

第49篇 生产过程自动控制系统

主编单位:

国家仪器仪表总局重庆工业自动化仪表研究所

编写单位:

第一机械工业部机械工业自动化研究所
浙江大学

主 编:

程与仁

编 写 人:

王永初 吕勇哉 戴绪愚 易受长

15291/2702

常用符号表

B ——过渡过程的峰值	R ——阻力系数
C ——容量系数	r ——给定值
c ——被控量	s ——拉普拉斯变换算子
D ——微分调节规律	T ——时间常数
d ——比重、密度、干扰	T_d ——微分时间
e ——偏差、误差	T_p ——振荡周期、操作周期
$e(\infty)$ ——稳态偏差、静态偏差	T_i ——积分时间
f ——频率	t ——时间
G ——质量流量	t_s ——调整时间
$G(j\omega)$ ——频率特性函数	u ——系统的输入
$G(s)$ ——传递函数	$u(t)$ ——单位阶跃函数
h ——物位	Δ ——延迟时间
$h(t)$ ——单位阶跃反应函数	δ ——比例带
I ——积分调节规律	θ ——温度
K ——放大系数	$\delta(t)$ ——单位脉冲函数
M_p ——频率特性中最大增益比	σ ——最大百分率超调量
m ——调节器的输出、执行机构位移	τ ——纯滞后时间
P ——比例调节规律	φ ——相角差、极值控制的输出指标
PI ——比例积分调节规律	ψ ——衰减率
PID ——比例积分微分调节规律	ω ——角频率
p ——压力	ω_c ——截止频率
Q ——体积流量、热量	ω_r ——谐振频率
检测、调节、控制图形符号另见附录	

第1章 概 述

1 生产过程自动控制

在冶金、石油、化工、电力、机械、轻工、建材等工业部门中,经常需对表征生产过程的温度、压力、流量、物位、成分、pH 值等物理量和化学量按工艺要求进行控制。如用自动化仪表、自动装置、工业控制机来代替人工实现这种控制,称为生产过程自动控制。其主要作用是:

(1) 保证生产过程稳定,防止事故发生(或扩大),特别是在高温、高压、易燃、易爆、剧毒和腐蚀介质的场合;

(2) 保证产品质量;

(3) 节约原料,减小能量消耗,降低产品成本;

(4) 提高劳动生产率,充分发挥生产设备能力;

(5) 减轻劳动强度,改善工作条件。

尤其近期以来,工业生产不断采用新工艺、新设备,如钢铁厂的大型转炉吹氧炼钢、连铸连轧生产线、电厂的高参数大型直流锅炉、石油化工厂的石油气裂解生产乙烯新工艺等,要保证生产安全稳定,保证产品质量,对操作提出了更严格的要求,生产过程自动控制的必要性就更为明显,成为大型成套设备不可缺少的组成部分。

实践证明,在原有企业结合工艺、设备的技术改造,采用自动控制,其效果也很显著。

因此,实现生产过程自动控制对发展我国国民经济,提高工业生产技术水平,加速实现工业、农业、国防和科学技术现代化有很重要的意义。

2 生产过程自动控制系统的组成

以加热器的温度控制系统为例,自动控制系统的组成见流程图(图 49.1-1)和方框图(图 49.1-2)

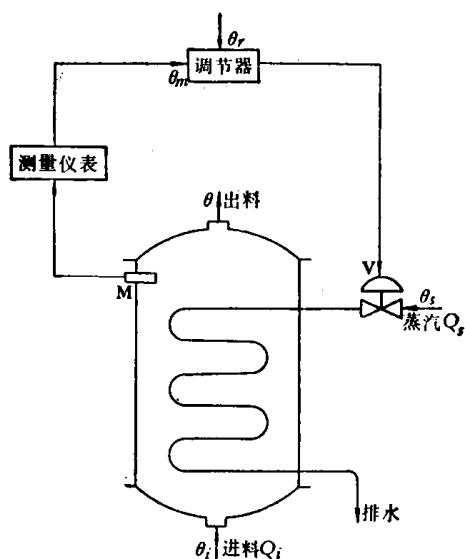


图 49.1-1 自动控制系统流程图

某生产过程要求将一种液料加热到一定温度。先从生产要求出发,选用一个恰当的加热设备,例如图 49.1-1 中的蛇形管加热器。加热介质(如蒸汽)从上部进入蛇形管,将热量传给被加热物料后从下部流出。进料被加热到温度 θ 后,从加热器上部输出。因此需要在蒸汽进口处装一个调节阀 V ,在出料口装一个温度计 M 。操作者一面观察温度计,测

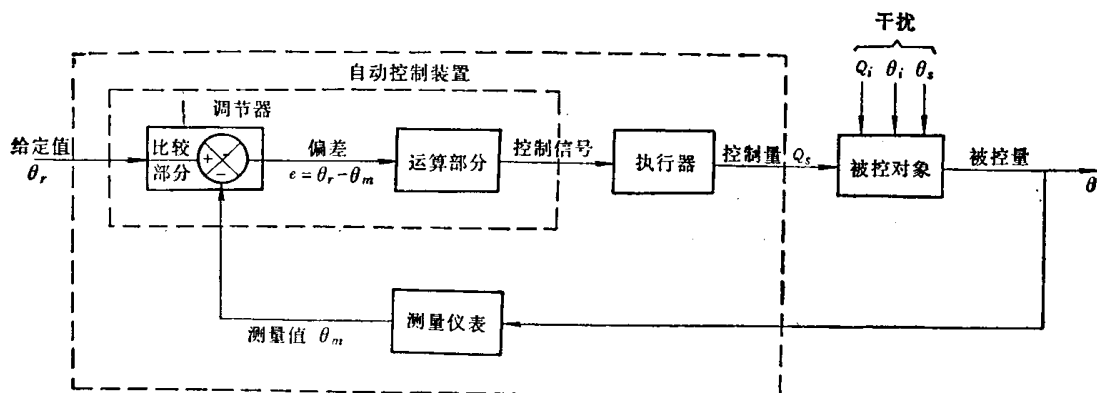


图 49.1-2 自动控制系统方框图

量到温度 θ_m ; 一面和工艺所要求的温度 θ_r 比较, 得知给定值 θ_r 和测量值 θ_m 的偏差 $e = \theta_r - \theta_m$, 然后以某一规律去改动阀门 V 的开度, 改变蒸汽量 Q_s , 使进料被加热到温度 $\theta = \theta_r$ 。假如要实现自动控制, 则需用一个自动控制器(调节器)去完成上述操作工的任务。

整个自动控制过程可以分析成表 49.1-1 的三步。完成这三步的装置分别是测量仪表、调节器和执行器。这三部分总称自动控制装置。它和被控对象配合, 构成自动控制系统, 见图 49.1-2 所示方框图。

表 49.1-1 自动控制系统
各组成部分及其作用

步骤	作用	使用装置
1	测出被控量 θ , 得测量值 θ_m	测量仪表 (温度计)
2	输入给定值 θ_r 和测量值 θ_m , 进行比较, 发出偏差信号 $e = \theta_r - \theta_m$, 并以偏差 e 为基础, 按预设规律运算, 发出控制信号	调节器 (气动调节器)
3	控制信号操纵控制量(蒸汽流量)以改变被控量	执行器 (气动薄膜调节阀)

在这个典型的温度控制系统中, 蛇形管加热器是被控对象, 出料温度 θ 是被控量, 蒸汽流量 Q_s 是控制量, 进料温度 θ_i 、进料量 Q_i 、蒸汽温度 θ_s 、都可能是引起被控变量 θ 偏离给定值的干扰量。

