

浙江大学

Exercise Book

课程名称 能源生产过程控制

专业班级

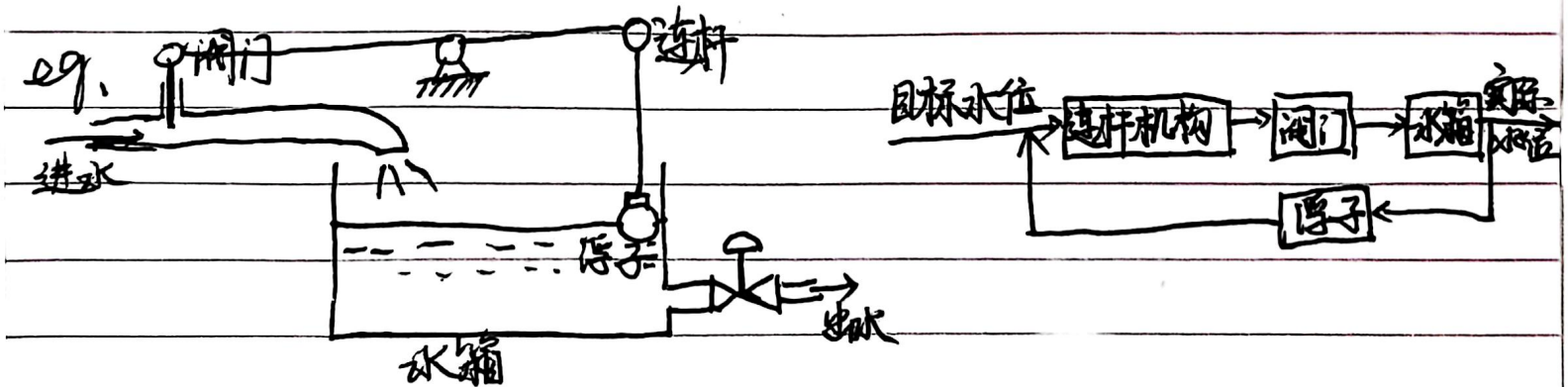
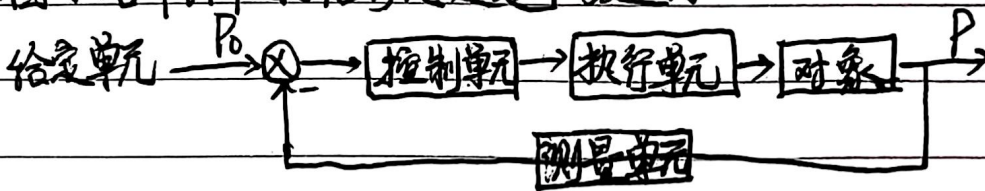
学号姓名 3210101534 何坤象



1. 绪论

1. 自动控制定义: 在没有人直接参与情况下, 利用外加的装置和设备(控制装置), 使机器、设备或生产过程(控制对象)的某个工作状态或参数(被控量)自动地按预定的规律运行
2. { 被控对象: 被控制的生产设备或生产过程 (炉膛)
被控量: 通过控制需要维持的物理量 (炉膛压力)
给定值: 根据生产要求, 被控量的规定数值 (-30Pa)
扰动: 引起被控量变化的各种原因 (负荷变化)
控制器: 在控制作用下, 用来改变输入被控对象的物质或能量的装置
控制量: 在控制作用下, 控制被控量变化的物理量 (引风机的调节阀开度、引风量)

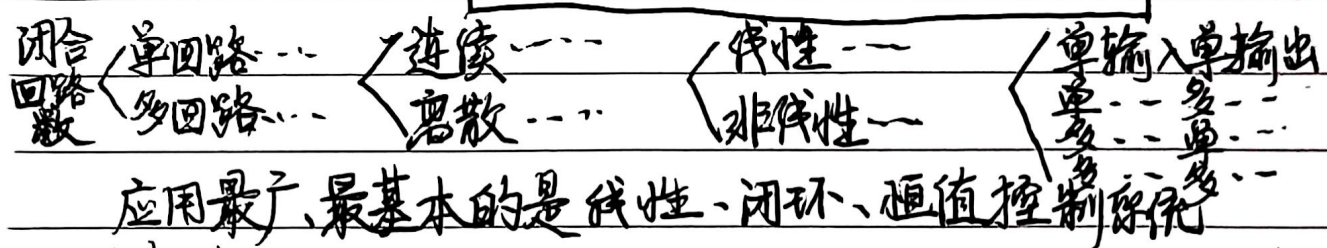
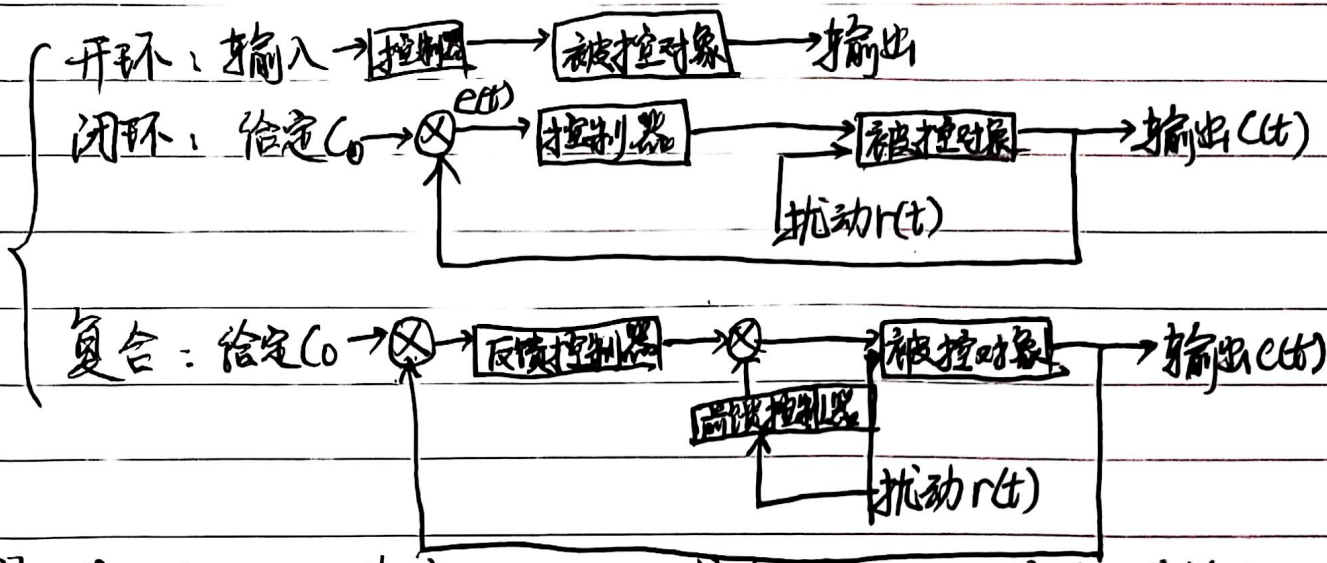
3. 方框图: 各个环节的信号传递是不可逆的



4. 按给定值信号分类 { 恒值控制系统: 给定值在工作过程中不变
程序控制系统: 给定值是时间的确定函数
随动控制系统: 给定值按事先不确定的随机因素改变

- 按控制系统结构分类 { 反馈控制系统(闭环): 依据偏差(结果)进行控制
前馈控制系统(开环): 依据扰动(原因)进行控制
复合控制系统: 开环和闭环配合使用, 粗调和细调





5. 动态特性: 由于输入的变化, 输出随时间而变化, 它们之间的关系
 静态特性: 参数保持不变时, 输出与输入间的关系

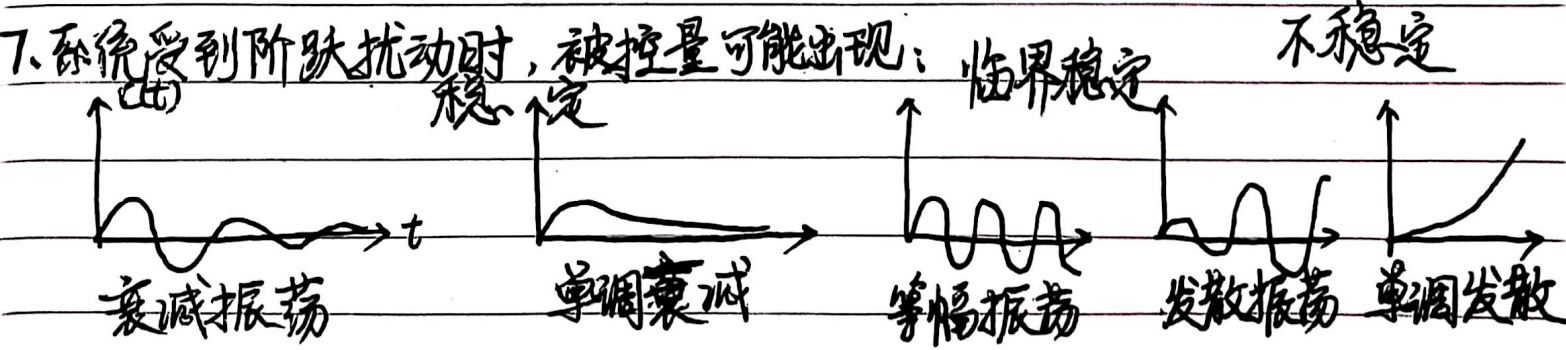
6. 典型输入函数:

单位脉冲函数 $\delta(t) = \begin{cases} 0 & t \neq 0 \\ \infty & t = 0 \end{cases}, \delta(s) = 1$

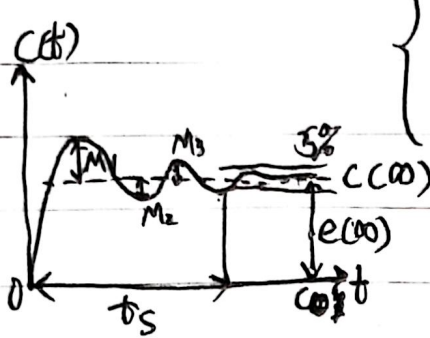
单位阶跃函数 $1(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}, 1(s) = \frac{1}{s}$

单位斜坡函数 $f(t) = \begin{cases} t & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}, f(s) = \frac{1}{s^2}$

正弦函数 $f(t) = \begin{cases} \sin \omega t & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}, f(s) = \frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$



对控制系统的要求



- 稳定性**: 衰减率 $\psi = \frac{M_1 - M_3}{M_1} = 1 - \frac{M_3}{M_1}$
- 准确性**:
 - 静态偏差 $e(\infty) = c_0 - c(\infty)$
 - 动态偏差 $e_{max} = M_1 + c(\infty)$
- 快速性**: 控制时间 $t_s < \frac{2\%}{5\%} = \frac{\Delta}{\Delta}$

绝对积分准则 $J = \int_0^{\infty} |y(t) - y(\infty)| dt$

超调量 $M_p = \frac{y_{max} - y_0}{y_0} \times 100\% = \frac{M_1}{c(\infty)} \times 100\%$

2. 建模方法

- 静态: 输入信号和输出信号不随时间变化, (平衡状态)
 动态: 输入和输出信号随时间变化, (不平衡状态)

2. **传递函数**: 线性定常系统在零初始条件下, 系统(或环节)的输出信号的拉氏变换与输入信号的拉氏变换之比。

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)}$$

$c(t) \rightarrow C(s)$ 时域 $\rightarrow$ 频域

- ① 传递函数是描述动态特性的数学模型, 表征系统(环节)的固有特性
- ② 分母是系统的特征方程, 能方便地判断动态基本特性。

3. 数学模型建立需掌握

- 要明确输入量和输出量
- 要有先验知识
- 要有试验数据

数学模型并不要求非常精确

4. 建模方法

- 机理法建模: 根据生产过程中实际发生的变化机理, 写出各种有关的平衡方程、特性方程和特性方程, 从中获得数学模型
- 试验测定法建模: 根据生产过程的输入和输出的实测数据并经过某种数学处理后得到的模型。

“灰盒”法

“白盒”法要求: 生产过程的机理必要掌握, 可以确切地加以数学描述。模型应尽量简单, 同时保证达到合理的精度。

“黑盒”法特点: 将生产过程视为黑盒子, 完全从输入特性上测试和描述过程动态特



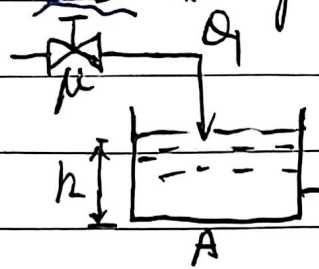
5. 根据被控对象在阶跃变化作用下被控量的响应曲线形状, 被控对象分为有自平衡能力对象和无自平衡能力对象。

自平衡特性: 被控对象受到扰动后平衡被破坏, 仅依靠自身变化使对象重新恢复平衡的特性。

6. 机理法建模

根据被控对象微分方程阶次即储能部件多少, 被控对象分 单容 对象 多容 对象

(1) 单容对象 eg.



