

工程控制系统

《过程仪表控制系统》

(中 册)

姜宝之

上海工业大学

一九八一年二月

目 录

第一章 调节对象的特性及实验测定

1-1节 单容对象动特性及其数学描述	1-1
1-1.1 水槽水位的动特性	1-2
1-1.2 加热器对象的动特性	1-5
1-1.3 气罐的动特性	1-6
1-1.4 对象的自衡特性	1-9
1-2节 多容对象的特性、容量滞后、纯滞后	1-11
1-2.1 双容对象的特性	1-11
1-2.2 纯滞后	1-13
1-3节 对象特性的实验测定、时域法	1-13
1-3.1 实验测定方法概述	1-13
1-3.2 测定动态特性的时域方法	1-15
1-4节 测定动态特性的频域方法	1-25
1-4.1 正弦波方法	1-25
1-4.2 矩形波方法	1-26
1-4.3 闭路测定法	1-29
1-5节 测定动态特性的统计方法	1-30
1-5.1 平稳随机过程、相关函数、功率密度谱	1-31
1-5.2 相关分析法识别对象动态特性的原理	1-36
1-5.3 伪随机信号	1-40
1-5.4 伪随机序列的产生方法及其性质	1-41
1-5.5 用M序列信号测定对象的动态特性	1-45

第二章 单回路调节系统的设计及调节器参数整定方法

2-1节 概述	1-59
2-2节 对象动特性对调节质量的影响及调节方案的正确	1-62

2-2.1	干扰通道动特性对调节质量的影响	1-62
2-2.2	调节通道动特性对调节质量的影响	1-66
2-2.3	调节方案的确定	1-68
2-3	调节规律对系统动特性的影响, 调节规律的选择	1-71
2-3.1	在干扰作用下双容对象的比例调节	1-72
2-3.2	系统调节性能指标、PI、PD调节作用分析	1-78
2-3.3	调节规律的选择	1-88
2-4	调节器参数的实验整定方法	1-89
2-4.1	反应曲线法	1-89
2-4.2	稳定边界法	1-92
2-4.3	衰减曲线法	1-92
2-4.4	三种整定方法的比较法	1-95
2-5	调节器参数整定的频域法	1-96
2-5.1	M圆法调节器参数的原理	1-96
2-5.2	按调节对象的幅相特性确定调节器的最佳整定参数	1-105
第三章 复杂调节系统		
3-1	串级调节系统	1-110
3-1.1	串级调节系统的组成	1-110
3-1.2	串级调节系统的特点和效果分析	1-114
3-1.3	调节器的选型和整定方法	1-118
3-2	比值调节系统	1-120
3-2.1	比值调节系统的组成原理	1-120
3-2.2	比值调节系统的整定	1-123
3-3	均匀调节系统	1-126
3-3.1	均匀调节系统的组成	1-126
3-3.2	调节器的选型和整定	1-128
3-4	前馈调节系统	1-131

3-4.1	前馈控制的工作原理	1-132
3-4.2	扰动补偿规律及其局限性	1-134
3-4.3	复合调节系统的特性分析	1-136
3-4.4	复合调节系统参数的选择	1-140
3-4.5	自治调节系统	1-142

第四章 连续系统采用模拟计算机仿真

4-1	节 以数学相似为基础的模拟计算机
4-2	节 模拟计算机的基本部件—运算放大器
4-3	节 误差分析
4-4	节 其他运算部件
4-5	节 模拟计算机的几种工作状态
4-6	节 已知系统微分方程求其过渡过程
4-7	节 关于初始条件的设置
4-8	节 系统的结构模拟法
4-9	节 用模拟机来进行纯时延的模拟

仪表是实现生产过程自动化的重要技术工具。但是，大家知道，工业自动调节系统是由自动化仪表和调节对象所组成，调节对象在系统中也占有重要地位。中册将着重研究调节对象动态特性的测试、调节系统的设计、调节器的参数整定和复杂的调节系统构成。

