

## 过程控制基础知识

## 内容提要

本章概括性地论述了学习过程控制所必须掌握的基础知识。主要介绍了自动控制系统的组成和分类,对自动控制系统运行的基本要求,并以满足稳定性、快速性和准确性三方面要求的单项性能指标作为重点,详细描述了衡量过程控制系统控制质量的品质指标;分别介绍了用理论分析法和实验测试法求取被控过程数学模型的一般步骤及主要注意事项。最后重点讨论常规控制器的基本控制规律及其对系统控制质量的影响。



## 特别提示:

本章为过程控制基础篇。考虑到部分院校因课程体系设置不同,未在前期开设“自动控制原理”课程。为保证本门课程的顺利学习,特在此章增设了过程控制必备的基本知识及要点;已开设“自动控制原理”课程的院校,只需重点讲授第1.3和1.6节即可。

## 1.1 自动控制系统的组成及分类

## 1.1.1 人工控制与自动控制

自动控制是在人工控制的基础上发展起来的。下面先通过一个实例,将人工控制与自动控制进行对比分析,从而进一步认识自动控制系统的特点及组成。

图1.1(a)所示是用于生产蒸汽的锅炉汽包设备,其控制要求已在绪论中予以阐述。图1.1(b)为人工控制示意图。为保持汽包液位恒定,操作人员应根据液位高度的变化情况控制进水量。手工控制的过程主要分为三步:

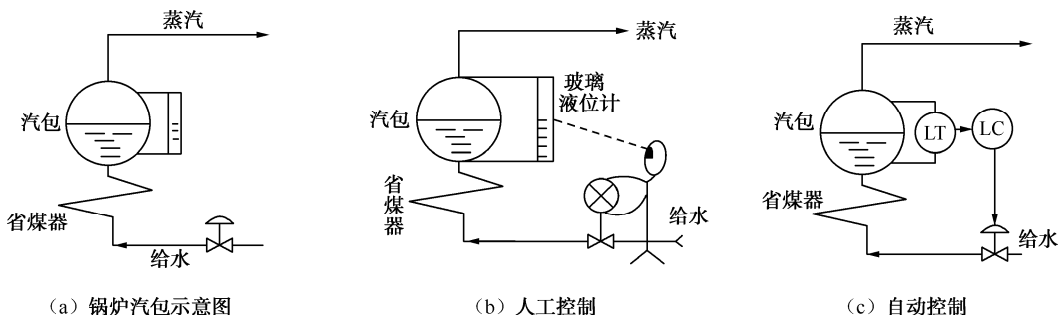


图 1.1 锅炉汽包水位控制示意图

- ① 用眼睛观察玻璃液位计中的水位高低以获取测量值，并通过神经系统传送到大脑；
- ② 大脑根据眼睛看到的水位高度，与设定值进行比较，得出偏差的大小和方向，然后根据操作经验发出控制命令；
- ③ 根据大脑发出的命令，用双手去改变给水阀门的开度，使给水量与产汽消耗量相等，最终使水位保持在工艺要求的高度上。

在整个手工控制过程中，操作人员的眼、脑、手三个器官，分别起到了检测、判断和运算、执行三个作用，来完成测量、求偏差、再施加控制操作以纠正偏差的工作过程，保持汽包水位的恒定。

如采用检测仪表和自动控制装置来代替人工控制，就成为自动控制系统。如图 1.1 (c) 所示为锅炉汽包液位自动控制系统示意图。这里以此为例来说明自动控制系统的工作原理。

当系统受到扰动作用后，被控变量（液位）发生变化，通过检测变送仪表得到其测量值；控制器接收液位测量变送器送来的测量信号，与设定值相比较得出偏差，按某种运算规律进行运算并输出控制信号；控制阀接收控制器的控制信号，按其大小改变阀门的开度，调整给水量，以克服扰动的影响，使被控变量回到设定值，最终达到控制汽包水位稳定的目的。这样就完成了所要求的控制任务。这些自动控制装置和被控的工艺设备组成了一个没有人直接参与的自动控制系统。

通常，设定值是系统的输入变量，而被控变量是系统的输出变量。系统的输出变量通过适当的检测变送仪表又引回到系统输入端，并与输入变量相比较，这种做法称为“反馈”。当反馈信号与设定值相减时，称为负反馈；当反馈信号取正值与设定值相加时，称为正反馈。反馈变量与输入变量（设定值）相比较所得的结果叫做偏差，控制装置根据偏差的方向、大小或变化情况进行控制，使偏差减小或消除。发现偏差，然后去除偏差，这就是反馈控制的原理。利用这一原理组成的系统称为反馈控制系统，通常也称为自动控制系统。在一个自动控制系统中，实现自动控制的装置可以各不相同，但反馈控制的原理却是相同的。由此可见，有反馈存在、按偏差进行控制，是自动控制系统最主要的特点。

## 1.1.2 自动控制的基本方式

自动控制系统一般有两种基本控制方式。通常我们按照控制系统是否设有反馈环节来对其进行分类。不设反馈环节的，称为开环控制系统；设有反馈环节的，称为闭环控制系统。这里所说的“环”，是指由反馈环节构成的回路。下面介绍这两种控制系统的控制特点。

### 1. 开环控制系统

若系统的输出信号对控制作用没有影响，则称为开环控制系统，即系统的输出信号不反馈到输入端，不形成信号传递的闭合环路。

在开环控制系统中，控制装置与被控对象之间只有顺向作用而无反向联系。例如，家用洗衣机便是开环控制系统的实际例子。洗衣机从进水、洗涤、漂洗到脱水的整个洗衣过程，都是根据设定的时间程序依次进行的，而无须对输出信号（如衣服清洁程度、脱水程度等）进行测量。显然，开环控制系统不是反馈控制系统。

又如，图 1.2 所示的数控加工机床中广泛应用的精密定位控制系统，也是一个没有反馈环节的开环控制系统。其工作流程如下：预先设定的加工程序指令通过运算控制器（可为微机或单片机）去控制脉冲的产生和分配，发出相应的脉冲；再由这些脉冲（通常还要经过功

率放大) 驱动步进电机, 通过精密传动机构带动工作台 (或刀具) 进行加工。此系统的被控对象是工作台; 加工程序指令是输入量; 工作台位移是被控变量, 它只根据控制信号 (控制脉冲) 而变化。系统中既不对被控变量进行测量, 也无反馈环节, 输出量 (被控变量) 并不返回来影响控制部分, 因此这个定位控制系统是开环控制。

此系统结构比较简单, 但不能保证消除误差, 图 1.2 中, 步进电机是一种由“脉冲数”控制的电机, 只要输入一个脉冲, 电机就转过一定角度, 称为“一步”。所以根据工作台所需要移动的距离, 输入端给予一定的脉冲。如果因为外界扰动, 步进电机多走或少走了几步, 但系统并不能“觉察”, 将造成误差。



图 1.2 精密定位控制系统方框图

开环控制系统的原理方框图如图 1.3 所示。

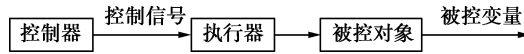


图 1.3 开环控制系统原理方框图

由此可见, 由于开环控制方式不需要对被控变量进行测量, 只根据输入信号进行控制, 所以开环控制方式的特点是: 无反馈环节; 系统结构和控制过程均很简单; 操作方便; 成本比相应的闭环系统低。由于不测量被控变量, 也不与设定值进行比较, 所以系统受到扰动作用后, 被控变量偏离设定值, 且无法消除偏差, 因此开环控制的缺点是抗扰动能力差、控制精度不高。