3 生产过程自动控制系统分类

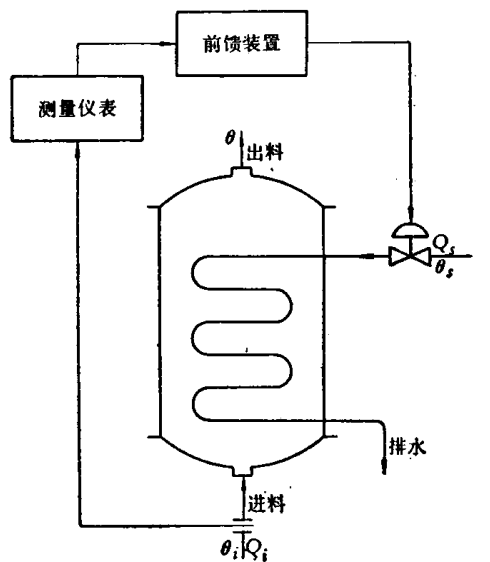
生产过程自动控制系统有许多种分类方式, 其中最基本的如下:

3.1 按系统结构的特点分类

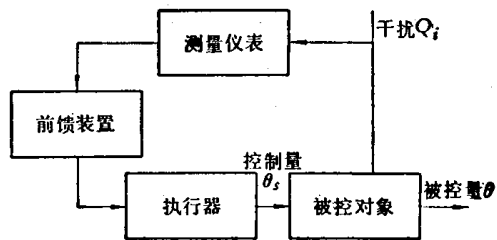
a. 反馈控制系统 图 49.1-1 所示的控制系统就是一个反馈控制系统。系统在干扰的作用下, 其被控量偏离了给定值, 将被控量反馈到调节器的输入端, 按表 49.1-1 所示步骤进行控制, 以克服干扰对被控量的影响, 直至被控量最终回到给定值。反馈控制的基本原则是按被控量的偏差进行控制, 偏差是控制的依据。因为通过被控量的反馈, 构成了

一个闭合回路, 所以反馈控制系统也称闭环控制系统。它是自动控制系统中最基本的一种控制方式。

b. 前馈控制系统 在定值控制系统中, 干扰是造成被控量偏离给定值的主要因素。如图 49.1-1 中, 进料量 Q_i 、温度 θ_i 及温度 θ_s 的变化都是造成温度波动的干扰因素。如果能使 θ_i 、 θ_s 不变, 只有 Q_i 是经常变动的, 就可直接测出进料流量 Q_i 去控制调节阀(即改变蒸汽量 Q_s)以保持被控变量 θ 不变, 见图 49.1-3a), 其方框图见图 49.1-3b)。前馈控制的基本原则是按干扰进行控制, 干扰是控制的依据。由于不存在被控量的反馈, 所以前馈控制系统也称开环控制系统。



a) 流程图



b) 方框图

图 49.1-3 前馈控制系统

按干扰控制的主要缺点是没有被控量的反馈, 因此不能最后检查被控量是否等于给定值。在有其他干扰或测量仪表有误差的情况下, 被控量可能有越来越大的误差。它的主要优点是能针对干扰迅速调整控制量, 使被控量及时得到平衡。因而, 它往往作为改善反馈控制系统品质的一种手段, 构成复合控制系统。

c. 复合控制系统(前馈-反馈控制系统) 在一个自动控制系统中,对其主要干扰用前馈控制,而其他干扰所引起的被控量的偏差,仍用反馈控制来克服。详见本篇第3章。

3.2 按给定信号的特点分类

a. 定值控制系统 在生产过程中,绝大多数的工艺参数(温度、压力、流量、物位、成分等)一般都要要求维持在某值,这时就要应用定值控制系统。在这种情况下,自动控制往往称自动调节。定值控制系统的给定值在正常运行下基本上是不变的。当然有时为了满足工艺的要求,给定值也可以从某一值改变到另一个值。

b. 随动系统 随动系统的主要作用是克服一切干扰,使被控变量尽可能随时都等于给定值,而给定值往往是随时间任意变化的。如武器的瞄准装置、雷达天线的跟踪系统和测量仪表中的显示装置等等都是属于随动系统的范围。在生产过程控制中,比值控制系统中从变量控制回路串级控制系统中的副环也都是随动系统。

c. 程序控制系统 程序控制系统实质是随动系统中的一种特殊类型,它的给定值是按时间程序或跟随某一参数的变化而变化。在时间程序控制系统中其给定值按某一预先规定的时间程序变化,例如金属退火炉或橡胶硫化器的温度时序控制系统。

3.3 按被控量的特点分类

a. 连续控制系统 前面提到的各种控制系统,需定量地控制被控量,被控量如可以连续地被调整,都可归入连续控制系统。控制动作在时间上是离散的(如采样控制系统等),但需定量地控制被控量,也归入连续控制系统。

b. 顺序控制系统 顺序控制系统中,其被控变量是开关量(即是、否某个状态)。系统按预先确定的时间顺序或根据一定逻辑关系所要求的顺序,逐次进行控制。图49-1-4a)是一个计量槽的顺序控制。按起动钮,开始进料计量,当料面达到位置1就停止进料,并自动排出。当料面降到位置2,就停止排出,完成了计量工作(排出的那部分就是定量),并为下次计量作好准备。其顺序见图49-1-4b)。顺序控制系统的组成和设计方法与连续控制系统不同,见本篇第6章。

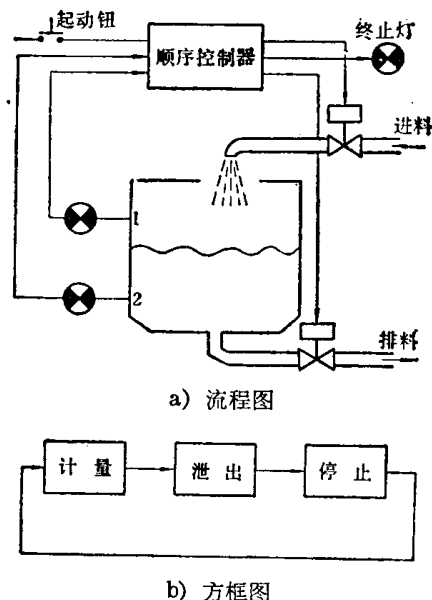


图 49-1-4 顺序控制系统

3.4 其他分类方式

按控制系统回路多少可分为单回路控制系统、多回路控制系统。

按不同的控制功能可分为均匀控制系统、选择性控制系统、极值控制系统、比值控制系统等。

按被控量名称可分为如温度控制、压力控制、液面控制、pH 控制等。

4 控制系统的品质指标

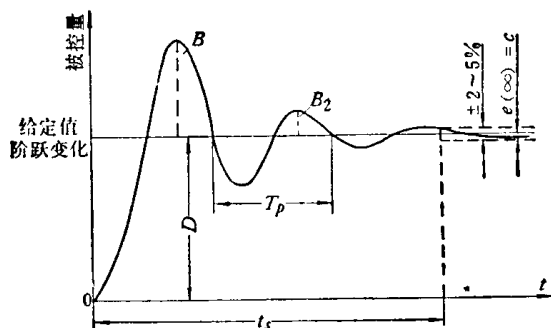
当控制系统改变给定值或经受干扰时,被控量必然偏离原先的稳态值,于是系统就进行自动控制,经过动态过程,最后达到符合工艺要求的新的稳定状态或回到原先的稳态值。这样一个动态过程称为控制系统的过渡过程。

任何自动控制系统都必须满足稳定、准确、快速的品质要求首先要满足稳定性的要求,使生产过程不产生过分振荡而影响正常生产和危及安全。为了衡量过渡过程的好坏,提出了控制过程的品质指标。但不同的生产过程对于具体的品质有不同的要求,因此,人们是根据工艺要求而提出品质指标,并据此来设计各种类型的控制系统并进行投运整定以达到预期目的。

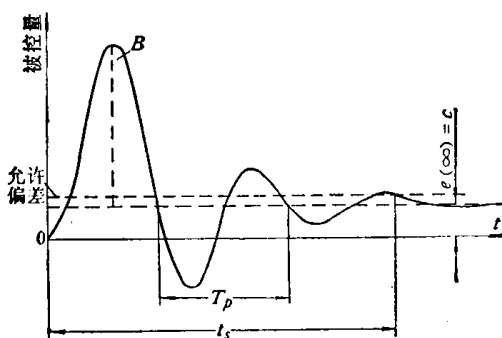
自动控制系统的品质指标通常用时间域或频率域方法表示,而用积分准则还能综合性地表示控制过程的优劣。