我们要分析研究自动调节系统的性能，或设计改进自动调节系统使之达到满意的调节品质，首先必须了解与掌握对象及系统各环节的动态特性。只有在分析对象以后才能制订合理的方案，选择恰当的仪表和调节器组成调节系统。在建立了系统之后，调节器的参数整定计算也很重要，因为参数整定不合适也不能发挥系统方案设计和仪表调节器的良好效能。对于有些情况下对象特性比较复杂或调节任务比较特殊，这时需要设计更为复杂的调节系统以适应新的需要，在本册最后一章介绍一些常见的复杂调节系统。

第一章 调节对象的特性及实验测定

设计一个自动调节系统，首先应对调节对象的特性作全面的分析和测定。一般研究调节对象特性的方法有二种：对于简单的对象或系统各环节的特性，可以通过分析过程的机理、物料或能量平衡关系求得数学模型，即通过推导而获得代表对象动态特性的微分方程式，这种方法称为分析法。但是，复杂对象的微分方程式很难推导，也不容易求解。所以另一种方法是通过实验测定，然后对取得的数据进行加工整理而求得对象的微分方程式或传递函数。这种方法用的较多，以下将着重讨论实验测定法。

1—1节 单容对象动特性及其数学描述

在不同的生产部门中调节对象千差万别，现仅就热工、化工生产过程中一般常遇到的对象：加热器、流体输送设备、水槽等为例，做一些分析。在连续生产过程中，最基本的关系是物料平衡和能量平衡，在静态条件下，单位时间流入对象的物料或能量等于从系统

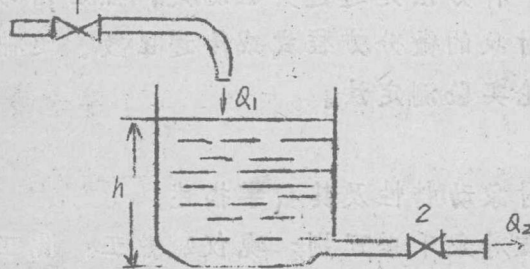
中流出的物料或能量。然而，对象的动特性是研究参数随时间而变化的规律，在动态条件下，物料平衡和能量平衡的关系是：单位时间内进入系统的物料（或能量）与单位时间内流出的物料（或能量）之差等于系统内物料（或能量）贮存量的变化率。

对象动特性的微分方程式，也就是输出参数与输入参数之间的函数关系式，就是通过上述平衡方程式获得。对于一个调节对象来说，输出参数就是被调量，输入参数就是输入量，它是引起被调参数变化的因素。调节对象的输入参数有二种：调节作用和干扰作用，输入作用至输出参数之间的信号联系称之为调节通道。干扰作用至被调量的信号联系称之为干扰通道。

下面就几个简单的对象的微分方程式推导为例，说明动特性的分析求法，并从其中阐明对象的某些基本性质（容量、阻力、放大系统、时间常数及自衡特性等）。

1-1.1 水槽水位的动特性

图 1-1 是一个简单的水槽水位调节对象，流入水槽的水流量 Q_1 是由管路上的阀 1 来调节。流出的水流量 Q_2 决定于管道上阀 2 的开度，它是由用户要需要而改变，流出的管路无泵而是借槽内的静压自行流出。这里水位 h 是被调量，阀门 2 的开度变化是外部扰动，而调节阀门 1 开度变化是调节作用。



研究对象的动特性，就是要找出其输入量和输出量之间的相互作用的规律，而对象的微分方程式便是这种规律的数学描述。以下研究图 1-1 所示对象的动特性。设各量定义如下：

Q_1 ：输入水流量（米³ / 秒）

Q_2 ：输出稳态水流量（米³ / 秒）

图 1-1 水槽水位调节对象

ΔQ_1 输入流量对它的稳态值的微小增量 (米³/秒)

Q_2 输出水流量 (米³/秒)

Q_{02} 输出稳态水流量 (米³/秒)

ΔQ_2 输出流量对它的稳态值的微小增量 (米³/秒)

h_0 稳态水位 (米)

