1 自动控制系统概述

1.1 自动化及仪表发展状况

20 世纪 40 年代开始形成的控制理论被称为“ 20 世纪上半叶三大伟绩之一 ”，在人类社会的各个方面有着深远的影响。控制理论与其他任何学科一样，源于社会实践和科学实践。在自动化的发展中，有两个明显的特点：第一，任务的需要、理论的开拓与技术手段的进展三者相互推动，相互促进，显示了一幅交错复杂，但又轮廓分明的画卷，三者间表明出清晰的同步性；第二，自动化技术是一门综合性的技术，控制论更是一门广义的学科，在自动化的各个领域，移植和借鉴起了交流汇合的作用。

自动化技术的前驱，可以追溯到我国古代，如指南车的出现。至于工业上的应用，一般以瓦特的蒸汽机调速器作为正式起点。工业自动化的萌芽是与工业革命同时开始的。这时候的自动化装置是机械式的，而且是自力型的。随着电动、液动和气动这些动力源的应用，电动、液动和气动的控制装置开创了新的控制手段。

到第二次世界大战前后，控制理论有了很大发展。电信事业的发展导致了 Nyquist (1932)频率域分析技术和稳定判据的产生。 Bode(1945 ）的进一步研究开发了易于实际应用的 Bode 图。 1948 年，Evans 提出了一种易于工程应用的求解闭环特征方程根的简单图解方法 ——根轨迹分析方法。至此，自动控制技术开始形成一套完整的，以传递函数为基础，在频率域对单输入单输出（ SISO）控制系统进行分析与设计的理论，这就是今天所谓的古典控制理论。古典控制理论最辉煌的成果之一要首推 PID 控制规律。PID 控制原理简单，易于实现，对无时间延迟的单回路控制系统极为有效，直到目前为止，在工业过程控制中有 80％～90％ 的系统还使用 PID 控制规律。经典控制理论最主要的特点是：线性定常对象、单输入单输出、完成镇定任务。即便对这些极简单对象的描述及控制任务，理论上也尚不完整，从而促使现代控制理论的发展。

20 世纪 60 年代，控制理论迅猛发展，这是以状态空间方法为基础，以极小值原理 (Pontryagin ,1962 ）和动态规划方法（ Bellman， 1963 ）等最优控制理论为特征的，而以采用 Kalman 滤波器的随机干扰下的线性二次型系统（ LOG)(Kalman ，1960)宣告了时域方法的完成。现代控制理论在航天、航空、制导等领域取得了辉煌的成果。现代控制理论中首先得到透彻研究的是多输入多输出系统，其中特别重要的是对描述控制系统本质的基本理论的建立，如可控性、可观性、实现理论、典范型、分解理论等，使控制由一类工程设计方法提高成为一门新的科学。为了扩大现代控制理论的适用范围，相继产生和发展了系统辨识与估计、随机控制、自适应控制以及鲁棒控制等各种理论分支，使控制理论的内容越来越丰富。现代控制理论虽然在航天、航空、制导等领域取得了辉煌的成果，但对于复杂的工业过程却显得无能为力。

从 20 世纪 70 年代开始，为了解决大规模复杂系统的优化与控制问题，现代控制理论和系统理论相结合，逐步发展形成了大系统理论（ Mohammad， 1983)。其核心思想是系统的分解与协调，多级递阶优化与控制（ Mesarovie ，1970)正是应用大系统理论的典范，实际上，大

系统理论仍未突破现代控制理论的基本思想与框架，除了高维线性系统之外，它对其他复杂系统仍然束手无策。对于含有大量不确定性和难于建模的复杂系统，基于知识的专家系统、模糊控制、人工神经网络控制、学习控制和基于信息论的智能控制等应运而生，它们在许多领域都得到了广泛的应用。

从自动控制系统结构来看，已经经历了四个阶段。20 世纪 50 年代是以基地式控制器等组成的控制系统，像自力式温度控制器、就地式液位控制器等，它们功能往往限于单回路控制，时至今日，这类控制系统仍没有淘汰，而且还有了新的发展，但所占的比重大为减少。

20 世纪 60 年代出现单元组合仪表组成的控制系统，单元组合仪表有电动和气动两大类。所谓单元组合，就是把自动控制系统仪表按功能分成若干单元，依据实际控制系统结构的需要进行适当的组合。因此单元组合仪表使用方便、灵活。单元组合仪表之间用标准统一信号联系。气动仪表（QDZ 系列）为 20～100 kPa 气压信号。电动仪表信号为 0～10 mA 直流电流信号(DDZ-Ⅱ 系列）和 4～20 mA 直流电流信号（DDZ-Ⅲ 系列）。单元组合仪表已延续 30 多年，目前国内还广泛应用。由单元组合仪表组成的控制系统，控制策略主要是 PID 控制和常用的复杂控制系统（例如串级、均匀、比值、前馈、分程和选择性控制等）。

20 世纪 70 年代出现了计算机控制系统，最初是直接数字控制（DDC）实现集中控制，代替常规控制仪表。由于集中控制的固有缺陷，未能普及与推广就被集散控制系统（DCS)所替代。DCS 在硬件上将控制回路分散化，数据显示、实时监督等功能集中化，有利于安全平稳生产。就控制策略而言，DCS 仍以简单 PID 控制为主，再加上一些复杂控制算法，并没有充分发挥计算机的功能和控制水平。

20 世纪 80 年代以后出现二级优化控制，在 DCS 的基础上实现先进控制和优化控制。在硬件上采用上位机和 DCS 或电动单元组合仪表相结合，构成二级计算机优化控制。随着计算机及网络技术的发展，DCS 出现了开放式系统，实现多层次计算机网络构成的管控一体化系统(CIPS)。同时，以现场总线为标准，实现以微处理器为基础的现场仪表与控制系统之间进行全数字化、双向和多站通讯的现场总线网络控制系统（FCS)。它将对控制系统结构带来革命性变革，开辟控制系统的新纪元。

当前自动控制系统发展的一些主要特点是：生产装置实施先进控制成为发展主流；过程优化受到普遍关注；传统的 DCS 正在走向国际统一标准的开放式系统；综合自动化系统(CIPS)是发展方向。

