等幅振荡过程，如图1-11(d)所示；

如果$\psi<0$，则为扩散振荡过程，如图1-11(e)所示。

由此可见，稳定的调节过程，其衰减率应大于零，这是调节系统能否可用的必要条件。故可把$0<\psi\leqslant1$时ψ的具体数值作为系统稳定裕量（富裕量或储备量）的一种量度。稳定裕量过大或过小对调节过程都是不利的，一般希望$\psi=0.75\sim0.90$。

稳定裕量也可以用过调量σ_p表示，即

$$\sigma_p = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\% \tag{1-2}$$

式中$y(t_p)$——调节过程中被调量偏离给定值的最大偏差，所对应的时间t_p为曲线达到该最大偏差（即第一个峰值）所需的时间，如图1-12所示。

$y(\infty)$——调节过程结束后，被调量的稳态偏差。

σ_p越小，说明调节过程进行得越平衡，稳定裕量越大；反之，σ_p越大，说明过调现象严重，过程振荡加剧，调节过程持续时间长。一般以保证在每次调节过程中，振荡次数为2～3次为宜。

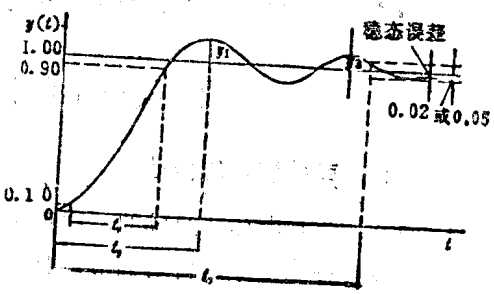

图1—12　过渡过程性能指标示意图

2．准确性

准确性是评价调节过程质量好坏的重要指标之一，一般用被调量的稳态误差表示。稳态误差是指在典型输入信号作用下，当时间趋近于无穷大时的稳态输出与给定值之差（也称为残余偏差、余差或静差），如图1-12所示。通常，希望稳态误差越小越好。当稳态误差超过规定，就表明系统的调节精度不能满足生产的要求。

3．快速性

快速性是指调节过程持续时间的长短，一般可用下述指标表示：

（1）调节时间t_s

定义曲线衰减到与稳态值之差不超过±5%或±2%时所需要的时间为调节时间t_s。一般希望t_s尽可能小，这样可以保证在下一次扰动发生之前，上一次扰动所引起的调节过程已经结束。

（2）峰值时间t_p

过渡过程曲线达到第一个峰值所需要的时间。

（3）上升时间t_r

上升时间有三种定义，即过渡过程曲线从稳态值的10%上升到90%所需的时间；从稳态值的5%上升到95%所需要的时间；从零上升到第一次达到稳态值所需要的时间。

不同的生产过程，对上述三方面的要求和排列主次地位是不同的。对于一个调节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。一般总是在稳定性好的前提下，力求准确性和快速性。

第二章　自动调节系统的基本环节

§2-1　环节(或系统)动态特性的表达方式

一、环节（或系统）的特性

自动调节系统是由环节组成的，这里环节可以代表一个器件、一个设备或一个组合体，它是真实设备的抽象。自动调节就是通过环节之间的信号传递和转换来实现的。

环节（或系统）的特性是指输入信号与输出信号之间的函数关系。环节的输入信号和输出信号处于平衡状态时的关系，称为静态特性，它们在变动状态时的关系称为动态特性。

研究环节（或系统）的静态特性具有重要意义，因为生产过程经常是在相对平衡工况下进行的，此时设备的静态特性是起决定作用的，因此不了解设备的静态特性就不能正确使用它。同样，对于一个调节系统而言，其平衡状态是由各个组成环节的静态配合来决定的，因此静态特性的好坏，将直接影响调节质量。

当调节系统工作时，系统中各个组成环节的状态都处于变动之中，它们的输入信号和输出信号均随时间而变化。调节作用就是在动态过程中发挥作用的。因此，研究环节（或系统）的动态特性具有更为重要的意义。

二、动态特性的表达方式

环节（或系统）的动态特性有多种表达方式，其中常用的有微分方程法、传递函数法、阶跃响应（飞升特性）法和频率特性法等。下面分别加以介绍。

1. 微分方程法

根据物理规律对系统进行分析，求出联系输入量和输出量及其导数的微分方程，用以描述系统的动态特性，这种方法称为微分方程法。微分方程法是表达环节(或系统)动态特性的最基本方法，具有直观、定量准确等优点。

对于复杂的环节（或系统），可以先把它分解为若干个简单环节，写出各个简单环节的动态方程，然后经过综合而得到一个高阶微分方程，该高阶微分方程即为整个设备或系统的动态方程。

下面举例说明微分方程的建立过程。

例 2-1　用无保护套管的热电偶测温，如图 2-1 所示。输入量为被测介质温度θ，输出量为热电偶的热电势E。写出它的动态特性表达式。

解　设热电偶的冷端温度不变，假定为0℃，热电偶的热端温度为θ_e。

在动态时，被测介质温度θ、热电偶热端温度θ_e和热电势E都是时间的函数。热电

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com