Δh_0 水位对它稳态值的微小增量 (米)

V 水槽中贮存水的容积 (米³)

F 水槽横断面积 (米²)

根据物料平衡关系, 在正常工作状态下的稳态方程式是:

$$Q_{10} - Q_{20} = 0 \quad (1-1)$$

动态方程式是:

$$Q_1 - Q_2 = \frac{dV}{dt} \quad (1-2)$$

式中 $\frac{dV}{dt}$ 是流体蓄存量的变化率, 它与被调量水位 h 间的关系是:

$$dV = F dh, \quad \frac{dV}{dt} = F \frac{dh}{dt} \quad (1-3)$$

将式 (1-3) 代入 (1-2) 得:

$$Q_1 - Q_2 = F \frac{dh}{dt} \quad (1-4)$$

或

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_1 - Q_2}{F} \quad (1-5)$$

上式可以看出, 水位变化 $\frac{dh}{dt}$ 决定于两个因素: 一个是水槽截面积 F , 一个是流入量与流出量的差额。 F 越大, 则 $\frac{dh}{dt}$ 越小。因此 F 是决定水槽水位变化率大小的因素, 称为水槽的容量系数, 又称液容 C 。它的物理意义是: 要使水位升高 1 米, 水槽内应该充入多少体积的液体。

在 (1-4) 式中, Q_1 只决定于调节阀 I 的开度。假定流量 Q_1 的变化量 ΔQ_1 与调节阀 I 的开度的变化量 $\Delta \mu$ 成正比, 即

$$\Delta Q_1 = K_{\mu} \Delta \mu_1$$

其中， K_{μ} 是比例系数（米²/秒）

输出水流量 Q_2 是随水位而变化，假定二者的变化量之间关系为

$$\Delta Q_2 = \frac{\Delta h}{R_2}; \quad \text{或} \quad R_2 = \frac{\Delta h}{\Delta Q_2} \quad (1-6)$$

其中 R_2 是流出管路中的阀门 2 的阻力，或称液阻。它的物理意义是：要使流出量增加 1 米³/秒，液位应该升高多少。在水位变化范围不大时，近似地认为 R_2 为常数，即流出量 Q_2 的大小决定于水槽中水位 h 和流出侧阀门的阻力 R_2 。严格说 R_2 不是一个常数，它与水位、流量的关系是非线性的。为简化问题，常常要将非线性特性进行线性化处理，常用的方法是切线法，即在静特性上的工作点附近不大范围内以切线代替原来的曲线，而线性化后则用以上 (1-6) 式表示流量的变化和液位变化的关系。

对于 (1-5) 式，我们考虑到变量用额定值和增量的形式表示：

$$Q_1 = Q_{10} + \Delta Q_1; \quad Q_2 = Q_{20} + \Delta Q_2; \quad h = h_0 + \Delta h$$

并考虑到 (1-1) 式，(1-4) 式就化成以增量表示的微分方程式

$$\Delta Q_1 - \Delta Q_2 = F \frac{d\Delta h}{dt} \quad (1-7)$$

将 (1-5)、(1-6) 式代入 (1-7) 式可得

$$K_{\mu} \Delta \mu_1 - \frac{\Delta h}{R_2} = F \frac{d\Delta h}{dt}$$

$$\text{或} \quad FR_2 \frac{d\Delta h}{dt} + \Delta h = K_{\mu} R_2 \Delta \mu_1 \quad (1-8)$$

一般将上式改写成下述标准形式：

$$T \frac{d\Delta h}{dt} + \Delta h = K \Delta \mu_1 \quad (1-9)$$

或写成拉氏变换式

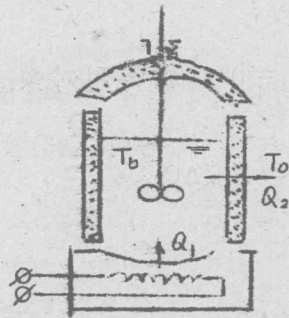
$$\frac{H(s)}{\mu_r(s)} = \frac{K}{Ts+1}$$

式中 $T = FR_r$; $K = K\mu R_r$.

