

163330

TK32  
7148

# 电厂热工过程自动调节

巨林仓

西安交通大学出版社

## 内 容 简 介

本书主要论述了自动调节基本理论和电厂热工过程自动调节系统。自动调节理论主要包括调节系统时域分析、频域分析和根轨迹法分析、调节对象的建模方法、自动调节器的动态特性和组成原理。本书结合实例，在电厂热工过程自动调节系统的内容中，介绍了锅炉给水调节系统、汽温调节系统、燃烧过程调节系统、汽轮机功频调节系统、单元机组负荷调节系统的组成原理。另外，介绍了电厂计算机监控系统的结构和功能。本书为专业本科生教材，也可供专科生学习使用，同时可作为有关研究部门和生产单位的技术参考书。

(陕) 新登字 007 号

电厂热工过程自动调节

巨林仓

责任编辑 孙文声

\*

西安交通大学出版社出版

(西安咸宁西路 28 号 邮政编码 710049)

陕西省轻工业厅印刷厂印装

陕西省新华书店经销

\*

开本：787×1092 1/16 印张：20.625 字数：501 千字

1994 年 12 月第 1 版 1994 年 12 月第 1 次印刷

印数：1—2000

ISBN7-5605-0660-7/TP·80 定价：16.00 元

# 前 言

生产过程自动化是工业生产文明化的重要标志，也是实现生产过程现代化的重要技术措施之一。电厂生产过程是连续生产过程，要求运行安全、可靠，因此自动化程度也就较高。

本书根据电厂热能动力工程专业“热工自动调节”课程大纲，结合近年来电厂热能动力工程专业的教学实践编写而成，同时也补充了一些电厂热工过程自动化发展的新技术。可以作为电厂热能动力工程专业“热工自动调节”课程的教材，也可作为类似专业同类课程的教材，并可供从事热工过程自动化工作人员参考。

本书内容分为两大部分。第1章到第7章为自动调节的基本理论篇；第8到第13章为电厂热工过程自动调节的应用篇。第14章为电厂计算机监控的简要介绍。

在本书的编写过程中，编者力求做到理论联系实际、循序渐进、深入浅出，并能反映近年来电厂热工过程自动化的新技术。

本书作为电厂热能动力本科专业教材，参考讲课时数可为75~80学时。部分章节（如第2，8，9，10，11章部分内容）可选讲。

本书由谢麟阁教授主审。谢麟阁教授对此书稿作了认真的审查和推敲，提出了许多意见和建议，作者在此深表感谢。

在本书的编写过程中，西安交通大学热能教研室刘齐寿等同志给予了热情的帮助，并提出了许多改进意见，作者在此表示衷心的感谢。

在编辑和出版过程中，西安交通大学出版社孙文声同志进行了深入仔细的修改和加工工作，作者在此一并表示感谢。

但由于编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，衷心欢迎各位读者批评指正。

编 者

1993年5月

# 目 录

<b>1 自动调节的基本概念</b>	
1.1 电厂自动化的内容	1
1.2 自动调节的基本概念	4
1.3 自动调节系统方框图	5
1.4 动态特性	7
1.5 对自动调节系统性能的要求	10
1.6 自动调节系统的分类	12
习题与思考题	16
<b>2 拉普拉斯变换及其应用</b>	
2.1 拉普拉斯变换	17
2.2 拉普拉斯反变换	22
2.3 用拉普拉斯变换法解线性微分方程	26
2.4 传递函数	29
2.5 物理装置传递函数的推导	30
2.6 用复阻抗分析电路	37
习题与思考题	39
<b>3 自动调节系统的基本环节与组合</b>	
3.1 构成自动调节系统的基本环节	41
3.2 环节的三种基本连接方式	48
3.3 方框图等效变换	51
3.4 梅森公式	56
习题与思考题	58
<b>4 调节对象的动态特性</b>	
4.1 研究调节对象动态特性的意义	61
4.2 单容调节对象的动态特性	62
4.3 多容调节对象和迟延	67
4.4 无自平衡能力的调节对象	71
4.5 热工对象动态特性的实验测取	72
习题与思考题	79
<b>5 自动调节器</b>	
5.1 比例调节器	82

5.2	积分调节器 .....	84
5.3	比例积分调节器 .....	86
5.4	微分调节作用和比例微分调节器 .....	88
5.5	比例积分微分调节器 .....	92
5.6	自动调节器各种调节作用的形成原则 .....	93
5.7	工业自动调节器 .....	97
	习题与思考题 .....	106
<b>6</b>	<b>自动调节系统的时域分析</b>	
6.1	稳定性分析 .....	107
6.2	自动调节系统的瞬态响应与性能指标 .....	114
6.3	自动调节系统的稳态误差 .....	125
6.4	用根轨迹法分析调节系统 .....	126
6.5	各种调节作用对系统性能的影响 .....	135
	习题与思考题 .....	140
<b>7</b>	<b>调节系统的频域分析</b>	
7.1	频率特性 .....	142
7.2	频率特性表示法 .....	144
7.3	用频率特性分析系统的稳定性 .....	158
7.4	闭环频率特性与系统动态性能之间的关系 .....	167
	习题与思考题 .....	174
<b>8</b>	<b>复杂调节系统</b>	
8.1	串级调节系统 .....	177
8.2	比值调节系统 .....	181
8.3	前馈调节系统 .....	184
8.4	自动调节系统的整定 .....	190
	习题与思考题 .....	200
<b>9</b>	<b>汽包锅炉给水自动调节系统</b>	
9.1	汽包锅炉给水调节的任务及调节对象的动态特性 .....	201
9.2	汽包锅炉给水自动调节系统 .....	205
9.3	变速泵给水调节系统 .....	211
9.4	给水全程自动调节系统 .....	212
9.5	单级三冲量给水自动调节系统的整定 .....	215
9.6	串级三冲量给水自动调节系统的整定 .....	218
	习题与思考题 .....	221
<b>10</b>	<b>蒸汽温度自动调节系统</b>	
10.1	主蒸汽温度的调节任务和对象动态特性 .....	222
10.2	主蒸汽温度串级调节系统 .....	223