μ : 调节阀开度, R : 出口阀门的阻力即液阻, A 水箱横截面积

(1) 稳态平衡状态: $Q_{10} = Q_{20}, h = h_0, \mu = \mu_0$

(2) t_0 时突然水阀开大 $\Delta\mu$, 经一定时间后重新平衡:

① 根据物质平衡原理: $Q_1 - Q_2 = \frac{dV}{dt} = A \frac{dh}{dt}$

Q_1 由 $\Delta\mu$ 引起的: $Q_1 = k_\mu \mu$

Q_2 由水压决定: $Q_2 = A \sqrt{2gh} = D \sqrt{h}$

是一个非线性关系

线性化:

$$\frac{dQ_2}{dh} = A \sqrt{2g} \cdot \frac{d\sqrt{h}}{dh} = \frac{A \sqrt{2g}}{2\sqrt{h_0}} = \frac{A \sqrt{2gh_0}}{2h_0} = \frac{Q_{20}}{2h_0} = \frac{Q_{20}}{2h_0} k_\mu \mu - \frac{h}{R} = A \frac{dh}{dt} \Rightarrow RA \frac{dh}{dt} + h = k_\mu \mu \cdot R$$

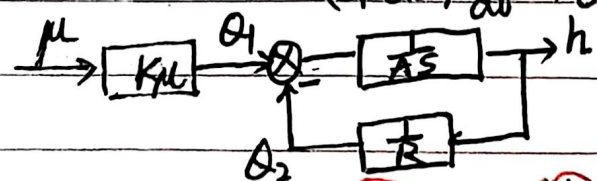
$$Q_2 = \frac{dQ_2}{dh} \cdot h = \frac{Q_{20}}{2h_0} \cdot h = \frac{h}{R}$$

$R = \frac{Q_{20}}{2h_0}$ 液阻

在平衡点 (Q_{20}, h_0) 附近线性化: $R = \frac{h}{Q_2}, Q_2 = \frac{h}{R}$

直接变换

$$\begin{cases} Q_1 = k_\mu \mu \Rightarrow Q_1(s) = k_\mu \cdot U(s) \\ Q_2 = \frac{h}{R} \Rightarrow Q_2(s) = \frac{H(s)}{R} \\ Q_1 - Q_2 = A \frac{dh}{dt} \Rightarrow Q_1(s) - Q_2(s) = A s H(s) \end{cases}$$



$$RA \cdot sH(s) + H(s) = k_\mu R \cdot U(s)$$

$$G(s) = \frac{H(s)}{U(s)} = \frac{k_\mu R}{1 + RA s} = \frac{K}{1 + T s}$$

$$k_\mu \frac{1}{\frac{1}{R} + A s} = \frac{k_\mu}{\frac{1}{R} + A s} = \frac{k_\mu R}{1 + RA s}$$



$$RA \frac{dh}{dt} + h = K_u R \mu, \quad G(s) = \frac{H(s)}{U(s)} = \frac{K}{Ts + 1} = \frac{K_u R}{RA \cdot s + 1}$$

在 $t=0$ 时刻加入阶跃信号 $\mu(t) = \Delta \mu \cdot 1(t)$

$$\text{解得 } h(t) = K \Delta \mu (1 - e^{-t/T})$$



1) 定义 **自平衡率** $\rho = \frac{1}{K}$ 指当对象受到扰动时, 只要依靠被控量自身变化使自身重新恢复平衡的能力大小。 $\rho \uparrow$, 自平衡能力 $\uparrow$, $\rho=0$ 表示无...

2) **时间常数** T : 受扰动后被控量完成变化过程所需时间长短的参数。

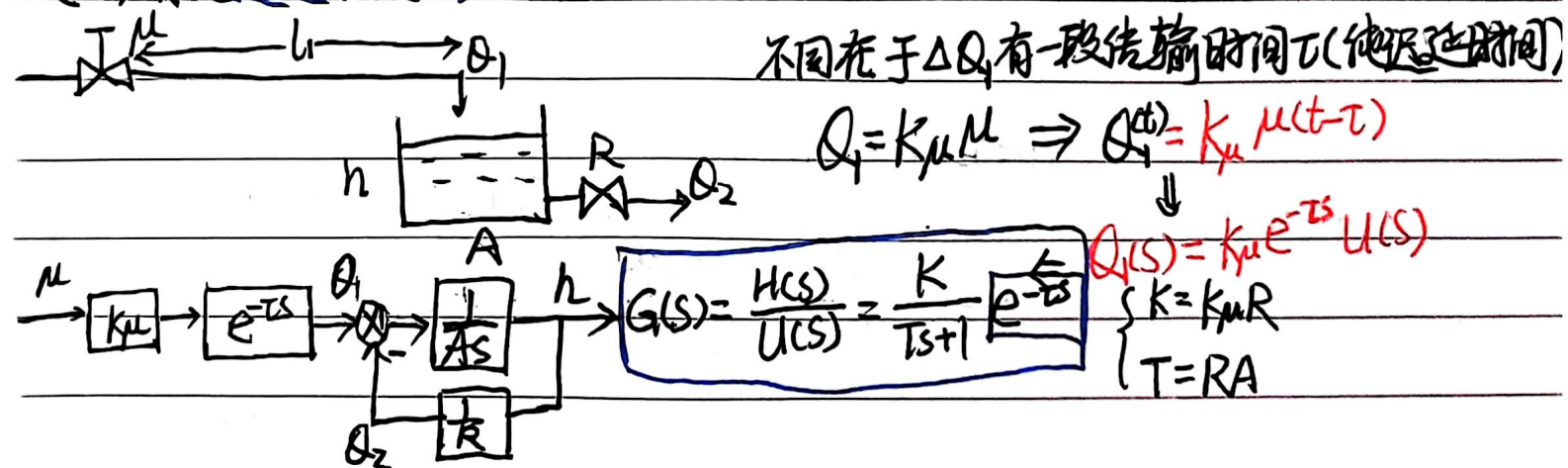
$$T = RA \quad t = T \text{ 时, } h(T) = 0.632 h(\infty), \quad T \uparrow, \text{ 惯性 } \uparrow, \text{ 响应速度 } \downarrow$$

3) **响应速度 (飞升速度)** ε : 单位阶跃扰动作用下, 被控量的最大变化速度

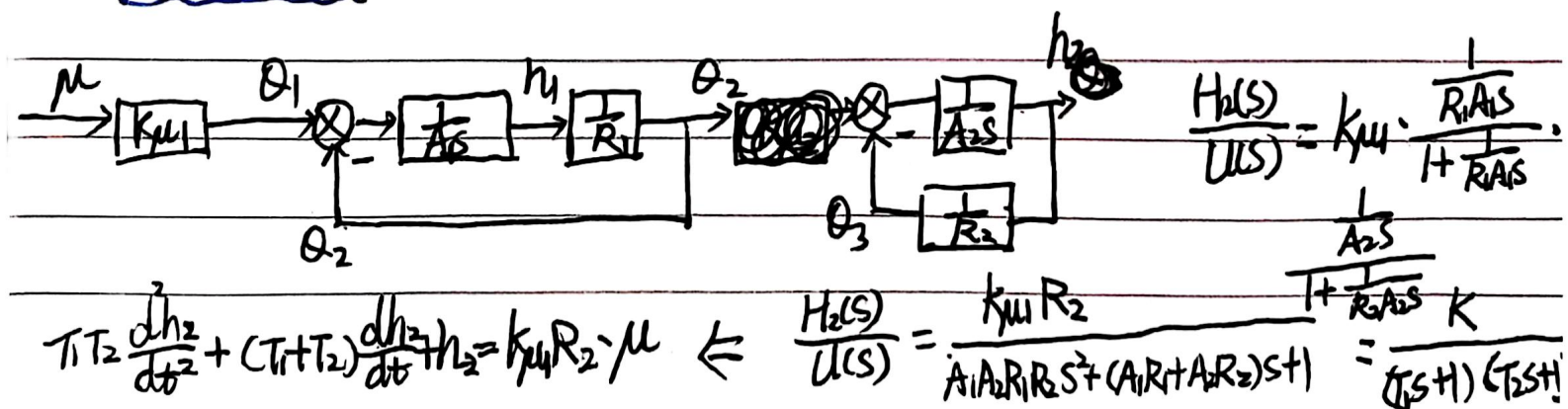
$$\varepsilon = \left(\frac{dh}{dt} \right)_{\max} / \Delta \mu = \left(\frac{dh}{dt} \right)_{t=0} / \Delta \mu = \left(\frac{K \Delta \mu}{T} \right) / \Delta \mu = \frac{K}{T}$$

$\varepsilon \uparrow$, 变化速度 $\uparrow$, 响应曲线陡, 惯性小, $T \downarrow$

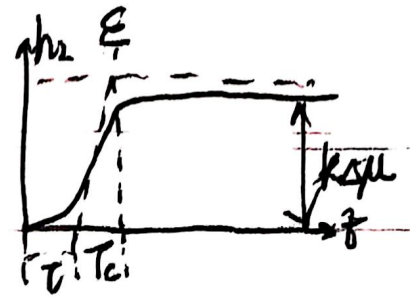
(2) **具有纯延迟的容容对象**



(3) **双容对象**



$$\text{解得 } h_2(t) = K_{\mu} R_2 \mu \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-t/T_1} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-t/T_2} \right)$$



$$\text{自平衡率 } \rho = k = \frac{1}{K_{\mu} R_2}$$

延迟时间 T_1 : 输入阶跃变化瞬间到切线与被控量起始平衡值横轴交点

时间常数 T_2 : 从曲线上最大变化速度变化时, 从起始到最终所需时间

$$\text{响应速度 } \xi = \frac{dh_2/dt}{\Delta \mu} = \frac{K_{\mu} \mu}{T_2 \Delta \mu} = \frac{K}{T_2} = \frac{K_{\mu} R_2}{T_2}$$

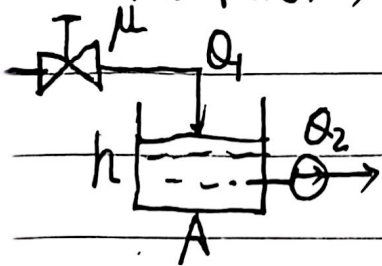
(4) 多容对象

$$G(s) = \frac{K}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1) \dots (T_n s + 1)} \quad [e^{-Ts}] \text{ 若还有纯延迟}$$

(5) 无自平衡能力对象:

流出端用计量泵排出恒定的流量:

无自平衡能力: 当被控量的平衡关系被破坏时, 被控量以固定速度一直变化下去而不会自动地在新的水平上恢复平衡。



1° 单容水箱: 流出量 $Q_2 = 0$

$$Q_1 - Q_2 = Q_1 = A \frac{dh}{dt}, \quad Q_1 = K_{\mu} \mu$$

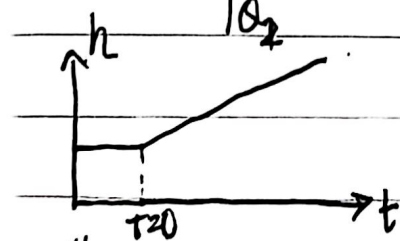
$$K_{\mu} \mu = A \frac{dh}{dt}, \quad K_{\mu} U(s) = A s \cdot H(s)$$

$$G(s) = \frac{H(s)}{U(s)} = \frac{K_{\mu}}{A s} = \frac{1}{T_a s} \quad (T_a = \frac{A}{K_{\mu}})$$

