



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

REGONG GUOCHENG ZIDONG TIAOJIE

热工过程自动调节

(第二版)

丁轲轲 主编 刘久斌 林青 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

Thermal Energy & Power



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

REGONG GUOCHENG ZIDONG TIAOJIE

热工过程自动调节

(第二版)

主 编 丁轲轲
副主编 刘久斌 林青
编 写 裘浚隽
主 审 吕震中 于向军



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

Thermal Energy & Power

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书主要论述了自动调节的基本理论和火力发电厂热工过程中主要的自动调节系统。全书共分为十章，前六章介绍了自动调节的基本理论，后四章介绍了自动调节技术在火力发电厂中的应用。书中内容体现出较强的工程实用性，结合热工过程自动化技术的发展，以一定的篇幅列举了火力发电厂中自动调节的实例并加以分析。

本书可作为高等院校热能与动力工程专业热工过程自动调节课程的本科教材，也可供高职高专和成人高校学生使用，同时可作为从事自动控制工作的技术人员学习的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

热工过程自动调节/丁轲轲主编. —2版. —北京: 中国电力出版社, 2010.12

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 1192 - 3

I. ①热… II. ①丁… III. ①火电—热力工程—自动控制系统—高等学校—教材 IV. ①TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 241756 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 2 月第一版

2011 年 2 月第二版 2012 年 1 月北京第七次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.75 印张 333 千字

定价 23.50 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

热工过程自动调节在热工控制领域占据着十分重要的地位，在电力生产过程中对安全经济运行具有十分重要的意义。本书主要涉及自动调节原理和自动调节系统两部分。自动调节原理是指导热工控制的基础，自动调节系统介绍的是火力发电厂整个热工控制系统的主要控制单元。

本书根据热能与动力工程专业“热工过程自动调节”课程的教学基本要求，结合近几年来火力发电厂热工自动化水平的发展和专业教学实践编写而成。在编写过程中，编者力求理论联系实际，保证基本理论的系统性，循序渐进，深入浅出，在阐述自动调节系统时，既介绍中、小型机组的常规调节系统，又列举了大型机组的工程实例，介绍较为先进的控制策略，反映出近年来火电厂热工控制的新技术和新水平。

本书由丁轲轲教授任主编，刘久斌教授和林青副教授任副主编。丁轲轲编写第一、五～七章，林青编写第二、十章，刘久斌编写第三、八、九章，裘浔隽编写第四章。全书由东南大学吕震中、于向军教授主审，编者在此深表谢意。

由于编者水平所限，书中疏漏之处在所难免，衷心欢迎读者批评指正。

编 者

2010年12月

第一版前言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神，加强教材建设，确保教材质量，中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校，满足学科发展和人才培养的需求，坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

随着自动控制技术的不断发展，热工过程自动调节在火力发电厂中占据着十分重要的地位，是电力生产过程中安全经济运行的保证。

本书根据热能与动力工程专业“热工过程自动调节”课程的教学基本要求，结合近几年来火力发电厂热工自动化水平的发展和专业教学实践编写而成。在编写过程中，编者力求理论联系实际，保证基本理论的系统性，循序渐进，深入浅出，在阐述自动调节系统时，既介绍中、小型机组的常规调节系统，又列举了大型机组的工程实例，介绍较为先进的控制策略，反映出近年来火电厂热工控制的新技术和新水平。

本书由丁轲轲教授编写第一、五、六、七章，林青副教授编写第二、四、十章，刘久斌副教授编写第三、八、九章。本书由丁轲轲教授任主编，刘久斌副教授任副主编。全书由吕震中教授担任主审，编者在此深表谢意。

由于编者水平有限，书中的不足之处在所难免，衷心欢迎读者批评指正。

编者

2006年8月

目 录

前言

第一版前言

第一章 自动调节的基本概念	1
第一节 自动调节的系统组成和实现方法	1
第二节 自动调节的常用术语	2
第三节 系统方框图	2
第四节 自动调节系统的分类	4
第五节 自动调节系统的性能	7
习题	10
第二章 自动调节系统的数学模型	12
第一节 静态特性和动态特性	12
第二节 拉普拉斯变换	18
第三节 传递函数和输出响应	24
第四节 基本环节及环节的连接方式	27
习题	43
第三章 热工对象动态特性和自动调节器	46
第一节 热工对象动态特性	46
第二节 调节器的动态特性	50
第三节 工业调节器调节规律的实现方法	52
第四节 控制系统的 SAMA 图例	59
习题	65
第四章 系统的时域分析	66
第一节 时域分析的基本概念	66
第二节 一阶系统性能分析	67
第三节 二阶系统分析	69
第四节 高阶系统的时域分析	78
第五节 调节系统的稳定性与代数判据	80
习题	87
第五章 系统的频域分析	89
第一节 频率特性的基本概念	89
第二节 基本环节的频率特性	92
第三节 稳定性分析和判据	96
习题	105

