

PID调节规律 和 过程控制

仇慎谦



PID 调节规律和过程控制

仇慎谦 编著

江苏科学技术出版社

PID调节规律和过程控制

仇慎谦 编著

出版：江苏科学技术出版社

发行：江苏省新华书店

印刷：江苏宜兴南漕印刷厂

开本 787×1092 毫米 1/32 印张 7.125 插页 2 字数 156,600

1987年12月第1版 1987年12月第1次印刷

印数1—3,760册

ISBN 7-5345-0187-3/TP·4

统一书号：15196·242 定价：1.75元

前 言

在冶金、电力、炼油、化工、轧钢等生产部门中，为了确保安全生产，改善劳动条件，保证产品质量，提高生产效率，急需提高工业生产过程的自动化水平。从十八世纪锅炉使用的水位调节装置，到二十世纪四十~五十年代相继采用的气动仪表、气动单元组合仪表、电动单元组合仪表和巡回检测装置等，使工业过程控制向自动化程度更高的方向发展。六十年代~七十年代，随着计算机的开发和应用，实现了信息自动化和过程控制相结合的多级计算机控制，使工业过程自动化发展到一个崭新的阶段。

按偏差调节的比例、积分、微分调节规律（简称PID调节规律）是过程控制中应用最广泛的一种调节规律。实际运行经验及理论分析证明，这种调节规律对于相当多的工业对象能够起到较满意的控制效果。在常规调节仪表中普遍采用了这种调节方案，在计算机过程控制中也广泛采用了这种调节方式。因而PID调节规律目前仍是一种最基本的调节规律。

在1985年航空部第三区域计量站的年会上，代表们都反映从事过程控制的人员对于PID调节规律了解不多，因而在实际工作中进行理论分析很困难。大部分过程控制人员会使用调节器，但对怎样调节调节器能使系统控制效果最佳，以及调节器的各个参数会对系统有哪些影响，却不能很好地掌握，因而对系统工作中出现的一些现象的分析也感到力不从

心。据我们所知，有的搞毕业设计的硕士研究生也为找不到一本完整的PID调节规律参考书而苦恼。他们翻阅了国内外资料，得到的只是一些零散的材料。在这种情况下，笔者找到了南京工学院自动控制系邵裕森副教授，在他的鼓励下，动手编写了这本书。

初稿完成以后，送给有关人员阅读和审阅，并在航空工业部第三区域计量站和山东九四二九计量站联合举办的学习班上，作为教材进行一次试讲。根据专家和学员的意见，几经修改，才完成了此书。

本书着重对过程控制中主要环节即调节器作了详细的介绍。为防止冲淡这方面的内容，对过程控制系统其余部分仅作简单的介绍。对调节器这个中心内容，由自动控制原理和计算机控制技术相结合，以实际使用的各种PID调节规律为例，同时联系一些计算机算法进行系统介绍，使读者学完本书就可应用。因此，本书既可作为从事过程控制技术人员 and 操作人员的参考书，也可作为大专院校自动化专业的参考资料。

在编写过程中，航空工业部第三区域站的同志对本书初稿提出了不少宝贵意见，邵裕森副教授不仅为本书提出许多修改意见，还为本书作了最后审定。在此表示感谢！

由于作者的理论水平和实际工作经验有限，书中难免有疏漏和错误的地方，敬请读者予以批评指正。

作者

1986年10月于南京

目 录

前言	1
第一章 自动调节系统	1
第一节 系统的组成	1
第二节 传递函数与方块图	7
第三节 调节过程及品质指标	29
第二章 PID调节规律	35
第一节 比例调节规律(P)	36
第二节 积分调节规律(I)	43
第三节 微分调节规律(D)	46
第四节 比例积分调节规律(PI)	47
第五节 比例微分调节规律(PD)	51
第六节 比例积分微分(PID)调节规律	57
第七节 PID调节仪表示例	62
第三章 PID调节规律对系统过程控制的影响	84
第一节 PID调节规律对系统稳定性的影响	84
第二节 PID调节规律对系统过渡过程的影响	87
第三节 调节器的选用原则	103
第四章 调节器参数整定	105
第一节 系统的投运	105
第二节 动态特性参数法	109
第三节 临界比例度法	112
第四节 衰减曲线法	114

第五节	经验试凑法·····	118
第六节	应用实例·····	123
第七节	复杂调节系统调节器参数整定·····	125
第五章	PID最优算法·····	137
第一节	PID算法的数字化·····	137
第二节	PID算法程序设计·····	145
第三节	PID最优算法·····	150
第四节	应用实例·····	155
第六章	过程控制应用示例及有关问题·····	171
第一节	电阻炉温度调节系统·····	172
第二节	系统设计中的有关问题·····	180
第三节	计算机应用中的有关问题·····	189
附录一	拉氏变换·····	198
附录二	用实验法确定系统的数学模型·····	202
第一节	用最小二乘法来确定系统数学模型·····	202
第二节	利用特性曲线来确定系统数学模型·····	211
主要参考文献	·····	223