这就是水位调节对象调节通道的微分方程式，式中 T 称为对象的时间常数，而 K 则叫做对象放大系数。

1-1.2 加热器对象的动特性

图 1-2 中所示的简单加热对象，它由电炉加热的容器，容器内盛水，水的温度为 T_b 。生产中希望保持 T_b 不变，所以 T_b 是被调量。电炉不断地向水供热，流入的热量为 Q_1 ，而水不断地通过保温材料向四周空气散热，这个流出的热量为 Q_2 。当 $Q_1 = Q_2$ 时，水从炉子接受的热量和向空气散出的热量相等，水温 T_b 保持不变。



如果在某瞬间突然加大电炉电流而使 Q_1 增大，此时，水从电炉接受热量多了，水温 T_b 就慢慢升高，但 T_b 的升高使得向四周的热量散发 Q_2 随之增大。最后 $Q_2 = Q_1$ ，流入热量与流出热量之间平衡关系又重新建立，水温 T_b 就不再变化了。

图 1-2 加热器温度调节对象

现在研究电加热器的微分方程式，根据能量平衡的关系在单位时间内进出对象中的能量之差，等于能量储存的变化率可得

能量之差，等于能量储存的变化率可得

$$Q_1 - Q_2 = GC_p \frac{dT_b}{dt} \quad (1-10)$$

其中， G —— 加热器内水的总重量（公斤）；

C_p —— 水的比热（大卡/公斤度 $^{\circ}C$ ），在常压下 $C_p = 1$ ；

$GC_p = C$ (千卡/度 $^{\circ}\text{C}$) 我们称之为热容, 它和水槽对象中的 F 相似, C 等于被调量水温 T_b 每升高 1°C 所储蓄的热量。

被加热的水不断地通过保温材料向四周空气散热, 在物理学中知道这个流出热量可以表示为

$$Q_2 = K_r A (T_b - T_a) \quad (1-11)$$

式中 K_r 为传热系数 (千卡/米 2 度 $^{\circ}\text{C}$ 秒); A 为表面积 (米 2); T_a 为周围空气的温度 ($^{\circ}\text{C}$)。在加热器中热量要散失到四周需通过保温材料, 保温材料对热量的流出是有阻力的, 这个阻力叫热阻。保温材料传热系数越大, 热阻越小, 散热表面积越大, 热阻越小。热阻用 R_b 表示

$$R_b = \frac{1}{K_r A} \quad (\text{度}^{\circ}\text{C}\text{秒}/\text{千卡})$$

将 (1-11) 代入 (1-10), 并采用与上例相同的步骤不难得到用增量表示的微分方程式

$$R_b C \frac{d\Delta T_b}{dt} + \Delta T_b = R_b \Delta Q_1 + \Delta T_a \quad (1-12)$$

若周围的空气温度不变则 $\Delta T_a = 0$, 就得到对象调节通道的微分方程式

$$R_b C \frac{d\Delta T_b}{dt} + \Delta T_b = R_b \Delta Q_1 \quad (1-13)$$

或写成标准形式:

$$T \frac{d\Delta T_b}{dt} + \Delta T_b = K \Delta Q_1 \quad (1-14)$$

式中 $T = R_b C$ 为对象的时间常数; $K = R_b$ 为对象的放大系数。

1-1.3 气罐的动特性

图 1-3 表示了一个气罐, 由压气机来的空气压力为 p_1 , 经过调节阀 1 向气罐充气, 同时气罐又通过阀 2 向外界供气, 罐内压力 p 要求保持稳定, 所以 p 是被调量。气罐进口压力, 可以认为它是基本不变的。现在就这样的对象研究它的动态特性。有关各参量如图 1-3 所示。