1.2 自动控制系统

1.2.1 自动控制系统

生产过程中，对各个工艺过程的物理量（或称工艺变量）有着一定的控制要求。有些工艺变量直接表征生产过程，对产品的数量和质量起着决定性的作用。例如，精馏塔的塔顶或塔釜温度，一般在操作压力不变的情况下，必须保持一定，才能得到合格的产品；加热炉出口温度的波动不能超出允许范围，否则将影响后一工段的效果；化学反应器的反应温度必需保持平稳，才能使效率达到指标。有些工艺变量虽不直接地影响产品的数量和质量，然而保持其平稳却是使生产获得良好控制的前提。例如，用蒸汽加热反应器或再沸器，在蒸汽总压波动剧烈的情况下，要把反应温度或塔釜温度控制好将极为困难；中间储槽的液位高度与气柜压力，必须维持在允许的范围之内，才能使物料平衡，保持连续的均衡生产。有些工艺变量是决定安全生产的因素，例如，锅炉汽包的水位、受压容器的压力等，不允许超出规定的限

度，否则将威胁生产的安全。还有一些工艺变量直接鉴定产品的质量，例如，某些混合气体的组成、溶液的酸碱度等。对于以上各种类型的变量，在生产过程中，都必须加以必要的控制。

图 1-1 所示是工业生产常见的锅炉汽包示意图，其液位是一个重要的工艺参数。液位过低，影响产汽量，且易烧干而发生事故；液位过高，影响蒸汽质量，因此对汽包液位应严加控制。

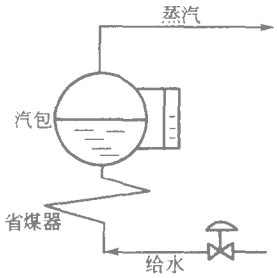


图 1-1 锅炉汽包示意图

如果一切条件（包括给水流量、蒸汽量等）都近乎恒定不变，只要将进水阀置于某一适当开度，则汽包液位能保持在一定高度。但实际生产过程中这些条件是变化的，例如进水阀前的压力变化，蒸汽流量的变化等。此时若不进行控制（即不去改变阀门开度），则液位将偏离规定高度。因此，为保持汽包液位恒定，操作人员应根据液位高度变化情况，控制进水量。

在此，把工艺所要求的汽包液位高度称为设定值；把所要求控制的液位参数称为被控变量或输出变量；那些影响被控变量使之偏离设定值的因素称为扰动作用，如给水量、蒸汽量的变化等，设定值和扰动作用都是系统的输入变量；用以使被控变量保持在设定值范围内的作用称为控制作用。

为了保持液位为定值，手工控制时主要有三步：

①观察被控变量的数值，在此即为汽包的液位；

②把观察到的被控变量值与设定值加以比较，根据二者的偏差大小或随时间变化的情况，作出判断，并发布命令；

③根据命令操作给水阀，改变进水量，使液位回到设定值。

如采用检测仪表和自动控制装置来代替手工控制，就成为自动控制系统。

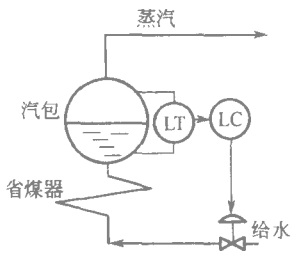


图 1-2 锅炉汽包液位自动控制系统示意图

现以图 1-2 所示的锅炉汽包液位自动控制系统为例，说明自动控制系统的原理。当系统受到扰动作用后，被控变量（液位）发生变化，通过检测仪表得到其测量值 h。在自动控制装置（液位控制器 LC）中，将 h 与设定值 h_0 比较，得到偏差 $e = h - h_0$，经过运算后，发出控制信号，这一信号作用于执行器（在此为控制阀），改变给水量，以克服扰动的影响，使被控变量回到设定值。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对象组成了一个自动控制系统。

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。输出变量通过适当的检测仪表，又送回输入端，并与输入变量相比较，因此称为反馈，二者相加称为正反馈，二者相减称为负反馈。输出变量与输入变量相比较所得的结果叫做偏差，控制装置根据偏差方向、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。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。

1.2.2 闭环控制与开环控制

在反馈控制系统中，被控变量送回输入端，与设定值进行比较，根据偏差进行控制，控制被控变量，这样，整个系统构成了一个闭环，因此称为闭环控制。

闭环控制的特点是按偏差进行控制，所以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，达到被控变量与设定值一致的目的，这是闭环控制的优点。

由于闭环控制系统按照偏差进行控制，所以尽管扰动已经发生，但在尚未引起被控变量变化之前，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，系统会引起剧烈震荡，甚至会使系统失去控制，这些是闭环控制系统的缺点，在自动控制系统的设计和调试过程中应加以注意。

有时亦采用比较简单的开环控制方式，这种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。由于不测量被控变量，也不与设定值相比较，所以系统受到扰动作用后，被控变量偏离设定值，并无法消除偏差，这是开环控制的缺点。

图 1-3 所示是目前数字程序控制机床中广泛应用的精密定位控制系统。这是一个开环控制系统。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，也不将其与控制信号进行比较，系统结构比较简单，但不能保证消除误差。图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，输入端给予一定数量的脉冲。如果因为外界扰动，步进电机多走或少走了几步，系统并不能“觉察”，从而造成误差。

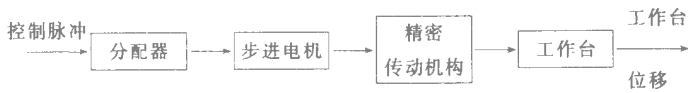


图 1-3　精密定位开环控制系统方框图

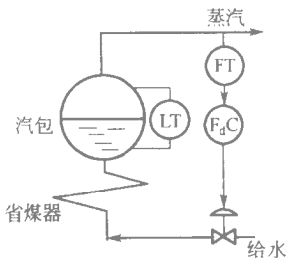


图 1-4　开环液位控制系统

图 1-4 所示是开环的液位控制系统。这里是根据扰动信号（蒸汽流量）来控制给水量。这种开环控制仅在蒸汽扰动信号对液位影响时，才进行补偿，而对其他影响液位的扰动无控制作用。因此，不能保证液位无误差。

依据扰动作用进行控制的系统，虽然不一定能消除偏差，但是也有突出的优点，即控制作用不需等待偏差产生，控制很及时，对于较频繁的主要扰动能起到补偿的效果。这种系统称为前馈控制系统。所用的控制装置 F_dC 称为前馈控制器。

综上所述，开环控制与闭环控制各有特点，应根据各种不同的情况和要求，合理选择适当的方式。前馈-反馈控制系统就是开环与闭环控制的组合形式，在不少情况下可获得很好的效果。