一般情况下开环控制系统只能适用于对控制性能要求较低的场合。其具体应用原则如下: 当不易测量被控变量或在经济上不允许时, 采用开环控制比较合适; 在输出量和输入量之间的关系固定, 且内部参数或外部负载等扰动因素不大 (或这些扰动因素产生的误差可以预先确定并能进行补偿) 的情况下, 也应尽量采用开环控制系统。但是当系统中存在无法预计的扰动因素, 并且对控制性能要求较高时, 开环控制系统便无法满足技术要求, 这时就应考虑采用闭环控制系统。

## 2. 闭环控制系统

凡是系统的输出信号对控制作用有直接影响的控制系统, 就称为闭环控制系统。在闭环控制系统中, 系统的输出信号通过反馈环节返回到输入端, 形成闭合环路, 故又称为反馈控制系统。

图 1.1 (c) 中的锅炉汽包液位自动控制系统就是一个具有反馈环节的闭环控制系统, 其原理方框图如图 1.4 所示。

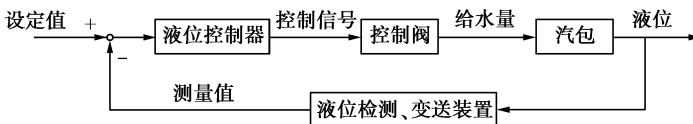


图 1.4 锅炉汽包液位闭环控制系统原理方框图

从图 1.4 中可以看出, 为使被控变量稳定在工艺要求的设定值附近, 闭环控制系统均采

用负反馈方式。在一个负反馈控制系统中，将被控变量通过反馈环节送回输入端，与设定值进行比较，根据偏差控制被控变量，从而实现控制作用。因此，“采用负反馈环节，按偏差进行控制”是闭环控制系统在结构上的最大特点。不论什么原因引起被控变量偏离设定值，只要出现偏差，就会产生控制作用，使偏差减小或消除，达到使被控变量与设定值一致的目的，这是闭环控制的优点。这一优点使得闭环控制系统具有较高的控制精度和较强的抗扰动能力。因此，在实现对生产过程进行自动控制的过程控制系统中，均采用闭环控制。

闭环控制需要增加检测、反馈比较、控制器等部件，这会使系统较为复杂、成本提高。特别需要指出的是，闭环控制会带来使系统的稳定性变差甚至造成不稳定的副作用。这是由于闭环控制系统按偏差进行控制，所以尽管扰动已经产生，但在尚未引起被控变量变化之前，系统是不会产生控制作用的，这就使控制不够及时。此外，如果系统内部各环节配合不当，则会引起剧烈振荡，甚至会使系统失去控制。这些是闭环控制系统的缺点，在自动控制系统的的设计和调试过程中应加以注意。

### 1.1.3 自动控制系统的组成

在研究自动控制系统时，为了更清楚地说明控制系统各环节的组成、特性和相互间的信号联系，一般都采用方框图来表示自动控制系统的原理。方框图也是过程控制系统中的一个重要概念和常用工具之一。

图 1.5 所示为通用的自动控制系统原理方框图，对该方框图说明如下。

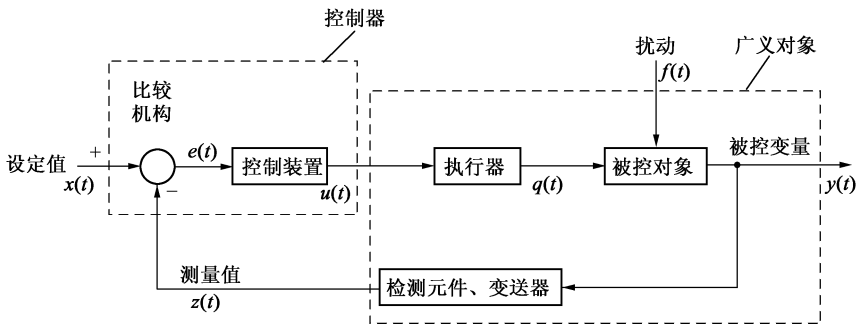


图 1.5 自动控制系统通用方框图

(1) 图中每个方框表示组成系统的一个环节，两个方框之间用一条带箭头的线段表示它们相互间的信号联系（而不表示具体的物料或能量），箭头方向表示信号传递的方向，线上的字母说明传递信号的名称。

(2) 进入环节的信号为环节输入，离开环节的信号为环节输出。输入会引起输出变化，而输出不会反过来直接引起输入的变化，环节的这一特性称为“单向性”，即箭头具有“单向性”。

(3) 在方框图中，任何一个信号沿着箭头方向前进，最后又回到原来的起点，构成一个闭合回路。闭环控制系统的闭合回路是通过检测元件及变送器，将被控变量的测量值送回到输入端与设定值进行比较而形成的，所以自动控制系统是一个负反馈闭环控制系统。

(4) 方框图中的各传递信号都是时间函数，它们随时间而不断变化。在定值控制系统中，扰动作用使被控变量偏离设定值，控制作用又使它恢复到设定值。当扰动作用与控制作用构成一对主要矛盾时，被控变量则处于不断运动之中。

图 1.5 所示的方框图采用下列符号：

- ①  $x(t)$ ——设定值;
- ②  $z(t)$ ——测量值;
- ③  $e(t)$ ——偏差,  $e(t)=x(t)-z(t)$ ;
- ④  $u(t)$ ——控制作用 (控制器输出);
- ⑤  $y(t)$ ——被控变量;
- ⑥  $q(t)$ ——操纵变量;
- ⑦  $f(t)$ ——扰动。

由图 1.5 可以看出,一般自动控制系统包括被控对象、检测变送单元、控制器和执行器。

## 1. 被控对象

被控对象也称被控过程 (简称过程),是指被控制的生产设备或装置。工业生产中的各种塔器、反应器、换热器、泵和压缩机及各种容器、储槽都是常见的被控对象,甚至一段管道也可以是一个被控对象。在复杂的生产设备中 (如精馏塔、吸收塔等),一个设备上可能有几个控制系统,这时在确定被控对象时,就不一定是生产设备的整个装置,只有该装置的某一个与控制有关的部分才是某一个控制系统的被控对象。

在图 1.1 中,被控对象就是锅炉汽包。

## 2. 检测变送单元

检测变送单元一般由检测元件和变送器组成。其作用是测量被控变量,并按一定规律将其转换为标准信号输出,作为测量值,即把被控变量  $y(t)$  转化为测量值  $z(t)$ 。例如,用热电阻或热电偶测量温度,并用温度变送器转换为统一的气压信号 ((20~100) kPa) 或直流电流信号 ((0~10) mA 或 (4~20) mA)。

## 3. 控制器

控制器也称调节器。它将被控变量的测量值与设定值进行比较得出偏差信号  $e(t)$ ,并按某种预定的控制规律进行运算,给出控制信号  $u(t)$ 。

需要特别指出的是,在自动控制系统分析中,把偏差  $e(t)$  定义为  $e(t)=x(t)-z(t)$ 。然而在仪表制造行业中,却把  $[z(t)-x(t)]$  作为偏差,即  $e(t)=z(t)-x(t)$ ,控制器以  $e(t)=z(t)-x(t)$  进行运算给出控制信号。两者的符号恰好相反。

## 4. 执行器

在过程控制系统中,常用的执行器是控制阀,其中以气动薄膜控制阀被使用最多。执行器接收控制器送来的控制信号  $u(t)$ ,直接改变操纵变量  $q(t)$ 。操纵变量是被控对象的一个输入变量,通过操作这个变量可以克服扰动对被控变量的影响,操纵变量通常是执行器控制的某一工艺变量。

