

《过程控制与自动化仪表》

杨延西（第三版）

吉林大学 王 萍

- 目录:**
- 第1章 绪论
 - 第2章 过程参数的检测与变送
 - 第3章 过程控制仪表
 - 第4章 被控过程的数学模型
 - 第5章 简单控制系统的设计
 - 第6章 常用高性能过程控制系统
 - 第7章 实现特殊工艺要求的过程控制系统
 - 第8章 复杂过程控制系统
 - 第9章 基于网络的过程计算机控制系统
 - 第10章 典型生产过程控制与工程设计

课程基础:

电子技术基础

微型计算机原理与应用

自动控制理论

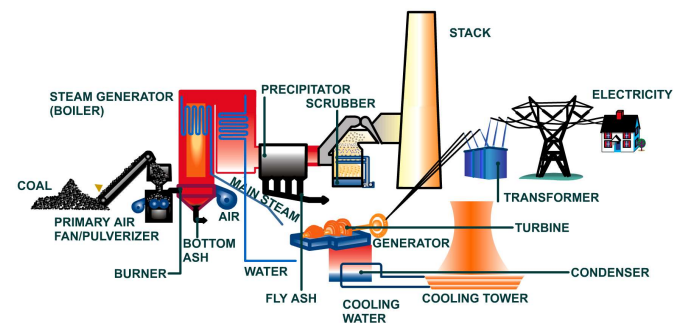
计算机网络

课时安排:

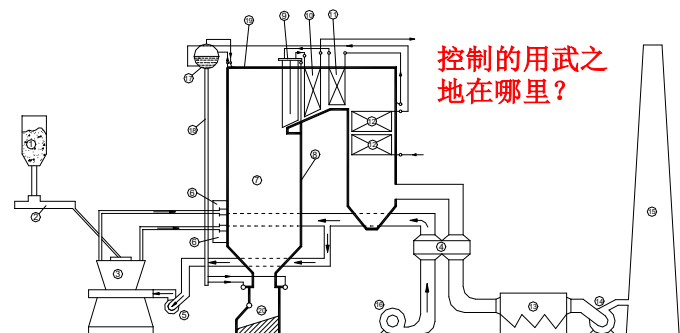
40教学+8实验



电站锅炉及其辅助设备系统



电站锅炉及其辅助设备系统简图



- ①—煤斗；②—给煤机；③—磨煤机；④—空气预热器；⑤—排粉风机；⑥—燃烧器；
⑦—炉膛；⑧—水冷壁；⑨—屏式过热器；⑩—高温过热器；⑪—低温过热器；
⑫—省煤器；⑬—除尘器；⑭—吸风机；⑮—烟囱；⑯—送风机；⑰—汽包；
⑱—下降管；⑲—顶棚过热器；⑳—排渣室

第1章 绪论

过程控制 (Process control) 是生产过程自动化的简称。它泛指石油、化工、水利、电力、冶金、轻工、纺织、制药、建材、核能等工业生产中**连续的或按一定周期程序**进行的生产过程自动控制，是自动化技术的重要组成部分。

连续生产过程的特征是：生产过程中的各种流体在连续（或间歇）的流动过程中进行着物理化学反应、物质能量的转换或传递。

例如室内温度的控制。

图1为人工控制室温。假设在冬季，室内加温是通过热水加热器，将送风加热后源源不断送往恒温室。为保证恒温室温符合要求，操作人员要随时观察温度计的指示值，并随时判断和决定如何操作阀门来保证恒温要求，然后进行操作。

在此人的作用可分为三步：

眼看
脑想
动手

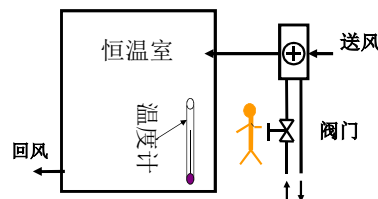


图1 室温人工控制示意图

眼看——用**传感器或变送器**将温度信号转换为控制器可接受的信号。（还有什么方式？？）

脑想——**控制器**将输入的实测温度信号和要求值进行比较（相减求偏差），并按偏差值计算出控制量。

动手——人工调整阀门开口，**执行器**完成控制器命令。

人工控制受制于人的经验和注意力，控制不精确。而自动控制按设定好的方案进行计算控制，可以做到精确的、恰当的控制。

图2为室温自动控制系统，自动化仪表代替了人。

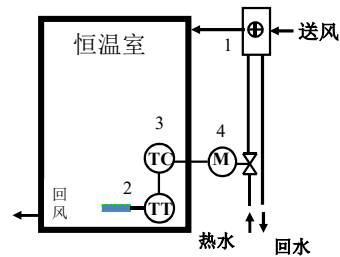


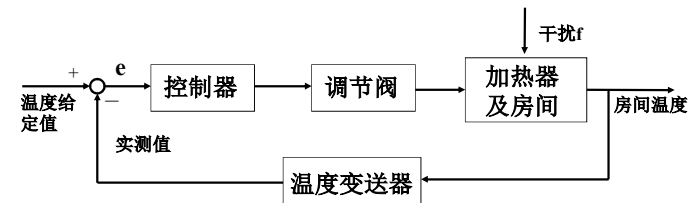
图2 室温自动控制系统示意图
1—热水加热器；3—控制器；
2—传感变送器；4—执行器