4.1 时间域表示法

控制系统的过渡过程,在改变给定值时,如图49.1-5a)所示,在其他干扰作用下如图49.1-5b)所示。



a) 给定值阶跃扰动下的控制过程



b) 其他阶跃干扰下的控制过程

图 49.1-5 控制品质的时间域表示

其品质指标为:

a. 最大动态偏差 B 及百分率超调量 σ 百分率超调量 σ 以最大动态偏差与稳态值 D 之比来表示

$$\sigma = \frac{B}{D} \times 100\% \quad (49.1-1)$$

b. 调整时间 t_s 在给定值扰动下, t_s 为从干扰发生起到被控量的偏差达到新的稳定值的 $\pm 2\%$ 至 $\pm 5\%$ 范围里, 并且不再超出这个范围所经历的时间。

在干扰作用下, t_s 为从干扰发生起, 被控量偏离给定值直至重新进入工艺所容许的偏差范围, 并且不再超出这个范围所经历的时间。

c. 静态偏差 $e(\infty)$ 过渡过程结束后, 被控量与给定值之差。图 49.1-5b) 中 $e(\infty) = c_0$ 。

d. 衰减率 ψ

$$\psi = 1 - \frac{B_2}{B_1} \quad (49.1-2)$$

式中 B_1 、 B_2 分别为过渡过程出现的第一个和第二个峰值(B_1 即图 a 中的 B)。

B_1/B_2 为衰减比。

B_1/B_2 为 4:1 时, $\psi = 0.75$ 。

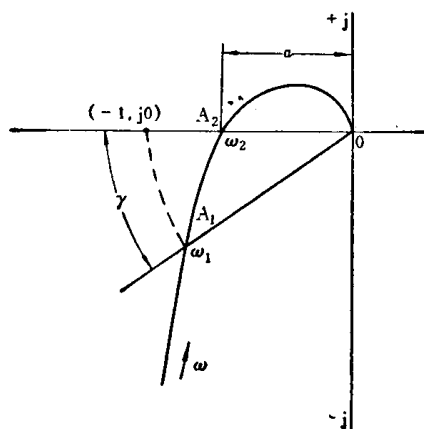
B_1/B_2 为 10:1 时, $\psi = 0.90$ 。

e. 振荡周期 T_p 过渡过程呈现振荡时的振荡周期(也称操作周期、调节周期)

4.2 频率域表示法

频率域指标和时间域指标有密切的相互关系, 详见本手册第 5 篇“自动控制理论”。

a. 增益裕度和相角裕度 增益裕度和相角裕度是衡量控制系统稳定度的指标, 见图 49.1-6 奈奎斯特矢量轨迹图(系统开环频率特性)。

图 49.1-6 奈奎斯特矢量轨迹图
表示系统的稳定性

增益裕度为矢量轨迹与实轴相交的那一点的增益的倒数。如图 49.1-6 中增益裕度为 $1/a$ 。

相角裕度为矢量轨迹上增益为 1 的点偏离负实轴的角度。在图 49.1-6 中, 相角裕度为 γ 。

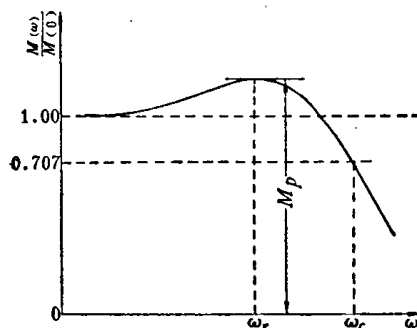


图 49.1-7 幅频特性曲线

b. 共振频率 ω_r 相应于系统幅频特性上增益最大时的频率, 见图49-1-7。

c. 截止频率 ω_c 增益比 $\frac{M(\omega)}{M(0)}$ 为 0.707 时, 即 -3dB 时的频率。

d. 最大增益比 M_p 幅频特性中增益的最大值。

4.3 积分准则

积分准则综合反映了控制系统的稳定性、准确性和快速性诸方面的品质, 在使用计算机分析控制系统过渡过程时特别有效。常用的积分准则有:

a. 误差 $e(t)$ 积分 $\int_0^{\infty} e(t) dt$ 最小(英文简称 IE) 这个准则较适用于非周期控制过程。

b. 绝对误差 $|e(t)|$ 积分 $\int_0^{\infty} |e(t)| dt$ 最小(英文简称 IAE) 基于此准则的控制系统, 具有适当的阻尼和较好的瞬态响应。

上述两个准则综合反映了过渡过程时间和偏差。

c. 误差 $e(t)$ 平方值积分 $\int_0^{\infty} e^2(t) dt$ 最小(英文简称 ISE) 有时因对 $|e(t)|$ 不便于分析计算, 采取 ISE 准则代替 IAE 准则, 计算时较为容易。

ISE 准则的积分值随控制系统误差增大而急剧增大, 当要求动态偏差尽可能小时, 采用此准则。

d. 绝对误差 $|e(t)|$ 和时间乘积的积分 $\int_0^{\infty} |e(t)| t dt$ 最小(英文简称 ITAE)

ITAE 是一种使用模拟机计算研究较方便的准则。它较适用于要求控制过程尽可能快和要求衰减率大的场合。用此准则设计的系统, 控制过程中超调量很小。

4.4 控制系统品质指标的确定

控制系统诸品质指标彼此相关, 相互约束, 实际上不可能出现同时都是最好的情况, 因此, 确定品质指标应主要看能否满足工艺的要求。如:

a. 定值控制系统 一般被控量动态偏差小, 且尽可能快地回复到给定值。通常取开环相角裕度在 $20^\circ \sim 50^\circ$ 增益裕度在 3~9dB 之间。

对于工业中常见的压力、物位、流量等控制系统, 通常要求控制过程的衰减比为 4:1~10:1。

对于控制过程较快的系统, 如某些流量、压力控制系统, 还需考虑到系统的工作频率不宜太高, 否则往往使执行器动作频繁而影响其寿命。

对于控制过程较慢的系统, 要求控制过程衰减比大(如 10:1), 控制过程时间尽可能短。

对于不允许有超调的系统, 要求控制过程应为非周期过程, 且调整时间尽可能短。

b. 随动系统 如串级控制系统的副环和比值控制系统的从变量控制回路, 要求被控量以一定精度快速地跟上给定值的变化, 因此希望超调量小, 调整时间尽可能短, 通常取开环相角裕度在 $40^\circ \sim 60^\circ$ 增益裕度在 12~20dB 之间。

第2章 被控对象特性及其测试方法

1 测试被控对象特性的目的

自动控制系统的品质由组成系统的各环节(被控对象和控制装置)的特性和系统的结构两者所决定。

控制装置(测量仪表、调节器、执行器等)的特性是在设计制造时就人为地确定的, 它易于改进和测试, 其中调节器的特性还特意做成可调的, 藉以配合不同特性的被控对象和控制要求。被控对象的特性往往比较复杂, 在设计工艺流程和设备时往往难以

考虑周到, 故在设计自动控制系统时, 就必须加以深入研究。目前, 在生产过程控制中用理论推导方法求得对象特性往往是比较困难的, 因此工程上经常用实验方法测定对象的特性。

测试对象特性的目的有:

- (1) 设计自动控制系统和选择调节器的类型;
- (2) 整定调节器的参数;
- (3) 实现自适应控制系统;
- (4) 研究改进工艺流程和设备。

2 被控对象的特性

被控制的生产过程及其设备,通称为被控对象。被控对象的特性是指被控对象各输入及其相应输出之间随时间变化的关系。

例如图 49.1-1 中加热过程及加热罐是一个温度对象。图中,出料温度 θ 是被控量,蒸汽流量 Q 是控制量,而其他变量的变化,诸如蒸汽温度的变化 $\Delta\theta_s$, 进料量变化 ΔQ_i , 进料温度的变化 $\Delta\theta_i$ 等等,均为引起出料温度变化的各种因素,通称为干扰。

