

第4章 常规及复杂控制技术



总体介绍

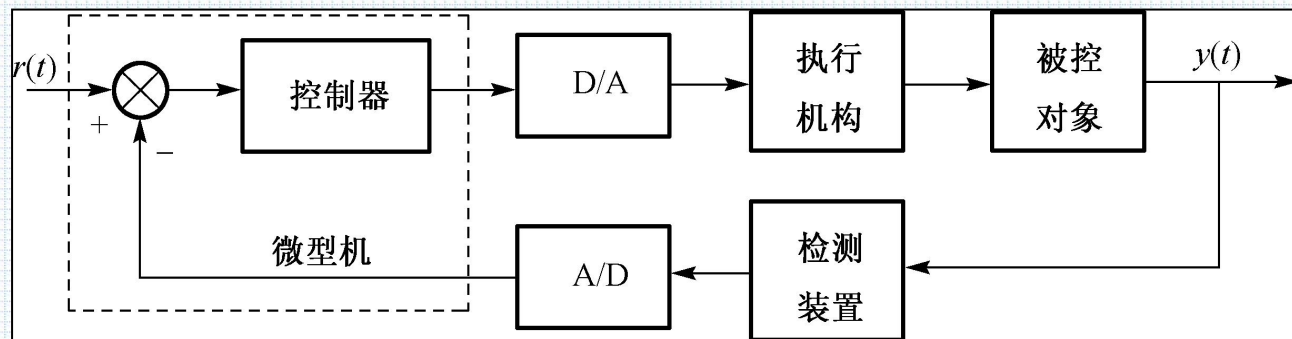
第一节

第二节

第三节

实验

学习要求



第4章 常规及复杂控制技术



总体介绍

第一节

第二节

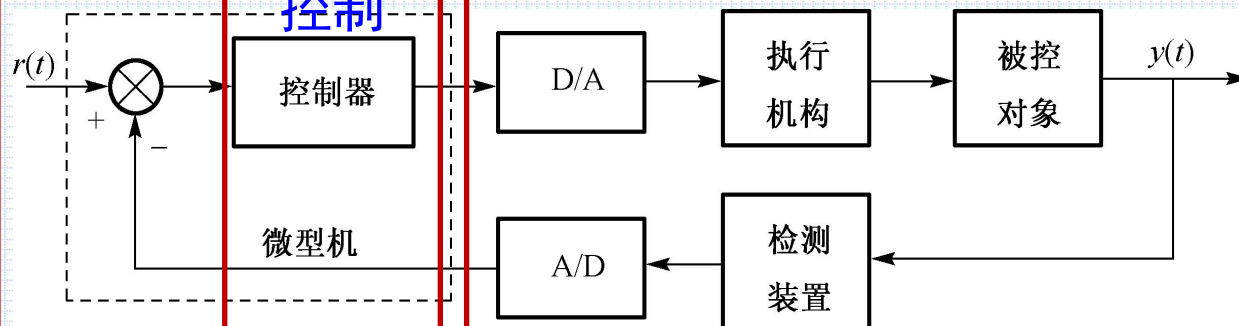
第三节

实验

学习要求

第一章 绪论

第三章 数字量 控制



第4章 常规及复杂控制技术

总体介绍

第一节

第二节

第三节

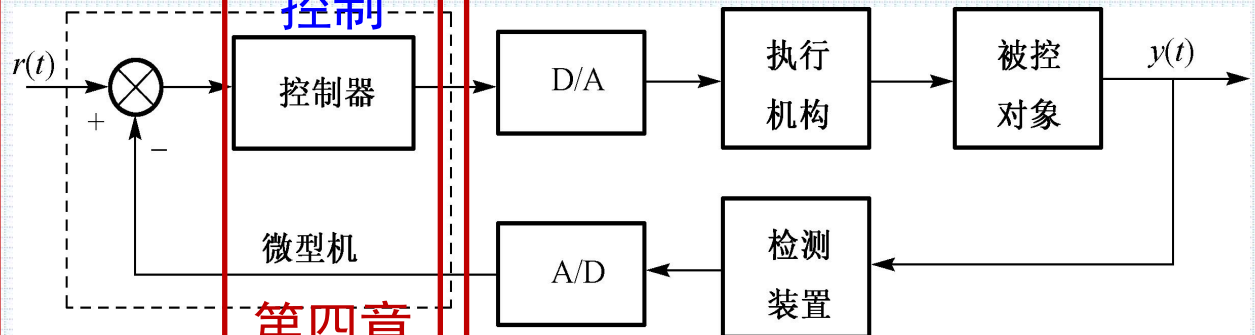
实验

学习要求

第一章 绪论

第三章 数字量 控制

第二章 硬件设计（总线，过程通道，硬件总体设计）



第四章 模拟量 控制

第四章 常规及复杂控制技术，实现对模拟量稳定性、快速性和准确性控制。

第4章 常规及复杂控制技术



总体介绍

第一节

4.1 数字PID控制器的连续化设计技术

第二节

4.2 串级控制技术

第三节

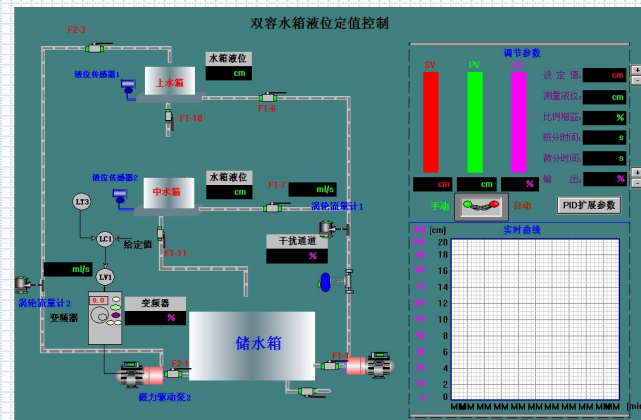
4.3 前馈-反馈控制技术

实验

数字PID控制技术实验

学习要求

学习要求



第4章 常规及复杂控制技术



总体介绍

第一节

第二节

第三节

实验

学习要求

1. (4.1) 了解数字 PID 控制技术作用；明确掌握数字 PID 控制器连续化设计方法，数字控制器改进方法和参数整定方法；可进行实践应用。
2. (4.2) 掌握串级 PID 控制技术的结构和控制原理，熟悉串级 PID 控制系统的设计方法。
3. (4.3) 掌握前馈-反馈 PID 控制技术的结构和控制原理，熟悉前馈-反馈 PID 控制系统的设计方法。
4. 本章**教学重点**是数字 PID 技术。
5. 本章**教学难点**是串级控制和前馈-串级控制的控制原理。

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



主要内容：

- 4.1.1 介绍PID控制技术
- 4.1.2 数字PID控制器的设计
- 4.1.3 数字PID控制器的改进
- 4.1.4 数字PID控制器的参数整定

学习要求：

1. (4.1.1) 了解数字 PID 控制技术作用
2. (4.1.2) 掌握数字 PID 控制器连续化设计方法
3. (4.1.3和4.1.4) 掌握数字 PID 控制器改进方法和参数整定方法
4. (4.1.2) 可进行实践应用

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.1 介绍PID控制技术：1.PID技术

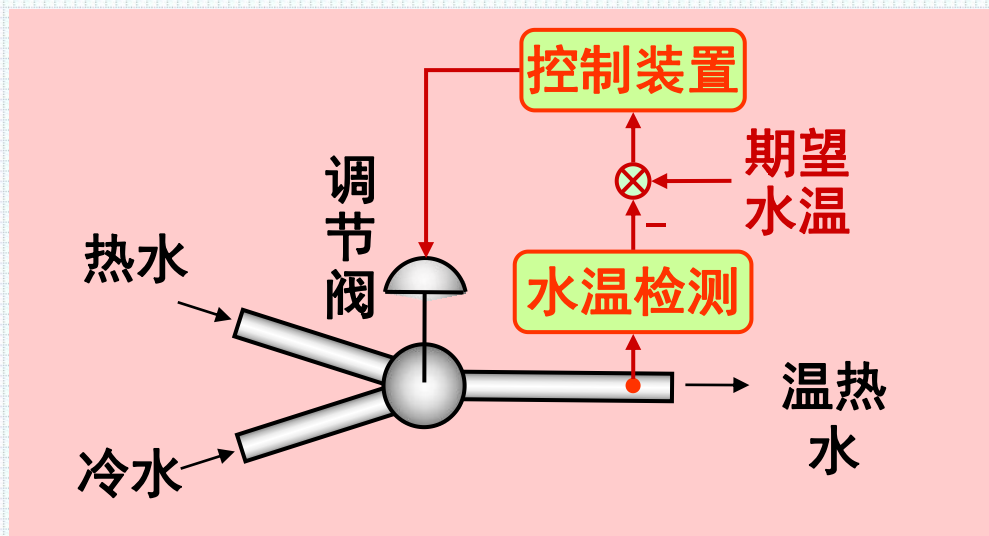
定义：PID控制技术

- ◆比例(Proportion)控制
- ◆积分(Integral)控制
- ◆微分(Differential)控制

总的控制思路：

若水温偏低，则增大控制输入，即增大热/冷水流量的比值；

反之，若水温偏高，则减小控制输入。



4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.1 介绍PID控制技术：1.PID技术

※历史悠久：

- ◆ 产生于20世纪初
- ◆ 机械式、液动式、气动式、电子式等

※优点：

- ◆ 原理简单；（P,I,D）
- ◆ 易于实现；（编程简单）
- ◆ 对模型依赖少，鲁棒性强；（不需要数学模型）
- ◆ 适用面广（化工，冶金，飞行，制药，石油等）；
- ◆

※主导地位：

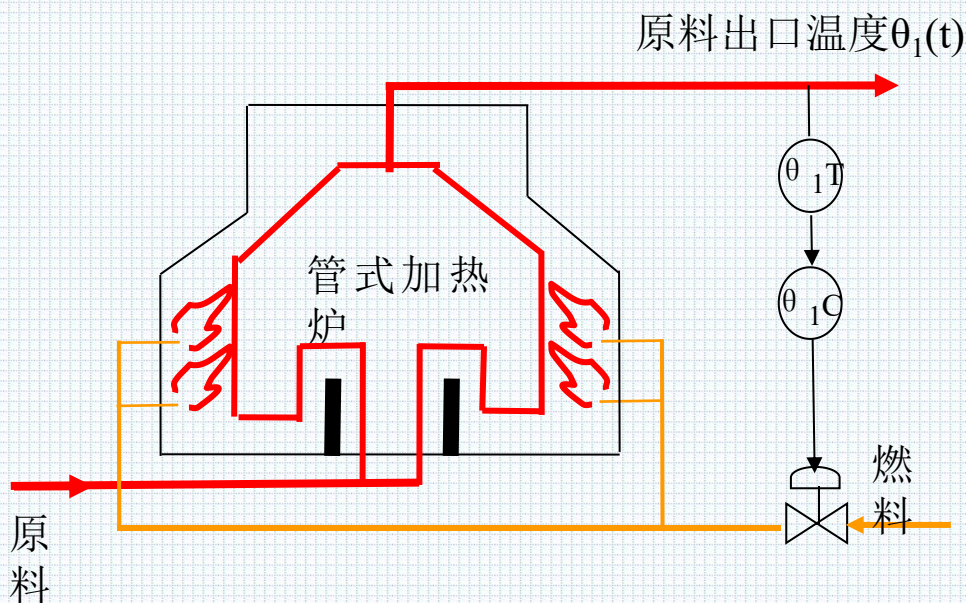
- ◆ 在DDC、DCS、FCS中，PID控制算法占主导地位。

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.1 介绍PID控制技术：2.作用

【例】管式加热炉是炼油厂经常采用的设备之一，要求是：出口温度保持恒定。具体任务是把原油加热到一定温度，以保证下道工艺的顺利进行。因此，需要控制原油加热后的出口温度。



4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.1 介绍PID控制技术：2.作用

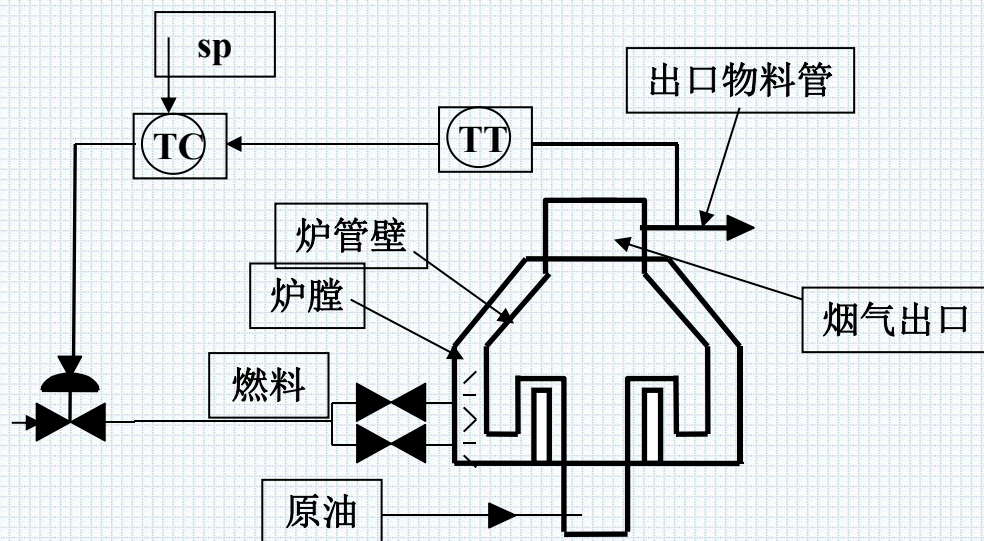
【例】管式加热炉是炼油厂经常采用的设备之一，要求是：炉出口温度保持恒定。具体任务是把原油加热到一定温度，以保证下道工艺的顺利进行。因此，需要控制原油加热后的出口温度。

● 系统主要扰动：

$f_1(t)$: 炉膛温度波动

$f_2(t)$: 燃料油流量（压力）的波动

$f_3(t)$: 加热炉烟气排量波动



4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.1 介绍PID控制技术：2.作用

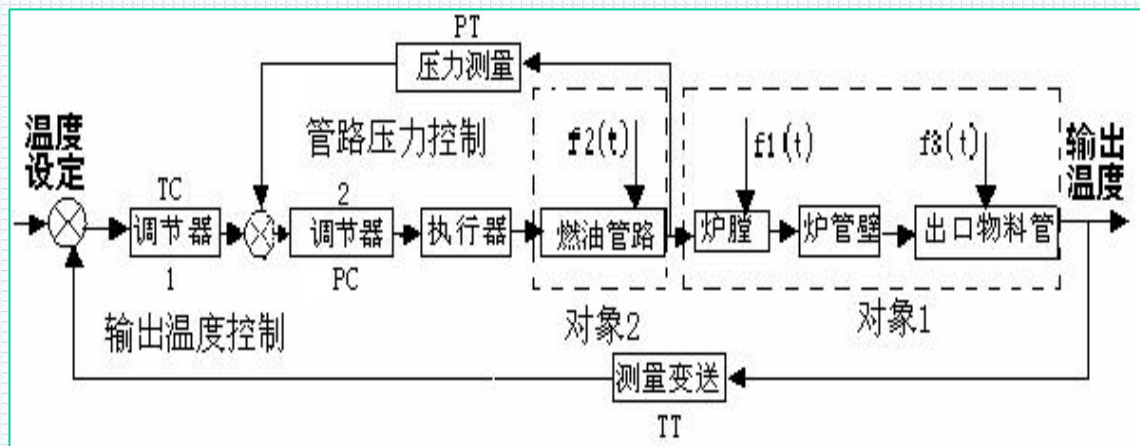
【例】管式加热炉是炼油厂经常采用的设备之一，要求是：炉出口温度保持恒定。具体任务是把原油加热到一定温度，以保证下道工艺的顺利进行。因此，需要控制原油加热后的出口温度。