设对象调节量为流量 Q_1 ，当 Q_1 和 Q_2 的静态平衡被破坏，气罐内的气体重度会发生变化

$$Q_1 - Q_2 = V \frac{d\rho}{dt} \quad (1-15)$$

式中 ρ —— 气体重度 (公斤/米³)；
 Q_1 —— 流入气体流量 (公斤/秒)；
 Q_2 —— 流出气体流量 (公斤/秒)；
 V —— 气罐的体积 (米³)

根据气体方程式，一定质量的理想气体的压强和体积被它绝对温度除所得商在状态变化中是保持不变的。故有

$$Pv = RT_0$$

其中 P —— 绝对压力 (公斤/厘米²)；
 v —— 气体比容 (米³/公斤)；

R —— 气体常数 (米—公斤/公斤·度 (°K))；
 T_0 —— 绝对温度 (°K)。

以
$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{P}{RT_0}$$

代入 (1-15) 式，并用前例相同步骤，可以得到用增量表示的微分方程式

$$\Delta Q_1 - \Delta Q_2 = \frac{V}{RT_0} \frac{d\Delta p}{dt} \quad (1-16)$$

考虑到气罐内压力变化时， Q_2 也随着压力 p 变化，假定二者的变化量之间关系为

$$\Delta Q_2 = \frac{\Delta p}{R_0} \quad \text{或} \quad R_0 = \frac{\Delta p}{\Delta Q_2} \quad (1-17)$$

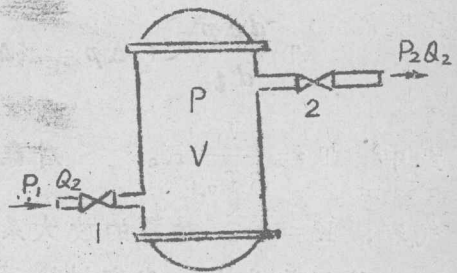


图 1-3 气罐压力调节对象

这里， R_0 是输出管道阀门 2 的阻力，又称气阻，它定义为：

$$R_0 = \frac{\text{气压差的变化 (公斤/厘米}^2\text{)}}{\text{气体流量的变化 (公斤/秒)}}$$

将 (1-17) 式代入 (1-16) 式可得

$$\frac{V}{RT_0} R_0 \frac{d\Delta p}{dt} + \Delta p = R_0 \Delta Q, \quad (1-18)$$

写成标准形式

$$T \frac{d\Delta p}{dt} + \Delta p = K\Delta Q, \quad (1-19)$$

式中 $T = \frac{V}{RT_0} R_0$ 对象时间常数； $\frac{V}{RT_0}$ 为容量系数，又称气容； $K = R_0$ 对象的放大系数。

到目前为止，我们讨论了水槽、加热器和气罐等三种调节对象。它们从表面上看是完全不同的设备，内部的物理过程也很不一样，但我们通观 (1-8)、(1-13)、(1-18) 式可以发现，这些单容对象的微分方程式均属同一类型，也就是熟知的非周期环节。这是因为它们都反映流入量与流出量之间的关系，不论水位，温度或气压都有容量系数和阻力。容量系数和阻力，决定了过程的时间常数和放大系数。容量和阻力的概念是普遍的东西。我们在电路中常见的由电阻 R 和电容 C 所组成的充电回路。描述充电电压与电容两端电压变化规律的微分方程式是一样的，也是一个非周期环节。这里容量就是电容 C ，阻力就是电阻 R 。

