

电厂热工过程自动调节

南京工学院 顾晓栋 徐耀文

电力工业出版社

电厂热工过程自动调节

南京工学院 顾晓栋 徐耀文

*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六辅坑)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 16.75印张 376千字 1插页

1981年7月第一版 1981年7月北京第一次印刷

印数 0001—9110册 定价 1.95元

书号 15036·4198

内 容 提 要

全书共分两篇，第一篇(第一章至第四章)为基础理论知识，着重介绍自动调节的基本原理、调节器的性质和组成原理；第二篇(第五章至第十章)具体介绍火电厂的给水、汽温、燃烧自动调节系统的分析和整定方法，并较详细地讨论了直流锅炉和单元机组的控制以及自动调节系统在火电厂的投试。

本书为高等学校的教材，亦可供有关专业的技术人员参考。

前 言

本书是根据1978年原水利电力部制定的高等学校电力类教材编审出版规划编写的。本书绪论及第一篇第一、二、四章由顾晓栋编写，第一篇第三章及第二篇第五、六、七、八、九、十章由徐耀文编写。

参加审稿的单位有华北电力学院（主审）和东北电力学院。华北电力学院张贻琛副教授、沈自钧、李勤和孙德立等同志以及东北电力学院徐伟勇、张玉铎、王满家和邓天日等同志，在审稿中和审稿会议上提出了宝贵的意见。南京工学院钱钟韩教授和陈来九副教授对本书的编写给予热情的指导。对此，我们表示衷心的感谢。

由于水平所限，书中定会存在不少缺陷，诚恳地希望使用本教材的师生及读者批评指正。

编 者

1980年11月

目 录

前 言

绪 论 1

第一篇 自动调节的理论基础

第一章 自动调节的基本概念	3
第一节 人工调节和自动调节	3
第二节 自动调节系统	5
第三节 调节过程	8
第二章 自动调节系统的组成环节及其联接方式	10
第一节 环节的特性	10
第二节 动态特性的表达方式	18
第三节 环节的典型联接方式及其综合传递函数	28
第四节 典型环节及其动态特性	38
第五节 热工调节对象动态特性的特点	65
附录一 拉普拉斯变换简介	70
附录二 部分分式法	74
第三章 自动调节器	79
第一节 三种基本调节作用的特点	80
第二节 自动调节器的典型动态特性	81
第三节 自动调节器动态特性的实现方法	86
第四节 DTL-331型调节单元	92
第五节 DBC、DBY型矢量机构机械力变送器	102
第六节 DBW型温度(温差)变送器	104
第七节 DKJ型电动执行器	108
第四章 自动调节系统的分析	112
第一节 调节系统的稳定性	114
第二节 调节系统的品质指标	127
第三节 单回路反馈调节系统的分析	130
第四节 单回路反馈调节系统的整定	151

第二篇 电厂热工过程调节系统

第五章 汽包锅炉给水自动调节系统	168
第一节 给水调节的任务和调节对象的动态特性	168

第二节	三冲量给水调节系统(前馈——反馈给水调节系统)	170
第三节	给水调节系统的分析和整定方法	171
第四节	其它给水调节系统的介绍	174
第六章	蒸汽温度自动调节系统	180
第一节	过热汽温的调节任务和对象的动态特性	180
第二节	过热汽温的自动调节系统	181
第三节	过热汽温调节系统的分析和整定方法	181
第四节	再热汽温自动调节系统	191
第七章	汽包锅炉燃烧过程自动调节系统	192
第一节	燃烧过程的调节任务	192
第二节	燃烧过程调节对象的动态特性	194
第三节	燃烧过程自动调节系统的基本方案	197
第四节	燃烧过程自动调节系统的分析和整定	204
第八章	直流锅炉的自动调节系统	213
第一节	直流锅炉的调节任务和特点	213
第二节	直流锅炉的动态特性	215
第三节	直流锅炉的自动调节系统	218
第九章	单元机组的自动调节系统	222
第一节	单元机组负荷调节的特点	222
第二节	单元机组主控系统的组成原则和作用原理	224
第十章	自动调节系统的投运	242
第一节	对象动态特性的测试和数学处理	242
第二节	阀门特性试验	250
第三节	自动调节设备的校验	251
第四节	调节系统调试投入运行的一般步骤	254
结 语		256

绪 论

随着生产技术的不断发展，自动化技术在各个生产领域中的应用日益广泛。电力工业中电厂生产过程采用自动化技术已有较长的历史，相对于其它工业部门虽然已有较高的自动化水平，但在近时期内还是获得较快的发展。促使电厂生产过程自动化发展的主要因素不外如下两个方面：

1) 大容量、高参数锅炉汽轮发电机组的出现，导致单元机组的容量不断增大，对机组运行的安全性、经济性和自动化要求不断提高，对运行过程中需要监督控制的参数也越来越多，仅凭运行人员监视和操作就难以保证机组的安全经济运行。因此自动化已成为锅炉汽轮发电机组不可缺少的组成部分。自动化设备的可靠性、自动化系统工作性能的好坏将直接影响到机组的安全经济运行，所以促使自动化系统的日臻完善是电力工业发展的必然结果。