第六章 自动调节系统的整定	107
第一节 系统的整定分析	107
第二节 单回路调节系统的整定	110
第三节 串级调节系统的整定	113
习题	116
第七章 汽包锅炉给水自动调节系统	117
第一节 被调对象的动态特性	117
第二节 给水调节系统分析和整定	119
第三节 给水调节系统实例	126
习题	128
第八章 汽温调节系统	129
第一节 过热蒸汽温度调节系统分析和整定	129
第二节 再热蒸汽温度调节系统分析	142
第三节 大机组汽温控制系统	146
习题	151
第九章 汽包锅炉燃烧过程自动控制系统	153
第一节 概述	153
第二节 燃烧过程控制对象的动态特性	154
第三节 反映燃料量信号的测取	156
第四节 锅炉燃烧控制的基本策略	159
第五节 燃烧过程控制系统实例	167
习题	183
第十章 单元机组主控制系统	184
第一节 概述	184
第二节 调节对象的动态特性	185
第三节 负荷控制方式	187
第四节 前馈控制的应用	194
第五节 滑压运行机组的协调控制方案	201
第六节 负荷指令处理	202
第七节 单元机组主控系统实例	207
习题	210
参考文献	211

第一章 自动调节的基本概念

第一节 自动调节的系统组成和实现方法

自动调节技术是在人工调节的基础上演变发展而成的，随着生产技术和生产工艺的发展，自动调节的技术水平也不断提高。从调节系统各基本部件的功能上看，自动调节和人工调节是相同的，人们在生产实践中，从早期的人工调节过程逐步发展到目前高水平的自动调节过程，无非是自动调节的设备替代了人的生理器官，计算机控制程序体现了人在控制领域的学术思想。生产过程实现自动化，能有效地改善劳动条件，有利于现代化生产，有利于提高生产质量，降低生产成本。

自动调节系统由哪些主要部件组成？这些部件的系统如何组态？如何实现自动调节的方法？是我们首先需要解决的问题，现以一个实现水槽水位自动调节的方法为例进行介绍。

图 1-1 所示为水位自动调节示意。图中水槽的水位是输入水流量 q_1 和输出水流量 q_2 是否平衡的标志。当水槽水位由于某种原因（如 q_2 的增加）偏离正常水位，这时水位检测元件发出信号，转换元件将检测到的信号转换为统一的标准信号（如电流或电压信号），并传递到调节元件的输入端，调节元件将此信号与正常水位信号比较，作出判断，发出相应的调节信号去执行机构，执行机构根据调节信号的大小，改变调节阀的阀门开度，使输入水流量 q_1 发生变化，直至水位恢复到正常值。

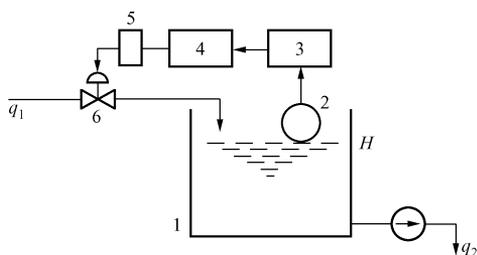


图 1-1 水位自动调节示意
1—水槽；2—检测元件；3—转换元件；4—调节元件；5—执行机构；6—调节阀

以上是实现自动调节最基本的方法。要完成好自动调节的任务，必须要重视以下几个问题：

(1) 检测部件的检测准确性是自动调节的先决条件。另外，检测部件的检测快速性也是十分重要的，它直接影响自动调节的调节质量。在热工过程自动调节中，对温度和压力等物理量的检测技术比较成熟，对煤粉量的检测目前还比较困难，对蒸汽流量和烟气含氧量的检测条件又比较苛刻，这些问题对我们今后研究自动调节方案时都必须引起重视。

(2) 调节部件是自动调节设备中的一个核心部件，它将转换部件输出的信号和预先规定要求达到的正常信号值进行比较，作出判断后以预定的规律发出调节信号（指令）。根据上述两个信号的偏差值或者两个信号偏差的变化速度决定发出什么样的调节信号是自动调节的技术关键。在后续章节中，我们将以大量的篇幅对其进行研究分析。

(3) 调节部件发出的调节信号是通过哪个物理量的改变去实现调节也是值得研究的问题（水槽水位调节中我们是通过物理量 q_1 来调节水位的）。我们对这个物理量的选择条件是调节的快速程度和可操作程度。