- 系统主要扰动：

$f_1(t)$: 炉膛温度波动

$f_2(t)$: 燃料油流量（压力）的波动

$f_3(t)$: 加热炉烟气排量波动



4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.1 介绍PID控制技术：2.作用

广泛应用于各类模拟量控制系统

受控变量：

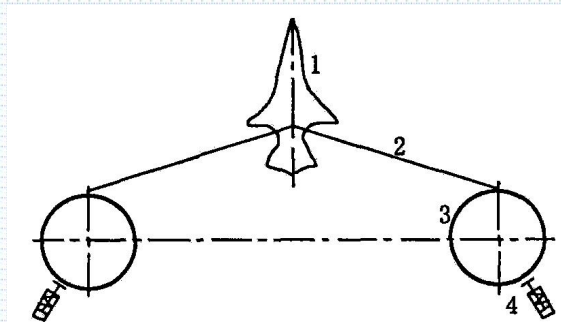
Y

各种扰动：

影响稳定的不确定的量。

控制目标：

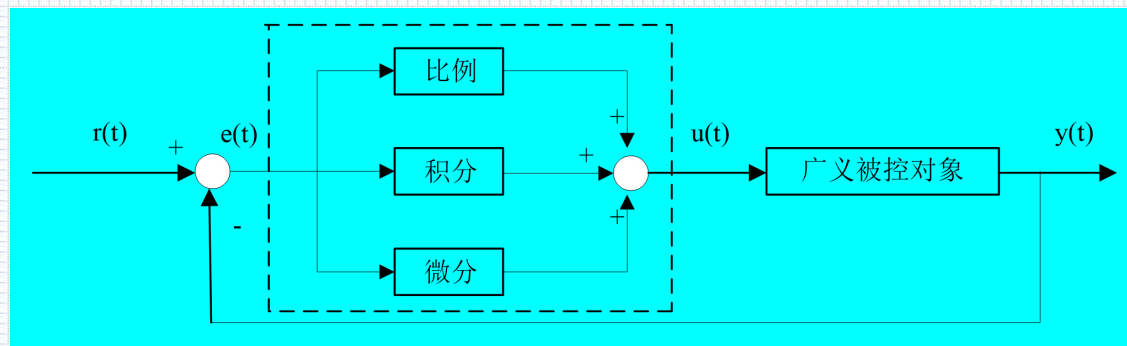
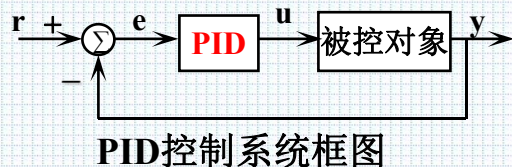
保持输出基本恒定：PID



4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.2 数字PID控制器的设计：1.模拟PID调节器

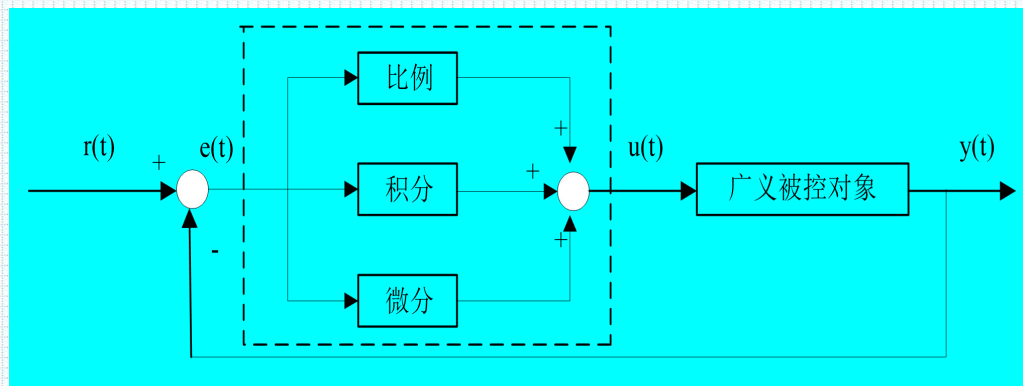


- **输入**：控制偏差 $e(t) = r(t) - y(t)$
- **输出**：偏差的比例(P)、积分(I)和微分(D) 的线性**组合**

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.2 数字PID控制器的设计：1.模拟PID调节器



模拟系统的PID算法表达式：

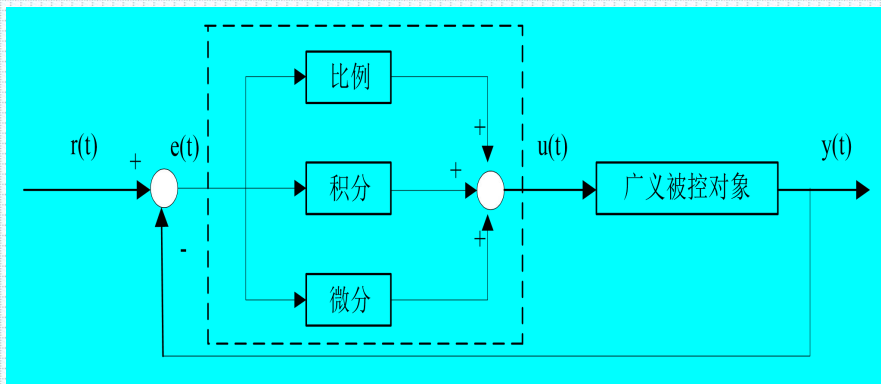
$$u(t) = K_P(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt})$$

式中： $e(t)$ —— 偏差
 $u(t)$ —— 控制量
 K_P —— 比例系数
 T_I —— 积分时间常数
 T_D —— 微分时间常数

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.2 数字PID控制器的设计：1.模拟PID调节器



比例

若水温偏低，就使控制输入增大得越多；反之，若水温偏高，就使控制输入减小得越多。

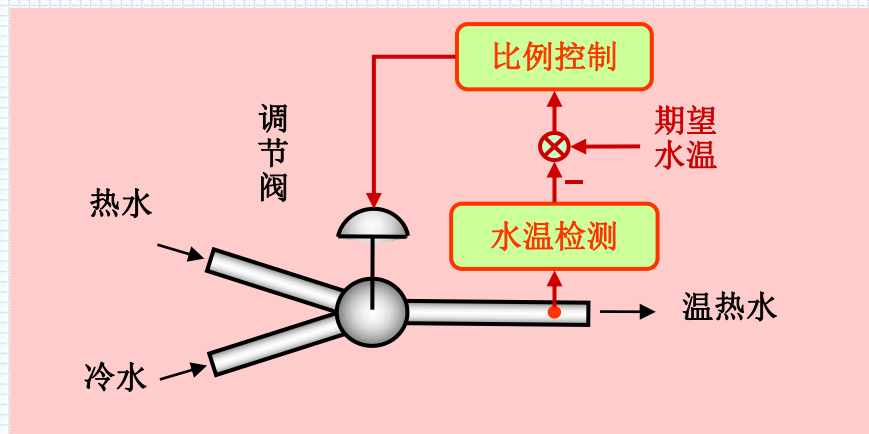
控制量的大小大致与偏差成比例。

积分

若水温低于期望值，则将输入增大一些，如果还没有达到，就再增大一些，这样一点一点地调节，直到水温合适为止；控制输入包含对偏差的积分，即偏差在时间上的累积，可以最终消除偏差。

微分

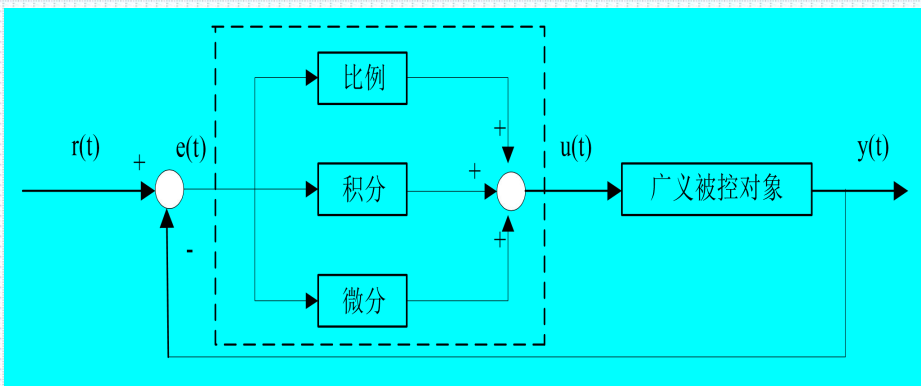
若扰动使水温开始升高，则应降低热/冷水比值，且升温速度越快，降低越多；反之若水温要降低，则应增大热/冷水比值，且降低速度越快，增大越多。即控制作用与水温的变化率成正比。



4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.2 数字PID控制器的设计：1.模拟PID调节器



比例

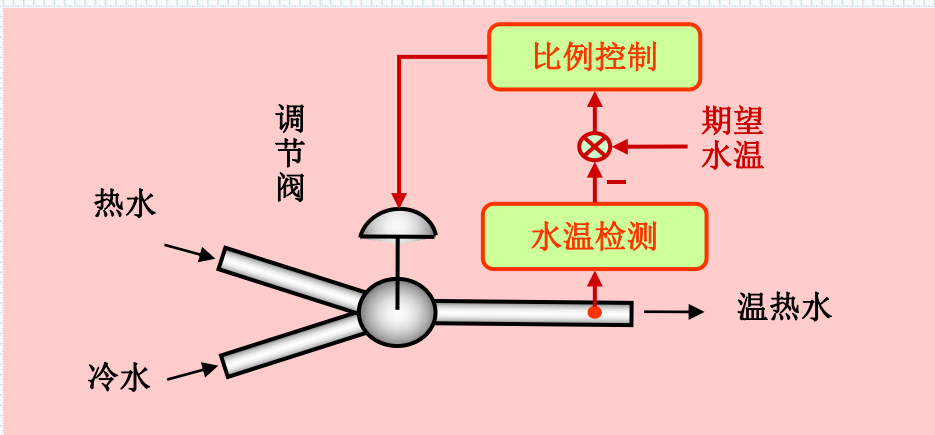
迅速反映偏差。能迅速反映偏差，从而减小偏差，但不能消除静差，比例的加大，会引起系统的不稳定。

积分

消除偏差。只要系统存在偏差，积分环节就会产生控制作用减小偏差，直到最终消除偏差，但积分作用太强会使系统超调加大，甚至使系统出现振荡。

微分

预调节作用。有助于系统减小超调，克服振荡，加快系统的响应速度，减小调节时间，从而改善了系统的动态性能。但微分过大，会使系统出现不稳定。





4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术

4.1.2 数字PID控制器的设计： 1.模拟PID调节器

参数	利	弊
K_p (P)	加快调节速度、提高灵敏度、 减小稳态误差	引起振荡、不稳定
T_i (I)	消除系统稳态误差	诱发系统振荡、延长过渡过程
T_d (D)	加快响应、减少超调量	引起系统的不稳定、易受干扰



4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术

4.1.2 数字PID控制器的设计： 1.模拟PID调节器

参数	利	弊
K_p (P)	加快调节速度、提高灵敏度、减小稳态误差	引起振荡、不稳定
T_i (I)	消除系统稳态误差	诱发系统振荡、延长过渡过程
T_d (D)	加快响应、减少超调量	引起系统的不稳定、易受干扰

1.在PID控制系统中，P的作用主要是（），它一般不单独使用的原因是（）。
答案：快速调节；有差调节，无法消除残差

2.在PID控制系统中，I的作用主要是（），它一般不单独使用的原因是（）。
答案：消除静差；响应缓慢，容易产生积累

3.在PID控制系统中，D的作用主要是（），它一般不单独使用的原因是（）。
答案：超前调节；对高频干扰信号响应剧烈，无法消除不变残差



4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术

4.1.2 数字PID控制器的设计：2.数字PID调节器

模拟PID算法表达式：

$$u(t) = K_P(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t)dt + T_D \frac{de(t)}{dt})$$

数字PID算法表达式： ?

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术

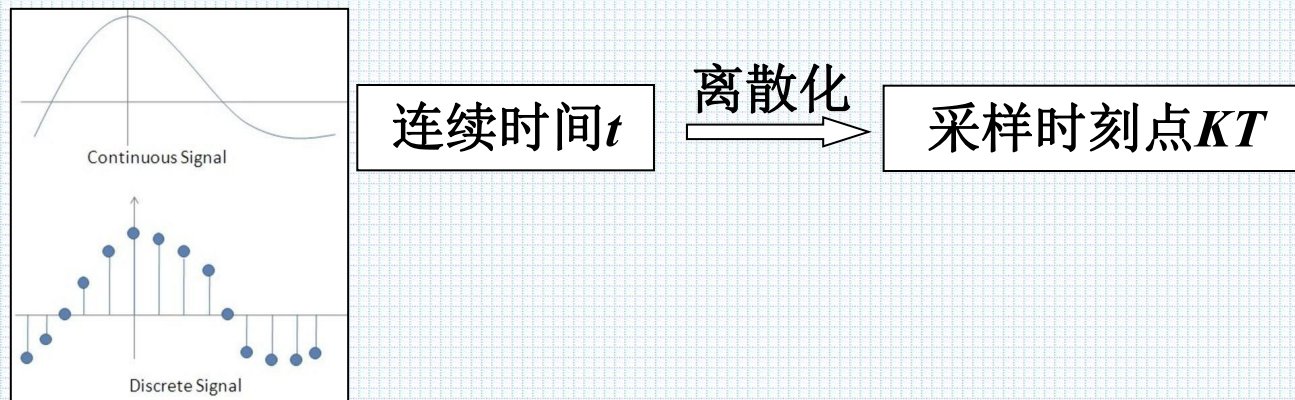
4.1.2 数字PID控制器的设计：2.数字PID调节器

模拟PID算法表达式：

$$u(t) = K_P(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t)dt + T_D \frac{de(t)}{dt})$$

数字PID算法表达式：

- PID控制算法离散化



4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术

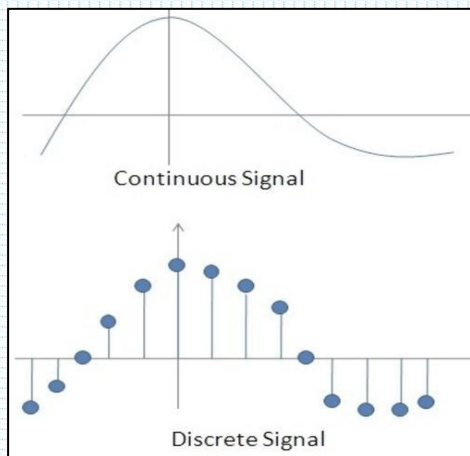
4.1.2 数字PID控制器的设计：2.数字PID调节器

模拟PID算法表达式：

$$u(t) = K_P(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t)dt + T_D \frac{de(t)}{dt})$$

数字PID算法表达式：

- PID控制算法离散化



求和
取代
积分

$$\int_0^t e(t)dt \approx \sum_{i=0}^k T e(i)$$

差分
取代
微分

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(k) - e(k-1)}{T}$$

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.2 数字PID控制器的设计：2.数字PID调节器

模拟PID算法表达式：

$$u(t) = K_P(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t)dt + T_D \frac{de(t)}{dt})$$

数字PID算法表达式：

- PID控制算法离散化

$$u(k) = K_p \{e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)]\}$$

$e(t)$ — 偏差； $u(t)$ — 控制量

K_P — 比例系数； T_I — 积分时间常数； T_D — 微分时间常数

T — 样周期

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.2 数字PID控制器的设计：2.数字PID调节器

(1) 数字PID位置型控制算法

$$u(k) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\}$$

特点：提供阀门开度，所以称为位置型。

缺点：

- (1) 对 $e(k)$ 的累加增大了计算机的存储量和运算的工作量；
- (2) $u(k)$ 的直接输出易造成执行机构的大幅度动作；
- (3) 有些应用场合要求增量式 $u(k)$ 。

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.2 数字PID控制器的设计：2.数字PID调节器

(1) 数字PID位置型控制算法

$$u(k) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\}$$

$$u(k-1) = K_p \left\{ e(k-1) + \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + \frac{T_D}{T} [e(k-1) - e(k-2)] \right\}$$

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.2 数字PID控制器的设计：2.数字PID调节器

(2) 数字PID增量型控制算法

$$u(k) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\}$$

$$u(k-1) = K_p \left\{ e(k-1) + \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + \frac{T_D}{T} [e(k-1) - e(k-2)] \right\}$$

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]$$

↓
比例增益

$$K_I = K_p T / T_I$$

积分系数

$$K_D = K_p T_D / T$$

微分系数

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.2 数字PID控制器的设计：2.数字PID调节器

(2) 数字PID增量型控制算法

$$\Delta u(k) = K_p[e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + K_D[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]$$

$$\Delta u(k) = q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2)$$

$$\begin{cases} q_0 = K_p \left(1 + \frac{T}{T_I} + \frac{T_D}{T}\right) \\ q_1 = -K_p \left(1 + \frac{2T_D}{T}\right) \\ q_2 = K_p \frac{T_D}{T} \end{cases}$$

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



【例题】

已知模拟调节器的传递函数为

$$D(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{1 + 0.17s}{1 + 0.085s}$$

试写出相应数字控制器的位置型和增量型控制算式，设采样周期 $T=0.2s$ 。

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



【例题】

已知模拟调节器的传递函数为

$$D(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{1 + 0.17s}{1 + 0.085s}$$

试写出相应数字控制器的位置型和增量型控制算式，设采样周期 $T=0.2s$ 。

解：

$$U(s) + 0.085sU(s) = E(s) + 0.17sE(s)$$

$$\therefore u(t) + 0.085 \frac{du(t)}{dt} = e(t) + 0.17 \frac{de(t)}{dt}$$

把 $T=0.2s$ 代入得
$$\therefore u(k) + 0.085 \frac{u(k) - u(k-1)}{T} = e(k) + 0.17 \frac{e(k) - e(k-1)}{T}$$