2) 电子技术的发展为自动化提供了越来越完备的仪表和设备。我国从50年代开始研制电动单元组合仪表以来，已先后设计制造出DDZ-I型、DDZ-II型、DDZ-III型和组装式仪表等系列的自动化仪表和设备。自动化仪表的发展，不仅使自动化系统工作的可靠性逐步提高，而且有可能利用新型的自动化仪表和设备构成各种复杂的自动化系统，从而使自动化系统的功能越来越完善。控制计算机的出现为现代控制理论在电厂生产过程自动化方面的应用创造了更为有利的条件。利用计算机不仅有可能实现对机组的最佳综合控制，而且还有可能对整个电厂以至于整个电力系统的生产过程，包括从生产管理、负荷调度到运行操作实现全盘自动化。我们相信，随着我国社会主义四个现代化的逐步实现，电力工业的自动化必将出现崭新的面貌。

目前，电厂热工过程的自动化主要包括以下几个方面：

(1) 自动检测(遥测) 为了监督生产过程的进行情况和检查对生产过程进行控制的效果，通常是把反映生产过程情况的各项物理参数(如温度、压力、流量、液位、化学成分等)和各项生产设备的工作状态传递到集中控制室内，并以适当的方式显示出来(例如指示仪表、记录仪表、积算仪表等)。大型机组则进一步采用巡回检测方式，配合数字或图象显示和越限报警。此外，如果再结合适当的计算装置，还可以根据检测数据，对机组的运行效率进行“在线”计算，或对运行趋势进行分析判断，当然这是属于自动检测的高级阶段。

(2) 工艺讯号(光、声) 工艺讯号作为自动检测的补充，通常有两类。一类是当生产过程出现异常情况时用来唤起运行人员的注意，如参数越限时自动报警信号；设备发生故障而停机时的事故信号等。另一类是远方操作时的检查信号(如检查遥控发出的“开机”或“停机”命令是否已经执行，可采用灯光信号表示)和不同地点的操作人员之间的联络信号。

(3) 远方操作(遥控) 利用辅助能源进行开、关动作(例如电动阀或气动阀), 并把控制各项操作的指挥信号集中到一个控制台上。自动检测和远方操作是实现生产过程自动化的先决条件, 也是自动调节的后备手段。当自动调节系统发生故障时, 操作人员仍可在控制台上进行远方操作, 以保证生产过程的继续进行。

(4) 自动操作(程序控制) 按照预先拟定的顺序, 有计划有步骤地对生产设备进行一系列的操作, 而各个操作步骤之间的转换都是自动执行不需要人力干预。自动操作通常用于生产过程中某些经常性的工作循环(如补给水的化学处理、烟道吹灰)和主机、辅机的自动启停, 以提高工作效率和运行的可靠性, 防止误操作, 并可减轻运行人员的劳动强度。

(5) 自动调节 当生产过程受到外来干扰(在预期范围内)而使运行工况发生偏移时, 自动调节能自动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。

在正常运行和连续生产条件下, 自动调节是经常地起作用的一种自动化职能。它对生产过程的经济性(发电的成本、质量)和安全性(包括机组寿命)有极大的影响。了解和析调节过程的特点是本课程的主要内容。

(6) 自动保护 在发生事故时自动保护立即动作, 以使生产设备不致遭受严重破坏, 或把事故区域与其它部分隔离开来, 防止事故的进一步扩大。自动保护是保障设备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。

自动保护一般有如下几种:

- 1) 自动切断能源, 中断电、汽、燃料等的供给。例如汽轮机的超速保险。
- 2) 自动泄放储存的能量, 如锅炉的安全阀、防爆门等。

3) 各种调节阀门、挡板的最大开度和最小开度可根据安全运行的要求规定极限位置。这样, 即使运行中出现异常情况(如由于调节系统的故障而发出错误的调节信号)时也不致于超越这些极限位置, 从而保证机组运行的安全。

4) 连锁是为了防止不正确的操作程序。这一要求在程序控制中(如主机和辅机的启停过程)是特别重要的。此外, 如某一设备发生事故时, 必须按预定的次序使其它有关设备逐步自动解列, 如果次序错了就可能进一步扩大事故或造成设备的损坏。

电厂生产过程自动化的上述各个方面通常是分别由各种专用设备来完成的, 但是它们的工作应协调一致, 它们的设计也应统一考虑。当采用计算机控制时, 这种统一调度和集中管理的特点就显得更为突出。