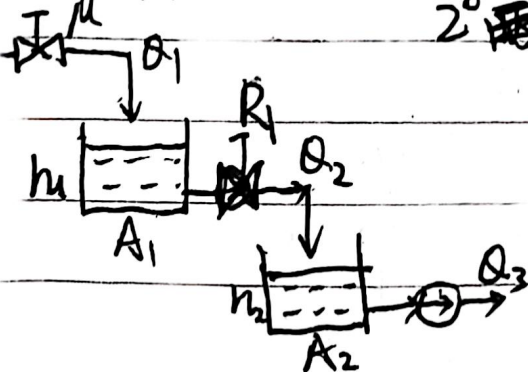
动态特性方程为 $T_a \frac{dh(t)}{dt} = \mu(t)$

$t=0$ 时加入阶跃 $\mu(t) = \Delta \mu$, 则 $h(t) = \frac{\Delta \mu t}{T_a}$

响应 $h(t) = \Delta \mu \xi t, (\xi = \frac{1}{T_a} = \frac{K_{\mu}}{A})$



2° 双容水箱

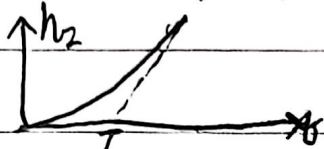


$$\frac{H_2(s)}{U(s)} = K_{\mu} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{R_1 A_1 s}} \cdot \frac{1}{A_2 s} = \frac{K_{\mu} R_1 A_1 s}{R_1 A_1 A_2 s^2 + A_2 s}$$



$$\frac{H_2(s)}{U(s)} = \frac{K_u}{A_2 s} \cdot \frac{1}{R_1 A_1 s + 1} = \frac{1}{T_a s} \cdot \frac{1}{T_1 s + 1} \quad (T_a = \frac{A_2}{K_u}, T_1 = R_1 A_1)$$

动态特性曲线 $h_2(t) = \frac{\Delta U}{T_a} (t - T_1 + T_1 e^{-t/T_1})$



7. 试验测定法建模

(测定动态特性的时域方法
测定动态特性的频域方法
测定动态特性的统计相关法)

	激励信号	记录	结果
时域方法	脉冲/阶跃信号	输出随时间响应曲线	传递函数
特点: 测试设备简单、工作量小、精度不高			
频域方法	不同频率正弦波	幅值比, 相位差	频率特性, 传递函数
特点: 原理简单, 数据处理简单, 精度高, 专用的超低频设备, 工作量大			
统计相关法	随机信号/本身随机噪声	各参数变化	动态特性
特点: 在线辨识, 精度较高, 但要求量大数据, 要用计算机对其计算处理			

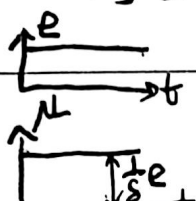
3. PID

1. PID控制 **优点**: 原理简单, 使用方便, 适应性强, 鲁棒性强。

是一种负反馈调节

PID作用方式
正作用方式: 随着被控量测量值与给定值差 $(C-r) \uparrow$, 控制器输出 $\mu \uparrow$
负作用方式: $\dots (C-r) \uparrow, \mu \downarrow$

2. 比例控制 P: 控制器输出信号 $\mu(t)$ 与其偏差输入信号 $e(t)$ 成比例。



$$\mu(t) = K_p e(t), \quad G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p = \frac{1}{\delta}$$

比例带 $\delta = \frac{1}{K_p}$ 是增益的倒数



比例带 δ 表示使阀门开度改变100% (全关到全开) 时, 所需要的被控量的变化范围

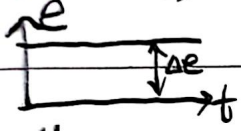
习惯用它相对于被控量测量仪表量程的百分数表示

eg. $\delta = 50\%$ 表示当被控量改变50%时使调节阀从全关到全开 (量程为100℃)

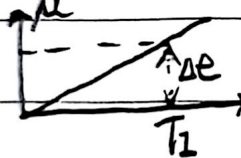
P有静态偏差, $\delta \uparrow, e(\infty) \uparrow, K_p \downarrow, \text{变化} \downarrow, \text{振荡} \downarrow, \text{稳定} \uparrow$

$\mu(t) = K_p e(t) = \frac{1}{\delta} e(t)$, (δ 大, 被控量变化平缓, 静态偏差大, 甚至无超调。
 δ 小, 被控量变化迅速, 静态偏差小, 加大振荡趋势。
 δ 过小, 系统不稳定

3. 积分控制 I: $\mu(t) = K_I \int_0^t e(t) dt = \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt$



K_I 积分增益, T_I 积分时间



$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_I}{s} = \frac{1}{T_I s}$$

阶跃响应为 $\mu(t) = \Delta e \cdot \frac{t}{T_I}$, T_I 为 μ 从开始变化到与输入量相等时的时间

I 无静态偏差, 只有 $e(t) = 0$ 时, 积分控制器的输出才会保持不变。

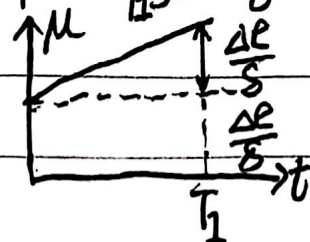
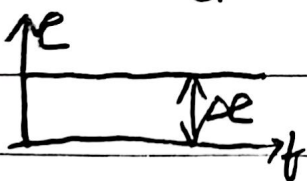
注: 应用只有 I 作用的调节器时, 往往容易造成调节动作过头而引起反复振荡, 一般不单独使用

$\left\{ \begin{array}{l} T_I \downarrow, K_I \uparrow, \text{积分作用} \uparrow, \text{动作} \uparrow, \text{振荡} \uparrow \\ T_I \text{过小, 振荡加剧甚至不稳定} \\ T_I \text{需兼顾最大动态偏差和振荡频率} \\ T_I \text{过大, 积分作用太小} \end{array} \right.$

4. 比例积分控制 PI:

利用 P 控制快速抑制干扰的影响, 同时利用 I 控制消除静态偏差

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) = \frac{1}{\delta} \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right), \quad \mu(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_I} \int_0^t e(t) dt$$



引入积分动作带来消除系统静态偏差之好处同时, 降低了系统稳定性, 为保持原来的衰减率, PI 的比例带 δ 必须增大



5. 微分控制D: $\mu = T_D \frac{de}{dt} = T_D \frac{de}{dt}$, $G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = T_D s$

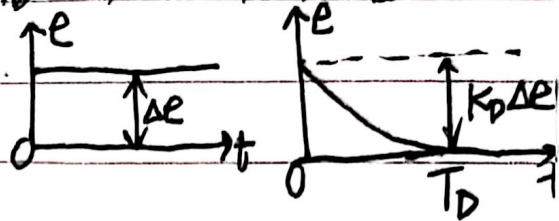
阶跃响应 $\mu(t) = T_D \Delta e \delta(t)$

理想微分作用在被控变量和给定值发生阶跃变化瞬间,控制作用将无穷大

实际微分作用有惯性, $G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_D}{1 + T_D s} \cdot T_D s$, K_D 为微分增益

阶跃响应 $\mu(t) = \Delta e K_D e^{-t/T_D}$

过度过程结束,控制作用为0。



不单独使用微分控制D

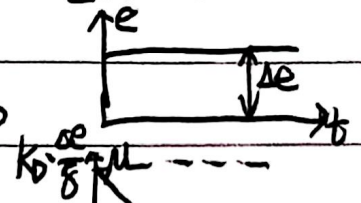
一旦偏差e有变化,在P, I还未动作时, D已有控制输出,能实现**超前调节**

减小被控变量的波动

6. 比例微分控制PD: $\mu(t) = \frac{1}{s} e(t) + \frac{1}{s} T_D \frac{de(t)}{dt}$, $G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{1}{s} (1 + T_D s)$

实际PD: $G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{1}{s} (1 + T_D s) \frac{1}{1 + \frac{T_D s}{K_D}}$

单位阶跃响应 $\mu(t) = \frac{\Delta e}{s} + \frac{\Delta e}{s} (K_D - 1) e^{-t/T_D} \cdot K_D$



特点 { PD也有**静态偏差**

引入微分D之后,为保持衰减率,可适当减小比例带s,不但减小了静态偏差,也减小了动态最大偏差,提高了振荡频率。

不利之处 { 微分动作太强容易饱和,因此PD中P为主, D为辅

{ PD控制器抗干扰能力很差,对纯延迟过程无效

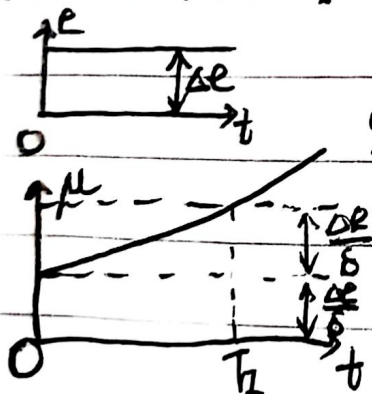
7. 比例积分微分控制PID: $\mu(t) = \frac{1}{s} [e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt}]$

$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{1}{s} (1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s)$ 大

8. 对象控制通道时间常数较大或衰减延迟较大时,引入微分

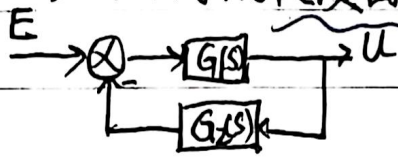
< 允许有稳态偏差, PD
< 要求无 $e(\infty)$, PID

对象控制通道时间常数较小,负荷变化也不大,工艺要求无稳态偏差, ~~PI~~ 较小, ... 较小,工艺要求不高, P



8. 模拟式控制器 (连续的, 实时的, 精度高)

(1) 采用不同的反馈回路



$$G_c(s) = \frac{G_1(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)} = \frac{1}{\frac{1}{G_1(s)} + G_2(s)}$$

当 $G_1(s) \gg 1$ 时, $G_c(s) \approx \frac{1}{G_2(s)}$

① 实现 PI 的方法: $G_c(s) = \frac{1}{s} (1 + \frac{1}{T_I s}) = \frac{1 + T_I s}{s T_I s}$

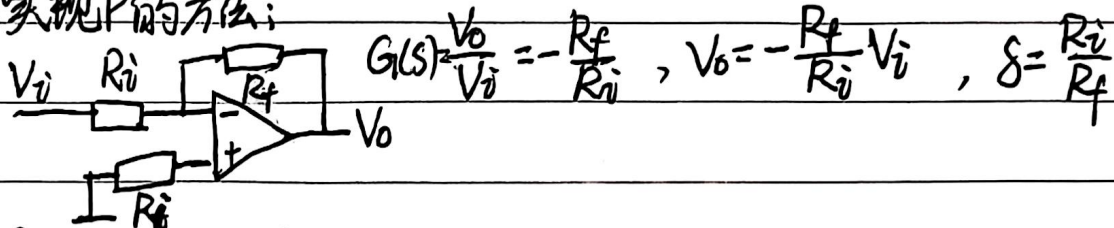
反馈通路/反馈装置的 $G_2(s) \approx \frac{1}{G_c(s)} = \frac{s T_I s}{1 + T_I s}$ 为 **实际微分环节**

② 实现 PD 的方法: $G_c(s) = \frac{1}{s} (1 + T_D s)$

反馈装置的 $G_2(s) \approx \frac{1}{G_c(s)} = \frac{s}{1 + T_D s}$, 为 **惯性环节**

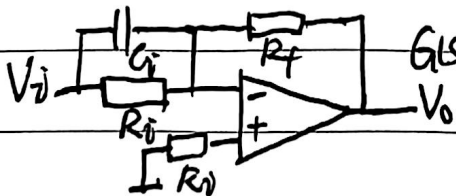
(2) 采用运算放大器

① 实现 P 的方法:



$$G(s) = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_f}{R_i}, \quad V_o = -\frac{R_f}{R_i} V_i, \quad \delta = \frac{R_i}{R_f}$$