第一章 自动调节系统

第一节 系统的组成

在生产过程中，自动调节系统是在人工调节的基础上产生和发展起来的。应用自动调节系统的目的主要有两点：一是在人类生产和生活中，应用自动调节技术可以解脱繁重的、单调的、低效的人力劳动，以便提高生产效率和提高生活水平；二是对现代生产过程中很复杂的或极精密的工作，当用人力不能胜任时，应用自动调节技术就可以保证高质量地完成任任务。在开始介绍自动调节系统之前，先来分析一个人工操作的例子，这对于了解和分析自动调节系统是很有裨益的。

人体本身，包括眼、耳、鼻等敏感器官；脑子和神经等调节器官；以及肩、臂、手、脚等操作执行器官，就是一个天生的具有高度调节能力的系统。

下面列举几个实例来说明系统的工作原理和组成。

图 1-1 所示为电加热炉配用热电偶和电子电位差计来测量炉子温度的例子。

电加热炉用电阻丝加热，电阻丝上的电压 U 由调压变压器供给。

此例中的调节过程是这样的：假定要求炉子温度控制在 900°C ，则操作人员就必须经常观察仪表指针所指示的温度，如发现炉温低于 900°C ，就要调节调压器使炉子加热电

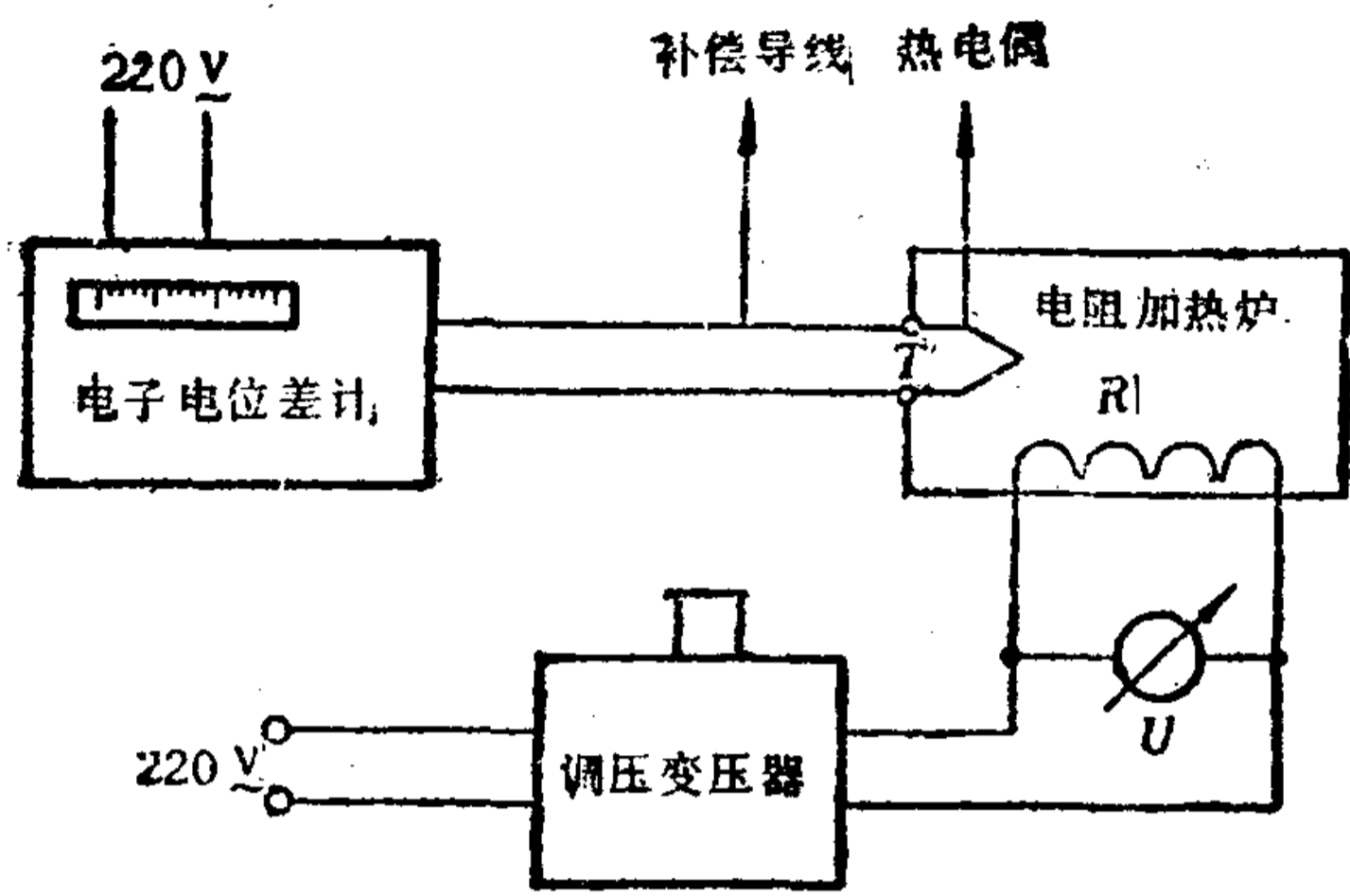


图1-1 电阻炉加热示意图

压 U 增加；反之，若发现炉温高于 900°C ，就要调节调压器使加热电压 U 减小。这样经过多次反复，最终将加热电压 U 调在合适的数值上，使炉温控制在 900°C 左右。