(4) 掌握被调节的生产设备的特性，是设计自动调节方案前需要做的一项工作。对于常

规的自动调节系统,掌握被调节的生产设备的特性,以利于我们有针对性地设计出合理的自动调节系统,提高自动调节的效果。

第二节 自动调节的常用术语

人们在长期的工作中,为了记录、整理、学习和交流从实践中得来的经验和知识,常采用大家所公认的习惯用语,我们称为术语。自动调节领域中,基本的常用术语如下:

(1) 被调对象。被调对象就是被调节的生产设备或生产过程。在图 1-1 的水槽水位自动调节系统中,被调对象就是水槽。

(2) 被调量。被调量就是通过调节需要维持的物理量。在图 1-1 的水槽水位自动调节系统中,被调量就是水槽水位。在发电厂的给水自动调节系统中,被调量是汽包水位;在主蒸汽温度自动调节系统中,被调量是主蒸汽温度。

(3) 给定值。给定值是根据生产要求,被调量的规定数值。在图 1-1 的水槽水位自动调节系统中,给定值就是指生产过程中希望的水位值。

(4) 扰动。扰动是引起被调量变化的各种原因。在图 1-1 的水槽水位自动调节系统中,输出水流量 q_2 的变化就是一种扰动。

(5) 调节机关。调节机关是在调节作用下,用来改变调节作用量的装置。在图 1-1 水槽水位自动调节系统中,调节机关就是控制输入水流量 q_1 的调节阀门。在发电厂中,给水调节阀、减温水调节阀、风道的挡板等都是调节机关。

(6) 调节作用量。调节作用量是在调节作用下,控制被调量变化的物理量。在图 1-1 水槽水位自动调节系统中,调节作用量就是输入水流量 q_1 。在发电厂中,给水流量就是控制汽包水位高低的调节作用量,减温水流量就是控制主蒸汽温度高低的调节作用量,燃料量就是控制主蒸汽压力高低的调节作用量。

第三节 系统方框图

在描述或分析调节系统时,我们往往把调节系统用方框图的形式来表示。系统方框图是将实际的生产设备以及它们相互间的连接关系用抽象的形式表示,是一种对调节系统进行描述或分析的有力工具和非常直观的表达方式。

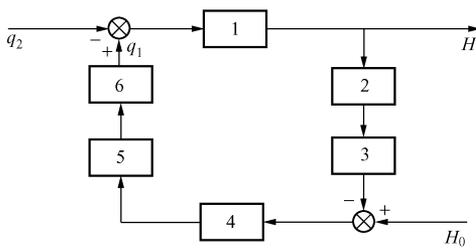


图 1-2 水位调节示意

1—水槽; 2—检测元件; 3—转换元件; 4—调节元件; 5—执行机构; 6—调节阀

为了便于说明,我们把图 1-1 的水槽水位自动调节系统以方框图的形式表达,如图 1-2 所示。

系统方框图主要由环节方框和信号线组成。图 1-2 所示的每一个方框代表一个能完成一定职能的元件,称为环节;连接各个环节且带有方向箭头的线称为信号线。

一、环节

环节是一个抽象体。每个环节都有对应的输入量和输出量,输入量是引起该环节发生作

用的原因，输出量是该环节发生作用的表现和结果。我们从自动调节的角度去分析研究调节系统时，往往重视的是环节的特性，也就是指环节输入量和输出量之间的因果关系（数学关系），不一定去观察具体的物理系统。环节示意如图 1-3 所示。

图 1-3 (a) 所示为一个电阻分压器，把电阻分压器作为一个环节，电压 u 作为环节的输入量，电压 u_2 作为环节的输出量，根据电路知识可知

$$u_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u = ku \quad (1-1)$$

$$k = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

式中 k ——分压比。

图 1-3 (b) 所示为杠杆系统，把杠杆系统作为一个环节，杠杆左端的位移量 x 作为环节的输入量，杠杆右端的位移量 y 作为环节的输出量，根据力学知识可知

$$y = \frac{b}{a} x = kx \quad (1-2)$$

$$k = \frac{b}{a}$$

式中 k ——两臂长比。

不难看出，虽然上述两例的物理系统不同，但是它们数学模型的形式完全相同，两个环节的因果关系类同，称它们为同类环节。

方框图中的每一个方框代表一个元件或一个过程在具体输入量作用下与输出量的因果关系，但并不是说一个元件只能用一个方框表示。在不同的输入作用下，环节反应特性一般是不同的，因此，同一个元件在反映两个或多个不同特性时，可以用两个或多个方框来表示它们不同的因果关系。

根据分析研究自动调节系统的目的和要求，在确定环节所包括的范围时可以灵活地选择，把非重点研究的几个元件或设备合并归纳为一个环节，把重点研究的元件或设备相应分为几个环节，这样既有利于具体的分析研究，又能使调节系统方框图简洁明了。例如，可以把图 1-2 的系统方框图简化为图 1-4 所示。