通常将系统中控制器以外的部分组合在一起,即将被控对象、执行器和检测变送环节合并为广义对象。因此,也可以将自动控制系统看成由控制器和广义对象两部分组成。

### 1.1.4 自动控制系统的分类

自动控制系统的分类方法有多种,每一种分类方法都反映了控制系统某一方面的特点。

这里为了便于分析反馈控制系统的特性，按设定值的变化情况，将自动控制系统分为三类，即定值控制系统、随动控制系统和程序控制系统。

## 1. 定值控制系统

设定值保持不变（为恒定值）的反馈控制系统称为定值控制系统。在定值控制系统中，由于设定值是固定不变的，扰动就成为引起被控变量偏离设定值的主要因素，因此定值控制系统的基本任务就是要克服扰动对被控变量的影响，使其保持为设定值。所以也把仅以扰动量作为输入的系统叫做定值控制系统。本书叙述的自动控制系统均为定值控制系统。

工业生产中大多数都是定值控制系统，如各种温度、压力、流量、液位等控制系统，恒温箱的温度控制，稳压电源的电压稳定控制等。换热器出口温度控制系统和图 1.1 (c) 所示的锅炉汽包水位自动控制系统即属于定值控制系统。

图 1.6 (a) 所示是一个用电阻丝加热的恒温箱温度控制系统。控制变压器活动触点的位置即改变了输入电压，使通过电阻丝的电流产生变化，从而将恒温箱控制在不同的温度值上。所以，控制活动触点的位置可以达到控制温度的目的。这里的被控变量是恒温箱的温度，经热电偶测量并与设定值比较后，其偏差经过放大器放大，控制电动机的转向，然后经过传动装置，移动变压器的活动触点位置，其控制结果使偏差减小，直到温度达到设定值为止。其系统方框图如图 1.6 (b) 所示。

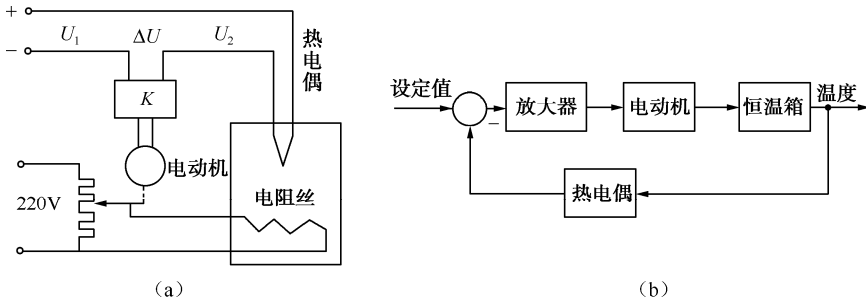


图 1.6 恒温箱温度控制系统

## 2. 随动控制系统

随动控制系统也称跟踪控制系统。这类控制系统的特点是设定值在不断变化，而且没有确定的规律，是时间的未知函数，并且要求系统的输出（被控变量）随之而变化。自动控制的目的是要使被控变量能够及时而准确地跟踪设定值的变化。例如，雷达跟踪系统就是典型的随动控制系统；各类测量仪表中的变送器本身亦可以看做一个随动控制系统，它的输出（指示值）应迅速、准确地随着输入（被测变量）而变化。

图 1.7 (a) 所示是工业生产中常用的比值控制系统。现以加热炉燃料与空气的混合比例控制系统为例说明其控制过程。在该系统中，燃料量是按工艺过程的需要而手动或自动地不断改变的，控制系统应使空气量跟随燃料量而变化，并自动按规定的比例增、减空气量，保证燃料经济地燃烧。图 1.7 (b) 所示是该系统的方框图，从图中可以清楚地看出，该系统也是一个随动控制系统。

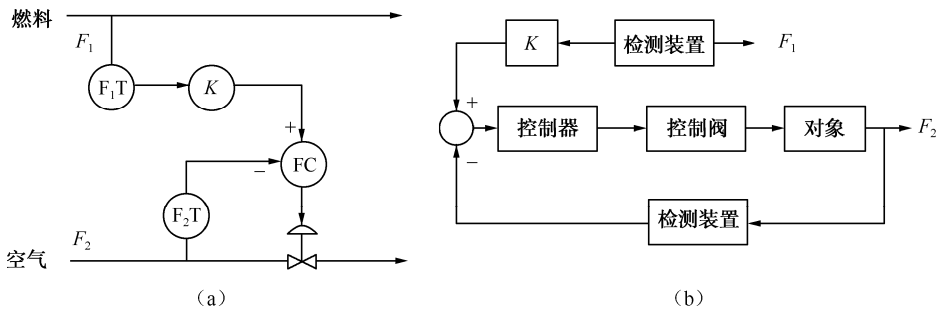


图 1.7 比值控制系统示意图及方框图

### 3. 程序控制系统

程序控制系统的设定值是根据工艺过程的需要而按照某种预定规律变化的，是一个已知的函数，自动控制的目的是使被控变量以一定的精度、按规定的时间程序变化，以保证生产过程顺利完成。程序控制系统主要用于实现对周期作业的工艺设备的自动控制，如某些间歇式反应器的温度控制、冶金工业中退火炉的温度控制，以及程序控制机床等。

图 1.8 所示是某电炉炉温程序控制系统示意图。给定电压  $U_0$  由程序装置给出（根据需要按时间变化，由时钟机构和凸轮产生），并与热电偶所产生的热电势  $U_1$  比较。若  $U_1 \neq U_0$ ，则放大器输入端有偏差电压  $U = U_0 - U_1$  产生，此电压经放大后送到电动机。电动机根据偏差大小和极性而动作，经减速器改变电炉电阻丝的电流，使电炉内的温度发生变化，直至  $U_1 = U_0$  为止。此时放大器输入的偏差电压  $U = U_0 - U_1 = 0$ ，电动机不转动。当  $U_0$  按一定程序变化时，电炉温度也随之而变化，使热电势  $U_1$  时刻跟踪给定电压  $U_0$ 。

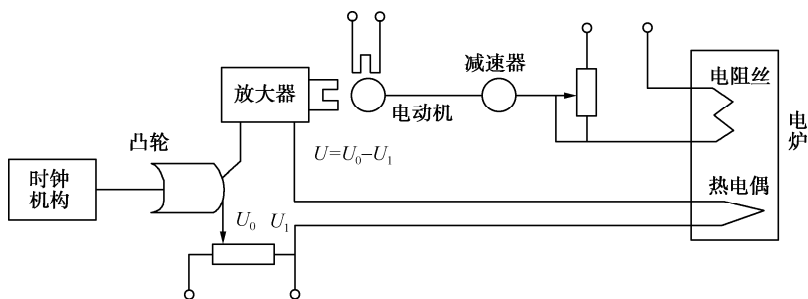


图 1.8 电炉炉温程序控制系统示意图

上述各种反馈控制系统中，各环节间信号的传送都是连续变化的，故称为连续控制系统或模拟控制系统，统称为常规过程控制系统。在石油、化工、冶金、电力、陶瓷、轻工、制药等工业生产中，定值控制系统占大多数，是主要的控制系统，其次是程序控制系统和随动控制系统。



#### 【工程经验】

工业生产过程流程复杂、扰动繁多，为取得良好的控制效果，绝大多数过程控制系统均采用“闭环负反馈”控制方式；过程控制中最有效的调节手段为流量参数，因此过程控制系统中的执行器均为控制阀。这是过程控制区别于其他自动控制的显著特点。

