

# 第一章 绪论

## 第一节 过程控制发展概况

过程控制通常是指石油、化工、电力、冶金、轻工、纺织、建材、原子能等工业部门生产过程的自动化。

自从进入 20 世纪 90 年代以来，自动化技术发展很快，并获得了惊人的成就，已成为国家高科技的重要分支。过程控制技术是自动化技术的重要组成部分。在现代工业生产过程自动化中，过程控制技术正在为实现各种最优技术经济指标、提高经济效益和社会效益、提高劳动生产率、节约能源、改善劳动条件、保护环境卫生、提高市场竞争能力等方面起着越来越巨大的作用。

在 20 世纪 40 年代前后，工业生产非常落后，大多数工业生产过程均处于手工操作状态，人们主要是凭经验、用手工方式去控制生产过程。例如生产过程中的关键参数靠人工观察，生产过程中的操作也靠人工去执行，当时的劳动生产率是很低的。

40 年代以后，工业生产过程自动化技术发展很快。尤其是近些年来，过程控制技术发展更为迅猛。纵观过程控制的发展历史，大致经历了如下几个阶段：

50 年代前后，一些工厂企业的生产过程实现了仪表化和局部自动化。这是过程控制发展的第一个阶段。这个阶段的主要特点是：过程检测控制仪表普遍采用基地式仪表和部分单元组合式仪表（多数是气动仪表）；过程控制系统结构大多数是单输入、单输出系统；被控参数主要是温度、压力、流量和液位四种参数；控制的目的是保持这些过程参数的稳定，消除或减小主要扰动对生产过程的影响；过程控制理论是以频率法和根轨迹法为主体的经典控制理论，主要解决单输入、单输出的定值控制系统的分析和综合问题。

自 60 年代来，随着工业生产的不断发展，对过程控制提出了新的要求；随着电子技术的迅速发展，也为自动化技术工具的完善创造了条件，从此开始了过程控制的第二个阶段。在仪表方面，开始大量采用气动和电动单元组合仪表。为了满足定型、灵活、多功能的要求，又开发了组装仪表，它将各个单元划分为更小的功能块，以适应比较复杂的模拟和逻辑规律相结合的控制系统的需要。与此同时，计算机控制系统开始应用于过程控制领域，实现了直接数字控制（DDC）与设定值控制（SPC）。在过程控制系统方面，为了提高控制质量和实现一些特殊的工艺要求，相继开发和应用了各种复杂的过程控制系统，诸如串级控制、比值控制和均匀控制。尤其是前馈控制和选择性控制的开发和工业应用，使复杂控制系统达到了一个新的水平。前馈控制是按扰动量来控制的，在扰动可测的条件下，可以显著地提高控制质量。选择性控制是当生产过程遇到不正常工况、被控量达到安全极限时，能自动实现保护性控制，而不必被迫联锁停车，从而扩大了自动化的范畴。在过程控制理论方面，除了仍然采用经典控制理论解决实际工业生产过程中遇到的问题外，现代控制理论得到应用，为实现高水平的过程控制奠定了理论基础，从而过程控制由单变量系统转向多变量系统。但是，由于过程机理复杂，过程建模困难等等原因，现代控制理论一时还难以应用于实际工业生产过程。在此

期间，工厂企业实现了车间或大型装置的集中控制。

70年代以来，过程控制得到了很大发展。随着现代工业生产的迅猛发展，随着大规模集成电路制造成功与微处理器的相继问世，使功能丰富的计算机的可靠性大大提高，而性能价格比又大大提高，尤其是工业控制机采用了冗余技术和软硬件的自诊断措施，使其满足了工业控制的应用要求。随着微型计算机（以下简称微机）的开发、应用和普及，使生产过程自动化的发展达到了一个新的水平。过程控制发展到现代过程控制的新阶段——计算机时代。这是过程控制发展的第三个阶段。这一阶段的主要特点是：对全工厂或整个工艺流程的集中控制、应用计算机系统进行多参数综合控制，或者由多台计算机对生产过程进行控制和经营管理。在自动化技术工具方面有了新的发展，诸如以微处理器为核心的智能单元组合仪表（包括可编程调节器和 DDZ-S 系列智能仪表）的开发和广泛应用；在线成分检测与数据处理的测量变送器的应用；在 DDZ-Ⅲ 型仪表方面，不仅产品品种增加，而且可靠性有了很大提高，适应了各种复杂控制系统的要求。

由于生产过程是一个分散系统，因此，过程控制的方式最好是分散进行（使故障分散、危险分散），而监视、操作与现代化管理，则应以集中为好。随着现代工业的迅速发展，生产规模不断扩大，控制要求越来越高，过程参数日益增多，控制回路更加复杂。为了满足工业生产过程自动化新的更高的要求，70年代中期，集散控制系统，也称为分布式控制系统开发问世了。它一出现就受到了工业控制界的青睐。

集散控制系统（DCS）是把自动化技术、计算机技术、通信技术、故障诊断技术、冗余技术和图形显示技术融为一体的装置。这种系统在结构上是分散的，就是将计算机分装到工段或装置，这不仅使系统危险分散，消除了全局性的故障点，提高了系统的可靠性，同时能方便灵活地实现各种新型的控制规律与算法。这种系统由于是分级的，因此便于实现现代化的最佳管理，并使工业生产过程自动化开始进入控制管理一体化的新模式。

80年代以后，工业过程控制得到了一个飞跃的发展。一方面现代控制理论（与主要解决单回路系统控制的经典控制理论相比较）从本质上解决了一般多变量系统的控制问题，包括线性系统、时变系统、非线性系统、微分-差分系统等，从而大大促进了过程控制的发展。另一方面，过程控制的结构已从包括许多手动控制的分散局部控制站改变为具有高度自动化的集中、远动控制中心。使得过程控制的概念有了很大的发展，它不仅包括数据采集与管理、基本过程控制，而且包括先进的管理系统、调度和优化等。柔性化、分散化和集成化的综合自动化系统，已被应用于实际工业过程。专家系统、神经网络、模糊控制、过程监督和在线诊断等理论已经大大地促进了过程控制的发展。

目前，世界各工业发达国家，正集中全力进行工厂综合自动化技术的研究。所谓综合自动化，就是在自动化技术、信息技术、计算机控制和各种生产加工技术的基础上，从生产过程的全局出发，通过生产活动所需的各种信息的集成，把控制、优化、调度、管理、经营、决策融为一体，形成一个能适应各种生产环境和市场需求、多变性的、总体最优的高质量、高效益、高柔性的管理生产系统。

在我国以最大的社会效益和经济效益为目标，研究和开发综合自动化技术是国民经济快速发展的需要，是参加国际市场剧烈竞争的需要。在世纪交替之际，新技术的研究和开发将大大推动工业过程自动化的发展，并带来巨大的社会效益和经济效益。

## 第二节 过程控制的特点

过程控制的特点是与其它自动控制系统相比较而言的，大致可归纳如下：

### 一、连续生产过程的自动控制

过程控制一般是指连续生产过程的自动控制，其被控量需定量地控制，而且应是连续可调的。若控制动作在时间上是离散的（如采样控制系统等），但是其被控量需定量控制，也归入过程控制。