② 实现 PD 的方法:



$$G(s) = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_f}{R_i} (R_i G_i s + 1) = \frac{1}{s} (1 + T_D s)$$

$$\delta = \frac{R_i}{R_f}, \quad T_D = R_i G_i$$

9. 数字式控制器 (质量不如模拟式, 一段时间是不变的, 有延滞的, A/D, D/A 转换误差更大)

(1) 位置式控制算法: 将动态方程离散化, 用 矩形法数值积分代替

$$u(kT) = \frac{1}{s} [e(kT) + \frac{1}{T_I s} e(kT)] \quad \text{连续积分用增量代替微分, 直接决定了执行机构的位置}$$

(2) 增量式控制算法

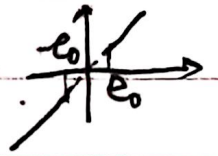
$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1); \text{ 又称速度式算法}$$

(3) 改进的 PID 算法: ① 积分分离式 PID 算法: 当 e 过大时, 取消积分作用, 减小超调

② 抗饱和积分的 PID 算法: 判断上一时刻是否已达饱和, 若 $u(k-1) > u_{max}$, 只叠加负偏差, 若 $u(k-1) < u_{min}$ 则叠加正偏差, 否则各控制量长时间保持在饱和区



③带死区的PID算法：在PID算法中，当 $e(kT) \neq 0$ 时， $\Delta u(kT) \neq 0$ ，意味着执行机构会一直动作过于频繁，引入带死区的PID。



4. 单回路控制系统

1. 自动控制系统的设计原则

- (1) 原则性控制系统的拟定
- (2) 控制系统的综合
 - 确定控制器的控制规律和类型
 - 确定补偿元件的功能及参数
 - 建立系统的数学模型
- (3) 控制系统的分析：计算控制系统的性能指标

熟悉对象的运行特点和工艺要求
掌握对象的动态特性

选择被控量和控制变量

了解对控制的要求和性能指标

拟定原则性方案

2. 被控量和控制量的选择

被控量 $\left\{ \begin{array}{l} \text{可测：如过热器出口汽温。} \\ \text{不可测：没有直接的测量手段或信号滞后太大。如煤的干燥程度} \end{array} \right.$

快速 磨煤器出口温度

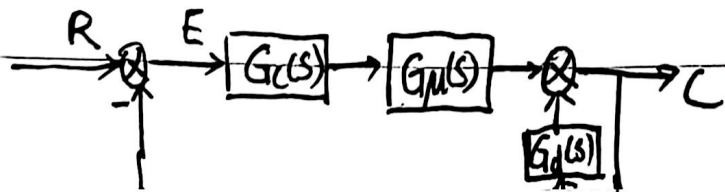
控制量 $\left\{ \begin{array}{l} \text{①要考虑工艺的合理性，选择工艺允许作为控制手段的变量} \\ \text{②希望控制通道有较大的放大系数，较小惯性和延迟} \end{array} \right.$

eg. 锅炉负荷控制系统中，被控量是主蒸汽压力，引起被控量变化的主要因素是进汽量和燃料量，前者由电能生产要求所确定，所以不能作为控制量，而应选择燃料量

3. 被控对象的特性对控制质量的影响。

控制通道：控制作用与被控量之间的信息通道

扰动通道：扰动与被控量之间的信息通道



控制通道传递函数 $G_p(s) = \frac{K_u}{(1+T_u s)^n} e^{-\tau s}$

扰动 $G_d(s) = \frac{K_d}{(1+T_d s)^n} e^{-\tau s}$

$G_o(s) = K_r$



被控对象的特性包括：放大系数 k_u, k_d ，时常 T_d, T_c ，阶次 n, m ，纯延迟 τ

放大系数影响： $k_d \uparrow, k_c, k_u \downarrow$ ，稳态误差 $\uparrow$ ，克服干扰能力 $\downarrow$

扰动 控制通道

时间常数，~~阶次~~影响

(1) 扰动通道 { 扰动通道相当于低通滤波器
 $T_d \uparrow$ ，低通频率范围 $\downarrow$
 $m \uparrow$ ，幅值衰减 $\uparrow$ ，有利于控制

(2) 控制通道： $T_u \uparrow, m \uparrow$ ，响应越迟缓，动态偏差 $\downarrow$ ，工作频率 $\downarrow$ ，持续时间

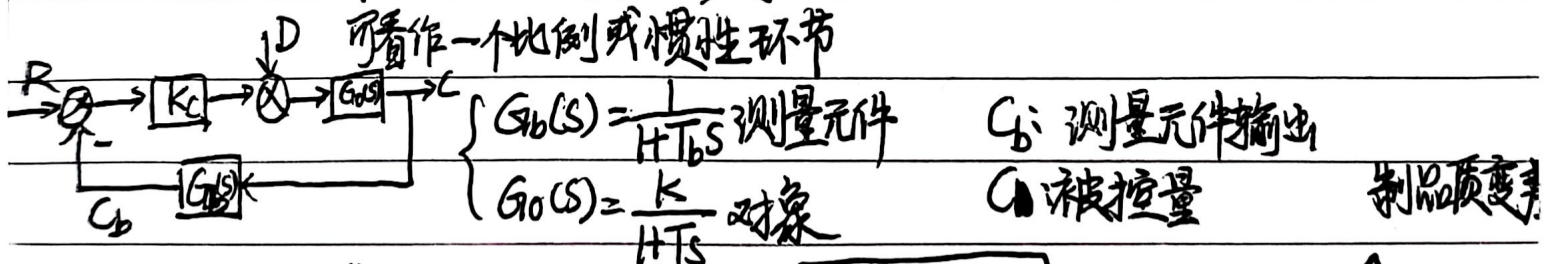
纯延迟 τ 影响

(1) 扰动通道：不影响控制质量

(2) 控制通道： $\tau \uparrow$ ，偏差 $\uparrow$ ， $\tau \uparrow$ ，控制品质越差。不利于控制品质。

4. 测量元件和变送器特性

(1) 测量元件对控制质量的影响



结论： C 与 C_b 之间差别随时间常数 T_b 测量元件的 $\uparrow$ 而 $\uparrow$ ，导致控

5. 执行器：作用：接收控制器输出的控制信号，改变控制量

执行器 { 执行机构 { 力与力矩转换部件
 调节机构 { 转换部件

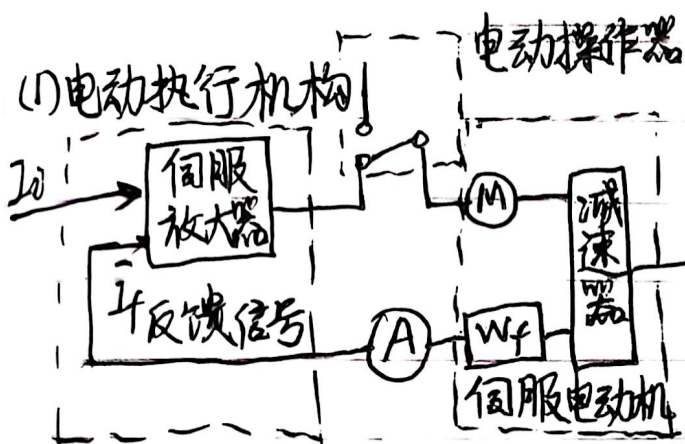
执行机构：根据控制器控制信号产生推力或位移的装置

调节机构 { 力与力矩转换部件：根据执行机构输出信号去改变能量或物料输送量的装置

 转换部件：将推力或力矩转换为直线或角位移的部件

力与力矩转换部件：将控制器输出信号转换为推力或力矩的部件





伺服放大器综合输入和反馈信号,并放大
 伺服电动机根据综合信号极性不同而转向
 伺服电动机转速越高,输出力矩小
 减速器转换为低速、大力矩后带动调节机构
 位置发送器将执行器输出轴位移转换为成百分比的电流信号

(2) 调节机构: 将直线位移或角位移变化转换为流通面积的变化。

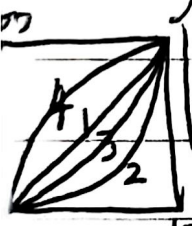
常用的有: 调节阀门, 烟气和空气挡板, 给粉机和给煤机等

调节阀的流量特性: 流过阀门的相对流量与阀杆的相对行程(即阀门的相对开度)之间的关系。 $Q = f(L)$, $Q = \frac{q}{q_{max}}$, $L = \frac{l}{l_{max}}$

- 理想特性: 阀前后压差固定条件下, 流量与阀杆位移之间关系
- 工作特性: 阀前后压差变化时, 流量与阀杆位移之间关系

① 理想流量特性: 线性, 对数(等百分比), 抛物线, 快开 不适负荷载

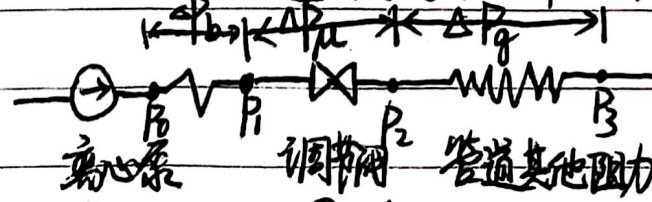
- 线性: $\frac{dQ}{dL} = k$, 1, $Q = (1-k)L + k$ (开度较小时流量相对变化大, 易振荡)
- 对数: $\frac{dQ}{dL} = kQ$, 2, $Q = R^{L-1}$ (开度较大时——小, 控制缓慢; 开度小时, k 小, 控制平缓; 开度大时, k 大, 控制灵敏) 对控制有利



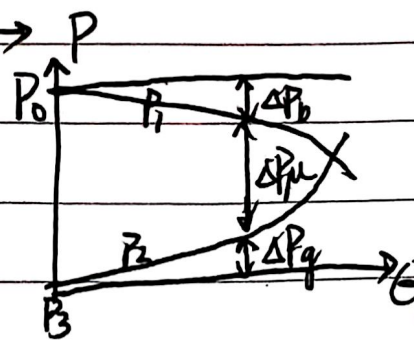
抛物线 $\frac{dQ}{dL} = k\sqrt{L}$, 3, 介于线性和对数之间

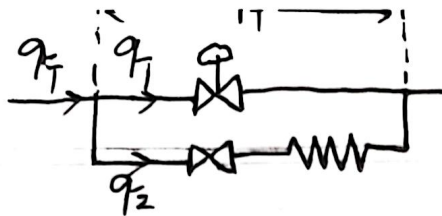
快开: $\frac{dQ}{dL} = k(1-L)$, 用于迅速启闭的切断阀或双位控制系统

② 工作流量特性
 1° 串联管路



阀门开大, 流量↑, $\Delta P_{val} / (\Delta P_b + \Delta P_g)$, 阀门全开时, ΔP_{val100}





2° 并联管道:

实际可调比 $R_p = \frac{q_{Tmax}}{q_{Tmin} + q_2}$, 旁路程度 $B = \frac{q_{Tmax}}{q_{Tmin}}$, $R = \frac{q_{Tmax}}{q_{Tmin}}$ ^{保证调节性能}
 $\Rightarrow R_p \approx \frac{1}{1-B} = \frac{q_{Tmax}}{q_2}$

单回路的工程整定方法

控制系统整定: 根据控[被]对象的特性选择最佳的整定参数。主要是控制

(1) 临界比例带法: 先将PID控制器设置为纯比例作用, 比例带 δ 放在较大位置, 系统投入闭环控制, 稳定后逐渐减小 δ , 出现等幅振荡时, 记录下临界比例带 δ_k , 临界振荡周期 T_k , 按公式得出PID参数

