

# 自动控制系统

(工业生产过程自动控制系统)

邵裕森 编

中央广播电视大学出版社

## 内 容 简 介

本书以工业生产过程自动控制系统为体系,结合生产工艺要求和特点,系统地介绍了工业生产过程自动控制系统的  
设计方法、投运和参数整定方法。对于计算机控制和智能仪表控制也作了简单介绍。书中选编了较多的工程实例、习题与思考  
题,对读者巩固所学理论,掌握控制系统设计方法,提高解决生产中自动控制问题的能力很有助益。

本书是广播电视大学电气类及有关专业的教材,可供电力、冶金、石油化工、机械、轻纺、食品、建材、轻工和环保等部门  
从事自动控制工作的工程技术人员学习参考,也可作为大专院校有关专业师生的教学参考书。

## 自动控制系统

(工业生产过程自动控制系统)

邵裕森 编

\*

中央广播电视大学出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京第二新华印刷厂印刷

\*

开本 787×1092 1/16 印张 13 千字 295

1988年7月第1版 1988年10月第1次印刷

印数 1—16000

定价 2.70 元

ISBN7—304—00261—1/TP·15

## 前 言

工业生产过程自动控制(简称过程控制)一般是指在冶金、机械、石油、化工、电力、轻工、建材、原子能和环境保护等部门生产过程中对于温度、压力、流量、液位、成份等变量实现自动控制。即利用过程检测控制仪表、自动装置、数字计算机等自动化技术工具,对整个生产过程进行自动检测和控制,以达到各种最优的技术经济指标,提高经济效益和劳动生产率、节约能源,改善劳动条件,保护环境卫生等目的。

工业生产过程自动控制系统(简称过程控制系统),是指自动控制系统的被控量为温度、压力、流量、液位、成份、pH(氢离子浓度)等这样一些变量时的系统。它由对象和过程检测控制仪表组成。

工业生产过程自动控制系统是一门内容极为丰富的综合性的应用技术学科,它与工程实践联系紧密,在现代工业生产过程自动化中得到了十分广泛的应用。

本书是根据中央广播电视大学的教学大纲编写的。

本书根据工业生产过程的特点,联系国内生产实际和国内外先进技术水平,应用自动控制理论,结合生产工艺,系统地介绍生产过程自动控制系统的设计、分析以及应用中必须注意的问题。

对于组成工业生产过程自动控制系统的过程检测控制仪表,从使用的角度介绍其工作原理、主要特点及选用中的有关问题。

本书共分四章,第一章介绍过程控制的主要特点。重点介绍对象数学模型的建模方法。这是分析、设计自动控制系统的必备资料。

第二章介绍过程参数的检测方法、常用仪表及其选用;介绍目前常用的 DDZ-II 型仪表和正在推广使用的、具有先进水平的 DDZ-III 型仪表的变送器、调节器和执行器等工作原理、性能特点和使用中的有关问题。它是构成过程控制系统的技术工具。

第三章是本书的重点内容,侧重介绍单回路控制系统的设计方法,参数整定方法,并通过应用举例,加深和巩固理论。

第四章是在第三章的基础上,结合生产工艺的某些特殊要求和生产过程的特点,介绍串级控制、前馈控制、比值控制、分程控制、选择性控制、多变量控制以及正在开发和应用中的数字过程控制系统等,侧重介绍其构成原理和应用中必须注意的问题。对于智能仪表,结合工程实例也作了简要介绍。

在本书中选编了较多的工程实例、习题与思考题,对于读者切实掌握工业生产过程自动控制系统的的设计方法,巩固所学基本理论和提高解决实际问题的能力很有助益。同时,在编写中力求深入浅出,便于自学。

由于本人水平所限,缺点和错误在所难免,敬请读者批评指正。

编者

1988年2月于东南大学

# 目 录

<b>第一章 过程控制的特点和对象的数学模型</b> .....	(1)
§ 1-1 过程控制的特点 .....	(1)
§ 1-2 对象数学模型的建立 .....	(3)
习题及思考题 .....	(25)
<b>第二章 过程检测控制仪表及其应用</b> .....	(27)
§ 2-1 概述 .....	(27)
§ 2-2 过程参数检测仪表 .....	(28)
§ 2-3 变送器与调节器 .....	(65)
§ 2-4 执行器 .....	(97)
习题及思考题 .....	(108)
<b>第三章 单回路控制系统设计</b> .....	(110)
§ 3-1 单回路控制系统设计 .....	(111)
§ 3-2 单回路控制系统的投运及调节器参数的整定 .....	(121)
习题及思考题 .....	(135)
<b>第四章 其他典型过程控制系统</b> .....	(138)
§ 4-1 串级控制系统及应用 .....	(138)
§ 4-2 前馈控制系统及应用 .....	(147)
§ 4-3 比值控制系统及应用 .....	(154)
§ 4-4 分程控制系统及应用 .....	(161)
§ 4-5 选择性控制系统及应用 .....	(166)
§ 4-6 多变量控制系统 .....	(170)
§ 4-7 数字过程控制系统 .....	(180)
习题及思考题 .....	(190)
<b>附录 部分习题及思考题答案</b> .....	(192)
<b>参考文献</b> .....	(194)
<b>实验指导书</b> .....	(195)

# 第一章 过程控制的特点和对象的数学模型

## § 1-1 过程控制的特点

与其它自动控制系统相比,过程控制的主要特点大致可归纳如下:

一、系统由工业上系列生产的过程检测控制仪表组成:

例 1-1 发电厂锅炉过热蒸气温度控制系统

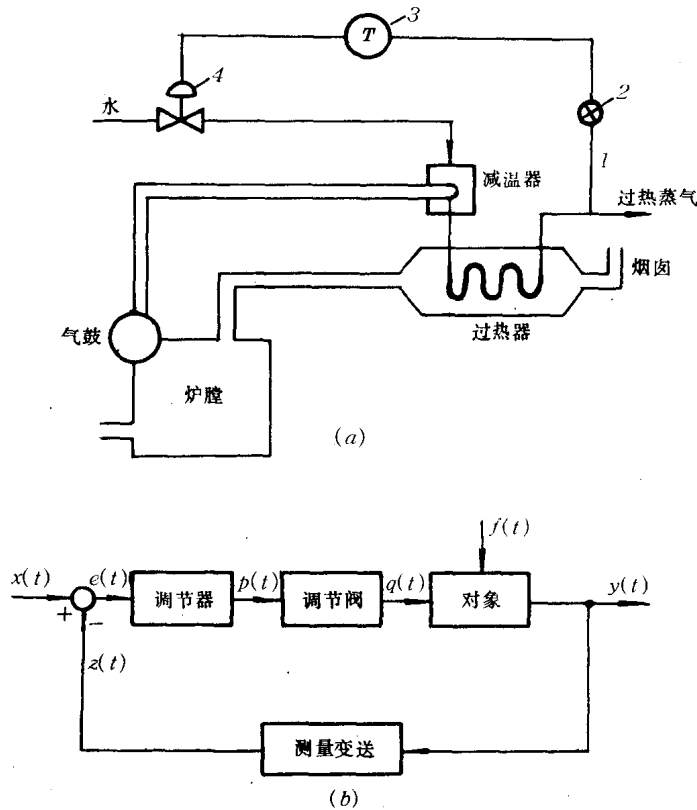


图 1-1 锅炉过热蒸气温度控制系统

在冶金、机械、石油、化工、电力、轻工等工业部门中,锅炉是不可缺少的动力设备。发电厂从锅炉汽鼓出来的饱和蒸气经过过热器继续加热,使蒸气达到  $460^{\circ}\text{C}$  左右,再去推动汽轮机工作。每种锅炉与汽轮机组都有一个规定的运行温度,在这个温度下运行机组的效率最高。如果温度过高,会使汽轮机的寿命大大缩短;如果温度过低,当蒸气带动汽轮机作功时,会使部分蒸

气变成小水滴,冲击汽轮机叶片,造成生产事故。因此过热蒸气的温度是生产工艺的一个重要参数,是保证汽轮机组正常运行的一个重要条件,必须对其进行控制。通常在过热器之前或中间部分串接一个减温器,通过控制减温水流量大小来改变过热蒸气温度。本系统采用 DDZ-III 型(电动单元组合 III 型)仪表,用热电阻 1 检测过热蒸气的温度,经温度变送器 2,将测量信号送至调节器 3 的输入端,并与代表蒸气温度的给定值进行比较,调节器按此偏差发出控制命令,来控制调节阀 4 的开度,从而改变减温水流量,达到控制过热蒸气温度的目的。

### 例 1-2 液位控制系统

图 1-2 所示为一个液体贮罐,在实际工业生产过程中常常作为一个中间容器或成品罐,从前一道工序来的成品或半成品连续不断地经过阀门 4 流入贮罐,而贮罐中的成品或半成品又通过阀门 5 送至下一道工序进行包装或加工。为了保证正常生产,需要对贮罐液位进行控制。

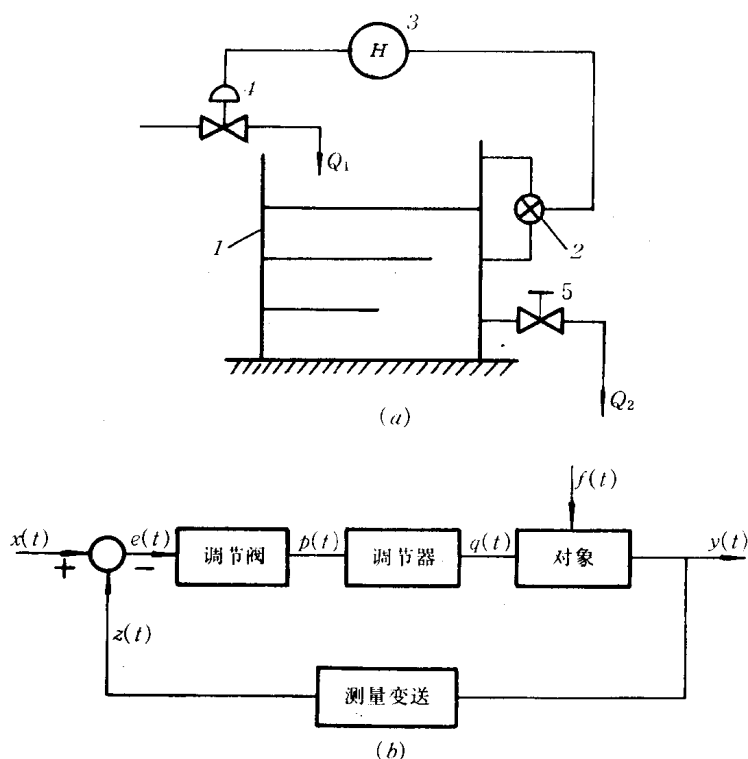


图 1-2 液位控制系统

本例选用气动单元组合仪表(即 QDZ 仪表)。用 QBC 差压变送器 2 测量液位,其液位信号与其给定值进行比较,调节器 3 按此偏差发出控制命令,控制调节阀 4 的开度,使液位控制在给定值上。

从上述两个实例的方框图可以看出,一个简单的过程控制系统是由控制对象和过程检测控制仪表(包括测量元件,变送器、调节器和调节阀)两部分组成。为了设计系统方便和得到预期的控制效果,根据生产工艺要求,通过选用过程检测控制仪表,组成过程控制系统,并通过对

控制系统参数的整定,使系统运行在最佳状态,实现对生产过程的最佳控制。

二、被控对象的设备是已知的,对象的型式很多,它们的动态特性是未知的或者是不十分清楚的,但一般具有惯性大,滞后大,而且大半具有非线性特性。例如热工过程中的锅炉、热交换器、动力核反应堆;冶金过程中的转炉、平炉;机械工业中的热处理炉;石油化工过程中的精馏塔,化学反应器,流体传输设备等。这些对象的工作机理比较复杂,很难用解析方法得出其精确的动态数学模型。

