



过程控制原理应用I  
**检测技术与过程控制原理**

**主讲人：安剑奇、曹卫华、金星**

中国地质大学（武汉） 自动化学院

2020年9月

# 任课教师 安剑奇

---

---



- 教授、博士生导师、自动控制系主任
- 电话：027-87175089
- E-mail: [anjianqi@cug.edu.cn](mailto:anjianqi@cug.edu.cn)
- 办公地址：先进控制与智能自动化研究所 信息楼703室
- 个人主页: [http://grzy.cug.edu.cn/anjianqi/zh\\_CN/index.htm](http://grzy.cug.edu.cn/anjianqi/zh_CN/index.htm)
- 研究方向：过程控制，智能控制，信息融合
- 教授课程：检测技术与过程控制原理、自动控制原理、微机原理与接口技术、人工智能与无人驾驶（通选课）

# 任课教师 曹卫华

---

---

- 教授、博士生导师、自动化学院常务副院长
- E-mail: [weihuacao@cug.edu.cn](mailto:weihuacao@cug.edu.cn)
- 办公地址: 信息楼313室
- 个人主页: [http://grzy.cug.edu.cn/caoweihua/zh\\_CN/index.htm](http://grzy.cug.edu.cn/caoweihua/zh_CN/index.htm)
- 研究方向: 过程控制、智能系统和机器人技术
- 教授课程: 检测技术与过程控制原理、网络化过程控制系统、计算机网络等



# 任课教师 金星

---

---

- 教授
- E-mail: [jinxing@cug.edu.cn](mailto:jinxing@cug.edu.cn)
- 办公地址: 信息楼 206 室
- 个人主页: [http://grzy.cug.edu.cn/jinxing/zh\\_CN/index.htm](http://grzy.cug.edu.cn/jinxing/zh_CN/index.htm)
- 研究方向: 智能检测与智能仪器
- 教授课程: 检测技术与过程控制原理



# 课程介绍

## ➤ 过程控制原理与应用技术

- I:检测技术与过程控制原理—安剑奇、曹卫华、金星
- II: 网络化过程控制系统—何王勇、曹卫华

## ➤ 先修课程:

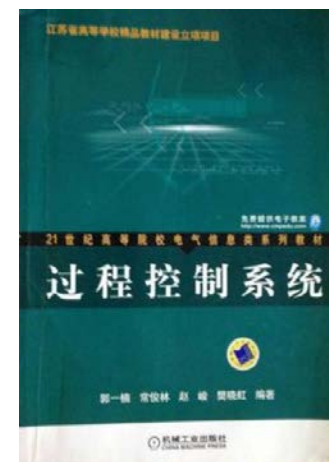
- 自动控制原理、传感器与自动化仪表等

## ➤ 教材:

- 郭一楠、常俊林等编著, 过程控制系统, 机械工业出版社, 2013年

## ➤ 参考书:

- 金以慧, 过程控制, 清华大学出版社
- 李国勇, 过程控制系统, 电子工业出版社, 2009
- 方康玲. 过程控制系统, 武汉理工大学出版社(第2版), 2007
- 邵欲森, 过程控制及仪表, 上海交通大学出版社, 2007



# 课程介绍

---

---

- 自动化专业重要的**限选课**、是指导**工业过程领域**控制系统分析、设计和集成的理论结合实践的**重要综合性课程**
- 课时数安排及学分数：
  - **学分**：3.5
  - **课时分配**：理论学时40 + 实验学时16 = 共计 56 学时
  - **配套实践环节**：PLC综合设计+DCS综合设计
- 评分标准：
  - **平时成绩**：占总评成绩**40%**（出勤及课堂表现、作业、实验）
  - **闭卷考试**：占总评成绩**60%**

