

# 热工过程自动调节原理和应用

陈来九 编著

水利电力出版社

## 内 容 简 介

本书全面地阐述了自动调节的基本理论，但以经典线性理论为主要内容，应用传递函数作为描述和分析系统动态过程的基本工具，并以单变量线性反馈调节理论作为研究自动调节系统的基础。此外，书中也简要地介绍了非线性系统和采样系统的分析方法。关于现代控制理论在生产过程自动化中的应用，目前正处在研究阶段，为了提供学习现代控制理论的基础，本书也适当介绍了状态变量分析方法的基本内容。

本书具有较强的工程实用性，以一定的篇幅详细介绍了自动调节理论在火电厂机、炉典型调节系统上的应用，并选编了较多的工程分析实例和习题，对读者切实掌握和应用控制理论很有助益。

本书可供电力、化工、冶金、机械等部门从事自动控制工作的技术人员学习参考，也可作为大专院校自动控制专业的教学参考书。

## 热工过程自动调节原理和应用

陈 来 九

责任编辑 顾希衍

\*

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

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

\*

850×1168毫米 32开本 19.25印张 512千字  
1982年11月第一版 1982年11月北京第一次印刷

印数0001—8430册 定价2.30元

书号15143·5006

# 序 言

热工过程自动调节是火力发电厂生产过程实现现代化的重要技术措施之一。热工过程是连续进行的生产过程，实现自动调节需要各方面技术条件的配合，其中包括生产设备的运行状况、自动化仪表的性能以及自动调节系统的组织和调整。因此，从事热工过程自动调节工作的工程技术人员必须熟练地掌握自动调节理论，才能从实现自动调节的角度来分析研究生产设备的运行特性，对生产设备和生产过程提出合理的要求；从自动调节的需要出发对自动化仪表提出正确的技术要求；同时在熟悉生产过程和自动化仪表的基础上组织自动调节系统并使它发挥出最好的作用。

自动调节理论的内容极为丰富，编写本书的出发点在于应用自动调节理论来指导生产过程实现自动调节。根据生产过程的特点，经典的（或称为常规的）线性调节理论有着很重要的实用价值，因此本书以经典线性理论为主要内容，应用传递函数作为描述和分析系统动态过程的基本工具，并以单变量线性反馈调节理论作为研究自动调节系统的基础。此外，由于实际调节系统中有时因存在非线性因素而出现一些特殊现象以及非线性元件和采样调节系统的应用，所以在本书中也简要地介绍了非线性系统和采样系统的分析方法。关于现代控制理论在生产过程自动化中的应用，目前正处在研究阶段，为了提供学习现代控制理论的基础，本书适当介绍了状态变量分析方法的基本内容。

本书是在南京工学院动力系历年来开设热工过程自动调节方面有关课程的讲义和讲稿基础上编写的，全书共分十章，各章内容简述如下：

第一章和第二章介绍自动调节系统的基本概念和动态分析的

基本方法。重点介绍用方框图和传递函数分析系统动态特性的方法，并以此作为研究自动调节的基本工具。为了应用传递函数，还介绍了有关的数学基础——拉普拉斯变换。

第三章介绍热工调节对象和自动调节器的动态特性，重点介绍它们的动态数学模型（动态特性的数学表达式）的特点和获得这些模型的常用方法。这是分析研究自动调节系统的必要资料。

第四章和第五章介绍自动调节系统的分析方法，重点介绍根轨迹法和频率法的基本内容。应用这些方法分析单回路反馈自动调节系统的基本性质和评价它们的工作品质，以指导设计和改进自动调节系统。

第六章介绍单回路反馈系统的整定方法。第七章是在第六章的基础上结合典型热工对象（蒸汽锅炉）的运行特点，介绍几种典型热工过程自动调节系统的分析和整定方法，包括多变量对象实现自动调节的工程方法。