1.2.3　自动控制系统的组成及方框图

在研究自动控制系统时，为了更清楚地表示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。图 1-5 所示是自动控制系统的方框图。每个方框表示组成系统的一个环节，两个方框之间用带箭头的线段表示信号联系；进入方框的信号为环节输入，离开方框的为环节输出。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。

图 1-5 所示方框图采用下列符号：

$r(t)$　设定值；

$y(t)$　测量值；

$e(t)$）偏差，$e(t)=r(t)-y(t)$；

$u(t)$ 控制作用（控制器输出）；

$c(t)$）被控变量；

$q(t)$）操纵变量；

$f(t)$）扰动。

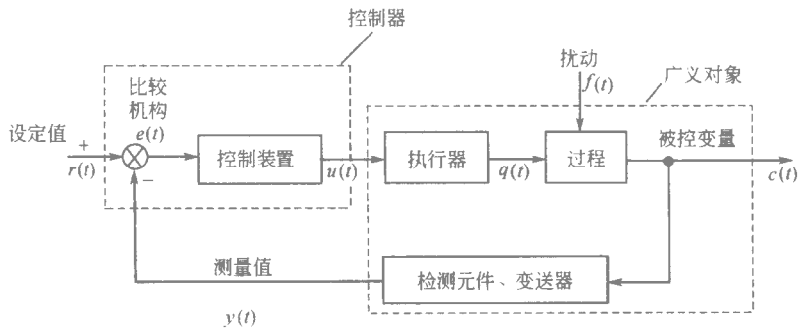


图 1-5 闭环控制系统组成

检测元件和变送器的作用是把被控变量 $c(t)$转化为测量值 $y(t)$。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).

比较机构的作用是比较设定值 $r(t)$与测量值 $y(t)$并输出其差值。在自动控制系统分析中，把 $e(t)$定义为$[r(t)-y(t)]$。然而在仪表制造行业中，却把$[y(t)-r(t)]$作为偏差，两者的符号恰好相反。

控制装置的作用是根据偏差的正负、大小及变化情况，按某种预定的控制规律给出控制作用 $u(t)$。

比较机构和控制装置通常组合在一起，称为控制器。目前应用最广的控制器是气动和电动控制器，它们的输出 $u(t)$也是统一的气压或电流信号。

执行器的作用是接受控制器送来的 $u(t)$，相应地去改变操纵变量 $q(t)$。最常用的执行器是气动薄膜控制阀，在采用电动控制器的场合，控制器的输出 $u(t)$还需经电-气转换器将统一的电流信号转换成统一的气压信号。

系统中控制器以外的各部分组合在一起，即过程、执行器、检测元件与变送器的组合称为广义对象。

在分析控制系统的工作过程时，有以下几个很重要的概念。

① 信息的概念 图 1-5 中的 $r(t),y(t),e(t),u(t),q(t),c(t)$和 $f(t)$尽管是实际的物理量，然而它们是作为信息来转换和作用的。图 1-5 中的箭头方向表示信息的流向。对于图 1-6 中的两个液位控制系统，图 1-6（a） 的操纵变量是进入量，图 1-6（b） 的操纵变量是流出量。作为物料流动方向来看，两者有进、出之分；但作为信息来看，它们都是作用于过程，使液位发生变化的输入信号，因此信息流的流向是相同的。图 1-5 中的每一个部分称为一个环节，作用于它的信息称为该环节的输入信号，它送出的信息称为输出信号。上一环节的输出信号就是下一环节的输入信号。每一环节的输出信号与输入信号之间的关系仅仅取决于该环节的特性。从整个系统来看，设定值和扰动是输入信号，被控变量或其测量值是输出

信号。

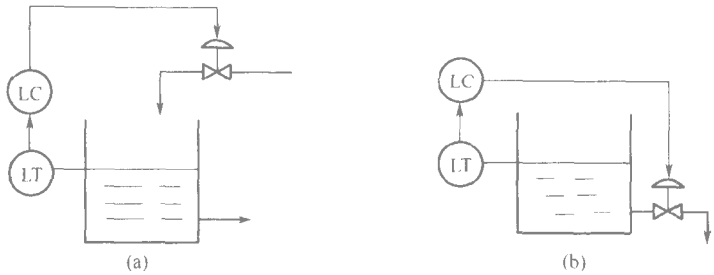


图 1-6　两个液位控制系统

②闭环的概念在方框图中，任何一个信息沿着箭头方向前进，最后又回到原来的起点，构成一个闭合回路，这种系统称为闭环系统。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 $y(t)$ 送回到输入端与设定值 $r(t)$ 进行比较而形成的，所以闭环一定要有反馈。

③动态的概念　$r(t),y(t),e(t),u(t),q(t),c(t)$ 和 $f(t)$ 都是时间函数，它们随时间而变，是不断运动的，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。扰动与控制构成一对主要矛盾时，被控变量则处于不断运动之中。

1.2.4　自动控制系统的分类

自动控制系统的分类方法有多种，这里按设定值的不同情况，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（为一恒定值）的反馈控制系统称为定值控制系统。这类系统在工业生产中得到广泛的应用，例如各种温度、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。

图 1-7(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，则通过电阻丝的电流将产生变化，使恒温箱得到不同的温度。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。结果使偏差减少，直到温度达到设定值为止，系统的方框图如图 1-7(b) 所示。

（2）随动控制系统

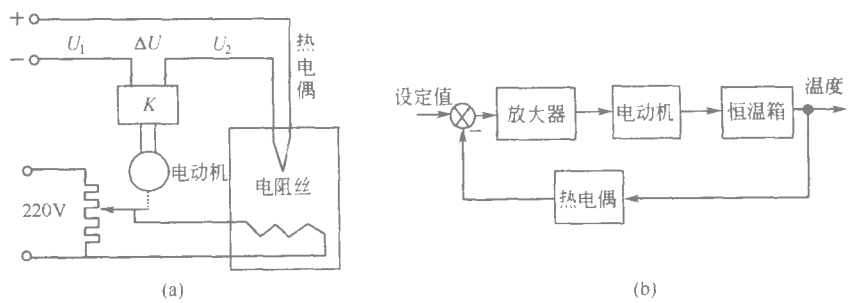


图 1-7　恒温箱温度控制系统

这类控制系统的特点是设定值不断变化，且事先是不知道的，并要求系统的输出（被控变量）随之而变化。例如雷达跟踪系统。各类测量仪表中的变送器本身亦可以看做是一个随动控制系统，它的输出（指示值）应迅速和正确地随着输入（被测量值）而变化。