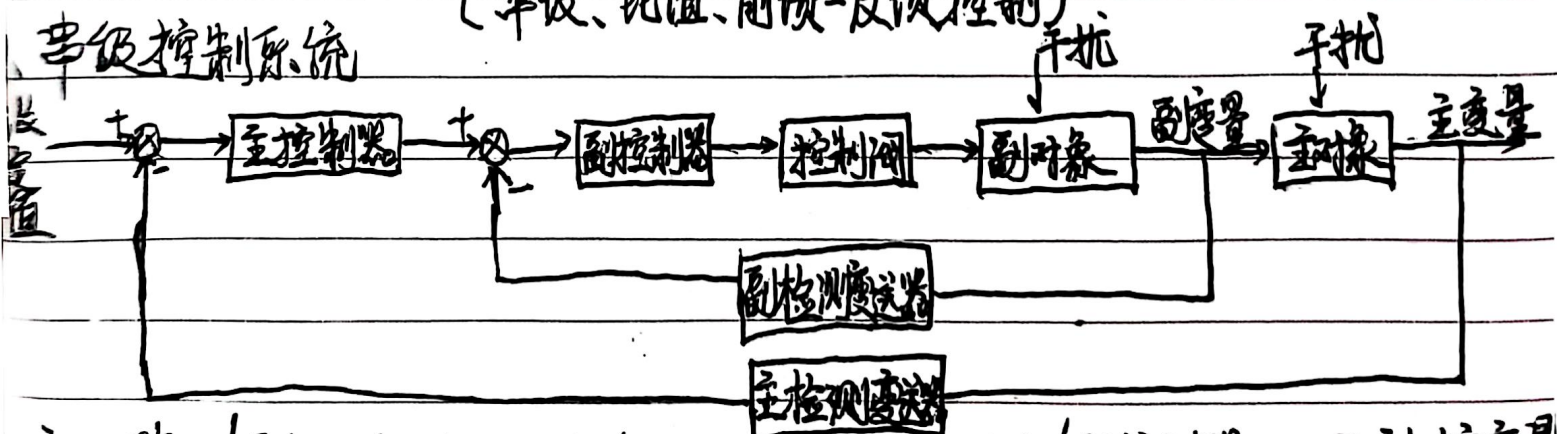
(2) 衰减曲线法: 先将PID控制器置为纯比例作用, 比例带 δ 放在较大位置, 系统投入闭环控制, 减小 δ , 出现衰减率 $\psi = 0.75$ 时, δ_k 上升时间 t_r , 按公式参数。

(3) 响应曲线法 (4) 经验法

5. 复杂控制回路

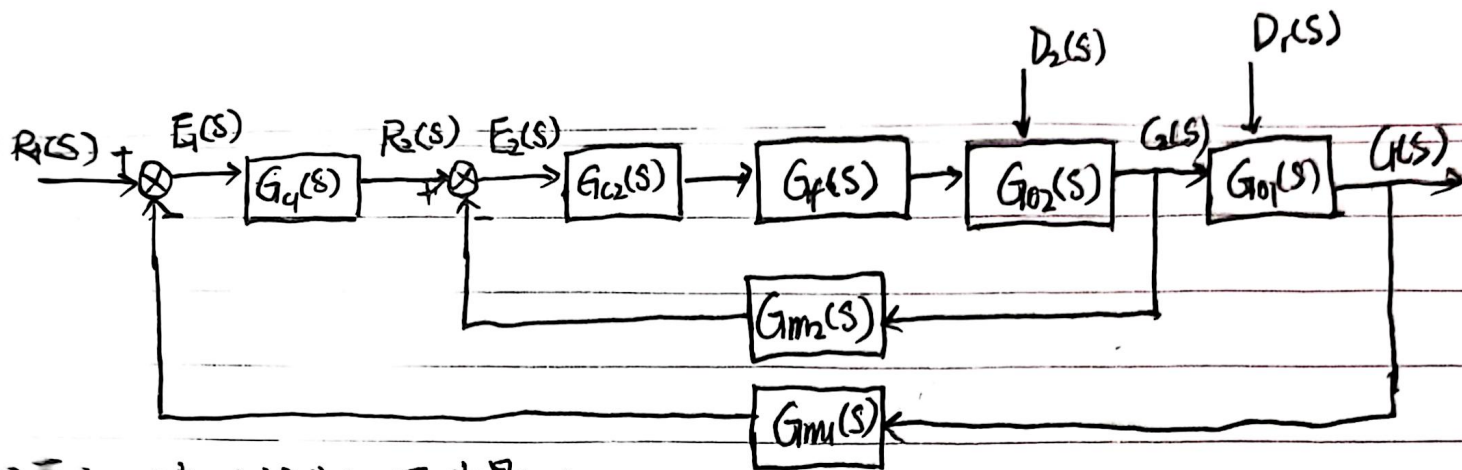
(串级、比值、前馈-反馈控制)

串级控制系统



主回路 / 副回路 主对象 / 副对象, 主控制器 / 副控制器, 主被控变量 / 副被控变量
 与简单控制系统相比, 串级控制系统控制质量得到很大改善





1) 副回路对控制品质的影响

{ 减小了时间常数, 控制作用更迅速
 { 提高了系统工作频率, 振荡周期减小
 { 放大系数减小, 提高系统稳定性

改善控制品质

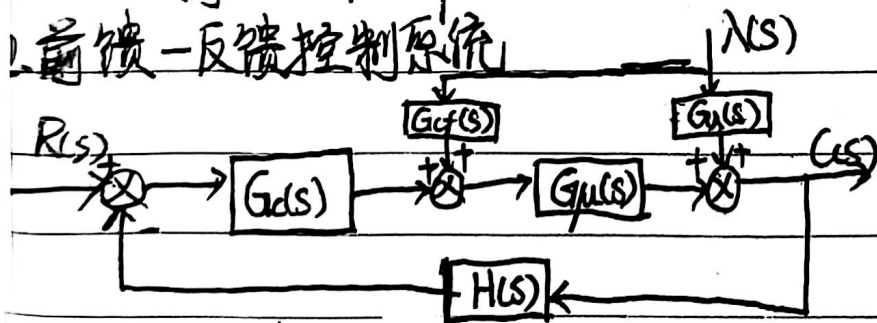
2) 副回路的抗干扰能力

{ 对进入副回路的干扰 D_2 有很强抑制作用, 减少 D_2 对主参数影响, (对 D_1 也有一定克服能力)
 { 主副控制器的比例系数乘积 $K_1 K_{c2}$ 越大, 抗干扰能力 $\uparrow$

3) 副回路对负荷变化适应性

对负荷或操作条件的变化有一定的自适应能力

1. 前馈-反馈控制系统



优点①有利于对系统中的主要干扰进行前馈补偿, 对系统中的其他干扰进行反馈补偿

②由于增加了反馈回路, 降低了前馈控制器精度的要求
 ③既可高精度控制, 又能保证系统稳定

引入前馈的原则:

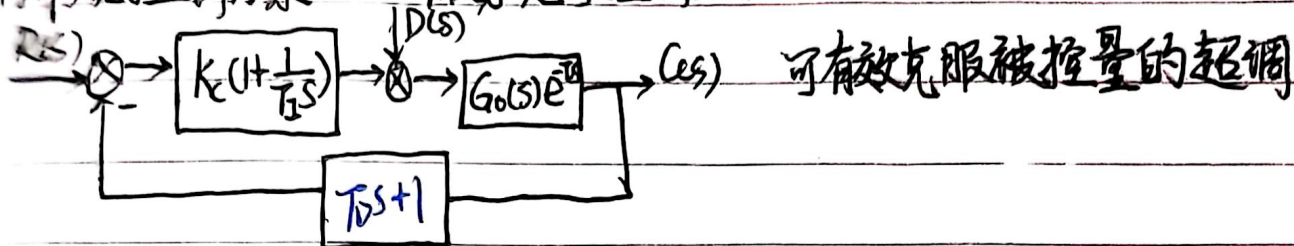
- ① 扰动量是可测不可控的
- ② 扰动量变化幅值大 频率高, 对被控量影响显著
- ③ 控制通道延迟大或扰动通道时间常数小

2. 大延迟控制系统

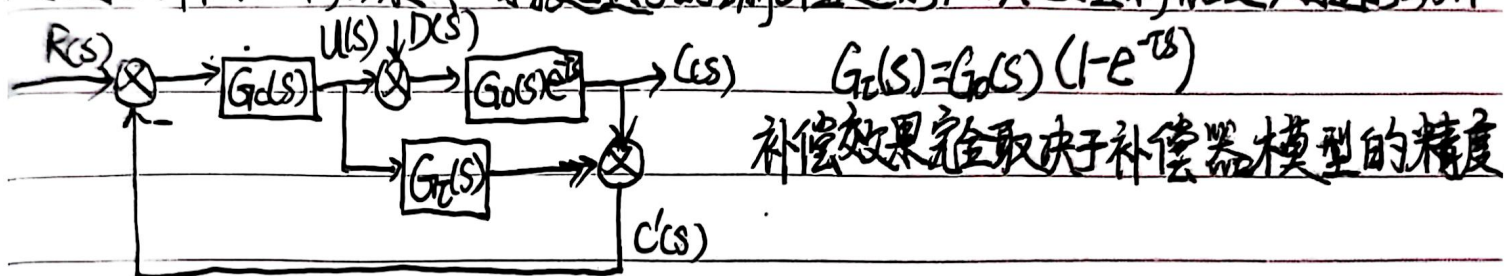


大延迟对象: 广义对象的延迟与时常之比大于0.5 (会导致系统稳定性↓)

1) 常规控制方案——微分先行控制方案



1) 预估补偿控制方案, 将延迟了的输出量超前反映到控制器使其提前动作



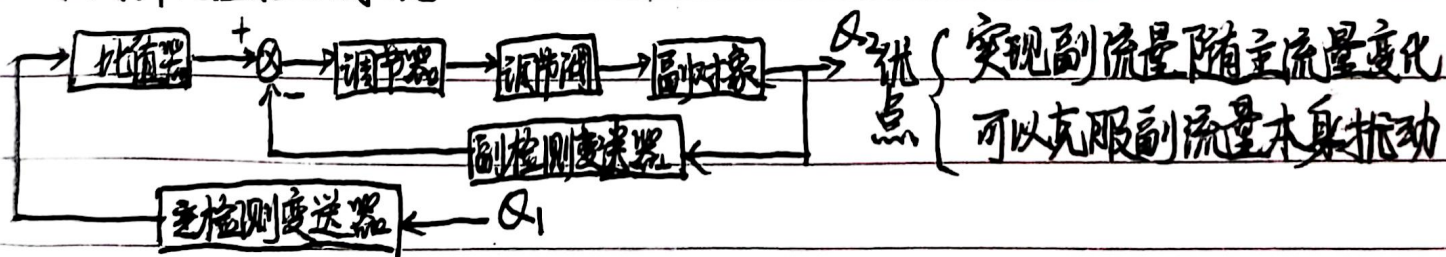
地质控制系统

凡是把两种及以上的物料量自动地保持一定比例的控制系统

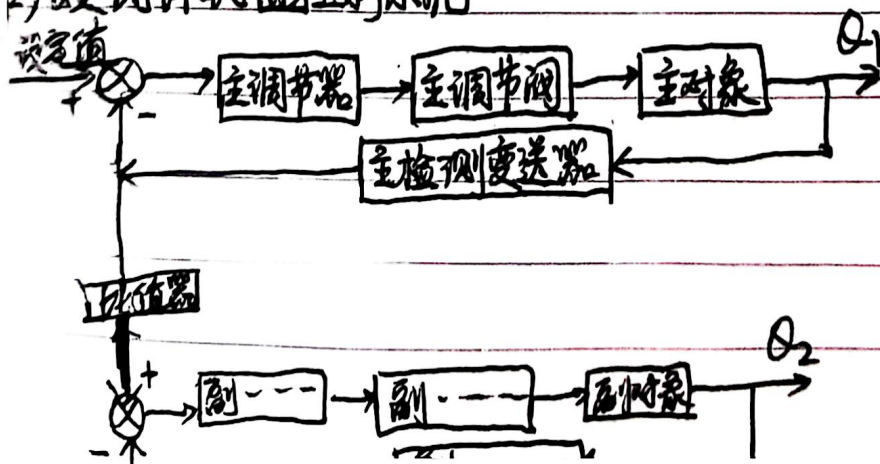
✓ 主物料(流量): 处于主导地位物料

副物料(流量): 以一定比例跟随主物料变化而变化的物料

(1) 单闭环位置控制系统



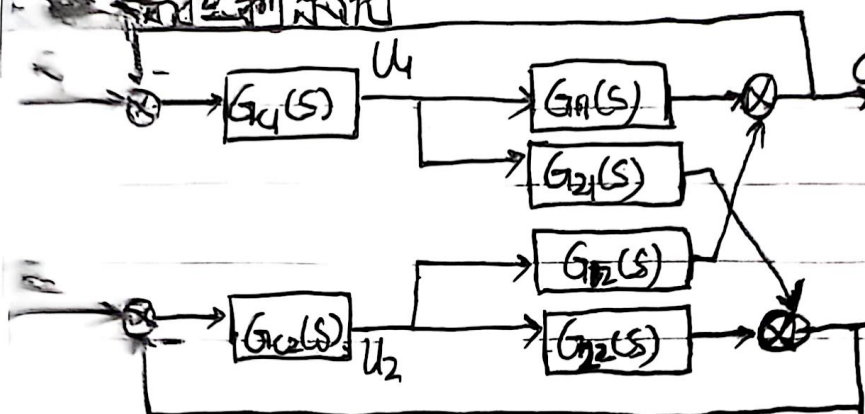
2) 双闭环比值控制系统



可实现对主流量的定值控制
但代表多、投资高，报送复杂。



耦合控制系统



(1) 解耦分析方法

$$\begin{bmatrix} C_1(s) \\ C_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \end{bmatrix}$$

$$C(s) = G(s)U(s)$$

(2) 解耦设计方法:

采用多变量系统的解耦设计 (最有效) { 前馈补偿解耦法 (常用)
反馈解耦法, 对角阵... 单位阵...