以上炉温调节过程可用图1-2表示：

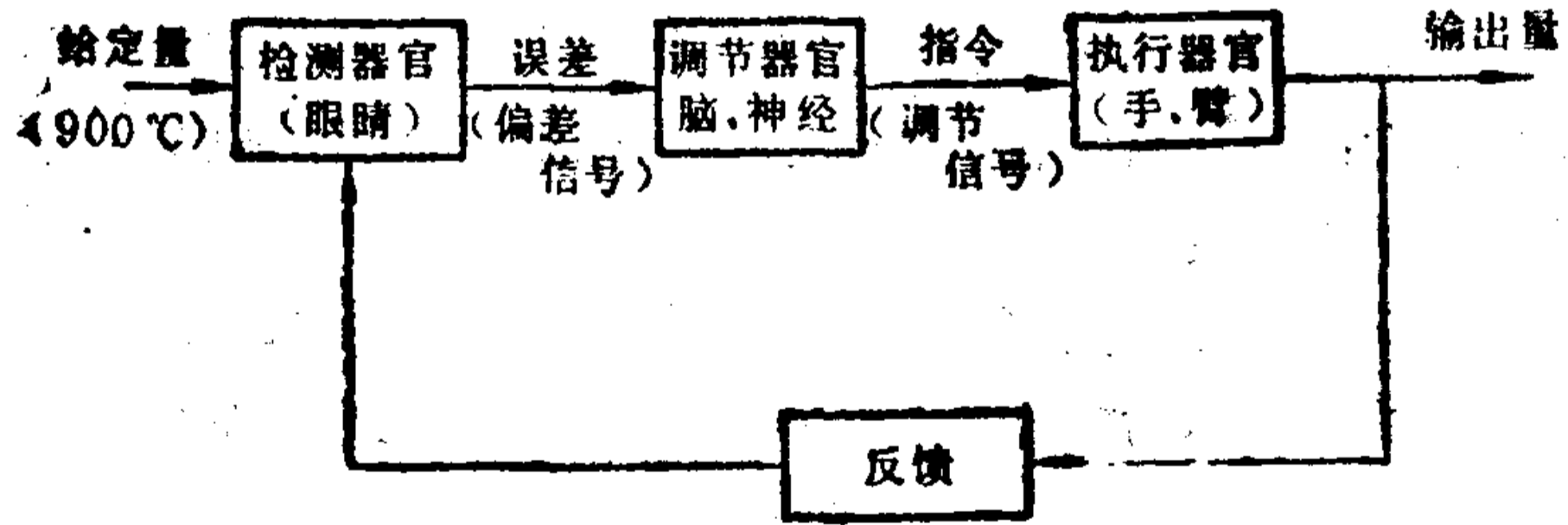


图1-2 调节方框图

从上图可以看出，要完成上述功能，操作人员必须做到：

1. 了解情况

操作人员从电子电位差计上看实际测得的温度是多少。

2. 比较判断

调节器官（大脑）根据眼睛看到的实际温度和预先给定的温度值之差，来判断炉温是高于还是低于给定值，从而发出控制命令去调节执行机构。

3. 执行操作

执行机构（手、臂）根据调节命令去执行相应的动作。即调节调压器，以改变相应的加热电压，使炉温保持在 900°C 。

4. 反馈

反馈就是反送回来的意思。开始时，炉温低于 900°C ，它反馈给大脑的信号要求加温；如果炉温高于 900°C 时，它反馈给大脑的信号要求降温。这种反馈称为负反馈。由于采用负反馈，使输出量又送回到检测器官，从而形成了闭环调节回路。这就是所谓闭环调节。自动调节的基本概念也是由此而来的。