### 二、过程控制系统由过程检测、控制仪表组成

过程控制是通过各种检测仪表、控制仪表（包括电动仪表和气动仪表，模拟仪表和智能仪表）和电子计算机（看作一台仪表）等自动化技术工具，对整个生产过程进行自动检测、自动监督和自动控制。一个过程控制系统是由被控过程和过程检测控制仪表两部分组成的过程检测控制仪表包括检测元件、变送器、调节器（包括计算机）、调节阀等。过程控制系统的设计是根据工业过程的特性和工艺要求，通过选用过程检测控制仪表构成系统，再通过 PID 参数的整定，实现对生产过程的最佳控制。

### 三、被控过程是多种多样的、非电量的

在现代工业生产过程中，工业过程很复杂。由于生产规模大小不同，工艺要求各异，产品品种多样，因此过程控制中的被控过程是多种多样的。诸如石油化工过程中的精馏塔、化学反应器、流体传输设备；热工过程中的锅炉、热交换器；冶金过程中的转炉、平炉；机械工业中的热处理炉等。它们的动态特性多数具有大惯性、大滞后、非线性特性。有些机理复杂（如发酵、生化过程等）的过程至今尚未被人们所认识，所以很难用目前过程辨识方法建立其精确的数学模型，因此设计能适应各种过程的控制系统并非易事。

### 四、过程控制的控制过程多属慢过程，而且多半为参量控制

由于被控过程具有大惯性、大滞后（大时延）等特性，因此决定了过程控制的控制过程多属慢过程。另外，在石油、化工、电力、冶金、轻工、建材、制药等工业生产过程中，往往采用一些物理量和化学量（如温度、压力、流量、液位、成分、pH 等）来表征其生产过程是否正常，因此需要对上述过程参数进行自动检测和自动控制，故过程控制多半为参量控制。

### 五、过程控制方案十分丰富

随着现代工业生产的迅速发展，工艺条件越来越复杂，对过程控制的要求越来越高。过程控制系统的设计是以被控过程的特性为依据的。由于工业过程的复杂、多变，因此其特性多半属多变量、分布参数、大惯性、大滞后和非线性等等。为了满足上述特点与工艺要求，过程控制中的控制方案是十分丰富的。通常有单变量控制系统，也有多变量控制系统；有仪表过程控制系统，也有计算机集散控制系统；有复杂控制系统，也有满足特定要求的控制系统。本书将要介绍单回路控制、串级控制、前馈-反馈控制、比值控制、分程控制、选择性控制、多变量解耦控制，还要介绍高级新型过程控制系统（如专家系统、模糊控制、...，以及正将成为过程控制主流的集散控制系统（DCS））。

### 六、定值控制是过程控制的一种常用形式

在石油、化工、电力、冶金、轻工、环保和原子能等现代工业生产过程中，过程控制的主要目的在于消除或减小外界干扰对被控量的影响，使被控量能稳定控制在给定值上，使工

业生产能实现优质、高产和低消耗的目标。定值控制仍是目前过程控制的一种常用形式

### 第三节 过程控制系统的组成及其分类

#### 一、过程控制系统的组成

过程控制系统通常是指工业生产过程中自动控制系统的被控量是温度、压力、流量、液位、成分、粘度、湿度和 pH（酸碱度或氢离子浓度）等这样一些过程变量的系统。

下面以几个典型的工业控制系统为例，来介绍过程控制系统的组成。

#### （一）发电厂锅炉过热蒸汽温度控制系统

锅炉是电力、冶金、石油化工等工业部门不可缺少的动力设备，其产品是蒸汽。发电厂从锅炉汽鼓（汽包）中出来的饱和蒸汽经过过热器继续加热成为过热蒸汽。过热蒸汽的温度是火力发电厂（含其它厂矿企业的余热发电）生产工艺的重要参数。过热蒸汽温度控制是保证汽轮机组（发电设备）正常运行的一个重要条件。通常过热蒸汽的温度应达到 460℃ 左右再去推动汽轮机做功。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。如果过热蒸汽的温度过高，会使汽轮机的寿命大大缩短；如果温度过低，当过热蒸汽带动汽轮机做功时，会使部分过热蒸汽变成小水滴，小水滴冲击汽轮机叶片，会造成生产事故。所以必须对过热蒸汽的温度进行控制。通常在图 1-1a 所示的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的大小来控制过热

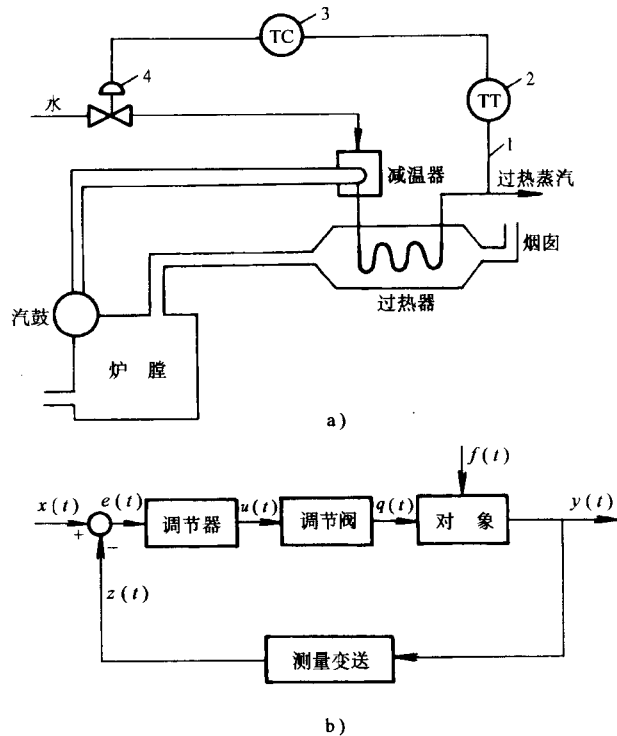


图 1-1 过热蒸汽温度控制系统

a) 控制流程图 b) 框图

1—热电阻 2—温度变送器 3—温度调节器 4—调节阀

蒸汽的温度，所以设计图 1-1a 所示的温度控制系统。本系统采用 DDZ-Ⅲ 型电动单元组合仪表。系统中过热蒸汽温度采用热电阻温度计 1 来测量，并经温度变送器 2 (TT) 将测量信号送至调节器 (TC) 3 的输入端，与过热蒸汽温度的给定值进行比较得到其偏差，调节器按此输入偏差以某种控制规律进行运算后输出控制信号，以控制调节阀 4 的开度，从而改变减温水流量的大小，达到控制过热蒸汽温度的目的。图 1-1b 为该系统的框图。

#### （二）转炉供氧量控制系统

转炉是炼钢工业生产过程中的一种重要设备。熔融的铁水装入转炉后，可以通过氧枪供给转炉一定的氧气量，在氧气的作用下，铁水中的碳逐渐氧化燃烧，从而使铁水中的含碳量不断地降低，控制吹氧量和吹氧时间就可以控制冶炼钢水的含碳量，于是就可以获得不同品

种的钢。为了冶炼各种不同品种的钢材，设计了图 1-2a 所示的转炉供氧量控制系统。本系统采用 DDZ-Ⅲ 型仪表。采用节流装置 1 来测量氧气流量，并送至流量变送器（FT）2，再经开方器 3 后作为流量调节器（FC）4 的测量值，其测量值与供氧量的给定值进行比较得到偏差，调节器按此偏差输入信号以 PID 某种控制规律进行运算并输出控制信号去控制调节阀 5 的开度，从而改变供氧量的大小，以满足生产工艺要求。图 1-2b 为供氧量控制系统框图。