第一篇 自动调节的理论基础

第一章 自动调节的基本概念

第一节 人工调节和自动调节

自动调节是在人工调节的基础上发展起来的。因此，首先分析一下人工调节过程，了解自动调节是很有启发的。

图1-1(a)为锅炉汽包水位进行人工调节的示意图。

在锅炉运行过程中，水位 H 的增减（在一般情况下）是给水流量 W 和蒸汽流量 D 是否平衡的标志。如果运行人员能维持水位 H 在一定范围内，也就实现了给水流量 W 和蒸汽流量 D 的相等。因此，水位 H 是反映锅炉运行是否正常的主要参数之一，也是水位调节的直接目标。通常，我们希望将水位 H 维持在某一规定的数值 H_0 。当水位 H 在某些因素（例如锅炉负荷变化等）影响下偏离所规定的数值 H_0 时，运行人员就要进行操作，调整给水调节阀门4的开度以改变给水流量 W ，使水位重新恢复到规定的数值 H_0 ，这一操作过程就称为调节。

在调节理论的术语中，被调节的生产过程或设备称为调节对象（如图1-1中的汽包及其进出管道）；通过调节所要维持的参数称为被调量（如图1-1中的水位 H ）；被调量所需

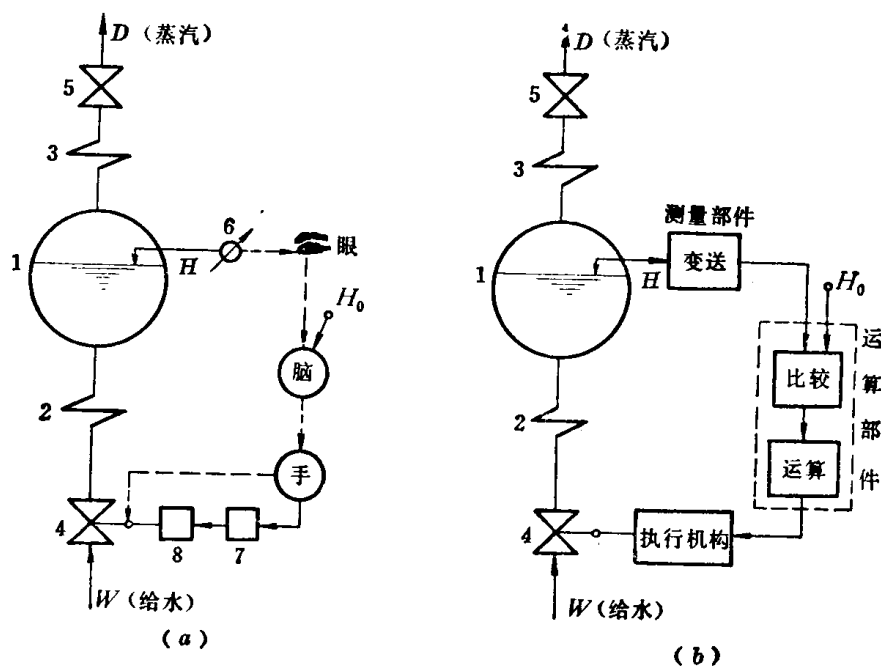


图 1-1 汽包锅炉水位调节示意图

(a)人工调节，(b)自动调节

1—汽包；2—锅炉蒸发受热面；3—过热器受热面；4—给水调节阀门；5—负荷侧蒸汽阀门；6—指示仪表；7—操作开关；8—执行机构

保持的数值称为规定值(H_0)。对被调量的调节一般都是通过改变参与生产过程的某些物质的流量或能量来实现的。因此在生产设备上必须装有可用来改变进入调节对象的物质或能量的装置,这个装置称为调节机关(如图1-1中的给水调节阀门4)。改变调节机关的位置从而控制被调量的作用称为调节作用。除调节作用外,引起被调量变化的其它因素统称为扰动。简单的调节对象只有一个被调量、一个调节机关(如图1-1的水位调节对象)。复杂的调节对象具有几个被调量和相应数目的调节机关。当这些被调量之间的相互影响不是很密切时,为了便于分析,往往可以把它们看作是由若干个独立的简单对象所组成。

因此,调节的任务就是通过调节机关的动作产生调节作用来抵消扰动对被调量的影响,使被调量能经常等于(或接近于)规定值。

在图1-1(a)的人工调节中,调节机关是由运行人员操作的(远方操作或就地直接操作)。为了进行调节,运行人员必须:

(1) 了解情况 使用肉眼观察指示仪表6的数值,以了解生产过程的进行情况。

(2) 分析决策 根据观察到的情况,首先判断被调量数值与头脑中记忆的(或指示仪表上用红线划定的)规定值有无偏差及偏差的方向和大小(例如水位是过高还是过低),以确定要否调节以及调节机关该向哪个方向动作(开大或关小)。然后,根据自己的实践经验确定应以怎样的规律去开大或关小调节机关。