若以被控量 θ 作为输出,控制量 Q_s 作为输入,则它们之间的关系称对象的控制通道特性;而以被控量 θ 为输出,以干扰($\Delta\theta_s$ 、 $\Delta\theta_i$ 、 ΔQ_i 等)为输入,它们之间的关系称对象的干扰通道特性。用方框图表示于图 49.2-1。

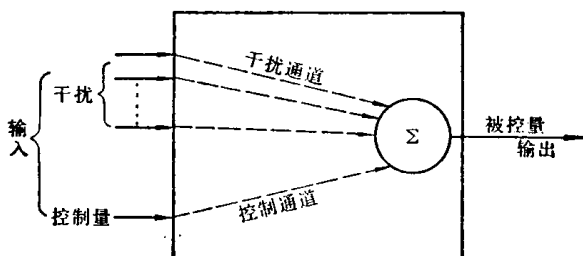


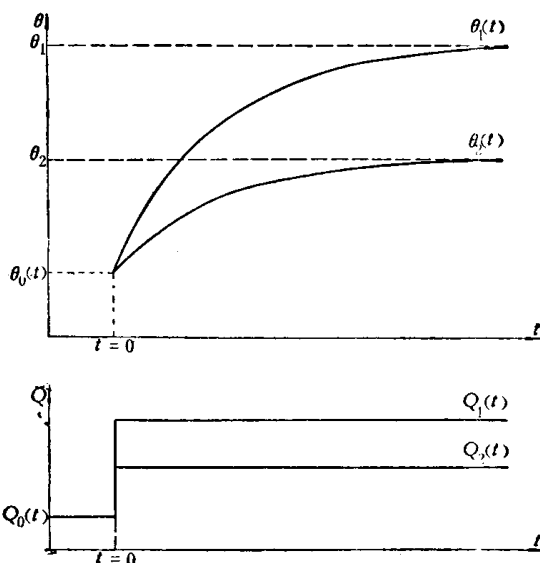
图 49.2-1 被控对象的控制通道和干扰通道

如控制量在某一时间 ($t=0$) 从初始值 Q_0 突变到 Q_1 或 Q_2 , 则被控量 θ 也跟着从原始值 θ_0 开始逐渐随时间变化(如图 49.2-2a)中的曲线 $\theta_1(t)$ 、 $\theta_2(t)$ 所示)经过一段时间后, 稳定在某一值 θ_1 或 θ_2 上, 这个值称被控量的稳态值。而相应的曲线就称被控对象的阶跃反应曲线, 它是表示被控对象特性的一种方式。反应曲线也可用 Q 和 θ 的增量 $\Delta Q = Q - Q_0$ 及 $\Delta\theta = \theta - \theta_0$ 的形式表示, 如图 49.2-2b)所示。对象的各输入和各输出变量在静态时(即它们的各阶导数均为零时)的关系称为对象的静态特性。而输入和输出变量间的全面关系称为对象的动态特性。

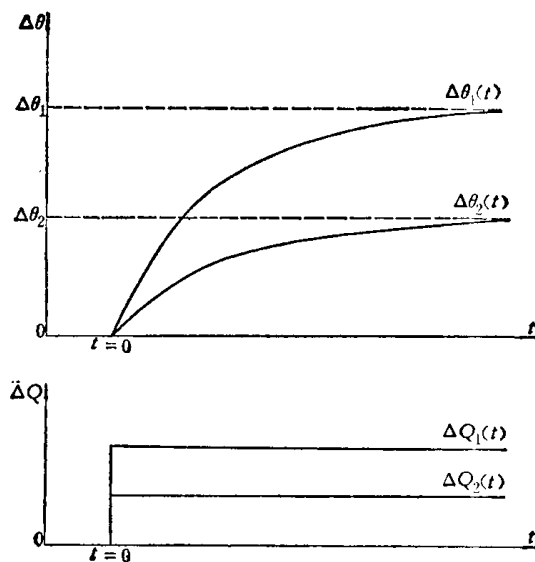
2.1 静态特性

被控对象的静态特性可分成两类: 一是线性关系, 如图 49.2-3a) 示, 一是非线性关系如图 49.2-3b) 所示。

线性静态关系可用一个输出变化 Δy 对输入变化 Δu 的比例系数来表示, 即



a) 阶跃反应曲线



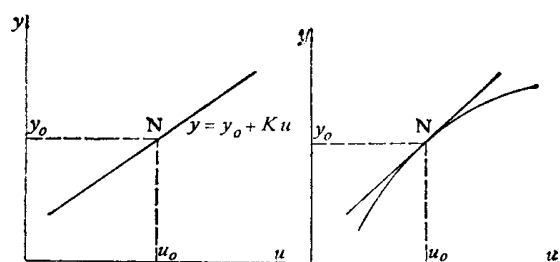
b) 以增量表示的阶跃反应曲线

图 49.2-2 被控对象特性

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (49.2-1)$$

K 常称为对象的放大系数。

由于被控对象经常控制在额定工况(如图 49.1-1 中, 在额定工况 Q_0 、 θ_0 下工作, 所以对大多数非线性对象, 可以在其额定工作点附近采用线性化方法, 使其特性近似地视为线性, 即在非线性曲线上, 由代表额定工况的 N 点作切线来代替曲线, 如图 49.2-3b) 所示。这时被控对象经线性化后的放大系数是 $K = \frac{\Delta y}{\Delta u}$ 。



a) 线性关系 b) 非线性关系

图 49-2-3 对象的静态特性

2.2 动态特性

对象的动态特性可以用不同的数学方法描述,也可用不同的测试方法测定,详见后节。严格地说,许多生产过程存在着非线性因素和分布参数,但在设计、分析和调整自动控制系统时,工程上往往用几个主要特征量来大致地近似表达一般被控对象的动态特性,它们是:放大系数 K 、时间常数 T 和纯滞后时间 τ 。

2.2.1 时间常数、容量系数、阻力系数

图 49-2-4 表示液位控制对象,图中

- h ——液位
- A ——容器截面积
- m ——阀门开度
- Q_i ——流入量
- Q_o ——流出量

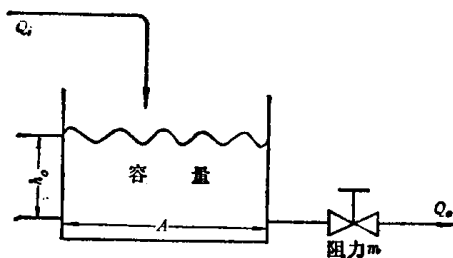


图 49-2-4 液位对象

根据质量平衡的原理,可列出对象的微分方程式

$$Q_i - Q_o = A \frac{dh}{dt} \quad (49.2-2)$$

将式(49.2-2)表示为增量形式

$$\Delta Q_i - \Delta Q_o = A \frac{d\Delta h}{dt} \quad (49.2-3)$$

式中 ΔQ_i 、 ΔQ_o 、 Δh 分别为 Q_i 、 Q_o 、 h 的增量

ΔQ_o 可认为与 Δm (阀门开度 m 的增量) 和 Δh 有

线性关系,并表示为

$$\Delta Q_o = \frac{\partial Q_o}{\partial m} \Delta m + \frac{\partial Q_o}{\partial h} \Delta h \quad (49.2-4)$$

代入式(49.2-3)可得

$$\begin{aligned} \Delta Q_i - \frac{\partial Q_o}{\partial m} \Delta m - \frac{\partial Q_o}{\partial h} \Delta h &= A \frac{d\Delta h}{dt} \\ \frac{A}{\partial Q_o / \partial h} \frac{d\Delta h}{dt} + \Delta h &= \frac{\partial h}{\partial Q_o} \Delta Q_i - \frac{\partial Q_o / \partial m}{\partial Q_o / \partial h} \Delta m \end{aligned} \quad (49.2-5)$$