为了便于应用控制理论分析过程控制系统，根据系统的工作过程，由控制流程图 1-1a 和图 1-2a 可以分别画出其框图 1-1b 和图 1-2b。现以图 1-1b 为例介绍图中的各方框、连线等的含义。

在图 1-1b 中每个框表示组成该系统的一个（设备或装置）环节，两个框之间的一条带有箭头的连线表示其相互关系和信号传递方向，但是不表示方框之间的物料联系。在

该图中的温度测量元件、变送器、调节器和调节阀等各环节是单向作用的，即环节的输入信号会影响输出信号，但是输出信号不会反过来去影响输入信号。应该指出，在过程控制中，调节阀控制的介质流量可以是输入过程的，也可以是从过程流出来的。如果被控的物料是流入过程的，则正好与框图中的箭头方向一致。如果被控物料是从过程流出来的，则图中信号的传递方向与物料的流动方向就不一致了。

在图 1-1b 中的“过程”（又称对象）方框指某些被控制的装置或设备，在本例中表示测量温度的热电阻温度计到调节阀之间的管道设备，即包括过热器、减温器及到调节阀前的一段管道。 $y(t)$  表示过热蒸汽的温度，是过热蒸汽温度控制系统的被控参数，是“过程”的输出信号。在本例中进入过热器的烟道气温度的高低以及环境温度的变化（如刮风、降温）情况都是会引起被控参数波动的外来因素，称其为扰动作用，可用  $f(t)$  表示。它是“过程”的输入信号。减温水流量的改变是由于调节阀动作（开度改变）所致，它也是影响过热蒸汽温度变化的因素，作为调节阀方框的输出信号，也是“过程”的输入信号，可用  $q(t)$  表示，称其为操作变量，也叫控制参数，最终实现控制作用。调节器的输出  $u(t)$  称为控制作用，它是调节阀的输入信号。测量变送器的作用是把被控变量  $y(t)$  成比例地转换为测量信号  $z(t)$ ，它是调节器的输入信号。

应当指出，调节器是根据  $y(t)$  测量值的变化与给定值  $x(t)$  进行比较得出的偏差值对被控过程进行控制的。过程的输出信号，即温度控制系统的输出通过温度测量元件与变送器的作用，将输出信号反馈到输入端，构成一个闭环控制回路，称为闭环控制系统。

在生产过程中，由于扰动不断产生，控制作用也在不断地进行。若因扰动（如冬天刮风降温）使过热蒸汽的温度下降时，测量元件（热电阻温度计）将温度的变化值测量出来，经变送器送至调节器的输入端，并与其给定值进行比较得到偏差，调节器按此偏差并以某种控

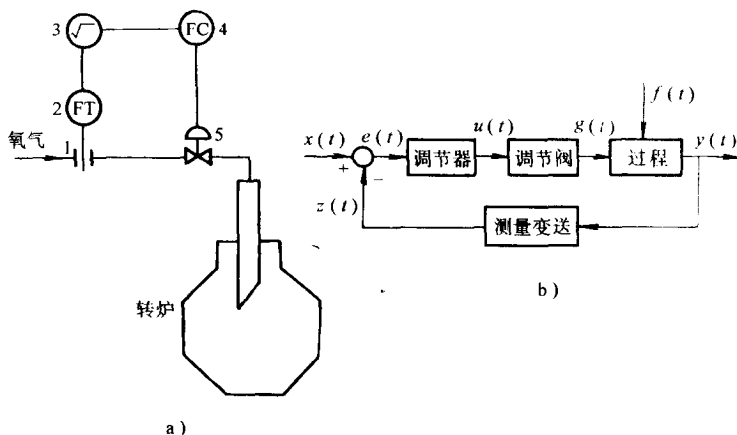


图 1-2 转炉供氧量控制系统

制规律发出控制信号，去关小调节阀的开度，使减温水减小，从而使过热蒸汽的温度逐渐升高，并趋向于给定值。反之亦然。

从以上两个工业过程控制的实例可见，控制系统均由测量元件、变送器、调节器、调节阀和被控过程等环节构成。如果把测量元件、变送器、调节器和调节阀称为过程检测控制仪表，则一个简单的过程控制系统是由被控过程和过程检测控制仪表两部分组成的。

以上介绍的是由模拟仪表构成的过程控制系统。如果由计算机代替模拟调节器，就构成了计算机过程控制系统，见图 1-3。

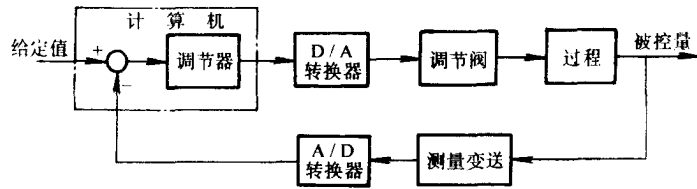


图 1-3 计算机过程控制系统框图

控制系统中引入微型计算机，则可以充分利用其具有的计算速度快、运算精度高、存储信息容量

大、逻辑判断功能强、灵活通用等特点，同时运用微处理器提供的各种指令，设计生产工艺要求的控制程序、管理程序与微处理执行程序，就能实现对生产过程的控制和管理（如打印、显示等）。在仪表过程控制系统中控制规律是由硬件来实现的，而在微机过程控制系统中改变控制规律，只要改变程序就可实现了，非常灵活方便。

在计算机过程控制系统中，计算机的输入与输出信号均是数字信号，所以系统中没有将模拟信号转换为数字信号的 A/D 转换器，以及将数字信号转换为模拟信号的 D/A 转换器。

在图 1-3 中，如果把计算机看作一台仪表，则该系统仍由过程检测控制仪表和被控过程两部分组成。

### （三）集散控制系统 DCS

为了适应现代生产控制与管理的需要，采用了多层次分级结构形式的集散控制系统。其基本组成框图如图 1-4 所示。

由图可见，集散控制系统由过程输入-输出接口、过程控制单元、数据高速通路、CRT 操作站、管理计算机等五部分组成。下面就其各部分的简单作用原理作一介绍。

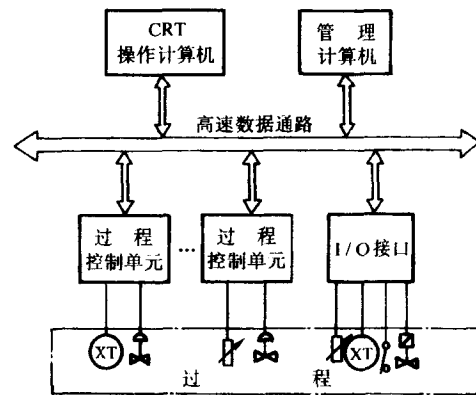


图 1-4 集散控制系统基本组成框图

（1）过程输入-输出接口 它是带有微处理器的智能装置，主要用于采集过程信息（模拟量和数字量），故又称其为数据采集站。它能完成数据采集与预处理，对实时数据作进一步的加工，提供 CRT 操作站的显示与打印。同时，在有管理计算机的情况下，它可以用模拟量与开关量的方式向过程终端输出计算机的控制指令。

（2）过程控制单元（基本控制器，控制站）它相当于若干台常规调节器，能完成常规调节器的全部运算与控制功能，通过软件组态能灵活地构成满足各种不同控制要求的复杂控制系统。它接受现场的各种信号，并进行转换，再通过内部微处理器进行各种运算处理，输出转换为 DC 4~20mA 或接点信号，去操作各类执行器，实现自动控制。