## 1.2 系统运行的基本要求

### 1.2.1 系统的动态与静态

#### 1. 静态和静态特性

自动控制系统的输入有两种，一种是设定值的变化（或称设定作用），另一种是扰动的变化（或称扰动作用）。当输入恒定不变时，整个系统若能建立平衡，系统中各个环节将暂不动作，它们的输出都处于相对静止状态。在自动控制系统中，把被控变量不随时间而变化的平衡状态，称为系统的静态（或稳态）。

在此，值得指出的是，系统的静态与平时认为的静止不动是不相同的。静止，习惯上都是指静止不动。而在自动控制领域中，系统的静态，并非指系统内没有物料与能量的流动，而是指各个参数（或信号）的变化率为零，即参数保持不变，此时的控制系统暂时处于相对的平衡状态。自动控制系统在静态时，生产仍在进行，物料和能量仍然有进有出，只是整个生产过程暂时平稳运行，各参数保持不变。例如，在锅炉汽包液位控制系统中，当给水量与蒸汽量相等时，液位保持不变，此时称系统达到了平衡，亦即处于静态。

同样，对于系统中的任何一个环节来说，也存在静态。在保持平衡时环节的输出与输入关系称为环节的静态特性。

系统和环节的静态特性是很重要的。系统的静态特性是控制品质的重要一环；被控过程的静态特性是扰动分析、确定控制方案的基础；检测装置的静态特性反映了它的精度、线性度、灵敏度、变差等性能；控制装置和执行器的静态特性对控制品质有显著的影响。

#### 2. 动态和动态特性

当系统暂处于平衡状态时，由于扰动作用或设定值变化（即输入发生变化），系统的平衡受到破坏，被控变量（即输出）随即发生变化，偏离设定值，自动控制装置就会相应动作，进行控制以克服扰动的影晌，力图使系统恢复平衡。从输入开始变化时起，经过控制，直到再建立静态，在这段时间中整个系统的各个环节和变量都处于变动状态。在自动控制系统中，把被控变量随时间而变化的不平衡状态，称为系统的动态。例如，前述锅炉汽包液位控制系统中，当给水量与蒸汽量不相等时，液位将上下波动变化，此时系统处于动态。

系统处于动态时的输出与输入之间的关系称为系统的动态特性。同样，对系统中的任何一个环节来说，当输入发生变化时，也将引起输出的变化，其间的关系称为环节的动态特性。

在控制系统中，了解动态特性甚至比了解静态特性更为重要，也可以说，静态特性是动态特性的一种极限情况。在定值控制系统中，扰动不断产生，控制作用也就不断克服其影响，系统总是处于动态过程中。同样，在随动控制系统中，设定值不断变化，系统也总是处于动态过程中。因此，控制系统的分析重点要放在系统和环节的动态特性上，这样才能设计出良好的控制系统，以满足生产提出的各种要求。

#### 3. 静态与动态的辩证关系

以哲学的观点看，在自动控制系统中，平衡和静态是暂时的、相对的、有条件的，不平



衡和动态才是普遍的、绝对的、无条件的。在生产过程中，扰动作用不断产生，控制作用也就不断地去克服扰动对被控变量的影响，最后使被控变量恢复到设定值上来。所以，自动控制系统总是处在动态之中。

## 1.2.2 基本要求

自动控制理论是研究各种自动控制系统的共同规律的一门学科。尽管自动控制系统有不同的类型，对每个系统也都有不同的特殊要求，但是，对于每一种类型的控制系统，对被控变量变化全过程提出的基本要求都是一样的。

由于系统在控制过程中存在着动态过程，所以自动控制系统性能的好坏，不仅取决于系统稳态时的控制精度，还取决于动态时的工作状况。因此，对自动控制系统的基本技术性能的要求，包含静态和动态两个方面，一般可以将其归纳为稳定性、快速性和准确性，即“稳、快、准”的要求。

### 1. 稳定性

稳定性是指系统受到外来作用后，其动态过程的振荡倾向和系统恢复平衡的能力。如果系统受到外来作用后，经过一段时间，其被控变量可以达到某一稳定状态，则称系统是稳定的；否则，则称系统是不稳定的。

稳定性是保证控制系统正常工作的先决条件。一个稳定的控制系统，其被控变量偏离设定值的初始偏差应随时间的增长而逐渐减小或趋近于零。具体来说，对于稳定的定值控制系统，当被控变量因扰动作用而偏离设定值后，经过一个动态过程，被控变量应恢复到原来的设定值状态；对于稳定的随动控制系统，被控变量应能始终跟踪设定值的变化。反之，不稳定的控制系统，其被控变量偏离设定值的初始偏差将随时间的增长而发散，因此，不稳定的控制系统无法实现预定的控制任务。

线性自动控制系统的稳定性是由系统结构和参数所决定的，与外界因素无关。因此，保证控制系统的稳定性，是设计和操作人员的首要任务。

### 2. 快速性

一个能在工业生产中实际应用的控制系统，仅仅满足稳定性要求是不够的。还必须对其动态过程的形式和快慢提出要求，一般称为动态性能。

快速性是通过动态过程持续时间的长短来表征的。输入变化后，系统重新稳定下来所经历的过渡过程的时间越短，表明快速性越好；反之亦然。快速性表明了系统输出对输入响应的快慢程度。因此，提高响应速度、缩短过渡过程的时间，对提高系统的控制效率和控制过程的精度都是有利的。

### 3. 准确性

在理想情况下，当过渡过程结束后，被控变量达到的稳态值（即平衡状态）应与设定值一致。但实际上，由于系统结构和参数、外来作用的形式等非线性因素的影响，被控变量的稳态值与设定值之间会有误差存在，称为稳态误差（余差）。稳态误差是衡量控制系统静态控制精度的重要标志，在技术指标中一般都有具体要求。

稳定性、快速性和准确性往往是互相制约的。在设计与调试过程中，若过分强调系统的

稳定性, 则可能会造成系统响应迟缓和控制精度较低后果; 反之, 若过分强调系统响应的快速性, 则又会使系统的振荡加剧, 甚至引起不稳定。

怎样根据工作任务的不同分析和设计一个自动控制系统, 使其对三方面的性能要求有所侧重, 并兼顾其他, 以全面满足要求, 这正是本课程所要研究的内容。



### 【工程经验】

系统静态的实质, 是指在生产连续运行前提下, 被控变量不随时间变化的相对稳定状态。正确分辨系统的动、静态, 是自控从业人员的必备技能。

## 1.3 过程控制系统的过渡过程及控制性能指标

在前面两节中, 主要介绍了一般自动控制系统的组成、分类和对系统运行的基本要求。从本节开始, 将重点讨论在生产过程中实现自动控制的过程控制系统。

### 1.3.1 过程控制系统的过渡过程

原来处于稳定状态下的过程控制系统, 当其输入(扰动作用或设定值)发生变化后, 被控变量(即输出)将随时间不断变化, 它随时间而变化的过程称为系统的过渡过程, 即系统从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态的过程。

过程控制系统的过渡过程, 实质上就是控制作用不断克服扰动作用的过程。当扰动作用与控制作用这一对矛盾得到统一时, 过渡过程也就结束了, 系统又达到了新的平衡状态。

研究过程控制系统的过渡过程, 对分析和改进控制系统具有很重要的意义, 因为它直接反映控制系统质量的优劣, 与生产过程中的安全及产品的产量、质量有着密切的联系。

对于一个稳定的控制系统(所有正常工作的反馈系统都是稳定系统), 要分析其稳定性、准确性和快速性, 常以阶跃输入作用时被控变量的过渡过程为例。这是因为阶跃信号形式简单, 容易实现, 便于分析计算, 实际中也经常遇到, 并且这类输入变化对控制系统的影响最大。如果一个系统对阶跃输入有较好的响应, 那么它对其他形式的输入变化就更能适应。