图 1-4 (a) 中，把输入流量的调节阀和水槽作为一个环节，可称为广义对象。在图 1-4 (b) 中，把输入流量的调节阀和调节元件作为一个环节，称为调节装置。前者不需要观察进水流量的变化，后者不需要观察输入流量的调节阀开度的变化。由此可见，同一个自动调节系统的系统方框图不是唯一的，环节可大可小，系统方框图可简可详，完全取决于分析研究系统的需要而定。

二、信号线

信号线决定了系统中各环节之间的组态方式。每一个环节的输入量和输出量之间都遵循

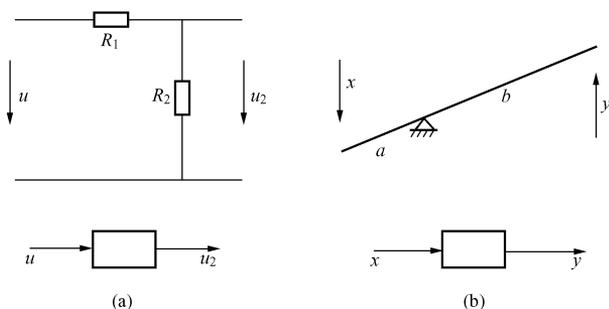


图 1-3 环节示意

(a) 电阻分压器；(b) 杠杆系统

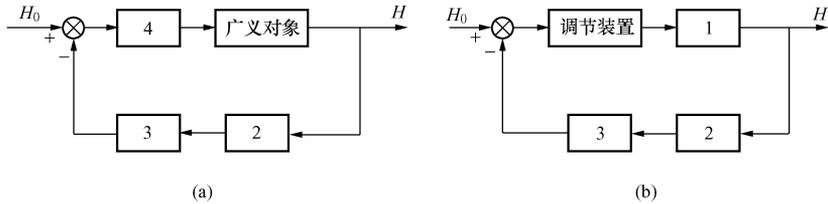


图 1-4 系统方框图不同的表达方式

(a) 把输入流量的调节阀和水槽作为一个环节；(b) 把输入流量的调节阀和调节元件作为一个环节

“单向性”原则，这意味着输入量是输出量变化的原因，输出量变化是输入量作用的结果，输出量的变化不能反过来影响输入量，信号的流向不能逆行，可以用图 1-5 所示的方框图说明。

图 1-5 中， q_2 的变化通过环节 1（水槽）引起 H 发生变化， H 的变化通过环节 2（阀门）引起 q_2 变化，而不能理解为 H 的变化通过环节 1（水槽）引起 q_2 的变化。

在方框图中，信号线只表示信号的传递关系和方向，而不是代表物料是从水槽中向外流出的，但是在方框图中， q_2 是作为引起水槽水位变化的原因，是水槽这个环节的输入量，它的方向应该指向代表水槽的那个方框的。由此可见，工质流程图和方框图的作用和画法有着本质上的区别，两者不能混淆。

在系统方框图中，还常用到信号的相加和引出，在信号的相加处和引出处用图 1-6 所示的画法符号表示。

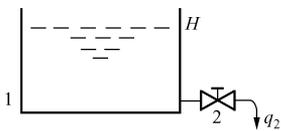


图 1-5 水槽方框图

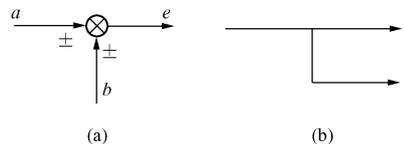
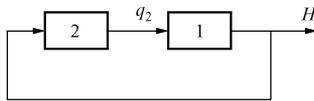


图 1-6 信号的汇交点和分支点

(a) 信号叠加；(b) 信号引出

图 1-6 (a) 是信号相加点的符号，也称为信号叠加符号，两个信号 a 和 b 的量纲必须相同，其数学表达式为

$$e = \pm a \pm b \quad (1-3)$$

图 1-6 (b) 是信号引出点的符号，表示信号以相同的数值送到两个（或多于两个）的地方去。这里要注意的是，引出点指信号的传递，而决不是物质或能量的分流和支取。因此，引出点前后的信号是相等的。

第四节 自动调节系统的分类

一、按给定值信号的特点分类

1. 恒值调节系统

在生产过程中，自动调节系统的给定值恒定不变，也就是使被调量保持为一固定数值。在发电厂生产过程中，汽包锅炉给水自动调节系统、主蒸汽温度自动调节系统都采用恒值调

节系统，这是在热工过程自动调节中应用最多的一种自动调节系统。

2. 程序调节系统

这类系统的给定值是时间的已知函数，给定值随时间变化是预先设定的，调节系统用来保证被调量按预先设定的随时间变化的数值来改变。例如，金属热处理炉的炉温自动调节系统中，被调量炉温是依据工艺要求随时间预先设定的。在这类调节系统中，需要有一套专门的可设定的程序发送装置，以产生一个按一定关系随时间变化的给定值信号。