下面再以烘箱的温度自动调节为例，来说明恒温自动调节系统的工作原理。其方框图如图1-3所示。

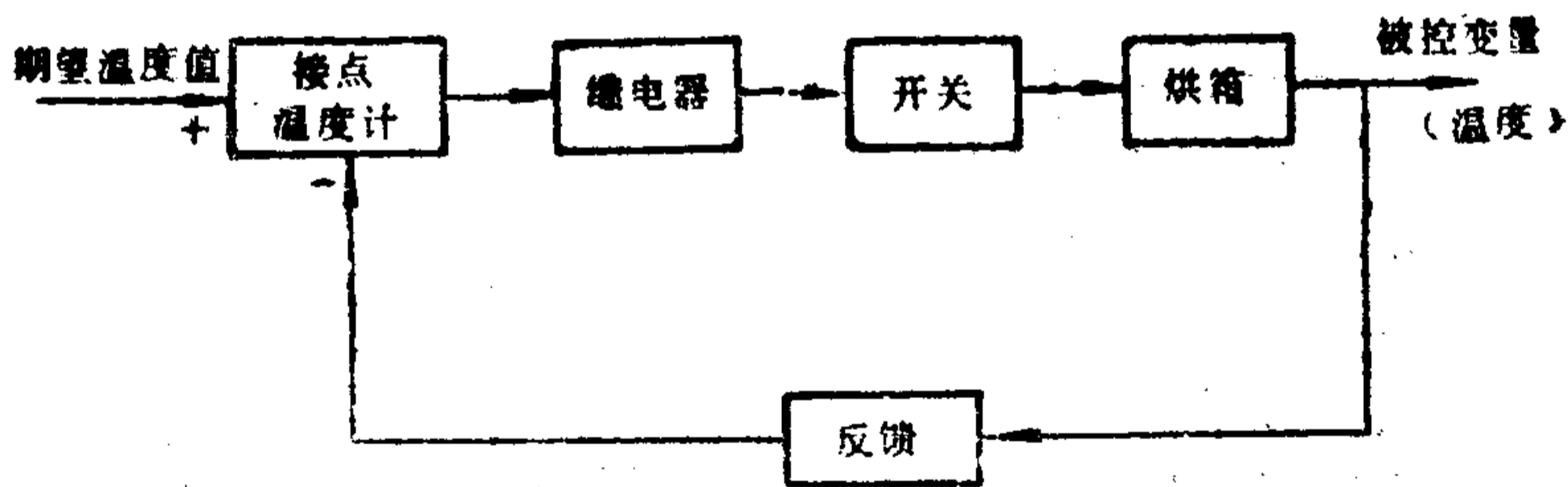


图1-3 烘箱调温系统方框图

在这个恒温系统中，输入量为温度期望值，它由人工预先将所需要的温度调定在接点式温度计上。如实际温度低于期望温度，温度计就使继电器线圈电路接通，继电器开关控

制电阻丝加热，当输出温度达到期望温度时，接点温度计自动断开继电器电路，使烘箱停止加热，从而使输出温度和期望温度保持一致。

一个简单自动调节系统的组成，可用图 1-4 表示，图中每一个方框表示一个设备或装置，各个设备装置之间的信号传递关系或作用，可用带箭头的连线表示。

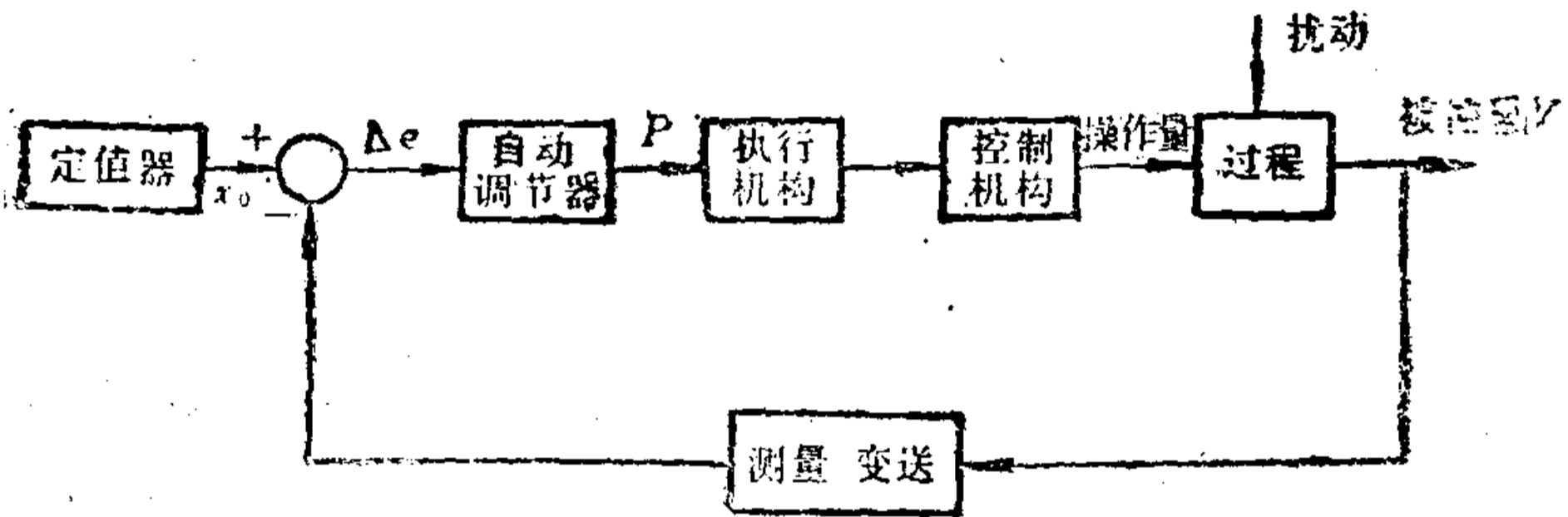


图1-4 简单调节系统方框图

图中：

x_0 ——给定值；

x ——检测值；

Δe ——偏差值；

P ——调节器输出；

Y ——过程输出；

f ——扰动。

1. 过程

在过程控制中，过程是指正在运行中的多种多样的工艺生产设备。被调过程也称为被调对象。例如：加热炉、高炉、沸腾炉、回转窑以及贮藏物料的槽罐或输送物料的管线等。

2. 检测元件及变送器

其功能是感受并测出被调量的大小。如热电偶、孔板等。变送器的作用则是将检测元件测出的被调量，变换成调节器所需要的信号形式。

3. 定值器

定值器的作用是给出被调量给定值（即生产工艺规定的数值）的大小。定值器可以是调节器的一部分，也可以是一块单独的仪表。

4. 调节器

它是自动调节系统中的指挥机构，能代替部分人脑的作用，其比较元件首先将给定值 x_0 与检测值 x 进行比较，将两者的差值 Δe ，按某种调节规律进行运算，然后发出调节信号 P 使执行机构动作。

5. 执行机构

其作用是接受调节器发来的调节信号，并将其放大，去推动调节机构动作。

6. 调节机构