过程控制系统的定义：

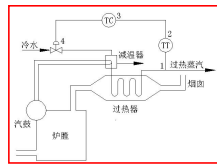
为实现对某个工艺参数的自动控制，由相互联系、制约的一些仪表、装置及工艺对象、设备构成的一个整体。

一般用原理框图来表示控制系统原理。

如图2的室温控制系统是由温度变送器、控制器、电动调节阀和加热器及房间组成。

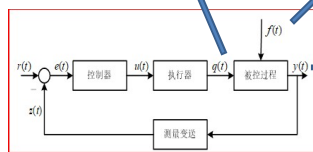


过程控制系统的组成：被控过程+自动化仪表



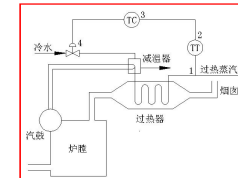
(2) 控制参数（亦称操作变量、控制介质） $q(t)$ ：使被控参数保持期望值的物料量或能量；

(3) 干扰量 $f(t)$ ：除被控参数外，作用于被控过程并引起被控参数变化的各种因素；



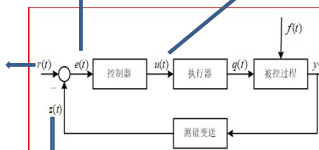
(1) 被控参数（亦称系统输出） $y(t)$ ：被控过程内要求保持稳定的工艺参数；

过程控制系统的组成：被控过程+自动化仪表



(6) 偏差 $e(t)$ ：设定值与反馈值之差；
(7) 控制作用 $u(t)$ ：控制器的输出值。

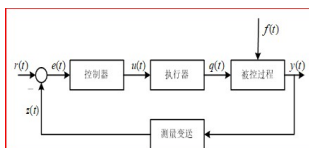
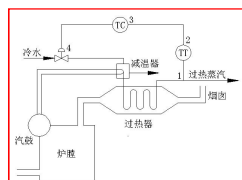
(4) 设定值 $r(t)$ ：与被控参数相对应的设定值；



(5) 反馈值 $z(t)$ ：被控参数经测量变送后的实际测量值；

过程控制系统的组成：被控过程+自动化仪表

- (1) 被控参数（亦称系统输出） $y(t)$ ：被控过程内要求保持稳定的工艺参数；
- (2) 控制参数（亦称操作变量、控制介质） $q(t)$ ：使被控参数保持期望值的物料量或能量；
- (3) 干扰量 $f(t)$ ：除被控参数外，作用于被控过程并引起被控参数变化的各种因素；
- (4) 设定值 $r(t)$ ：与被控参数相对应的设定值；
- (5) 反馈值 $z(t)$ ：被控参数经测量变送后的实际测量值；
- (6) 偏差 $e(t)$ ：设定值与反馈值之差；
- (7) 控制作用 $u(t)$ ：控制器的输出值。



1.1 过程控制的特点

过程控制系统具有以下特点：

1. 控制对象复杂、控制要求多样；
2. 控制方案丰富；
3. 控制对象大多属于慢过程；
4. 大多数工艺要求定值控制；
5. 大多使用标准化的检测、控制仪表及装置。

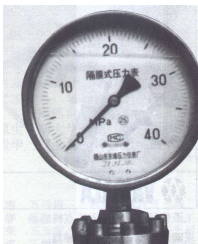
1.2 过程控制的发展概况

过程控制的发展历程，就是过程控制装置（自动化仪表）与系统的发展历程。

1.2.1 过程控制装置与系统的发展过程

1. 局部自动化阶段（20世纪50~60年代）

- 自动化仪表安装在现场生产设备上，只具备简单的测控功能。
- 适用于小规模、局部过程控制。



2. 模拟单元仪表控制阶段（20世纪60~70年代）

特点：

- 自动化仪表划分成各种标准功能单元，按需要可以组合成各种控制系统。
- 控制仪表集中在控制室，生产现场各处的参数通过统一的模拟信号，送往控制室。操作人员可以在控制室监控生产流程各处的状况。
- 适用于生产规模较大的多回路控制系统。

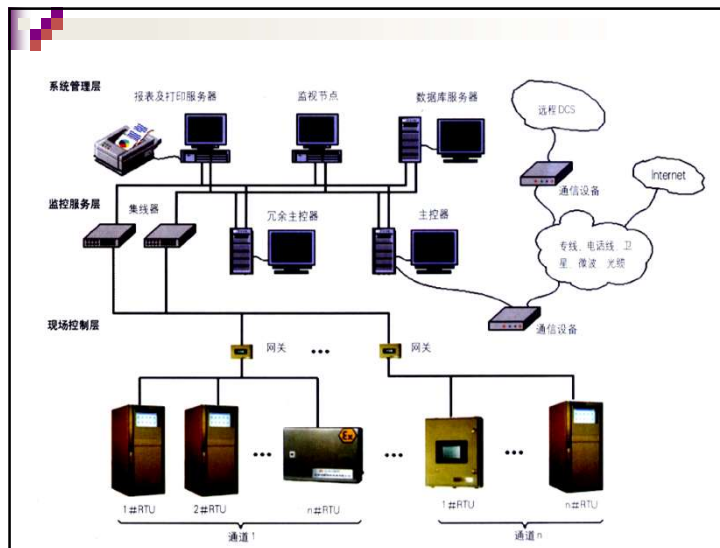
3. 集散控制阶段（20世纪70年代中期至今）

❑ 直接数字控制（DDC, Direct Digital Control）故障危险高度集中，一旦计算机出现故障，就会造成所有控制回路瘫痪，使生产过程风险加大。因此，DDC系统并未得到广泛应用。