过程控制单元是集散控制系统的核心。不同的 DCS 其差别较大。控制回路有 2~64 个，固

有算法有 2~212 种。诸如 PID 控制、非线性增益、选择性控制和 Smith 预估等。

(3) 数据高速通路 它又称数据通信总线。它是一条同轴电缆或光导纤维，高速率传送基本控制单元、过程输入-输出接口单元与显示操作站之间的数据。为了提高信息传输的可靠性，通常 DCS 除有主通信总线外，还配置有冗余通信总线。

(4) CRT 操作站 它是集散控制系统的人-机接口装置，主要用于操纵工艺生产过程，并监视工厂的运行状态及回路组态，调整回路参数（如 PID 值、极限报警值与设定值等）显示动态流程画面以及进行部分生产管理。通常它由 CRT 监视器、数据通信总线接口、操作键盘、打印机、磁带机与软盘驱动装置等组成。

(5) 管理计算机（上位机）它通过数据通信总线和系统中各智能单元，采集各种数据信息，并综合下达诸如设定值（SPC）等各种高级命令。它可以进行集中管理与最优控制，实现信息-控制-管理一体化。通常管理计算机还有可能供用户进一步开发高级语言软件，可完成有关工艺参数间复杂的运算和数据分析工作等。

## 二、过程控制系统的分类

过程控制系统的分类方法很多，若按被控参数的名称来分，有温度、压力、流量、液位、成分、pH 等控制系统；按控制系统完成的功能来分，有比值、均匀、分程和选择性控制系统；按调节器的控制规律来分，有比例、比例积分、比例微分、比例积分微分控制系统；按被控量的多少来分，有单变量和多变量控制系统；按采用常规仪表和计算机来分，有仪表过程控制系统和计算机过程控制系统等。但是最基本的分类方法有：

### （一）按过程控制系统的结构特点来分类

#### 1. 反馈控制系统

它是过程控制系统中的一种最基本的控制结构形式。反馈控制系统是根据系统被控量的偏差进行工作的，偏差值是控制的依据，最后达到消除或减小偏差的目的。图 1-1 所示的过热蒸汽温度控制系统就是一个反馈控制系统。另外，反馈信号也可能有多个，从而可以构成多个闭合回路，称其为多回路控制系统。

#### 2. 前馈控制系统

它在原理上完全不同于反馈控制系统。前馈控制是以不变性原理为理论基础的。前馈控制系统直接根据扰动量的大小进行工作，扰动是控制的依据。由于它没有被控量的反馈，所以也称为开环控制系统。

图 1-5 所示为前馈控制框图。扰动  $f(t)$  是引起被控量  $y(t)$  变化的原因，前馈调节器 FFC 是根据扰动  $f(t)$  进行工作的，可能及时克服扰动对被控量  $y(t)$  的影响。但是，由于前馈控制是一种开环控制，最终不能检查控制的精度，因此，在实际工业生产过程自动化中是不能单独应用的。

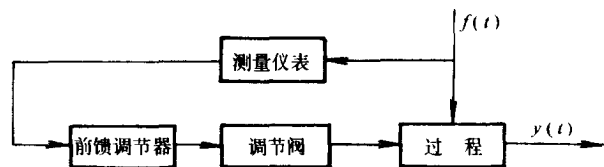


图 1-5 前馈控制系统框图

最终不能检查控制的精度，因此，在实际工业生产过程自动化中是不能单独应用的。

#### 3. 前馈-反馈控制系统（复合控制系统）

在工业生产过程中，引起被控参数变化的扰动是多种多样的。开环前馈控制的最主要的优点是能针对主要扰动及时迅速地克服其对被控参数的影响；对于其余次要扰动，则利用反馈控制予以克服，使控制系统在稳态时能准确地使被控量控制在给定值上。在实际生产过程中，将两者结合起来使用，充分利用开环前馈与反馈控制两者的优点，在反馈控制系统中引

入前馈控制，从而构成图 1-6 所示的前馈-反馈控制系统，它可以大大提高控制质量。

(二) 按给定信号的特点来分类

### 1. 定值控制系统

所谓定值控制系统，就是系统被控量的给定值保持在规定值不变，或在很小范围附近不变。定值控制系统是过程控制中应用最多的一种控制系统，这是因为在工业生产过程中大多

要求系统被控量的给定值保持在某一定值，或在某很小范围内不变。例如过热蒸汽温度控制系统、转炉供氧量控制系统均为一个定值控制系统。对于定值控制系统来说，由于  $\Delta x = 0$ ，引起被控量给定值变化的是扰动信号，所以定值系统的输入信号是扰动信号。

### 2. 程序控制系统

它是被控量的给定值按预定的时间程序变化工作的。控制的目的是使系统被控量按工艺要求规定的程序自动变化。例如同期作业的加热设备（机械、冶金工业中的热处理炉），一般工艺要求加热升温、保温和逐次降温等程序，给定值就按此程序自动地变化，控制系统按此给定程序自动工作，达到程序控制的目的。

### 3. 随动控制系统

它是一种被控量的给定值随时间任意变化的控制系统。其主要作用是克服一切扰动，使被控量快速跟随给定值而变化。例如在加热炉燃烧过程的自动控制中，生产工艺要求空气量跟随燃料量的变化而成比例地变化，而燃料量是随生产负荷而变化的，其变化规律是任意的。随动控制系统就要使空气量跟随燃料量的变化自动控制空气量的大小，达到加热炉的最佳燃烧。

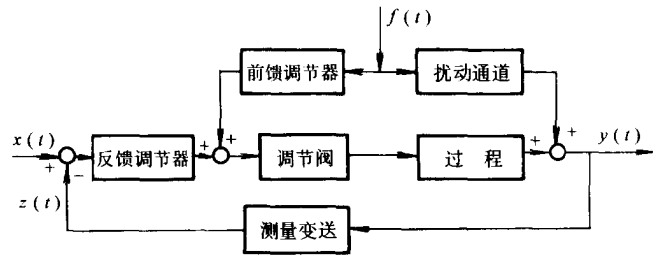


图 1-6 前馈-反馈控制系统

## 第四节 “过程控制工程”课程的性质和任务

工业自动化的范围很广，包含的专业内容非常丰富，是国家高科技的重要组成部分。“过程控制工程”是一门工业自动化专业的专业必修课。自动化仪表（包括模拟仪表、智能仪表）、微型计算机是构成过程控制的重要自动化技术工具，是实现工业生产过程自动化的重要装置，也是实现过程控制的前提。

现代工业生产过程往往是流程复杂、规模庞大，同时往往又具有高温、高压、易燃、易爆、有毒等特点。为了保证生产安全、稳定、可靠地进行，对过程参数的检测和自动控制提出了更严、更高的要求。

实现工业生产过程自动化，不仅能够把生产过程控制在最佳的工况下运行，减少原材料和动力的消耗，降低成本，实现优质、高产、低消耗的目标，而且能够保证安全生产，防止事故发生，延长设备使用寿命，提高设备利用率，减轻劳动强度，改善劳动条件，保护环境卫生，维护生态平衡等等。

过程控制是控制理论、生产工艺、计算机技术和仪器仪表知识等相结合的一门综合性应用学科。过程控制的任务是在了解、熟悉、掌握生产工艺流程与生产过程的静态和动态特性

的基础上，根据工艺要求，应用控制理论、现代控制技术，分析、设计、整定过程控制系统。同时，必须注意工程应用中的有关问题。过程控制的任務是由过程控制系统的工程设计与工程实现来完成的。