以上七章为本书的主要内容。

第八章概要介绍非线性调节系统的概念和两种分析方法（描述函数法和相平面法）。

第九章介绍线性采样调节系统以及 $z$ 变换法的基本概念。

第十章介绍近代控制理论的基础——状态变量分析方法的基本内容，包括系统的状态变量描述方法，状态变量反馈系统和线性最优控制的概念。

编写本书时所用到的主要参考资料和文献，其目录已列在书末。

本书是在南京工学院动力系领导和很多同志的支持、鼓励下得以完成的。在编写过程中，钱钟韩教授经常给予指导并对部分章节进行了仔细审阅。刘士中副教授详细审阅了第十章的原稿。为了验证整定公式的可靠性，徐耀文和郑光华同志做了大量的模拟试验。

本书初稿完成后，由清华大学自动化系方崇智教授以及有关老师作了全面审阅，提供了很多宝贵意见和建议，对初稿的修改

提高很有帮助。

在此，我谨向上述所有同志表示衷心感谢。

限于本人水平，本书难免有不少缺点和错误，欢迎读者批评指正。

陈来九

初稿写于一九八〇年春

修改于一九八二年二月

# 目 录

## 序 言

第一章 自动调节系统概论 .....	1
1-1 关于自动控制 .....	1
1-2 自动调节的概念 .....	2
1-3 自动调节系统分类 .....	5
1-4 方框图 .....	8
1-5 系统和元件的特性 .....	10
小结 .....	20
习题 .....	21
第二章 拉普拉斯变换和传递函数 .....	23
2-1 引言 .....	23
2-2 拉普拉斯变换方法的基本概念 .....	23
2-3 函数的拉普拉斯变换 .....	24
2-4 拉普拉斯变换的若干运算规则 .....	28
2-5 用部分分式法求拉普拉斯反变换 .....	35
2-6 传递函数 .....	38
2-7 脉冲响应函数和单位阶跃响应函数 .....	43
2-8 基本环节和环节间的基本联接方式 .....	46
2-9 推导物理系统的传递函数举例 .....	62
小结 .....	78
习题 .....	79
第三章 热工对象和工业调节器的动态特性 .....	82
3-1 引言 .....	82
3-2 热工对象动态特性的特点 .....	83
3-3 由阶跃响应曲线求出对象的近似传递函数 .....	87
3-4 自动调节器的基本调节作用 .....	106
3-5 工业调节器的动态特性 .....	112

3-6 工业调节器动态特性的形成原则·····	119
小结·····	126
习题·····	127
第三章 附录·····	128
III-1 有自平衡对象的阶跃响应曲线及其传递函数·····	128
III-2 无自平衡对象的阶跃响应曲线及其传递函数·····	130
第四章 调节系统的瞬态响应分析·····	133
4-1 引言·····	133
4-2 二阶系统分析·····	136
4-3 高阶系统的瞬态响应分析·····	149
4-4 劳斯 (Routh) 稳定判据·····	151
4-5 根轨迹法介绍·····	156
小结·····	176
习题·····	177
第五章 用频率法分析调节系统·····	180
5-1 引言·····	180
5-2 频率响应函数和频率响应特性·····	181
5-3 二阶系统的频率响应特性·····	188
5-4 用频率响应特性判别闭环系统的稳定性——奈魁斯特 (Nyquist) 判据·····	192
5-5 用闭环幅频特性分析研究系统的瞬态响应·····	211
5-6 关于对数频率响应特性·····	218
小结·····	230
习题·····	231
第六章 单回路反馈调节系统的整定·····	234
6-1 引言·····	234
6-2 整定调节系统的性能指标·····	237
6-3 使系统特征方程式主导复根的衰减指数 $m$ 为指定值的 整定计算方法·····	246
6-4 用根轨迹法进行整定·····	264
6-5 用频率法整定调节系统的一般介绍·····	286
6-6 调节系统的工程整定方法·····	296
小结·····	306