80年代初，随着计算机性能提高、体积缩小，出现了内装CPU的数字控制仪表。

❑ 集中、分散相结合的集散型控制系统（DCS, Distributed Control System）

- DCS系统实行分层结构，将控制故障风险分散、管理功能集中。-----得到广泛应用
- 基于“集中管理，分散控制”的理念



❑ 智能仪表构成的现场总线控制系统（FCS, Fieldbus Control System）。

FCS系统把控制功能彻底下放到现场，依靠现场智能仪表便可实现生产过程的检测、控制。

而用开放的、标准化的通信网络——现场总线，将分散在现场的控制系统的通信连接起来，实现信息集中管理。

1.2.2 过程控制策略与算法发展

伴随着自动化仪表的发展，过程控制策略与算法也经历了由简单到复杂的发展历程。

以经典控制理论为基础的**PID**（Proportional Integral Derivative）控制算法，由单回路控制发展了**串级控制**、**比值控制**、**前馈控制**、**均匀控制**、**Smith预估控制**及**选择性控制**等控制策略。

随着现代控制理论和人工智能技术的发展，解耦控制、推断控制、预测控制、模糊控制、自适应控制等控制策略与算法，也日趋完善。

现代自动控制技术的主要特点：

- 1、功能综合化，控制与管理一体化已成为趋势，其应用领域和规模越来越大。
- 2、技术密集化、系统集成化，是控制技术、通讯技术、计算机技术相结合的产物。
- 3、系统的智能化程度日益提高，控制精度越来越高，控制手段日益丰富。

1.3 过程控制系统分类及其性能指标

1.3.1 过程控制系统的分类

过程控制系统有多种分类方法。

按所控制的参数来分：**温度控制系统**、**压力控制系统**、**流量控制系统**等；

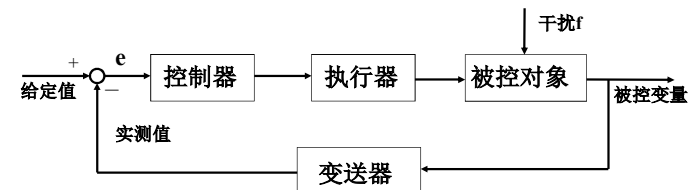
按控制系统所处理的信号方式来分：**模拟控制系统**与**数字控制系统**；

按控制器类型来分：**常规仪表控制系统**与**计算机控制系统**等。

但在讨论控制原理时，常用的分类方法是按设定值的形式或系统的结构特点分类。

1. 按设定值的形式分类

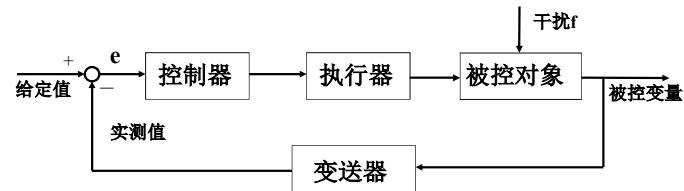
- 1) **定值控制系统**——设定值恒定不变。
- 2) **随动控制系统**——设定值随时可能变化。
- 3) **程序控制系统**——设定值按预定的时间程序变化。



2. 按系统的结构特点分类

1) 反馈控制系统（闭环控制系统）

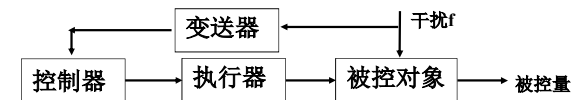
将被控变量输入到控制器，形成闭环，具有被控变量负反馈的控制系统。如：



反馈控制系统是过程控制最基本的结构形式。

2) 前馈控制系统（开环控制系统）

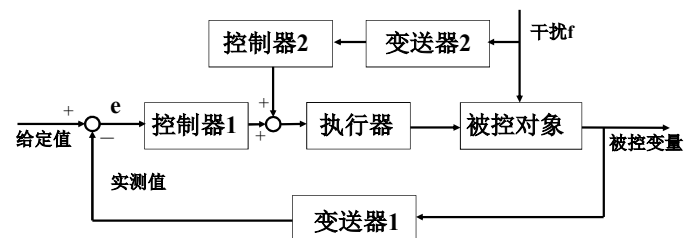
控制系统没有被控变量负反馈，不将被控变量引入到控制器输入端。如：



开环控制系统原理框图

3) 复合控制系统

前馈与反馈相结合，优势互补。如：

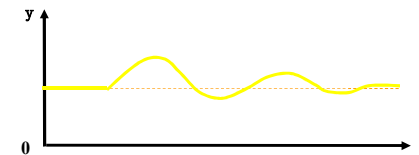


前馈-反馈复合控制系统原理框图

1.3.2 过程控制系统的性能指标

当被控对象受到干扰、被控变量发生变化时，控制系统抵制干扰、纠正被控变量的过程，反映了控制系统的优劣。为此，要有评价控制系统的性能指标。

控制系统的性能指标是根据工艺对控制的要求来制定的，概括为**稳定性**、**准确性**和**快速性**。

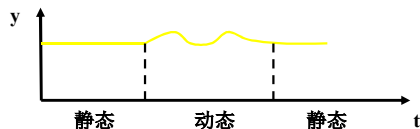


1.3.2.1 稳态与动态

1、**稳态**—把被控变量不随时间变化的平衡状态称为系统的稳态（**静态**）。

当自动控制系统的输入和输出均恒定不变时，系统就处于一种相对稳定的平衡状态，系统的各个环节也都处于稳定状态，但生产还在进行，物料和能量仍然有进有出，只是平稳进行没有改变。