3. 随机调节系统

随机调节系统的给定值是不可预知的，其数值决定于一些外来因素的变化，所以调节结果使被调量也跟随这个给定值随时改变。例如，机组按条件启动时，需要根据机组某些部件的温差或应力来随时确定升温、升压的速度，由于每次启动时机组的热状态不同，因而每次的升温、升压速度都不同，这时的汽温、汽压调节系统就是随动调节系统。又例如，在锅炉燃烧过程自动调节中，要求空气量随燃料量的变化而成比例变化，燃料量是随负荷变化而变化的，而负荷的变化规律是不能预定的，所以这种自动调节系统就是随机调节系统。

二、按调节系统的结构分类

1. 反馈调节系统

反馈调节系统是调节系统中最基本的一种系统类型。它的基本工作原理是把被调量信号经过反馈回路送到调节器的输入端和给定值信号进行比较，比较后的偏差信号作为调节器的调节依据，这种调节系统在结构上，为调节结束时被调量等于给定值提供可能性。由于反馈回路的存在，形成一个闭合的环路，所以也称为闭环调节系统。反馈调节系统如图 1-7 所示。

图 1-7 是一个冷、热水混合容器的水温自动调节系统。流入混合容器的冷水被引入的蒸汽加热，流出的热水流量为 q ，设计的水温自动调节系统属反馈调节系统类型。被调量（水温）经温度检测元件送到温度变送器变换为电信号 I_t 和给定值 I_0 比较，其偏差信号为调节器的输入信号，调节器依据偏差信号，发出调节信号改变蒸汽调节阀门的开度，使蒸汽流量 D 发生改变，最后可使水温等于给定值。

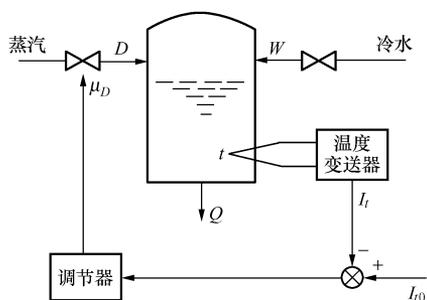


图 1-7 反馈调节系统

由此可见，反馈调节系统是依据偏差进行调节的，其特点是：

(1) 在调节结束时，可以使被调量等于或接近于给定值；

(2) 当调节系统受到扰动作用时，必须等到被调量出现偏差后才开始调节，所以调节的速度相对比较缓慢。

2. 前馈调节系统

前馈调节系统中不存在反馈回路，调节器只是根据直接或间接反映扰动的输入信号进行调节。它的基本工作原理是调节器接受了被调对象受到的扰动信号，按预定的调节规律立即对被调对象产生一个调节作用，以抵消扰动信号对被调量的影响。前馈调节系统如图 1-8 所示。

图中冷水流量信号经流量检测元件送到差压变送器变换为电信号 I_w ，调节器依据 I_w 的

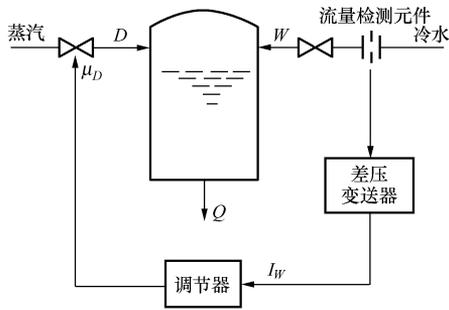


图 1-8 前馈调节系统

前馈调节系统由于无闭环回路存在，也称为开环调节系统。

3. 复合调节系统

根据前馈和反馈调节系统的各自特点，在生产过程中，常常相互结合使用，组成前馈 - 反馈复合调节系统。将图 1-7 和图 1-8 综合后，就组成了复合调节系统，如图 1-9 所示。

当冷水流量 W 发生扰动（如水压自发性的变化等）作用到调节系统而被调量（水温） t 还没有反应之前，先由前馈部分依据扰动信号进行粗调，尽快使调节作用（蒸汽流量 D 的改变）一开始就能大致抵消扰动作用（冷水流量 W 的改变）的影响，被调量不至于发生大的变化，调节作用和扰动作用不可能完全抵消，被调量和给定值出现的一些偏差，则可以由反馈部分进行细调。采用复合调节系统后，吸取了前馈和反馈系统各自的长处，在调节的过程中，水温偏离给定值不会太大，调节结束时，水温可等于或接近于给定值。另外，整个调节时间也可以缩短，调节质量得到改善。