位置型：
$$u(k) = 3.1579e(k) - 2.4561e(k-1) + 0.2982u(k-1)$$

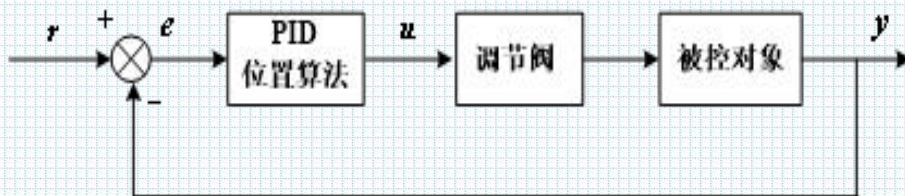
增量型：
$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = 3.1579e(k) - 2.4561e(k-1) - 0.7018u(k-1)$$

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术

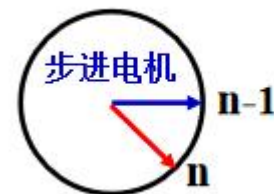
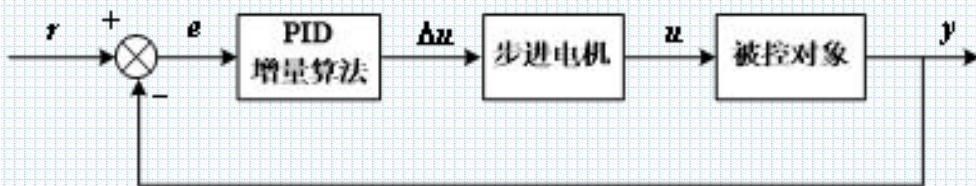


4.1.2 数字PID控制器的设计：3.数字PID控制算法实现比较

(1) 如执行机构采用调节阀，则控制量对应阀门的开度，表征了执行机构的位置，此时控制器应采用数字PID位置式控制算法。



(2) 如执行机构采用步进电机，每个采样周期，控制器输出的控制量，是相对于上次控制量的增加，此时控制器应采用数字PID增量式控制算法。



4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术

4.1.2 数字PID控制器的设计：4.增量式控制算法优点

位置型

$$u(k) = K_P \left[e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^k e(i) + T_D \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \right]$$

增量型

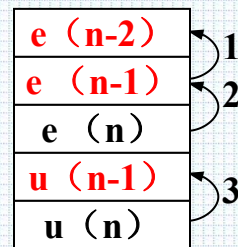
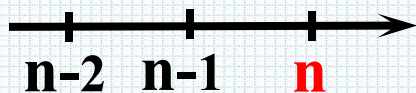
$$u(k-1) = K_P \left[e(k-1) + \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + T_D \frac{e(k-1) - e(k-2)}{T} \right]$$

★历史数据存储：

$e(n-1)$ 、 $e(n-2)$ 和 $u(n-1)$

已在前时刻存于内存存储器

★平移法保存这些历史数据：



保存历史数据

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.2 数字PID控制器的设计：4.增量式控制算法优点

位置型

$$u(k) = K_P \left[e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^k e(i) + T_D \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \right]$$

增量型

$$u(k-1) = K_P \left[e(k-1) + \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + T_D \frac{e(k-1) - e(k-2)}{T} \right]$$

(1) 增量算法不需要做积分累加，计算误差或计算精度对控制量的计算影响较小。而位置算法则不然。

(2) 增量式算法给出的是控制量的增量，对执行机构误动作影响小。而位置算法给出的是控制量的全量，误动作影响大。


(3) 采用增量算法易实现手动到自动的无冲击切换。

- 编程序简单，
- 历史数据可以递推使用，
- 占用存储单元少，
- 运算速度快，
- 切换方便。

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.1 介绍PID控制技术 

4.1.2 数字PID控制器的设计 

4.1.3 数字PID控制器的改进

4.1.4 数字PID控制器的参数整定

总结:

1. (4.1.1) 了解数字 PID 控制技术作用：定义、特点、作用
2. (4.1.2) 掌握数字 PID 控制器连续化设计方法：模拟PID，数字PID，特点及区别。
3. (4.1.3和4.1.4) 掌握数字 PID 控制器改进方法和参数整定方法
4. (4.1.2) 可进行实践应用

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



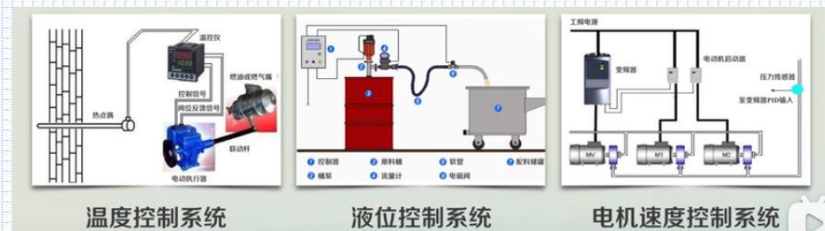
4.1.1 介绍PID控制技术：1.PID技术

※应用范围广泛：

- ◆ 模拟量：流量、压力、温度、速度等；
- ◆ 控制系统：机械式、液动式、气动式、电子式等。

※优点：

- ◆ 原理简单；（P,I,D）
- ◆ 易于实现；（编程简单）
- ◆ 对模型依赖少，鲁棒性强；（不需要数学模型）；
- ◆ 适用面广（化工，冶金，飞行，制药，石油等）；
- ◆



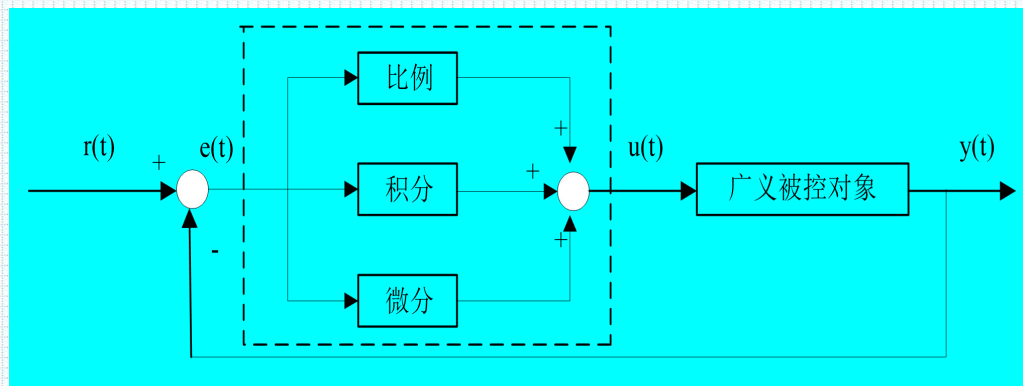
※主导地位：

- ◆ 在DDC、DCS、FCS中，PID控制算法占主导地位；
- ◆ 各类控制软件中均可见到PID控制身影。

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.2 数字PID控制器的设计：1.模拟PID调节器



模拟系统的PID算法表达式：

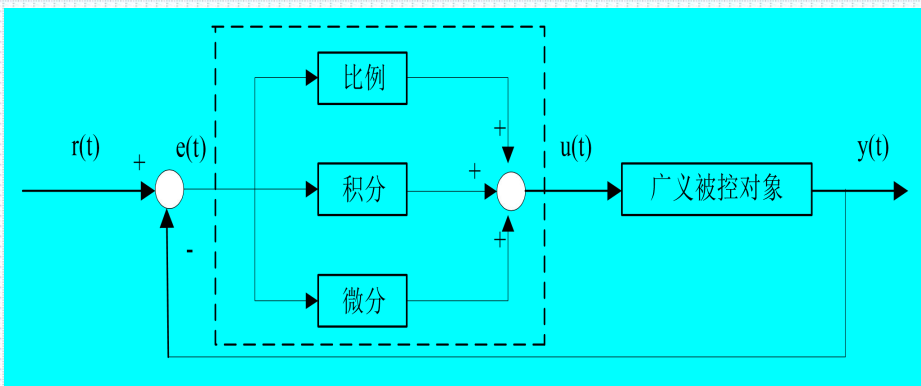
$$u(t) = K_P(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt})$$

式中： $e(t)$ —— 偏差
 $u(t)$ —— 控制量
 K_P —— 比例系数
 T_I —— 积分时间常数
 T_D —— 微分时间常数

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.2 数字PID控制器的设计：1.模拟PID调节器



比例

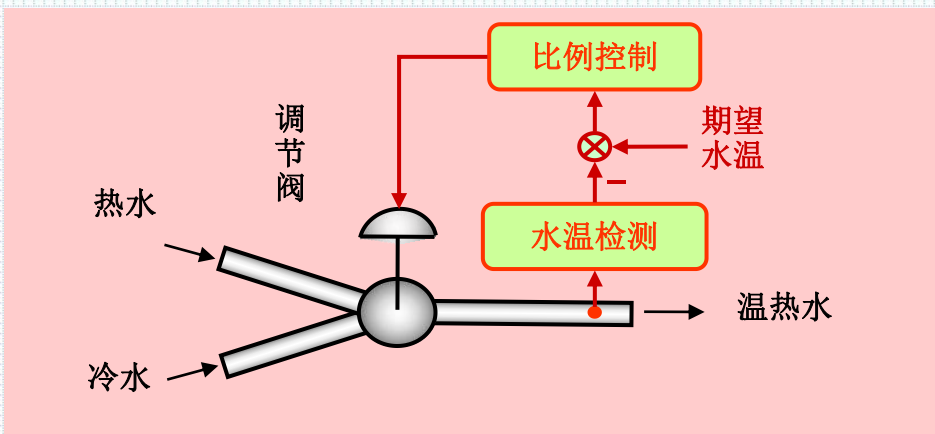
迅速反映偏差。能迅速反映偏差，从而减小偏差，但不能消除静差，比例的加大，会引起系统的不稳定。

积分

消除偏差。只要系统存在偏差，积分环节就会产生控制作用减小偏差，直到最终消除偏差，但积分作用太强会使系统超调加大，甚至使系统出现振荡。

微分

预调节作用。有助于系统减小超调，克服振荡，加快系统的响应速度，减小调节时间，从而改善了系统的动态性能。但微分过大，会使系统出现不稳定。



4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.2 数字PID控制器的设计：2.数字PID调节器

模拟PID算法表达式：

$$u(t) = K_P(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t)dt + T_D \frac{de(t)}{dt})$$

数字PID算法表达式：

- PID控制算法离散化

$$u(k) = K_p \{e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)]\}$$

$e(t)$ — 偏差； $u(t)$ — 控制量

K_P — 比例系数； T_I — 积分时间常数； T_D — 微分时间常数

T — 样周期

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.2 数字PID控制器的设计：4.增量式控制算法优点

位置型

$$u(k) = K_P \left[e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^k e(i) + T_D \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \right]$$

增量型

$$u(k-1) = K_P \left[e(k-1) + \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + T_D \frac{e(k-1) - e(k-2)}{T} \right]$$

(1) 增量算法不需要做积分累加，计算误差或计算精度对控制量的计算影响较小。而位置算法则不然。

(2) 增量式算法给出的是控制量的增量，对执行机构误动作影响小。而位置算法给出的是控制量的全量，误动作影响大。

(3) 采用增量算法易实现手动到自动的无冲击切换。

- 编程序简单，
- 历史数据可以递推使用，
- 占用存储单元少，
- 运算速度快，
- 切换方便。

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



1.在控制系统中，如果执行机构采用调节阀，则控制量对应阀门的开度，表征了执行机构_____的，此时控制器应采用_____。如执行机构采用步进电机，每个采样周期，控制器输出的控制量，是相对于_____，此时控制器应采用_____。

答案：

2.数字PID控制器有三种常用形式，分别是_____、_____。

答案：

3.位置式控制算法提供执行机构的位置 $u(k)$ ，需要用到_____，一般用于以_____或_____作执行器件的控制系统中。

答案：

4.增量式控制算法提供执行机构的增量 $\Delta u(k)$ ，只需要保持_____即可，一般用在_____作执行机构的控制系统中。

答案：

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



1.在控制系统中，如果执行机构采用调节阀，则控制量对应阀门的开度，表征了执行机构_____的，此时控制器应采用_____。如执行机构采用步进电机，每个采样周期，控制器输出的控制量，是相对于_____，此时控制器应采用_____。

答案：位置、数字PID位置式控制算法、上次控制量的增加、数字PID增量式控制算法

2.数字PID控制器有L种常用形式，分别是_____、_____。

答案：位置式、增量式

3.位置式控制算法提供执行机构的位置 $u(k)$ ，需要用到_____，一般用于以_____或_____作执行器件的控制系统中。

答案：过去的累计误差；可控硅、伺服电机

4.增量式控制算法提供执行机构的增量 $\Delta u(k)$ ，只需要保持_____即可，一般用在_____作执行机构的控制系统中。

答案：现时及以前2个时刻的偏差值；步进电机

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.3 数字PID控制器的改进

1. 积分项的改进

- ① 积分分离
- ② 抗积分饱和
- ③ 梯形积分
- ④ 消除积分不灵敏区

2. 微分项的改进

- ① 不完全微分
- ② 微分先行

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



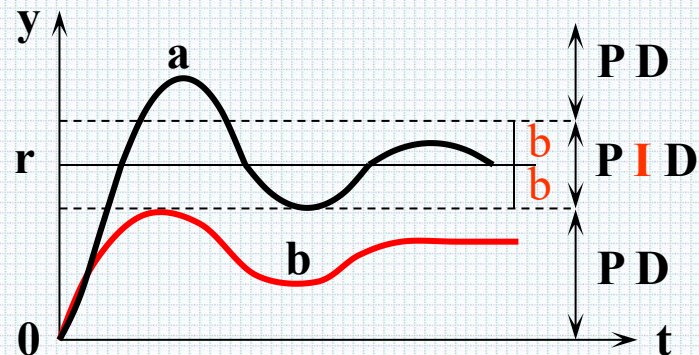
4.1.3 数字PID控制器的改进: 1.积分项改进

① 积分分离

◆ 当 $|e(n)| > \beta$ 时 — 用PD控制
控制偏差较大时，取消积分作用，以减小超调；

◆ 当 $|e(n)| \leq \beta$ 时 — 用PID控制

控制偏差较小时，再恢复积分作用，以消除余差。



4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术

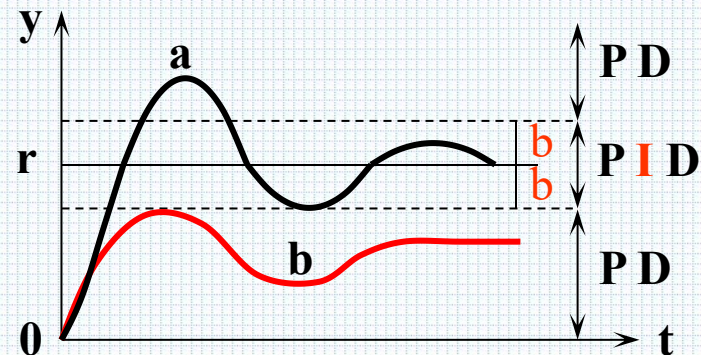
4.1.3 数字PID控制器的改进: 1.积分项改进

① 积分分离

◆ 当 $|e(n)| > \beta$ 时 — 用PD控制
控制偏差较大时，取消积分作用，以减小超调；

◆ 当 $|e(n)| \leq \beta$ 时 — 用PID控制

控制偏差较小时，再恢复积分作用，以消除余差。



实现方法： 编程序时从PID方程式中**分离出积分项**。

$$u(k) = K_p \{ e(k) + \beta \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \} \quad \beta = \begin{cases} 1 & |e(k)| \leq \varepsilon \\ 0 & |e(k)| > \varepsilon \end{cases}$$

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.3 数字PID控制器的改进: 1.积分项改进

② 抗积分饱和

定义：如果执行机构已到极限位置，仍然不能消除偏差时，由于积分作用，尽管 $u(n)$ 继续增大或减小，而执行机构已无相应的动作，这就称为**积分饱和**。

$u(n) \rightarrow D/A \rightarrow 4\sim 20\text{mA} \rightarrow \text{执行机构(如调节阀)}$

$u(n)$ 超出D/A所能表示的数值范围：

◆对控制量 $u(n)$ 限幅

◆若以12位D/A为例，则

●当 $u(n) < 0$ 时，则取 $u(n) = 0$ ；

●当 $u(n) > \text{FFFH}$ 时，则取 $u(n) = \text{FFFH}$ 。

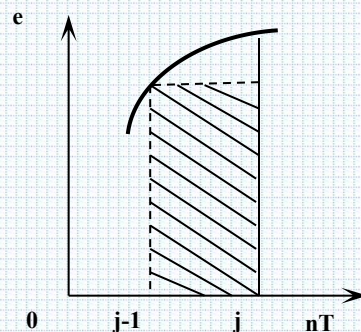
4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术