### 三、控制方案的多样性

随着现代工业生产的迅速发展,生产工艺条件的更加复杂化,而且生产过程多属多变量,非线性,分布参数。因此,对过程控制的要求便不断提高,为了满足各种生产工艺要求,过程控制中应用的控制方案类型很多。有单变量控制系统,多变量控制系统;有线性系统,也有非线性系统;有模拟量控制系统,也有数字控制系统,等等。这是其他自动控制系统所不能比拟的。

### 四、控制过程属慢过程,多半属参量控制

由于对象特性的特点,决定了控制过程属慢过程。另外,在一些生产过程中(例如石油、化工、冶金、电站、造纸、玻璃制品、塑料加工等),通常用一些物理量和化学量来表征其生产过程是否正常,因此,需要对表征生产过程的温度、压力、流量、液位、成份、pH 等过程参量进行控制。

五、在过程控制系统中,其给定值是恒定的(定值控制),或是已知时间的函数(程序控制)。控制的主要目的是在于如何减小或消除外界扰动对被控量的影响。另外,过程控制多半是多变量控制,并且其被控对象是相关的。

综上所述,工业生产要实现生产过程自动化,首先必须熟悉生产过程,掌握对象特点;同时要熟悉过程参数的主要测量方法,了解仪表的主要性能、特点,根据生产工艺要求和反馈控制理论的分析方法,合理正确地构成过程控制系统;并且通过改变调节仪表的 P、PI、PD、PID 特性参数,使系统运行在最佳状态。

## § 1-2 对象数学模型的建立

过程控制系统的品质,是由组成系统的对象和过程检测控制仪表各环节的特性和系统的结构所决定的。建立对象的数学模型,对于实现生产过程自动化有着十分重要的意义。可以说,一个过程控制系统的优劣,主要取决于对生产工艺过程的了解和建立对象的数学模型。

### 一、基本概念

在过程控制系统中,对象是指正在运行中的多种多样的工艺生产设备。操作人员根据工艺需要,操作着这些设备。有经验的操作人员由于他们深入了解生产过程,摸透这些设备的特性,当生产出现扰动并偏离工艺要求时,就能正确地操作各种阀门和装置,使生产很快恢复正常。

不同的生产过程,对象是千差万别的,有的对象很稳定,操作很容易,但有的对象则不然,只要稍不小心,就会不符合正常工艺条件,甚至造成生产事故。在过程控制中,是运用一些自动化技术工具来模拟操作人员动作的。所以,首先必须深入了解对象特性,了解其内在规律,学会

建立对象数学模型的方法。

在对象中,一般总有某些物质或能量的输入和输出,而一般对象具有储存物质和能量的能力。

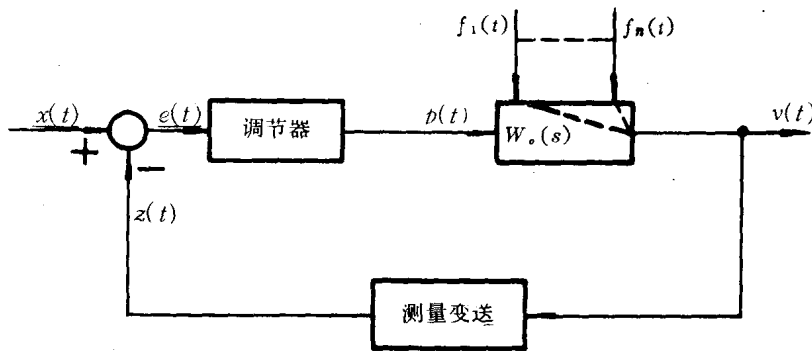


图 1-3 工业生产过程自动控制系统方框图

图 1-3 所示为最简单的过程控制系统方框图。其中过程检测控制仪表完成系统中检测、运算和执行三种功能,是用来实现对生产过程中某一设备进行控制的工具。在实际生产过程中,对象是多种多样的,生产工艺要求也各不相同,欲设计一个过程控制系统,必须根据具体的对象,正确选用过程检测控制仪表。同时,为使控制系统运行在最佳状态,还必须针对具体对象的特性与控制要求(即工艺要求),选择合适的调节器参数。对于那些纯滞后较大,扰动众多或非线性较严重等很难控制的对象,采用简单控制系统是不能满足工艺要求的。因此,将要设计较复杂的控制系统。由此可见,为了分析、设计、研究或整定一个过程控制系统,首先必须熟悉生产过程,掌握对象的动态特性。

图 1-3 所示,对象  $W_o(s)$  是多个输入信号( $p(t)$ 、 $f_1(t)$ 、 $f_2(t)$ 、 $\dots$ 、 $f_n(t)$ )、单个输出信号( $y(t)$ )的物理系统。各个输入信号( $p(t)$ 、 $f_1(t)$ 、 $f_2(t)$ 、 $\dots$ 、 $f_n(t)$ )引起被控量( $y(t)$ )变化的动态特性一般是不同的。通常选一个可控性良好的输入信号作为控制作用,即调节器的输出  $p(t)$  作为控制作用,常称为对象的“基本扰动”或“内部扰动”。其他的输入信号则为扰动作用  $f_1(t)$ 、 $f_2(t)$ 、 $\dots$ 、 $f_n(t)$ ,统称为“外部扰动”。对象的“基本扰动”作用在闭合回路内,所以对过程控制系统的性能起决定作用。但是,“外部扰动”作用下对象的动态特性对控制过程也有很大影响,所以也必须有所了解。

为了简化对象的数学模型,我们仅讨论线性对象或线性化的对象。这样,在多个输入信号的作用下,对象的输出量为:

$$Y(s) = W_o(s)P(s) + W_{f_1}(s)F_1(s) + \dots + W_{f_n}(s)F_n(s) \quad (1-1)$$

式中:  $W_o(s)$  —— 当  $f_1(t)$ 、 $f_2(t)$ 、 $\dots$ 、 $f_n(t)$  不变时,控制作用  $p(t)$  对被控量  $y(t)$  的传递函数;

$W_{f_1}(s)$  —— 当  $p(t)$ 、 $f_2(t)$ 、 $\dots$ 、 $f_n(t)$  不变时,扰动  $f_1(t)$  对被控量  $y(t)$  的传递函数;

.....