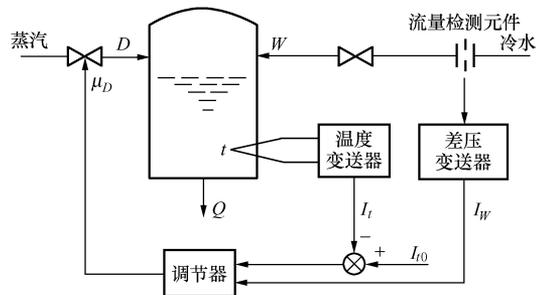


图 1-9 复合调节系统

三、按调节系统闭环回路的数目分类

调节系统按闭环回路的数目分类，可分为单回路调节系统和多回路调节系统（两个闭环回路的系统可称为双回路调节系统）。

1. 单回路调节系统

单回路调节系统的被调量反馈到调节器的输入端，形成一个闭环回路。

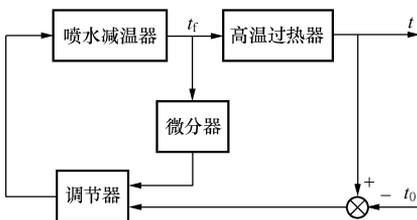


图 1-10 主蒸汽温度双回路调节系统

变化发出一个调节信号改变蒸汽调节阀的开度 μ_D ，使蒸汽流量 D 相应发生变化，以抵消冷水流量 W 扰动（变化）对冷、热水混合容器中水温的影响。

由此可见，前馈调节系统是依据扰动进行调节的，其特点是：

(1) 由于扰动影响被调量的同时，调节器的调节作用已产生，所以调节速度相对比较快；

(2) 由于没有被调量的反馈，所以调节结束时不能保证被调量等于给定值。

2. 多回路调节系统

如果除被调量反馈到调节器输入端之外，还有另外的变量信号也作为反馈信号反馈到调节系统中某一个环节的输入端，从而形成一个以上的闭环回路，则称为多回路调节系统，如图 1-10 所示的主蒸汽温度自动调节系统。由于主蒸汽温度对调节作用量（减温喷水量）的反应很慢，为了改善调节效果，可以把减温器出口处的汽温 t_f 的微分信号作为

辅助信号送到调节器的输入端，从而形成了双回路调节系统。

四、按调节作用的形式分类

1. 连续调节系统

连续调节系统中所有环节之间的传递信号都是模拟量信号，信号的传递是连续的、不间断的，而且各个环节输入量与输出量之间存在着连续的函数关系，调节作用量也是连续的。

2. 离散调节系统

在离散调节系统中有一个或多个变量是脉冲信号，这些信号在时间上是离散的。离散调节系统对被调量与给定值的偏差以及其他参数间歇地进行测量（采样）和调节，因此也称为采样调节系统。

在离散调节系统中，往往采用多点调节器或数字计算机作为调节设备控制生产过程，一台调节设备用于控制的参数同时会有几个或几百个，因此只能轮流地对各个参数进行测量和调节，即每测量一个参数并对相应的调节机构发出调节作用信号后，又去测量和调节另一个参数。随着计算机控制技术的发展，离散调节系统在发电厂中将得到更广泛的应用。

五、按系统的特性分类

1. 线性调节系统

线性调节系统中所有环节的输入量和输出量之间的关系都可以用线性微分方程来描述。线性调节系统有一个重要性质，就是如果有几个输入信号同时作用在调节系统上，那么在输出端得到的响应就等于各个输入信号作用得到的响应之和，这就是线性叠加原理。

2. 非线性调节系统

如果在调节系统中存在非线性元件或部件时，该系统就称为非线性调节系统。对非线性调节系统的分析研究要比线性调节系统复杂得多。如果对非线性元件或部件在其工作点附近线性化，就可以将非线性调节系统简化为线性调节系统。

第五节 自动调节系统的性能

自动调节系统的任务就是当被调节对象受到扰动后，通过调节作用使被调量等于给定值。我们关心的是在调节作用下，被调量最终是否能够稳定下来，稳定的数值是否等于或接近于给定值以及被调量在调节作用下的变化过程。在分析研究这些问题时，往往在调节系统中人为地加一个较为典型的扰动，观察其变化过程和调节的结果。所以，在分析自动调节系统的性能时，首先介绍几种典型扰动（输入函数）的表达式和特性。

一、典型的输入函数

典型输入函数见表 1-1。

典型输入函数的说明如下：

(1) 阶跃函数是一种简单且对正常工况影响很大的扰动形式，如锅炉引风挡板开度的突然变化（打开或关闭），就是对锅炉燃烧系统中的炉膛负压自动调节系统施加的一个阶跃扰动。阶跃扰动的扰动量 $x_0=1$ 时，称为单位阶跃扰动。阶跃扰动在实验研究和生产过程中易于实现、易于分析，是应用最广泛的一种输入形式。