4.1.3 数字PID控制器的改进: 1.积分项改进

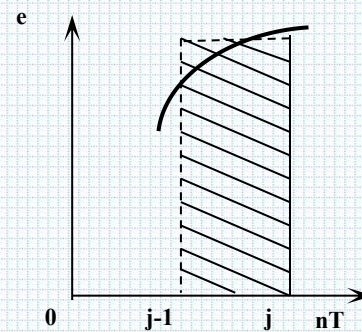
③ 梯形积分

※积分项的作用是消除残差,

为了提高积分项的运算精度,
将矩形积分改为梯形积分。



(a) 矩形积分



(b) 梯形积分

$$\int_0^t e(t) dt = \sum_{j=0}^n \frac{e(j) + e(j-1)}{2} \cdot T$$

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术

4.1.3 数字PID控制器的改进: 1.积分项改进

④ 消除积分不灵敏区

※ 积分作用
$$\Delta u_i(n) = K_p \frac{T}{T_i} e(n)$$

※ 由于计算机字长的限制，
当 $\Delta u_i(n)$ 小于字长所能表示数的精度，
则计算机就作为“0”将此数丢掉。

◆ 例如，温度量程为0~1275°C，A/D转换为8位
 $K_p=1$ ， $T_i=10s$ ， $T=1s$ ， $e(n)=50^\circ\text{C}$

$$\Delta u_i(n) = K_p \frac{T}{T_i} e(n) = \frac{1}{10} \left(\frac{255}{1275} \times 50 \right) = 1$$

- 如果偏差 $e(n)<50^\circ\text{C}$ ，则 $\Delta u_i(n)<1$
- 将 $\Delta u_i(n)$ 作为“0”丢掉

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.3 数字PID控制器的改进: 2.微分项改进

① 不完全微分算法

在普通PID算法中加入一个一阶惯性环节（低通滤波 $G(s) = 1/(1 + T_f s)$ ），以获得比较柔和的微分控制。

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.3 数字PID控制器的改进: 2.微分项改进

② 微分先行

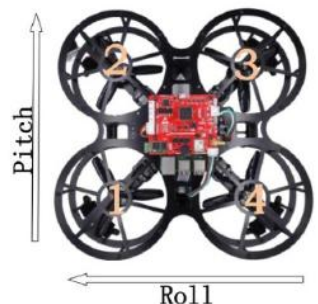
只对测量值 $y(t)$ 微分，而不对偏差 $e(t)$ 微分，也即对给定值 $r(t)$ 无微分作用。

这样在调整设定值时，控制器的输出就不会产生剧烈的跳变，也就避免了给定值升降给系统造成的冲击。

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.4 数字PID控制器的参数整定



位置控制

姿态控制

自身中心偏移、自身气流干扰
外界气流干扰、多变量、非线性、强耦合、欠驱动系统、传感器精度低、误差积累

无人机人工智能发展研究院成立 - 先进制造 - 中国新闻网 -

1天前 由工业和信息化部工业文化发展中心与航拍网共建及行业组织支持的无人机人工智能发展研究院日前在京成立。工信部工业文化发展中心主任罗民表示,无人机...

www.chinahightech.com/html/cha... 百度快照

中国无人机发展的最新相关信息

2000余架最新无人机下月来深展示,还有无人机足球比赛! 深圳新闻网 昨天17:52
其中,深圳1200余家,产值500亿元,消费级无人机占全球74%的市场份额,工业级无人机占全球5%的市场份额。全年无人机出口180亿元,以消费无人机、植保无人机、行业无人机...

两千多台无人系统装备新产品亮相 深圳国际无人... 腾讯 昨天20:29

重磅出击!中国尖端无人机被证实,海陆空通吃性能... 网易 昨天10:28

无人机人工智能发展研究院在京成立 中国经济新闻网 前天17:18

不止大疆 新型无人机母机比美早、专家指出中大... 腾讯新闻 前天12:05

中国无人机 - 百度百科



中国无人机是由中国自主研发的多款无人机。2010届航展上,由中国自主研发的多款无人机亮相,据现场统计,本次参展的军用或民用无人机近30款。除部分散展在一号馆各个展台外,由中国航天科技工业集团(以下简称“航天科工”)系统展出的10余种无人机受到了重点...

重要性 珠海航展 长空一号 长虹1 ASN-206 发展前景 更多 >

baike.baidu.com/

其他人还在搜

中国三大无人机公司 中国无人机中东战绩 中国无人机出口阿塞拜疆

中国大型无人机 中国攻击无人机数量 无人机的发展简史 印度网友评论中国无人机

中国无人机发展“前景喜人” 市场规模2023年有望达968亿元

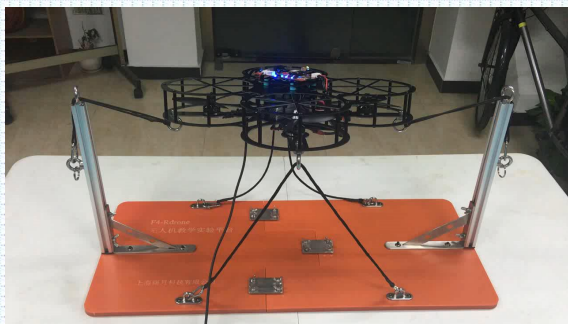
2020年9月16日 对于中国无人机行业发展现状,中国工程院院士刘大响在演讲中表示,中国无人机发展“前景喜人”。“到2023年市场规模有望达到968亿元,军用无人机约为350...

新浪财经 百度快照

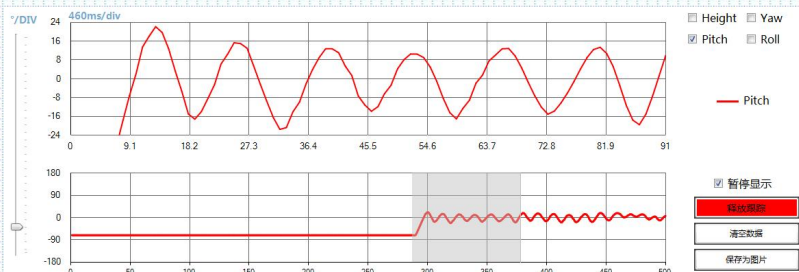
4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



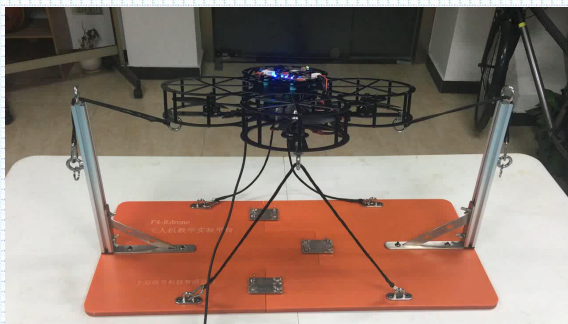
01



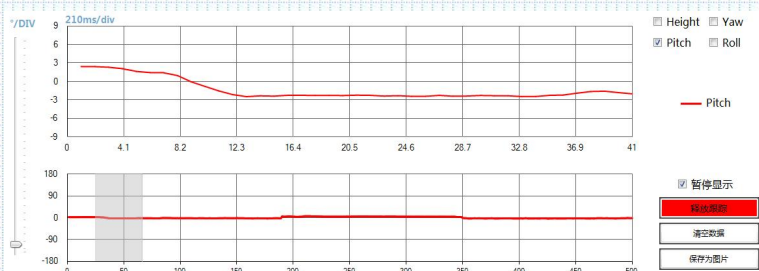
比例调节，引起等幅震荡。



02



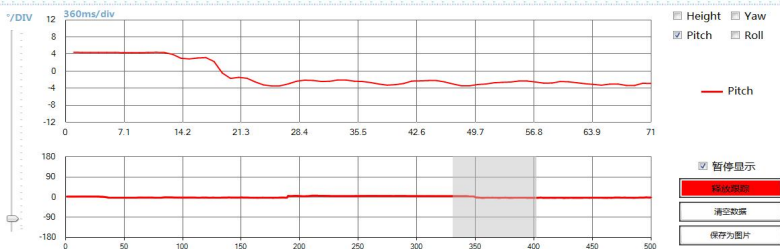
加入一些微分，反向抑制震荡，但存在静差



03

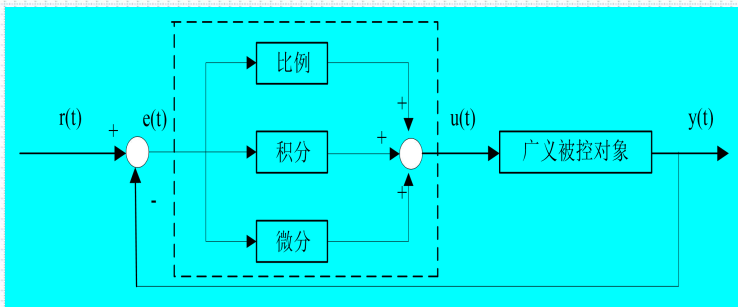


加入一些积分项，使静差减小，在 -1° 至 1° 间



4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术

4.1.4 数字PID控制器的参数整定



$$u(k) = K_p \{ e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \}$$

定义： 根据被控过程的特性确定PID控制器的参数，以使系统全面满足各项控制指标，这一过程叫做数字PID控制器的参数整定。

整定的参数： T 、 K_p 、 T_I 、 T_D 。

方法： 扩充临界比例度法、扩充响应曲线法、归一参数整定法、凑试法。

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.4 数字PID控制器的参数整定：1.扩充临界比例度法

方法如下：

Step1: 选择一个足够短的采样周期。

（具体地说就是选择采样周期为被控对象纯滞后时间的十分之一以下）

Step2: 用选定的采样周期使系统工作，且此时控制器只保留比例作用。

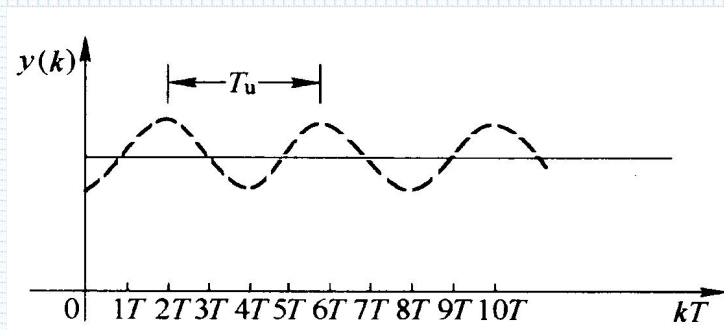
Step3: 在阶跃信号输入下，逐渐加大比例系数 K_p ，

使控制系统出现临界振荡状态。

记下此时比例系数 K_p 为临界比例系数 K_r ，

得到临界比例度为 $\delta = 1/K_p$ ，

并观察临界振荡周期 T_u 。



Step4: 选择控制度和控制规律。

Step5: 根据控制度，查表并计算出相应参数值。

Step6: 按照求得的整定参数，投入系统运行，观察控制效果，再适当调整参数，直到获得满意的控制效果为止



4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术

4.1.4 数字PID控制器的参数整定：1.扩充临界比例度法

方法如下：

Step1:

(具体

Step2:

作用,

Step3:

使控制

记下此

得到临

matlab即可实现具体操作

K_p

Step4

Step5

Step6

直

查表并计算

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



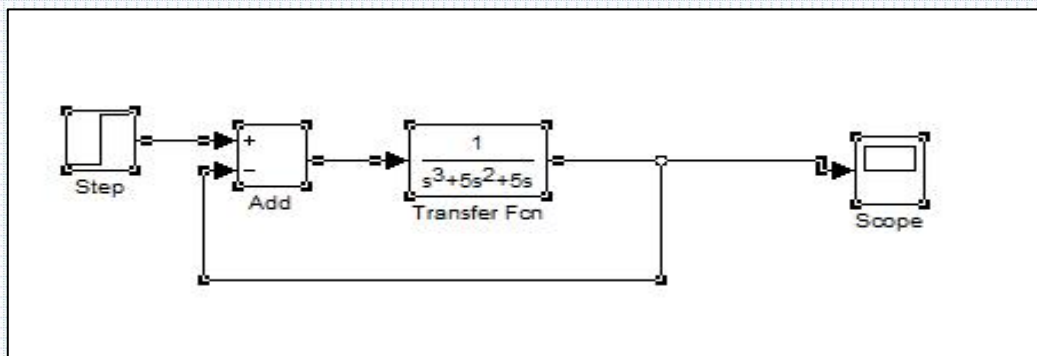
4.1.4 数字PID控制器的参数整定：1.扩充临界比例度法

【例题1：仿真案例】

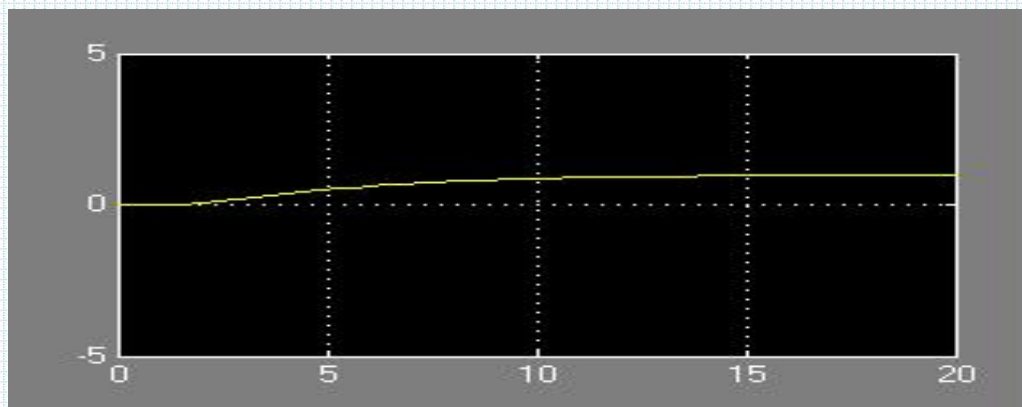
Step1: 采样周期

$$G(s) = \frac{1}{s^3 + 5s^2 + 5s}$$

被控对象
传递函数



系统Simulink模型



系统单位阶跃
响应曲线

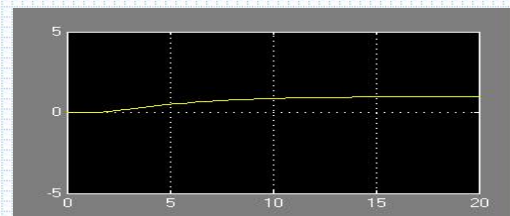
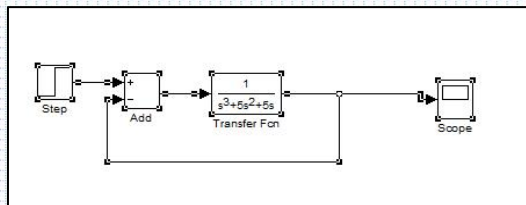
4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