# 课程要求

---

---



## ■ 课程要求

——上课认真听，下课仔细看。很难！很简单！

## ■ 课堂纪律

——手机关机或震动、上课保持安静、不准吃东西

## ■ 实验要求

——注重前、中、后三个环节

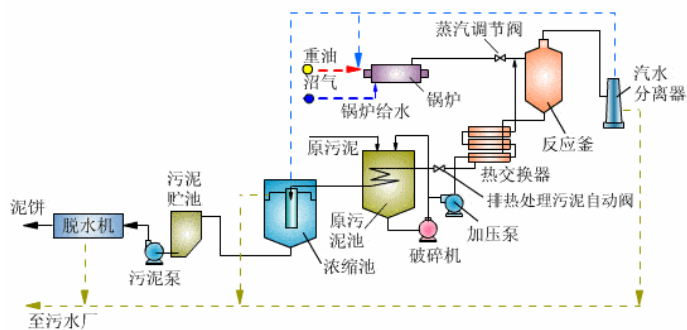
# 第1章 绪论



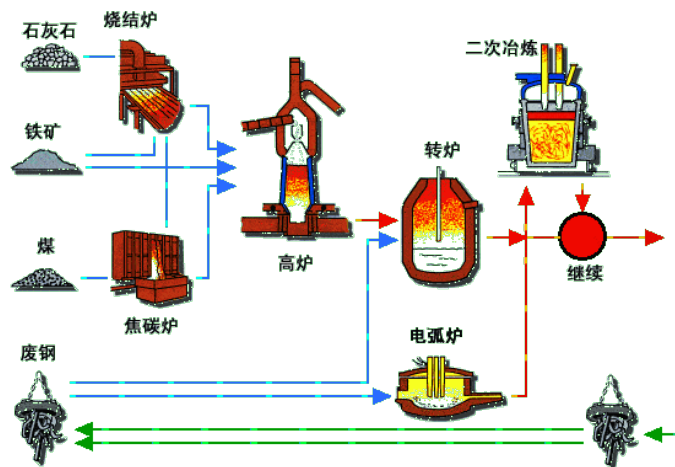


# 1.1 什么是过程控制

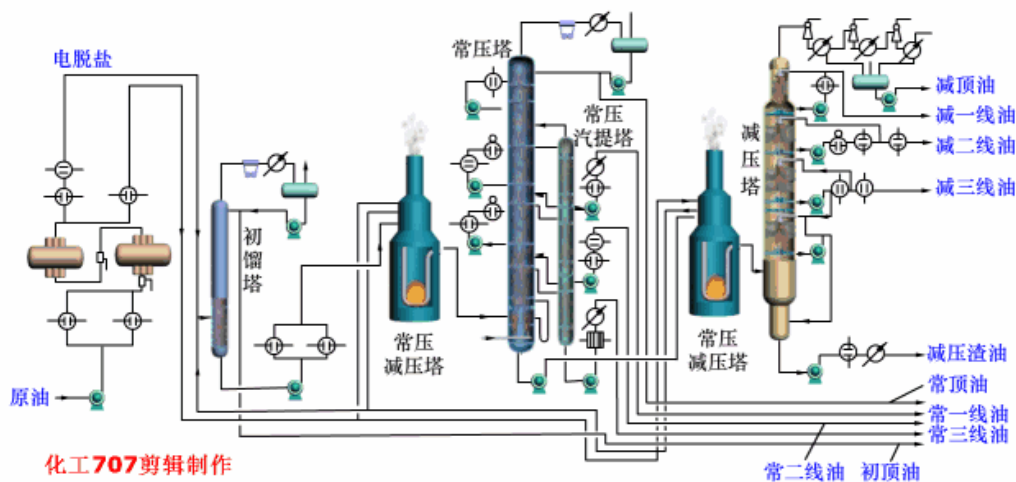
## ➤ 什么是过程？



高温加压热处理流程



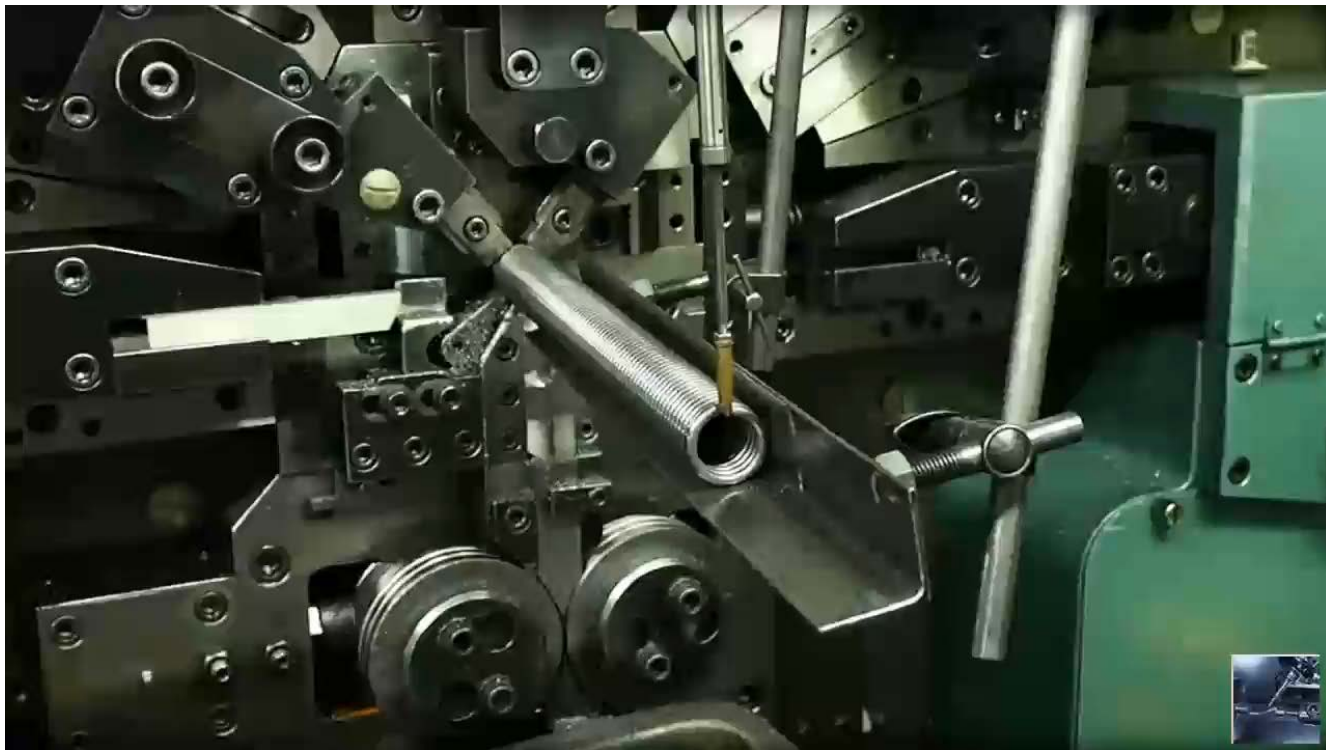
东方仿真COPYRIGHT



化工707剪辑制作

# 1.1 什么是过程控制

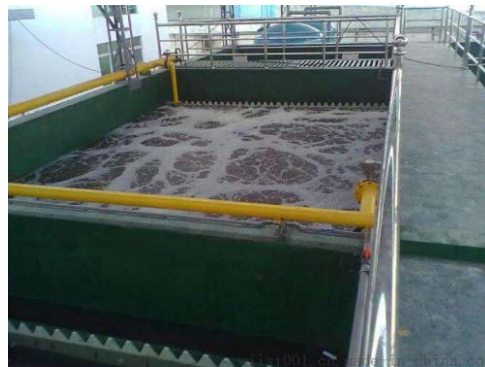
## ➤ 什么是过程?



# 1.1 什么是过程控制

## ➤ 什么是过程？（狭义）

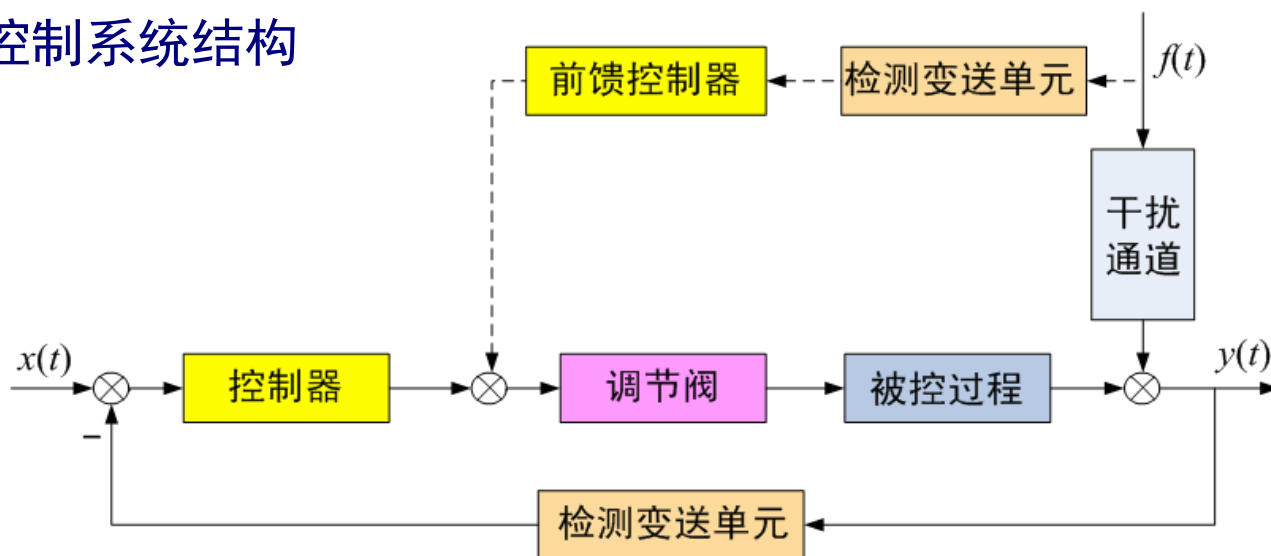
- 定义：通过生产装置或设备中进行的物质和能量的相互作用和转换，采用化学和物理的方法将原材料加工成产品的过程
- 表征过程的主要参量：温度、压力、流量、液位、物位、成分、浓度、粘度、PH值等
- 应用领域：石油、化工、冶金、机械、电力、纺织、建材、材料、轻工及航空航天等工业部门



# 1.1 什么是过程控制

## ➤ 什么是过程控制？

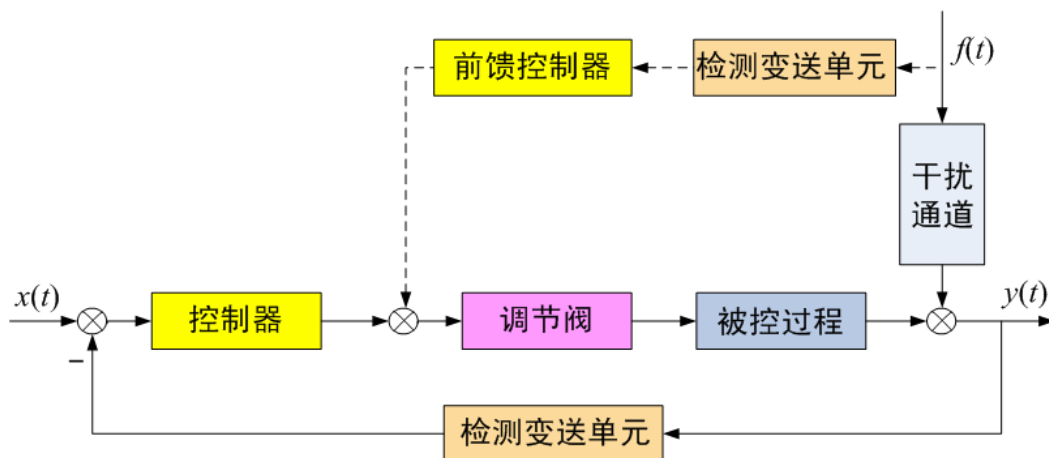
- 利用检测技术、控制理论与方法、执行器设备、网络与计算机平台等设计自动控制系统
- 保持生产过程中各种参数处于期望的运行工况，安全经济运行，满足环境和质量的要求
- 单回路的控制系统结构