10.3	采用导前汽温微分信号的双回路主汽温调节系统	224
10.4	其它主蒸汽温度调节系统	226
10.5	再热汽温调节系统	230
10.6	采用导前汽温微分信号的双回路自动调节系统整定	230
10.7	主汽温串级调节系统的整定	235
	习题与思考题	239
<b>11</b>	<b>汽包锅炉燃烧过程自动调节系统</b>	
11.1	燃烧过程的调节任务及调节系统组成	240
11.2	燃烧过程调节对象的动态特性	241
11.3	中间粉仓式汽包锅炉燃烧过程自动调节系统	245
11.4	热量信号及其应用	248
11.5	直吹式锅炉燃烧过程自动调节系统	253
11.6	微正压燃油炉燃烧过程自动调节系统	258
11.7	直流锅炉自动调节系统	259
11.8	锅炉燃烧自动调节系统的整定	267
	习题与思考题	274
<b>12</b>	<b>汽轮机电液自动调节系统</b>	
12.1	纯速度电液调节系统	276
12.2	功频电液调节系统	277
12.3	功频电液调节系统举例	281
	习题与思考题	286
<b>13</b>	<b>单元机组负荷调节系统</b>	
13.1	单元机组负荷调节的特点	287
13.2	单元机组负荷调节的基本方案	288
13.3	单元机组负荷调节系统的组成原则及运行方式	290
13.4	单元机组负荷调节系统的典型形式	295
13.5	单元机组负荷调节系统实例	301
13.6	滑压运行单元机组的负荷调节系统	309
	习题与思考题	311
<b>14</b>	<b>电厂计算机控制与检测系统简介</b>	
14.1	概述	312
14.2	火电厂分布式计算机监控系统的组成及结构	313
14.3	火电厂计算机监控系统实例	315
14.4	电厂计算机监控系统功能	317
	参考文献	321

# 1 自动调节的基本概念

## 1.1 电厂自动化的内容

随着生产技术的不断发展,自动化在各个生产领域中的应用日益广泛。自从1766年波尔祖诺夫发明了锅炉给水调节装置,1784年瓦特发明了蒸汽机离心摆调速装置之后,自动调节装置不断革新,不断发展。无论是自动化技术的应用历史,还是自动化水平,电力生产过程都走在其它工业部门的前面,尽管如此近年来的发展速度仍然十分快。促使电厂生产过程自动化发展的主要因素有以下两个方面。

第一,锅炉-汽轮发电机组的容量不断增加,参数不断提高,对机组运行的安全性和经济性要求也不断提高。然而,机组容量越大,自动化包含的内容也越广泛,运行中需要监督和控制的参数也越多,单凭运行人员的监督和操作是无法保证机组安全、经济运行的。对于早期的小型机组,如果自动化是可有可无的话,那么今天的电厂生产过程,特别是大容量高参数机组,没有高水平自动化设备和自动化系统是无法运行的,更谈不上安全、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。另一方面,自动化设备工作的可靠性,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。因而电力工业发展的必然结果使自动化装置和系统日趋完善。

第二,电子技术的发展极大地促进了自动化仪表的更新,从而为自动化提供了越来越完备的工具和手段。从50年代开始,我国已先后设计制造出DDZ型和组装式系列化的自动化仪表和设备。近几年引进和生产了具有世界先进水平的智能化仪表。由于电子工业的发展,不仅使自动化设备工作的可靠性逐渐提高,而且新型自动化仪表的功能愈来愈完善。特别是计算机的出现为新的控制理论在生产过程自动化方面的应用打下了物质基础。在电力生产过程中使用计算机不仅能够实现对发电机组的最佳综合控制,而且还能对整个电力系统的生产过程从生产管理、负荷调度到运行操作实现全盘自动化管理和指挥。我们相信,随着社会主义现代化建设的不断发展,我国电力工业的自动化也必将出现更加崭新的面貌。

目前,电厂热工过程自动化主要包括如下几个方面的内容。

### 1.1.1 自动检测(DAS)

为了监督生产过程的进行情况和检查对生产过程进行操作后的效果,把反映生产过程运行情况的各项物理参数(如温度、压力、流量、固体粉末浓度、液体表面位置、化学成份等)和各种生产设备的工作状态传递到集中控制室内,以适当的方式显示、处理、记录(如指示仪表、记

录仪表、积算仪表等),使运行人员能及时掌握设备状态、生产过程进行的情况。在大型机组上,大多采用巡回检测方式,并配合数字显示、图象显示及越限报警装置。此外,如果安装计算机检测系统还可以根据检测数据,对机组的综合性能指标进行“在线”计算,或对运行趋势进行分析判断,提出运行指导意见,这属于自动检测的高级阶段。

近几年来,工业电视作为辅助检测手段已被广泛地应用于电站监测之中,用工业电视监视锅炉的汽包水位、炉膛燃烧状况以及给水泵、风机等大型设备的运行情况。

对于汽轮机而言,自动检测参数主要包括:机组功率、主蒸汽压力和温度、再热蒸汽压力和温度、各段抽汽压力、汽轮机转速、转子轴向位移量、转子与汽缸的相对膨胀量、热应力、汽轮机的振动、主轴挠度、各轴承温度、油膜压力、润滑油温度、调节油压力等。