习题	308
<b>第七章 电厂热工过程自动调节系统及其整定</b>	<b>310</b>
7-1 引言	310
7-2 串级调节系统	311
7-3 采用导前微分信号的双回路系统	327
7-4 前馈-反馈调节系统	340
7-5 多变量调节对象的自动调节系统	356
小结	377
习题	378
<b>第八章 非线性调节系统</b>	<b>380</b>
8-1 引言	380
8-2 描述函数法概要	384
8-3 描述函数的推导	386
8-4 用描述函数法分析非线性闭环系统	396
8-5 相平面法的基本概念	407
8-6 相轨迹作图方法	416
8-7 相轨迹图的特征——奇点和极限圈	419
8-8 从相轨迹上求出两点间的时间间隔	427
小结	428
习题	429
<b>第九章 线性采样调节系统</b>	<b>431</b>
9-1 引言	431
9-2 信号的采样及复现	432
9-3 $z$ 变换法	441
9-4 脉冲传递函数	458
9-5 系统中有采样器时方框图的运算	463
9-6 采样调节系统的稳定性	471
9-7 连续系统的离散化	478
小结	486
习题	486
<b>第九章 附录</b>	<b>488</b>
IX-1 函数的广义 $z$ 变换	489



IX-2 函数的广义 $z$ 变换及其反变换举例 .....	490
<b>第十章 状态变量分析方法概论 .....</b>	<b>491</b>
10-1 引言 .....	491
10-2 用状态变量描述系统的动态特性 .....	494
10-3 系统状态方程的求解和状态转移矩阵 .....	525
10-4 状态变量反馈系统 .....	534
10-5 离散时间系统的状态方程及其求解 .....	547
10-6 系统的可控性和可观测性 .....	556
10-7 最优控制概念 .....	564
小结 .....	582
习题 .....	583
<b>第十章附录 矩阵及其运算 .....</b>	<b>586</b>
X-1 矩阵的定义和名词 .....	586
X-2 矩阵的代数运算 .....	592
<b>参考文献 .....</b>	<b>604</b>

# 第一章 自动调节系统概论

## 1-1 关于自动控制

在生产和科学技术的发展过程中，自动控制起着很重要的作用。自动控制的含义是十分广泛的：任何正在运行中的设备和正在进行中的过程，没有人的直接干预而能自动地达到人们所预期效果的一切技术手段都称为自动控制。

发电厂热工过程自动控制主要包含以下几个主要内容：

（1）自动检测：自动地检查和测量反映生产过程运行情况的各种物理量、化学量以及生产设备的工作状态，以监视生产过程的进行情况和趋势，称为自动检测。

（2）顺序控制：根据预先拟定的程序和条件，自动地对设备进行一系列操作，称为顺序控制。顺序控制也称自动操作，在发电厂中主要用于主机或辅机的启动和停止。

（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。

（4）自动调节：自动维持生产过程在规定的工况下进行，称为自动调节。

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，生产过程总会经常地受到各种因素的干扰和影响，使运行工况发生偏离，必须通过自动调节实现正常运行的要求。因此，自动调节是最经常起作用的一种自动控制职能，它对生产过程的正常进行有很大影响。由于自动调节在生产过程自动控制中的重要作用，所以有些文献上就把自动调节称为自动控制。

本书主要讨论热工过程自动调节中的一些基本问题，而在本

章中将主要介绍有关自动调节的常用术语和基本概念。

## 1-2 自动调节的概念

生产过程是否正常进行，通常是用一些物理量来表征的，例如：汽轮发电机的转速，锅炉的汽压、汽温，汽鼓水位，炉膛负压等。当这些物理量偏离所希望的数值时，就表示生产过程偏离了规定的工况，必须对生产过程进行“调节”。所以，“调节”是对生产过程的一种有目的的干预，调节的目的就是使表征生产过程的这些物理量保持为所希望的数值。这个调节任务可以由人工操作来完成，称为人工调节。而如果用一整套机械的或电气的装置来代替人工操作，则就是自动调节。

为了便于说明，先介绍几个常用的术语：

(1) 调节对象：被调节的生产过程称为调节对象或被控过程。

(2) 被调量：表征生产过程是否符合规定工况的物理量，也就是调节所要维持为规定数值的这些物理状态（如温度、压力、流量等），称为被调量或被调参数。

(3) 给定值：希望被调量应该具有的数值，称为目标值或给定值。在很多情况下给定值是不变的（如正常运行时锅炉的汽鼓水位、汽机转速等），但是在有些情况下给定值是变化的，如汽轮机启动过程中转速的给定值就应不断改变。