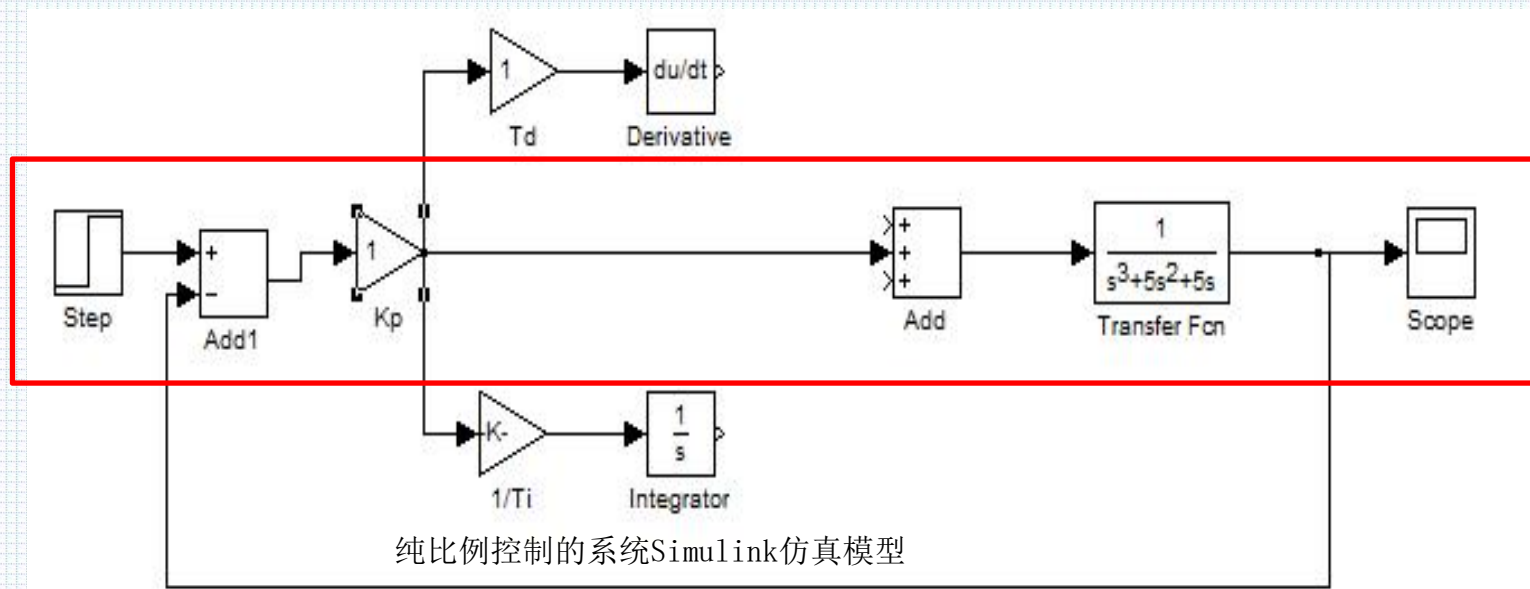
4.1.4 数字PID控制器的参数整定：1.扩充临界比例度法

【例题1：仿真案例】

Step1:
$$G(s) = \frac{1}{s^3 + 5s^2 + 5s}$$



Step2: 比例控制



纯比例控制的系统Simulink仿真模型

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术

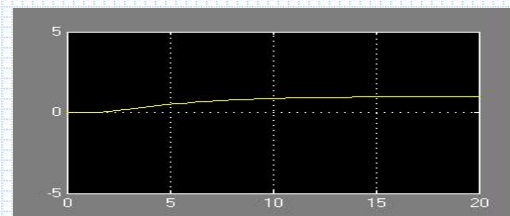
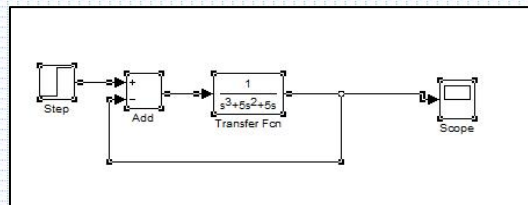


4.1.4 数字PID控制器的参数整定：1.扩充临界比例度法

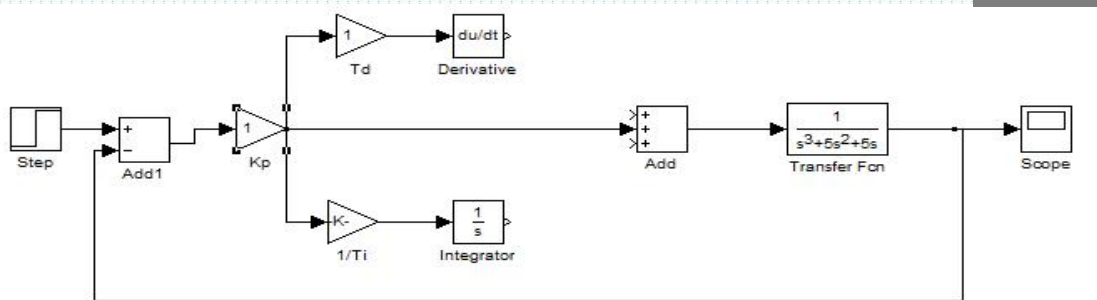
【例题1：仿真案例】

Step1:

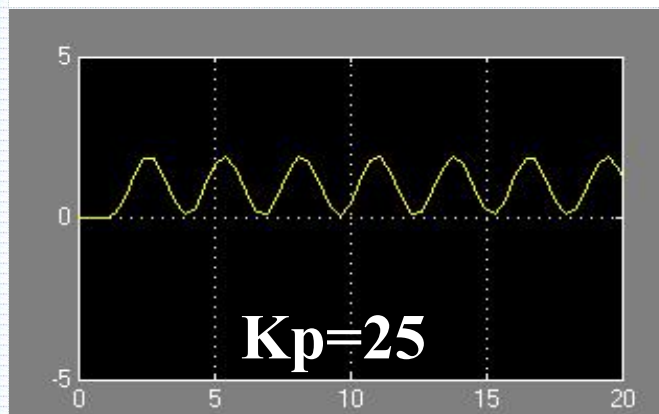
$$G(s) = \frac{1}{s^3 + 5s^2 + 5s}$$



Step2:



Step3:



临界比例度: $\delta = \frac{1}{K_r} = \frac{1}{25}$

临界振荡周期: $T_u = 2.7$



4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术

4.1.4 数字PID控制器的参数整定：1.扩充临界比例度法

【例题1：仿真案例】

Step4: 选择控制度和控制规律，如1.05和PID。

Step5: 根据控制度，查表并计算出相应参数值。

Step6: 按照求得的整定参数，投入系统运行，观察控制效果，再适当调整参数，直到获得满意的控制效果为止

控制度	控制规律	T	Kp	Ti	Td
1.05	PI	0.03Tu	0.53δ	0.88Tu	--
	PID	0.014Tu	0.63δ	0.49Tu	0.14Tu
1.2	PI	0.05Tu	0.49δ	0.91Tu	--
	PID	0.043Tu	0.47δ	0.47Tu	0.16Tu
1.5	PI	0.14Tu	0.42δ	0.99Tu	--
	PID	0.09Tu	0.34δ	0.43Tu	0.20Tu
2.0	PI	0.22Tu	0.36δ	1.05Tu	--
	PID	0.16Tu	0.27δ	0.4Tu	0.22Tu

临界比例度：

$$\delta = \frac{1}{K_r} = \frac{1}{25}$$

临界振荡周期：

$$Tu=2.7$$

解：

$$T=?$$

$$Kp=?$$

$$Ti=?$$

$$Td=?$$

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.4 数字PID控制器的参数整定：2.扩充响应曲线法

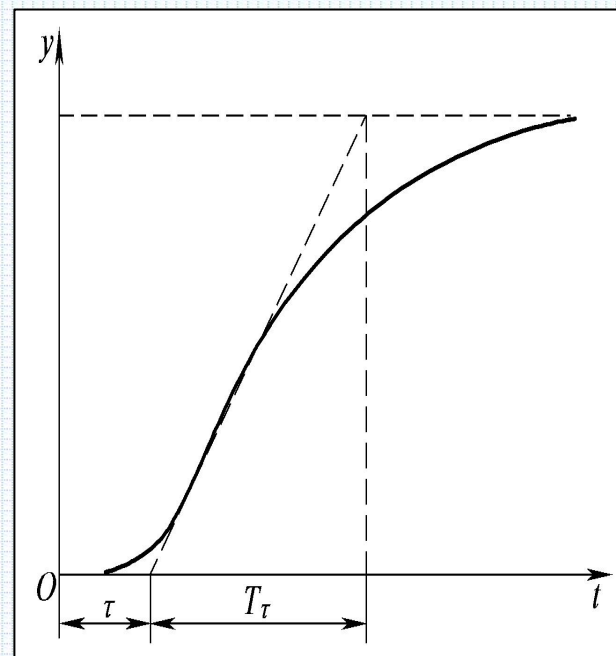
方法如下：

Step1: 断开数字调节器，使系统在手动状态下工作。当系统在给定值处达到平衡以后，给一阶跃输入。

Step2: 用仪表记录下被调参数在此阶跃作用下的变化过程曲线。

Step3: 在曲线最大斜率处，求得**滞后时间** T_p 、**被控对象时间常数** τ ，以及它们的**比值** T_p/τ 。

Step4: 根据所得求 T_p τ T_p/τ 的值，查表，即可求出控制器的参数值。





4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术

4.1.4 数字PID控制器的参数整定：2.扩充响应曲线法

方法如下：

Step1:

工作。
阶跃输入

Step2:

的变化

Step3:

被控对象

Step4:

求出控制

查表并计算





4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术

4.1.4 数字PID控制器的参数整定：2.扩充响应曲线法

【例题2】已知 $T_p=180$ 、 $\tau=30$ ，采用PID控制结构，计算控制器输出。

	T	K_p	T_i	T_d
PID	$\tau/3$	$1.2 * T_p / \tau$	2τ	0.5τ



4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术

4.1.4 数字PID控制器的参数整定：2.扩充响应曲线法

【例题2】已知 $T_p=180$ 、 $\tau=30$ ，采用PID控制结构，计算控制器输出。

	T	K_p	T_i	T_d
PID	$\tau/3$	$1.2 * T_p / \tau$	2τ	0.5τ

控制器输出值计算如下：

$$u(k) = u(k-1) + K_P [e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]$$

$$K_I = K_p \times T / T_i ; \quad K_D = K_p \times T_d / T$$

根据表计算得到：

$$T = \tau / 3 = ? ; \quad K_p = 1.2 * T_p / \tau = ? ; \quad T_i = 2\tau = ? ; \quad T_d = 0.5\tau = ?$$

$$K_I = K_p \times T / T_i = ? ; \quad K_D = K_p \times T_d / T = ?$$

因此： $u(k) = ?$



4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术

4.1.4 数字PID控制器的参数整定：2.扩充响应曲线法

【例题2】已知 $T_p=180$ 、 $\tau=30$ ，采用PID控制结构，计算控制器输出。

	T	K_p	T_i	T_d
PID	$\tau/3$	$1.2 * T_p / \tau$	2τ	0.5τ

控制器输出值计算如下：

$$u(k) = u(k-1) + K_P[e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + K_D[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]$$

$$K_I = K_p \times T / T_i ; \quad K_D = K_p \times T_d / T$$

根据表计算得到：

$$T = \tau / 3 = 10 ; \quad K_p = 1.2 * T_p / \tau = 7.2 ; \quad T_i = 2\tau = 60 ; \quad T_d = 0.5\tau = 15$$

$$K_I = K_p \times T / T_i = 7.2 \times 10 / 60 = 1.2 ; \quad K_D = K_p \times T_d / T = 7.2 \times 15 / 10 = 10.8$$

因此： $u(k) = u(k-1) + 7.2[e(k) - e(k-1)] + 1.2e(k) + 10.8[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]$
=?



4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术

4.1.4 数字PID控制器的参数整定：2.扩充响应曲线法

【例题2】 已知 $T_p=180$ 、 $\tau=30$ ，采用PID控制结构，计算控制器输出。

	T	K_p	T_i	T_d
PID	$\tau/3$	$1.2 * T_p / \tau$	2τ	0.5τ

控制器输出值计算如下：

$$u(k) = u(k-1) + K_P[e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + K_D[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]$$

$$K_I = K_p \times T / T_i ; \quad K_D = K_p \times T_d / T$$

根据表计算得到：

$$T = \tau / 3 = 10 ; \quad K_p = 1.2 * T_p / \tau = 7.2 ; \quad T_i = 2\tau = 60 ; \quad T_d = 0.5\tau = 15$$

$$K_I = K_p \times T / T_i = 7.2 \times 10 / 60 = 1.2 ; \quad K_D = K_p \times T_d / T = 7.2 \times 15 / 10 = 10.8$$

因此：

$$u(k) = u(k-1) + 7.2[e(k) - e(k-1)] + 1.2e(k) + 10.8[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]$$
$$= u(k-1) + 9.2e(k) - 28.8e(k-1) + 10.8e(k-2)$$



4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术

4.1.4 数字PID控制器的参数整定：3.归一参数整定法

方法如下：

$$\Delta u(k) = K_P \left\{ e(k) - e(k-1) + \frac{T}{T_I} e(k) + \frac{T_D}{T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right\}$$

Step1: 令 $T=0.1T_k$; $T_I=0.5T_k$; $T_D=0.125T_k$ 。

式中 T_k 为纯比例作用下的临界振荡周期。

(参照扩充临界比例度法)

则: $\Delta u(k) = K_P * (2.45e(k) - 3.5e(k-1) + 1.25e(k-2))$

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.4 数字PID控制器的参数整定：3.归一参数整定法

方法如下：

$$\Delta u(k) = K_P \left\{ e(k) - e(k-1) + \frac{T}{T_I} e(k) + \frac{T_D}{T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right\}$$

Step1: 令 $T=0.1T_k$; $T_I=0.5T_k$; $T_D=0.125T_k$ 。

式中 T_k 为纯比例作用下的临界振荡周期。

(参照扩充临界比例度法)

则: $\Delta u(k) = \underline{K_P} * (2.45e(k) - 3.5e(k-1) + 1.25e(k-2))$

Step2: 改变 K_P , 观察控制效果, 直到满意为止。

4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.4 数字PID控制器的参数整定：4.试凑法

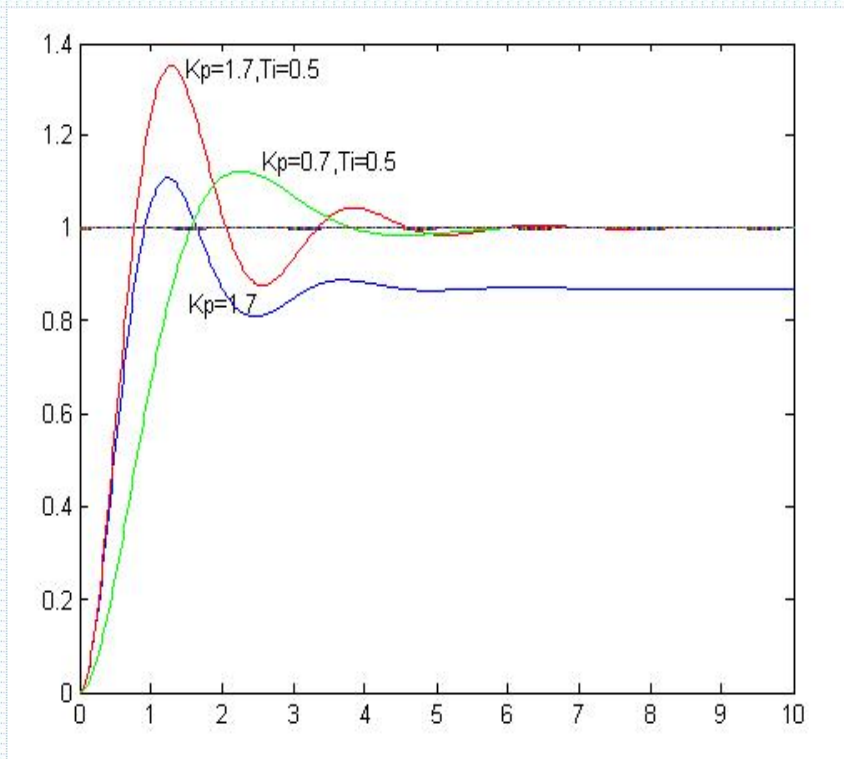
参数整定找最佳，从小到大顺序查，
先是比例后积分，最后再把微分加；

曲线振荡很频繁，比例值儿来减小，
曲线漂浮绕大湾，比例值儿来增大；

曲线偏离回复慢，积分时间往下降，
曲线波动周期长，积分时间再加长；

曲线振荡频率快，先把微分降下来，
动差大来波动慢，微分时间应加长；

理想曲线两个波，前高后低4比1，
一看二调多分析，调节质量不会低。



4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术



4.1.4 数字PID控制器的参数整定：4.试凑法

参数整定找最佳，从小到大顺序查，
先是比例后积分，最后再把微分加；

曲线振荡很频繁，比例值儿来减小，
曲线漂浮绕大湾，比例值儿来增大；

曲线偏离回复慢，积分时间往下降，
曲线波动周期长，积分时间再加长；

曲线振荡频率快，先把微分降下来，
动差大来波动慢，微分时间应加长；

理想曲线两个波，前高后低4比1，
一看二调多分析，调节质量不会低。

【例题3:仿真案例】

K_P	K_I	K_D
1	0	0
0.1	0	0
0.3	0	0
0.3	0.8	0
0.3	0.7	0
0.3	0.7	0.2

注意：一定仔细且有耐心的进行分析调节，养成良好科学素养



4.1 数字 PID 控制器的连续化设计技术

4.1.4 数字PID控制器的参数整定：总结

定义：根据被控过程的特性确定PID控制器的参数，以使系统全面满足各项控制指标，这一过程叫做数字PID控制器的参数整定。

整定的参数： T 、 K_P 、 T_I 、 T_D 。

方法： 扩充临界比例度法
扩充响应曲线法
归一参数整定法
凑试法

具体实现方法

例题1： 扩充临界比例度法

例题2： 扩充响应曲线法

课后作业： 1.将本课程学习的临界比例度法进行实践练习。
2.根据不同的传递函数，用试凑法进行参数整定。

第4章 常规及复杂控制技术



总体介绍

第一节

4.1 数字PID控制器的连续化设计技术

第二节

4.2 串级控制技术

第三节

4.3 前馈-反馈控制技术

实验

数字PID控制技术实验

学习要求

第4章 常规及复杂控制技术



总体介绍

第一节

第二节

第三节

实验

学习要求

4.1 数字PID控制器的连续化设计技术

1. (4.1.1) 了解数字 PID 控制技术作用：
定义、特点及作用。
2. (4.1.2) 掌握数字 PID 控制器连续化设计方法：
模拟PID、数字PID，特点及区别。
3. (4.1.3和4.1.4) 掌握数字PID控制器改进方法和参数整定方法。
积分改进方法、微分改进方法；
扩充临界比例度法、扩充响应曲线法、归一法、试凑法