常见的调节机构有各种调节阀，可控硅及接触器等。其动作直接受执行机构操纵，按照调节器的调节命令改变操作量，对过程施加调节作用，以调节过程中的物料量或能量，使被调量回复到给定值上。

7. 扰动

引起被调量波动的外来因素统称为扰动（调节作用除外），在图 1-4 中用 f 表示。扰动也是作用于过程的一种输入信号，所以箭头是指向过程的。扰动是破坏系统稳定运行的因素，调节作用则是克服扰动影响，使被调量回复并稳定在给定数值的手段。

自动调节系统的组成，不是机械地拼凑，而是互相协调

配合的有机组合,各自负担着不同的任务,达到自动调节的目的。在自动调节系统中,信号沿着箭头的方向前进,最后又回到原来的起点,形成一个闭合的回路,这样的系统叫做闭环系统。如果信号前进到某处断开了,没有形成闭合的回路,这样的系统叫做开环系统。我们从方框图 1-4 中可以看到,过程的输出(即被调量)经过检测(使用检测元件与变送器)将信号送至调节器中,利用比较元件,将检测值与给定值进行比较,其偏差由调节器按某种调节规律进行运算,并发出调节信号,使执行机构与调节机构动作,改变操作量,调整被调量的大小,使其符合工艺要求。被调量又作为过程的输出,返送到过程的输入端,这种把系统的输出信号又引回到输入端的做法叫做反馈。在图 1-4 中,由于反馈信号 x 送到输入端后,其作用方向与输出相位相反,而且是以其负值来考虑的,故叫做负反馈。反之,则叫做正反馈。所谓正负是相对于给定值而言的。在自动调节系统中,大多数采用负反馈,因为当被调量受到扰动的影响而增大时,反馈信号 x 与给定值 x_0 比较后,输入到调节器的偏差信号 Δe 为负值($\Delta e = x_0 - x$)。此时调节器发出调节信号,驱动调节机构动作,改变操作量,使被调量减小达到调节的目的。这就是负反馈的作用。可见,负反馈能减小偏差信号,改善动态品质,稳定调节过程。

在图 1-4 中,受调节机构所调节的操作量,是给过程施加调节作用,以克服扰动的影响,使被调量回复并稳定在给定值上。所以,在自动调节系统中,扰动和调节作用是相互制约的一对矛盾,而自动调节过程,就是这一对矛盾对立统一的过程。