(4) 扰动：生产过程中，引起被调量偏离其给定值的各种原因称为扰动。

(5) 调节量：由调节作用来改变，去控制被调量变化（使被调量恢复为给定值）的物理量称为调节量。

(6) 调节机构：接受调节作用去改变调节量的具体设备称为调节机构。

运用上述术语来表述，调节就是抵销扰动的影响，使被调量回复到给定值。生产过程中，如果被调量等于给定值，就不需调

节；而由于扰动使被调量偏离了给定值，这时就需要调节。调节就是根据被调量偏离给定值的情况，适当地动作调节机构，改变调节量，最后抵销扰动的影响，使被调量回复到给定值。

图1-1是对加热器温度进行人工调节的示意图。加热器中蒸汽加热液体的过程是调节对象（或简称加热器为调节对象），被加热液体的出口温度 $\theta$ 是被调量，蒸汽阀 $V$ 是调节机构。当被调量 $\theta$ 偏离规定值 $\theta_0$ 时，操作人员就要适当地操作蒸汽阀 $V$ ，以改变加热蒸汽的流量 $Q_1$ ，使温度 $\theta$ 回复到规定的数值。操作人员对调节机构的操作就是调节作用。由于调节作用而改变的蒸汽流量就是调节量。引起被调量 $\theta$ 变化的各种原因，如被加热液体的流量或液体进入加热器时温度的改变、蒸汽温度的改变或蒸汽流量的自发变化（不是调节阀动作所引起的）等，都是扰动。

在图1-1的例子中，平衡状态时被调量 $\theta$ 等于给定值 $\theta_0$ ，这时不需要调节；如果发生扰动，设被加热液体的流量 $Q_2$ 发生变化，于是被调量 $\theta$ 发生变化，当 $\theta$ 偏离给定值 $\theta_0$ 时，操作人员就要根据 $\theta$ 偏离给定值的情况操作调节阀，直到被调量 $\theta$ 重新

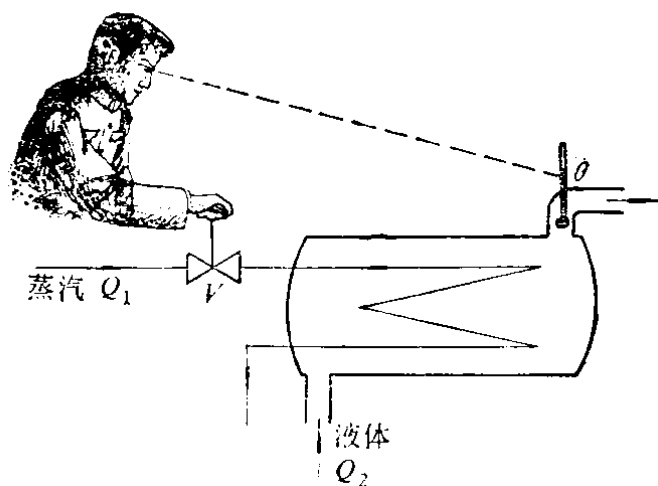


图 1-1 人工调节示意图

等于给定值 $\theta_0$ 为止。从扰动发生被调量 $\theta$ 偏离给定值 $\theta_0$ ，经过操作人员的调节，到被调量 $\theta$ 重新等于给定值 $\theta_0$ ，其间要经历一段过渡过程。在这个过渡过程中，操作人员的作用和调节对象的关系如图1-2所示。在调节的过渡过程中，被调量 $\theta$ 和给定值 $\theta_0$ 的偏差是操作人员调节的依据。由于被调量 $\theta$ 不断变化，偏差 $\theta_0 - \theta$ 也不断变化，操作人员和调节对象就组成了一个如图1-2所示的反馈调节系统。应该指出，在调节过程中，被调量 $\theta$ 一定会暂时偏离给定值（动态偏差），而且调节过程总要经历一段时间（调节