$W_{f_n}(s)$  —— 当  $p(t)$ 、 $f_1(t)$ 、 $f_2(t)$ 、 $\dots$ 、 $f_{n-1}(t)$  不变时, 扰动  $f_n(t)$  对象被控量  $y(t)$  的传递函数;

$Y(s)$ 、 $P(s)$ 、 $F(s)$  —— 分别为对象被控量、控制信号和扰动信号的拉氏变换。

对象输入量与输出量之间的信号联系(图 1-3 中用虚线表示), 称为“通道”。调节作用(控制作用)与被控参数之间的信号联系, 称为调节通道(即控制通道)。扰动作用与被控参数之间的信号联系, 称为“扰动通道”。

另外, 还有一些对象可能是多个输入信号( $p_1(t)$ 、 $p_2(t)$ 、 $\dots$ 、 $p_n(t)$ )、多个输出信号( $y_1(t)$ 、 $y_2(t)$ 、 $\dots$ 、 $y_m(t)$ )的物理系统。在这样一些对象中, 调节阀的个数通常与被控参数的个数相等。几个输入信号将同时影响两个或两个以上的被控量。即每一个调节作用除了影响“自己的”被控参数外, 还将或多或少地影响其余的被控量。为此, 有时可以采用解耦控制, 以便使某一个调节作用只影响“自己的”被控参数, 而不影响其余的被控参数。本章仅讨论只有一个被控量的对象。

从阶跃响应曲线来看, 过程控制中大多数控制对象特性的特点是: 被控量的变化往往是不振荡的、单调的, 有滞后和惯性, 如图 1-4 所示。从对象的典型阶跃响应曲线来看, 当扰动发生后, 被控参数并不立即有显著的变化, 这表明对象对扰动的响应有滞后, 被控参数变化的最后阶段可能达到新的平衡, 如图 1-4(a) 所示。也可能被控量不断变化, 而其变化速度趋近某一数值, 不再平衡下来, 如图 1-4(b) 所示。前者对象具有自平衡能力, 统称为有自衡的对象; 后者对象无自平衡能力, 统称为无自衡对象。

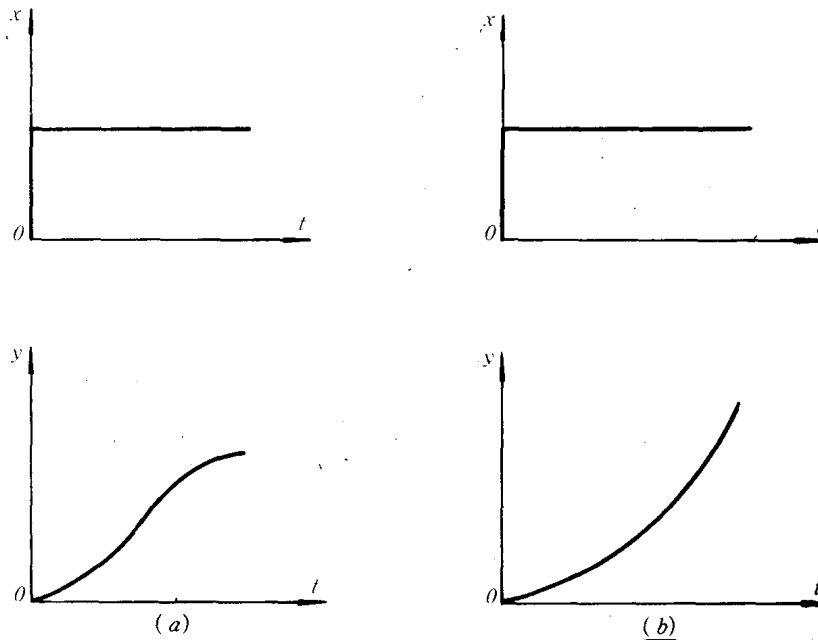


图 1-4 对象的阶跃响应曲线

对象的数学模型, 是指对象在各输入量作用下, 其相应输出量变化的函数关系的数学表达式。如微分方程式、微分方程组、传递函数表达式或频率特性表达式等。

目前,研究对象数学模型一般有两种方法。对于简单对象,可以根据过程进行的机理和生产设备的具体结构,用分析计算的方法,即通过物料平衡和能量平衡关系,推导出对象的数学模型;对于复杂对象,用解析方法求取数学模型比较困难,因此,通常采用现场实验测定方法来获得。