第二节 传递函数与方块图

一、传递函数

一个自动调节系统的各个环节，可以用传递函数来表示。所谓传递函数，是指初始条件为零时，输出信号的拉氏变换与输入信号的拉氏变换之比。

将图1-4用图1-5所示传递函数形式来表示为：

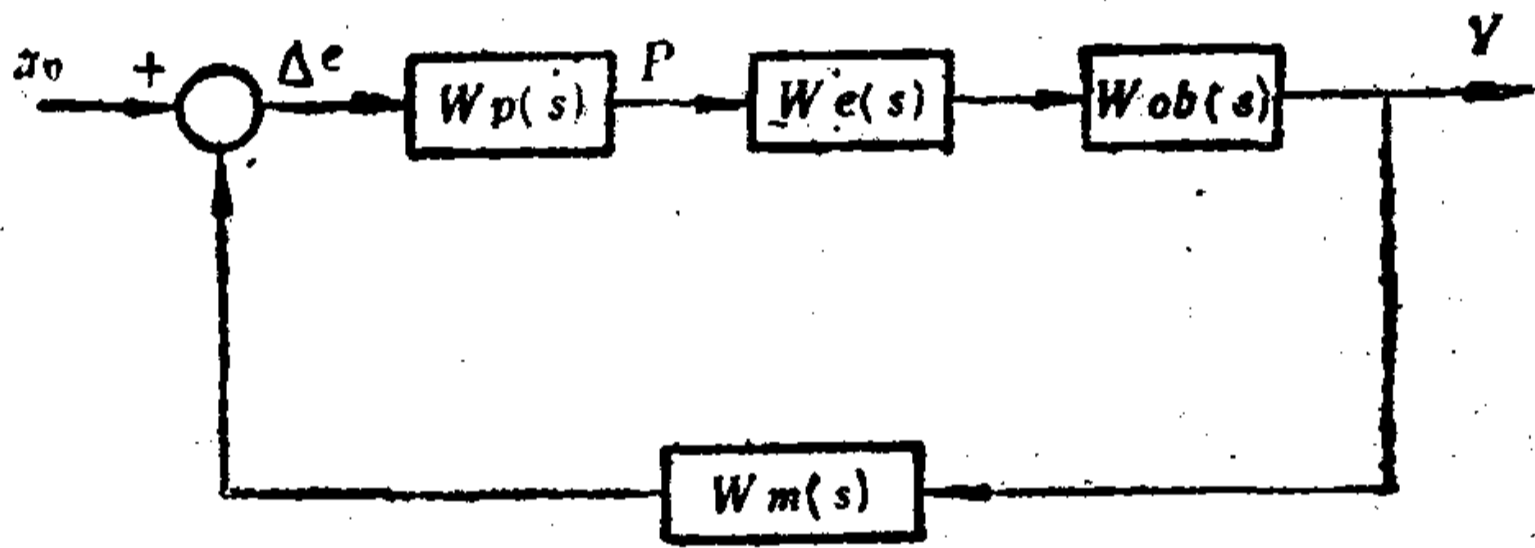


图1-5 系统传递函数表示的方块图

下面分别对每个环节作一简单分析

(一)对象 $W_{ob}(s)$

1. 对象静态特性

对象的静态特性是指对象输入信号和输出信号在平衡或稳定时的关系。

现以图1-6所示的蒸汽直接加热器为例来说明。

图1-6(a)所示用蒸汽直接把冷物料加热到某一规定温度，然后，送至下一工序进行加工。假如流入物料温度有一阶跃变化，其幅度为 Δf ，经过一段时间之后，加热器出口处的物料温度稳定在 $Y(\infty)$ 。如果在冷物料的温度发生阶跃变化之前，加热器出口处热物料的温度为 $Y(0)$ ，则 $K = [Y(\infty) -$