# 1.1 什么是过程控制

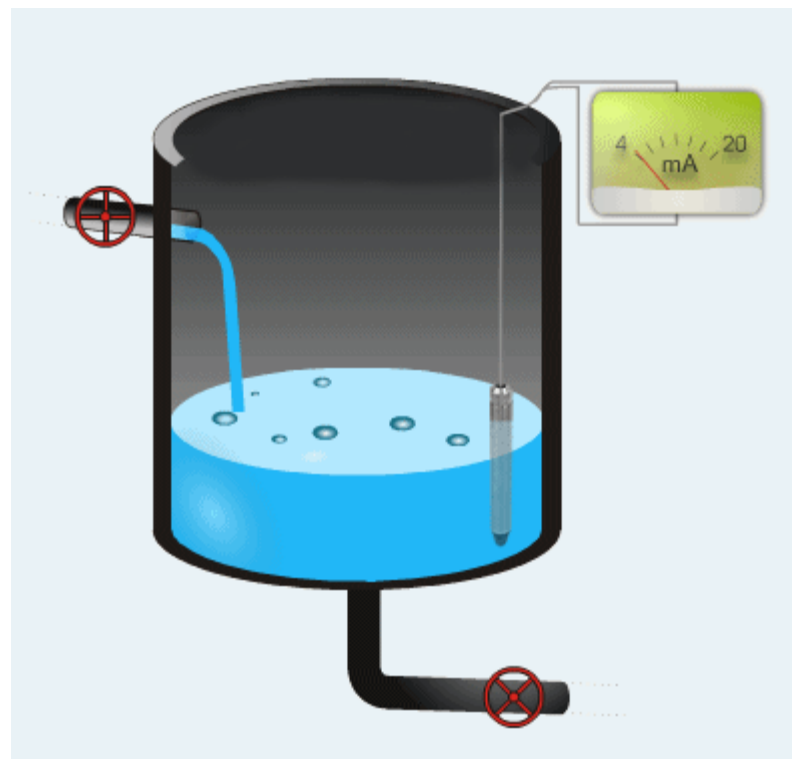
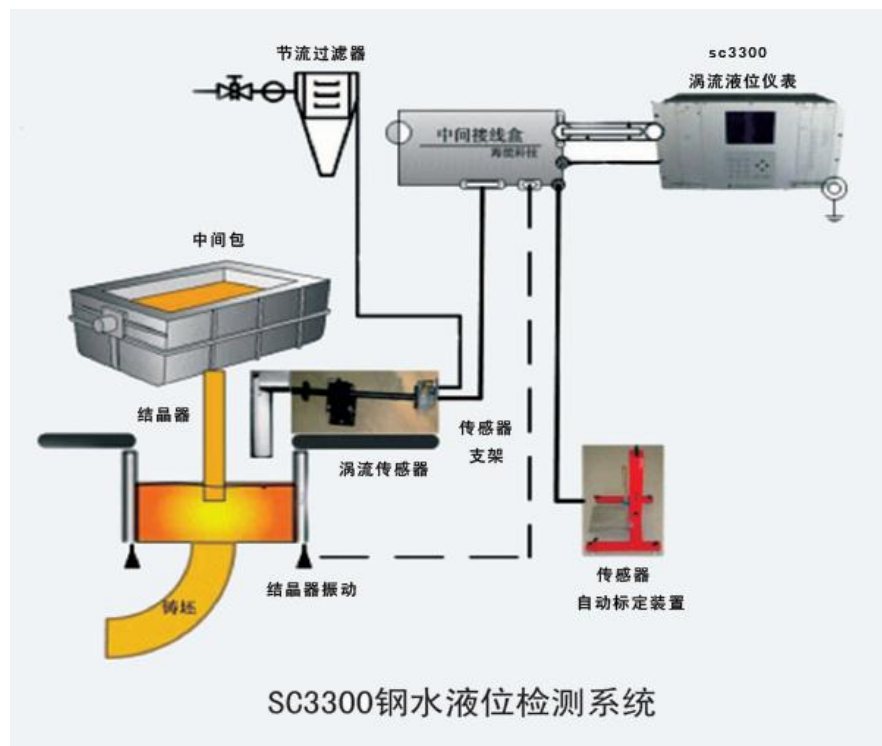
## ➤ 过程变量分为三类：

- **被控量 (Controlled Variable)**：被控制的过程变量，如液位，温度等。  
被控量的期望值称为设定值
- **操作量 (Manipulated Variable)**：用来保持被控量等于或接近设定值的过程变量。如液体输入流量，蒸汽量等
- **干扰量 (Disturbance Variable)**：能够影响被控量的过程变量，往往与过程操作环境的变化有关，如环境温度，物料入口温度等