图 1-8(a)所示是自动平衡电子电位差计示意图。电动平衡电子电位差计实际上是一种电压转换器，将被测电压转换成角位移，通过传动机构显示出来。其动作原理是：被测电压与滑线电阻上的反馈电压相比较，其偏差经放大器放大，由可逆电机移动滑线电阻活动触点，改变反馈电压，使之与被测电压相平衡，同时通过传动机构使被测电压显示出来。只要被测电压发生变化，就有偏差进入放大器，系统就会动作，直到被测电压与反馈电压平衡为止。其方框图如图 1-8(b)所示。显然，自动平衡电子电位差计是一个典型的随动系统，它的输出跟随输入变化，输出与输入之间存在着单值比例关系。

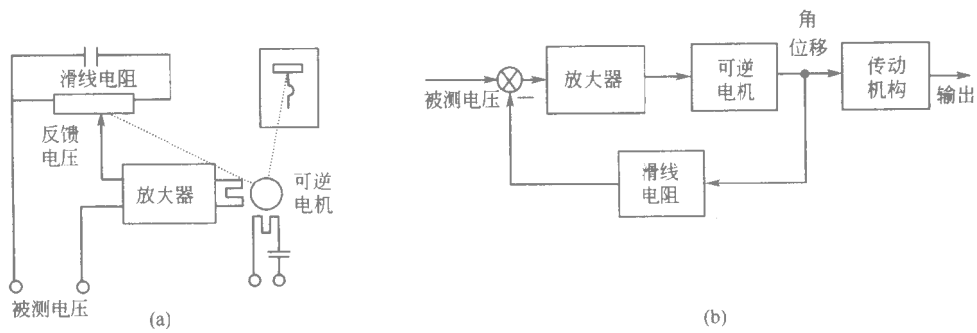


图 1-8　自动平衡电子电位差计示意图及方框图

图 1-9(a）是工业生产中常用的比值控制系统。生产上要求将物料 F_2 与物料 F_1 配成一定比例送至下一工序。物料 F_1 代表生产负荷，经常发生变化。若 F_1 发生变化，F_2 也需随之发生变化，使保持 F_2/F_1 比值不变。为了满足这个要求，就组成了图 1-9(a)的比值控制系统，其动作原理是：当 F_1 发生变化时，F_1 经测量变送，并乘以某一比例系数 K 后，作为物料 F_2 控制器 FC 的设定值。此时由于设定值变化而产生偏差，使 FC 动作，从而改变 F_2 使之与 F_1 的比值保持不变；若由于 F_2 本身变化时，由测量变化而产生偏差使 FC 动作，控制 F_2 使之恢复到原值，从而保持比值不变。图 1-9(b)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。

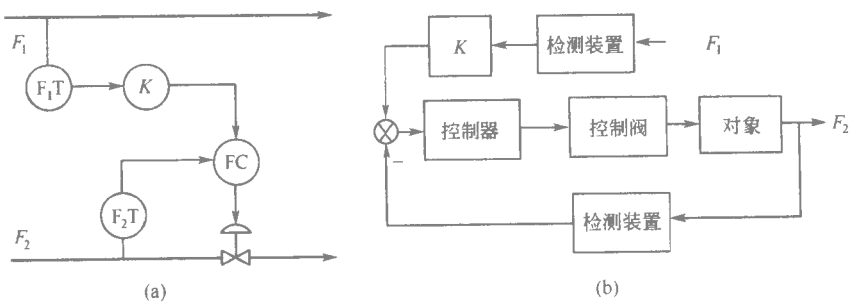


图 1-9　比值控制系统示意图及方框图

（3）程序控制系统

这类控制系统的设定值也是变化的，但它是一个已知的时间函数，即根据需要按一定时间程序变化，例如程序控制机床、冶金工业中退火炉的温度控制等。

图 1-10 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，山时钟机构和凸轮产生），并与热电偶所产生的热电动势 U_1 比较。若 $U_1 \neq U_0$，则放大器输入端有偏差电压 $U=U_0-U$；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，使电炉内温度发生变化，直至 $U_0=U_1$ 为止。此时放大器将无偏差电压输入，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，使热电动势 U_1 时时跟踪 U_0。

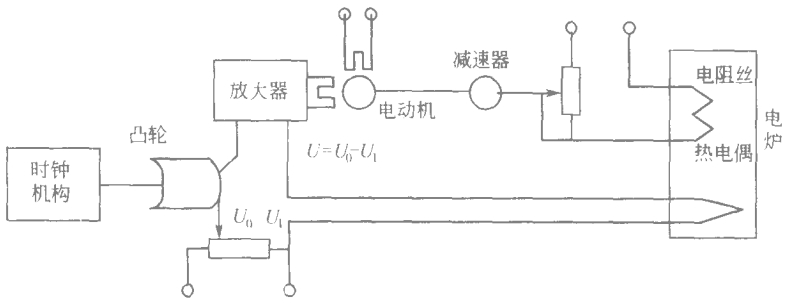


图 1-10 电炉炉温程序控制系统示意图

1.3 自动控制系统的过渡过程及品质指标

1.3.1 静态与动态

自动控制系统的输入有两种，其一是设定值的变化或称设定作用，另一个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，这种状态称为静态或定态。例如前述锅炉汽包液位系统中，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。这里所说的静态，并非指系统内没有物料与能量的流动，而是指各个参数的变化率为零，即参数保持不变。此时输出与输入之间的关系称为系统的静态特性。

同样，对于任何一个环节来说，也存在静态。在保持平衡时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；对象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；控制装置和执行器的静态特性对控制品质有显著的影响。

假若一个系统原来处于静态，由于出现了扰动，即输入起了变化，系统的平衡受到破坏，被控变量（即输出）发生变化，自动控制装置就会动作，进行控制，以克服扰动的影响，力图使系统恢复平衡。从输入开始，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化的过程之中，这种状态称为动态。另一方面，在设定值变化时，也引起动态过程，控制装置力图使被控变量在新的设定值或其附近建立平衡。总之，由于输入的变化，输出随时间而变化，其间的关系称为系统的动态特性。

同样，对任何一个环节来说，当输入变化时，也引起输出的变化，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。

1.3.2 自动控制系统的过渡过程

当自动控制系统的输入发生变化后，被控变量（即输出）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。也就是系统从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态的过程。