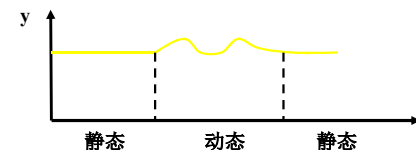
静态特性—静态时系统各环节的输入输出关系。



2、**动态**—把被控变量随时间变化的不平衡状态称为系统的动态。

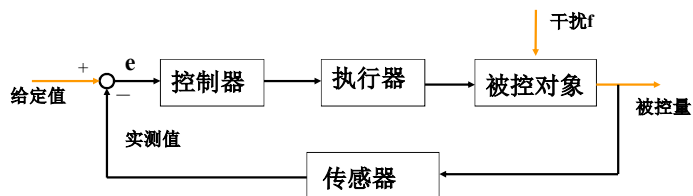
即控制系统从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态的**过渡过程**。当干扰破坏了系统的平衡时，被控变量就会发生变化，而控制器、控制阀等自动化装置就要产生控制作用来使系统恢复平衡。

动态特性—在动态过程中系统各环节的输入输出变化关系。



1.3.2.2 控制系统的过渡过程

控制系统的输入变化后，系统从原来的平衡状态，经过动态过程到达新的平衡状态的动态历程称为系统的过渡过程。



系统的过渡响应受**内部**和**外部**两种因素的影响。

1、内部因素：系统特性

系统的特性是由系统中各环节的特性和系统的结构所决定的。

2、外部因素：输入信号

在系统特性一定的情况下，被控变量随时间的变化规律取决于系统的输入信号。

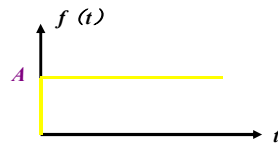
生产中，出现的干扰信号是随机的。但在分析和设计控制系统时，为了充分体现系统的特性和分析方便，常选择一些特定的输入信号，其中常用的是阶跃信号和正弦信号。