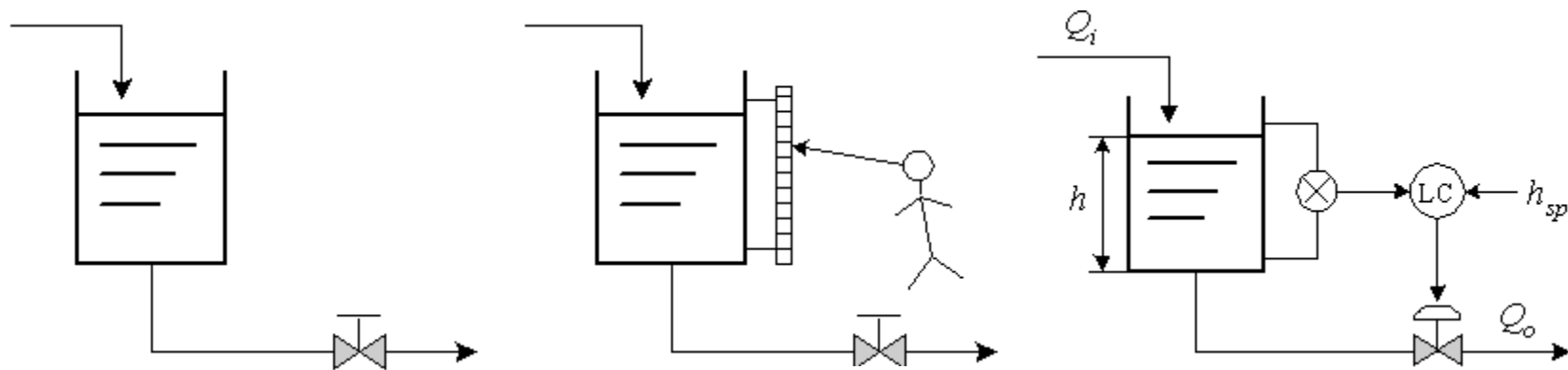


# 1.1 什么是过程控制----案例1液位控制

## ➤ 液位变化过程



# 1.1 什么是过程控制----案例1液位控制



(1) 基本问题

(2) 手动控制

(3) 自动控制

传感测量器：液位计+人眼

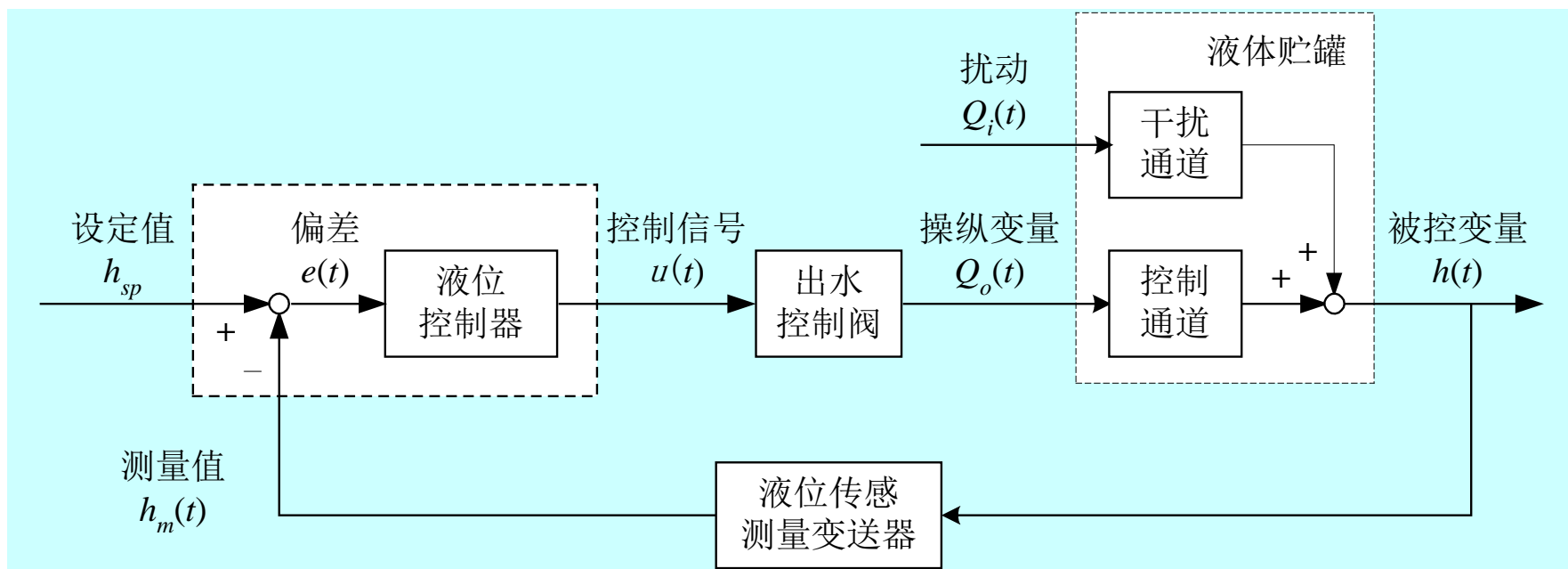
手动控制：

控制器：大脑

执行机构：手+手动阀

# 1.1 什么是过程控制----案例1液位控制

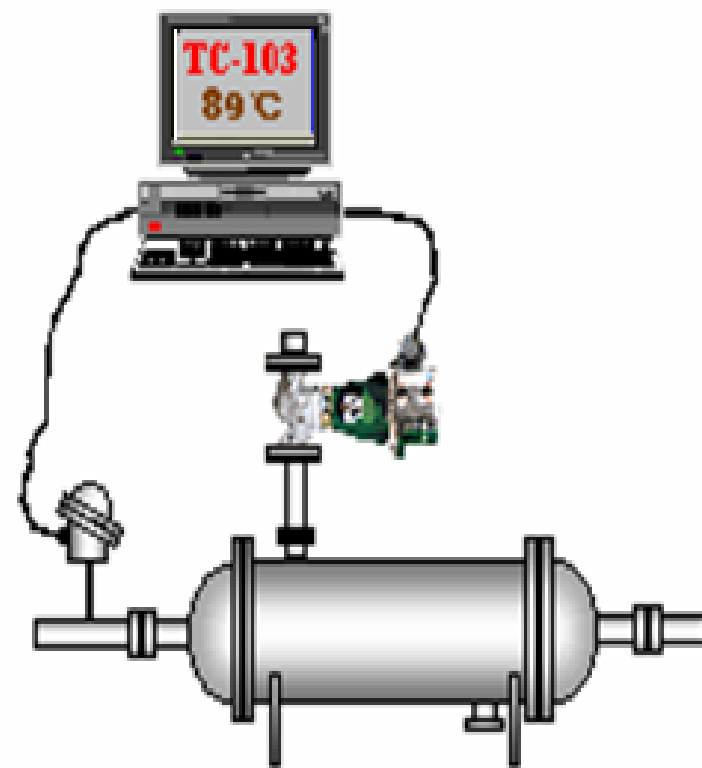
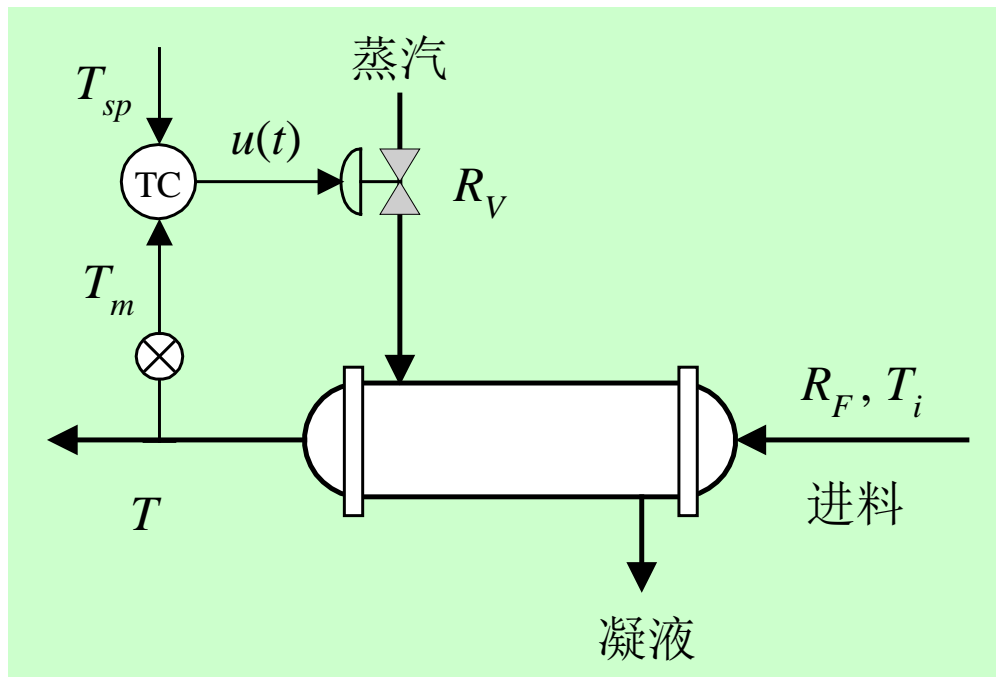
## ➤ 液位自动控制系统结构