(3) 执行操作 根据分析决策的结果,按确定的调节规律去操作调节机关。调节机关可能是通过远方操作(电动或气动)来带动,也可能是就地直接手动操作。

重复上述步骤,直到被调量恢复到规定值为止,调节过程才告结束。

显然,人工调节效果的好坏主要取决于运行人员的实践经验。这些经验包括对调节对象特性的了解,并能根据调节对象特性确定一套合适的操作规律。当运行人员还不了解对象特性的情况下,要正确地进行调节是不可能的。

为了实现自动调节,必须用一整套机械的或电气的装置来代替人工调节中运行人员的上述三方面功能。这套装置总称为“自动调节装置”(或称自动调节器)。从自动调节的要求来看,它必须具备有如下三方面功能的基本部件:

(1) 测量部件(变送器) 用来测量被调量的大小,并能把原始的物理量参数(如水位、温度、压力和流量等)转变成某种便于远距离传送的,与被调量成比例(或某种固定的函数关系)的测量信号。

(2) 运算部件(调节单元) 能接受测量部件来的被调量信号,并把它与规定值进行比较,当被调量与规定值有偏差时,发出一个反映偏差方向(正或负)和大小的信号。同时根据这个偏差信号按预定的规律进行运算(比例、微分、积分等线性运算和限幅、死区等非线性运算)。根据运算结果发出一连串调节信号。在这个部件中通常附有一个可调的定值器。运行人员可根据生产上的要求在定值器上预先设置好规定值。

(3) 执行机构 按照运算部件发出的调节信号去移动调节机关。

把这套自动调节装置和调节对象连接起来(图1-1, b)就构成了一个自动调节系统。

在自动调节系统中,调节设备替代了运行人员的功能。为了得到好的调节效果,就要求自动调节装置能象熟练的运行人员那样执行调节任务。也就是说,自动调节装置应按

人们掌握的对象特性和积累的操作经验来设计和调整。因此，自动调节装置基本上是模拟人的操作，并反映了运行人员积累的经验。对某一生产过程，如果人们还不知道应该如何正确进行调节的时候就实现自动调节是不可能的^①。

第二节 自动调节系统

一、调节系统方框图

在自动调节系统中，调节对象和自动调节装置是通过信号的传递互相联系起来的。例如图1-1(b)的汽包水位调节系统中，当负荷侧蒸汽阀门开度改变使锅炉负荷发生变化时，汽包水位的变化通过变送器转换成调节装置所能接受的统一信号（如电流或电压信号）。在运算部件中，这一信号首先与代表规定值 H_0 的信号相比较，得到一个偏差信号。然后按预定的运算规律对偏差信号进行运算，得到需要的调节信号。该调节信号送至执行机构，使它去移动给水调节阀，改变进入汽包的给水流量，以抵偿蒸汽负荷变化对水位的影响。给水自动调节系统的这一讯号传递过程可用图1-2的方框图来表示。图中每一个小方框代表调节对象或自动调节装置的一个部件或一个设备或几个设备的组合体。称之为环节。环节之间用带有箭头的连接线表示信号的传递途径和方向。每一个环节有“输入信号”，也有“输出信号”，分别称之为环节的“输入量”和“输出量”。每个环节的输入量是引起它的输出量变化的原因，而输出量的变化又是输入量变化的结果。因此方框图中的环节并不代表某一部件或

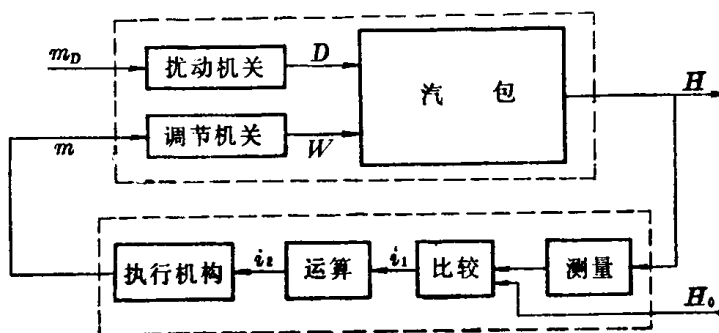


图 1-2 给水调节系统方框图

m_D —扰动作用； m —执行机构位移(调节作用)； D —蒸汽流量变化； W —给水流量变化； H —汽包水位； H_0 —水位规定值； i_1 —水位偏差信号； i_2 —调节信号

某一设备的具体结构，而是代表这个部件或设备所具有的输入与输出之间的某种因果关系（或称输入与输出之间的信号传递关系）。这一因果关系（传递方向）是不可逆的。用方框图来表明调节系统工作过程中各变量之间的因果关系对调节系统的分析研究很有帮助，以后我们将经常用到它。

同一个系统可以画成不同的方框图，只要能正确表示出信号之间的因果关系就行了。例如图1-2的调节系统方框图中，如果按虚线那样把调节对象和调节装置分别用一个环节表示，则可画成图1-3的方框图。这个方框图表明引起水位 H （被调量）变化的原因有两个：负荷侧蒸汽阀门开度 m_D （扰动）和调节装置的执行机构位移 m （调节作用）。而水