自动检测的另一个重要的方面是工艺信号(声、光)。这种信号通常分为两类:一类是当生产过程出现异常情况时,用来唤起操作人员的特别注意。例如:汽包水位过高、某关键点温度过高时的自动报警信号;主机或辅机发生故障停机时的事故信号等。另一类工艺信号是用作遥控操作时的检查信号。如遥控发出的“开机”或“关机”是否已经执行可用灯光信号表示执行的结果;不同操作地点的操作人员之间对设备操作的灯光联络信号。

### 1.1.2 远方操作

远方操作也叫远动。它是利用辅助能源对远离主控室的设备进行操作的过程,如对气动阀和电动阀的开、关操作,对泵、风机的启、停操作等。控制各项操作的指挥信号通常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,仍可由操作人员在操作台上进行远方操作,保证生产过程的继续进行。

### 1.1.3 顺序控制(SCS)

顺序控制也叫自动操作。主要是机组起停、运行和事故处理时一系列操作的自动化。顺序控制的内容是按照预先设计的顺序,有计划、有步骤地对生产设备和过程进行的一系列操作。每个操作步骤之间的转换都是自动执行而不需要人力干预的。实现顺序控制的装置必须具备必要的逻辑判断能力和联锁保护功能。在每一步操作后,必须判明这一步是否已经实现?是否为下步操作创造好条件?如果条件具备,则继续执行下一步操作,否则等候处理或自动处理,甚至中断操作过程。目前计算机已成为实现顺序控制的主要装置。

锅炉方面应用的顺序控制主要有:锅炉点火,锅炉吹灰,送、引风机的启停,水处理设备的运行,制粉系统的启停等。

汽轮机的顺序控制主要指汽轮机的自动启动和停机。汽轮机的自动启停分为两种。一种是模仿人操作的启动过程。该方法按照事先规定好的步骤和时间进行各项操作。另一种是根据热应力控制的自动启停过程。根据热应力控制的自动启停过程不仅可以保证机组的热应力处于安全范围之内,延长机组寿命,而且可以充分发挥机组的热应力潜力,缩短启动时间,节省启动费用,避免误操作,提高机组启动过程的经济性和安全性。



#### 1.1.4 自动调节

√ 生产过程要能够正常进行,并生产出合格的产品必须处于适当的工况,自动调节是维持这种状况的一种手段。当生产过程受到外来扰动而使运行工况发生偏移时,能够进行必要的操作来抵消扰动的影响,以恢复正常工况的过程叫调节。依靠自动化仪表自动实现这种操作过程就叫自动调节。

电站锅炉的自动调节主要包括:锅炉给水自动调节、锅炉燃烧过程自动调节(包括燃料量自动调节、送风量自动调节、引风量自动调节、制粉系统自动调节)、过热汽温调节、再热汽温调节等。对于大型机组来说还应该完整的逻辑控制功能,以及根据机组运行状况,确定机组的运行方式并实现全程调节和滑参数运行。

对于汽轮机,最基本又最主要的是保证发电频率的汽轮机转速自动调节系统;背压式汽轮机还必须有背压调节系统;大型汽轮机还有汽封汽压、旁路系统、凝汽器水位等自动调节系统。国外有些机组还配置有热应力调节系统。

单元制运行的锅炉-汽轮机,为使锅炉和汽轮机发电机组共同适应负荷的变化都设计了较为完善的协调控制系统(CCS)。

在正常运行和连续生产的条件下,自动调节是最经常起作用的一种自动化职能。它对电厂生产的经济性和安全性有极大的影响,掌握和分析调节过程的特点是十分重要的。

#### 1.1.5 自动保护

自动保护是在发生事故或异常情况下,不致于使生产设备遭受严重破坏,或把事故区域与其它部分分隔开来,防止事故进一步扩大所采取的紧急措施。这是保障设备安全的最后一关,一般不宜轻易动作,但在动作时必须快速可靠。自动保护包括以下几种措施:

(1)自动切断能源:中断电、气、汽、燃料的供应。如汽轮机的超速保护,锅炉炉膛灭火保护(FSSS)等等。

(2)自动减放储存的能量:如锅炉的安全阀、防爆门等。

(3)各种调节阀、挡板的限位:各种调节阀、挡板的极限位置(最大开度和最小开度)是根据安全运行的要求规定下来的,在正常工作中是不允许超过的。如果在自动调节过程中调节阀、挡板达到了极限位置,或者调节系统有故障而发出了报警信号(过大或过小),或者生产过程中出现了异常情况,此时应将自动调节或自动操作系统切除,只保留手动操作,以便运行人员根据自己的经验和判断进行操作和处理。

(4)连锁:连锁是在出现异常情况下或不正确操作时的一种保护程序。这一点要求在顺序控制的设计中特别注意。例如,在某一设备发生故障时,要按预定的顺序使其它有关设备自动解列。如果顺序错了或遗漏某一设备,就可能导致事故的进一步扩大或造成设备的损坏。

电厂生产过程自动化的上述各个组成部分虽然是由各种专用设备来完成的,但是它们的工作应该是协调一致的,设计是经过统筹考虑的。当采用计算机控制时,这种统一调度和集中管理的特色就更为突出了。

计算机是一种多功能的自动化装置,除可以完成上述的自动检测、自动调节、顺序控制、自动保护功能外,还具备突出的计算和逻辑判断功能。它在事故处理方面可以对报警原因进行分析、指出故障部位、提出处理意见、指导操作,也可以在事故发生后追忆、记录和打印事故前的

参数和首发事故等,供事故分析用;在运行方面,它可以实现自动启停,并对启动、停机、运行过程中的参数和设备进行检测和监督、对主要参数的变化趋势进行分析、对操作顺序进行监视等。