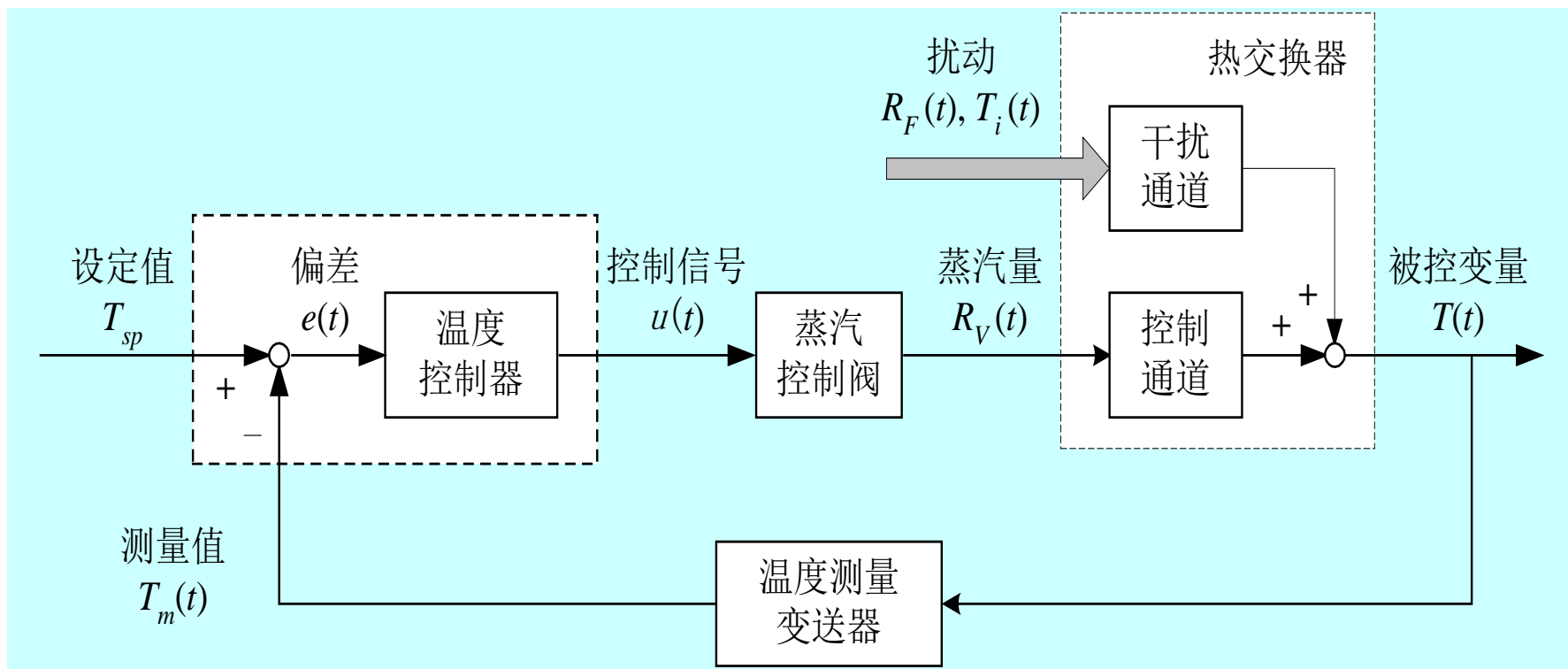
# 1.1 什么是过程控制----案例2温度控制

## ➤ 温度变化过程



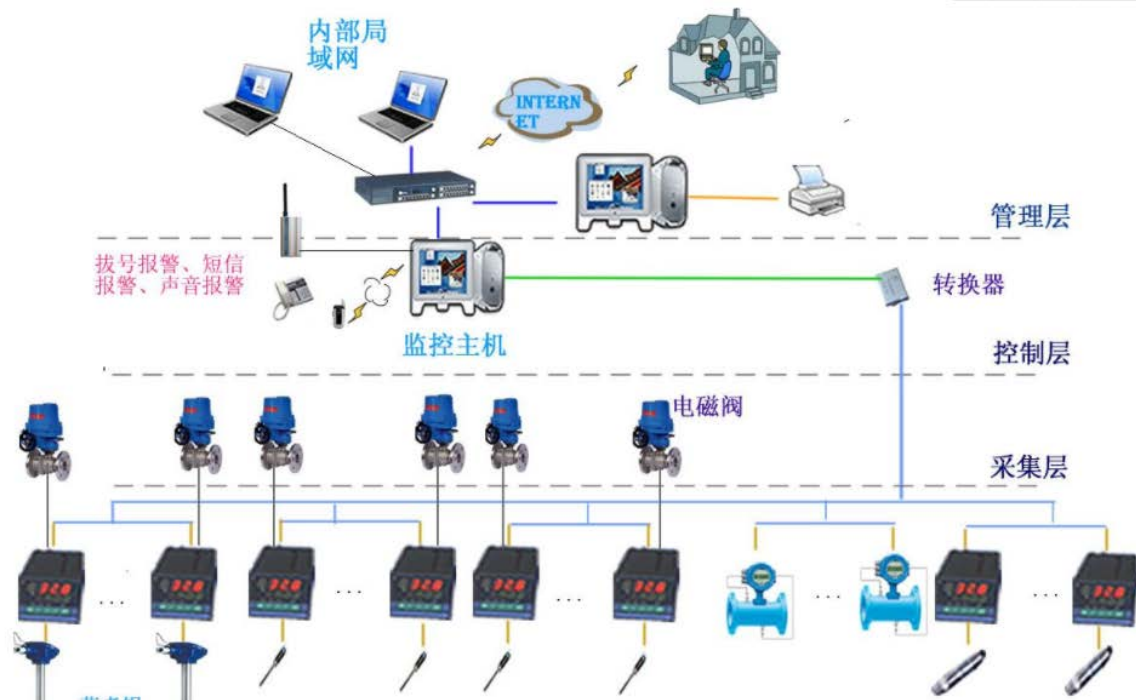
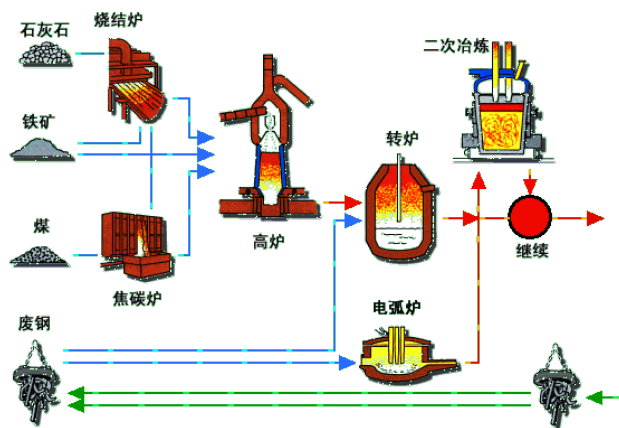
# 1.1 什么是过程控制----案例2温度控制

## ➤ 温度自动控制系统结构



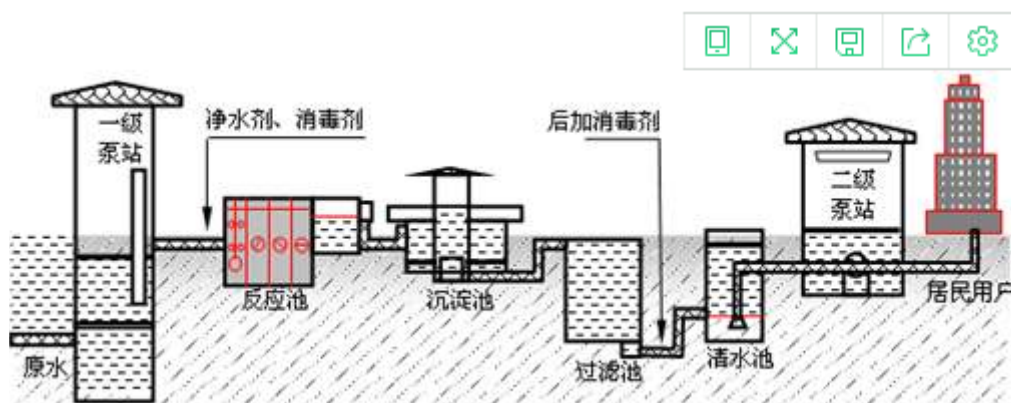
# 1.1 什么是过程控制----案例3多对象协调控制

## ➤ 网络化工程控制系统结构

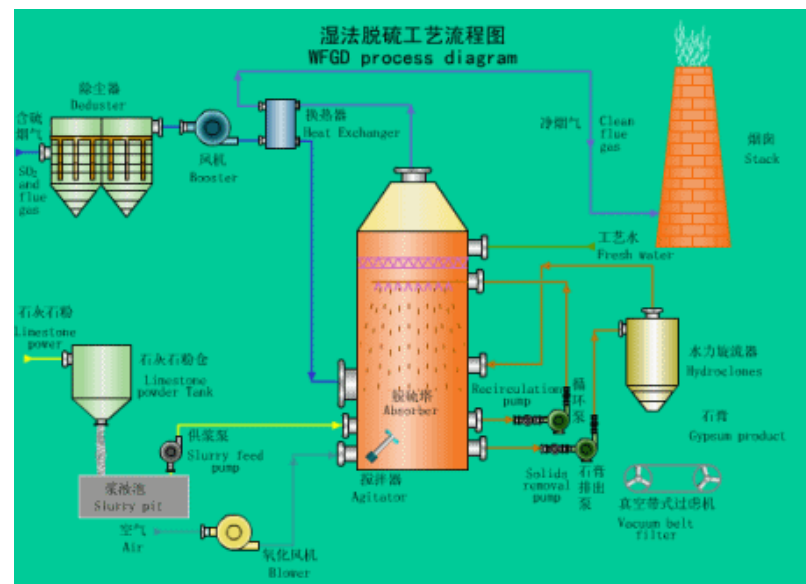


# 1.1 什么是过程控制----分类

➤ 连续过程：稳态条件下连续完成生产任务的生产过程



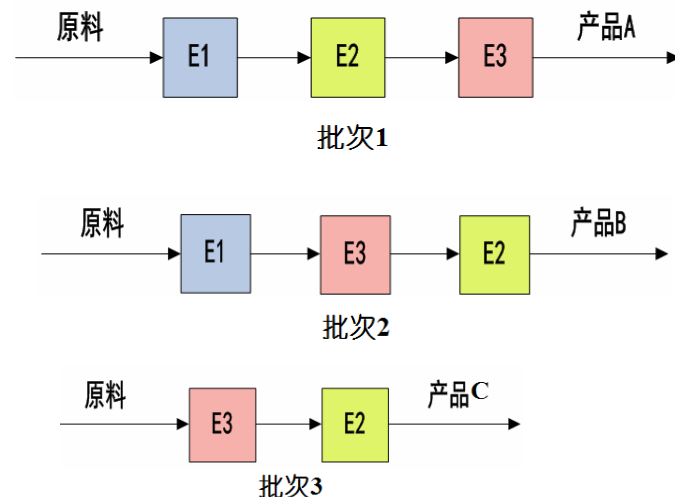
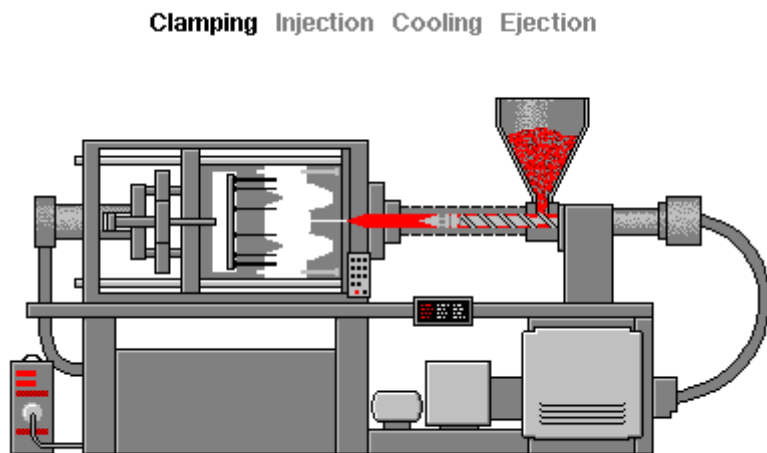
产品制造的各道工序，前后必须紧密相连的生产方式。即从原材料投入生产到成品制成时止，按照工艺要求，各个工序必须顺次连续进行