在阶跃扰动作用下, 定值控制系统的过渡过程有如下几种基本形式, 如图 1.9 所示。

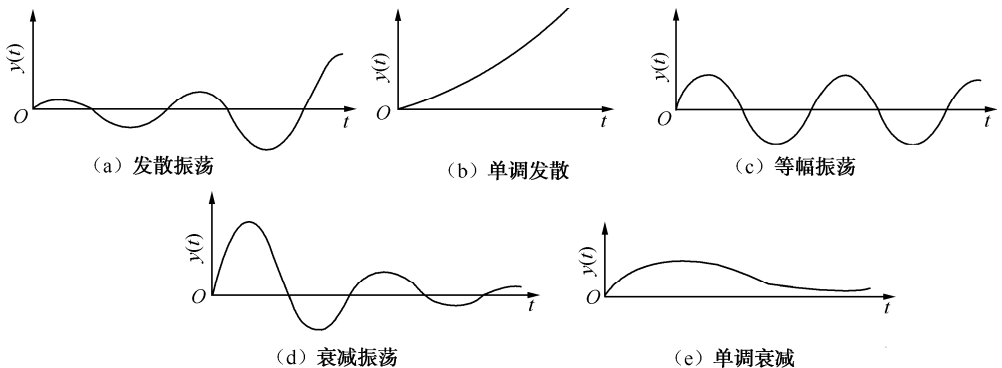


图 1.9 定值控制系统过渡过程的几种形式

(1) 图 1.9 (a) 所示是发散振荡过程, 被控变量一直处于振荡状态, 且振幅逐渐增加, 远离设定值, 直到超出工艺所允许的范围产生事故为止。显然, 这种过渡过程是绝对不允许出现的。

(2) 图 1.9 (b) 所示是单调发散过程, 被控变量虽不振荡, 但偏离原来的静态点越来越远。显然, 这种过渡过程也是不稳定的。

(3) 图 1.9 (c) 所示是等幅振荡过程, 既不衰减也不发散, 处于稳定与不稳定的临界状态。由于被控变量始终在某一数值附近上下波动而不能稳定下来, 因此除了简易的双位控制, 这种系统在生产上也不能采用。

(4) 图 1.9 (d) 所示是衰减振荡过程, 被控变量经过几个周期的波动后就能重新稳定下来, 符合对系统基本性能的要求 (稳定、迅速、准确), 这正是人们所希望的。

(5) 图 1.9 (e) 所示是非周期的单调衰减过程, 它表明被控变量偏离设定值以后, 要经过相当长的时间才慢慢地接近设定值。单调衰减过程符合稳定要求, 但不够迅速, 不够理想, 因此一般不宜采用, 只有当生产上不允许被控变量有较大幅度波动时才采用。

综上所述, 从满足稳定性、快速性和准确性的基本要求出发, 一般都希望过程控制系统在阶跃输入作用下的过渡过程为图 1.9 (d) 和图 1.10 所示的衰减振荡过程 (图 1.10 所示为稳定的随动控制系统的过渡过程)。

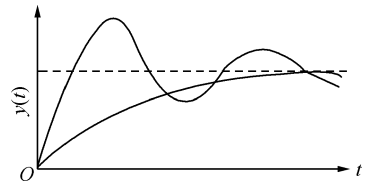


图 1.10 稳定的随动系统过渡过程

### 1.3.2 过程控制系统的控制性能指标

过程控制系统的控制性能指标是衡量系统控制质量优劣的依据, 又称为质量指标 (或品质指标)。根据分析方法的不同, 控制性能指标也有很多形式, 通常主要采用两类性能指标: 单项性能指标和综合控制指标。

#### 1. 单项性能指标

由上述分析可知, 过程控制系统在受到外来作用时, 被控变量应平稳、迅速和准确地趋近或恢复到设定值。图 1.11 所示是满足此要求的定值控制系统和随动控制系统在阶跃输入作用下的典型过渡过程响应曲线。

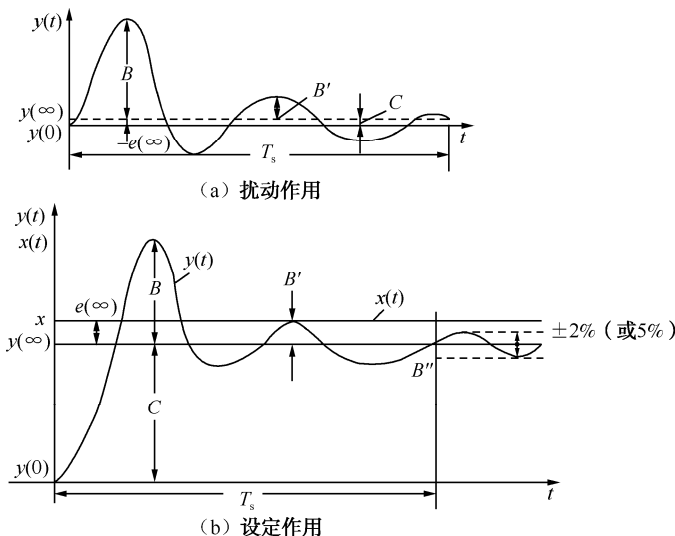


图 1.11 控制系统的时域控制性能指标示意图

单项性能指标是在时间域上从满足稳定性、快速性和准确性三方面的基本要求出发，来评价一个原处于静态的过程控制系统在单位阶跃输入作用下的过渡过程，也即单项性能指标是以原处于零状态下的系统在单位阶跃输入作用下被控变量的衰减振荡曲线来定义的。通常用如下四个指标来评定，这些控制指标仅适用于衰减振荡过程。

(1) 衰减比  $n$ 。衰减比是控制系统的稳定性指标。它表示振荡过程的衰减程度，其定义是过渡过程曲线上相邻同方向两个波峰的幅值之比。在图 1.11 中，若用  $B$  表示第一个波的振幅， $B'$  表示同方向第二个波的振幅，则衰减比为

$$n = \frac{B}{B'} \quad (1.1)$$

习惯上用  $n:1$  表示衰减比。若衰减比  $n < 1$ ，表明过渡过程是发散振荡，系统处于不稳定状态；若衰减比  $n = 1$ ，则过渡过程是等幅振荡，系统处于临界稳定状态；若衰减比  $n > 1$ ，则过渡过程是衰减振荡， $n$  越大，系统越稳定。为保持足够的稳定裕度，衰减比一般取  $4:1 \sim 10:1$ ，这样，大约经过两个周期，系统就能趋近于新的稳态值。通常，希望随动控制系统的衰减比为  $10:1$ ，定值控制系统的衰减比为  $4:1$ 。而对于少数不希望有振荡的过渡过程，则需要采用非周期的形式，因此，其衰减比须视具体被控对象的不同来选取。

(2) 超调量  $\sigma$  与最大动态偏差  $e_{\max}$ 。超调量和最大动态偏差表征在控制过程中被控变量偏离参比变量的超调程度，是衡量过渡过程动态精确度（即准确性）的一个动态指标。它也反映了控制系统的稳定性。