过程时间)。动态偏差的大小和调节过程的时间决定于操作人员的经验,也决定于调节作用对被调量施加的影响。

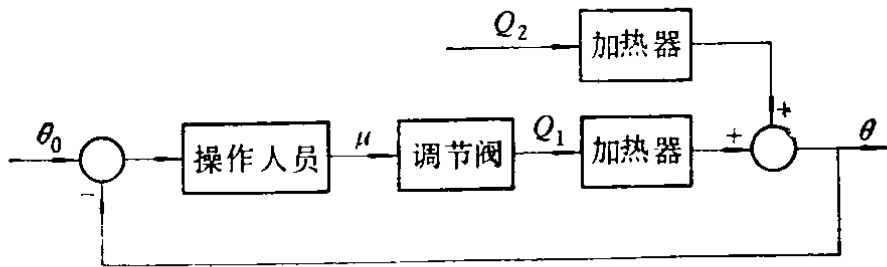


图 1-2 加热器温度人工调节系统方框图

如果用一整套自动调节装置来代替操作人员的作用,使生产过程不需操作人员的直接参与而能自动地执行调节任务,这就叫做自动调节。图1-3(a)为加热器温度自动调节的示意图,图1-3(b)则为该自动调节系统的方框图。图1-3(b)所示自动调节系统的工作原则和图1-2的人工调节系统是相同的,也是反馈调节系统,只是用了一些自动调节设备代替操作人员的作用,这些设备主要有:

- (1) 测量单元——用来测量被调量,并把被调量转换为与之成比例(或其它固定函数关系)的某种便于传送和综合的信号 $b$ 。
- (2) 给定单元——用来设定被调量的给定值,发生与测量信号 $b$ 同一类型的给定值信号 $r$ 。
- (3) 调节单元——接受被调量信号和给定值信号比较后的偏差信号,发出一定规律的调节指令给执行器。
- (4) 执行器——根据调节单元送来的调节指令去推动调节机构,改变调节量。

当被调量偏离给定值后,自动调节设备就自动地对生产过程进行调节,直到被调量等于给定值不再进一步变化时为止。应该指出,并不是自动调节设备一经安装好就能执行调节任务、实现生产过程自动调节的。为了使自动调节系统能满意地工作,必须研究

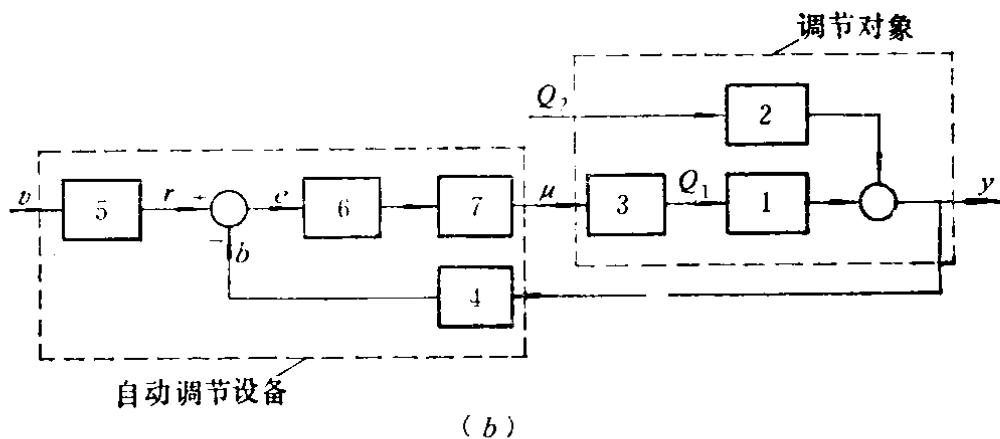
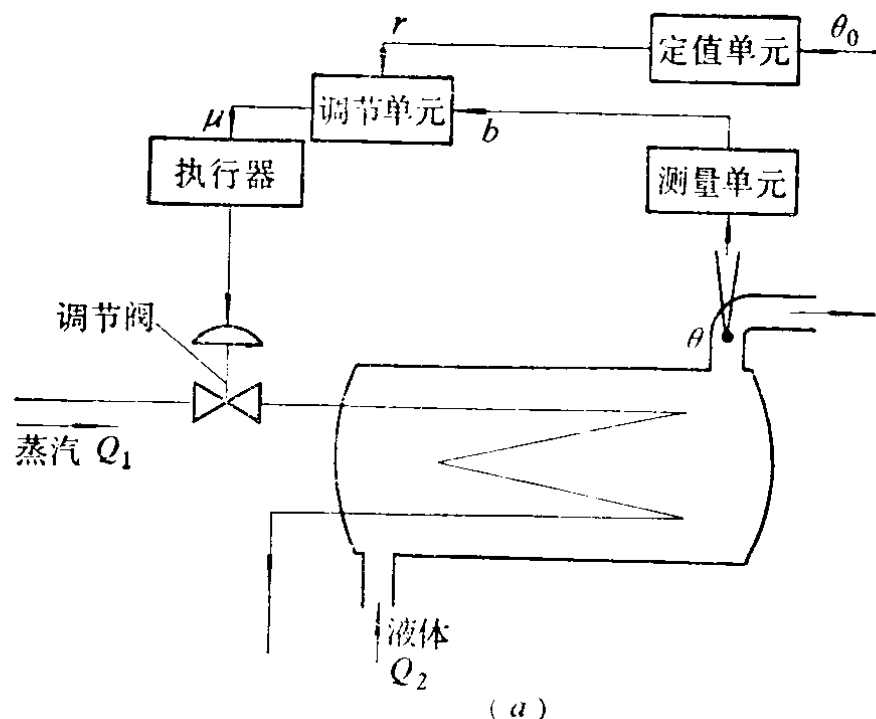