# 1.1 什么是过程控制----分类

## ➤ 间歇（半间歇）过程：

- 存在一系列操作工序，需要按照预定的顺序来执行，从而生产出指定数量的产品，适于产品频繁改变或产量较少情况



零件按照特定的加工要求，在不同的加工中心顺序加工，设备通常按照加工功能分组布置，通过不同的加工中心生产过程控制，加工过程可以停顿，形成在制品，并可以存储的生产组织方式

# 1.1 什么是过程控制----分类

## ➤ 连续过程与间歇过程之间的差别

类型	间歇过程	连续过程
生产过程	按预定顺序进行	连续生产
设备的使用	能生产多种产品任意组合	生产给定的一种产品
输出产品	批量	连续
工艺条件	可变化	稳态、一般不变化

# 1.1 什么是过程控制----特点

---

---

- 生产过程的连续性：在过程控制系统中，大多数被控过程是以**长期的或间歇形式运行**，在密闭设备中被控变量不断的受到各种扰动的影响
- 被控过程的复杂性：过程控制涉及范围广，被控对象较复杂，**建模困难**；大多属于慢过程，常具有**大惯性、纯滞后特性**；**多输入多输出控制回路多**，常常**相互耦合等**
- 控制方案的多样性：过程控制系统的控制方案非常丰富
- 大多数工艺要求定值控制
- 大多使用标准化的检测、控制仪表及装置

# 1.1 什么是过程控制----难点

---

---

- 过程参数信号测量问题
- 被控过程的滞后特性
- 被控过程的时间常数长短不一
- 非线性特性
- 时变性
- 执行器特性
- 耦合特性



# 课程学习知识点

---

---

- 过程控制系统概况
- 检测技术与执行器
- 接口技术与过程通道
- 生产过程系统模型与建模方法
- 常规过程控制系统设计
- 复杂过程控制系统设计
- 过程控制系统分析与设计



# 课程基本要求

- 了解过程控制系统的发展历程和趋势、系统结构特点、典型特征、知识体系、相关技术与工具软件
- 掌握检测技术和执行器原理，掌握现代过程控制系统中常用自动化仪表接口特征、信息获取技术、数据处理方法
- 掌握过程控制系统对象动态特性和性能评价指标
- 掌握现代过程控制系统对象的数学建模方法和辨识技术
- 掌握过程控制系统的控制策略和计算机数字控制方法，以及参数整定和工程实现方法
- 初步掌握过程控制系统的设计与开发流程

能够从事工业过程控制领域的自动化系统的分析、设计、开发、调试与日常维护等工作

## 1.2 过程控制性能要求

---

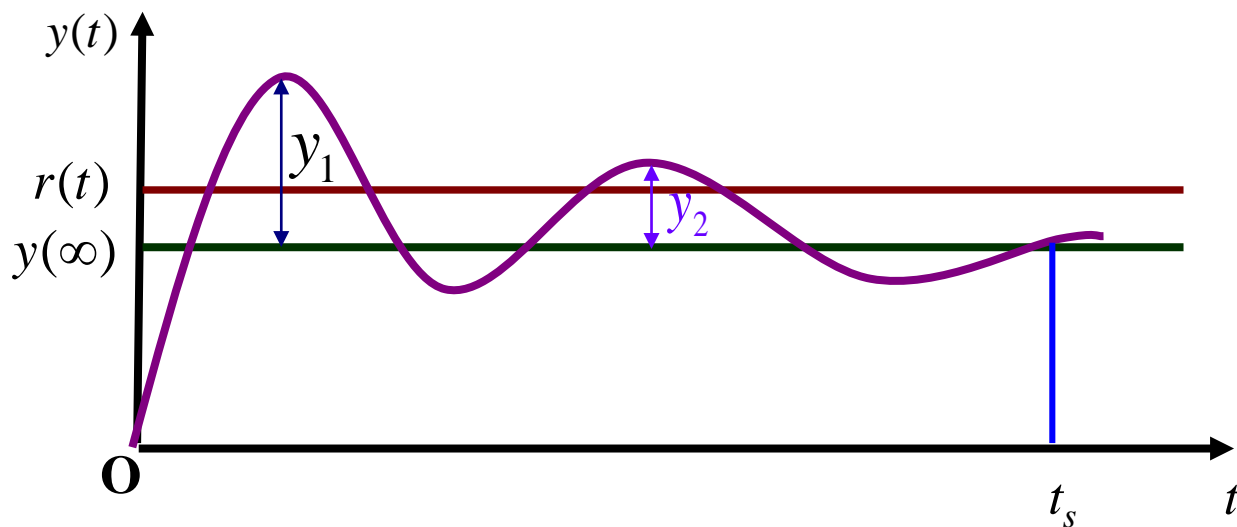
---

1.2.1 时域控制性能指标

1.2.2 积分控制性能指标

## 1.2.1 时域控制性能指标

- **时域性能指标：**阶跃输入信号作用下，控制系统输出响应曲线表示的控制系统性能指标



## 1.2.1 时域控制性能指标

➤ **衰减比**：控制系统的稳定性指标，衡量振荡过程的衰减程度，越大系统越稳定

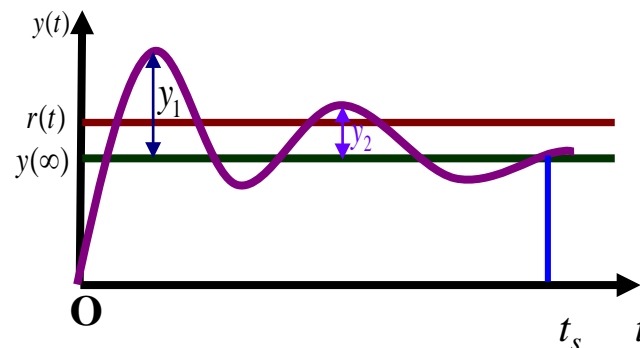
$$n = \frac{y_1}{y_2}$$

- $n = 1:1$  表明等幅振荡，**临界稳定**
- $n > 1:1$  表明衰减振荡，**稳定**
- $n < 1:1$  表明发散振荡，**不稳定**

➤ **衰减率**：每经过一个周期后，波动幅度衰减的百分数，即

$$\psi = \frac{y_1 - y_2}{y_1} \times 100\%$$

为保证系统有足够的**稳定度**，通常取  $\psi=0.75$  或  $0.9$ （两周期后趋于稳定），随动系统  $n = 10:1$ ，定值系统  $n = 4:1$



## 1.2.1 时域控制性能指标

---

---

- **超调量**：表征过渡过程中被控量偏离设定值的超调程度，反映控制系统的**稳定性**

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

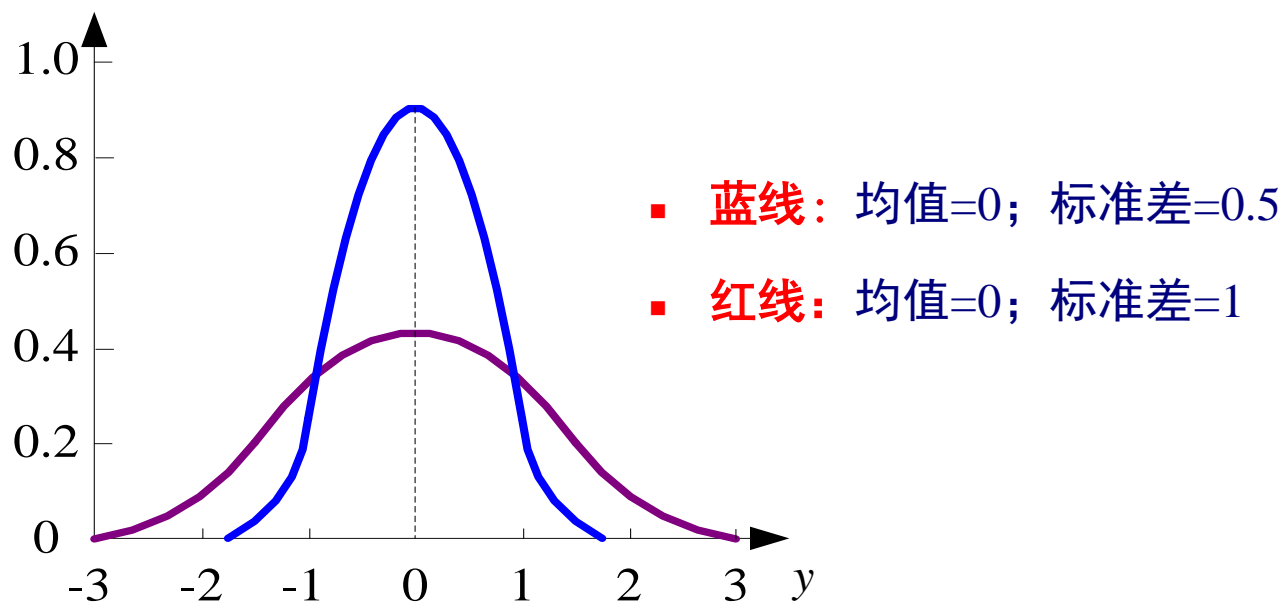
- **余差**：过渡过程结束后被控量值与设定值间的最终稳态偏差

$$e(\infty) = r - y(\infty)$$

- **调节时间**： $t_s$ ，从被控量从过渡过程开始到进入稳态值 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 范围内的时间，衡量控制系统的快速性