## 1.2 自动调节的基本概念

上节已经提到,所谓调节就是为了达到一定的目的,对作为生产过程的设备进行操作。用人来完成所需要的操作过程叫人工调节。如果根据人工调节的思想,由仪器、仪表完成的这一操作过程则称为自动调节。了解人工调节过程对于深入理解自动调节是很有启发意义的。因此下面结合汽包锅炉给水调节过程说明人工调节和自动调节的一些特点。

图 1-1 为汽包锅炉给水人工调节示意图。在锅炉运行过程中,汽包水位  $h$  是给水流量  $W$  与蒸汽流量  $D$  是否平衡的标志。汽包水位高,说明给水流量大于蒸汽流量;汽包水位低,说明给水流量小于蒸汽流量。如果运行人员能维持汽包水位  $h$  在一定范围内,也就实现了给水流量  $W$  和蒸汽流量  $D$  的平衡。因此,水位  $h$  是反映锅炉运行是否正常的主要参数之一,也是给水调节系统的直接目标。通常我们希望水位  $h$  维持在某一规定的数值  $h_0$ 。当水位  $h$  在某些因素(例如锅炉负荷发生变化)影响下偏离所规定的数值  $h_0$  时,操作人员就要进行操作,调整给水调节阀的开度,以改变给水流量  $W$ ,使汽包水位重新恢复到  $h_0$ ,这一操作过程也就称为调节过程。

在调节理论术语中,被调节的生产过程或设备称为调节对象,如图 1-1 的汽包及进出口管道。通过调节所要维持的参数称为被调量,如图 1-1 中的汽包水位  $h$ 。被调量所要保持的数值称为给定值,如汽包水位的给定值  $h_0$ 。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用来改变进入调节对象的物质或者能量流率的装置,这种调节装置称为调节机关,如给水调节阀。改变调节机关的位置从而改变调节量的作用称为调节作用量,如给水流量。除调节作用量外,引起被调量变化的其它因素通称为扰动。

因此,调节也就是通过调节机关的动作,改变调节作用量来抵消扰动对被调量的影响,使被调量能经常等于给定值或与给定值的偏差保持在允许的范围之内。

在图 1-1 所示的人工调节中,调节机关是由运行人员操作的。为了进行操作,运行人员必须作到以下几点。

(1) 监视:即运行人员用眼睛观察汽包水位表,掌握汽包水位的实际值。

(2) 决策:将监视到的汽包水位值与给定值进行比较,检查是否有偏差及偏差的方向和大小,然后决定是否进行调节及调节机关该向那个方向动作(开大或关小)。最后确定应以什么样的规律去开大或关小调节机关。

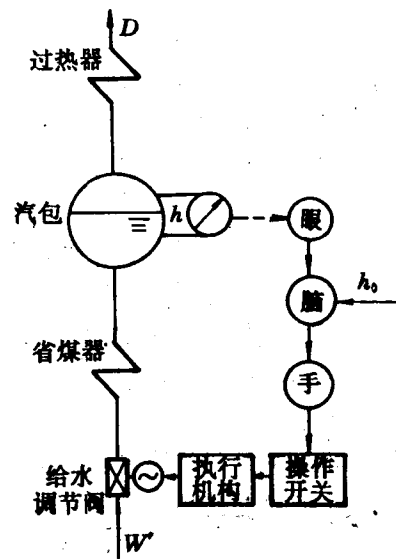


图 1-1 汽包锅炉给水人工调节示意图

(3)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。调节机关可能是远方操作(电动的或气动的),也可能是就地直接手操。

重复上述步骤,直到被调量恢复到给定值为止,调节过程方算结束。

显然,人工调节效果的好坏,主要取决于操作人员的实践经验,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则。在运行人员还不了解调节对象特性的情况下,要想进行正确的操作是不可能的。

为了实现自动调节,必须用一套机械的、气动的、液压的或电动的装置来实现人工调节中的操作人员所完成的三方面功能。这套装置总称为自动调节装置。从自动调节的要求来看,自动调节装置必须具有能完成上述三方面功能的基本部件。即:

(1)测量变送部件(测量、变送器):用来测量被调量。把物理参数(如水位、温度、压力、流量等)转换成某种便于远距离传送,并与被调量成比例(或某种确定的函数关系)的测量信号。

(2)运算部件(调节器):接受变送器来的被调量测量信号,并把它与给定值比较。

当被调量与给定值有偏差时,产生一个反映偏差方向(正或负)和大小的信号。根据这个偏差信号按照预先设计的规律(比例、积分、微分等线性运算和限幅、死区或其它非线性)进行运算,根据运算结果发出连续的调节信号。这个运算部件也就是常说的自动调节器(简称调节器)。调节器中通常附有一个可调的定值器用于确定给定值。运行人员可以根据生产过程的要求在定值器上预先设置好给定值。

(3)执行机构:按照调节器发出的调节信号使调节机关动作,改变调节作用。

汽包锅炉的给水自动调节示意图如图 1-2 所示。

把自动调节装置和调节对象连接在一起就构成了一个自动调节系统。在自动调节系统中,自动调节装置代替了操作人员的功能。为了得到良好的调节效果,要求自动调节装置能象熟练的操作人员那样执行调节任务。自动调节装置是根据人们掌握的对象特性和积累的操作经验来设计和工作。因此,自动调节装置是实现人的操作思想的装置,并反映了操作人员积累的经验。对某一生产过程,如果在人们还不知道应该如何进行调节的情况下,要想实现自动调节是不可能的。