(2) 单位脉冲函数 [也称 $\delta(t)$ 函数] 从数学表达式来看，纯属数学假设，在实际系统中是不可能产生的。在工程上对于持续时间极短且幅值变化很大的信号，就可以近似认为是

脉冲信号。单位脉冲函数的几何意义是其曲线和时间轴所围成的面积为 1。

表 1-1 常用典型输入信号

典型输入信号	数学表达式	函数图形
阶跃函数	$x_0(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ A & t \geq 0 \end{cases}$	
单位脉冲函数	$\delta(t) = \begin{cases} 0 & t \neq 0 \\ \infty & t = 0 \end{cases}$ $\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1$	
斜坡函数	$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ at & t \geq 0 \end{cases}$	
正弦函数	$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \sin \omega t & t > 0 \end{cases}$	

(3) 斜坡函数表示从 $t=0$ 时刻开始, 以一个恒定速度变化的时间函数。由于该速度是恒定的, 因此斜坡函数也称为等速度函数。在实际生产过程中, 斜坡函数意味着随时间变化的, 作用在系统中的一种扰动形式。

(4) 正弦函数施加给自动调节系统时, 在某一频率范围内改变正弦输入信号的频率, 从而通过观察系统的输出响应, 达到研究系统的目的。

二、典型的调节过程

图 1-11 所示为自动调节系统受到阶跃扰动后, 被调量可能出现的几种典型的调节过程。

图 1-11 (a) 是非周期(不振荡)调节过程, 其中曲线 1 是单调变化的非周期调节过程曲线, 曲线 2 是具有单峰值的非周期调节过程曲线。图 1-11 (b) 是衰减振荡调节过程。这两种过程中, 被调量经过变化过程后能够重新达到新的平衡状态, 新的平衡状态下被调量的数值可能等于给定值, 也可能不等于给定值。自动调节系统受到扰动后破坏了原来的平衡状态, 在调节作用下, 重新达到了平衡状态, 这种自动调节系统称为稳定的调节系统。

图 1-11 (c) 是等幅振荡调节过程。这种调节过程受到扰动后不能达到新的平衡状态,

系统形成等幅振荡，这种自动调节系统称为临界稳定系统。

图 1-11 (d) 是渐扩振荡调节过程。这种调节过程受到扰动后，不但不能达到新的平衡状态，而且幅值越来越大，直到发生破坏作用或受到限幅保护装置的干涉为止，这种系统在生产过程中是不能采用的，称为不稳定的调节系统。

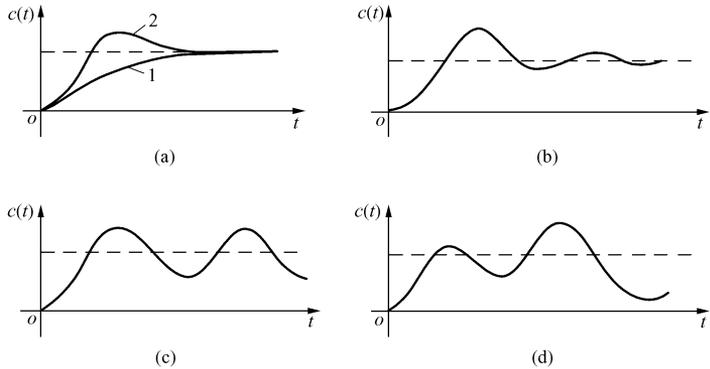


图 1-11 典型的调节过程曲线

- (a) 非周期调节过程；(b) 衰减振荡调节过程；
(c) 等幅振荡调节过程；(d) 渐扩振荡调节过程

三、主要的性能指标

人们在设计和分析一个自动调节系统时应该有什么要求呢？首先应该考虑的是系统稳定性，其次应该考虑到系统调节的准确性和快速性。下面分别进行阐述。

1. 稳定性

稳定性分析是自动调节理论中的一个重要课题，系统稳定性的要求是一个最基本的要求，只有一个稳定的系统才能完成自动调节的任务。如自然循环锅炉的负荷发生一个阶跃扰动，即蒸汽量突然增加或突然减少，汽包水位就会受到影响，这就需要调节给水量使汽包水位维持在水位的给定值，因此首先必须考虑的是水位在调节作用下最终必须能够稳定下来。

调节系统的稳定性问题是由于系统本身的闭环反馈作用所引起的，负反馈是自动调节系统稳定的必要条件，而正反馈往往是系统不稳定的根本原因。所以，在实际工作中，反馈回路的极性是不允许接反的，否则将人为地破坏了系统的稳定性。