## 1.2.1 时域控制性能指标

- **偏离度**：被控量的统计特性，通常遵循正态分布。若采用被控量的均值 $a$ 作为设定值，则偏离度 $\sigma$ 采用其标准差度量



## 1.2.1 时域控制性能指标

---

---

### ➤ 说明

- 上述各项性能指标相互联系又相互制约
- 同时满足系统各项性能指标要求是很困难的
- 应根据生产工艺的具体要求，分清主次，统筹兼顾，保证优先满足主要的性能指标



## 1.2.2 积分控制性能指标

➤ 偏差的积分性能指标也可衡量控制系统的性能，是系统的综合性性能指标，常用于分析系统的动态响应性能，主要包含以下几种：

- 误差积分(IE)

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

简单、但不能反映等幅波动

- 误差绝对值积分(IAE)

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

有利于反映等幅波动

## 1.2.2 积分控制性能指标

➤ 偏差的积分性能指标可衡量控制系统的性能，是综合性能指标，用于分析系统的动态响应性能，主要包含以下几种：

- 误差绝对值与时间乘积的积分 (ITAE)

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

有利于反映等幅波动和大误差

- 误差平方积分(ISE)

$$ISE = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt$$

有利于反映长过度时间

## 1.2.3 过程控制系统的重要准则

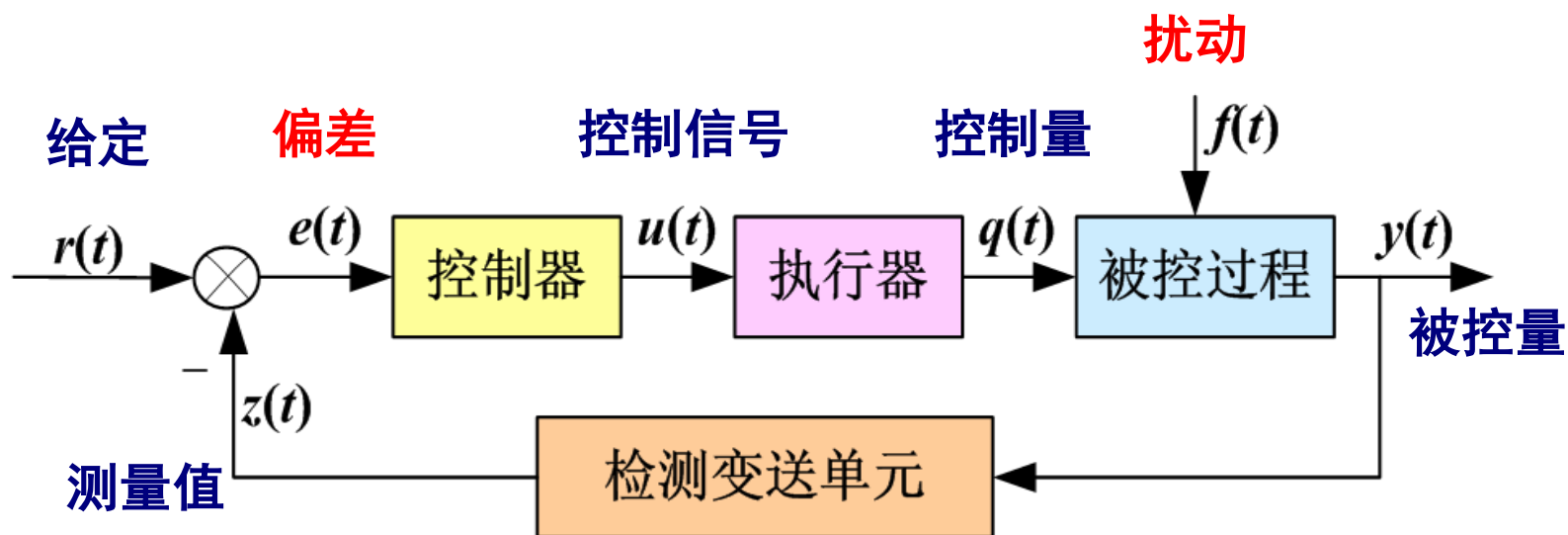
---

---

➤ 一个过程控制系统正常运行的重要准则：

- 负反馈准则：控制系统负反馈条件是各开环增益之积为正
- 控制系统稳定运行准则：
  - 静态稳定运行条件是控制系统各环节增益之积基本不变
  - 动态稳定运行条件是控制系统总开环传递函数的模基本不变

## 1.3 过程控制系统的组成



过程控制由**检测变送单元**，**控制器**，**执行器**和**被控过程**（对象组成）

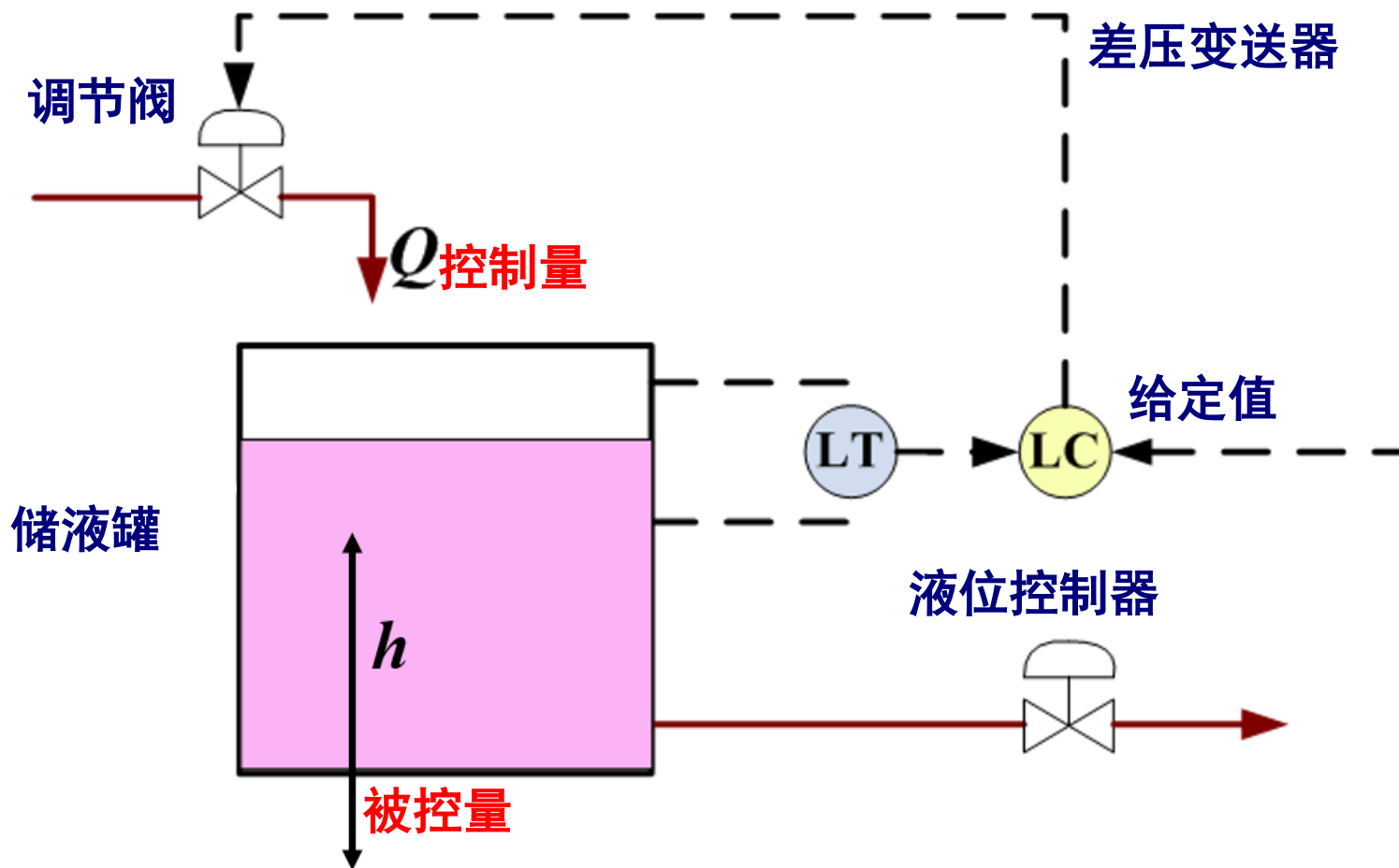
## 1.3 过程控制系统的组成

---

---

- **检测变送单元**：检测被控量，并将检测到的信号转换为标准电信号输出
- **执行器**：用于操作控制量变化
- **被控过程**：需要控制的**设备，装置或流程**
- **控制器**：根据检测变送单元的输出信号与设定值信号间的**偏差**，按一定控制规律计算得到相应的**控制信号**，并经变化和放大后推动**执行器**
- **设定值**：被控参数的设定值
- **测量值**：测量变送输出的被控参数值
- **偏差**：设定值与测量值之**差**
- **扰动作用**：作用于被控对象的并引起被控变量**变化**的作用