6. 汽包锅炉自动控制系统

过热蒸汽温度自动控制系统

任务: ① 保持过热汽温稳定在规定值附近 (暂时偏差 $\pm 0.2^\circ\text{C}$, 长期 $\leq \pm 0.5^\circ\text{C}$)

② 维持蒸汽流程中各点的过热蒸汽温度一定

扰动: ① 蒸汽流量变化 (负荷变化) ② 烟气热量变化 ③ 减温水流量变化

① 蒸汽负荷扰动时, 主蒸汽温度的阶跃响应:

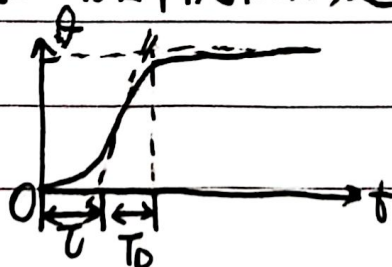
有延迟, 有惯性, 有自平衡能力, 延迟、惯性较小

② 烟气传热量扰动时, 主要是烟气流速 w_g 和烟气温度 θ_g 影响:

有延迟, 有惯性, 有自平衡能力, 延迟较小 $T_d = 0-20\text{s}$

③ 减温水流量扰动时, 有延迟有惯性, 有自平衡能力, 延迟较大 $T_d = 30-60\text{s}$

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{D(s)} = \frac{k_D}{1 + T_D s} e^{-T_D s}, \quad T_D = 100\text{s}$$



典型方案 (1) 串级汽温控制系统

工作原理：在系统中，减温器出口汽温 θ_1 是导前信号会在主汽温 θ_2 变化前反映出温度的变化，系统设有主、副两个调节器，主调节器对应于主汽温 θ_2 ，副调节器则基于导前汽温 θ_1 的变化作出调节，只要 θ_1 变化，副调节器就会计算出相应喷水量调节，~~然而~~主调节器还会根据 θ_2 变化进一步调整喷水量。

主回路要求：保持主汽温 θ_2 等于给定值，PI or PID

副回路要求：尽快消除减温水流量的自发扰动和进入副回路的其他扰动，P or P

(2) 采用导前汽温微分信号的双回路汽温控制系统

工作原理：主回路以主汽温调节喷水量，副回路以导前汽温的变化率 ~~来~~来提前对变化进行补偿或调整，使汽温更稳定。

静态时，过热汽温 θ_2 等于给定值

动态时，根据 $\frac{d\theta_1}{dt}$ 和 θ_1 与给定值间偏差来动作

(3) 过热汽温分段控制系统

优点：可改善控制品质

缺点：负荷变化时会导致两级减温水流量分配不均。

① 分段定值控制系统

② 按温差控制的分段控制系统

稳定时， $\theta_2 - \theta_1 = G - f(D) = \text{Constant}$

可在负荷较大时一级减温喷水量较大，可使一级喷水阀始终在合适开度

(4) 实例：一级喷水减温控制

无扰切换：在控制系统手动切自动时，必须保证无扰切换！

因此手动时，副调节器的输出必须跟踪调节阀当前位置

始终处于
主调节器输出必须始终跟踪一级喷水减温器后温度



2. 再热器汽温自动控制系统

任务: ① 维持再热器出口汽温为给定值

② 低负荷、甩负荷、或汽机跳闸时, 保护再热器不超温

扰动: 负荷变化、燃烧工况 (再热器具他对流汽温特性)

调节手段: 烟气 (烟气挡板位置, 烟气再循环, 燃烧器角度, 多层燃烧器)

典型方案: (1) 采用烟气挡板的再热汽温控制

{ 设备结构简单 操作方便
但调温灵敏较差, 幅度小

挡板开度与汽温变化不成线性关系

(2) 采用烟气再循环的 ———

{ 反应灵敏, 调温幅度大
设备结构复杂

负荷↓, 汽温↓, 开大再循环风机出口挡板, 汽温↑,

关小挡板。再循环设备停用, 打开热风门, 防烟气倒

(3) 采用摆动燃烧器角度的 ———

改变角度 → 改变火焰中心位置 → 改变再热器入口烟温

(4) 采用喷水减温方式的 ———

简单可靠但不经济, 一般用作再热汽温超极限时的事故情况下保护手段

3. 给水自动控制系统

任务: 使锅炉给水量适应锅炉蒸发量, 维持汽包水位在规定范围内。

扰动: 给水量 W , 锅炉负荷 D , 锅炉炉膛热负荷 Q , 汽包压力 P

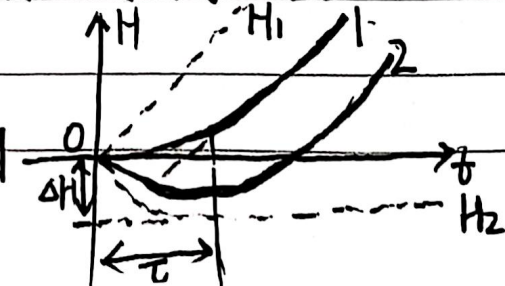
注: 水位太高, 蒸汽湿度太大, 水位太低, 运动压头太低, 自然循环动力不足

一般在汽包中心线下100~200mm, 运行中一般要求水位在给定值±50mm内。

动态特性 ① 给水量 W 扰动下:

{ 物质平衡 (曲线 H_1)
热平衡 (曲线 H_2)

叠加后得到水位曲线1



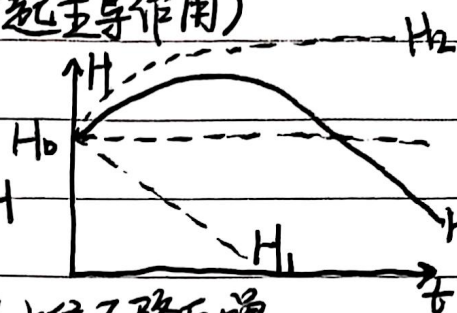
有延迟,有惯性,无自平衡能力

虚假水位: "2" 水位先下降后上升。(由于热平衡起主导作用)

② 蒸汽量 D 扰动下:

{ 负荷 $\uparrow$ 时, 水位先 $\uparrow$ 后 $\downarrow$
{ 负荷 $\downarrow$ 时, 水位先 $\downarrow$ 而 $\uparrow$

物质平衡 H_1
热平衡 H_2

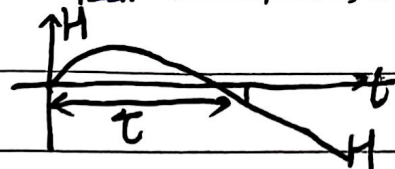


虚假水位: 负荷 $\uparrow$ 时, 给水量 $<$ 蒸发量, 但开始阶段水位不降反增。

③ 炉膛热负荷 Q 扰动下: (与 D 近似, 但虚假水位幅值及变化速度小)

$Q \uparrow$, 蒸发强度 $\uparrow$, 水面下汽泡体积 $\uparrow$, 水位 $\uparrow$,

蒸发量 $D \uparrow$, 汽压升高, 蒸汽流量 $\uparrow$, 水位 $\downarrow$



需考虑问题

(1) 调节量只能选择给水量, 蒸汽量和炉膛热负荷都是外部扰动

(2) 给水量变化后到水位变化存在一定延迟和惯性, 若仅根据水位去调节给水

(3) 蒸汽量和热负荷变化时, 水位反应更快, 应将蒸汽量作为前馈调节信号。

典型方案: (1) 单级三冲量给水自动控制系统

是前馈-反馈复合控制系统, 接受三个信号 (H 、 D 、 W)

{ 水位 H 是主信号, 组成反馈控制系统

{ 蒸汽流量 D 是前馈信号, $D \uparrow$ 时 $\uparrow W$, 减小由于虚假水位使给水量与负荷反向变化的趋势

{ 给水流速 W 既是反馈又是前馈信号

(2) 串级三冲量给水自动控制系统

工作原理: 主调节器校正水位偏差, 副调节器消除给水量、蒸汽量扰动影响

主 PI H , 副 P W 、 D

(3) 采用变速泵的给水自控系统



- ①变速泵
- 电动：原动机是定速电动机，采用液力联轴器
 - 汽动：原动机是小汽轮机，高压缸抽汽量改变水泵转速

汽动泵效率高，但机组启动、低负荷时，抽汽压力低，需配定速电动泵和调节阀

②变速给水泵工作点要在安全经济运行区域内

③任务：

维持水位恒定，保证泵工作点在安全经济区域内

由三个给水调节子系统实现：

- 水位控制系统：通过改变给水泵转速改变给水量，维持汽包水位合理范围
- 泵出口压力控...：...给水泵调节阀开度...泵出口压力，保证给水泵安全区内工作
- 泵最小流量...：通过控制再循环水阀门开关，保证W不低于泵规定的最低流量