图 1-3 自动调节系统举例

(a)示意图; (b)方框图

- 1、2—生产过程(加热器中进行的加热过程); 3—调节机构; 4—测量单元;  
 5—定值单元; 6—调节单元; 7—执行器  
 $v(\theta_0)$ —给定值;  $r$ —给定值信号;  $y(\theta)$ —被调量;  $b$ —被调量信号;  $\mu$ —调节作用(或操作量);  $Q_1$ —调节量;  $Q_2$ —扰动

调节系统的运动规律。研究反馈调节系统有关问题的学科称为反馈调节理论, 本书以后几章主要讨论反馈调节理论及其应用。

### 1-3 自动调节系统分类

生产过程自动调节系统应用广泛, 形式多样, 分类方法也很不一致, 现将常用的调节系统分类叙述如下:

## 1. 反馈调节系统和前馈调节系统

(1) 反馈调节系统：它的基本工作原理是根据被调量与其给定值的偏差进行调节，最后消除偏差。因为系统是由被调量的反馈构成闭合回路的，所以它也称为闭环调节系统。图 1-3 是以被调量作为反馈且仅有一个闭合回路的反馈调节系统，这是自动调节系统中最基本的一种。也可能有一个以上的反馈信号（除被调量外，还有其它反馈信号），组成一个以上的闭合回路，称为多回路反馈调节系统。

(2) 前馈调节系统：直接根据扰动进行调节而不测量被调量的自动调节系统称为前馈调节系统。前馈调节系统的工作原理如图 1-4 所示。

调节对象的扰动  $u$  是造成被调量  $y$  变化的原因，前馈调节器直接根据扰动  $u$  进行调节，这就有可能及时抵销扰动的影响而使被调量保持不变。在前馈调节系统中，没有反馈信号系统是不闭合的，因此也称为开环调节系统。

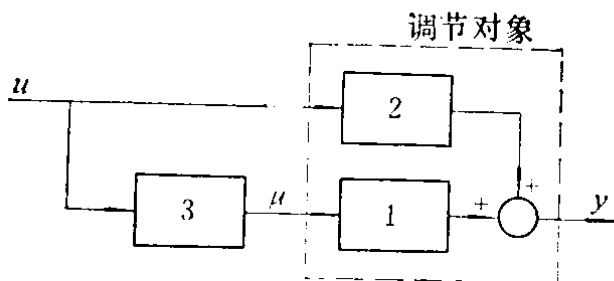


图 1-4 前馈调节系统方框图  
1, 2—生产过程；3—前馈调节器

在前馈调节系统中，没有被调量的反馈，因此调节结束后不能保证被调量等于给定值。这种系统，在生产过程自动调节中，实际上是不能单独应用的。但是，针对具体扰动  $u$ ，前馈调节将十分有效