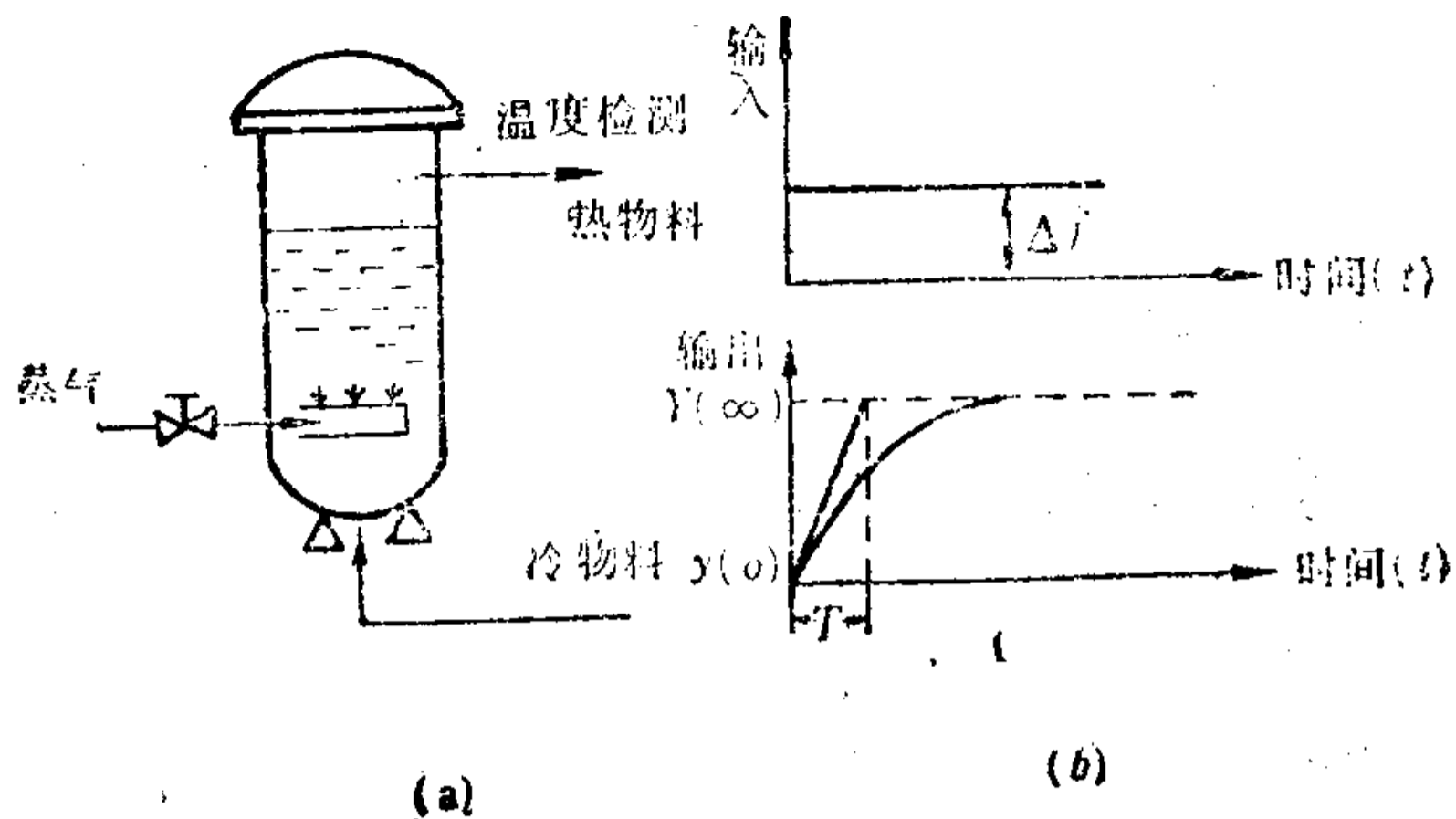


图1-6 直接蒸汽加热器及其反应曲线

$K = \Delta Y / \Delta f = \text{输出的变化量} / \text{输入的变化量}$

式中 K 称为对象的放大系数。它代表对象的静态特性。从上式看出： K 和温度变化的过渡过程没有关系，而只与过渡过程的起始状态和终点状态有关。对象的输入输出和放大系数的关系可用图1-7表示。由图可见， K 愈大，表示输入对输出的影响愈大，反之亦然。

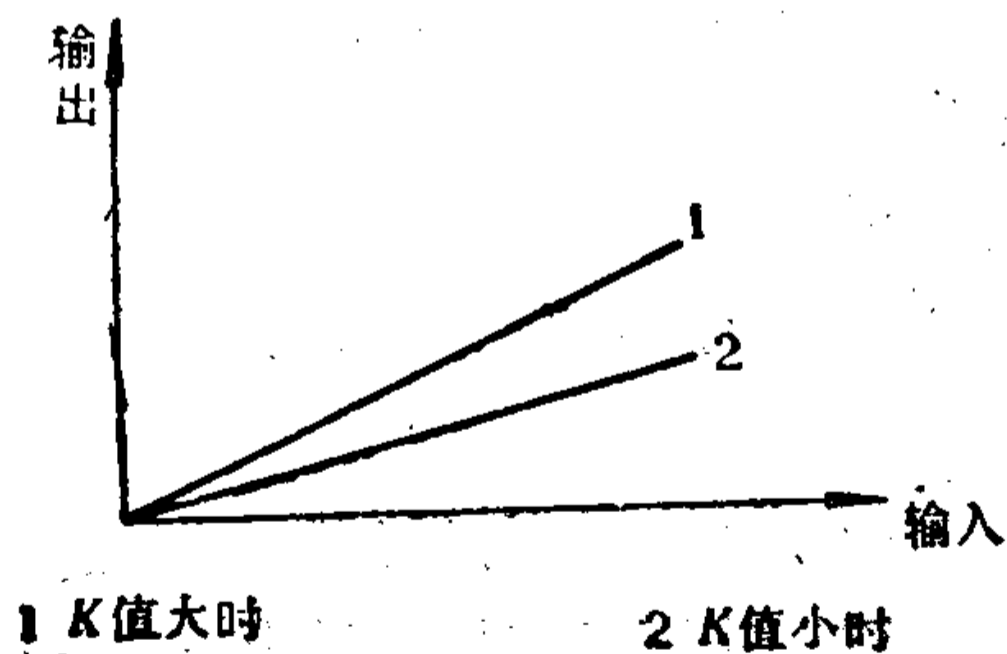


图1-7 对象静态特性示意图

1. K 值大时 2. K 值小时

图1-7所示对象放大系数是一个常数，输出和输入可用直线表示，故称为线性对象。但也有的对象在不同负荷作用

下，放大系数不是常数，这种对象就叫做非线性对象。

2. 时间常数

时间常数 T 是说明过程被调量变化快慢程度的一个参数。一般说来，时间常数 T 越小，则过程惯性越小，被调量变化速度大，不易调节。因为被调量变化快，势必要求系统各组成装置反应灵敏，调节及时迅速，这样才能得到较好的效率；但调节速度快，又使系统不易稳定，这是工艺生产所不希望的。如果 T 太大，则过程惯性大，参数变化太慢，过渡时间太长，当扰动作用频繁时，就得不到好的调节效果。