^① 这是指简单的、有固定程序的调节装置。对于高级的、有自适应能力的自动装置就可能由自动设备(计算机)来自主地进行摸索和选择最优控制方案，不一定要有人来干预，亦不一定要有人预先知道如何正确调节。然而它的摸索方式以及最优的标准仍然需要人们预先规定。

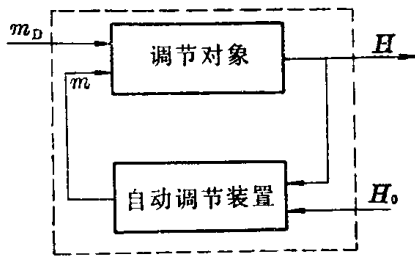


图 1-3 调节系统方框图

位 H 的变化（或规定值 H_0 的改变）又会引起自动调节装置的执行机构位移 m 发生变化。根据这个方框图，我们所要研究的是在扰动 m_D 或规定值 H_0 改变时，被调量 H 和执行机构位移 m 的变化情况。至于自动调节装置内部各部件输出讯号的变化可以不加考虑。也可把整个系统看作一个环节，如图 1-3 虚线所示。这时方框图只表明了系统输出被调量 H

和输入扰动 m_D 或规定值 H_0 之间的变化关系。由此可见，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。

二、调节系统的类型

实际生产过程中采用的自动调节系统的类型是多种多样的，从不同的角度出发可以进行不同的分类。

1) 按规定值变化的规律来分，有恒值调节系统、程序调节系统和随动调节系统。

恒值调节系统的规定值在系统工作过程中是保持恒定的，从而使被调量保持（或接近于）恒定。例如锅炉的汽压、汽温、水位等调节系统都是属于这类系统。

程序调节系统的规定值是时间的已知函数。调节系统用来保证被调量按预先确定的、随时间变化的数值来改变。例如锅炉按一定的升温、升压曲线启动时，汽温和汽压的调节系统就属于程序调节系统。在这类系统中需要有一套可调整的程序发讯装置，以产生一个按一定关系随时间变化的规定值信号。

随动调节系统的规定值既不是恒定的，也不是按已知规律变化的，而是按事先不能确定的一些随机因素来改变的。调节结果使被调量也跟随这个规定值随时改变。例如锅炉按条件启动时，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，因而每次升温升压的速度也不可能一样。这时的汽温、汽压调节系统就是随动调节系统。显然，在这类调节系统中，规定值需要随时由运行人员或其它外来信号确定。

2) 按调节系统的结构来分，有闭环调节系统、开环调节系统和复合调节系统。

闭环调节系统亦称反馈调节系统，如图 1-3 所示。它是自动调节中最基本的调节系统。在闭环调节系统中，被调量变化讯号以反馈方式送到调节器的输入端，作为不断引起调节作用的依据。而调节的目的就是要尽可能地减少被调量与规定值之间的偏差。因此，信号是沿着调节系统的闭合回路传递的。只要被调量不等于规定值，就会持续不断地发生调节作用，直到被调量符合要求为止。因此闭环调节系统的最后调节结果总是能保证被调量等于或接近于要求的规定值。由于闭环调节系统是按被调量与规定值的偏差进行调节的，因此当调节系统受到扰动作用时，只有在被调量出现偏差之后才开始调节。这样，被调量的暂时偏差是不可避免的，调节只是使偏差尽可能减小，或尽可能快地消失。然而就那些调节作用对被调量影响比较迟缓的对象来说，调节过程中会出现数值较大、持续时间较长的被调量偏差。

如果调节系统中不存在被调量的反馈回路，调节器只是根据直接或间接反映扰动输入

的信号来进行调节，则称为开环调节系统。如图1-4所示。在这个系统中调节器接受了对象输入端的扰动信号 x ，一旦有扰动发生时，调节器可按预定的调节规律立即对调节对象产生一个调节作用 m ，以抵消扰动 x 对被调量的影响。这种调节方式也称为“前馈调节”（或“按扰动调节”）。从理论上来说，只要调节规律选择得恰当，它可以做到无偏差调节，但实际上是不可能的。由于开环系统中缺乏被调量变化的反馈信号，对调节后的被调量数值，既不能（自动）检查，也不能纠正。因此开环系统一般只用在对被调量没有严格要求，或对被调量进行测量有困难而测量扰动作用却比较方便的生产过程。图1-4(b)的锅炉燃烧调节系统就是属于这类系统。因为被调量是炉膛烟气含氧量（ $O_2\%$ ），测量比较困难或不够快速，故调节系统是按主要扰动量（燃料量）来调节送风量，使燃料量和风量保持一定比例。而保证最佳 $O_2\%$ 的燃料与风量的比例值是事先经过试验确定的。