对于一个稳定的系统（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，常以阶跃作用为输入时的被控变量的过渡过程为例，因为阶跃作用很典型，实际上也经常遇到，且这类输入变化对系统来讲是比较严重的情况。如果一个系统对这种输入有较好的响应，那么对其他形式的输入变化就更能适应。

定值控制系统的过渡过程几种形式如图 1-11 所示。图 1-11(a) 是发散振荡，被控变量一直处于振荡状态，且振幅逐渐增加。图 1-11(b)是单调发散，被控变量虽不振荡，但偏离原来的静态点越来越远。以上两种形式都属于不稳定，而系统稳定是正常工作的前提。图 1-11(c) 是等幅振荡，亦称中性，处于稳定与不稳定的边界，这种系统在一般情况下不采用。图 1-11(d)是衰减振荡，图 1-11(e) 是单调衰减，这两种形式都是稳定的，即受到扰动作用后，经过一段时间，最终能趋于一个新的平衡状态，故这两种形式是可以采用的。

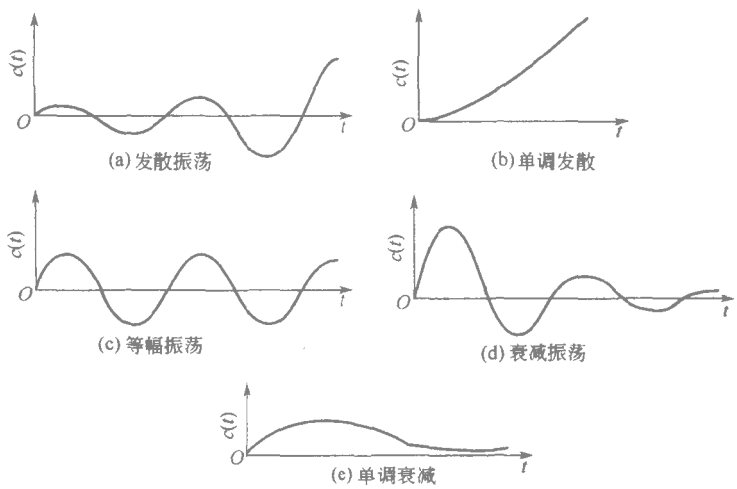


图 1-11 定值控制系统的过渡过程几种形式

稳定的随动系统过渡过程如图 1-12 所示。

1.3.3 自动控制系统的品质指标

图 1-13 是定值控制系统和随动控制系统在阶跃作用下的过渡过程响应曲线。一个控制系统在受到外作用时，要求被控变量要平稳、迅速和准确地趋近或恢复到设定值。因此，在稳定性、快速性和准确性三个方面提出各种单项控制指标和综合性控制指标。这些控制指标仅适用于衰减振荡过程。

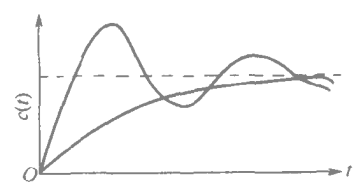


图 1-12 稳定的随动系统过渡过程

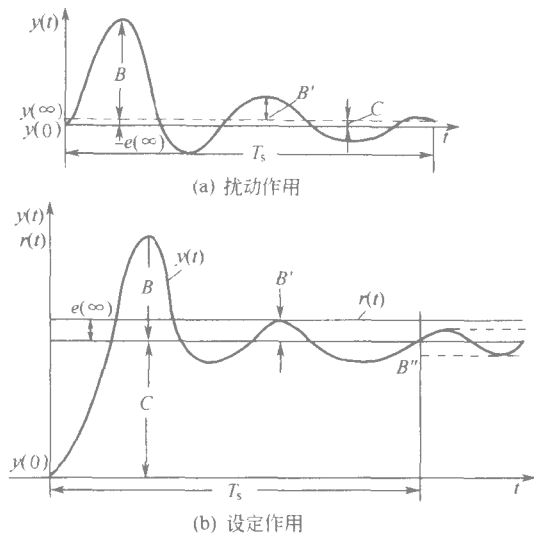


图 1-13 过渡过程控制指标示意图

(1) 单项控制指标

①衰减比 n 衰减比是衡量过渡过程稳定性的动态指标，它的定义是第一个波的振幅与同方向第二个波的振幅之比。在图 1-13 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 $n=B/B'$。显然，对衰减振荡而言，n 恒大于 1。n 越小，意味着控制系统的振荡过程越剧烈，稳定度也越低，n 接近于 1 时，控制系统的过渡过程接近于等幅振荡过程；反之，n 越大，则控制系统的稳定度也越高，当 n 趋于无穷大时，控制系统的过渡过程接近于非振荡过程，衰减比究竟以多大为合适，没有确切的定论，根据实际操作经验，为保持足够的稳定裕度，一般希望过渡过程有两个波左右，与此对应的衰减比在 4:1 到 10:1 的范围内。也有人用衰减率来反映衰减情况，$\eta=(B-B')/B$。$n=4:1$ 相当于 $\eta=0.75$；$n=10:1$ 相当于 $\eta=0.90$

②最大动态偏差 e_{max} 或超调量 σ 最大动态偏差或超调量是描述被控变量偏离设定值最大程度的物理量，也是衡量过渡过程稳定性的一个动态指标。对于定值控制系统，过渡过程的最大动态偏差是指被控变量第一个波的峰值与设定值之差，如图 1-13(a)中的 $|e_{max}|=|B+C|$。在设定作用下的控制系统（随动控制系统）中，通常采用超调量这个指标来表示被控变量偏离设定值的程度，它的定义是第一个波的峰值与最终稳态值之差，见图 1-13(b)中的 B。一般超调量以百分数给出，即

$$\sigma=\frac{B}{C}\times 100\%$$

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。对于某些工艺要求比较高的生产过程，例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，这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余差 $e(\infty)$ 余差是控制系统过渡过程终了时设定值与被控变量稳态值之差，即 $e(\infty)=r-y(\infty)$。图 1-13(a) 是定值控制系统的过渡过程，其余差以 C 表示，即 $y(t)$ 的最终值 $y(\infty)$。图 1-13(b) 是随动控制系统的过渡过程，余差为 $r-y(\infty)=r-C$，C 是 $y(t)$

的最终值。余差是反映控制准确性的一个重要稳态指标，一般希望其为零，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。