① 在随动控制系统中，超调量是一个反映被控变量偏离设定值的最大程度和衡量稳定程度的指标。它的定义是第一个波的峰值与最终稳态值之差，见图 1.11 (b) 中的  $B$ 。一般超调量以百分数给出，即

$$\sigma = \frac{B}{y(\infty)} \times 100\% = \frac{B}{C} \times 100\% \quad (1.2)$$

式中， $C$  是输出的最终稳态值， $B$  是输出超过最终稳态值的最大振幅（即第一个波峰的幅值）。

② 在定值控制系统中，最终稳态值很小或趋近于零，因此，仍用  $\sigma$  作为超调情况的指标就不合适了。通常改用最大动态偏差  $e_{\max}$  来代替超调程度，作为衡量过渡过程最大偏离程度的一项指标。对于图 1.11 (a) 所示的定值控制系统，过渡过程的最大动态偏差是指在单位阶跃扰动下，被控变量第一个波的峰值与设定值之差，它等于最大振幅  $B$  与最终稳态值  $C$  之和的绝对值，即

$$|e_{\max}| = |B + C| \quad (1.3)$$

最大动态偏差或超调量越大，生产过程瞬时偏离设定值就越远。在实际工作中，最大动态偏差不允许超过工艺所允许的最大值。对于某些工艺要求比较高的生产过程（如存在爆炸极限的化学反应），就需要限制最大动态偏差的允许值；同时，考虑到扰动会不断出现，偏差有可能是叠加的，就更需要限制最大动态偏差的允许值。因此，必须根据工艺条件确定最大偏差或超调量的允许值。

(3) 回复时间  $T_s$ 。回复时间又称为过渡过程时间，表示控制系统过渡过程的长短，也就是控制系统在受到阶跃外作用后，被控变量从原稳态值达到新稳态值所需要的时间。严格地讲，控制系统在受到外作用后，被控变量完全达到新的稳态值需要无限长的时间，但是这个时间在工程上是没有意义的。因此，工程上用“被控变量从过渡过程开始到进入稳态值附近  $\pm 5\%$  或  $\pm 2\%$  范围内并且不再超出此范围时所需要的时间”作为过渡过程的回复时间  $T_s$ 。回复时间越短，表示控制系统的过渡过程越快，即使扰动频繁出现，系统也能适应；反之，回复

时间越长，表示控制系统的过渡过程越慢。显然，回复时间越短越好。回复时间是衡量控制系统快速性的指标。

控制系统的快速性也可以用振荡频率 $\omega$ 来表示。过渡过程的振荡频率 $\omega$ 与振荡周期 $T$ 的关系是

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (1.4)$$

在衰减比相同的条件下，振荡频率与回复时间成反比，振荡频率越高，回复时间越短；在相同振荡频率下，衰减比越大，回复时间越短。因此，振荡频率也可作为控制系统的快速性指标。定值控制系统常用振荡频率来衡量控制过程的快慢。

(4) 余差 $e(\infty)$ 。余差又称残余偏差或静差，是控制系统的最终稳态偏差 $e(\infty)$ ，即过渡过程终了时被控变量的设定值与新稳态值之差，即

$$e(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = x - y(\infty) = x - C \quad (1.5)$$

对于定值控制系统， $x=0$ ，则有 $e(\infty)=-C$ 。

余差是反映控制系统稳态准确性的指标，相当于生产中允许的被控变量与设定值之间长期存在的偏差。一般希望余差为零，或不超过预定的范围，但不是所有的控制系统对余差都有很高的要求，如一般储槽的液位控制，对余差的要求就不是很高，而往往允许液位在一定范围内变化。因此，余差的大小是按生产工艺过程的实际需要制订的。若这个指标订高了，则要求系统特别完善；订低了又难以满足生产需要，也失去自动控制的意义。当然从控制品质着眼，自然是余差越小越好。余差的大小应根据被控过程的特性与被控变量允许的波动范围，综合考虑决定，不能一概而论。

必须说明，以上这些控制指标在不同的控制系统中各有其重要性，而且相互之间又有着内在的联系。高标准的同时要求满足这几个控制指标是很困难的，因此，应根据工艺生产的具体要求分清主次，区别轻重，对于主要的控制指标应优先保证。

## 2. 综合控制指标

以上介绍的单项性能指标分别代表了系统一个方面的性能。衰减比是描述系统稳定性的，最大动态偏差和余差是分别描述动态和静态的精确度（即准确性）的，回复时间则反映了系统的控制速度（即快速性）。这些指标往往相互影响、相互制约，难以同时满足要求。要对整个过程控制系统的过渡过程作出全面评价，一般采用综合控制指标。

综合控制指标又称为偏差的积分性能指标，常用于分析系统的动态响应性能。常用的综合控制指标见表 1.1，选用不同的积分公式作为目标函数则意味着控制的侧重点不同。各积分形式的表达式、特点及控制结果见表 1.1。

表 1.1 综合控制指标比较表

名称	公式	特点	控制结果	适用范围
绝对偏差积分鉴定指标 (IAE)	$IAE = \int_0^{\infty}  e(t)  dt$	把不同时刻、不同幅值的偏差等同对待	各方面的性能比较均衡	一般用于评定定值控制系统的质量指标
偏差平方积分鉴定指标 (ISE)	$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$	对大偏差敏感	最大偏差小但回复时间长	一般用于评定定值控制系统的质量指标
时间与偏差绝对值乘积的积分鉴定指标 (ITAE)	$ITAE = \int_0^{\infty} t e(t)  dt$	对初期偏差不敏感而对后期偏差敏感	最大偏差大但回复时间短	一般用于评定随动控制系统的质量指标

对于存在余差的控制系统, 由于余差  $e(\infty)$  不为零, 因此, 积分指标都将趋于无穷大, 这时, 可用  $e(t) - e(\infty) = -[y(t) - y(\infty)]$  代替偏差项进行积分运算。

过程控制系统控制质量的好坏, 取决于组成控制系统的各个环节, 特别是被控对象(过程)的特性。自动控制装置应按被控过程的特性加以选择和调整, 才能达到预期的控制质量。如果过程和自动控制装置两者配合不当, 或在过程控制系统运行过程中自动控制装置的性能或过程特性发生变化, 都会影响到过程控制系统的控制质量, 这些问题在控制系统的设计运行过程中应该充分注意。



### 【工程经验】

单项性能指标是评定系统控制质量优劣的依据, 深刻领会各项性能指标的含义, 是控制系统参数整定的必备前提。控制系统的整定多从稳定性指标入手, 首先整定 P (或 PI) 参数, 最后整定微分时间  $T_D$ 。对于计算机控制系统, 亦可采用符合控制要求的某项综合性能指标来评定。

## 1.4 过程动态特性与建模

### 1.4.1 数学模型的定义

过程控制系统一般是由被控过程、控制器、控制阀、检测元件和变送器等基本环节所组成的。在对过程控制系统进行分析、设计和质量改进之前, 必须首先掌握构成系统的基本环节的特性, 特别是过程的特性, 即建立系统(或环节)的数学模型。建立过程数学模型的目的是进行过程控制系统的设计、分析, 以及用于新型控制系统的开发和研究。

数学模型是描述系统(或环节)在动态过程中的输出变量与输入变量之间关系的数学表达式。数学模型有多种表示形式, 在时间域上常用的数学模型有微分方程式、传递函数和系统方框图等。它们反映了系统的输出量、输入量和内部各种变量间的关系, 表征了系统的内部结构和内在特性。