生产过程中，开环调节和闭环调节常常相互配合使用，组成“复合调节系统”（也称“前馈-反馈系统”）。如图1-5所示。当外界扰动 x 作用到调节系统而被调量 y 还没有反映之前，先由前馈部分进行粗调，尽快使调节作用 m_1 在一开始就能大致抵消 x 的影响，使被调量 y 不致发生大的变化。如果由于 m_1 的补偿作用不是恰到好处，使被调量 y 终于出现了一些偏差，则还可以通过闭环回路来进行细调（校正作用）。因此，这类调节系统对于扰动作用 x 来说，能获得比一般闭环调节更好的调节效果。

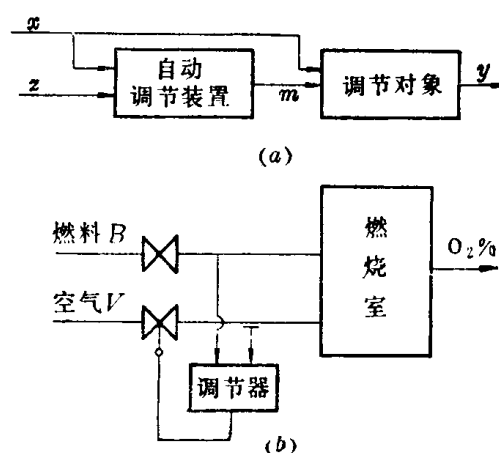


图 1-4 开环调节系统
(a)方框图；(b)实例

3)按调节系统闭环回路的数目来分，有单回路调节系统和多回路调节系统。

单回路调节系统是只有一个被调量被反馈到调节器输入端，只形成一个闭合回路的调节系统，如图1-3。显然，只有简单调节对象才能构成单回路调节系统。

如果调节对象有不只一个输出信号被反馈到调节器输入端，从而形成一个以上的闭合回路，则称为多回路调节系统。显然，复杂调节对象构成的反馈系统一定是多回路调节系统。某些简单调节对象，为了改善调节效果，除了有一个主要被调量作为反馈信号外，还有另外的辅助被调量也可作为反馈信号，同样也构成多回路调节系统。例如锅炉过热汽温调节系统（图1-6）中，由于过热器出口汽温对输入作用的反应太慢，为了改善调节效果，往往将设置在过热器中间的喷水减温器后面的汽温作为导前信号送到调节器输入端，从而形成了双回路调节系统。

4)按系统的特性来分，有线性调节系统和非线性调节系统。

调节系统的特性是指系统在输入量作用下，输出量随时间变化的关系。在线性调节系统中，这个变化关系可以用线性微分方程来描述，而非线性调节系统需要用非线性微分方程来描述。任何线性调节系统有一个重要的性质，就是：如果有好几个（扰动）输入同时作用于系统上，那么在输出端引起的总效果等于每个（扰动）输入单独作用时所引起的效

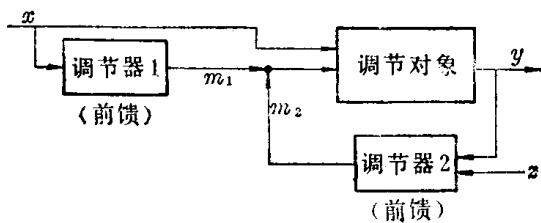


图 1-5 复合调节系统方框图

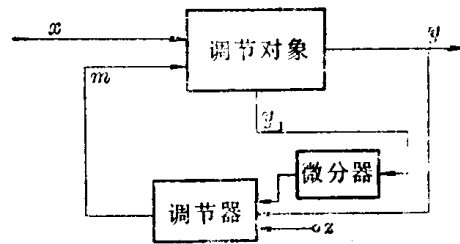


图 1-6 双回路汽温调节系统方框图

x —扰动； y —过热器出口汽温； y_1 —喷水点后汽温；
 z —汽温定值； m —喷水量

果之和。这就是线性系统的叠加原理。

自动调节系统还可以有其它的分类方法，不一一列举。

所有各类调节系统中，最基本的，也是目前热工生产过程中用得比较广泛的，是线性、闭环、恒值调节系统。多回路系统是单回路系统的发展，而单回路系统则是研究复杂系统的基础。因此，下面我们将着重研究和分析单回路调节系统的问题。

第三节 调节过程

原来处于平衡状态的调节对象，一旦受到扰动作用，被调量就会偏离规定值。这时，要通过自动调节装置或运行人员的调节作用使被调量重新稳定到规定值是需要一个过程的。这一过程称为调节过程。在手动调节情况下，调节过程反映了运行人员操作水平的高低。在自动调节的情况下，它就反映了调节系统工作品质的好坏。

显然，一个调节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，为了比较调节系统工作品质的好坏，为了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的或最经常出现的扰动形式，作为研究调节系统工作品质的标准输入信号。在热工过程自动调节中，最常用的是单位阶跃输入。其数学表达式为：

$$x = 1(t) = \begin{cases} 0, & \text{当 } t < 0 \text{ 时} \\ 1, & \text{当 } t \geq 0 \text{ 时} \end{cases}$$