下面我们研究对象的反应曲线，所谓对象反应曲线，是指对象某一输入量作阶跃变化时，其输出量对时间的变化曲线。在工程界，常常把反应曲线叫做对象的飞升曲线。

以水位对象为例，当进料水管阀门开度有一个阶跃的变化 $\Delta \mu_1$ ，同时将使进料流量有一阶跃变化 ΔQ ，时，对 (1-9) 式求解，就

能得出水位的变化规律：

$$\Delta h = K\Delta\mu_1 (1 - e^{-t/T}) \quad (1-20)$$

其变化曲线如图 1-4 所示。

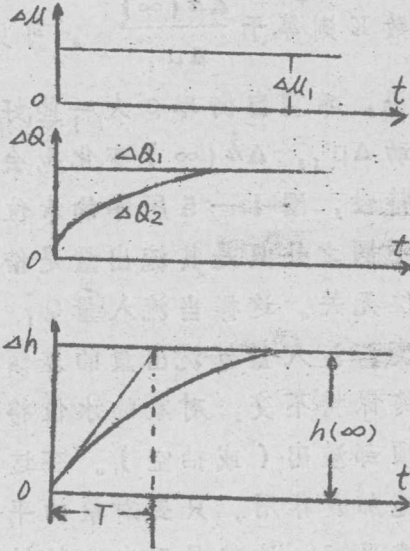


图 1-4 水位飞升曲线

图中当 $t \rightarrow \infty$ 时，水位趋向稳态值 $\Delta h(\infty) = K\Delta\mu_1$ ，这就是输入量 $\Delta\mu_1$ 经过水槽这个环节后放大了 K 倍而成为输出量的变化值。因而称 K 为放大系数。在 (1-20) 式中时间常数 T 表示了水位 Δh 一直以 $t=0$ 最大速度变化到稳态值时所需的时间。它是表示飞升过程所需时间的重要参数。

1-1.4 对象的自衡特性

跃变化时，对

对象被调量水位的变化 Δh 最后进入新的稳态 $\Delta h(\infty) = K\Delta\mu_1$ 。这种新的稳态的建立，是由于在变化了的液位作用下，使输出流量作相应变化所致。对象在扰动作用破坏其平衡工况后，在没有操作人员或调节器的干预下而能自动重新恢复平衡的特性，称为自衡特性。

由 (1-20) 式和图 1

—4 看出，当输入量有一阶

跃变化时，对象被调量水位的变化 Δh 最后进入新的稳态 $\Delta h(\infty) = K\Delta\mu_1$ 。这种新的稳态的建立，是由于在变化了的液位作用下，使输出流量作相应变化所致。对象在扰动作用破坏其平衡工况后，在没有操作人员或调节器的干预下而能自动重新恢复平衡的特性，称为自衡特性。

为了对自衡特性进一步了解，我们再观察一下水槽对象中所发生的过程，当进水管路的阀门增大 $\Delta\mu_1$ 时，随之输入流量增加了 ΔQ_1 ，由于进出流量不相等，使水槽中的水位逐渐上升，结果使得作用在流出阀上的压头增高，并导致输出流量的增长，这种增长将延续到出料流量的增量 ΔQ_2 与进料流量的增量 ΔQ_1 相等为止。由此可见，判断对象有无自衡特性的基本标志是其被调量能否对破坏

工况平衡的扰动作用施加反作用。在有自衡特性对象，常以自衡率 ρ 来说明对象自衡能力的大小。如果能以被调量较小的变化 $|\Delta h|$ 来抵消较大的扰动量 $(\Delta \mu)$ 的话，那就表示这个对象的自衡能力大。

因此， $\rho = \frac{\Delta \mu}{\Delta h(\infty)}$ ，而放大系数 K 则等于 $\frac{\Delta h(\infty)}{\Delta \mu}$ ，可见 ρ 和 K

是互为倒数，对一个调节对象来说，希望自衡率 ρ 大一些好，如果 ρ 大，那么即使加上一个很大扰动 $\Delta \mu$ ， $\Delta h(\infty)$ 变化也会很小。

实际上有些对象不具有自衡特性，图 1—5 所示的水位对象就是一个典型例子。它与图 1—1 不同之处只是其流出量是借一个水泵压送，由于这时的流出量与水位无关。这样当流入量 Q_1 有一个阶跃变化后，流出量 Q_2 保持不变，流入量与流出量的差额并不随水位的改变而逐渐减小，而是始终保持不变，对象的水位将以等速度不断上升（或下降）直至水槽顶部溢出（或抽空）。在这种情况下，由于被调量不能对扰动作用施加反作用，只要对象的平衡工况一旦被破坏，就再也无法自行重建平衡。这就是无自衡特性。