## 二、用解析方法建立对象的数学模型

### 1. 单容对象的数学模型

所谓单容对象,是指只有一个储蓄容积的对象。单容对象可分为具有自平衡能力和无自平衡能力两类。下面分别来介绍其对象的数学模型。

#### (1) 有自平衡能力单容对象的数学模型

所谓有自平衡能力,是指对象在扰动作用下,其平衡状态被破坏后,不需要操作人员或仪表等干预,就能依靠自身重新恢复平衡的能力。

在过程控制中,单容对象的种类繁多,其结构各异。下面以连续生产过程中常用到的液体贮罐、加热器等对象为例,介绍怎样通过物料平衡和能量平衡等关系来建立数学模型的方法。

#### 例 1-3 液位对象的数学模型

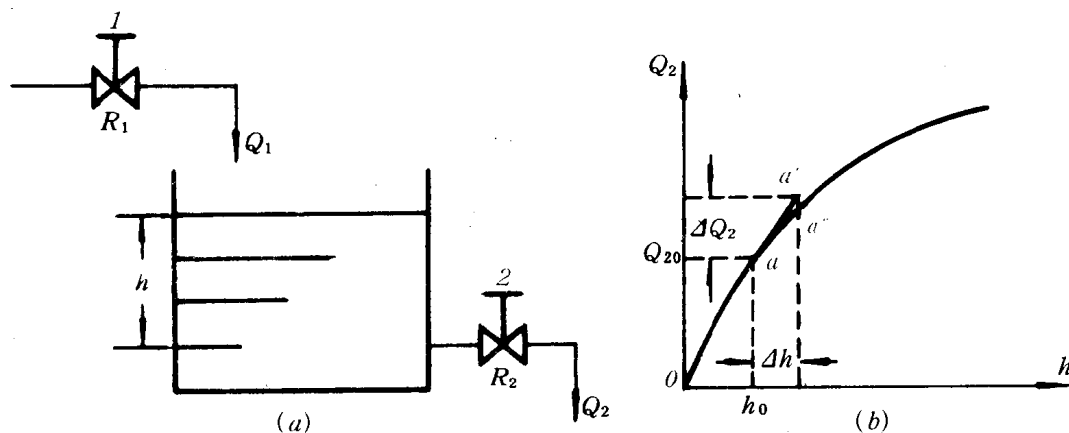


图 1-5 液位对象

图 1-5 所示为液位对象,其液体流入量为  $Q_1$ ,通过改变调节阀 1 的开度,可以改变  $Q_1$  的大小。液体流出量为  $Q_2$ ,它取决于用户的需要,可调节阀 2 的开度来加以改变。液位  $h$  代表贮罐中贮存液体的数量, $h$  的变化反映了由于液体流入量  $Q_1$  与流出量  $Q_2$  不等而引起贮罐中蓄水或泄水的过程。设液位对象的输入量为  $Q_1$ ,输出量为液位  $h$ 。根据物料平衡的关系,液体流入量与流出量之差应等于贮罐中液体贮存量的变化率,即

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

将式(1-2)表示为增量形式:

$$\Delta Q_1 - \Delta Q_2 = A \frac{d\Delta h}{dt} \quad (1-3)$$

式中： $\Delta Q_1$ 、 $\Delta Q_2$ 、 $\Delta h$ ——分别为偏离某一平衡状态  $Q_{10}$ 、 $Q_{20}$ 、 $h_0$  的增量；

$A$ ——贮罐截面积。

设某一平衡状态下的流入量  $Q_{10}$  等于流出量  $Q_{20}$ ，液位的平衡值为  $h_0$ 。 $\Delta Q_1$  是调节阀 1 的开度变化而引起的。

液体的流出量  $Q_2$  是随液位  $h$  而变化的， $h$  愈高， $Q_2$  出口静压愈大，流出量  $Q_2$  也就愈大。同时  $Q_2$  还与调节阀门的阻力  $R_2$  有关，假设三者变化量之间的关系为：

$$\Delta Q_2 = \frac{\Delta h}{R_2} \quad \text{或} \quad R_2 = \frac{\Delta h}{\Delta Q_2} \quad (1-4)$$

式中： $R_2$ ——阀门 2 的阻力，称为液阻。

液体在流动中总存在着阻力。在图 1-5(a) 中液阻  $R_2$  可定义为：

$$R_2 = \frac{\text{液位差变化}}{\text{流量变化}}$$

其物理意义是：产生单位流量变化所必须的液位变化量。

流体在一般流动(紊流)情况下，液位  $h$  和流量  $Q_2$  之间的关系是非线性的，如图 1-5(b) 所示。因此液阻  $R_2$  在  $Q_2$  不同流量时是不同的。为了简化问题，通常在静态特性曲线工作点  $a$  附近不大的范围内，用切于  $a$  点的一段切线  $aa'$ ，代替原曲线上的一段曲线  $aa''$ ，进行线性化处理。经过线性化后，液阻  $R_2$  则可以认为是常数，可以用式(1-4)表示。

将式(1-4)代入式(1-3)可得：

$$\Delta Q_1 - \frac{\Delta h}{R_2} = A \frac{d\Delta h}{dt}$$

或

$$R_2 A \frac{d\Delta h}{dt} + \Delta h = R_2 \Delta Q_1 \quad (1-5)$$

将上式改写成一般形式：

$$T \frac{d\Delta h}{dt} + \Delta h = K \Delta Q_1 \quad (1-6)$$

或写成拉氏变换式：

$$W_0(s) = \frac{H(s)}{Q_1(s)} = \frac{K}{Ts + 1} \quad (1-7)$$

式中： $T$ ——对象的时间常数， $T = AR_2$

$K$ ——对象的放大系数， $K = R_2$

液位对象时间常数  $T$  是反映对象在扰动作用下被控参数变化的快慢程度。即表示对象惯性大小的参数。

液位对象中的  $C$  称为容量系数，或称为液容。可定义  $C = \text{被储存液体的变化} / \text{液位的变化}$ 。其物理意义是：产生单位液位的变化所需的被储存液体的变化量。例如图 1-5(a) 液位对象的容量系数为：

$$C = \frac{dV}{d\Delta h} = \frac{Ad\Delta h}{d\Delta h} = A$$

由上可知,液阻  $R$  不但影响对象的时间常数  $T$ ,而且影响对象的放大系数  $K$ ,而容量系数  $C$  仅影响对象的时间常数  $T$ ,不影响对象的放大系数  $K$ 。

#### 例 1-4 温度对象的数学模型

电炉加热器为一温度对象,如图 1-6 所示。它由电炉和加热容器组成。容器内盛水,水的温度为  $T_1$ 。生产过程中要求  $T_1$  保持不变,所以  $T_1$  为被控参数,即温度对象的输出量。而温度对象的输入量是电炉给水的供热量  $Q_1$ 。在工作过程中,电炉不断给水供热  $Q_1$ ,而水又不断地通过保温材料向四周空气散热  $Q_2$ 。当  $Q_1 = Q_2$  时,则水从电炉得到的热量与水向空气散出的热量相等,水温  $T_1$  保持不变。如果在某瞬间突然加大电炉电流而使给水供热量  $Q_1$  增大,此时,水从电炉得到的热量增加了,于是水温就慢慢升高。与此同时,水温  $T_1$  的升高使得向四周空气散发的热量  $Q_2$  也随之增大,最后  $Q_1 = Q_2$ ,热量的输入与输出的平衡关系又重新建立起来,水温  $T_1$  也就保持不变了。