“过程控制工程”课程是以过程控制系统为主体，以过程检测控制仪表为工具，仪表与系统密切联系，相互依存。

“过程控制工程”课程是在学生学完电子技术基础、微型计算机原理与自动控制理论等课程之后开设的。课程着重研究根据连续工业过程的生产特点与要求，应用自动控制理论、控制技术和自动化仪表来设计过程控制系统，以及在实际工程应用中的有关问题。通过学习，不仅能达到解决过程控制工程中的一般问题，并具有分析和设计较复杂的过程控制系统的能力。

### 思考题与习题

- 1-1 试简述过程控制的发展概况及各个阶段的主要特点。
- 1-2 与其它自动控制相比，过程控制有哪些主要特点？为什么说过程控制的控制过程多属慢过程？
- 1-3 什么是过程控制系统？其基本分类方法有哪几种？
- 1-4 何谓集散控制系统（DCS）？试述其基本组成与各部分的作用原理。
- 1-5 试说明图 1-2b 供氧量控制系统框图中被控“过程”包含哪些管道设备以及图中各符号的含义。
- 1-6 在过程控制中，为什么要由系统控制流程图画出其框图。

## 第二章 过程建模和过程检测控制仪表

### 第一节 过程建模

过程控制系统的品质是由组成系统的各个环节的结构及其特性所决定的。过程的数学模型是设计过程控制系统，确定控制方案、分析质量指标、整定调节器参数等等的重要依据。前馈控制、最优控制、多变量解耦控制等更需要有精确的过程数学模型，所以过程数学模型是过程控制系统设计分析和应用的重要资料。研究过程建模对于实现生产过程自动化具有十分重要的意义。

#### 一、基本概念

被控过程是指正在运行中的多种多样的被控制的生产工艺设备。例如各种加热炉、锅炉、热处理炉、贮罐、精馏塔、化学反应器等等。

被控过程的数学模型（动态特性），是指过程在各输入量（包括控制量与扰动量）作用下，其相应输出量（被控量）变化函数关系的数学表达式。

过程的数学模型有两种，一是非参数模型，例如阶跃响应曲线、脉冲响应曲线和频率特性曲线，是用曲线表示的。二是参数模型，例如微分方程、传递函数、脉冲响应函数、状态方程和差分方程等，是用数学方程式或函数表示的。

过程数学模型分类方法很多，常见的还有动态与静态、连续与离散、定常与时变、集中参数与分布参数等。

被控过程有多输入、单输出和多输入、多输出两种。图 2-1 所示为过程控制系统框图。被控过程  $W_0(s)$  是多个输入量  $(u(t), f_1(t), f_2(t), \dots, f_n(t))$ 、单个输出量  $(y(t))$  的物理系统。各个输入量引起被控量  $y(t)$  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量  $u(t)$  作为控制作用，其余的输入量则称为扰动作用。过程的控制作用于闭合回路内，所以对系统的性能起决定作用。但是扰动作用对过程控制也有很大影响，因此也必须有所了解。

对于多个输入量  $(u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t))$ 、多个输出量  $(y_1(t), y_2(t), \dots, y_r(t))$  的物理系统，调节阀的个数一般与被控量的个数相等。这些过程中，几个输入量将同时影响两个或两个以上的被控量，即一个控制作用除了影响“自己的”被控量外，还将影响其余的被控量。对此可采用解耦控制等方法来消除对其余被控量的影响。

过程的数学模型还有线性与非线性之分。本章仅讨论线性（或线性化）过程的模型，而且是只有一个被控量的过程模型。

过程的数学模型还有线性与非线性之分。本章仅讨论线性（或线性化）过程的模型，而且是只有一个被控量的过程模型。

被控过程输入量与输出量之间的信号联系称为过程通道。控制作用与被控量之间的信号

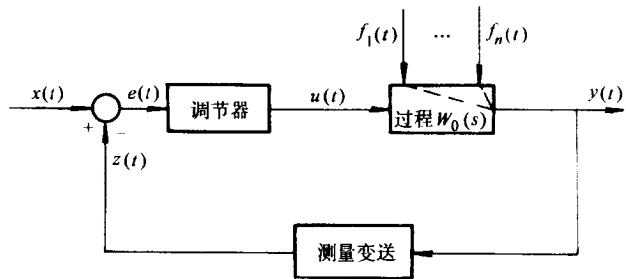


图 2-1 单回路控制系统框图

联系称为控制通道。扰动作用与被控量之间的信号联系称为扰动通道。过程通道不同，其数学模型亦不一样。

从阶跃响应曲线来看，大多数被控过程的特点是：被控量的变化往往是不振荡的、单调的、有滞后（时延）和惯性的。如图 2-2 所示当阶跃扰动发生后，被控量并不能立刻产生响应或不能立刻有显著的变化（这表明过程对扰动的响应有滞后），而后响应速度加快，在达到新的平衡之前，响应速度又逐渐减慢，最后达到新的平衡，如图 2-2a 所示；有的过程响应（被控量）也可能不断变化，如图 2-2b 所示，最后不再平衡下来。前者过程具有自平衡能力，称为自平衡过程；后者过程无自平衡能力，称为无自平衡过程。

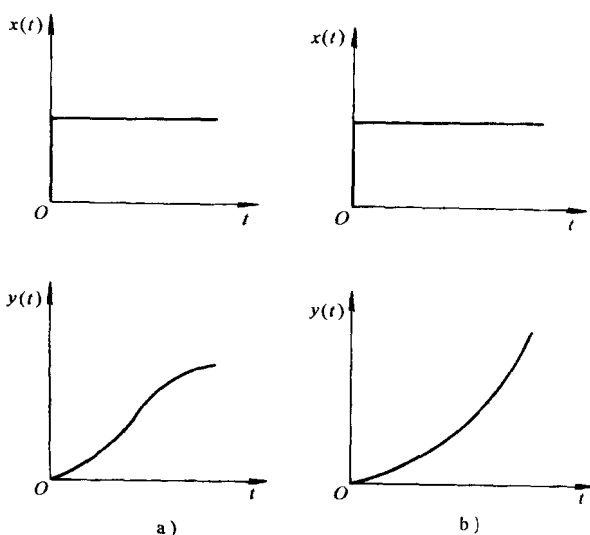


图 2-2 过程的阶跃响应曲线

要对现代规模庞大、复杂的过程进行自动控制、最优设计方面的研究与开发，首先要建立其数学模型。归纳起来研究过程建模的目的主要有：

(1) 设计过程控制系统和整定调节器参数 在过程控制系统的分析、设计和整定时，是以被控过程的数学模型为依据的，它是极其重要的基础资料。例如前馈控制系统就是根据被控过程的数学模型进行设计的，所以建立过程的数学模型是实现前馈控制的前提。

(2) 指导设计生产工艺设备 通过对生产工艺设备数学模型的分析 and 仿真，可以确定有关因素对整个被控过程动态特性的影响（例如锅炉受热面的布置、管径大小、介质参数的选择等对整个锅炉出口汽温、汽压等动态特性的影响），从而提出对生产设备的结构设计的合理要求和建议。

(3) 进行仿真试验研究 在实现生产过程自动化中，往往需要对一些复杂庞大的设备进行某些试验研究，例如某单元机组及其控制系统能承受多大的冲击电负荷，当冲击电负荷过大时会造成什么后果。对于这种破坏性的试验往往不允许在实际设备上进行，而只要根据过程的数学模型，通过计算机进行仿真试验研究，就不需要建立小型的物理模型，从而可以节省时间和经费。