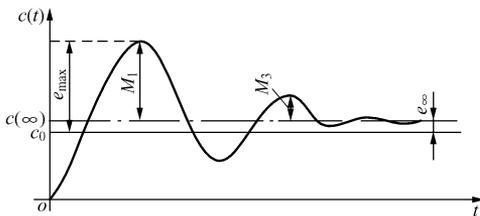


图 1-12 衰减率指标示意

自动调节系统的稳定性一般采用衰减率 ψ 这个品质指标来反映，如图 1-12 所示。

$$\psi = \frac{M_1 - M_3}{M_1} = 1 - \frac{M_3}{M_1} \quad (1-4)$$

衰减率 ψ 作为稳定性指标比较直观形象，在系统的调节过程曲线上能够很方便地得到它的数值。从式 (1-4) 中可得出， $\psi=1$ 是非周期调节过程， $\psi=0$ 是等幅振荡的调节过程，

$0 < \psi < 1$ 是衰减振荡的调节过程， $\psi < 0$ 是渐扩振荡的调节过程。在实际的生产过程中通常选取 $\psi=0.75 \sim 0.9$ 作为稳定性的最佳指标。

2. 准确性

准确性是反映调节过程中和调节结束时被调量与给定值之间偏差的程度。通常用动态偏差和静态偏差两个品质指标来描述系统的准确性。

(1) 动态偏差 e_{\max} 是指在整个调节过程中被调量偏高给定值的最大偏差值，如图 1-12 所示。对于一个合格的自动调节系统，即使受到一个可能的最大扰动作用时，系统的动态偏

差 e_{\max} 也不能超过生产中所允许的范围。如主蒸汽温度自动调节系统受到一个扰动后, 在调节作用下被调量(主蒸汽温度)以衰减振荡的调节过程变化, 其动态偏差 e_{\max} (主蒸汽温度与给定值的最大偏差值) 不允许超过操作规程中的允许值。

(2) 静态偏差 e_{∞} 是指调节过程结束后被调量和给定值之间的偏差值, 如图 1-12 所示。一般应使静态偏差 e_{∞} 不超过生产所允许的范围。

3. 快速性

快速性是反映调节过程持续时间的长短, 很显然持续时间越短越好。调节过程的持续时间也是一个品质指标, 称为调节时间 t_s 。

在系统调节过程中, 被调量完全达到稳态值, 理论上需要无限长的时间。实际上, 对系统的调节允许有一个稳定值的误差范围, 如图 1-13 所示。当被调量进入这个范围并不再超越出此范围时, 就认为已达到稳定值, 即进入稳定状态, 此刻所对应的时间就定义为调节时间 t_s 。一般稳定值的误差范围可选取为稳定值的 2%~5%。

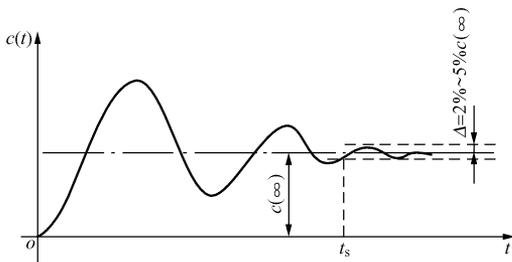


图 1-13 调节时间 t_s 的定义

稳定性、准确性和快速性是反映自动调节系统性能的三个主要方面, 具体表达这些性能的主要品质指标有衰减率 ψ 、动态偏差 e_{\max} 、静态偏差 e_{∞} 以及调节时间 t_s 等。这里还将介绍另外两个品质指标, 即绝对值积分准则和超调量。

绝对值积分准则是在单位阶跃扰动下, 系统的被调量 $y(t)$ 与其稳态值 $y(\infty)$ 之间偏差绝对值的积分值。绝对值积分准则是积分

准则中常用的一种。准则数 I 如下:

$$I = \int_0^{\infty} |y(t) - y(\infty)| dt$$

绝对值积分准则的几何意义如图 1-14 所示。 I 值就是曲线与稳态值延长线所包围的面积(阴影面积), I 值的数值越小, 可以认为调节的质量越好。

超调量 M_p 是反映系统调节过程中被调量超过稳态值的最大程度, 即调节过头的程度, 用下式计算:

$$M_p = \frac{y_{\max} - y_{\infty}}{y_{\infty}} \times 100\%$$

对一个自动调节系统, 要求它的稳定性、准确性和快速性都达到很高的质量往往是困难的, 也是不必要的。一般总是在保证稳定性的前提下, 再兼顾到准确性和快速性。

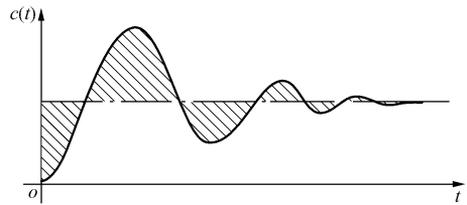


图 1-14 绝对值积分准则的几何意义

习 题

1-1 试列举一些自动调节的例子, 并分别说出它们各自的被调对象、被调量、调节作