❖ 阶跃信号的输入突然，对被控变量的影响也最大。如果一个控制系统能够有效地克服这种干扰，那么对其它比较缓和的干扰也能很好地克服。

❖ 阶跃信号的形式简单，容易实现，便于分析、实验和计算。故更多使用阶跃信号。

如图，输入信号在 $t=0$ 时，阶跃上升幅度为 A ，其后保持。表达为

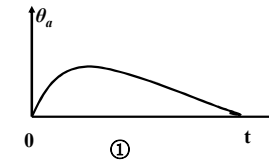
$$f(t) = Au(t)$$



在阶跃输入的扰动作用下，定值控制系统过渡过程有**四种**形式：

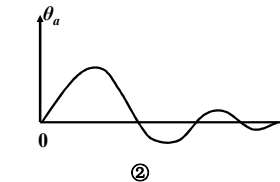
①单调衰减过程

被控变量在给定值的一侧作单调变化，最后稳定在某一数值上。



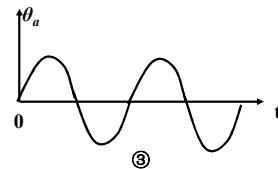
②振荡衰减过程

被控变量上下波动，但幅度逐渐减少，最后稳定在某一数值上。



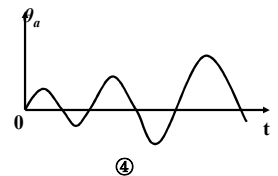
③等幅振荡过程

被控变量在给定值附近来回波动，且波动幅度保持不变。



④振荡发散过程

被控变量来回波动，且波动幅度逐渐变大，离给定值越来越远。



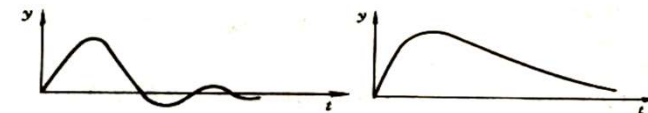
过渡过程的分类

(1) 稳定的过渡过程

单调过程和衰减振荡过程是稳定的过渡过程。被控变量经过一段时间后，逐渐趋向原来的或新的平衡状态。

衰减振荡过程的过渡过程较短，经常采用。

单调过程的过渡过程较慢，被控变量长时间地偏离给定值，一般不采用，只是在生产上不允许被控变量有波动的情况下才采用。

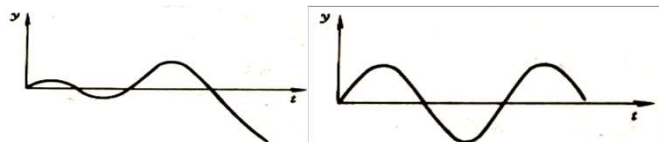


(2) 不稳定过渡过程

发散振荡过程中，被控变量不但不能达到平衡状态，而且逐渐远离给定值，它将导致被控变量超越工艺允许范围，这是生产上所不允许的。

(3) 临界过渡过程

处于稳定与不稳定之间，一般也认为是不稳定过程，生产上一般不采用。只是某些控制要求不高的场合，如位式控制时，只能达到这种效果。



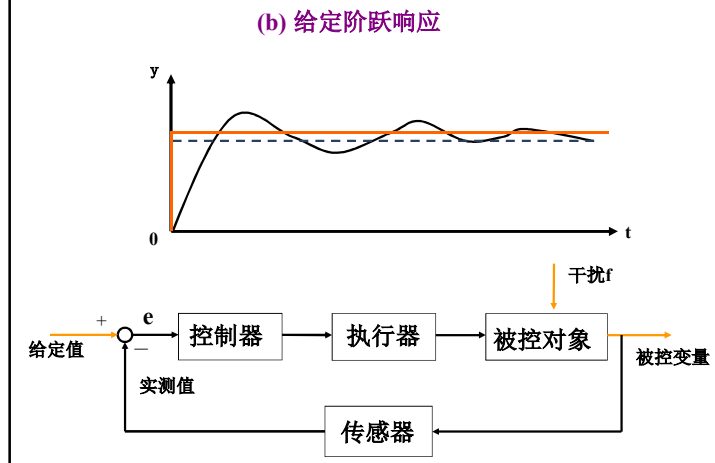
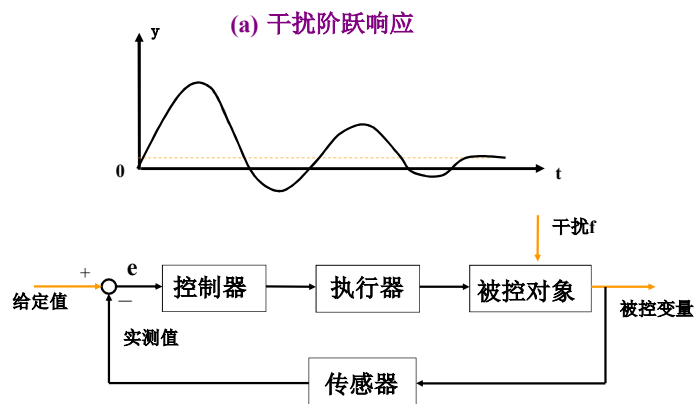
1.3.2.3 控制系统的性能指标

对控制系统的性能评价，是根据工艺对控制过程结果的要求来衡量的。控制系统的过渡过程曲线是评价控制系统品质的样本。

最典型的控制性能测试是给系统输入一个阶跃信号，观察其阶跃响应的品质。

阶跃响应分给定阶跃响应和干扰阶跃响应两类。其阶跃响应曲线有所不同，但反映的控制系统的性能指标是一致的。

干扰阶跃响应和给定阶跃响应的区别：



控制性能指标有单项指标和综合指标两类

单项性能指标以控制系统被控参数过渡过程的单项特征量作为性能指标，而偏差积分性能指标则是一种综合性指标。由于在多数情况下，都希望得到衰减振荡过程，所以以衰减振荡的过渡过程形式为例，讨论控制系统的品质指标。