(4) 培训运行操作人员 在现代生产过程自动化中，对于一些复杂的生产操作过程（例如大型电站机组的运行）都应该事先对操作人员进行实际操作培训。随着计算机仿真技术的发展，先建立这些复杂生产过程的数学模型（不需要建小型物理模型），而后通过仿真使之成为活的模型，在这样的模型上，教练员可以安全、方便、多快好省地对运行操作人员进行培训。

对于被控过程数学模型的部分应用与要求如表 2-1 所示。

建立过程数学模型的基本方法，一般来说有机理分析法和试验法两种。

## 二、机理分析法建模

机理分析法建模又可称为数学分析法建模或理论建模。对于一些简单的被控过程建模可采用此法。

表 2-1 被控过程数学模型的应用与要求

应用的目的	过程模型类型	精度要求
调节器参数整定	线性、非线性、时间连续	低
前馈、解耦、预估系统设计	线性、参数（或非参数）、时间连续	中等
控制系统的计算机辅助设计	线性、参数（或非参数）、时间离散	中等
自适应控制	线性、参数、时间离散	中等
最优控制	线性、参数、时间离散或连续	高

机理建模是根据过程的内部机理（运动规律），运用一些已知的定律、原理，如生物学定律、化学动力学原理、物料平衡方程、能量平衡方程、传热传质原理等，建立过程的数学模型。机理分析法建模的最大特点是当生产设备还处于设计阶段就能建立其数学模型。由于该模型参数直接与设备的结构、性能参数有关，因此对新设备的研究和设计具有重要意义。另外，对于不允许进行试验的场合，该方法是唯一可取的。机理分析法建模主要是基于分析过程的结构及其内部的物理化学过程，因此要求建模者应有相应学科的知识。通常此法只能用于简单过程的建模。对于较复杂的实际生产过程来说，机理建模有很大的局限性，这是因为实际过程的机理并非完全了解，同时过程的某些因素如受热面的积垢、催化剂的老化等可能在不断变化，难以精确描述。另外，一般来说机理建模得到的模型还需通过试验验证。

在工业生产过程中，多数被控过程具有自平衡能力。即过程在输入量作用下，其平衡状态被破坏后，无须人或仪器的干预，依靠过程自身能力，逐渐恢复达到另一新的平衡状态，这种特性称为自平衡能力。在过程控制中亦有少数被控过程无自平衡能力。即被控过程在输入量作用下，其平衡状态被破坏后，没有人或仪器干预，依靠过程自身能力，最后不能恢复其平衡状态，这种特性称其为无自平衡能力。这样，过程又可分自衡过程与非自衡过程。

(一) 自衡过程建模

1. 单容过程

所谓自衡单容过程，是指只有一个贮蓄容量的又具有自平衡能力的过程。

例 2-1 图 2-3a 所示为一个自衡单容液位被控过程，这是一只水箱。由图示，其流入量为  $q_1$  改变阀 1 的开度可以改变  $q_1$  的大小。其流出量为  $q_2$ ，它取决于用户的要求及液位  $h$  的高低 改变阀 2 的开度可以改变  $q_2$ ；液位  $h$  愈高，水箱内水的静压力增大， $q_2$  亦增大。液位  $h$  的变化反映了  $q_1$  与  $q_2$  不等而引起水箱中蓄水或泄水的过程。若  $q_1$  作为被控过程的输入量， $h$  为其输出量，则该被控过程的数学模型就是  $h$  与  $q_1$  之间的数学表达式。

根据动态物料平衡关系有

$$q_1 - q_2 = A \frac{dh}{dt} \tag{2-1}$$

将式 (2-1) 表示成增量形式为

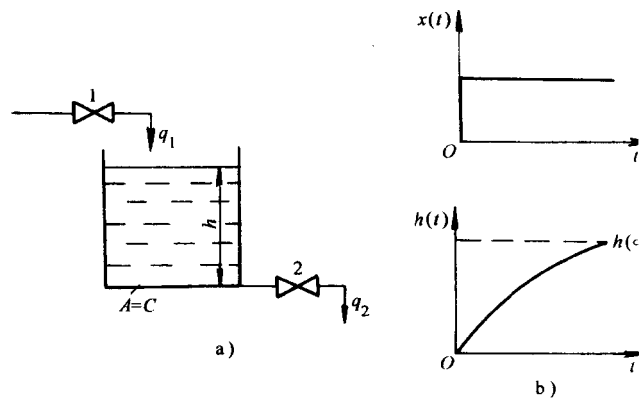


图 2-3 液位被控过程及其阶跃响应

$$\Delta q_1 - \Delta q_2 = A \frac{d\Delta h}{dt} = C \frac{d\Delta h}{dt} \quad (2-2)$$

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；  
 $A$ ——水箱截面积。

在静态时， $q_1 = q_2$ ， $dh/dt = 0$ ；当  $q_1$  发生变化时，液位  $h$  随之变化，水箱出口处的静压也随之变化， $q_2$  也发生变化。由流体力学可知，流体在紊流情况下，液位  $h$  与流量之间为非线性关系。但为了简化起见，经线性化处理，则可近似认为在工作区域内， $q_2$  与  $h$  成比例关系。而与阀 2 的阻力  $R_2$  成反比，即

$$\Delta q_2 = \frac{\Delta h}{R_2} \quad \text{或} \quad R_2 = \frac{\Delta h}{\Delta q_2} \quad (2-3)$$

式中  $R_2$ ——阀 2 的阻力，称为液阻。

为了求单容过程的数学模型，将式 (2-1)、式 (2-2) 进行拉氏变换后，画出如图 2-4 所示的框图。

单容液位过程的传递函数为

$$W_0(s) = \frac{H(s)}{Q_1(s)} = \frac{R_2}{R_2Cs + 1} = \frac{K_0}{T_0s + 1} \quad (2-4)$$

式中  $T_0$ ——液位过程的时间常数， $T_0 = R_2C$ ；

$K_0$ ——液位过程的放大系数， $K_0 = R_2$ ；

$C$ ——液位过程的容量系数，或称过程容量。

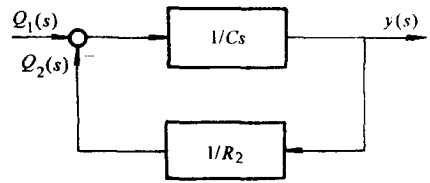


图 2-4 框图

被控过程都具有一定贮存物料或能量的能力，其贮存能力的大小称为容量或容量系数。其物理意义是：引起单位被控量变化时被控过程贮存量变化的大小。

图 2-3b 所示为单容液位过程的阶跃响应曲线。

从上面分析可知，液阻  $R_2$  不但影响过程的时间常数  $T_0$ ，而且影响过程的放大系数  $K_0$ ，而容量系数  $C$  仅影响过程的时间常数。

## 2. 多容过程

在工业生产过程中，被控过程往往由多个容积和阻力构成，这种过程称为多容过程。

下面以具有自平衡能力的双容过程为例，讨论建立数学模型的方法。

例 2-2 图 2-5a 所示为两只水箱串联工作的双容过程。设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