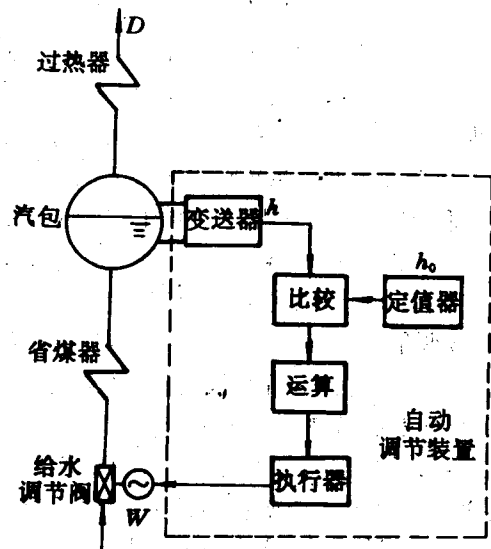


图 1-2 汽包锅炉给水自动调节示意图

### 1.3 自动调节系统方框图

自动调节系统中,调节对象和调节装置是通过信号的传递相互连接起来的。在图 1-2 所示的给水自动调节系统中,当外部负荷变化引起蒸汽流量改变时,汽包水位的变化通过变送器转换成自动调节器能够接受的统一信号(如电动调节器所采用的电流或电压信号)。在调节器中,反映被调量变化的电流或电压信号首先与代表给定值的电流或电压信号进行比较,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,得到所需的调节信号。该调节信号送到执行机构,驱动给水调节阀,改变进入锅炉的给水流量,以抵消蒸汽流量变化对汽包水位产生的影响。锅炉给水自动调节系统的这一信号传递关系,可用图 1-3 所示的方框图来表示。

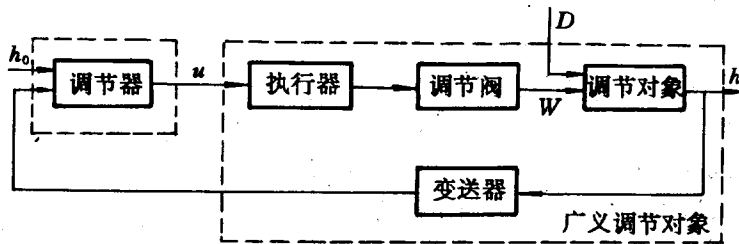


图 1-3 自动调节系统方框图

在图 1-3 中,每一个小方框均代表自动调节装置和调节对象的一个部件或几个部件的组合,称之为环节。环节之间带有箭头的连线表示信号的传递途径和方向。每一环节有“输入信号”,也有“输出信号”,分别称为环节的输入(量)和输出(量)。输入量和输出量之间存在着一定的因果关系。方框图中的环节并不代表某一部件或某一设备的具体结构,而是代表这个部件或设备具有的输入和输出之间的因果关系,或者说代表这个部件或设备将输入信号转变为输出信号的传递关系。这种因果关系(传递方向)是不可逆的。方框图清楚的表明了调节系统调节过程中各个信号之间的单向因果关系,对调节系统的分析和研究是十分重要的。

同是一个调节系统可以画成不同的方框图。画方框图的原则是要能正确地表示出信号之间的联接关系,可繁可简。如图 1-3 所示的锅炉给水调节系统方框图,如果按虚线那样把调节对象、变送器、执行器、调节阀用一个环节表示,我们称之为广义调节对象(为了简单也就称为调节对象),则可画成图 1-4 所示的方框图。这个方框图表明引起被调量汽包水位(为具有一般性,被调量用  $c$  表示)变化的原因有两个:蒸汽负荷  $D$ (扰动量用  $d$  表示)变化和调节器输出  $u$  (调节作用)。

另一方面,被调量  $c$  的给定值(用  $r$  表示)的变化也会引起调节作用  $u$  的变化。在自动调节原理中我们所要熟悉的是上述几个变量的关系,即在扰动  $d$  或给定值  $r$  改变时,被调量  $c$  和调节作用量  $u$  是如何变化的,至于自动调节装置内部各部件输入输出信号之间的关系暂不作仔细分析。这个最简单的方框图说明了调节系统输出(即被调量  $c$ )和输入(扰动  $d$  和给定值  $r$ )之间的变化关系。由此可见,自动调节系统的方框图可以简单明了地反映出系统输入与输出之间的关系。在图 1-4 中“ $\otimes$ ”表示加法器,也称合点,输入量加或减用“+”或“-”标注。图中的“ $\perp$ ”称分点,它表示经过该分点后,信号延两条路线传递,而且两条信号线上信号都与输入分点的信号相等。

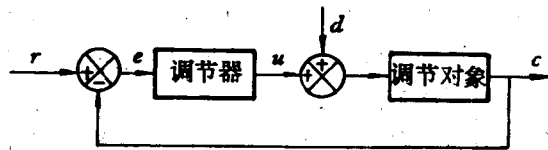


图 1-4 简化的自动调节系统方框图

在图 1-4 中,从自动调节系统的输出  $c$  到调节器的输入引了一个信号,该信号称为反馈信号(简称反馈),它以消弱(取负号)调节器输入信号的方式起作用,因此也称为负反馈。从信号的联接关系来看,该自动调节系统的信号流向构成一个闭合回路,因而称作闭环调节系统。这是最简单的自动调节系统或称单回路自动调节系统。

## 1.4 动态特性

### 1.4.1 动态特性

动态特性是研究调节系统(或元件、部件、调节器、调节对象)的基础,是分析和设计的依据,后面还要花费较大的篇幅深入地讨论环节、调节对象和调节器的动态特性,然后研究自动调节系统的性能。本节只说明动态特性的定义。为了理解动态特性,首先必须区分静态和动态两种状态。