与电路中的电阻电容类似，在过程控制中也有“容量”和“阻力”两个概念。时间常数也是“容量”和“阻力”的乘积。

见表1-1。

3. 滞后时间 τ

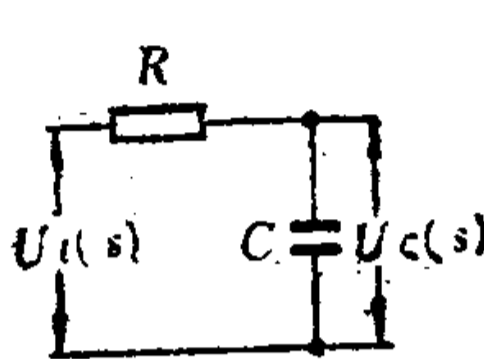
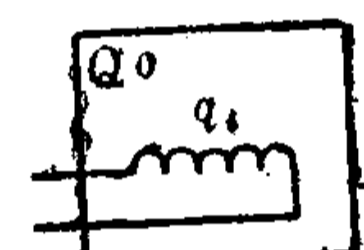
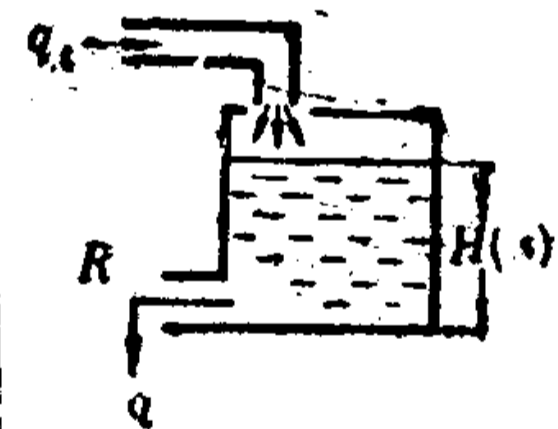
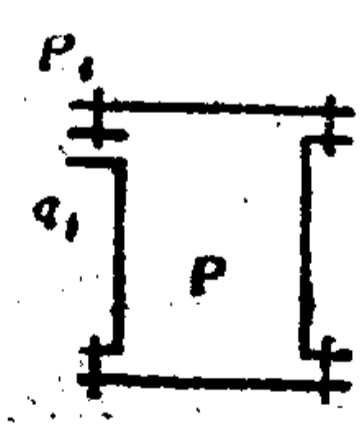
在生产过程中，当有扰动时，被调量往往不能立即变化，而必须等待一段时间之后。这种被调量的变化落后于扰动的现象，称为过程的滞后。滞后也是过程的一个动态参数。

滞后又分为两种：传递滞后和过渡滞后。

(a) 传递滞后

传递滞后又叫纯滞后，一般用 τ_0 表示。它是由于物料量或能量的传送过程需要一定的时间而造成的。如图1-8所示，由于进料阀离贮槽较远，其开度变化后，输入的物料量，需要一段时间才能进入贮槽，影响液位的高度。这段时间就叫传递滞后时间。可见，传递滞后使被调参数不能立即跟随负荷的变化而变化，而要等一段时间之后才开始变化。它是单纯地延迟了被调参数开始变化的时间。

表1-1 各物理系统中的简单对象类比

物理系统	对象	对应物理量		对应参量		传递函数	特性参量	
		流量	位能	容量	阻抗		T	K
电系统		电流 I	电压 U	电容 C (法拉)	电阻 R (欧姆)	$\frac{U(s)}{U_c(s)} = \frac{K}{Ts + 1}$	RC	1
热系统		热流量 q	温度 Q	热容 C (千卡/分)	热阻 K (度/千卡/分)	$\frac{Q_0(s)}{q(s)} = \frac{K}{Ts + 1}$	RC	R
液系统		流量 q	液位 H	断面 积 C (米 ²)	流阻 R (米/米 ² /分)	$\frac{H(s)}{q(s)} = \frac{K}{Ts + 1}$	RC	R
气系统		流量 q	压力 P	气容 C (厘米 ²)	气阻 R (公斤 ² /厘米 ² /分)	$\frac{P(s)}{(P_1 s)} = \frac{K}{Ts + 1}$	RC	1