④回复时间 T_s 和振荡频率 ω　回复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，被控变量从原有稳态值达到新的稳态值所需要的时间。严格地讲，控制系统在受到外作用后，被控变量完全达到最终稳态值需要无限长时间。但实际上当被控变量的变化幅度衰减到足够小，并保持在一个极小的范围内所需要的时间还是有限的。对于输入作用下的控制系统，被控变量进入工艺允许的稳态值所需要的时间称回复时间。对于设定作用下的控制系统（即随动控制系统），被控变量进入稳态值附近 $\pm 5\%$ 或 $\pm 3\%$ 的范围内所需要的时间称为回复时间。回复时间短，表示控制系统的过渡过程快，即使扰动频繁出现，系统也能适应；反之，回复时间长，表示控制系统的过渡过程慢。显然，回复时间越短越好。它是反映控制快速性的一个指标。

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。因此振荡频率也可作为衡量控制快速性的指标，定值控制系统常用振荡频率来衡量控制系统的快慢。

必须说明，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。高标准地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

由于过渡过程中动态偏差越大，或是回复时间越长，则控制品质越差。所以综合控制指标采用积分鉴定的形式。

$$J = \int_0^\infty f(e,t)\mathrm{d}t \tag{1-1}$$

式中，J 为积分鉴定值；e 为动态偏差；t 为回复时间。

通常采用三种表达形式。

①平方积分鉴定 ISE

$$f(e,t) = e^2, \quad J = \int_0^\infty e^2\mathrm{d}t \tag{1-2}$$

②绝对值积分鉴定 IAE

$$f(e,t) = |e|, \quad J = \int_0^\infty |e|\mathrm{d}t \tag{1-3}$$

若用动态偏差 e 作为 $f(e,t)$ 函数，正、负偏差将相互抵消。即使 e 值很大或剧烈波动，J 值仍然可以很小，所以用 e^2 或 $|e|$，一般用于评定定值控制系统质量指标。

③时间乘以绝对值的积分鉴定 ITAE

$$f(e,t) = |e|t, \quad J = \int_0^\infty |e|t\mathrm{d}t \tag{1-4}$$

上式是为了突出快速性的要求，一般用于随动控制系统的质量指标评定。

对于有余差的系统，存在 $e(\infty)$，三种形式的积分鉴定值 J 都将趋于无穷大，无法鉴定系统的控制质量，为此采用 $e(t) - e(\infty)$ 作为动态偏差项代入。

自动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，特别是过程的特性。自动控制装置应按过程的特性加以适当的选择和调整，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，或在控制系统运行过程中自动控制装置的性能或过程的特性发生变化，都会影响到自动控制系统的控制质量，这些这些问题在控制系统的设计运行过程中都应该充分注意。

思考题与习题 1

1-1 闭环控制系统与开环系统控制有什么不同？

1-2 什么是负反馈，为什么自动控制系统要采用负反馈？

1-3 按设定值的不同，自动控制系统可分为哪几类？

1-4 自动控制系统主要由哪些部分组成？

1-5 自动控制系统的单项控制指标有哪些？

1-6 结合所学专业，画出一个自动控制系统的实际例子。

2 过程特性

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，才能得心应手地操作，使工艺生产在最佳状态下进行。在自动控制系统中，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。特别在设计新型的控制方案时，例如前馈控制、解耦控制、时滞补偿控制、预测控制、软测量技术及推断控制、自适应控制、计算机最优控制等，多数都要涉及到过程的数学模型，更需要考虑过程特性。

2.1 过程特性的类型

所谓过程特性，是指当被控过程的输入变量（操纵变量或扰动变量）发生变化时，其输出变量（被控变量）随时间的变化规律。过程各个输入变量对输出变量有着各自作用途径，将操纵变量 $q(t)$ 对被控变量 $c(t)$ 的作用途径称为控制通道，而将扰动 $f(t)$ 对被控变量 $c(t)$ 的作用途径称为扰动通道。在研究过程特性时对控制通道和扰动通道都要加以考虑。

广义对象特性可以通过控制作用 $u(t)$ 作阶跃变化（扰动 $f(t)$ 不变）时被控变量的时间特性 $c(t)$，以及扰动 $f(t)$ 作阶跃变化（控制作用 $u(t)$ 不变）时被控变量的时间特性 $c(t)$ 来获得。用图形表示时，前者称为控制通道的响应曲线，后者称为扰动通道的响应曲线。

响应曲线可分为四种类型。

(1) 自衡的非振荡过程

在阶跃作用下，被控变量不经振荡，逐渐向新的稳态值靠拢，称自衡的非振荡过程。图 2-1 所示的液体储槽中的液位高度 h 和图 2-2 所示的蒸汽加热器出口温度 θ 都具有这种特性，其响应曲线示于图 2-3(a)，图 2-3(b)。

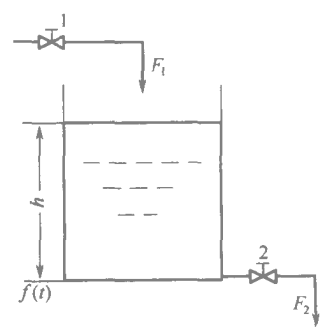


图 2-1 有自衡的液位过程

在图 2-1 中，当进料阀开度增大、进料量增加时，破坏了储槽原有的物料平衡状态。由于进料多于出料，多余的液体在储槽内蓄积起来，使储槽液位升高。随着液位的上升，出料量也因静压头的增加而增大。这样进、出料量之差会逐渐减小，液位上升速度也逐渐变慢，最后当进、出料量相等时，液位也就稳定在一个新的位置上。显然这种过程会自发地趋于新的平衡状态。

图 2-2 所示蒸汽加热器也有类似的特性。当蒸汽阀门开大，流入蒸汽流量增大时，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。

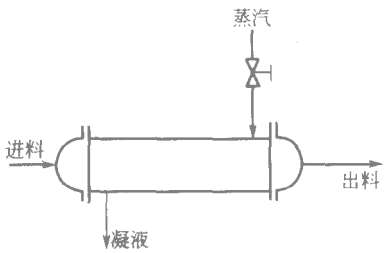


图 2-2　蒸汽加热器

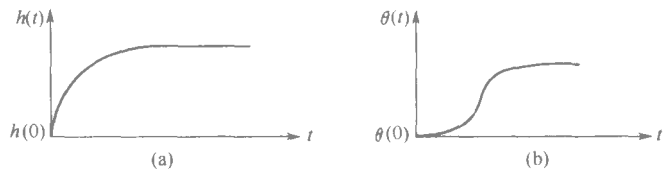


图 2-3　自衡的非振荡过程

这种过程在化工自动控制系统中最为常见，而且也比较容易控制。

（2）无自衡的非振荡过程

这类过程在阶跃作用下，被控变量会一直上升或下降，直到极限值。图 2-4（a）所示也是一个液体储槽，它与图 2-1 所示的液体储槽差别在于出料不是用阀门节流，而是用定量泵抽出，因此当进料量增加后，液位的上升不会影响出料量。当进料量作阶跃变化后，液位等速上升，不能建立起新的物料平衡状态，其响应曲线见图 2-4（b）所示。