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{A}{\partial Q_o / \partial h} \\ K_m &= -\frac{\partial Q_o / \partial m}{\partial Q_o / \partial h} \\ K_i &= \frac{\partial h}{\partial Q_o} \end{aligned} \right\} \quad (49.2-6)$$

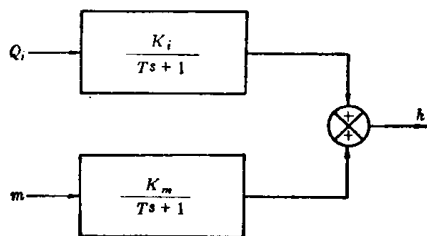
代入式(49.2-5)得

$$T \frac{d\Delta h}{dt} + \Delta h = K_i \Delta Q_i + K_m \Delta m \quad (49.2-7)$$

式中 T 为液位对象的时间常数, K_i 为液位相对于输入流量的放大系数, K_m 为液位相对于阀位的放大系数。

如阀位保持不变,则式(49.2-7)成为(49.2-8)

$$T \frac{d\Delta h}{dt} + \Delta h = K_i \Delta Q_i \quad (49.2-8)$$



a) 被控对象动态特性方框图

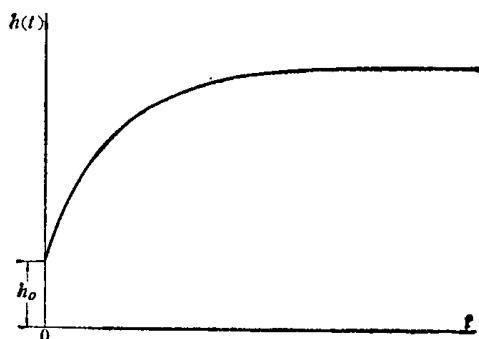

 b) Q_i 阶跃变化时, h 的反应曲线

图 49-2-5 液位对象动态特性

当输入流量 Q 阶跃变化时,液面的变化曲线如图 49·2-5b)所示。

a. 时间常数 T 时间常数表征了被控对象的动态特征。在输入阶跃变化时,时间常数越大,则稳定时间越长;时间常数越小,则稳定时间越短。在同样的阶跃输入幅度时,时间常数小的对象反应速度要比时间常数大的对象快。见图 49·2-6。

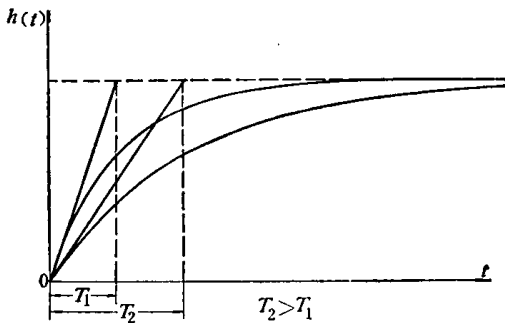


图 49·2-6 时间常数与调整时间的关系

时间常数可表示为容量系数 C 和阻力系数 R 的乘积即

$$T = RC \tag{49·2-9}$$

b. 容量系数 C 以上述液位对象为例,容量系数等于容器截面积 A 。

容量系数越大,被控量变化越慢,容量系数越小,被控量变化越快。

c. 阻力系数 R 以上述液位对象为例,阻力系数为液位变化量与输出流量的变化量之比。如上例中的 $\frac{\partial h}{\partial Q_0}$ 。

阻力系数越大,被控量相对变化越慢,阻力系数越小,被控量相对变化越快。同时阻力系数还影响到静态放大系数。许多工业对象,都可以用上述时

间常数及放大系数来表示其特征。不仅是液位,压力、流量、温度等对象都可以用类似的方式表示。各种物理量间的类比关系见表 49·2-1。

上例液位变化是一个单容量的过程,相应的传递函数是

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} \tag{49·2-10}$$

许多工业对象往往有较多的容量,例如精馏塔、热交换器等等,它们的动态特性常常可用下列几种传递函数近似表示:

$$G(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} \tag{49·2-11}$$

$$G(s) = \frac{K}{(Ts + 1)^n} \tag{49·2-12}$$

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-\tau s}}{Ts + 1} \tag{49·2-13}$$

$$G(s) = \frac{K e^{-\tau s}}{s(Ts + 1)} \tag{49·2-14}$$

具有多容量(即多阶系统)的反应曲线类似图 49·2-7,其共同特点是在阶跃输入后,输出量并不立即以最大速度变化,而是缓慢地变化,变化速度逐渐增加,到达一定值之后,又渐渐减慢,最后达到新的稳态值。

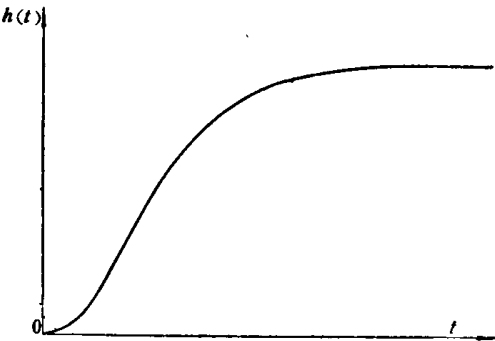


图 49·2-7 多容量被控对象的阶跃反应曲线

表 49·2-1 物理系统的类比关系

被 控 量	流 量	贮 存 量	流 阻	容 量
液 位 h	液体流量 Q	贮 液 量 V	液体流阻 R	容器截面积 A
压 力 p	气体流量 G	贮 气 量 m	气体流阻 R	容器容量 V
电 压 V	电 流 I	电 量 Q	电 阻 R	电 容 C
温 度 θ	热 流 量 ϕ	热 量 Q	热 阻 R	热 容 量 C

2.2.2 纯滞后时间

图 49-2-8 是一个料位对象。对于不同的出料量 G_o , 调节进料量 G_i , 可以维持料斗内一定的料位 h_o 。进料量 G_i 用传送带上闸板的开度 m_i 来调节, 当阶跃改变开度 m_i 后, 料斗内的进料量 G_i 要经过 τ 秒后 ($\tau = \frac{l}{v}$, 其中 v 是传送带速度, l 是从闸板到落料点的距离) 才开始改变, 然后再使料面 h 变化。其反应曲线如图 49-2-9 所示。从输入量 m_i 突变, 到料位开始变化的这段时间 τ 就叫做纯滞后时间, 其传递函数为 $e^{-\tau s}$ 。

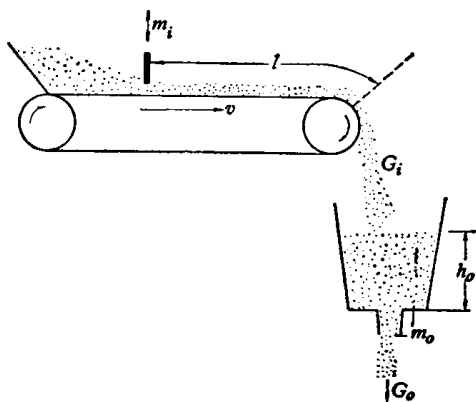


图 49-2-8 具有纯滞后的对象

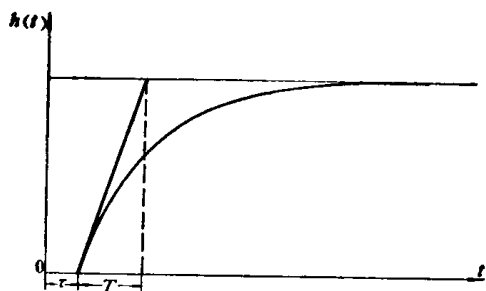


图 49-2-9 纯滞后对象的阶跃反应曲线

2.2.3 自衡对象和无自衡对象

当对象的输入作阶跃变化后, 经动态变化过程, 对象输出能达到某一新的稳态值, 这种对象称为自衡对象。前面例举的各对象, 均属此类。

另一类无自衡对象, 如图 49-2-10 所示, 用泵 (例如齿轮泵) 抽出液体, 则输出流量 Q_o 仅和泵的转速有关, 不受液面 h 的影响。在平衡条件下, $Q_i = Q_o$, 从而保持液面为 h 。如果输入量增加 ΔQ_i , 则液面就以一定速度上升, 直到液体溢出容器, 其反应曲线如图 49-2-11 所示。这种对象称无自衡对象。