单位阶跃输入的函数曲线如图1-7所示。

已知调节系统对单位阶跃输入的反应，根据线性系统的叠加原理，就可以很方便地推算出对其它幅度的阶跃输入的反应。

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图1-8所示的几种不同形状。其中(a)、(b)两种过程中，被调量最后能重新达到平衡。这新的平衡状态的被调量数值，可能就是扰动前的数值，也可能是一个新的数值。具有这两类调节过程的系统是稳定的。(a)是非周期过程。其中又可分为单调变化的(曲线1)和有单峰值的(曲线2)两种形式。(b)是衰减振荡过程。(c)是等幅振荡过程。调节系统受扰动作用后不能达到新的平衡，被调量和调节作用都作等幅振荡。这种情况称为“边界稳定”。(d)为扩大振荡过

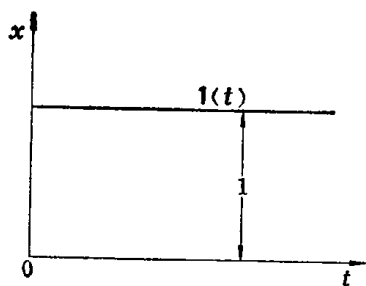


图 1-7 单位阶跃输入的函数曲线

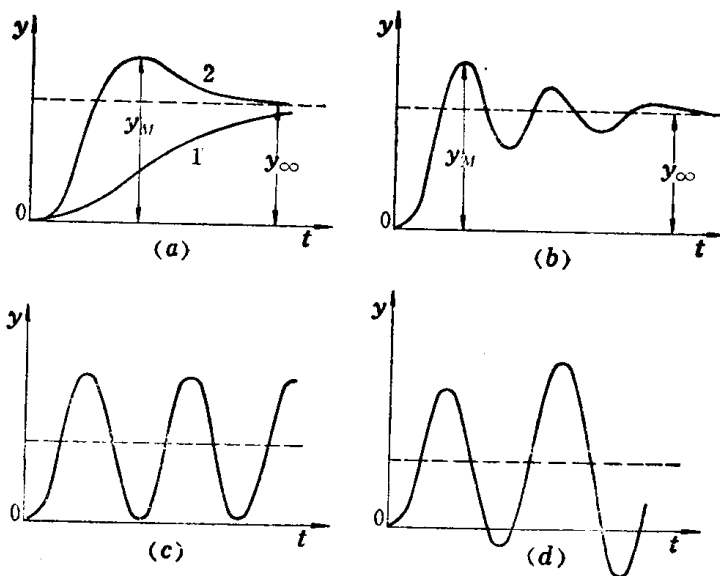


图 1-8 几种典型的调节过程曲线
(a)非周期过程；(b)衰减振荡过程；(c)等幅振荡过程；
(d)扩大振荡过程

程。调节系统受扰动作用后,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。这种调节系统是不稳定的。

从生产过程的要求来看,希望自动调节系统能随时保证被调量和规定值相等,不受任何扰动的影响。实际上调节过程中被调量总是要发生变化,产生偏差。那么怎样来衡量一个调节过程(即调节系统工作品质)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调节系统最基本的要求。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(约2~3次)。

稳定性问题是由于调节系统中闭环的反馈作用引起的。正反馈容易造成不稳定,因此实际应用的调节系统通常都采用负反馈。一般工业调节对象,被调量对调节作用的反应总是比较迟缓的。如果作为负反馈的调节作用“过大”有可能使系统发生振荡。改变反馈作用的大小就可以获得图1-8所示的各种类型调节过程。

(2) 准确性 是指被调量偏差的大小,它包括动态偏差 y_M 和静态偏差 y_∞ (图1-8)。

动态偏差 y_M 是指调节过程中被调量偏离规定值的最大偏差值。通常要求调节系统保证被调量的动态偏差,即使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动范围。

静态偏差 y_∞ 是指调节过程结束后被调量的残余偏差。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（即不同负荷下被调量保持不同的稳定值）。例如单元机组中的锅炉出口汽压就可能在低负荷时维持较高的数值，而在高负荷时维持较低的数值。

（3）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，对调节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它一些要求，例如有些生产过程对被调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等。这些限制条件对调节系统的工作往往有重大的影响，在设计调节系统时必须事先加以考虑。

习 题

1. 试说明汽包锅炉有哪些被调量？相应的调节机关有哪些？锅炉运行过程中它们可能受到哪些扰动？

2. 调节过程的基本形态有哪几种（指阶跃扰动输入下）？它们各有什么特点？如何根据调节过程曲线来检验调节系统是否满足基本要求？

第二章 自动调节系统的组成环节及其联接方式

第一节 环节的特性

自动调节系统是由环节构成的，是通过环节之间的信号传递和转换来实现自动调节的。因此要分析和研究调节系统，首先要研究在输入信号作用下每个环节的输出信号是怎么变化的。也就是要研究环节的输入信号和输出信号之间的关系，这关系就称为环节的特性。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。无论是静态特性或动态特性都是这个环节（在特定条件下）的内在性质。