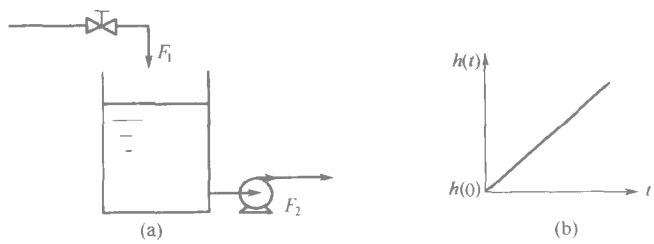


图 2-4　无自衡的非振荡液位过程

具有无自衡的非振荡过程，也可能出现如图 2-5 所示的响应曲线。通常无自衡过程要比自衡过程难控制一些。

（3）自衡的振荡过程

在阶跃作用下，被控变量出现衰减振荡过程，最后能趋向新的稳态值，称自衡的振荡过程，见图 2-6。这类过程不多见。显然具有振荡的过程也较难控制。

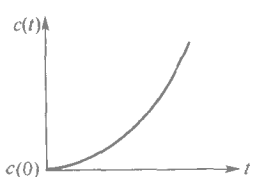


图 2-5　无自衡的非振荡过程

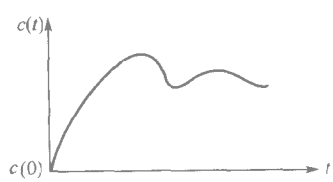


图 2-6　有自衡的振荡过程

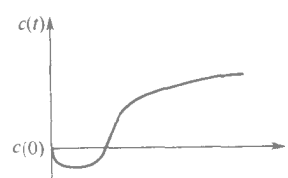


图 2-7　具有反向特性的过程

（4）具有反向特性的过程

有少数过程会在阶跃作用下，被控变量先降后升，或先升后降，即起始时的变化方向与最终的变化方向相反，出现图 2-7 所示的反向特性，例如锅炉水位控制。处理这类过程必须十分谨慎，要避免误向控制动作。

在以上介绍的 4 种不同类型的过程中，以有自衡非振荡过程最为多见。

2.2 过程的数学描述

在研究被控过程特性时通常必须将具体过程的输入、输出关系用数学方程式表达出来，这种数学模型又称为参量模型。数学方程式有微分方程式、偏微分方程式、状态方程等形式。建立数学模型最基本的方法是根据被控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，从而获得被控过程的数学模型。这种建立数学模型的方法称为机理建模方法，所建立的数学模型又称为机理模型。

图 2-8 为直接蒸汽加热器的示意图。图中 θ_a 为热物料出口温度，F_a 为热物料流量，Q_a 为热物料在单位时间内带走的热量；θ_c 为冷物料进口温度，F_c 为冷物料流量，Q_c 为热物料在单位时间内带入的热量；Q_s 为加热蒸汽在单位时间内带入的热量。由于蒸汽相对于冷物料的耗用量较少，当过程处于原有稳定状态时，可近似认为 $F_{c0}=F_{a0}=F_0$。若物料的比热容为 c，近似作常数处理，且忽略热损，单位时间内输入过程的热量必等于单位时间内输出过程的热量，即

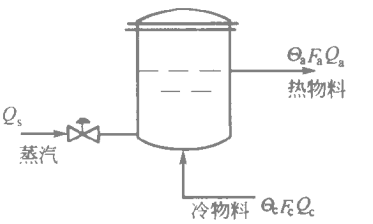


图 2-8 传热过程示意图

$$Q_{s0}+cF_0\theta_{c0}=cF_0\theta_{a0} \tag{2-1}$$

在这一传热过程中，把加热蒸汽量作为操纵变量比较容易确定，而扰动则可以是冷物料的进口温度、流量、成分的变化，这里暂且假定为冷物料进口温度的变化。

当加热蒸汽带入的热量和冷物料温度作阶跃增加时，必将导致过程蓄热量的变化，其热量平衡方程为

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}&=Q_s+Q_c-Q_a\\&=Q_{s0}+\Delta Q_s+cF_0(\theta_{c0}+\Delta\theta_c)-cF_0(\theta_{a0}+\Delta\theta_a)\\&=\Delta Q_s-cF_0\Delta\theta_a+cF_0\Delta\theta_c\end{aligned} \tag{2-2}$$

式中，$\mathrm{d}Q/\mathrm{d}t$ 为过程蓄热量的变化率；ΔQ_s 为加热蒸汽热量的增量；$\Delta\theta_a$ 为热物料出口温度的增量；$\Delta\theta_c$ 为冷物料进口温度的增量。

若过程总的热容量用 C 表示，则过程的蓄热量 Q 为

$$Q=C\theta_a=C(\theta_{a0}+\Delta\theta_a) \tag{2-3}$$

于是

$$C\frac{\mathrm{d}\Delta\theta_a}{\mathrm{d}t}+cF_0\Delta\theta_a=\Delta Q_s+cF_0\Delta\theta_c \tag{2-4}$$

将上式两边除以 cF_0，得

$$\frac{C}{cF_0}\frac{\mathrm{d}\Delta\theta_a}{\mathrm{d}t}+\Delta\theta_a=\frac{1}{cF_0}\Delta Q_s+\Delta\theta_c \tag{2-5}$$

令 $\dfrac{1}{cF_0}=R$，$RC=T$，则有

$$T\frac{\mathrm{d}\Delta\theta_a}{\mathrm{d}t}+\Delta\theta_a=R\Delta Q_s+\Delta\theta_c \tag{2-6}$$