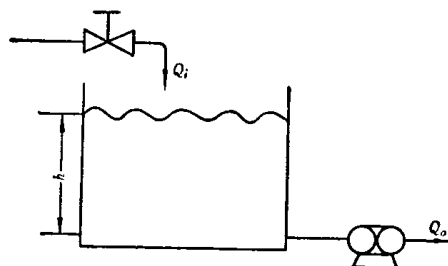


图 49-2-10 无自衡对象

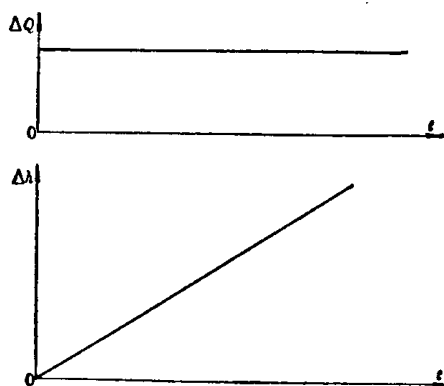


图 49-2-11 无自衡对象的阶跃反应曲线

3 对象动态特性的数学描述方法

对象动态特性的较理想的表达方式是它的数学模型。微分方程和状态变量方程是全面描述对象 (或自动控制系统) 的数学方式。这里仅作简要介绍, 详见本手册第 5 篇“自动控制理论”。

3.1 微分方程表达式

对于单输入、单输出的线性对象, 它的动态特性可以用下列微分方程表示

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} \\ + a_0 y = b_m \frac{d^m u}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} u}{dt^{m-1}} \\ + \dots + b_1 \frac{du}{dt} + b_0 u \end{aligned} \quad (49-2-15)$$

式中 y 、 u 分别表示线性对象的输出变量和输入变量。

$a_0, a_1, \dots, a_{n-1}, a_n; b_0, b_1, \dots, b_m$ 分别表示微分方程的常系数。

3.2 传递函数表达式

在自动控制理论中, 为了便于分析和运算, 往往用对象 (或自动控制系统及系统中其他环节) 的输出

变量和输入变量的拉普拉斯变换之比即传递函数来表达对象的动态特性。从式(49.2-15)得

$$G(s) = \frac{Y(s)}{u(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (49.2-16)$$

3.3 频率特性表达式

如果用 $j\omega$ 代替传递函数中的变量 s , 则传递函数就化成频率特性函数, 即

$$G(j\omega) = \frac{b_m (j\omega)^m + b_{m-1} (j\omega)^{m-1} + \dots + b_1 (j\omega) + b_0}{a_n (j\omega)^n + a_{n-1} (j\omega)^{n-1} + \dots + a_1 (j\omega) + a_0} \quad (49.2-17)$$

3.4 阶跃反应函数表达式

如果用单位阶跃函数

$$\left. \begin{aligned} u(t) &= 1, & t \geq 0 \\ u(t) &= 0, & t < 0 \end{aligned} \right\} \quad (49.2-18)$$

作为对象的输入变量(它的拉普拉斯变换为 $\frac{1}{s}$), 则其输出变量就是表达对象动态特性的单位阶跃反应函数(它的拉普拉斯变换为 $\frac{G(s)}{s}$)。如图 49.2-12 所示。