图 1-4 所示的自动调节系统中,调节对象和调节器的信号随时都在相互作用着,但调节系统有两种状态可能出现。仍以汽包水位自动调节系统为例进行分析。当流入量  $W$ (给水)和流出量  $D$ (蒸汽流量)相等,被调量  $c$ (水位)等于给定值  $r$ (水位给定值)时,调节系统中的各信号都处于平衡状态,系统所处的这种状态称为静态或稳态。一旦系统受到扰动使  $W \neq D$ ,水位必然受到影响,使  $c \neq r$ ,于是,调节器便进行调节,我们称系统进入动态(过程)或瞬态(过程)。在动态过程中,调节器不断根据水位与给定值的偏差调整给水量,直到  $c=r, W=D$ ,达到新的平衡状态,系统又进入静态。调节系统就是这样从静态受到扰动后进入动态,经过调节,又进入新的静态,周而复始地工作。调节系统(或元件、部件、调节器、调节对象等)静态时输入输出之间的关系,即静态特性是比较简单的。而动态过程中信号之间的关系就要复杂得多。而且对于一个自动调节系统,衡量其品质优劣的主要标准是动态过程中各个参数的变化情况。因此动态特性也就是自动调节系统分析和设计的基础。

调节系统(或元件、部件、调节器、调节对象)在初始平衡状态下受到某一时间函数  $x(t)$  的输入作用时,其输出响应将是另一个时间函数  $y(t)$ 。 $x(t)$  与  $y(t)$  之间存在着因果的关系,这种因果关系便是系统(或元件、部件、调节器、调节对象)的动态特性。

动态特性有多种表示法,最直观的就是图示法。例如图 1-5 所示的自动调节系统,在任意时间函数  $x(t)$  的输入扰动下,其输出为时间函数  $y(t)$ 。这里  $x(t)$  和  $y(t)$  都用图形表示, $x(t)$  与  $y(t)$  之间的关系就表示了自动调节系统的动态特性,但是具体是什么样的关系就不易看清楚

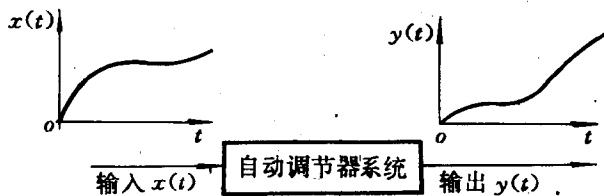


图 1-5 自动调节系统动态特性的图示法表示

了。精确而又便于分析动态特性的表示法是动态方程(微分方程)或传递函数。传递函数的概念将在第 2 章介绍,这也是自动调节原理的最基本内容。

采用任意时间函数  $x(t)$  作为输入分析动态特性,由于很难看出  $x(t)$  和  $y(t)$  之间的关系,或者说不易识别系统(或元件、部件、调节器、调节对象等)的动态特性。鉴于这种情况,就有必要利用某些特殊的确定性的函数  $x(t)$  作为输入,以便得到易于分析的输出响应  $y(t)$ ,进而得到系统(或元件、部件、调节器、调节对象)的动态特性。热工自动调节系统的动态特性分析中,最常用的输入函数是阶跃函数,其次是斜坡函数、脉冲函数和正弦函数。选用这些典型的函数作为输入函数在动态特性分析时是十分方便的。首先,无论是在实验室还是在生产现场,这种形式的输入函数易于产生;其次,采用这些典型函数易于使用叠加原理,即对

于任意形式的输入,均可视为典型输入函数的叠加组合。第三,典型输入函数的表达式简单,便于理论分析和计算。

### 1.4.2 典型输入函数

下面简单地介绍一下几种最常用的典型输入函数的表达式及特性。

#### 1. 阶跃函数

阶跃函数的数学表达式为

$$x(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ x_0 & t \geq 0 \end{cases} \quad (1-1)$$

阶跃函数表示在  $t=0$  时出现的阶跃变化幅值为  $x_0$  的函数。如图 1-6 所示,在实际生产过程中,这意味着某一幅值为  $x_0$  的输入在  $t=0$  时突然加到系统上。例如负荷突然增加或减少,调节阀突然开大或关小,以及电源电压或电流突然跳跃变动等,都可以近似看成阶跃变化信号。阶跃函数是测试动态特性应用最多的一种输入函数。

幅值  $x_0=1$  的阶跃函数叫单位阶跃函数,用  $1(t)$  来表示。于是幅值为  $x_0$  的阶跃函数也可以写成  $x_0 \cdot 1(t)$ 。

通常我们用  $x(t-t_0)$  表示在  $t=t_0$  时刻出现的阶跃函数。即

$$x(t-t_0) = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ x_0 & t \geq t_0 \end{cases} \quad (1-2)$$

#### 2. 斜坡函数

斜坡函数的数学表达式为

$$x(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ vt & t \geq 0 \end{cases} \quad (1-3)$$

它表示从  $t=0$  时刻开始,以恒定速度  $v$  变化的时间函数,如图 1-7 所示。由于该函数的变化速度是恒定的,因此斜坡函数也称等速度函数。在实际生产过程中,斜坡函数意味着随时间以恒定速度  $v$  变化的扰动。 $v=1$  的斜坡函数叫单位斜坡函数。

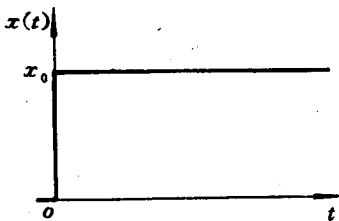


图 1-6 阶跃输入函数

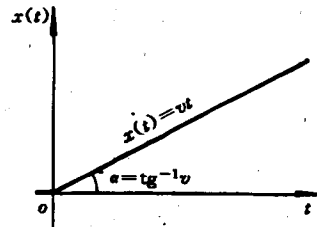


图 1-7 斜坡输入函数

#### 3. 脉冲函数

脉冲函数是分析自动调节系统最简单的输入函数。它可以看作由方波函数演变而来。方波函数如图 1-8(a)所示,它可以表示为:

$$x(t) = \frac{A}{t_0} [1(t) - 1(t - t_0)] \quad (1-4)$$

即方波函数是由  $t=0$  时幅值为  $\frac{A}{t_0}$  的正阶跃函数〔图 1-8(b)〕和  $t=t_0$  时幅值也为  $\frac{A}{t_0}$  的负阶跃函数〔图 1-8(c)〕叠加而成的。参看图 1-8(a)可知,方波函数曲线与时间轴围成的面积为  $A$ ,它等于阶跃函数高度  $\frac{A}{t_0}$  和方波函数宽度  $t_0$  的乘积。