若 $\Delta\theta_c=0$，则得过程控制通道的动态方程

$$T\frac{d\Delta\theta_a}{dt}+\Delta\theta_a=R\Delta Q_s \tag{2-7}$$

若 $\Delta Q_s=0$，则得过程扰动通道的动态方程

$$T\frac{d\Delta\theta_a}{dt}+\Delta\theta_a=\Delta\theta_c \tag{2-8}$$

式（2-7）或式（2-8）中，T 为传热过程控制通道或扰动通道的时间常数；R 为传热过程控制通道的放大系数。

由传热过程的分析可得：一阶被控过程控制通道的动态方程为

$$T_0\frac{d\Delta c(t)}{dt}+\Delta c(t)=K_o\Delta q(t) \tag{2-9}$$

一阶被控过程扰动通道的动态方程为

$$T_f\frac{d\Delta c(t)}{dt}+\Delta c(t)=K_f\Delta f(t) \tag{2-10}$$

式（2-9）、式（2-10）中，T_0,T_f,K_0 和 K_f 分别为控制通道、扰动通道的时间常数和放大系数；$\Delta c(t),\Delta q(t),\Delta f(t)$分别为被控变量增量、操纵变量增量和扰动变量增量。如果控制通道存在纯滞后时间 τ_0，则式（2-9）中的$q(t)$改成 $q(t-\tau_0)$。

对时域信号进行拉氏变换（拉氏变换时将导数项变为 s，积分项变为 $1/s$），这样式(2-9)、式(2-10)可写成

$$(T_os+1)C(s)=K_oQ(s) \tag{2-11}$$

$$(T_f+1)C(s)=K_fF(s) \tag{2-12}$$

输出变量拉氏变换 $C(s)$与输入变量拉氏变换 $Q(s)$(或 $F(s)$)之比称为传递函数。因此一阶过程控制通道的传递函数为

$$G_p(s)=\frac{C(s)}{Q(s)}=\frac{K_o}{T_os+1} \tag{2-13}$$

扰动通道的传递函数为

$$G_f(s)=\frac{C(s)}{F(s)}=\frac{K_f}{T_fs+1} \tag{2-14}$$

2.3 过程特性的一般分析

描述有自衡非振荡过程的特性参数有放大系数 K、时间常数 T 和时滞 τ。下面结合一些实例分别介绍 K,T,τ 的意义。

2.3.1 放大系数 K

以直接蒸汽加热器为例，冷物料从加热器底部流入，经蒸汽直接加热至一定温度后，由加热器上部流出送到下道工序。这里，热物料出口温度即为被控变量 $c(t)$（或被控变量的测量值 $y(t)$），加热蒸汽流量即为操纵变量 $q(t)$，而冷物料入口温度或冷物料流量的变化量即为扰动 $f(t)$，见图 2-9（考虑控制作用时，图中 $F(t)$即为 $q(t)$，而考虑扰动作用时，图中 $F(t)$为 $f(t)$）。

由于被控变量 $c(t)$ 受到控制作用（控制通道）和扰动作用（扰动通道）的影响，因而过程的放大系数乃至其他特性参数也将从这两个方面来分析介绍。

（1）**控制通道放大系数** K_o。

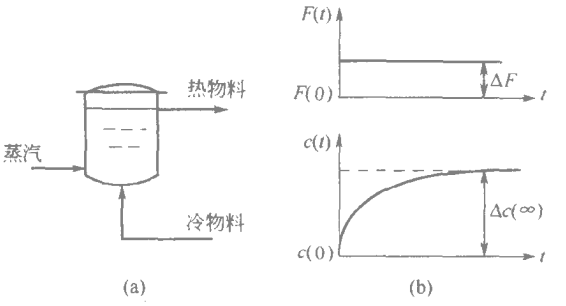


图 2-9　直接蒸汽加热器及其阶跃响应曲线

设过程处于原有稳定状态时，被控变量为 $c(0)$，操纵变量为 $q(0)$。当操纵变量（本例中的蒸汽流量）作幅度为 Δq 的阶跃变化时，必将导致被控变量的变化（如图 2-9(b)所示），且有 $c(t)=c(0)+\Delta c(t)$(其中 $\Delta c(t)$ 为被控变量的变化量），则过程控制通道的放大系数 K。即为被控变量的变化量 Δc 与操纵变量的变化量 Δq 在时间趋于无穷大时之比，即

$$K_o=\frac{\Delta c(\infty)}{\Delta q}=\frac{c(\infty)-c(0)}{\Delta q} \tag{2-15}$$

式中，$\Delta c(\infty)$）为过程结束时被控变量的变化量。

上式表明，过程控制通道的放大系数 K。反映了过程以初始工作点为基准的被控变量与操纵变量在过程结束时的变化量之间的关系，是一个稳态特性参数。所谓初始工作点，即过程原有的稳定状态。若把过程的生产能力或处理量称为负荷，则初始工作点将取决于过程的负荷以及操纵变量的大小。例如对蒸汽加热器而言，在某一处理量下，蒸汽量不同，达到平衡的出口温度也不同。反之，在蒸汽量相同，处理量不同的情况下，出口温度也不一样，其间的关系见图 2-10。实际生产中线性过程并不多见，如不同的负荷或工作点下，过程的放大系数 K。并不相同，由图 2-10 可见，在相同的负荷下，K。将随工作点的增大而减少，例如 A,B,C 三点（对随动控制系统而言）；在相同的工作点下，K。也将随负荷的增大而减小，例如 D,A,E 三点（对定值控制控制系统而言）。

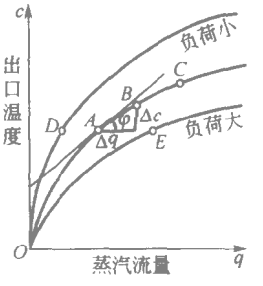


图 2-10　蒸汽加热器的稳态特性

从自动控制系统的角度看，必须着重了解 K。的数值和变化情况。

操纵变量 $q(t)$ 对应的放大系数 K。的数值大，说明控制作用显著，因而，假定工艺上允许有几种控制手段可供选择，应该选择 K。适当大一些的，并以有效的介质流量作为操纵变量。当然，比较不同的放大系数时应该有一个相同的基准，就是在相同的工作点下操纵变量都改变相同的百分数。

由于控制系统总的放大系数 K 是广义对象放大系数和控制器放大系数 K_c 的乘积，在系统运行过程中要求 K 恒定才能获得满意的控制过程。一般来说 K。较大时，取 K_c 小一些；而 K。较小时，取 K_c 大一些。

(2) 扰动通道放大系数 K_f

在操纵变量 $q(t)$ 不变的情况下，过程受到幅度为 Δf 的阶跃扰动作用，过程从原有稳定状态达到新的稳定状态时被控变量的变化量 $\Delta c(\infty)$ 与扰动幅度 Δf 之比称为扰动通道的