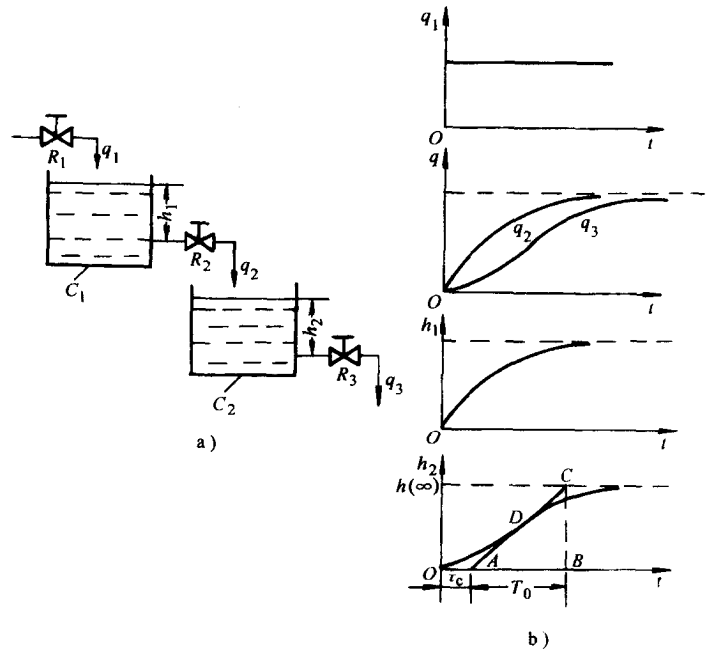


图 2-5 双容过程及其响应曲线

列出如下方程：

$$\left. \begin{aligned} \Delta q_1 - \Delta q_2 &= C_1 \frac{d\Delta h_1}{dt} \\ \Delta q_2 &= \frac{\Delta h_1}{R_2} \\ \Delta q_2 - \Delta q_3 &= C_2 \frac{d\Delta h_2}{dt} \\ \Delta q_3 &= \frac{\Delta h_2}{R_3} \end{aligned} \right\} \quad (2-5)$$

根据上述方程的拉氏变换式，画出框图 2-6。

双容过程的数学模型为

$$W_o(s) = \frac{H_2(s)}{Q_1(s)} = \frac{K_0}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} \quad (2-6)$$

式中  $T_1$ ——第一只水箱的时间常数， $T_1 = R_2C_1$ ；

$T_2$ ——第二只水箱的时间常数， $T_2 = R_3C_2$ ；

$K_0$ ——过程的放大系数， $K_0 = R_3$ ；

$C_1$ 、 $C_2$ ——分别为两只水箱的容量系数。

图 2-5b 所示为流量  $q_1$  有一阶跃变化时，被控量  $h_2$  的响应曲线。与单容过程相比，多容过程受到扰动后，被控量  $h_2$  的变化速度并不是一开始就最大，而是要经过一段滞后时间之后才达到最大值。

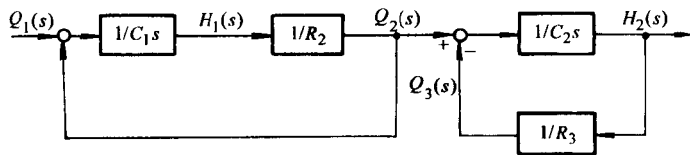


图 2-6 双容过程框图

即多容过程对于扰动的响应在时间上存在滞后，被称为容量滞后。产生容量滞后的原因主要是两个容积之间存在着阻力，所以使  $h_2$  的响应时间向后推移。容量滞后时间可用作图法求得，即通过  $h_2$  响应曲线的拐点  $D$  作切线，与时间轴相交于  $A$ 、与  $h_2(\infty)$  相交于  $C$ ， $C$  点在时间轴上的投影为  $B$ ， $OA$  即为容量滞后时间  $\tau_c$ ， $AB$  即为过程的时间常数  $T_0$ 。

如果过程的容量愈大，则容量滞后时间  $\tau_c$  也愈大。

图 2-7 所示为多容过程 ( $n=5$ ) 的阶跃响应曲线。过程的特性参数可以用  $K_0$ 、 $T_0$ 、 $\tau$  来描述。

多容过程的传递函数为

$$W_o(s) = \frac{K_0}{(T_1s + 1)(T_2s + 1) \cdots (T_ns + 1)} \quad (2-7)$$

如果  $T_1 = T_2 = \cdots = T_n = T_0$ ，则上式可表示为

$$W_o(s) = \frac{K_0}{(T_0s + 1)^n} \quad (2-8)$$

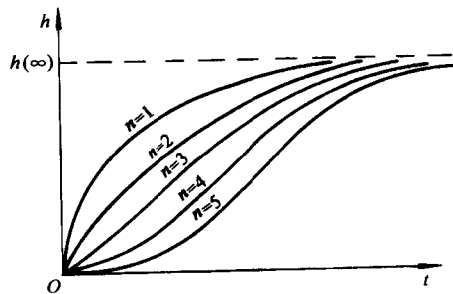


图 2-7 多容过程阶跃响应曲线

### 3. 滞后过程

在工业生产过程中，过程的纯滞后问题是经常碰到的。例如皮带运输机的物料传输过程，管道输送、管道的混合过程等。下面以图 2-8 为例讨论纯滞后过程的建模。

例 2-3 图 2-8 所示为具有纯滞后的液位过程。流量  $q_1$  通过长度为  $l$  的管道流入水箱。当

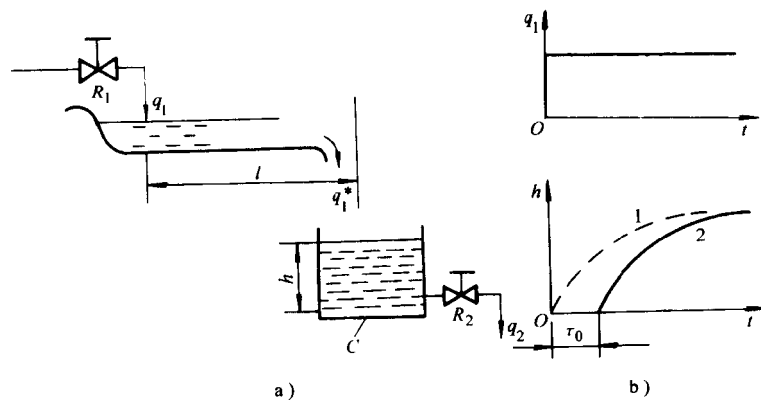


图 2-8 纯滞后液位过程

进水阀的开度产生变化后，流量  $q_1$  要流经长度为  $l$  的管道经传输时间  $\tau_0$  后才流入水箱，才使液位  $h$  发生变化。

具有纯滞后单容过程的微分方程和传递函数为

$$\left. \begin{aligned} T_0 \frac{d\Delta h}{dt} + \Delta h &= K_0 \Delta q_1 (t - \tau_0) \\ W_0(s) = \frac{H(s)}{Q_1(s)} &= \frac{K_0}{T_0 s + 1} e^{-\tau_0 s} \end{aligned} \right\} \quad (2-9)$$

式中  $T_0$ ——过程的时间常数， $T_0 = R_2 C$ ；

$K_0$ ——过程的放大系数， $K_0 = R_2$ ；

$\tau_0$ ——过程的纯滞后时间。

对于纯滞后的多容过程，其传递函数为

$$W_0(s) = \frac{K_0}{(T_0 s + 1)^n} e^{-\tau_0 s} \quad (2-10)$$

## (二) 非自衡过程建模

### 1. 单容过程

例 2-4 若将图 2-3 所示水箱的出口阀 2 换成定量泵，则如图 2-9a 所示。这样，其流出量  $q_2$  与液位  $h$  无关。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