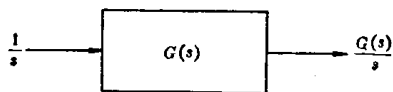


图 49.2-12 阶跃反应函数的拉普拉斯变换表示

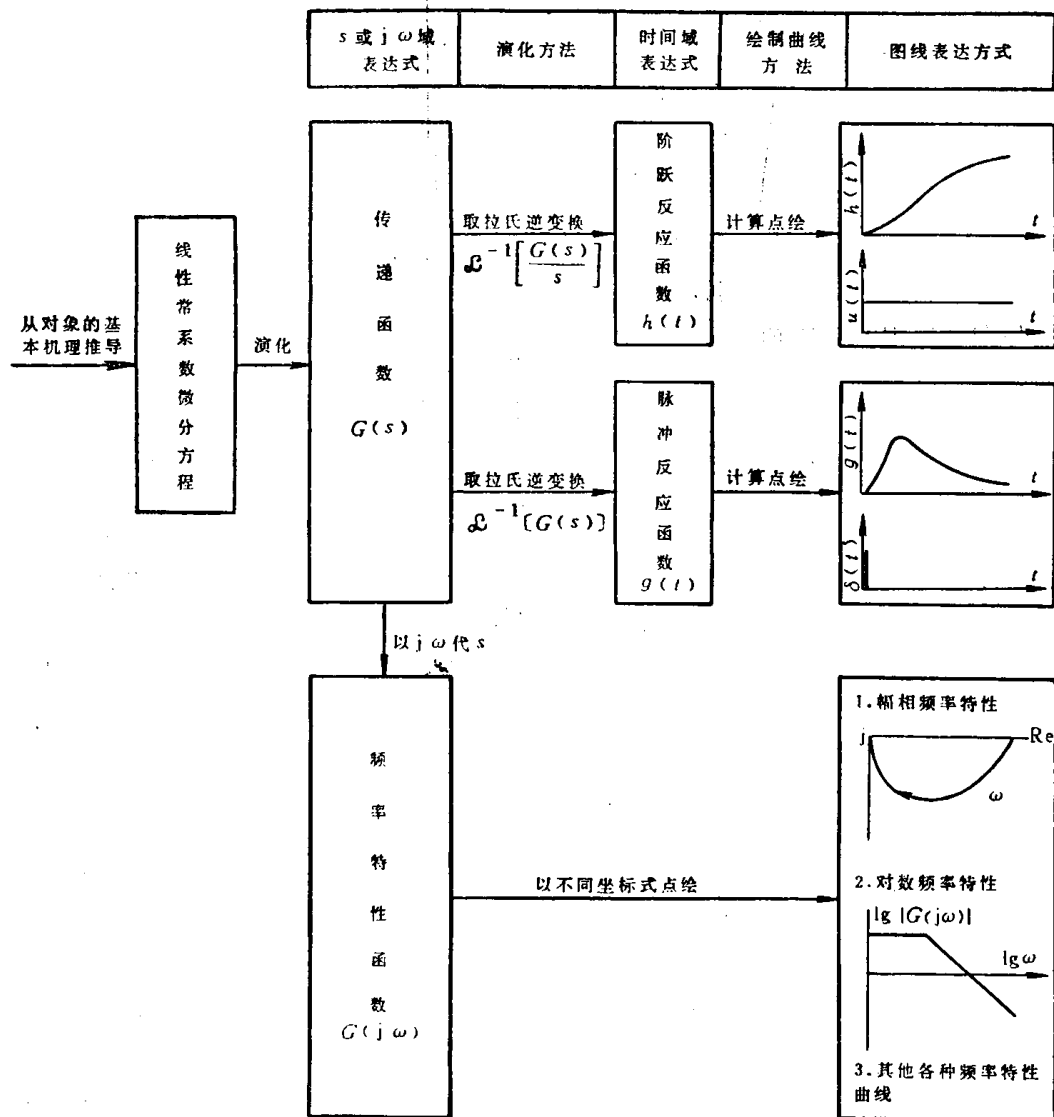


图 49.2-13 微分方程到各反应曲线的推导关系图

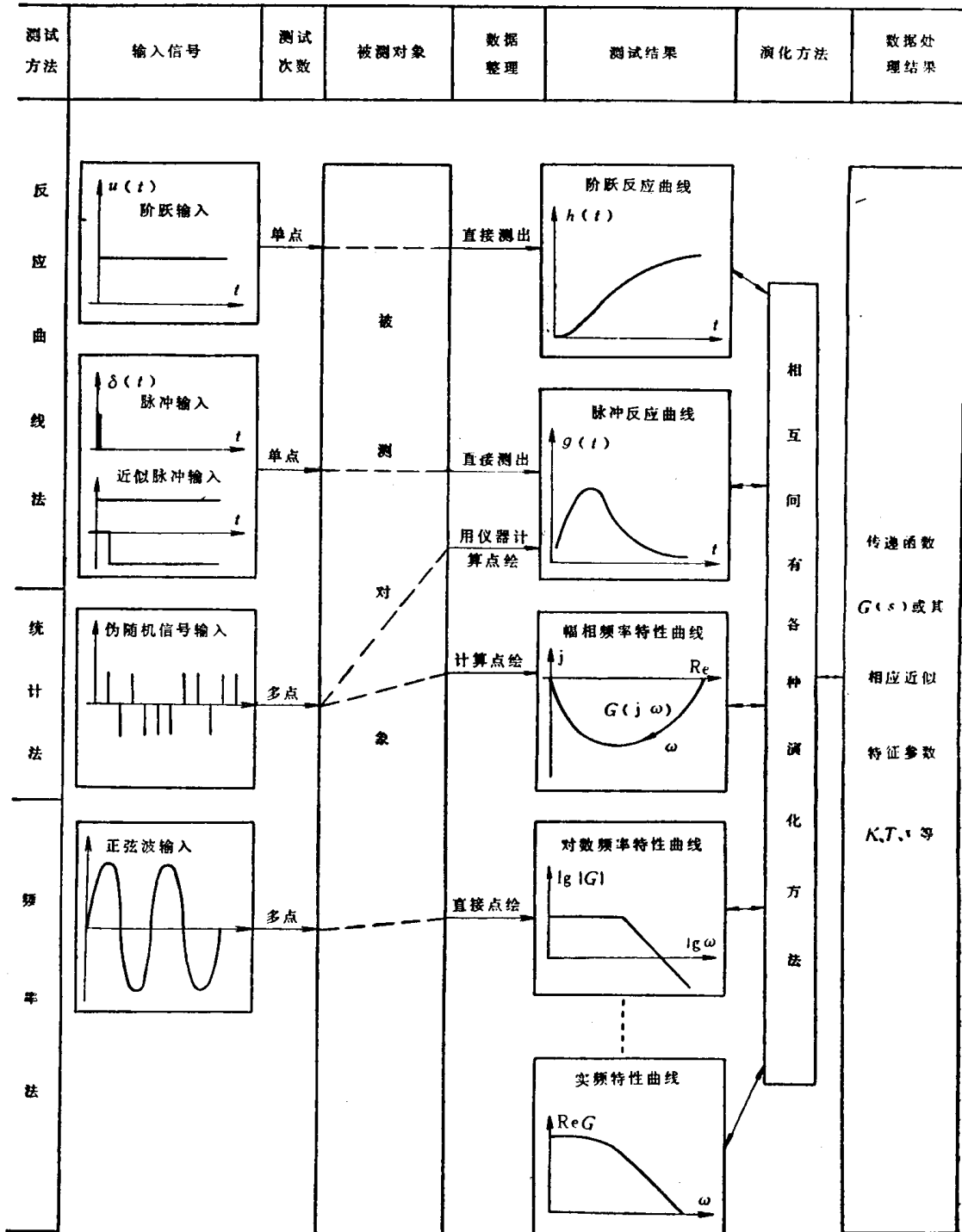


图 49.2-14 测试动态特性各种方法及其数据处理

单位阶跃反应函数可以取 $G(s)/s$ 的拉氏反变换而求得。

$$h(t) = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{G(s)}{s}\right] \quad (49.2-19)$$

3.5 脉冲反应函数表达式

如果用单位脉冲函数(狄拉克函数)

$$\left. \begin{aligned} \delta(t) &= 0 & t &\neq 0 \\ \delta(t) &= \infty & t &= 0 \\ \int_0^{\infty} \delta(t) dt &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (49.2-20)$$

作为对象的输入变量(它的拉普拉斯变换为1), 则其输出变量就是表达对象动态特性的单位脉冲反应函数(它的拉普拉斯变换即为对象传递函数 $G(s)$)。

单位脉冲反应函数可以取传递函数 $G(s)$ 的拉普拉斯逆变换而求得。

$$g(t) = \mathcal{L}^{-1}[G(s)] \quad (49.2-21)$$

在工程上分析和设计自动控制系统时, 应用传递函数、频率特性函数、阶跃反应函数、脉冲反应函数常常较直接应用其微分方程为方便, 在许多场合,

不但要利用上述这些数学式, 还要利用这些数学式所推演或点绘出来的曲线形式和几何图象。从微分方程到各种反应曲线的推导关系见图 49.2-13。

4 对象动态特性的实验测定方法

在工程上常常用实验方法测定对象动态特性, 原因是:

(1) 对象的动态特性虽可运用流动、蒸发、化学反应、传热、吸收、扩散、混合等等物理化学基础理论来推导求得。但是, 具体对象的物理化学过程是复杂的, 在数学推导过程中必须作许多假设和简化, 推导的结果尚需实验测试来验证。

(2) 实际工业对象的机理很复杂, 有时甚至很难用数学方法推导。这时只能用实验方法来测定。

(3) 有许多被控对象, 它的特性在运行过程中会随工况变化而改变, 或随其他因素而改变, 为了提高自动控制系统的品质, 有时需要采用自整定控制或自适应控制。这种系统就非得在运行过程中随时用实验方法测定对象动态特性不可。

表 49.2-2 对象动态特性测试方法的比较

比 较 项 目	反 应 曲 线 法		频 率 法	统 计 法
测试信号	阶 跃 信 号	近似脉冲信号	正弦波信号 组合频率信号 周期性方波信号	伪随机信号
测试设备及仪器	电动或气动定值器、切换开关、多笔记录仪		(1) 电动或气动正弦波发生器及多笔记录仪 (2) 频率特性测试仪 (3) 动态测试仪	(1) 伪随机信号发生器 (2) 动态分析仪
测试及处理结果	阶跃反应曲线	脉冲反应曲线	可处理成各种频率特性曲线	脉冲反应曲线
测试时是否会影 响生产过程正常 运行	会 影 响	会 影 响, 但程度较轻	会影响	轻微影响或几乎不影响
干扰对测试结果 影响	有		有	选择合适测试信号, 使之与干扰互不相关, 则可使测试结果不受干扰信号影响
特 点	(1) 设备简单, 测试方便 (2) 离线、在线都能用 (3) 测试精度稍差		(1) 要有一定测试设备或专用仪器 (2) 要多点(不同 ω) 测试费事费时 (3) 常用以测定自动控制装置及其部件、元件的特性 (4) 一般不适用于工业对象	(1) 要有专用仪器 (2) 配备不同的延迟 τ , 可算出不同的 $g(t)$ 值 (3) 适用于在线测试, 常和计算机配合, 可实现对象识别和参数估计以构成各种复杂自动控制系统 (4) 精度较高

工程上常用的动特性测试方法有反应曲线法、频率法和统计法等三种, 详见图 49·2-14, 图中列出用不同测试方法实际测得对象动态特性的步骤。它和图 49·2-13 是相互对应的。各种实验曲线之间、实验曲线到传递函数间有许多相互转化的方法, 在此就不一一列举。三种测试方法的比较见表 49·2-2。

测试方法还可分成离线和在线的二种。所谓离线测试是指控制回路断开, 调节器在测试回路之外, 控制系统不发挥调节作用, 如图 49·2-15 所示。所谓在线测试是指调节器与被控对象构成一个闭合回路, 测试时控制系统仍发挥调节作用。在线测试原理见图 49·2-16。信号发生器产生的测试信号加在调节回路的给定值处, 记录仪记录被测对象输入输出端曲线, 经过比较复杂的数据处理也可求出对象特性。若已知调节器的动态特性, 可直接计算控制系统输入端 R 到输出端 y 的动态特性, 按一定的计算方法扣除调节器的动态特性。可得被控对象的动态特性, 并可对现有控制系统作出评价, 更好地提高控制系统品质。