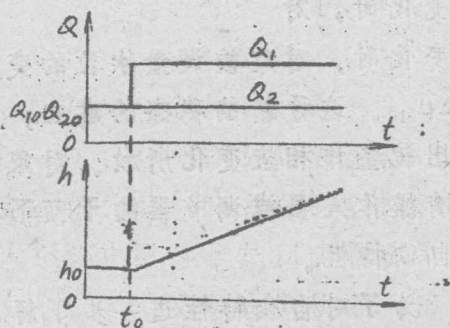
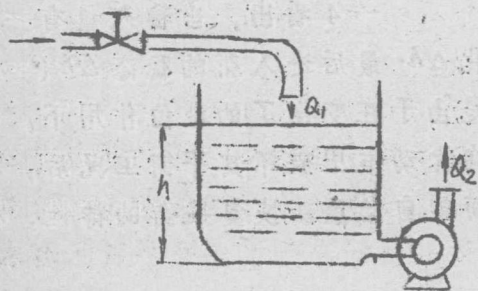


图 1—5 无自衡特性水槽

图 1—6 无自衡特性水槽的飞升曲线

无自衡对象的反应曲线示于图 1—6。列写这种对象的微分方程与前面有自衡的水槽对象，在很多方面都一样，只是在流出量方

面有差别，考虑到水位变化过程中，这个水槽流出量 Q_2 ，始终保持不变，因此对于图1-5无自衡特性对象来说，可以利用以上推导的(1-7)式令 $\Delta Q_2=0$ 即得

$$\Delta Q_1 = F \frac{d\Delta h}{dt}$$

考虑到(1-5)式得

$$F \frac{d\Delta h}{dt} = K_{\mu} \Delta \mu_1 \quad (1-21)$$

或写做

$$\frac{d\Delta h}{dt} = \varepsilon \Delta \mu_1 \quad (1-$$

其中， $\varepsilon = \frac{K_{\mu}}{F} = \frac{\frac{d\Delta h}{dt}}{\Delta \mu_1}$ 称为飞升速度。

1-2节 多容对象的特性、容量滞后、纯滞后

1-2.1 双容对象的特性

以上我们讨论的是只有一个储蓄容量的对象。实际生产中的调节对象往往要复杂一些，它往往具有一个以上的储蓄容量，如图1-7所示的调节对象具有两个水槽，也就是说它有两个可以储水的容积，称为双容对象。

这是由二个一阶非周期惯性环节串联起来，被调量是第二水槽的水位 h_2 。当输入量有一个阶跃增加 ΔQ_1 时，则被调量变化的反应曲线如图1-8中所示的 Δh_2 曲线。它不再是简单的指数曲线，而是呈S形的一条曲线。由于多了一个容量就使调节对象的飞升特性在时间上更加落后一步。

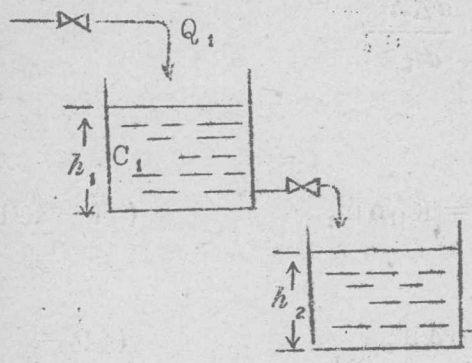


图 1-7 双容对象

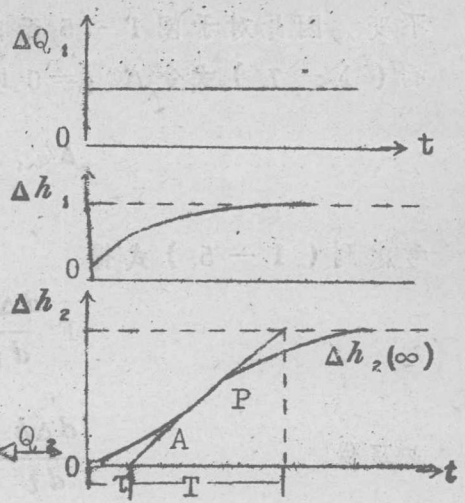


图 1-8 双容对象的飞升曲线

在图 1-8 中 S 形曲线的拐点 P 上做切线，它在时间轴上截出一段时间 OA，这段时间可以近似地衡量由于多了一个容量而使飞升过程向后推迟的程度，因此称为容量滞后，通常以 τ_c 代表之。