建立过程数学模型的方法主要有以下两种。

(1) 理论分析法。理论分析法又称机理建模法或解析法。这种方法是根据工业生产过程的内在机理, 应用物料平衡、能量平衡和有关的化学、物理规律建立过程的数学模型。

(2) 实验测试法。指在系统的输入端加上一定形式的测试信号, 通过实验测试出系统的输出信号, 再根据输入、输出特性确定数学模型。

本节首先介绍运用理论分析法来建立被控过程的数学模型。描述被控过程的输入量和输出量之间关系的最直接的数学方法是列写被控过程的微分方程。当过程的输入量和输出量都是时间  $t$  的函数时, 其微分方程可以确切地描述过程的动态特性。因此, 微分方程是过程数学模型最基本的表示形式。

### 1.4.2 被控过程的数学模型(过程特性)

工业生产过程的数学模型有静态和动态之分。静态数学模型是过程输出变量和输入变量之间不随时间变化时的数学关系。动态数学模型是过程输出变量和输入变量之间随时间变化时动态关系的数学描述。过程控制中通常采用动态数学模型, 也称为动态特性。建立控制系统中各组成环节和整个系统的数学模型不仅是分析和设计控制系统方案的需要, 也是控制系

统投运、控制器参数整定的需要，它在操作优化、故障检测和诊断、操作方案的制订等方面也是非常重要的。

在工业生产过程中，最常见的被控过程是各类热交换器、塔器、反应器、加热炉、锅炉、窑炉、储液槽、泵、压缩机等。每个过程都各有其自身固有的特性，而过程特性的差异对整个系统的运行控制有着重大影响。有的生产过程较易操作，工艺变量能够控制得比较平稳；有的生产过程很难操作，工艺变量容易产生大幅度的波动，只要稍不谨慎就会越出工艺允许的范围，轻则影响生产，重则造成事故。只有充分了解和熟悉生产过程，才能得心应手地进行操作，使工艺生产在最佳状态下进行。在过程控制系统中，若想采用过程控制装置来模拟操作人员的劳动，就必须充分了解过程的特性，掌握其内在规律，确定合适的被控变量和操纵变量。在此基础上才能选用合适的检测和控制仪表，选择合理的控制器参数，设计合乎工艺要求的控制系统。特别是在设计新型的控制方案时，多数都要涉及过程的数学模型，更需要考虑过程特性。

工业生产过程中常采用阶跃输入信号作用下过程的响应表示过程的动态特性。

### 1. 过程特性的类型

以阶跃响应分类，典型的工业过程动态特性分为四类。

(1) 自衡的非振荡过程。这一大类是在工业生产过程中最常见的过程。该类过程在阶跃输入信号作用下的输出响应曲线没有振荡地从一个稳态趋向于另一个稳态。

过程能自发地趋于新稳态值的特性称为自衡性。在外部阶跃输入信号作用下，过程原有的平衡状态被破坏，并在外部信号作用下自动地、非振荡地稳定到一个新的稳态，这类工业过程称为具有自衡的非振荡过程。

例如，如图 1.12 所示的液体储罐（槽）中的液位高度  $L$  和如图 1.13 所示的蒸汽加热器的出口温度  $T$  都具有这种特性，其响应曲线分别如图 1.14 (a)、图 1.14 (b) 所示。

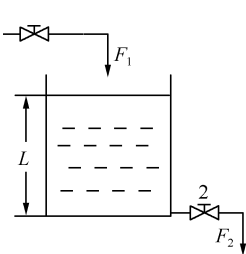


图 1.12 液体储罐

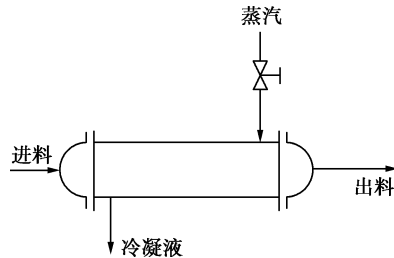
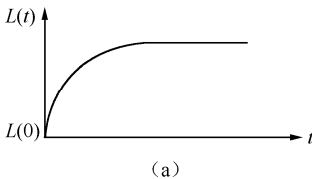
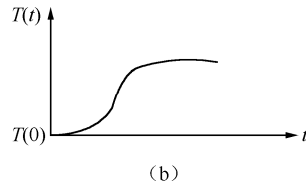


图 1.13 蒸汽加热器



(a)



(b)

图 1.14 自衡的非振荡过程

对于图 1.12 所示的液体储罐，当储罐的进料阀开度增大，使进料量阶跃增加时，原来稳定的液位就会上升。由于出料阀开度未变，随着液位的升高，静压增大，出料流量也增大，因此，液位上升速度逐渐变慢，直到液位达到一个新的稳定位置。显然，这种过程会自发地趋于新的平衡状态。

图 1.13 所示的蒸汽加热器也有类似的特性。当蒸汽阀门开大、流入的蒸汽流量增大时，热平衡被破坏。由于输入热量大于输出热量，多余的热量加热管壁，继而使管内流体温度升高，出口温度也随之上升。这样，随着输出热量的增大，输入、输出热量之差会逐渐减小，流体出口温度的上升速度也逐渐变慢。这种过程最后也能在新的出口温度下自发地建立起新的热量平衡状态。

过程有无自衡特性，取决于过程本身的结构和性质。具有自衡特性的过程比较容易控制。

(2) 无自衡的非振荡过程。该类过程没有自衡能力，它在阶跃输入信号作用下的输出响应曲线无振荡地从一个稳态一直上升或下降，不能达到新的稳态。

例如，如图 1.15 (a) 所示的液体储罐，其出料采用定量泵抽出，当进料阀开度阶跃变化时，液位会一直上升到溢出或下降到排空，而不能重新达到新的平衡状态。其响应曲线如图 1.15 (b) 所示。

具有无自衡的非振荡过程，也可能出现如图 1.16 所示的响应曲线。虽然在阶跃信号作用下无自衡的非振荡过程会不稳定，但组成闭环后，控制系统可以稳定。通常，无自衡过程要比自衡过程难控制一些。

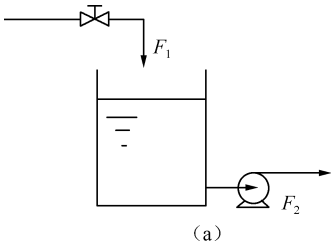


图 1.15 无自衡的非振荡液位过程

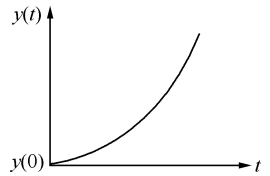
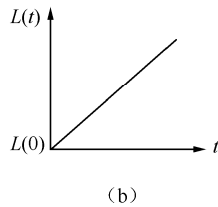


图 1.16 无自衡的非振荡过程

(3) 自衡的振荡过程。该类过程具有自衡能力，在阶跃输入信号作用下，输出响应呈现衰减振荡特性，最终过程会趋于新的稳态值。如图 1.17 所示为该过程的阶跃响应。工业生产过程中这类过程不多见。显然，具有振荡的过程也较难控制。

(4) 具有反向特性的过程。该类过程在阶跃输入信号作用下的开始与终止时出现反向的变化，即输出响应先降后升或先升后降。过程的这种性质称为“反向特性”，如图 1.18 所示。