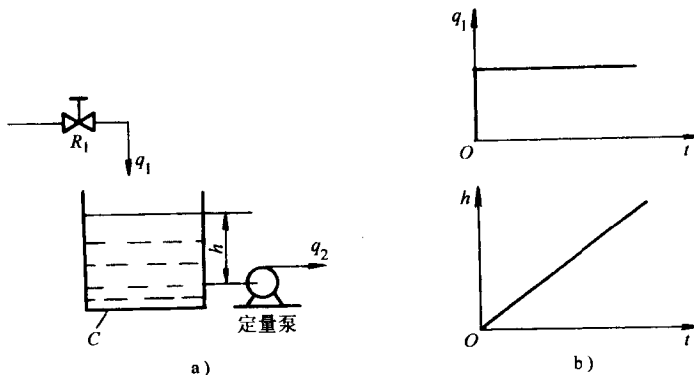


图 2-9 单容过程及其响应曲线

以水箱液位或者等速上升直至液体溢出，或者等速下降直至液体被抽干，其阶跃响应曲线如图 2-9b 所示。

同上述分析，图 2-9a 所示过程的微分方程为

$$C \frac{d\Delta h}{dt} = \Delta q_1 \quad (2-11)$$

式中  $C$ ——水箱的容量系数。

过程的传递函数为

$$W_0(s) = \frac{1}{T_a s} \quad (2-12)$$

式中  $T_a$ ——过程的积分时间常数， $T_a = C$ 。

## 2. 多容过程

**例 2-5** 对于无自平衡能力的多容过程，以图 2-10 所示的双容过程为例，来讨论其建立数学模型的方法。图中， $h_2$  为过程的被控量， $q_1$  为其输入量。当  $q_1$  产生阶跃变化时，液位  $h_2$  并不立即以最大的速度变化，由于中间水箱具有容积和阻力， $h_2$  对扰动  $q_1$  的响应有一定的滞后和惯性。

同上述所述，图 2-10 所示过程的数学模型为

$$W_0(s) = \frac{H_2(s)}{Q_1(s)} = \frac{1}{T_a s(Ts + 1)} \quad (2-13)$$

式中  $T_a$ ——双容过程积分时间常数， $T_a = C_2$ ；

$T$ ——第一只水箱的时间常数。

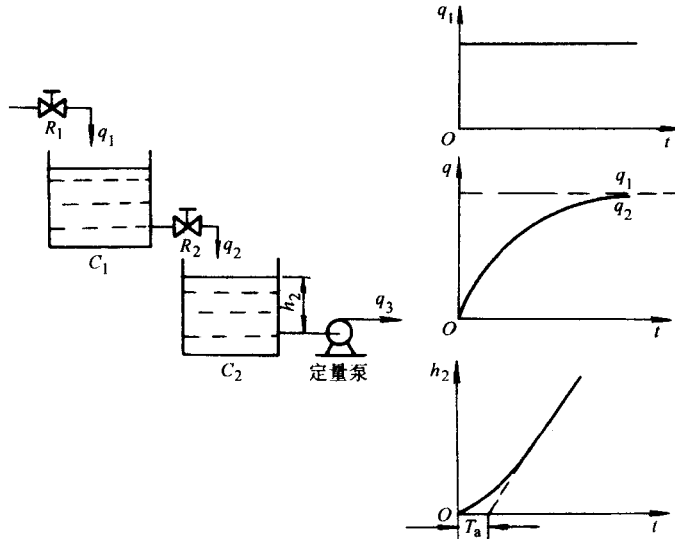


图 2-10 无自平衡能力的双容过程

同理，无自衡多容过程的数学模型为

$$W_0(s) = \frac{1}{T_a s(Ts + 1)^n} \quad (2-14)$$

## 3. 滞后过程

**例 2-6** 同自衡过程的分析方法一样，当无自衡单容过程具有纯滞后时，则其传递函数为

$$W_0(s) = \frac{1}{T_d s} e^{-\tau_0 s} \quad (2-15)$$

当无自衡多容过程具有纯滞后时，则其数学模型为

$$W_0(s) = \frac{1}{T_a s (T_s + 1)^n} e^{-\tau_0 s} \quad (2-16)$$

### 三、试验法建模（过程辨识）

以上介绍的机理分析法虽然具有较大的普遍性，但是，由于很多工业过程其内部机理较复杂，对某些物理、化学过程目前尚不完全清楚，所以对这些较复杂过程的建模较为困难。另外，实际工业过程多半有非线性因素，在进行数学推导时常常作了一些近似与假设，虽然这些近似和假设具有一定的实际依据，但并不能完全反映实际情况，甚至会带来估计不到的影响。因此，即使用机理分析法得到过程的数学模型，仍然希望采用实验方法加以验证。尤其当实际过程较复杂求不出其数学模型时，更需要通过实验方法即辨识方法来求得。

试验法建模是在实际的生产过程（设备）中，根据过程输入、输出的实验数据，即通过过程辨识与参数估计的方法建立被控过程的数学模型。

与机理分析法相比，试验法建模的主要特点是不需要深入了解过程的机理。但是必须设计一个合理的实验，以获得过程所含的最大信息量，而对此却往往是困难的。所以，在实际使用时，这两种方法经常是相互补充的。如先通过机理分析确定模型的结构形式，再通过实验数据来确定模型中各系数的大小。

试验法又可分为加专门信号与不加专门信号两种。加专门信号的方法就是在试验过程中改变所研究的过程输入量，对其输出量进行数据处理就可求得过程的数学模型。所谓不加专门信号即利用过程在正常操作时所记录的信号，进行统计分析来求得过程的数学模型。一般来说这种方法只能定性地反映过程的数学模型，其精度较差。所以，为了能得到精度较高的数学模型，应采用加专门信号的试验法。

产生专门信号的发生器是多种多样的。通常可分为时间域信号，如阶跃信号、脉冲信号等；频率域信号，如正弦波、梯形波等；随机信号，如白噪声、伪随机信号等。

下面介绍常用的用响应曲线法（阶跃响应曲线和矩形脉冲响应曲线）来辨识过程的数学模型。

#### （一）阶跃响应曲线法

测定阶跃响应曲线的原理很简单，在被控过程的输入量作阶跃变化时，测定其输出量随时间而变化的曲线，即得阶跃响应曲线，如图 2-11 所示。

阶跃响应曲线能形象、直观地描述被控过程的动态特性。实验测试方法简单，只要使调节阀的

开度作一阶跃变化（一般为 10%）即可。为了能得到可靠的测试结果，试验时必须注意：

1) 合理选择阶跃信号值。一般取阶跃信号值为正常输入信号的 5%~15% 左右，以不影响正常生产为准。

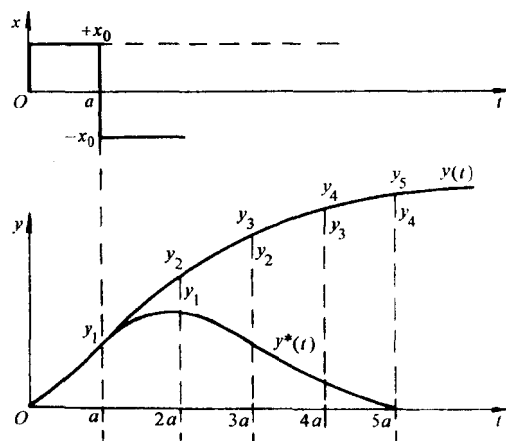


图 2-11 响应曲线