1. 系统阶跃响应的单项性能指标

单项性能指标包含了对控制系统的**稳定性、准确性和快速性**三方面的评价。

1) 衰减比 n 和衰减率 ψ

设第一个波峰值为 y_1 、同向第二个波峰值为 y_2

$$n = \frac{y_1}{y_2} \quad \psi = \frac{y_1 - y_2}{y_1} = 1 - \frac{1}{n}$$

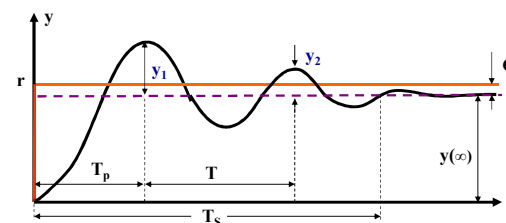


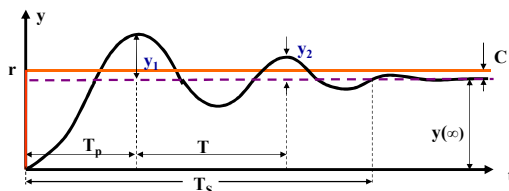
图1.3 闭环控制系统对设定值的阶跃扰动的响应曲线

衰减比 n 和衰减率 ψ 是表示系统稳定程度的指标。 n 大于1，则系统是稳定的。随着 n 的增大，过渡过程逐渐由衰减振荡趋向于单调过程。

试验证明：**衰减比在4:1到10:1之间时，过渡过程的衰减程度合适，过渡过程较短。**

衰减比 n 与衰减率 ψ 之间有简单的对应关系：

$n = 4:1 \sim 10:1$ 就相当于 $\psi = 75\% \sim 90\%$



2) 最大动态偏差 y_I 和超调量 σ

最大动态偏差表示系统瞬间偏离稳态值的最大程度。即： $y_I = y_{\max} - y(\infty)$

最大动态偏差是控制系统动态准确性指标。

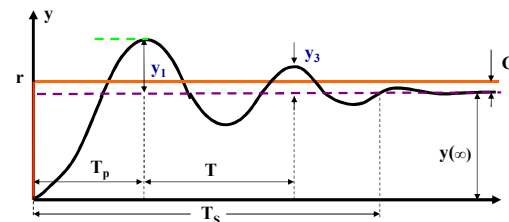


图1.3 闭环控制系统对设定值的阶跃扰动的响应曲线

有时也采用超调量 σ 来表示被控参数偏离稳态值的程度， σ 的定义是第一个波峰值与最终稳态值 $y(\infty)$ 之比。即

$$\sigma = \frac{y_1}{y(\infty)} \times 100\%$$

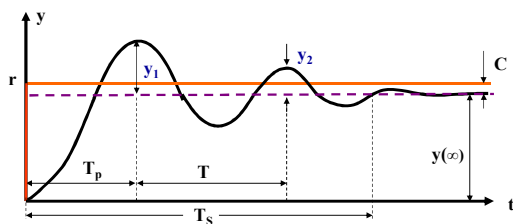


图1.3 闭环控制系统对设定值的阶跃扰动的响应曲线

3) 余差C

过渡过程结束后，被控参数的稳态值 $y(\infty)$ 与设定值之间的残余偏差叫做余差，也称静差。是衡量控制系统稳态准确性的指标。

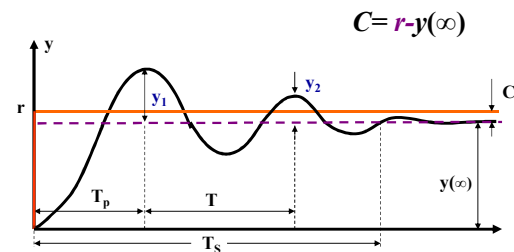


图1.3 闭环控制系统对设定值的阶跃扰动的响应曲线

4) 调节时间 T_s 和振荡频率 ω

T_s 是指从过渡过程开始到过渡过程结束所需的时间。当被控参数与稳态值间的偏差进入稳态值的 $\pm 5\%$ （或 $\pm 2\%$ ）范围内，就认为过渡过程结束。

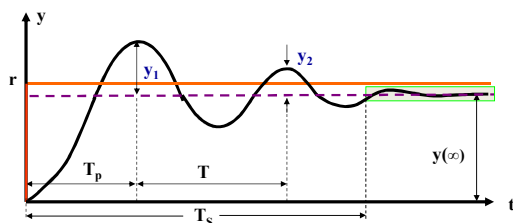


图1.3 闭环控制系统对设定值的阶跃扰动的响应曲线

调节时间和振荡频率是衡量控制系统快速性的指标。

过渡过程中相邻两同向波峰（或波谷）之间的时间间隔叫振荡周期 T ，其倒数称为振荡频率

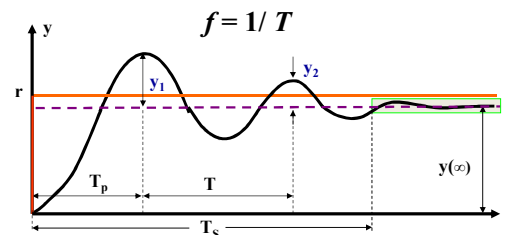


图1.3 闭环控制系统对设定值的阶跃扰动的响应曲线

另外还有峰值时间 T_p （又称上升时间），是指过渡过程开始，至被控参数到达第一个波峰所需要的时间。也是衡量控制系统快速性的指标。

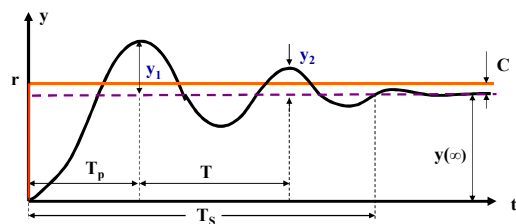


图1.3 闭环控制系统对设定值的阶跃扰动的响应曲线

[例] 某换热器的温度控制系统给定值为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

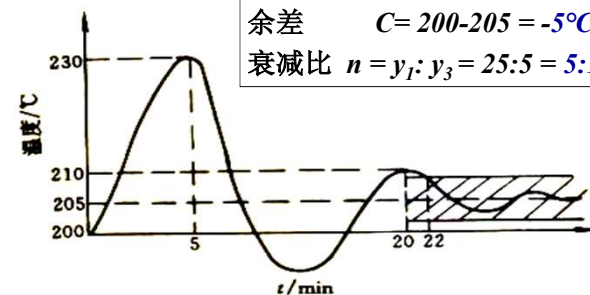
在阶跃干扰作用下的过渡过程曲线如图所示。试求最大偏差、余差、衰减比、振荡周期和过渡时间。