在输入信号作用下，环节的输出信号会发生变化。如果输入信号保持不变，输出信号也逐步趋向某一平衡数值，那末这类环节称为稳定环节。如果只有在输入信号恢复到原来平衡状态时输出信号才能达到平衡，但不一定恢复到原来的数值，而能停留在任何数值上（即相当于物理学中的随遇平衡情况），这类环节称为中性环节或积分环节。如果输入信号保持不变（无论是恢复到原来的平衡状态还是达到新的平衡状态）后，环节的输出信号

始终不能平衡，则称为不稳定环节。例如，图2-1的可逆电动机，输入量是绕组两端电压 u_1 。如输出量是电机输出轴的转速 ω ，则它就是一个稳定环节。如输出量是电机输出轴的角位移 θ ，则它就是一个中性环节。因为只要有输入电压 u_1 ， θ 将不断改变，只有在 u_1 等于零或某个不灵敏区范围内时， θ 才保持不变，而且可以停留在任何数值上。

环节也有线性和非线性之分，线性环节是能满足叠加原理的。环节的非线性既可在变动状态时表现出来（即动态特性呈现非线性）也可同时在平衡状态时表现出来（即动态特性和静态特性都呈现非线性）。有时为了简化调节系统的分析，常常把环节的非线性方程近似线性化。在调节系统设计中，有时为了改善调节系统的性能，从系统结构上采取某些措施将非线性环节近似线性化（如加线性反馈等）。反之，在有些情况下特意引入非线性环节来获得良好的调节效果（如非线性调节）。

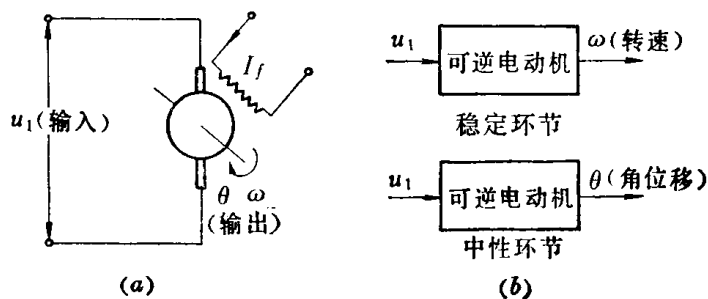


图 2-1 可逆电动机
(a) 示意图；(b) 方框图

环节的非线性方程近似线性化。在调节系统设计中，有时为了改善调节系统的性能，从系统结构上采取某些措施将非线性环节近似线性化（如加线性反馈等）。反之，在有些情况下特意引入非线性环节来获得良好的调节效果（如非线性调节）。

一、环节的静态特性

生产过程经常是在相对平衡的工况下进行的。因此，各项设备的静态特性是起决定作用的。不了解设备的静态特性就不能正确使用它。同样，在自动调节中，一个调节系统的平衡状态是由各个环节的静态配合来决定的。因此，静态特性不好会对调节造成不利影响。

环节的静态特性可以用输入量和输出量在平衡状态时的关系曲线或数学方程式来描述。图2-2给出了静态特性的例子。（a）是阻容元件构成的环节，其输入量为电压 u_1 ，输出量为电容两端电压 u_c 。静态特性为一条直线。可用代数方程式

$$u_c = u_1 \quad (2-1)$$

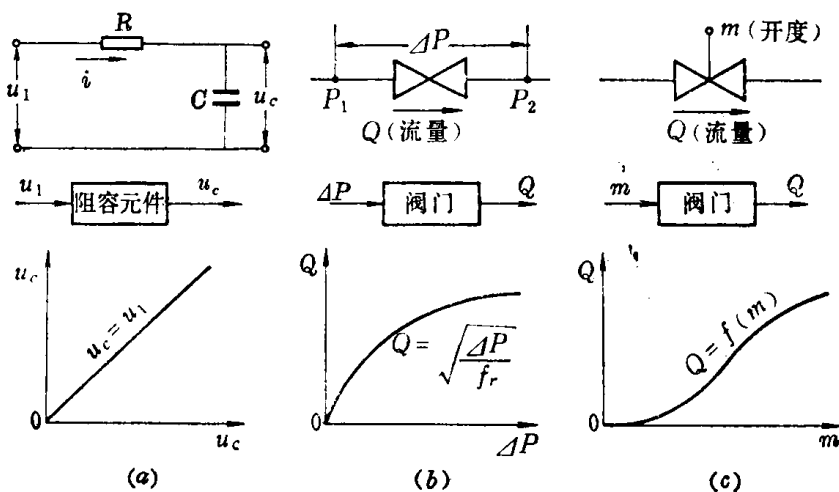


图 2-2 环节静态特性举例