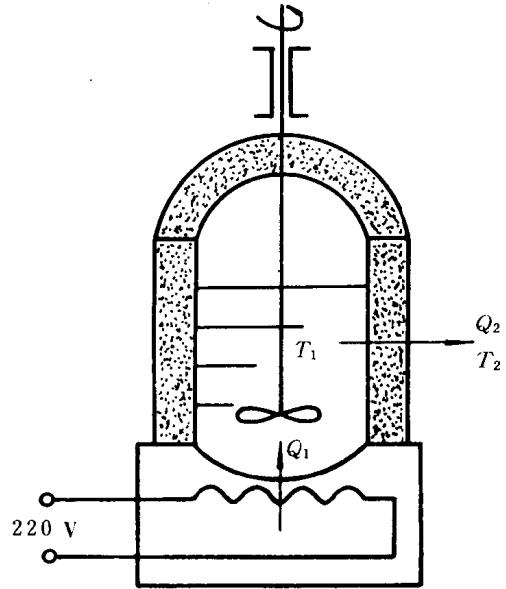


图 1-6 电加热器温度对象

根据能量平衡关系,可以建立电加热器的微分方程式,即在单位时间内进入加热器的热量与单位时间内散出加热器热量之差,应等于加热器热量储存的变化率。于是可得:

$$Q_1 - Q_2 = C \frac{dT_1}{dt} = Gc_p \frac{dT_1}{dt} \quad (1-8)$$

式中:  $G$ ——加热器内水的总重量;

$c_p$ ——水的比热,在常压下  $c_p = 1$ ;

$C$ ——热容。它与液位对象中的  $A$  相似, $C$  等于  $T_1$  每升高  $1^\circ\text{C}$  所需储蓄的热量,  $C = Gc_p$ 。

被加热的水要不断地通过保温材料向四周空气散发热量,这个热量可表示为:

$$Q_2 = K_r A (T_1 - T_2) \quad (1-9)$$

式中:  $K_r$ ——传热系数;

$A$ ——表面积;

$T_2$ ——周围空气的温度。

在电加热器中,热量要通过保温材料向四周空气散发,保温材料对热量的散出是有阻力的,把这个阻力称之为热阻。保温材料传热系数愈大,则热阻愈小,散热表面积愈大,则热阻愈小,若用  $R$  表示热阻,则

$$R = \frac{1}{K_r A} \quad (1-10)$$

将式(1-9)和式(1-10)代入式(1-8),并采用与液位对象相同的步骤,不难得到用增量表示

的微分方程式

$$RC \frac{d\Delta T_1}{dt} + \Delta T_1 = R\Delta Q_1 + \Delta T_2 \quad (1-11)$$

如果周围空气的温度不变,则  $\Delta T_2 = 0$ , 于是可得

$$RC \frac{d\Delta T_1}{dt} + \Delta T_1 = R\Delta Q_1 \quad (1-12)$$

将上式写成一般形式;

$$T \frac{d\Delta T_1}{dt} + \Delta T_1 = K\Delta Q_1 \quad (1-13)$$

或写成拉氏变换形式:

$$W_0(s) = \frac{T_1(s)}{Q_1(s)} = \frac{K}{Ts + 1} \quad (1-14)$$

式中:  $T$ ——对象的时间常数,  $T = RC$ ;

$K$ ——对象的放大系数,  $K = R$ 。

### 例 1-5 压力对象的数学模型

图 1-7 所示为气体储罐压力对象。由空气压缩机来的空气压力为  $p_1$ , 通过阀门 1 向气罐充气, 而气罐通过阀门 2 向外界供气, 在生产过程中气罐压力  $p$  要求保持稳定, 于是  $p$  为被控量。下面以气罐进口压力  $p_1$  基本不变为条件, 来讨论压力对象的数学模型。

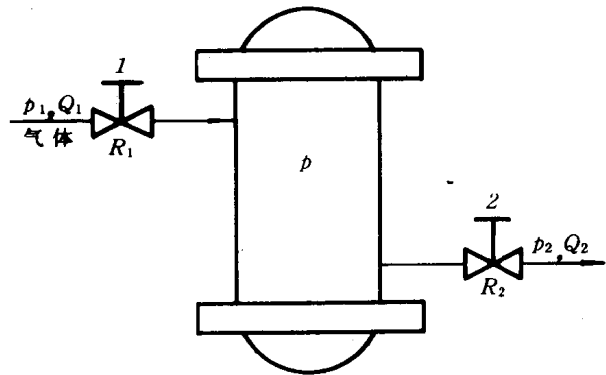


图 1-7 压力对象

根据物料平衡关系, 当  $Q_1$  和  $Q_2$  的静态平衡被破坏, 则气罐内气体的重度会发生变化。

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

式中:  $Q_1$  —— 流入气罐的气体流量;

$Q_2$  —— 流出气罐的气体流量;

$\gamma$  —— 气体重度;

$V$  —— 气罐的体积, 在该对象中为一个常数。

由于气体压力不高, 气罐中的气体可近似看作理想气体, 则根据气体状态方程:

$$pv = R_0 T_0 \quad (1-16)$$

式中:  $p$  —— 气罐中气体的绝对压力;

$v$  —— 气体比容;

$R_0$  —— 气体常数;

$T_0$  —— 气罐中气体的绝对温度。

由上式可得：

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{p}{R_0 T_0}$$

或以增量形式表示，并取导数可得：

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{R_0 T_0} \frac{dp}{dt} \quad (1-17)$$

当气罐内压力变化时， $Q_2$  也随之而变化，假设二者的变化量之间的关系为：

$$\Delta Q_2 = \frac{\Delta p}{R_2} \quad \text{或} \quad R_2 = \frac{\Delta p}{\Delta Q_2} \quad (1-18)$$

这里  $R_2$  为阀门 2 的阻力，称为气阻。

将式(1-15)用增量表示，并将式(1-17)和式(1-18)代入式(1-15)，可得：

$$\frac{V}{R_0 T_0} R_2 \frac{d\Delta p}{dt} + \Delta p = R_2 \Delta Q_1 \quad (1-19)$$

写成一般形式：

$$T \frac{d\Delta p}{dt} + \Delta p = K \Delta Q_1 \quad (1-20)$$

再写成拉氏变换式：

$$W_0(s) = \frac{P(s)}{Q_1(s)} = \frac{K}{Ts + 1} \quad (1-21)$$

式中： $T$ ——对象的时间常数， $T = \frac{V}{R_0 T_0} R_2$ ；

$\frac{V}{R_0 T_0}$ ——对象的容量系数，又称气容；

$K$ ——对象的放大系数， $K = R_2$ 。

以上讨论了液位对象、温度对象和压力对象。它们的工艺生产设备是完全不同的，其物理过程也不一样。但是，它们的微分方程式或传递函数式(1-7)、(1-14)、(1-21)均为一阶惯性环节，都有阻力和容量。它们都有相似的阶跃响应曲线，如图 1-8 所示(以液位对象为例的阶跃响应曲线)。