第4章 常规及复杂控制技术



总体介绍

第一节

4.1 数字PID控制器的连续化设计技术

第二节

4.2 串级控制技术

第三节

4.3 前馈-反馈控制技术

实验

数字PID控制技术实验

学习要求

4.2 串级控制技术



主要内容：

4.2.1 串级控制技术介绍

4.2.2 串级控制结构

4.2.3 串级控制系统工作过程

学习要求：

1. (4.2.1) 了解串级控制作用和应用
2. (4.2.2) 掌握串级控制结构和原理
3. (4.2.3) 掌握串级控制调节过程

4.2 串级控制技术



4.2.1 串级控制技术介绍

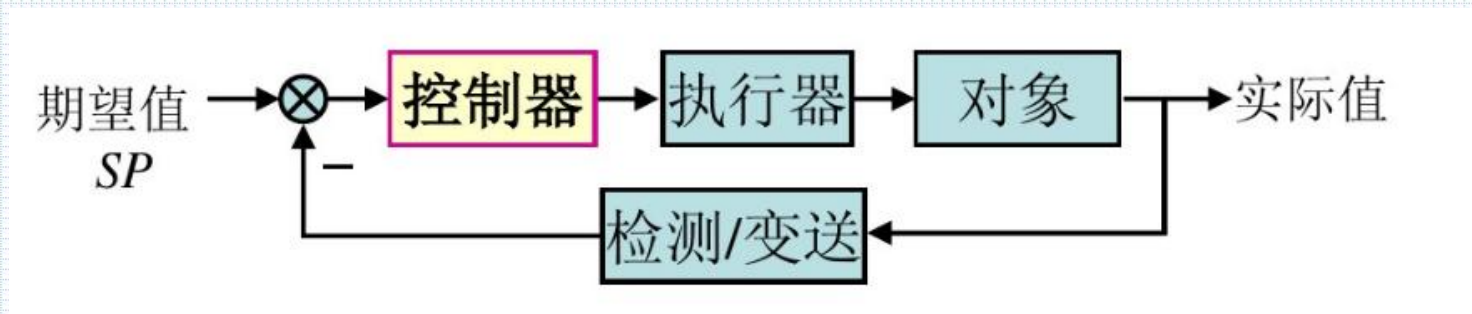
- 单回路系统是过程控制最基本，结构最简单，应用最广泛的一种结构形式。
 - 请画出PID控制器结构（）

4.2 串级控制技术



4.2.1 串级控制技术介绍

- 单回路系统是过程控制最基本，结构最简单，应用最广泛的一种结构形式。



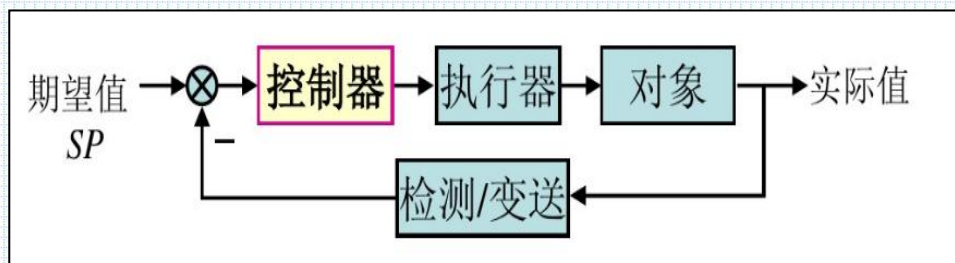
- 对于更复杂的对象或工艺要求更高的场合，单回路不能满足要求。
 - 1. 对象时间常数或迟延时间很长；
 - 2. 被控对象存在强烈的非线性或时变特性时；
 - 3. 受扰动影响很大，用单回路难以得到理想特性；
 - 4. 工艺有更高的控制要求时，比如精度，快速性等。

4.2 串级控制技术



4.2.1 串级控制技术介绍

- **定义：**串级控制系统是由其结构上的特征而得名的。它是由主、副两个控制器串接工作的。



4.2 串级控制技术

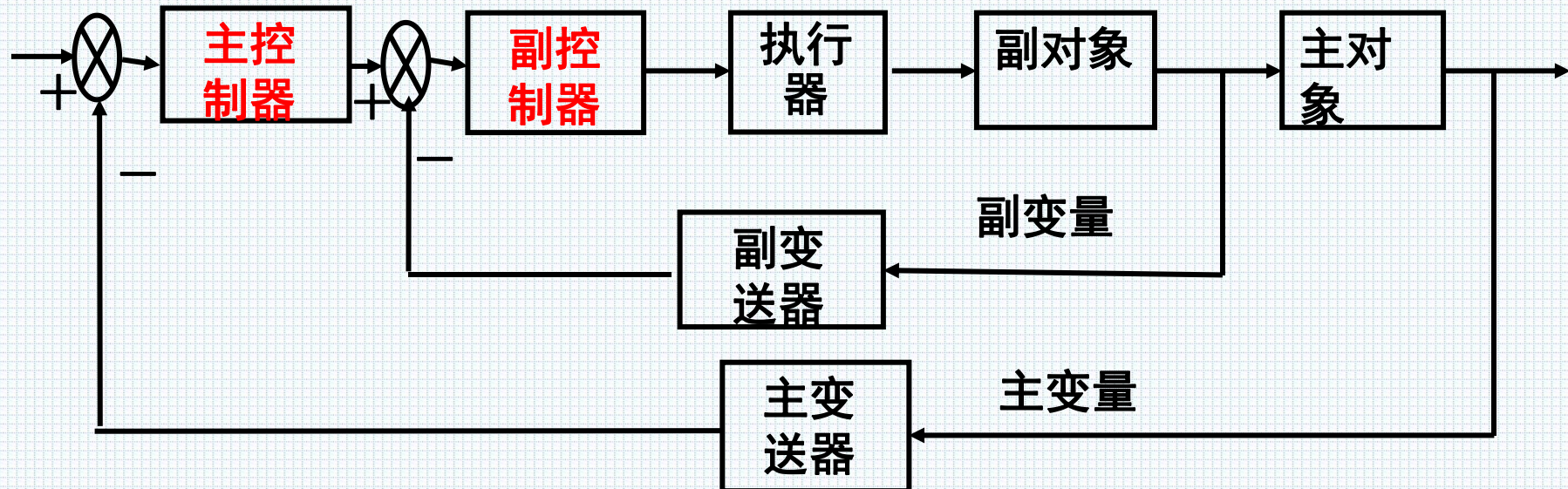


4.2.1 串级控制技术介绍

- **定义：**串级控制系统是由其结构上的特征而得名的。

它是由主、副两个控制器串接工作的。

给定

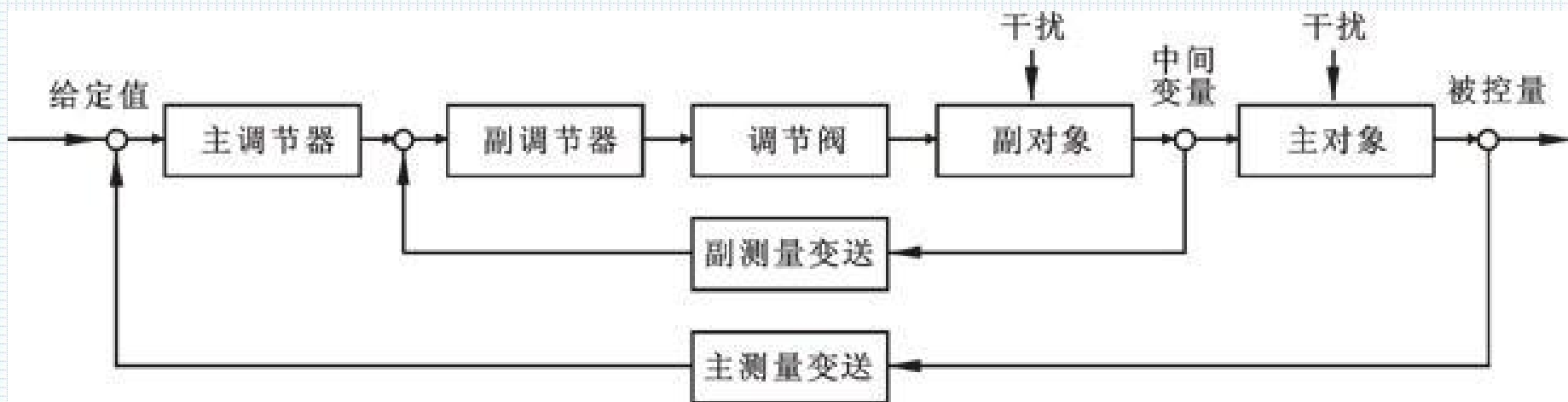


4.2 串级控制技术



4.2.1 串级控制技术介绍

- **定义：**串级控制系统是由其结构上的特征而得名的。它是由主、副两个控制器串接工作的。



串级控制系统方框图

主控制器的输出作为副控制器的给定值，
副控制器的输出去操纵控制阀，以实现对变量的定值控制。

4.2 串级控制技术



4.2.1 串级控制技术介绍

- **定义：**串级控制系统是由其结构上的特征而得名的。
它是由主、副两个控制器串接工作的。



串级控制系统方框图

4.2.1 串级控制技术介绍

- ◆ **目的**：用于改善被控对象特性或克服扰动对系统影响。
- ◆ **应用**：一种广泛应用的有效改善和提高控制品质的复杂控制系统方案。
 - (1) 用于容量滞后较大的过程对象；
温度、质量等容量滞后较大且控制质量要求较高的系统；
 - (2) 应用于纯时延较大的系统；
 - (3) 应用于扰动变化激烈而且幅度大的过程：
精馏塔温度与蒸汽流量控制关系；
 - (4) 用于非线性过程：合成反应炉。

4.2 串级控制技术



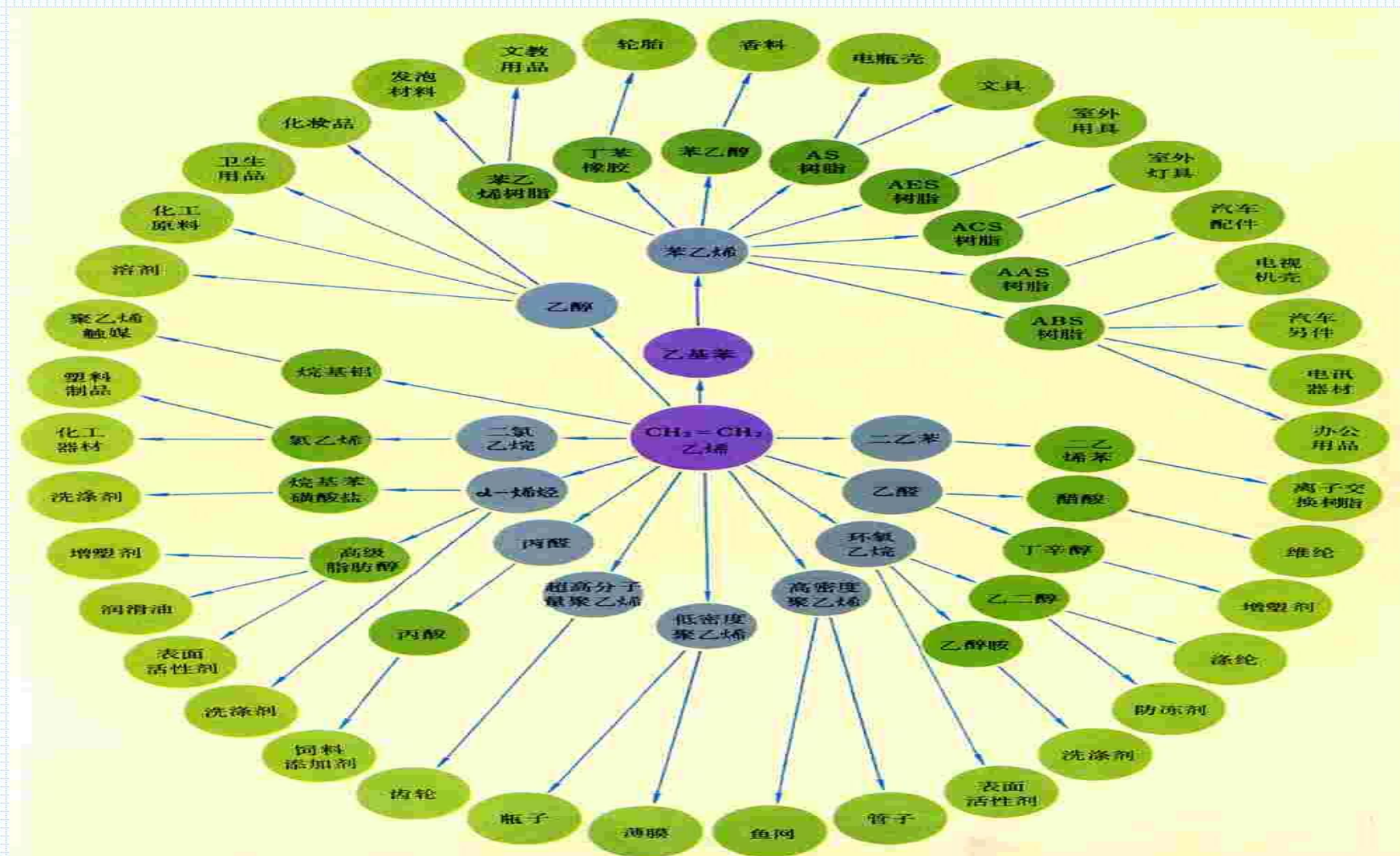
4.2.1 串级控制技术介绍

- ◆ **乙烯**：化学式为 C_2H_4 。
- ◆ **应用**：合成纤维、合成橡胶、合成塑料（聚乙烯及聚氯乙烯）、合成乙醇（酒精）的基本化工原料，也用于制造氯乙烯、苯乙烯、环氧乙烷、醋酸、乙醛、乙醇和炸药等应用。
- ◆ **乙烯工业**：是世界上产量最大的化学产品之一，乙烯工业是石油化工产业的核心，乙烯产品占石化产品的75%以上，在国民经济中占有重要的地位。世界上已将乙烯产量作为衡量一个国家石油化工发展水平的重要标志之一。

4.2 串级控制技术



4.2.1 串级控制技术介绍



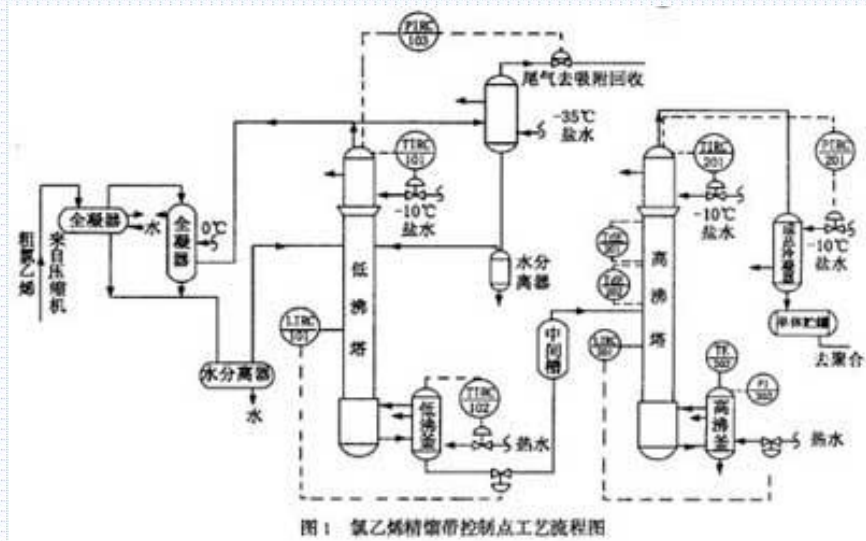
4.2 串级控制技术



4.2.1 串级控制技术介绍

◆ 以乙烯生产厂为例，它共有421个控制回路

其中：常规PID单回路占75%，多回路系统占25%(以串级为主)