解：

$$\text{最大偏差 } Y_1 = 230 - 205 = 25^{\circ}\text{C}$$

$$\text{余差 } C = 200 - 205 = -5^{\circ}\text{C}$$

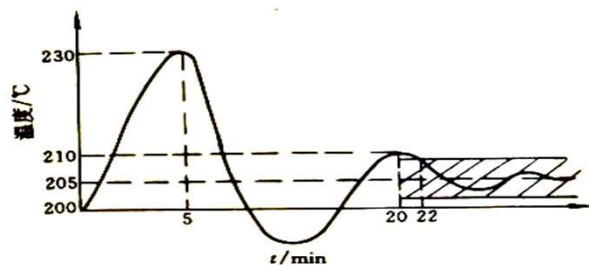
$$\text{衰减比 } n = y_1 : y_3 = 25 : 5 = 5 : 1$$



振荡周期 $T = 20 - 5 = 15 \text{ (min)}$

设被控变量进入稳态值的 $\pm 2\%$ ，就认为过渡过程结束，则误差区域 $= 205 \times (\pm 2\%) = \pm 4.1^{\circ}\text{C}$

在新稳态值（ 205°C ）两侧以宽度为 $\pm 4.1^{\circ}\text{C}$ 画一区域（阴影线）。曲线进入时间点 $T_s = 22\text{min}$



控制系统的单项品质指标小结

□ **稳定性** 衰减比 $n = 4:1 \sim 10:1$ 最佳

□ **准确性** 余差 C 小好

最大偏差 Y_1 小好

□ **快速性** 过渡时间 T_s 短好

振荡周期 T 短好

各品质指标之间既有联系、又有矛盾。例如，过分减小最大偏差，会使过渡时间变长。因此，应根据具体工艺情况分清主次，对生产过程有决定性意义的主要品质指标应优先予以保证。

2. 系统阶跃响应的综合性能指标——偏差积分

单项指标虽然清晰明了，但如何统筹考虑比较困难。而偏差幅度和偏差存在的时间都与偏差积分有关，因此用偏差积分一个指标就可以全面反映控制系统的品质。

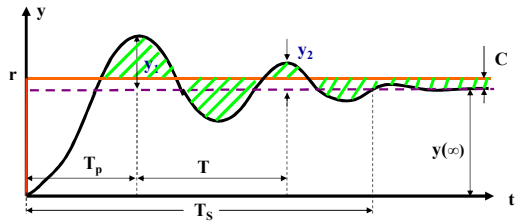


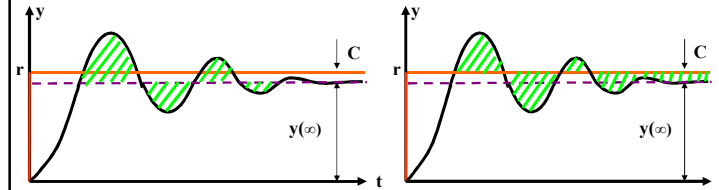
图1.3 闭环控制系统对设定值的阶跃扰动的响应曲线

偏差积分的原始定义： $IE = \int_0^{\infty} e(t) dt$

偏差的定义存在分歧：

$$e(t) = y(\infty) - y(t) \text{ 不能表达余差}$$

$$e(t) = y(r) - y(t) \text{ 如有余差则积分无穷大}$$



偏差积分指标有以下几种形式：

① 偏差积分 IE (Integral of Error)

$$IE = \int_0^{\infty} e(t) dt$$

缺点：不能保证系统是衰减振荡。

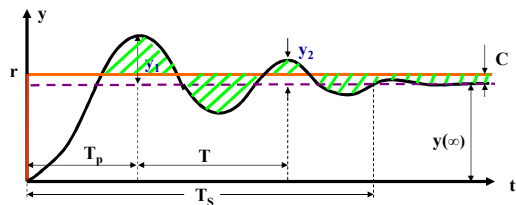


图1.3 闭环控制系统对设定值的阶跃扰动的响应曲线

② 绝对偏差积分 IAE (Integral Absolute value of Error)

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

排除了正负偏差抵消的可能。

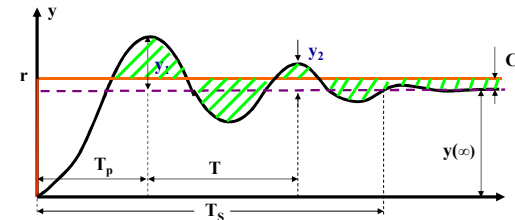


图1.3 闭环控制系统对设定值的阶跃扰动的响应曲线

③平方偏差积分 ISE (Integral of Squared Error)

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad \text{对大偏差敏感}$$

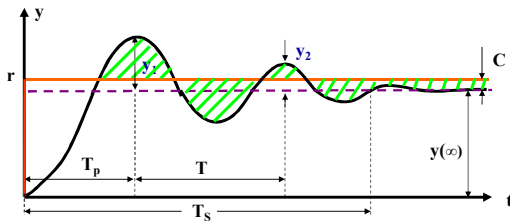


图1.3 闭环控制系统对设定值的阶跃扰动的响应曲线

④时间与绝对偏差乘积积分 $ITAE$ (Integral of Time multiplied by the Absolute value of Error)

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad \text{对调节时间敏感, 对初始偏差不敏感, 而对后期偏差非常敏感}$$