由图 1-5 所示，进水流量  $Q_1$  有一阶跃变化  $\Delta Q_1$ ，对式(1-6)求解可得：

$$\Delta h = \Delta Q_1 (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (1-22)$$

#### 例 1-6 具有纯滞后单容对象的数学模型

如图 1-9(a)所示，流量  $Q_1$  通过较长的通道进入水槽。当阀门开度变化引起流量  $Q_1$  变化时，需要经过一段传输时间  $\tau_0$  才使  $Q_1$  产生变化，从而使水槽液位  $h$  发生变化。图 1-9(b)所示曲线 1 为单容对象的阶跃响应曲线，而曲线 2 为具有纯滞后的单容对象的阶跃响应曲线，它与曲线 1 的形状完全相同，只相差一个纯滞后时间  $\tau_0$ 。

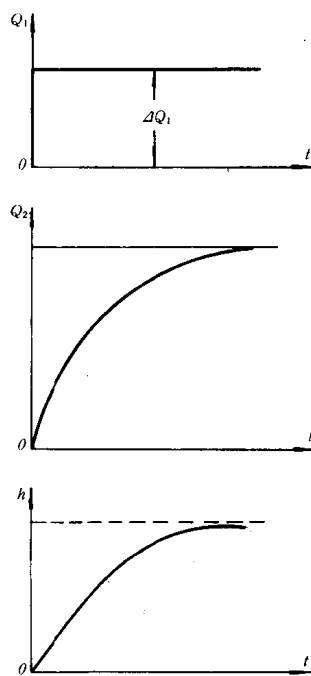


图 1-8 液位对象的阶跃响应曲线

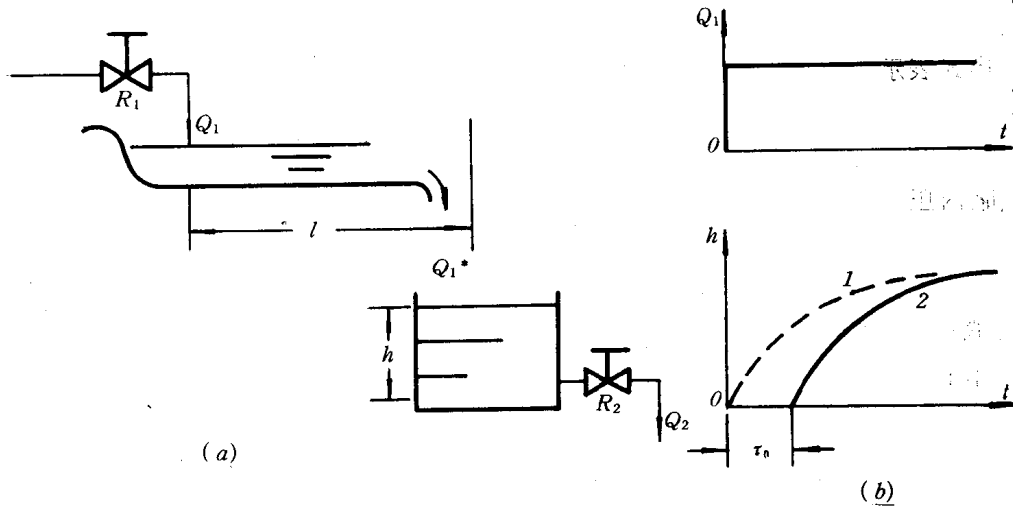


图 1-9 有纯滞后单容对象

具有纯滞后单容对象的微分方程和传递函数为：

$$\left. \begin{aligned} T \frac{d\Delta h}{dt} + \Delta h &= K\Delta Q_1(t - \tau_0) \\ W_0(s) &= \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau_0 s} \end{aligned} \right\} \quad (1-23)$$

对象的纯滞后，是由于信号的传输和测量所致。

(2) 无自平衡能力单容对象的数学模型

所谓无自平衡能力，是指对象在扰动作用下，平衡状态被破坏后，无操作人员或仪表等干预，依靠对象自身不能恢复其平衡的能力。

**例 1-7** 图 1-10 所示为无自平衡能力对象。与图 1-5(a) 所不同的是图 1-10(a) 液位贮罐流出侧采用一只定量泵将液体输出去。这样，其流出量  $Q_2$  与液位  $h$  无关。如果当流入量  $Q_1$  发生阶跃变化时，液位  $h$  即发生变化，由于流出量是不变的，所以贮罐液位或者等速下降直至液体被抽干，或者等速上升直至液体溢出。其阶跃响应曲线如图 1-10(b) 所示。

图 1-10(a) 所示对象的微分方程为：

$$A \frac{d\Delta h}{dt} = \Delta Q_1 \quad (1-24)$$

式中： $A$ ——贮罐截面积。

将式(1-24)改写为：

$$\frac{d\Delta h}{dt} = \frac{1}{A} \Delta Q_1 = \frac{1}{T_a} \Delta Q_1 \quad (1-25)$$