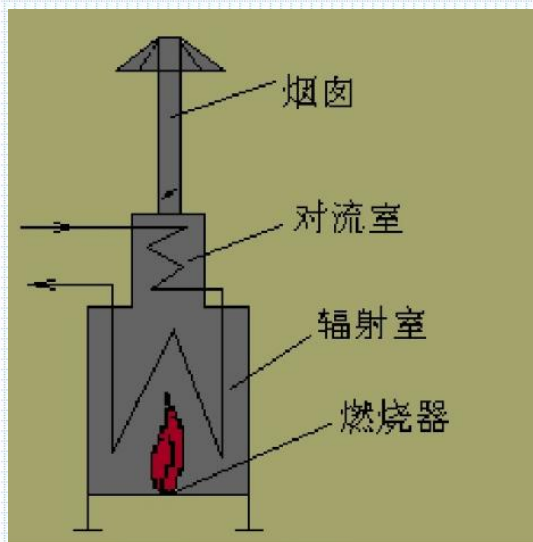
4.2 串级控制技术



4.2.2 串级控制的结构原理

1. 加热炉出口温度单回路控制

例：管式加热炉是炼油、化工生产中的重要装置之一，它的任务是把原油加热到一定温度，以保证下道工艺的顺利进行。因此，需要控制原油加热后的出口温度。



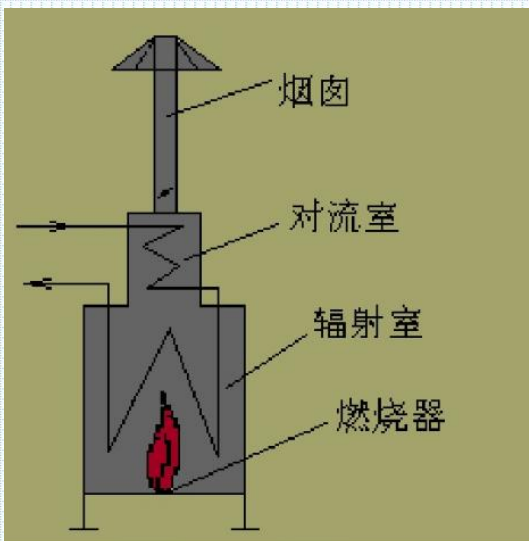
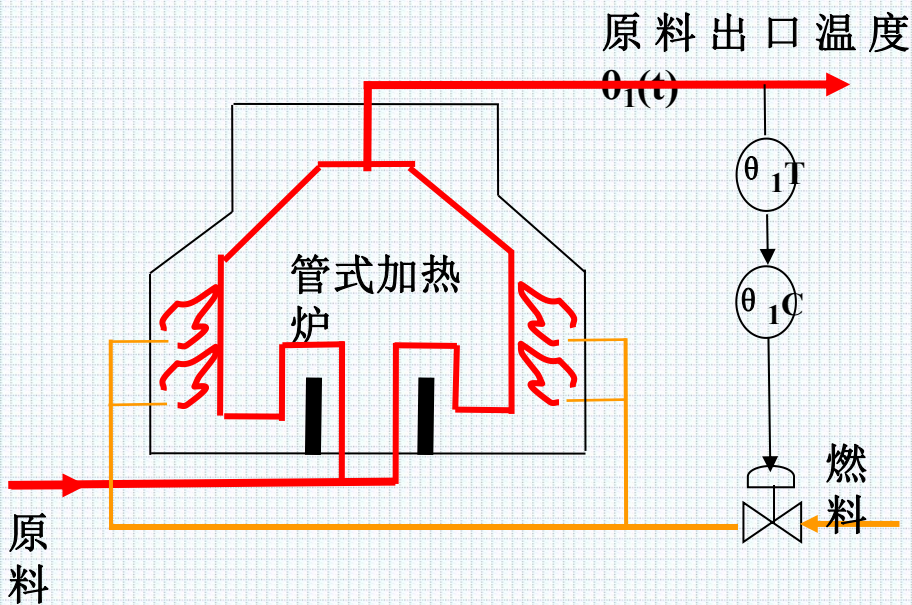
4.2 串级控制技术



4.2.2 串级控制结构

1. 加热炉出口温度单回路控制

例：管式加热炉是炼油、化工生产中的重要装置之一，它的任务是把原油加热到一定温度，以保证下道工艺的顺利进行。因此，需要控制原油加热后的出口温度。



4.2 串级控制技术

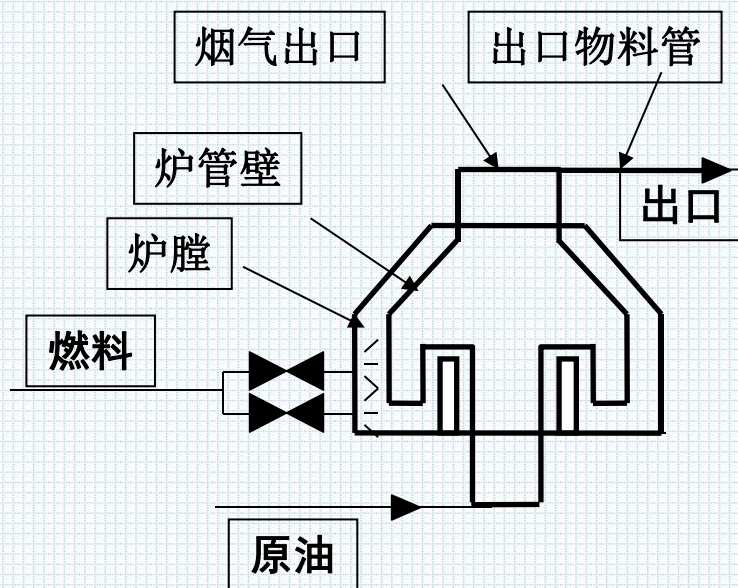


4.2.2 串级控制结构

1. 加热炉出口温度单回路控制

- ❖ 被控参数：原油出口温度
- ❖ 控制参数：燃料流量

- ❖ 测量变送器：温度传感器 (TT)
- ❖ 执行器：调节阀 (气开式)
- ❖ 控制器：温度控制器 (TC)



4.2 串级控制技术

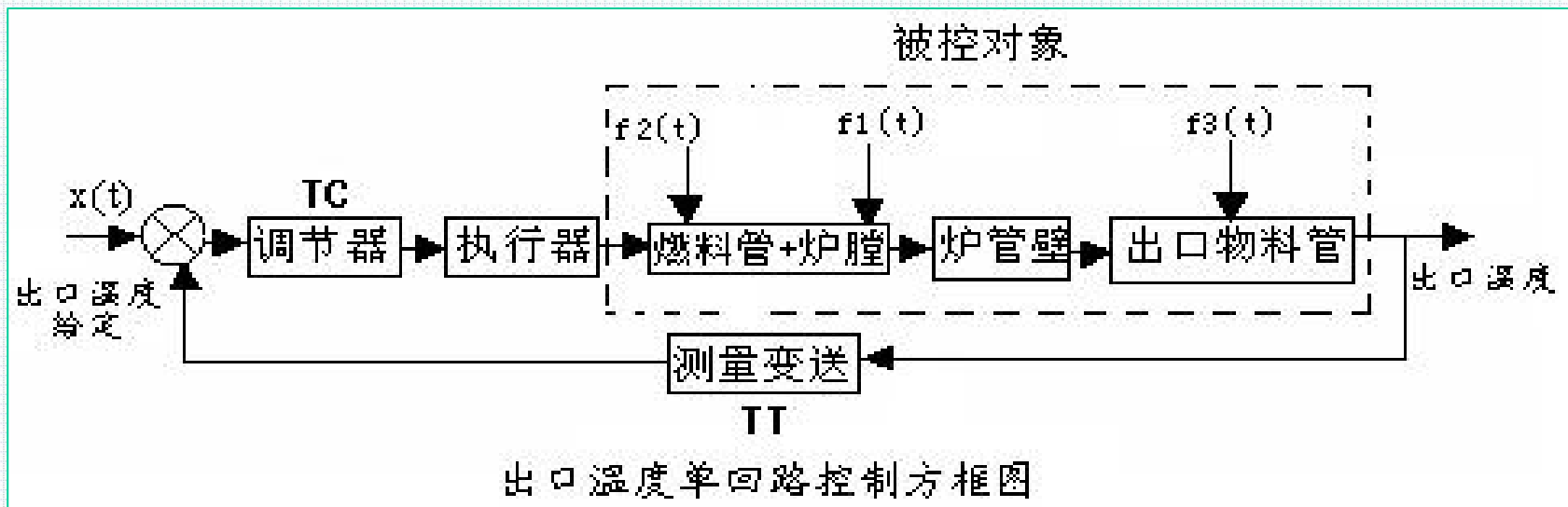


4.2.2 串级控制结构

1. 加热炉出口温度单回路控制

- ❖ 被控参数：原油出口温度
- ❖ 控制参数：燃料流量

- ❖ 测量变送器：温度传感器 (TT)
- ❖ 执行器：调节阀 (气开式)
- ❖ 控制器：温度控制器 (TC)

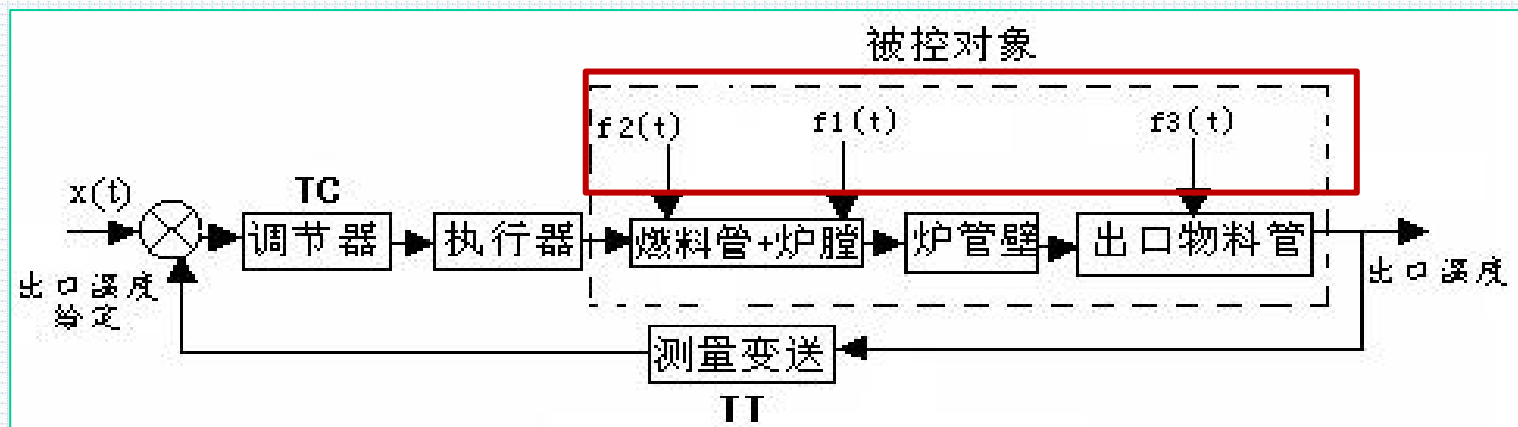


4.2 串级控制技术



4.2.2 串级控制结构

1. 加热炉出口温度单回路控制



- 系统主要扰动:

$f_1(t)$: 炉膛温度波动

$f_2(t)$: 燃料油流量 (压力)
的波动

$f_3(t)$: 加热炉烟气排量波动

当干扰很大时, 将影响控制质量, 单回路控制系统不能满足要求。需要在单回路系统基础上, 设计克服扰动措施。

4.2 串级控制技术



4.2.2 串级控制结构

1. 加热炉出口温度单回路控制

设计单回路克服扰动 $f_2(t)$:

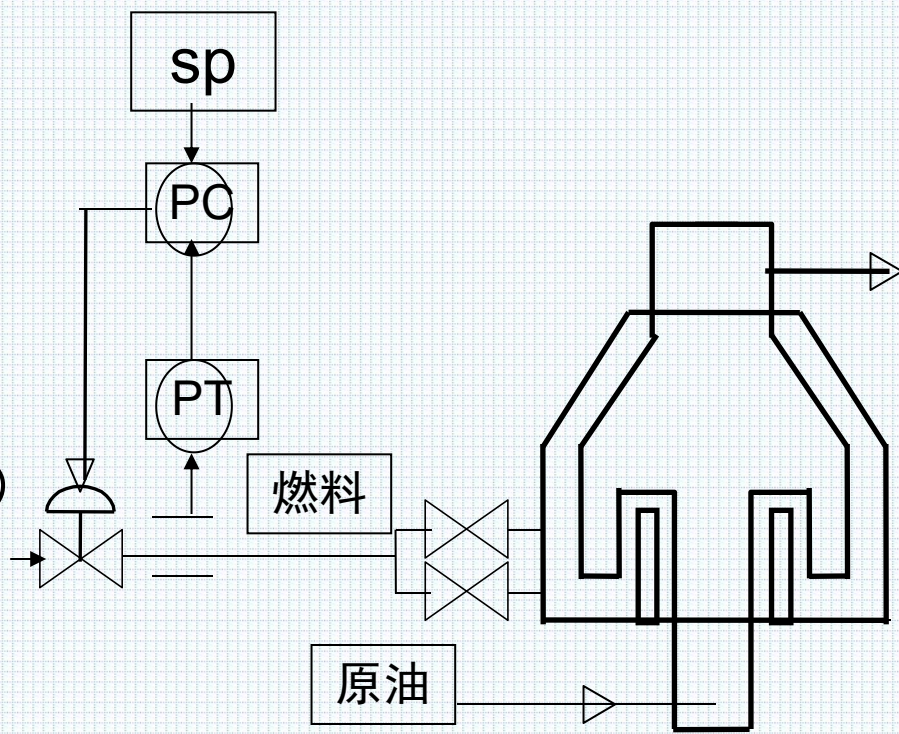
被控参数：燃料管路压力

控制参数：燃料流量

测量变送器：压力传感器 (PT)

执行器：调节阀

控制器：压力控制器 (PC)