地控制被调量的变化，这个特点是可取的。因而可以在反馈调节系统中加入前馈调节，构成前馈-反馈调节系统。

(3) 前馈-反馈调节系统：在反馈调节系统中加入对于主要扰动的前馈调节，组成前馈-反馈调节系统，利用前馈调节的特点，改善调节过程的质量（对于主要扰动）。

## 2. 按给定值信号的特点分类

根据生产过程中被调量所希保持数值的不同情况，自动调节

系统可分为以下几种：

(1) 恒值调节系统：在运行时被调量的给定值恒定不变，也就是被调量保持为某一固定数值。这是热工过程自动调节中应用最多的一种自动调节系统，如锅炉的过热蒸汽温度、汽鼓水位等自动调节都用恒值调节系统。

(2) 随动调节系统：被调量的给定值决定于某些外来因素而不是预先拟定的。例如，在锅炉的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，而燃料量则随负荷需要而变化，其变化规律是不能预定的。这种自动调节系统通常称为随动调节系统。

(3) 程序调节系统：被调量的给定值是预定的时间函数。例如，在汽轮机启动过程中，希望转速随时间成一定的函数关系变化，这就要求用程序调节系统。

无论是恒值调节系统、随动调节系统还是程序调节系统，一般都用反馈系统，它们的工作原理是基本相同的。

### 3. 其它分类

自动调节系统还可根据其它特点分类，例如：

(1) 时间连续系统和采样调节系统：在反馈调节系统中，所有变量都是连续的时间函数，如被调量是连续地测量和连续地进行调节的系统称为时间连续系统；而每隔一段时间测量一次被调量和给定值的偏差并对生产过程进行一次调节的系统称为采样调节系统。采样调节系统中有一个或一个以上变量是在时间上离散的，而它的工作原理则与时间连续系统基本相同。

(2) 线性系统和非线性系统：调节系统可以（或近似可以）用线性方程式来描述的系统称为线性调节系统，而必须用非线性方程式来描述的系统称为非线性调节系统。

此外，还有其它自动调节系统的分类方法。

在热工过程自动调节中应用最多的是连续反馈调节系统，最基本的是单回路线性反馈调节系统。



## 1-4 方框图

上面我们已经用方框图来表示调节系统中各个变量之间的关系。可以看出，用方框图来表示系统中各元件之间的关系是比较清楚的。在调节原理的叙述过程中，方框图的表示方法应用得很普遍。本节将进一步说明方框图的表示方法。

调节系统的方框图是用图解形式表示系统中各元件的功能和信号（或变量）传递关系的。方框图中的每一个方框表示元件的一种功能，箭头的方向标明信号（或变量）的传递方向。

方框图中的每一个方框都如图 1-5 所示。箭头进入方框的信号（ $x$ ）称为输入信号（是时间的函数），箭头离开方框的信号（ $y$ ）称为输出信号（也是时间的函数）。输入信号就是使这个

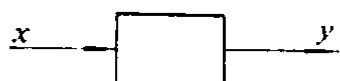


图 1-5 方框图中的一个方框

元件发生变化的原因，而输出信号就是在此输入信号作用下所引起的变化结果。因此，调节系统的方框图就表明了系统中各元件

间互相作用的一连串因果关系。

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信号作用下与输出信号的关系，但并不是说一个元件只能用一个方框表示。例如，在图1-3的方框图中，调节对象在扰动  $Q_2$ （输入）的作用下使被调量（输出）发生变化，而在执行器位移  $\mu$  改变（输入）时，被调量（输出）也发生变化。在这两种不同的输入作用下，调节对象的反应特性一般是不同的，因此应该用两个方框来表示。此调节对象用方框图1-6表示。图1-6（a）表示引起调节对象的被调量  $y$ （输出）变化的原因有两个： $Q_2$ 和 $\mu$ （输入），它们对  $y$  的影响是不同的。方框 2 表示  $Q_2$  改变时，被调量  $y$  的变化情况（具体反映在由于被加热液体流量  $Q_2$  改变而引起出口温度  $\theta$  改变的关系）；而执行器动作后先使  $Q_1$ （蒸汽流量）发生变化（方框 3），而  $Q_1$  变化后又使被调量  $y$  发生变化