其传递函数为：

$$W_0(s) = \frac{1}{T_a s} \quad (1-26)$$

式中： $T_a$ ——对象积分时间常数。

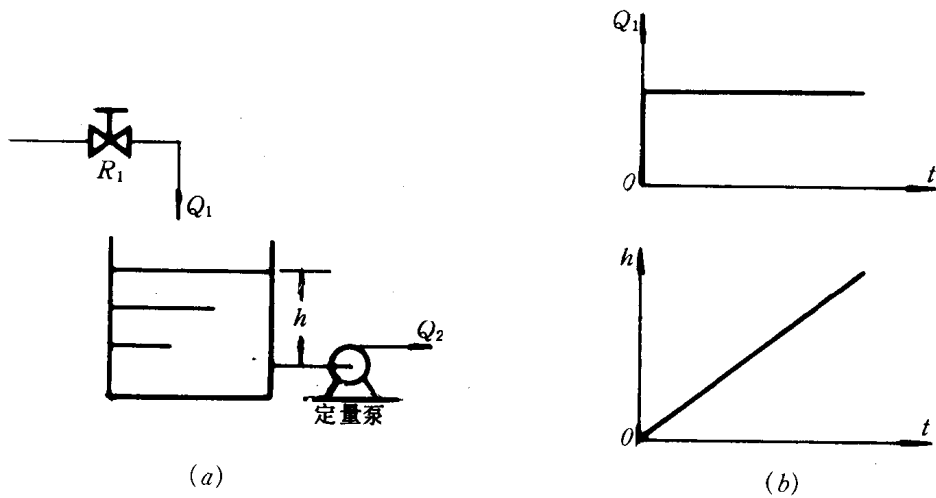


图 1-10 液位对象

当对象具有纯滞后时, 则其传递函数为:

$$W_0(s) = \frac{1}{T_1 s} e^{-\tau_0 s} \quad (1-27)$$

## 2. 双容对象的数学模型

单容对象是指只具有一个储蓄容积的对象。实际生产过程中的对象由多个容积和阻力构成, 这种对象称为多容对象。凡由两个容积和阻力构成的对象称为双容对象。

现在, 以具有自平衡能力的双容对象为例, 介绍其建立数学模型的方法。

**例 1-8** 图 1-11 所示为两只水箱串联工作的双容对象。其被控量是第二只水箱的液位  $h_2$ , 输入量为  $Q_1$ 。

与上述分析方法相同, 根据物料平衡关系可以列出下列方程:

$$\left. \begin{aligned} \Delta Q_1 - \Delta Q_2 &= C_1 \frac{d\Delta h_1}{dt} \\ \Delta Q_2 &= \frac{\Delta h_1}{R_2} \\ \Delta Q_2 - \Delta Q_3 &= C_2 \frac{d\Delta h_2}{dt} \\ \Delta Q_3 &= \frac{\Delta h_2}{R_3} \end{aligned} \right\} \quad (1-28)$$

消去中间变量  $\Delta h_1$ ,  $\Delta Q_2$ ,  $\Delta Q_3$  后可得输入量  $\Delta Q_1$  与输出量  $\Delta h_2$  之间的关系式:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 \Delta h_2}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d\Delta h_2}{dt} + \Delta h_2 = K \Delta Q_1 \quad (1-29)$$

将上式改写成传递函数:

$$W_0(s) = \frac{K}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1} \quad (1-30)$$

或



$$W_0(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} \quad (1-31)$$

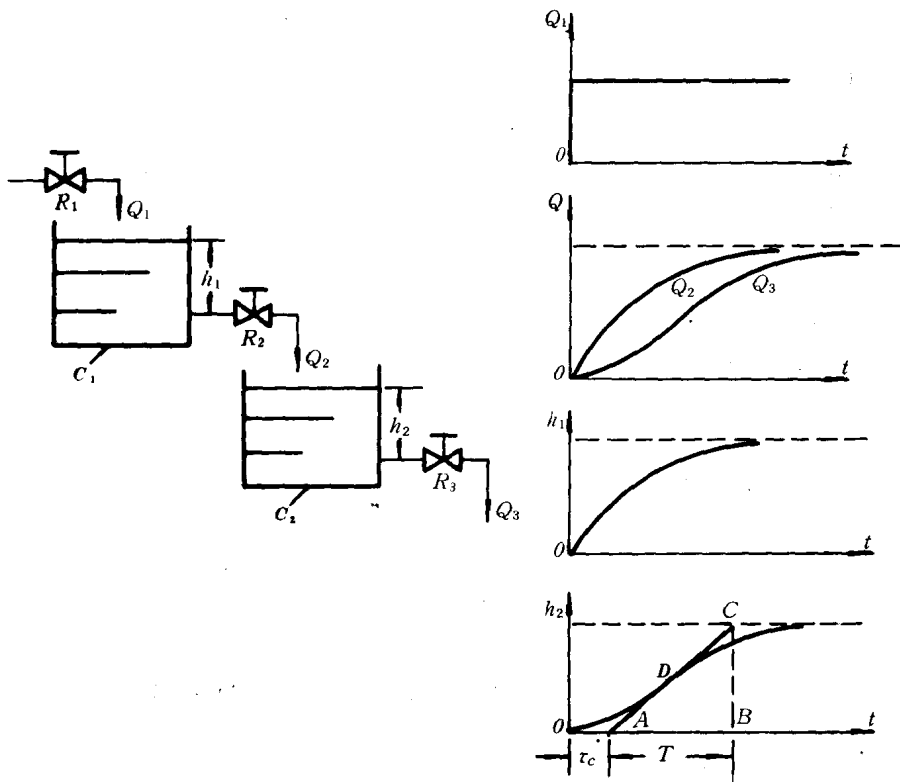


图 1-11 双容对象及其响应曲线

式中： $T_1 = C_1R_2$ ，第一只水箱的时间常数；  
 $T_2 = C_2R_3$ ，第二只水箱的时间常数；  
 $K = R_3$ ，对象的放大系数；  
 $C_1、C_2$ ——分别为两只水箱的容量系数。

**例 1-9** 图 1-12 所示为两只水箱串联工作的对象，其被控量为第二只水箱的液位  $h_2$ ，输入量为  $Q_1$ 。由于两只水箱的液位之间相互有影响，所以对象的数学模型与例 1-8 相比也有所不同。

对于本例对象，若和上述分析方法一样，则可以得到下列方程式：

$$\left. \begin{aligned} \Delta Q_1 - \Delta Q_2 &= C_1 \frac{d\Delta h_1}{dt} \\ \Delta Q_2 &= \frac{\Delta h_1 - \Delta h_2}{R_2} \\ \Delta Q_2 - \Delta Q_3 &= C_2 \frac{d\Delta h_2}{dt} \\ \Delta Q_3 &= \frac{\Delta h_2}{R_3} \end{aligned} \right\} \quad (1-32)$$