(4) 给水全程自动控制系统

全程调节系统：在启停过程和正常运行时均能实现自动调节的系统

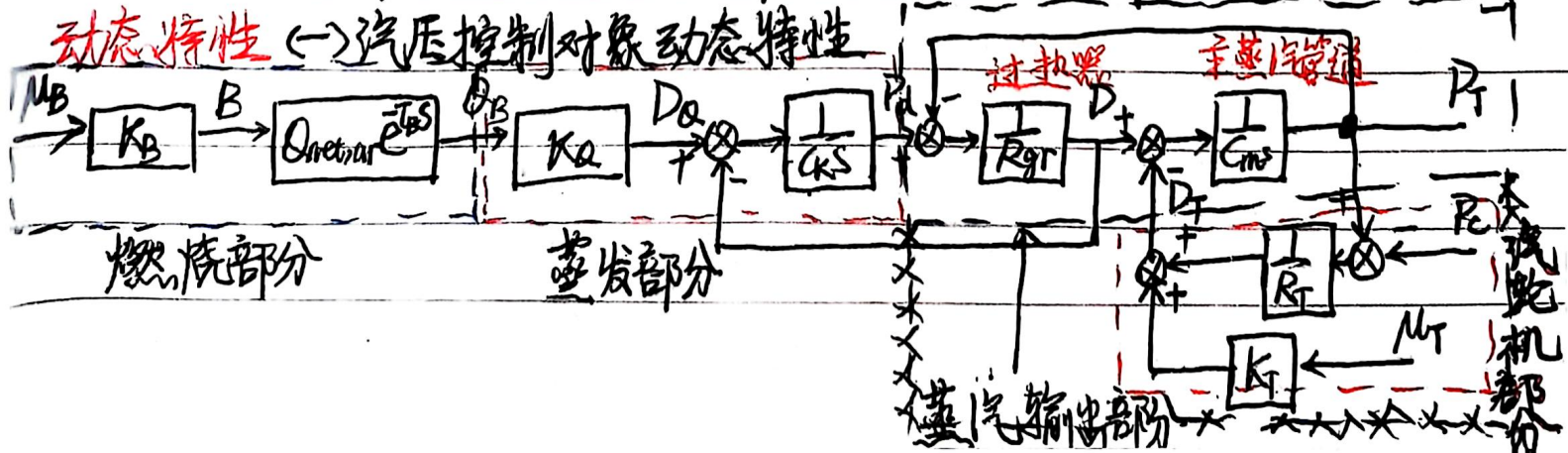
三冲量系统存在问题：

- 调节器参数整定是依据某一负荷下动态特性整定的，无法完成全程调节
- 蒸汽参数和负荷大范围变化时，H、W、D测量准确性受影响，需校正

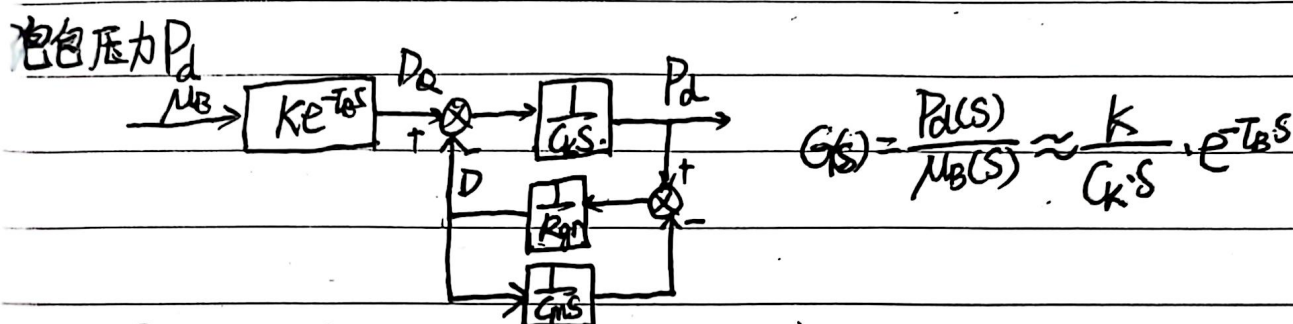
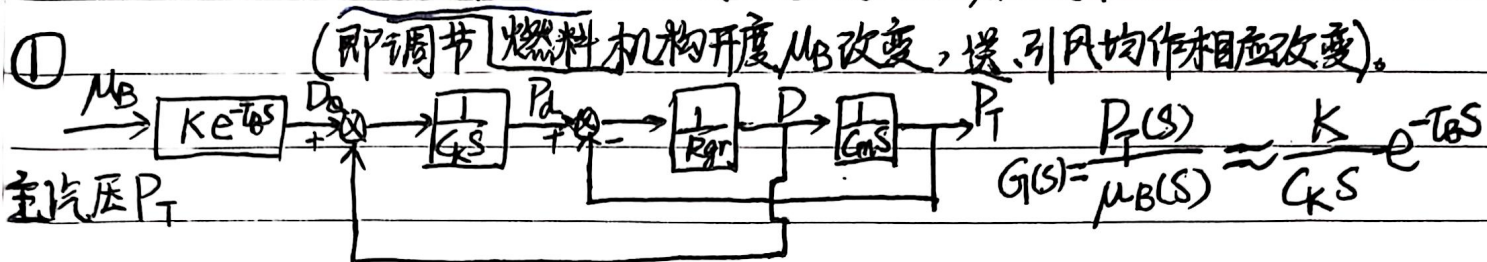
4. 燃烧过程自控系统

- 任务：①维持主蒸汽压力恒定 ②保证燃烧过程经济性
- ③维持炉膛压力稳定 ④维持燃烧系统正常运行

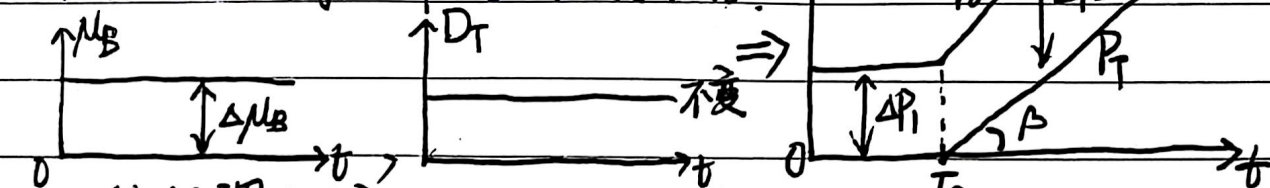
动态特性 (一) 汽压控制对象动态特性



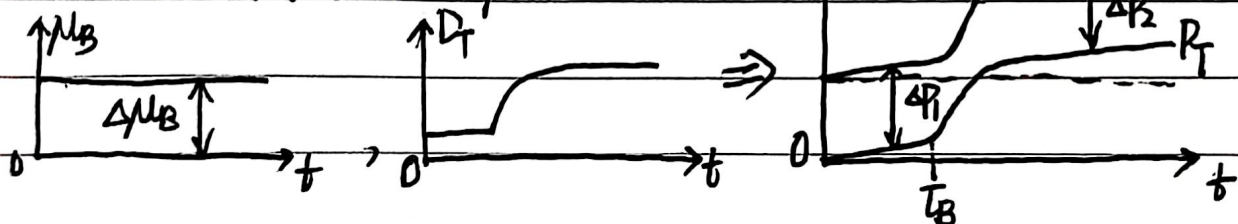
(二) 在燃烧率扰动下汽压控制对象的动态特性



① 汽轮机负荷不变 (D_T 不变) 时, 在燃烧率扰动下, 主汽压力和汽包压力均为具有延迟的无自平衡能力特性。

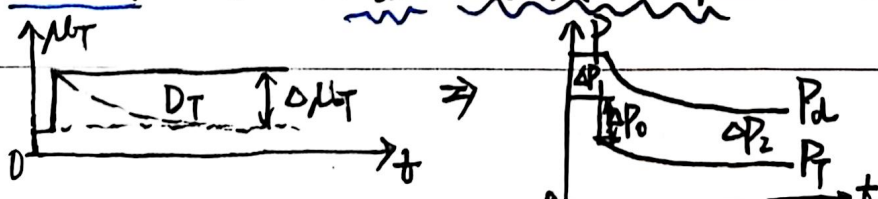


② 汽轮机调门开度不变时, 在燃烧率扰动下, 主汽压力和汽包压力均为具有延迟的惯性环节



(三) 负荷扰动下汽压控制对象的动态特性

① 汽轮机调门开度 μ_T 扰动下, 主汽压力 P_T 为比例环节和一阶惯性环节的并联环节, 汽包压力 P_d 为一阶惯性环节

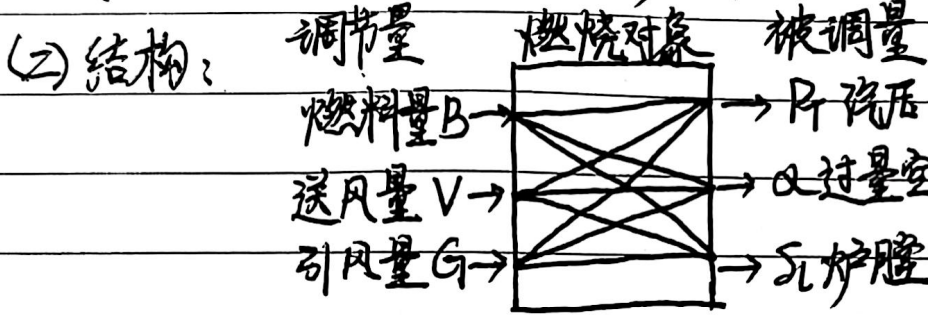


②进汽量 D_T 扰动下, P_T 近似于比例环节与积分环节的并联环节, P_D 近似于积分环节



基本方案 (一) 基本原则 组成:

- 能迅速改变炉膛燃烧率, 适应外界负荷变化
- 能迅速发现并消除燃烧率扰动
- 确保燃料送风量和引风等参数协调变化



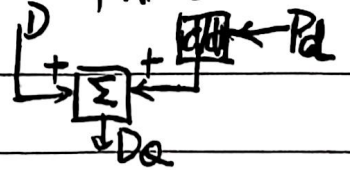
P_T 需要能量是否平衡的指标
是锅炉燃料能量与汽机
 α 过量空气系数 是 B 与 V 是否平衡
 S_L 炉膛负压 是 V 与 G 是否平衡

燃料量 B 的测量: 给煤机转速, 给粉机转速, 磨煤机进出口压差, 热量信号

所谓热量信号, 是指燃料进入炉膛燃烧后, 单位时间产生的热量折算为蒸汽量 D_Q

$$D_Q = D + C_k \frac{dP_k}{dt}$$

D_Q 可近似表示炉膛热负荷大小, 还能反应燃烧热值的变化



典型系统

燃油锅炉为保证燃料充分燃烧, 采用加油先加风, 减油先减油, 使燃料燃烧过程中始终有富裕风量。

10. 单元机组协调控制系统

1. 单元机组的动态特性

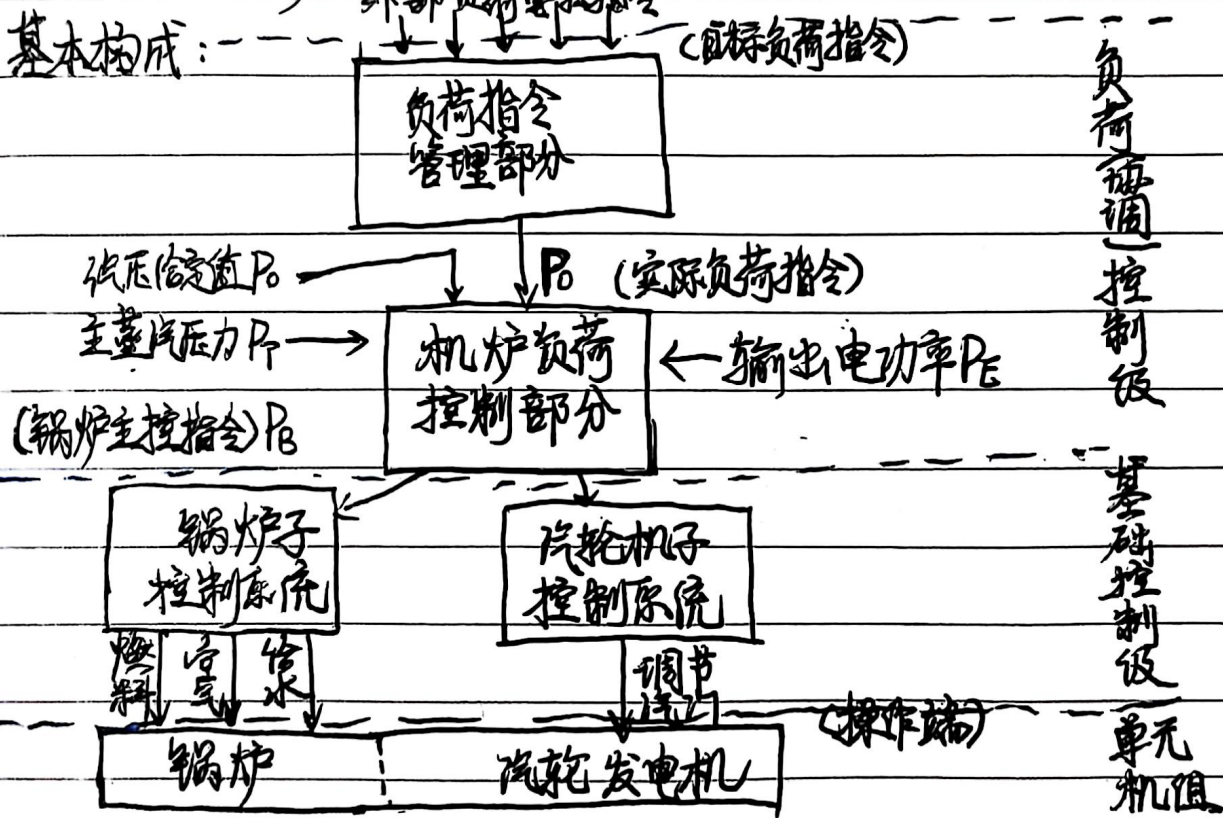


任务：在保证主蒸汽压力偏差在允许范围内的前提下，使机组输出功率尽快适应电网负荷变化的要求。

特点 ①单元机组是一个强关联的多变量对象，锅炉和汽轮机、发电机共同适应外界负荷要求，共同保证运行参数稳定

②汽轮机、发电机响应快，锅炉负荷响应慢

③应具有参与电网一次调频的能力



①负荷自动控制系统 $\left\{ \begin{array}{l} \text{负荷指令管理部分} \\ \text{机炉负荷控制部分} \end{array} \right.$