当方波函数的宽度  $t_0$  趋于零时,其极限定义为脉冲函数:

$$x(t) = \lim_{t_0 \rightarrow 0} \frac{A}{t_0} [1(t) - 1(t - t_0)] \quad (1-5)$$

即脉冲函数是一个宽度为无穷小,幅值为无穷大,而曲线与时间轴围成的面积为  $A$  (称为脉冲函数的强度)的方波函数,如图 1-8(d)所示。脉冲函数的唯一参数是它的脉冲强度  $A$ 。

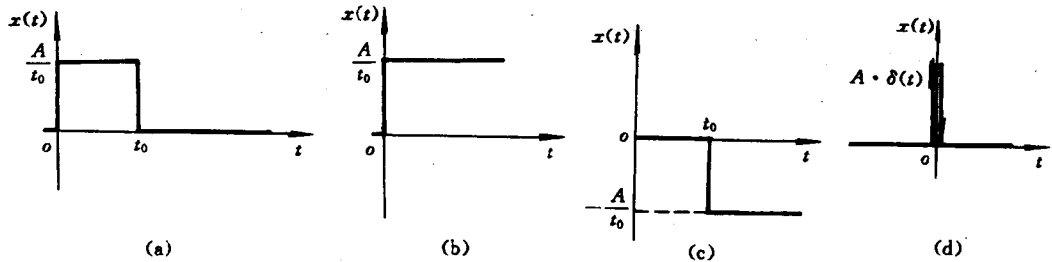


图 1-8 方波函数和脉冲函数

(a)方波函数; (b)正阶跃函数; (c)负阶跃函数; (d)脉冲函数

强度  $A$  等于 1 的脉冲函数称为单位脉冲函数或  $\delta$  函数,记作  $\delta(t)$ 。于是强度为  $A$  的脉冲函数可以写成  $A \cdot \delta(t)$ 。

$\delta(t-t_0)$  表示在  $t=t_0$  时刻出现的单位脉冲函数。根据脉冲函数的定义,脉冲函数具有如下的特性:

$$\delta(t) = \begin{cases} 0 & t \neq 0 \\ \infty & t = 0 \end{cases} \quad (1-6)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (1-7)$$

由上面  $\delta$  函数的性质很容易看出,单位脉冲函数是单位阶跃函数的导数。即

$$\delta(t) = \frac{d}{dt}[1(t)] \quad (1-8)$$

需要注意的是,实际中要严格地产生脉冲函数是不可能的。然而对于幅度较大而持续时间较短系统的时间常数又非常短的脉动输入量,可以近似地用一个脉冲输入信号来代替。脉冲输入信号(如力或力矩)在一个很短的时间内对系统提供了一定的能量,这种能量是不容忽视的,所以脉冲强度  $A$  是一个非常重要的参数。

#### 4. 正弦函数

前面所述的三种输入函数所得到的输出响应都是具有时间特性的或作为时域分析而用的。而正弦函数  $x(t) = A \sin \omega t$  是振幅为  $A$ ,角频率为  $\omega$  的周期函数。用这种输入函数并使  $\omega$  从 0 到  $\infty$  变化作为系统的输入,可得到系统在各种频率正弦信号输入作用下的稳态正弦输出。以后将会介绍该正弦输出的幅值和相角都是正弦输入信号角频率  $\omega$  的函数(输出幅值也与  $A$  成正比关系),因此称为频率特性。频率特性也是动态特性的一种表达形式。根据频率特性分析

系统的方法称频域分析法。这种方法将在第7章介绍。频域分析方法是自动调节理论的一个很重要的组成部分。

由上述可知，用阶跃函数测试调节系统（或调节对象、调节器、元件、部件）的动态特性，比采用其它几种典型输入函数时得到的结果容易分析，方法简单实用，因此经常被采用。需要注意的是动态特性的测试应从静态（稳态）开始，才能保证所得结果的正确性。从理论上讲幅度变化量为  $x_0$  阶跃函数，是以无穷大速率从 0 变化到  $x_0$  的，所以在阶跃函数输入下得到的输出响应曲线也被称为飞升曲线。图 1-9 是炉膛负压在引风量阶跃扰动  $x(t)$  [图 1-9(a)] 输入下的输出响应曲线  $c(t)$  [图 1-9(b)]。如果忽略炉膛的阻力和容积等因素的影响，其输出响应曲线(实线)就象把输入函数曲线按比例重复了一遍。所以这类调节对象的动态特性可称为比例的或比例环节。汽轮机调速器在阶跃输入下也有类似于图 1-9(b) 的响应曲线，因而它也是一个比例环节(比例调节器)。