## 1.3 过程控制系统的组成



## 1.4 过程控制系统的发展概况

---

---

1.4.1 过程控制系统体系结构的发展

1.4.2 过程控制检测仪表和执行机构的发展

1.4.3 过程控制策略的发展

## 1.4 过程控制系统的发 展概况

### ➤ 过程控制体系结构大致经历三个发展阶段

- 仪表化与局部自动化阶段：20世纪50~60年代

### ➤ 特点：

- 过程检测和控制仪表主要为**基地式仪表**和**部分单元组合仪表**
  - 实现单输入—单输出的单回路定值控制
  - 被控量主要是**温度**，**压力**，**流量**和**液位**等生产过程中的热工参数
  - 以**频率法**和**根轨迹法**为主体的经典控制理论
- **控制目的**：保持上述工艺参数的**稳定**和**生产安全**





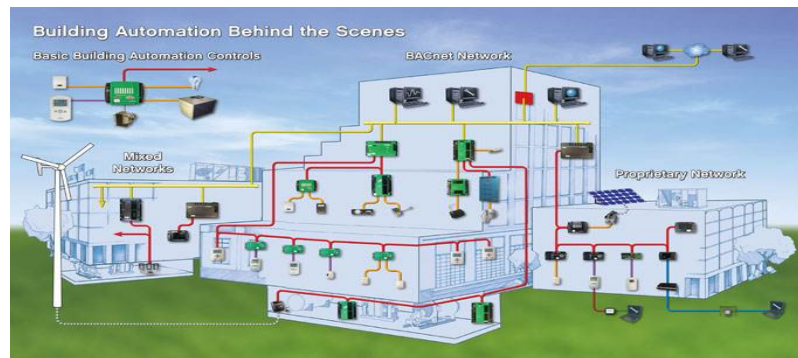
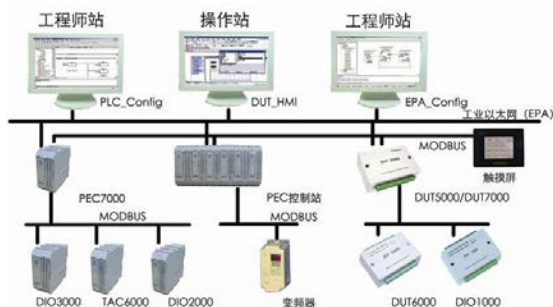
## 1.4 过程控制系统的的发展概况



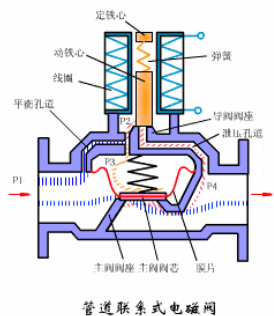
巴基斯坦贾姆肖罗电厂

## 1.4 过程控制系统的发展概况

- **全盘自动化阶段：20世纪70年代至今**
  - 通过微机实现**整个工艺流程、全工厂乃至整个企业操作管理和控制**
  - **单变量单回路**的仪表控制系统发展到**多变量多回路控制**
  - 经历了**直接数字控制，集中控制，分散控制**和**集散控制**几个发展阶段，进入**计算机集成过程控制系统阶段**
  - 20世纪90年代，随着**计算机技术，网络技术和通信技术**的发展，出现了**现场总线控制系统**



# 1.4 过程控制系统的的发展概况



东方仿奥GDPPII07



## 1.4.1 过程控制检测仪表和执行机构的发展

- 过程控制检测仪表和执行机构发展与其体系结构的发展相适应
- 基地式仪表：是把检测、显示和控制等环节放在一个表壳里，通常就地安装
  - 以指示，记录仪表为主体，附加控制机构而组成
  - 功能较完全，可以减少管线连接导致的滞后
  - 常用于中小企业里数量不多或分散的就地控制系统和单机的局部控制系统



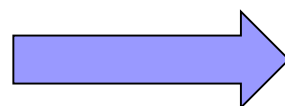
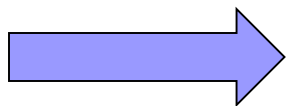
压力变送器



温度控制器

## 1.4.1 过程控制检测仪表和执行机构的发展

- **单元组合式仪表**：根据控制系统中各组成环节的不同功能和使用需求，将仪表做成能实现某种功能的独立单元
  - **包括**：变送单元、转换单元、控制单元、运算单元、显示单元、执行单元、给定单元和辅助单元
  - 单元间**采用统一**的标准信号彼此联系，可以灵活组合，通用性强
  - 适用于**中、小型**企业的自动化系统



➤ **流量传感器**

➤ **温度控制器**

➤ **执行器**

## 1.4.1 过程控制检测仪表和执行机构的发展

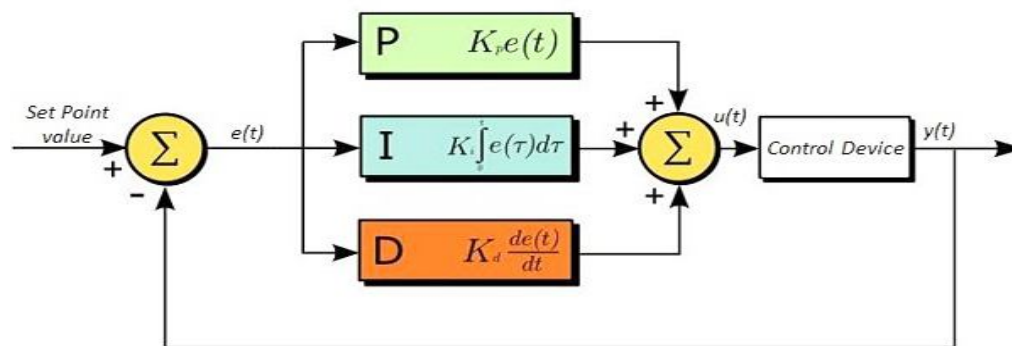
- **智能仪表**：以微处理器为核心，采用先进传感器和电子技术的智能变送器和智能阀门定位器
  - **精度、稳定性与可靠性**均比模拟式仪表优越
  - 可输出**全数字**信号或**模拟数字混合**信号
  - 可通过现场总线通信网络与计算机相连接，能满足**集散系统**和**现场总线控制系统**的应用要求



## 1.4.2 过程控制策略发展

### ➤ 经典控制策略：20世纪50年代以前

- 基础：微分方程和传递函数
- 方法：时域分析方法、S域分析方法和频域分析方法
- PID控制策略构成的简单控制模式



### ➤ 现代控制策略：20世纪60年代以后

- 基础：微分方程和传递函数基础：状态空间
- 方法：最小二乘法为基础的系统辨识、以极小值原理和动态规划为基础的最优控制、以卡尔曼滤波理论为核心的最优估计等

## 1.4.2 过程控制策略发展

- **复杂控制策略**：20世纪70年代以后
  - **核心思想**：系统分解与协调、多级递阶优化与控制
  - **重心**：有限维-无穷维，确定性-不确定性和随机性，线性-非线性
  - **方法**：非线性控制、自适应控制、随机控制、分布参数系统
  - **专家系统、模糊控制、人工神经网络、学习控制**等智能控制





# 致谢

---

---

- 感谢研究生彭佳佳、尹枫、郑文国、江博涛、董文佳等同学参与本PPT的制作
- PPT中部分图片和视频来自互联网，感谢原作者的制作