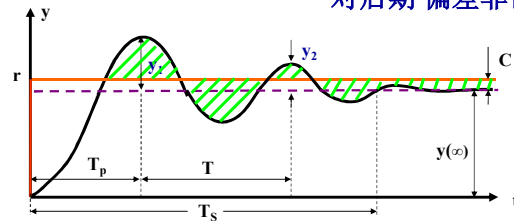
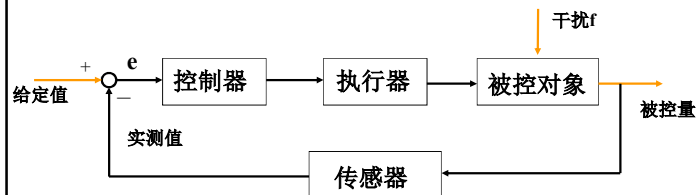


图1.3 闭环控制系统对设定值的阶跃扰动的响应曲线

1.3.2.4影响控制系统过渡过程品质的主要因素

控制系统的过渡响应品质指标主要取决于系统结构和系统中各环节的特性。



1.4 控制系统设计步骤

1. 确定控制目标

- 1) 热油出口温度稳定;
- 2) 出口温度与烟道气含氧量稳定;
- 3) 温度稳定与热效率最高。

2. 选择被控参数

直接参数与间接参数

3. 选择控制量

燃料油流量与冷油流量→出口温度
挡板开度与送风挡板→含氧量

4. 确定控制方案

简单与复杂、单输入与多输入、最优控制

5. 选择控制策略

PID、高级过程控制

6. 选择执行器

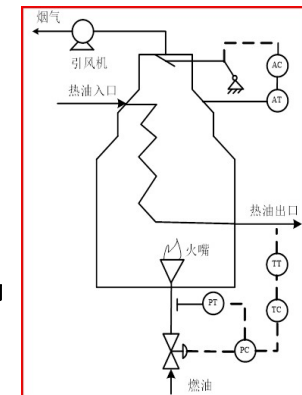
气动与电动

7. 设计报警与联锁保护系统

高、低限值; 加热炉停车程序: 停燃油泵→关燃油阀→停引风机→切断热油

8. 工程化设计

9. 系统投运、调试和整定参数



1.5 自动化仪表概述

1.5.1 自动化仪表的分类及发展

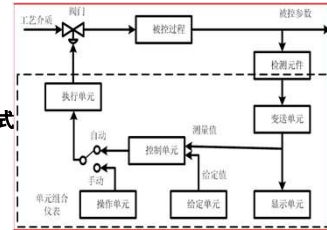
1.按安装场地分：一次仪表，二次仪表（现场就地安装的仪表简称一次仪表，将盘装的显示仪表简称二次仪表）

2.按能源分：液动，气动和电动

3.按信号类型分：模拟式和数字式

4.按结构形式分：基地式和单元组合式

（图1—8）、组装式、集中/分散式）



电动单元组合式仪表构成的控制系统

1.5.2 自动化仪表的信号制与能源供给

1.模拟仪表的信号制

- 1) 气动仪表：0.02~0.1MPa的模拟气压信号
- 2) 电动仪表（4~20mA, 1~5V; 直流电压与电流的优点：无感应、无相移、易转换、易获基准）

2.数字式仪表的通信标准

（不统一；内容：信息格式、编码方式、信号发送与接收、接口标准等）

3.能源供给：交流和直流

直流集中供电的优点：

- 1) 体积↓、重量↓、温升↓
- 2) 防停电能力↑ 3) 无交流，易于防爆

1.5.3 防爆仪表与防爆系统

1.安全防爆的基本概念

- 1) 防爆性能：本质安全与非本质安全；
- 2) 安全火花型防爆等级：30V DC; 最小引爆电流（表1—1）

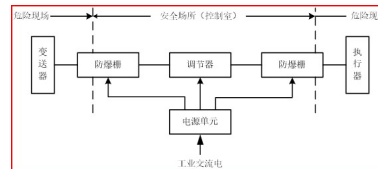
表1-1 爆炸性混合物最小引爆电流的等级

级别	最小引爆电流 (mA)	爆炸性混合物种类
I	$i > 120$	甲烷，乙烷，汽油，甲醇，乙醇，丙酮，氨，一氧化碳等
II	$70 < i \leq 120$	乙烯，乙醚，丙烯腈等
III	$i \leq 70$	氢，乙炔，二硫化碳，市用煤气，水煤气等

• 如DDZ-III型仪表防爆等级为“HIIIe”：“H”-安全火花型；“III”-最小引爆电流为III级，即低于70mA；e-周围气体自然温度为100℃，低于此温度，即可保证在e组气体中不自然起爆。

2.安全火花型防爆系统（图1—9）

条件：现场仪表为安全火花型；安全防爆栅隔离。



本章小结

- 1、过程控制的特点
- 2、过程控制系统的组成
- 3、过程控制系统的性能指标
- 4、过程控制系统的设计过程
- 5、自动化仪表分类
- 6、自动化仪表的信号制
- 7、安全防暴仪表及系统

思考题

1. 过程控制系统的组成及每一部分的作用
2. 试分析电厂锅炉过热蒸汽温度控制工作原理。
3. 过程控制系统的常用术语（被控制量、控制量和给定值等，结合实际系统分析）。
4. 过程控制系统的分类及各系统的特点。
5. 过程控制系统常用的性能指标（静态偏差、超调量、衰减率、过程时间等）。

本章结束
谢谢！