对比单容和双容对象的飞升特性曲线可以看到，双容对象由于容量数目由 1 变为 2，飞升特性就出现了一个容量滞后 τ_c ，而这个 τ_c 对调节过程的影响是很大的，在下一章讲到调节器整定时可以看到 τ_c 是很重要的一个参数。研究图 1-8 双容调节对象的飞升特性曲线，此时，T 应当用在曲线拐点 P 作切线的方法去求，而放大系数 K 和单容一样，即

$$K = \frac{\Delta h_2(\infty)}{\Delta \mu_1}$$

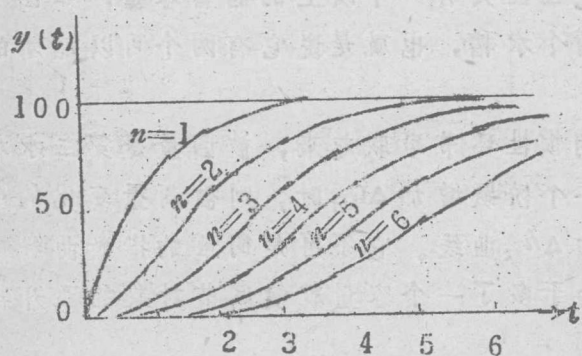


图 1-9 具有 1~6 个相同储蓄容量调节对象的飞升特性

以上讨论是双容对象的飞升特性，如果在这个基础上再增加一个或更多的储蓄容量，那么它的飞升曲线仍然呈 S 形，但是容量滞后 τ_c 更加大了。图 1-9 表示具

有1~6个同样大小的储蓄容量的调节对象的飞升特性。

实际的调节对象容量数目可以很多，每个容量也不相同，但它们的飞升特性曲线和图1-9相似。都可以用 τ_c 、 T 、 K 这三个参数来表征。

1-2.2 纯滞后

在调节对象中，所谓滞后是指被调量的变化落后于扰动的发生和变化。以上讨论的双容对象由于容量数目比单容多一个时，产生了容量滞后，另外还有一种滞后，它的来源不是由于储蓄容量的存在，而是由于信号的传输，这种滞后称为传输滞后或纯滞后（又称纯时延）。

图1-10所示的一个用蒸汽来控制水温系统，蒸汽量的变化一定要经过长度为 l 的路程以后才反应出来，这是由于扰动作用点和被调量测量点相隔一定距离所致。如果水的流速为 v ，则由扰动引起的测点温度的变化，需经一

段时间 $\tau_0 = \frac{l}{v}$ 这就是纯滞后时间。

有的对象既有纯滞后又有容量滞后，那么我们通常把这两种滞后加在一起，统称为滞后，用 τ 表示，即 $\tau = \tau_0 + \tau_c$ 。

这样的对象飞升特性，仍然用 τ 、 K 、 T 三个参数来表征。

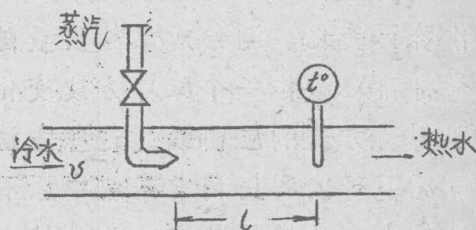


图1-10 蒸汽控制水温系统

对象的滞后性质，不论是纯滞后还是容量滞后，对调节系统的品质将产生极为不利的影响。由于滞后的存在，往往会导致扰动作用不能及早察觉，调节效果不能适时反映。

1-3节 对象特性的实验测定、时域法

1-3.1 实验测定方法概述