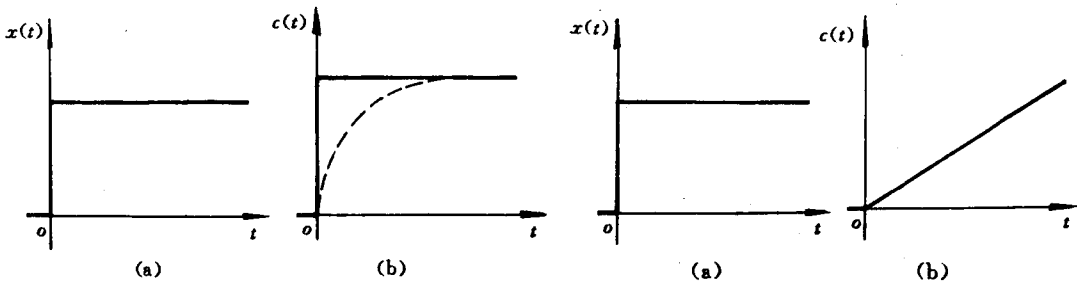


图 1-9 阶跃输入下炉膛负压的响应

图 1-10 蒸汽流量阶跃扰动下汽轮机转速响应

(a)引风量阶跃输入；(b)炉膛负压响应

(a)蒸汽流量阶跃输入；(b)转速输出响应

如果不忽略炉膛的阻力和容积等因素的影响，其输出响应将是图 1-9(b) 中虚线所示的曲线。这是由于炉膛负压对风量呈现一定的惯性所致。具有这种动态特性的调节系统(或调节对象、元件、部件)称为惯性系统(或惯性环节)。

图 1-10 是汽轮发电机在输出功率不变的情况下，进入汽轮机蒸汽流量阶跃变化时汽轮机转速的响应曲线。可以发现，输出是对输入按时间积分得到的，具有这种动态特性的环节便称为积分环节。

用阶跃函数对元件或部件进行动态特性测试。根据测试的结果，可以把动态特性用比例环节、积分环节、惯性环节等几种基本的典型环节来表示。第 3 章将较详细地介绍这些典型环节的数学描述和特性。在自动调节系统分析中，可以把典型环节根据具体情况组合起来，表达复杂的调节对象、调节器及调节系统的动态特性。例如根据调节器的特性可把调节器分为比例、积分、比例积分、比例微分、比例积分微分调节器。

## 1.5 对自动调节系统性能的要求

一个自动调节系统受到阶跃函数的输入扰动后，被调量的响应可能有图 1-11 所示的几种不同形式。图 1-11(a)和(b)两种过程中，被调量经过一个动态变化过程后重新达到平衡状态。新的平衡状态下被调量的数值可能就是扰动前的数值，也可能是一个新的数值。具有这两类过



程的系统是稳定的。图 1-11(a)是不振荡(非周期)的调节过程。其中又可分为单调变化(曲线①)和有单峰值(曲线②)两种形式。图 1-11(b)是衰减振荡过程。图 1-11(c)表示的是被调量等幅振荡的过程。这种自动调节系统受到扰动后不能达到新的平衡,被调量和调节作用都作等幅振荡。这种系统称为临界稳定系统。临界稳定系统在实际生产过程是不能采用的。图 1-11(d)为被调量渐扩振荡的过程。这种自动调节系统受到阶跃扰动后,不但不能达到新的平衡而且偏差时正时负,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。这种调节系统是不稳定的,当然生产过程也就不能应用了。

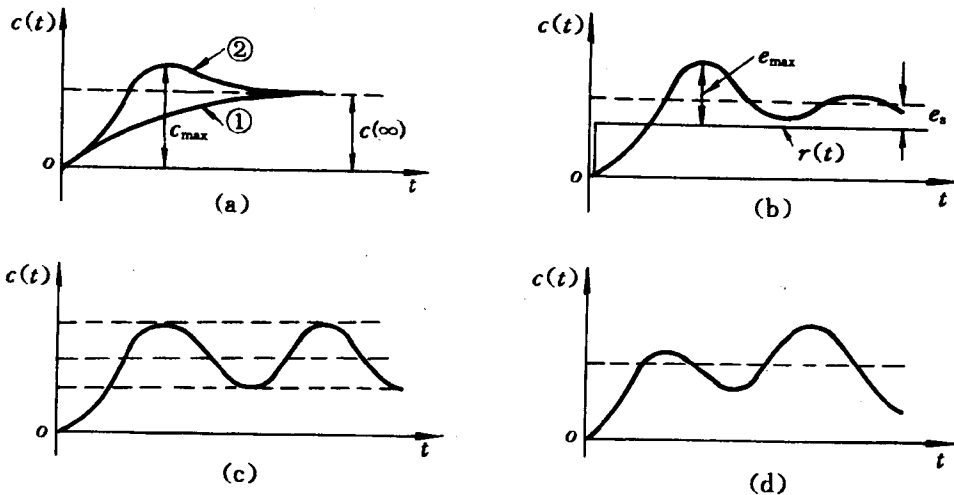


图 1-11 几种典型的调节过程曲线

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

从生产过程的要求看,希望自动调节系统能及时消除扰动对被调量的影响,保证被调量与给定值相等。从图 1-11 所示的调节过程曲线可以看出,在扰动作用下,调节系统不可能完全准确地保持被调量等于给定值,被调量总是要发生变化而偏离给定值。那么该怎样衡量调节系统品质的优劣呢?通常从稳定性、准确性和快速性三个方面来衡量调节系统的性能。

### 1.5.1 稳定性

调节系统的稳定性是对调节系统最基本的要求。不稳定的调节系统在生产过程中是不能应用的。临界稳定的系统也不符合生产的要求(只有在个别的特殊场合,才可以允许有振幅不大,频率不高的持续振荡)。只有稳定的自动调节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调节系统是稳定的,而且还要有一定的稳定裕量,以保证在扰动发生后的调节过程中振荡次数不致过多(一般限于 2~3 次)。

调节系统的稳定性问题是由于闭环反馈作用引起的,而负反馈是自动调节系统稳定的必要条件。如果把闭环回路中某一个信号接反了而成为正反馈,则自动调节系统就不能稳定,调节作用和被调量将自动地走向极端(极大或极小)状态,破坏了稳定的必要条件。这种系统结构上的错误造成不稳定的现象在试投一个新安装的闭环调节系统时时有发生,必须注意避免。

工业调节对象,尤其是热工调节对象,被调量对调节作用的反应总是比较迟缓的,因此