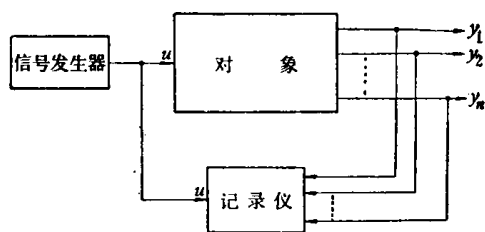


图 49·2-15 离线测试

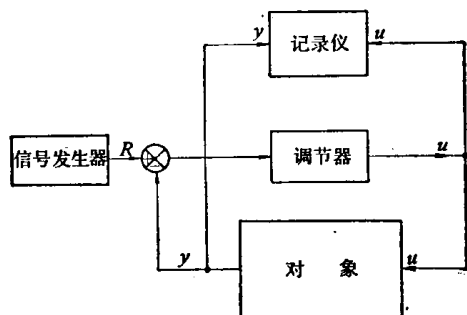


图 49·2-16 在线测试

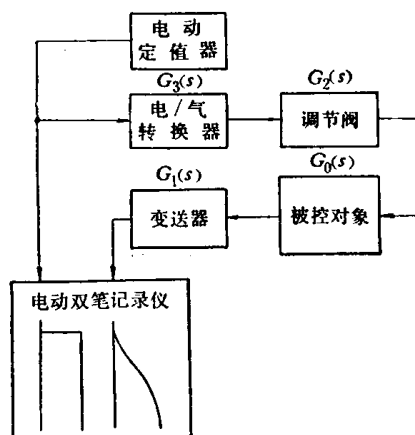
4.1 反应曲线法

对象的输入为阶跃变化, 其输出变量的时间反应曲线称为阶跃反应曲线。

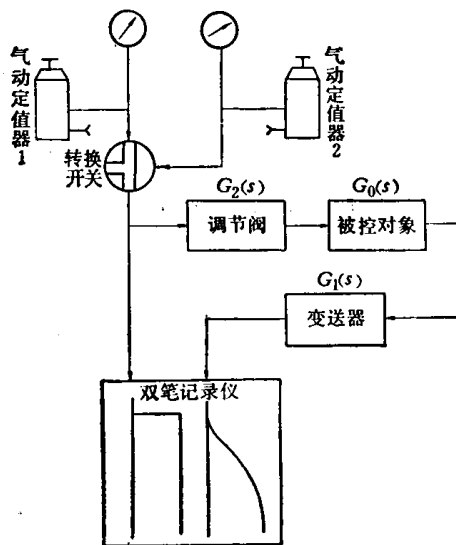
4.1.1 测试线路

图 49·2-17 之 a) 和 b) 分别表示利用电动仪表和气动仪表所组成的测试线路。

由于气动定值器输出信号是连续改变的, 为了得到阶跃信号, 必须用两只气动定值器和一只切换开关。由定值器, 调整对象输入的稳态值, 用切换开关和定值器 2 发出阶跃扰动信号 (输入到对象的新的稳态值信号), 双笔记录仪记录输入的阶跃信号和输出的反应曲线。



a) 电动仪表测试线路



b) 气动仪表测试线路

图 49·2-17 反应曲线法测试线路

用电动仪表测试出来的对象动态特性 $G(s)$, 包括了调节阀 $G_2(s)$, 转换器 $G_3(s)$ 和变送器 $G_1(s)$ 等在内的动态特性 (见图 49·2-17)。这种特性称广义对象特性, 在调整调节器参数时, 就可以直接用它

作为计算基础。如果要求对象的动态特性 $G_0(s)$, 则必须从测到的动态特性扣除调节阀(包括执行机构)、转换器、变送器的动态特性, 即

$$G_0(s) = \frac{G(s)}{G_1(s)G_2(s)G_3(s)}$$

4.1.2 测试注意事项

(1) 选择合适的阶跃输入幅度, 一般约为输入变量最大值的 5~15%。

(2) 选择合适的记录时间, 使反应曲线全貌能清楚地画在记录纸上。

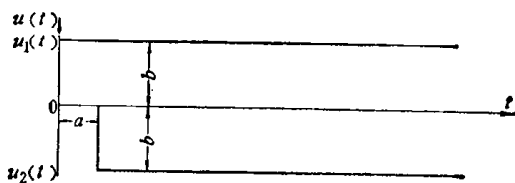
(3) 为了较全面地获得对象特性, 应在不同工况下测试, 对每一工况应正反方向重复多次。

(4) 在施加扰动前, 必须使对象维持在相应的稳定工况。

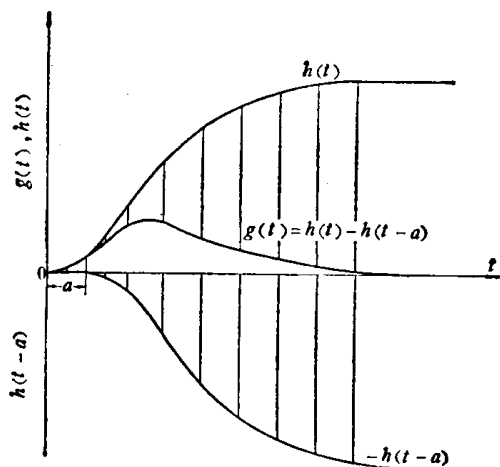
(5) 当对象不允许长时间加阶跃干扰时, 应采用近似脉冲的方波信号或改用统计测试方法。



a) 输入信号



b) 阶跃信号表示方波信号



c) 反应曲线

图 49-2-18 方波信号测试对象特性

图 49-2-18(a) 所示输入脉冲信号可看成是由图 49-2-18(b) 所示两个方向相反幅值相同的阶跃输入信号 $u_1(t)$ 、 $u_2(t)$ 之和组成的。方波信号作用在线性对象后的输出即图 49-2-18(c) 中的曲线 $g(t)$, 也可看成是相应于 $u_1(t)$ 、 $u_2(t)$ 两个输入所引起的阶跃反应曲线之和, 即 $h(t) + [-h(t-a)]$ 。其中 $-h(t-a)$ 比 $h(t)$ 时间上迟后 a , 波形相同, 方向相反。

由脉冲反应曲线求阶跃反应曲线 $h(t)$ 可按下式进行

$$\left. \begin{aligned} h(t) &= g(t), & t < a \\ h(t) &= g(t) + h(t-a), & t \geq a \end{aligned} \right\} \quad (49-2-22)$$

4.1.3 反应曲线的图解处理方法

即将测试所得反应曲线转化成近似的数学表达式的方法。

a. 一阶近似法

(1) 如反应曲线在输入阶跃变化发生时, 其斜率不为零而为最大值见图 49-2-19, 则可取近似公式

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

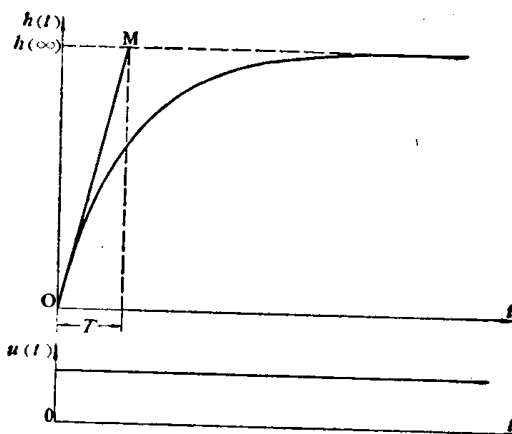


图 49-2-19 一阶近似法(方法之一)

步骤: 1) 求静态放大系数 K

$$K = \frac{h(\infty) - h(0)}{u(\infty) - u(0)} \quad (49-2-23)$$

2) 在反应曲线的起始点作切线交稳态值的渐近线于 M, 则 OM 在时间轴上投影为时间常数 T 。

3) 当反应曲线的切线不易作得准确时, 可由反应曲线值求取传递函数, 见图 49-2-20。