作用：接受外部负荷要求指令，并发出使机炉调节系统协调动作的指令。

②主控系统相当于机炉调节系统的指挥机构，起上位控制作用

③机炉调节系统相当于主控制系统的伺服机构，起下位控制作用，是基础

④协调控制系统：主控制系统和锅炉汽轮机各自调节系统的总称



运行方式: (1) 定压运行方式: (机跟炉、炉跟机、机炉协调)

始终维持主蒸汽压力和温度为额定值, 通过改变汽机调门开度改变机组输出功率。

(2) 滑压运行方式:

保持主汽门和调门全开, 外界负荷变化时通过改变锅炉的燃料、风量和给水等相应输入量, 改变锅炉蒸发量, 进而改变汽机进汽压力, 维持汽温为额定值使汽轮发电机组输出功率适应外界负荷需求。

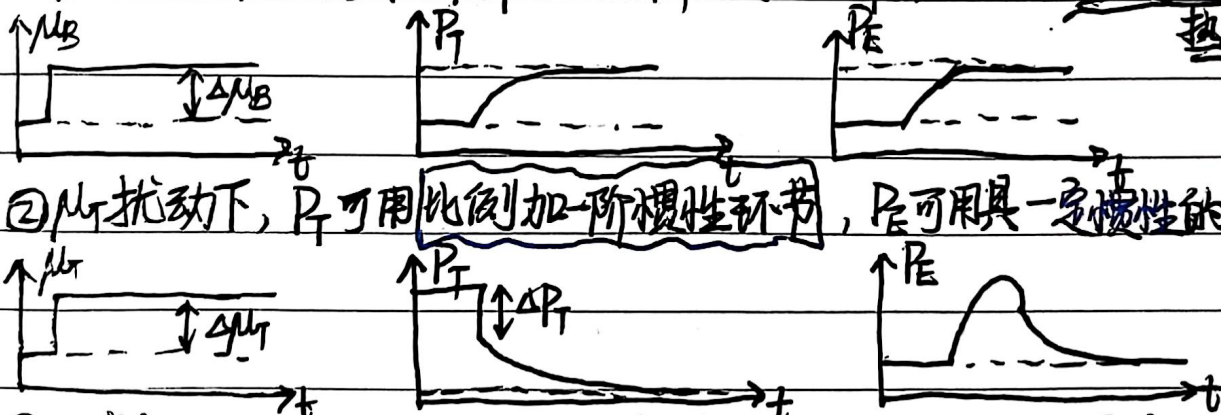
(3) 联合运行方式: 低负荷滑压, 高负荷定压运行

(4) 调频运行方式

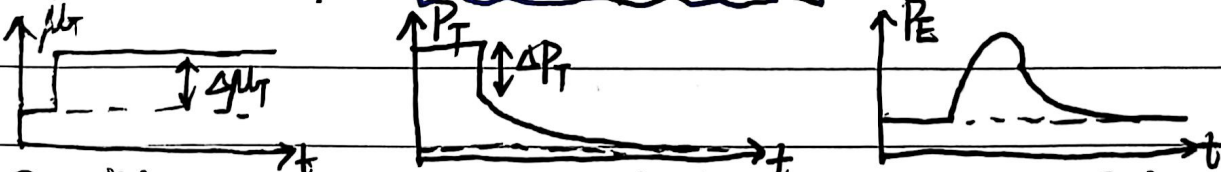
动态特性

输入: 燃烧率 M_B , 汽机调门开度 M_T (控制量)
输出: 主汽压力 P_T , 输出功率 P_E (被控量)

① M_B 扰动下, P_E 和 P_T 都可用高阶惯性环节来描述, P_E 惯性大, 主要由中间再热器的惯性决定



② M_T 扰动下, P_T 可用比例加一阶惯性环节, P_E 可用具有一定惯性的实际微分环节



③ 特点: (汽机调门 M_T 动作时, P_T 和 P_E 响应均很快
锅炉燃烧率 M_B 动作时, P_T 和 P_E 响应都很慢)

2. 负荷指令运算回路

任务: ① 根据负荷控制的要求选择目标负荷指令的形成方式

② 考虑汽机等主要热设备热应力变化的要求和机组负荷的跟踪能力, 对目标负荷指令信号进行适当的变化率限制

③ 对机组参加电网调频所需负荷指令信号的幅值和调频范围作出规定



3. 单元机组负荷控制方式

基本原则: 为了提高负荷响应能力, 充分利用机组蓄热能力, 加强对燃烧率调节

首要任务: 保证机组出力适应电网负荷变化要求, 维持机组稳定运行

结构形式: 以前馈-反馈控制为主的多变量协调控制反馈

机炉分别控制方式和机炉协调控制方式

一个调节量只控制一个被调量 允许汽压一定波动但不能超限, 又利用了一部分蓄热能力

(1) 锅炉跟随方式 (BF): 由汽机控制输出功率 P_e , 锅炉控制汽压 P_f

特点: 当 P_0 改变时, 由于利用了锅炉的蓄热能力, 具有较好负荷跟随性, 对调频调峰有利, 但汽压波动较大。

当有内扰 (μ_B 波动) 时, 汽压波动大, 功率波动小。

(2) 汽机跟随方式 (TF): 锅炉控制电功率 P_e , 汽机控制汽压 P_f

特点: 汽压波动小, 但因未利用锅炉蓄热能力, 有较大延迟, 负荷适应性差, 不利于带变动负荷和参与电网调频

μ_B 时, P_f 波动小, P_e 波动大

(3) ~~选择~~ 以锅炉跟随为基础的协调控制方式 (BFCC):

↓ P_e 响应性能 换来 汽压 P_f 控质量 ↑ μ_T 调节 P_e , μ_B, μ_T 调节 P_f

(4) 以汽机跟随为基础的协调控制方式 (TFCC)

↑ P_f 偏差 换取 P_e 响应速度 ↑ μ_T 调节 P_f , μ_B, μ_T 调节 P_e

(5) 综合型协调控制方式

(3) 和 (4) 实际 P_f, P_e 中只有 1 个通过两个调节 (μ_B, μ_T), 另一个仍是由 μ_T 调节



7. 人工神经网络：由大量神经元及它们间的有向连接构成

{ 神经元的激活规则：神经元输入到输出的映射关系，一般为非线性函数
网络的拓扑结构：不同神经元间的连接关系
学习算法：通过训练数据来学习神经网络的参数。

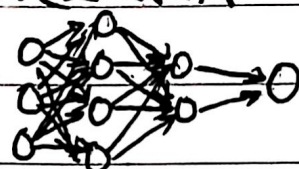
8. 燃气锅炉，热泵，制冷系统

9. 负荷预测

MLP：全连接神经网络（前馈神经网络）

结构：多个神经元构成层，多层神经元构成神经网络，全是全连接层

其中头尾分别是输入、输出层，中间为隐藏层

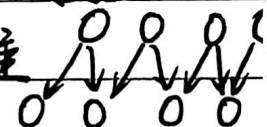


CNN：卷积神经网络

结构：由卷积层、汇聚层、全连接层交叉堆叠而成

(感受野)

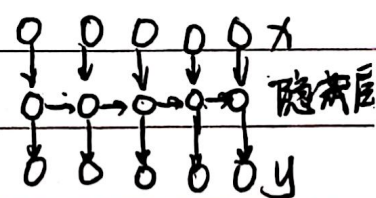
~~卷积~~ CNN需对维度进行转换，甚至是1维也将数据转换为3维



RNN：循环神经网络

MLP, CNN结构：连接存在于层与层之间，层内神经元间无连接

而RNN层内神经元间有连接



10. 神经网络的不足：

① 缺乏透明性，可解释性差

② 训练时间较长，特别是对于深度神经网络

③ 容易陷入局部最优解而不是全局最优

未来挑战：

① 提高模型的解释性和透明度 ③ 提高鲁棒性和安全性，改善泛化能力

② 提高训练效率，降低资源消耗 ④ 如何处理大规模数据

降低硬件依赖性



11. 基本思路: 通过训练一个神经网络模型, 使其能根据历史负荷数据和其他可能的影响因素(如天气、节假日、体育艺术活动等)来学习负荷的变化趋势, 并基于这个训练有素的模型对未来的负荷进行预测。

影响因素: 数据质量、网络结构、训练方法(如学习率、优化算法等)

超参数: 学习率、测试集和验证集的划分, 激活函数选择, 批量大小, 训练轮数, 正则化项, 网络初始化...

2. 燃气锅炉, 热泵, 空调, 热电联产机组

3. 牛顿-拉夫逊法求解水力模型

牛顿-拉夫逊法将非线性方程组的求解变成反复对相应的线性方程式进行求解的过程, 即所称的逐次线性化过程。通过对节点流量平衡方程、回路压力平衡方程和水头损失方程组成的非线性方程组多次迭代求解逼近最终解。线性化, 然后

4. 热力模型的给定条件:

环状供热网的基本结构, 物性参数, 管道长度, 水力计算得到的管段流量, 环境温度, 热原供水温度, 节点2回水温度, 负荷1, 2回水温度及参数

求解变量: 节点1, 2供水温度, 节点1, 2, 3回水温度

5. 电锅炉: 利用电流通过线圈产生电磁线, 由可导磁的金属材料切割磁力线时产生热量, 由金属材料将热量传递给水。

循环水泵: 产生并维持管网压力差

热泵: 通过做功使热量从温度低介质流向温度高介质, 电能→热能

燃气轮机: 将燃气的焓转化为电能

蒸汽轮机: 将蒸汽热能转化为电能, 燃料

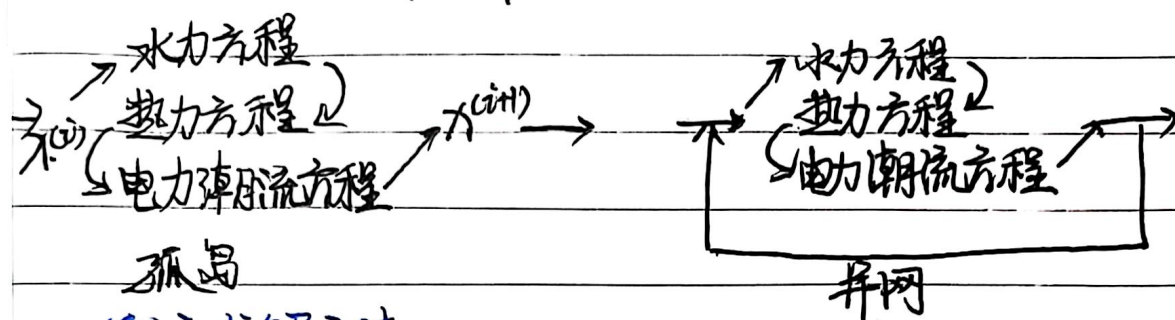
热电联供CHP机组: 依靠朗肯循环, 燃烧加热蒸汽产生热能和电能



16. 分解求解方法

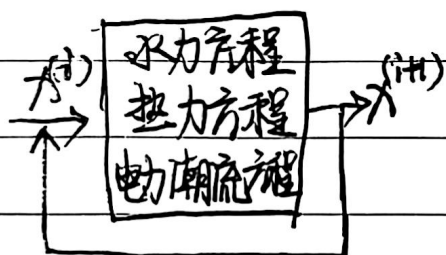
独立的水力方程、热力方程和电力潮流方程应依次顺序求解，并由转换设备耦合。孤岛模式的计算过程是一直重复直到结果收敛到给定误差。

并网模式是分解计算的简单特殊情况，仅需一次水力、热力、电力潮流方程的迭代。



联立求解方法

水力、热力、电力潮流方程联立成整体方程组，并用牛顿-拉夫逊法同时求解。



步骤：并网模式，先求解水力-热力模型，其结果通过耦合设备（CHP机组、热泵、电锅炉与循环水泵等）传至电网，然后计算电力系统潮流。