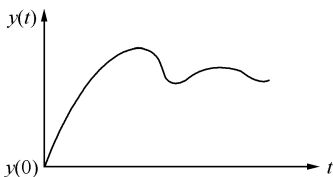


图 1.17 有自衡的振荡过程

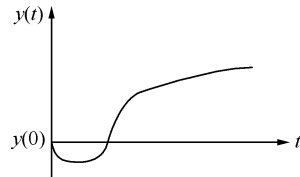


图 1.18 具有反向特性的过程

这类过程的典型例子是锅炉水位。当蒸汽用量阶跃增加时，引起蒸汽压力突然下降，汽包水位由于水的闪急汽化，造成虚假水位上升，但因用汽量的增加，最终，水位反而下降。由于控制器根据水位的上升会作出减少给水量的误操作，因此，控制这类过程最为困难，必须十分谨慎，避免误向控制动作。

## 2. 过程数学模型的建立方法

运用理论分析的方法（机理建模方法）来建立过程的数学模型时，其最基本的方法是根



据过程的内部机理列写各种有关的平衡方程，如物料平衡方程、能量平衡方程、动量平衡方程、相平衡方程，以及某些物性方程、设备特性方程、化学反应定律、电路基本定律等，从而获得过程的数学模型。微分方程是过程数学模型最基本的表示形式。

机理建模的一般步骤如下所述。

(1) 根据过程的结构及工艺生产要求进行基本分析，确定过程的输入变量和输出变量；

(2) 根据过程的内在机理，列写原始方程，如物料平衡和能量平衡方程等；

(3) 消去中间变量，并在工作点处进行线性化处理，简化过程特性，得到只含有输入变量和输出变量增量表示形式的微分方程式；

(4) 将该方程整理成标准形式，即把与输入量有关的各项写在方程式等号的右边，与输出量有关的项写在方程式等号的左边，各导数项按降幂排列，并将方程的系数转化为具有一定物理意义的表示形式，如时间常数等。

如果推导出的过程的数学模型是一阶微分方程式，则称这类过程具有一阶特性，简称一阶过程（或单容过程）；如果数学模型是二阶微分方程式，则称这类过程具有二阶特性，简称二阶过程（或双容过程）；其余类推，也可统称为高阶过程（或多容过程）。

下面分别求取典型一阶和二阶自衡过程的数学模型，由此再推广到过程特性的一般表达式。

### 3. 一阶过程的数学模型

下面以图 1.12 所示的储槽液位过程为例来分析如何建立一阶过程的数学模型。为了便于分析，现将其重画于图 1.19 (a) 中。

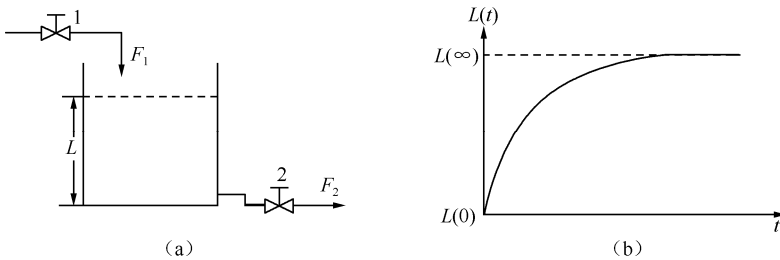


图 1.19 储槽液位过程及其阶跃响应曲线

(1) 确定过程的输入变量和输出变量。图 1.19 (a) 所示的储槽是一个简单的液位过程，流入储槽的流量  $F_1$  是由进料阀 1 来控制的；流出储槽的流量  $F_2$  取决于储槽液位  $L$  和出料阀 2 的开度，而出料阀 2 的开度是随用户需要而改变的。这里，液位  $L$  是被控变量（即输出变量），进料阀 1 为控制系统中的控制阀，它所控制的进料流量  $F_1$  是过程的控制输入（即操纵量），出料流量  $F_2$  是外部扰动。本例仅以进料流量  $F_1$  作为输入变量进行分析。

(2) 根据过程的内在机理，列写原始方程。根据物料平衡关系，当过程处于原有稳定状态时，储槽液位保持不变，其静态方程式为

$$F_{10} - F_{20} = 0 \quad (1.6)$$

式中， $F_{10}$ 、 $F_{20}$  分别为原稳定状态下储槽的进料流量和出料流量。

当进料流量  $F_1$  突然增大（即作阶跃变化）时，储槽原来的平衡状态被破坏，此时进料量大于出料量，多余的液体在储槽内蓄积起来，使其液位升高。设储槽中液体的储存量为  $V$ ，则单位时间内出料流量与进料流量之差等于储槽中液体储存量的净增量。其动态方程式为

$$F_1 - F_2 = \frac{dV}{dt} \quad (1.7)$$

式中,  $F_2 = F_{20} + \Delta F_2$ ,  $F_1 = F_{10} + \Delta F_1$ 。  $\Delta F_1$ 、 $\Delta F_2$  分别为  $F_1$  和  $F_2$  的增量。

设储罐截面积为  $A$ , 则有  $V = AL$ , 其增量形式为  $dV = AdL$ , 即

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dL}{dt} \quad (1.8)$$

将  $F_2 = F_{20} + \Delta F_2$ 、 $F_1 = F_{10} + \Delta F_1$  和式 (1.8) 代入式 (1.7), 得

$$F_{10} + \Delta F_1 - (F_{20} + \Delta F_2) = A \frac{d(L_0 + \Delta L)}{dt}$$

即

$$F_{10} + \Delta F_1 - F_{20} - \Delta F_2 = A \frac{d\Delta L}{dt} \quad (1.9)$$

将式 (1.9) 减去式 (1.6), 可得用增量形式表示的动态方程式, 为

$$\Delta F_1 - \Delta F_2 = A \frac{d\Delta L}{dt} \quad (1.10)$$

(3) 消去中间变量, 简化, 求得微分方程式。所谓中间变量, 就是原始方程式中出现的一些既不是输入变量又不是输出变量的工艺变量。为了获得只含有输出变量和输入变量的微分方程式, 需找出中间变量与输出变量 (或输入变量) 的函数关系, 通过方程联立将中间变量消去。

式 (1.10) 中,  $\Delta F_2$  为中间变量。  $F_2$  与输出变量  $L$  的关系可表示为

$$F_2 = k\sqrt{L} \quad (1.11)$$

式中,  $k$  为比例系数。

可见, 出料流量  $F_2$  与液位  $L$  之间是非线性的函数关系。当只考虑液位与流量均在有限的范围内变化时, 就可以认为出料流量与液位变化呈线性关系。将式 (1.11) 改写成增量形式:

$$\Delta F_2 = \frac{k}{2\sqrt{L_0}} \Delta L$$

令  $\frac{k}{2\sqrt{L_0}} = \frac{1}{R}$ , 则有

$$\Delta F_2 = \frac{\Delta L}{R} \quad (1.12)$$

将式 (1.12) 代入式 (1.10) 中, 即得

$$RA \frac{d\Delta L}{dt} + \Delta L = R\Delta F_1 \quad (1.13)$$

式 (1.13) 即为储罐液位过程的数学模型。可见, 这是一个一阶微分方程, 因此该液位过程为一阶过程。同理, 也可求得当扰动变量 (即出料流量  $F_2$ ) 作用时, 被控液位  $L$  与出料流量  $F_2$  之间的微分方程。

在此, 还需引入“通道”的概念。所谓“通道”, 是指过程输入变量至输出变量的信号联系。控制作用至被控变量的信号联系称为过程的控制通道。扰动作用至被控变量的信号联系称为过程的扰动通道。本例中, 进料流量  $F_1$  与被控液位  $L$  的信号联系即为储罐液位过程的控制通道, 其微分方程见式 (1.13); 而出料流量  $F_2$  与被控液位  $L$  的信号联系则为该液位过