系统目的: 燃料管路压力克服 f_2 ，稳定在设定值。

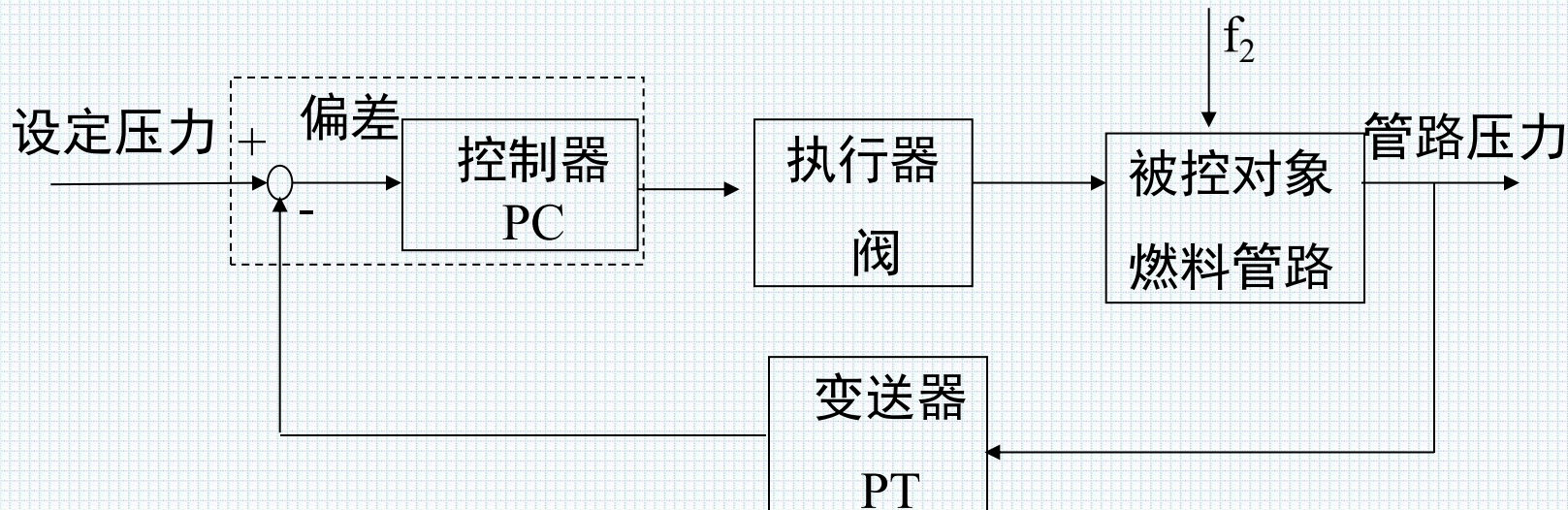
4.2 串级控制技术



4.2.2 串级控制结构

1. 加热炉出口温度单回路控制

管路压力控制方框图：

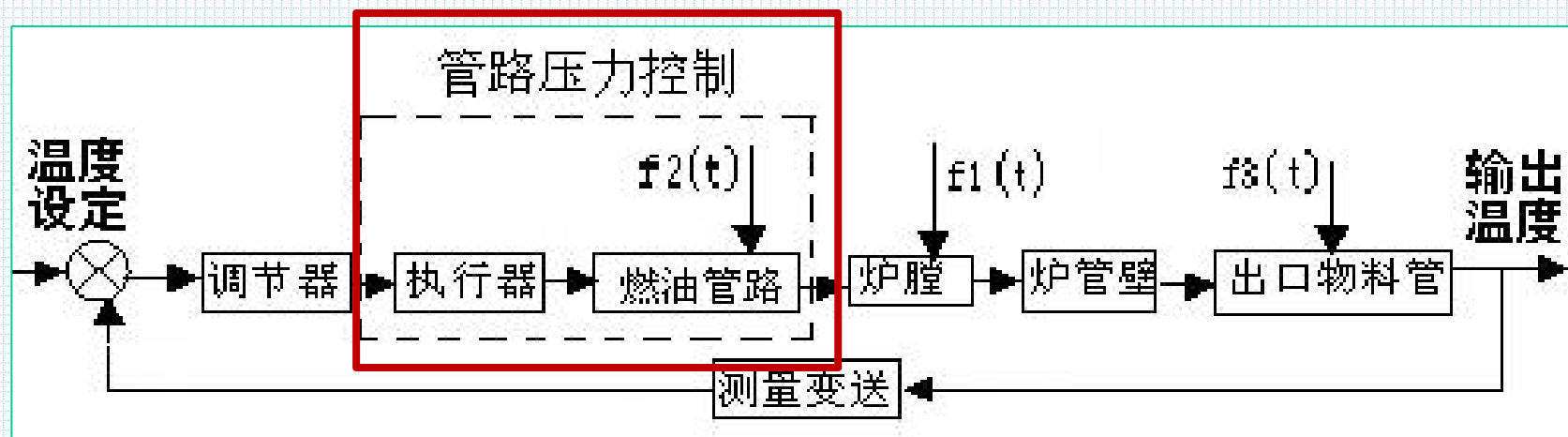
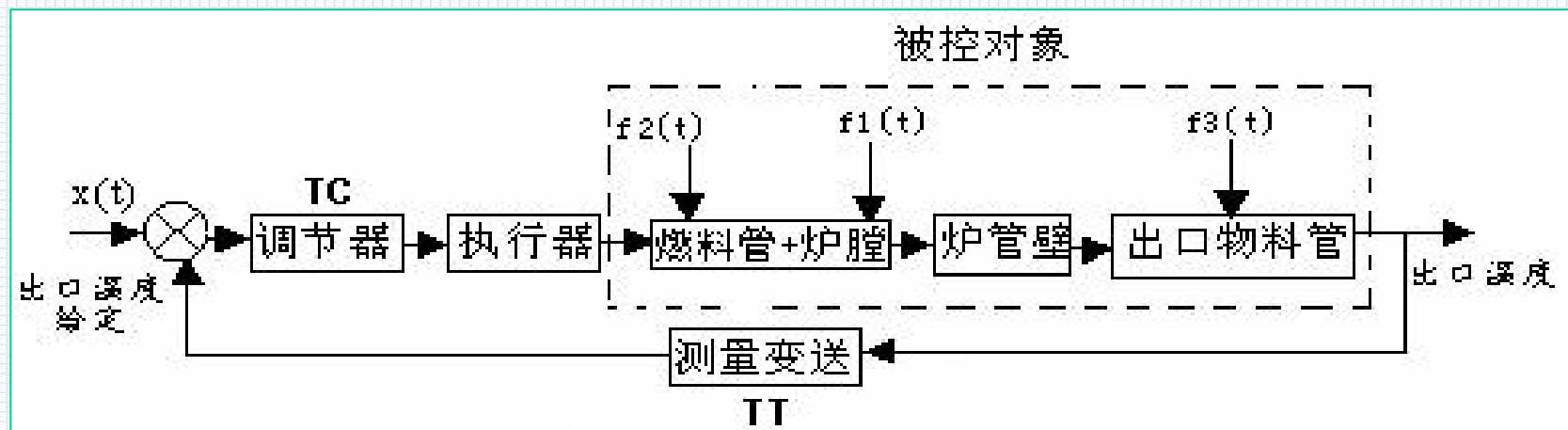


系统目的: 燃料管路压力克服 f_2 , 稳定在设定值。

4.2 串级控制技术



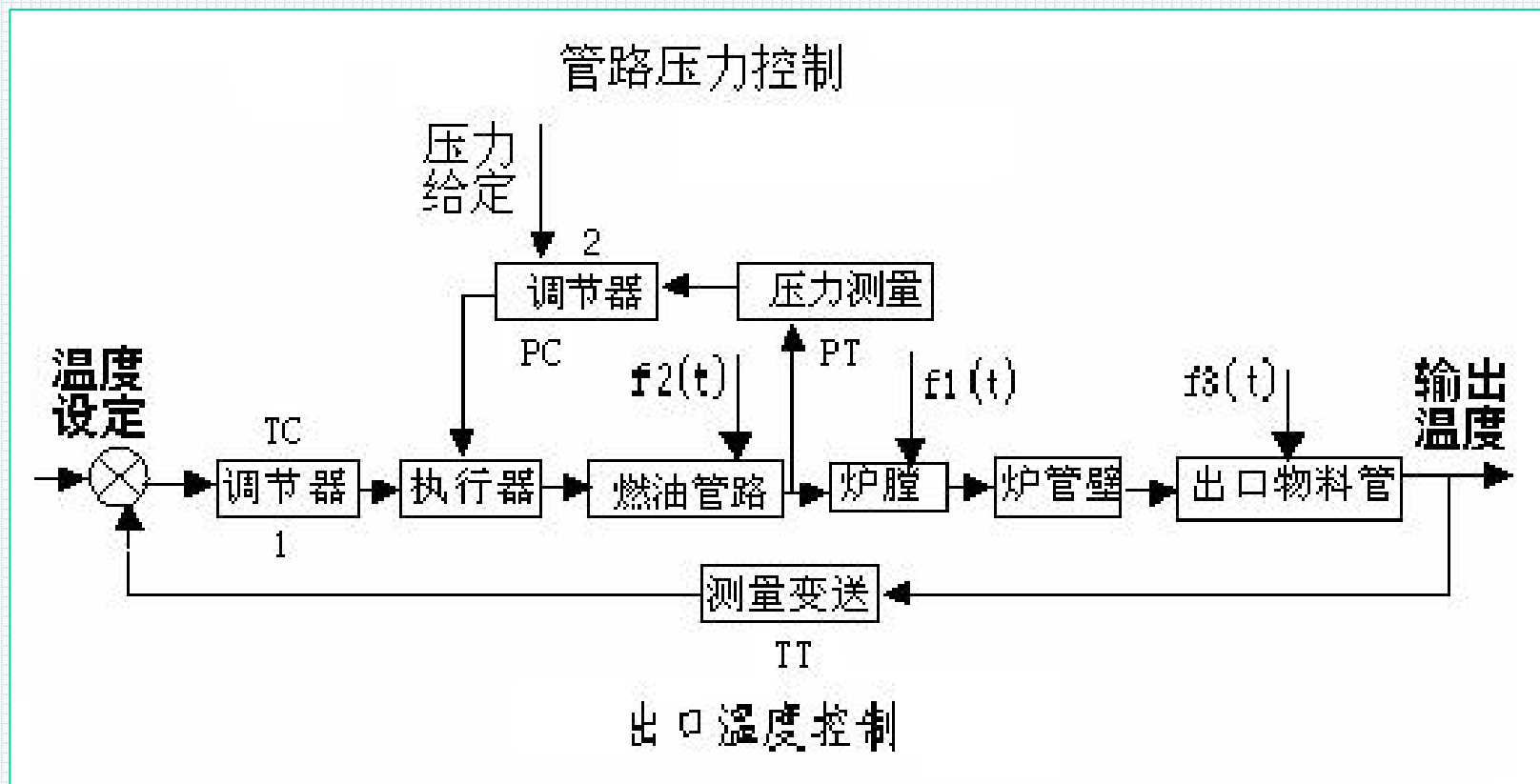
4.2.2 串级控制结构



4.2 串级控制技术



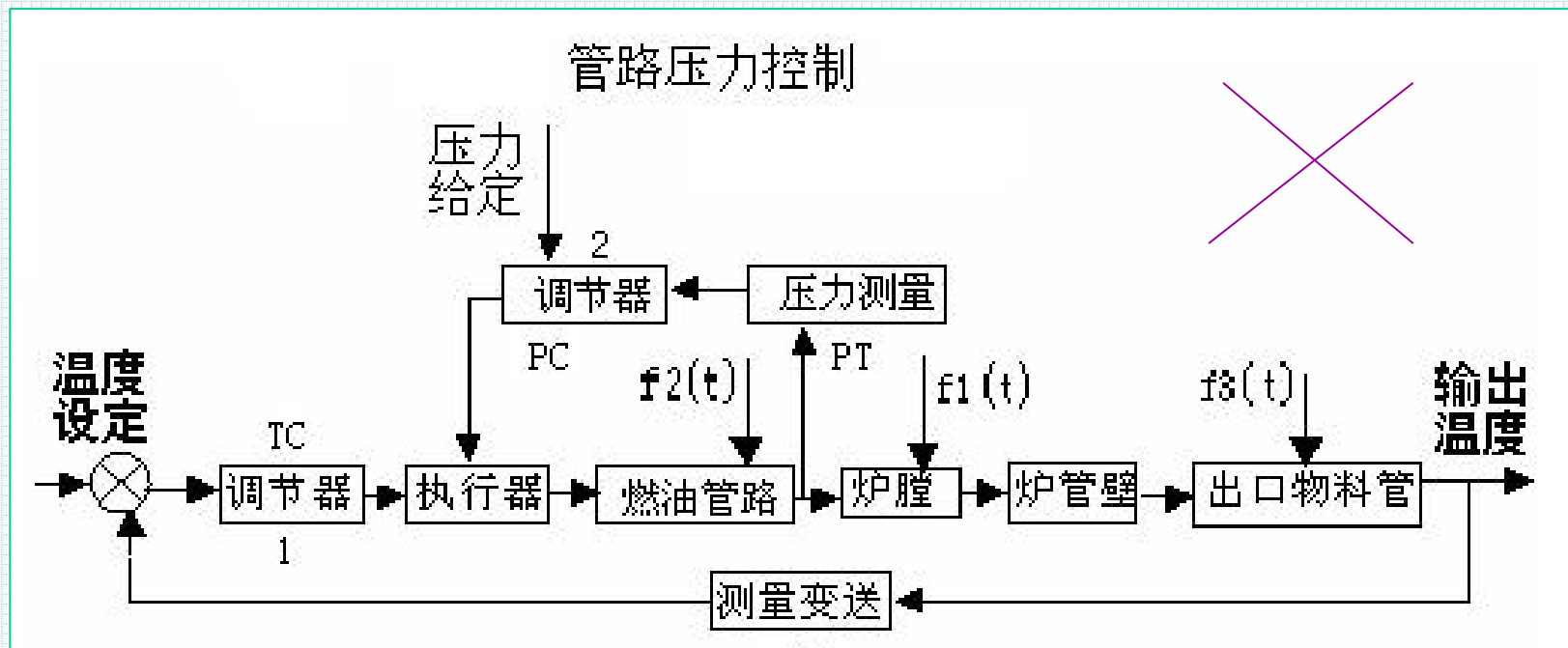
4.2.2 串级控制结构



4.2 串级控制技术

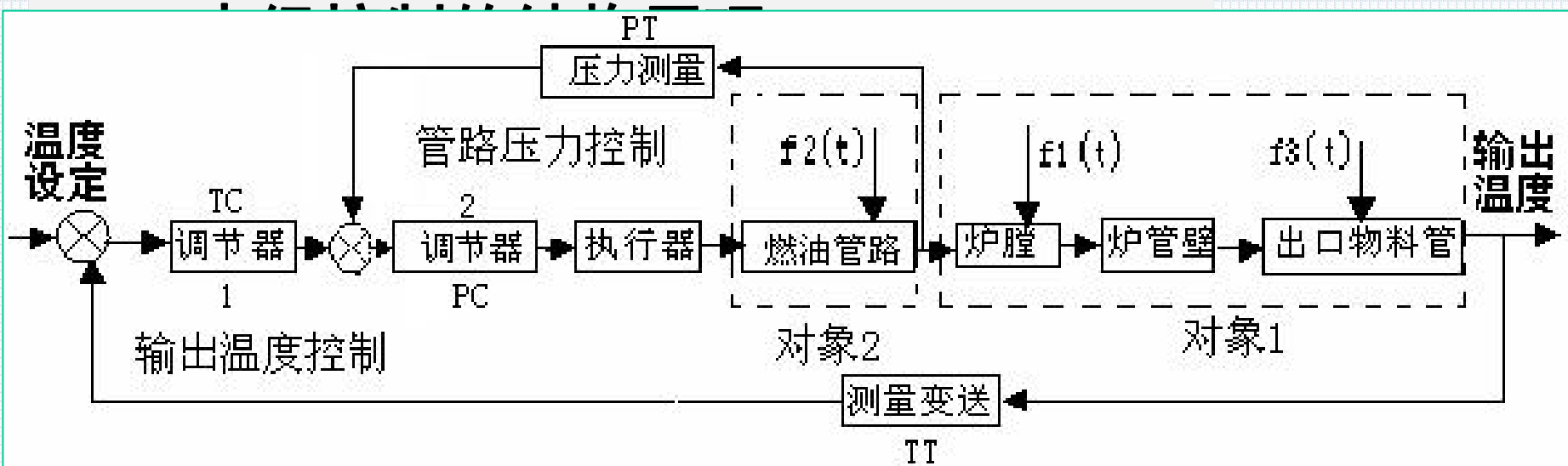


4.2.2 串级控制结构



**执行器只有一个，如何听从两个调节器的调节？
方案不可行。**

4.2 串级控制技术



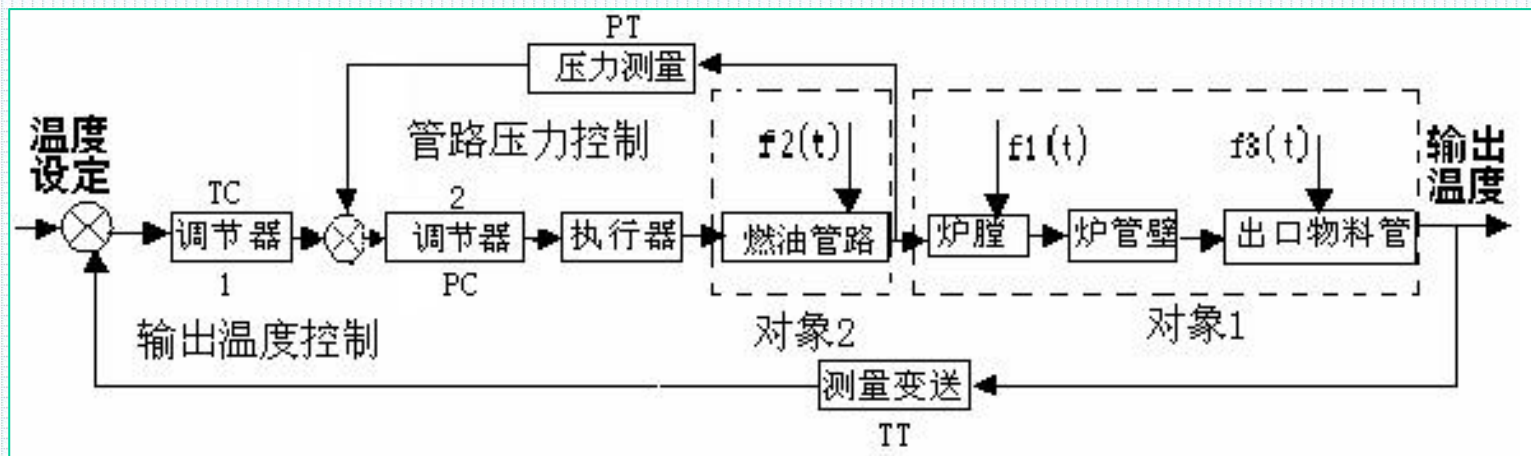
- 1、**压力控制回路（内路）**目的是保证管路中压力稳定，即保证管路中流量稳定。给定值实际是要求流量大小。
- 2、**调节器2**是要求调节阀的开度，就是对应的燃料流量的要求给定值。
- 3、因此，把调节器1的输出作为压力控制回路的给定值。
即**调节器1输出作为调节器2的给定值。**
- 4、**控制回路作用**:通过调节器2克服压力扰动 $f_2(t)$ ，实现管路实际流量跟踪调节器1的要求流量。

4.2 串级控制技术



4.2.2 串级控制结构

2. 加热炉出口温度串级控制

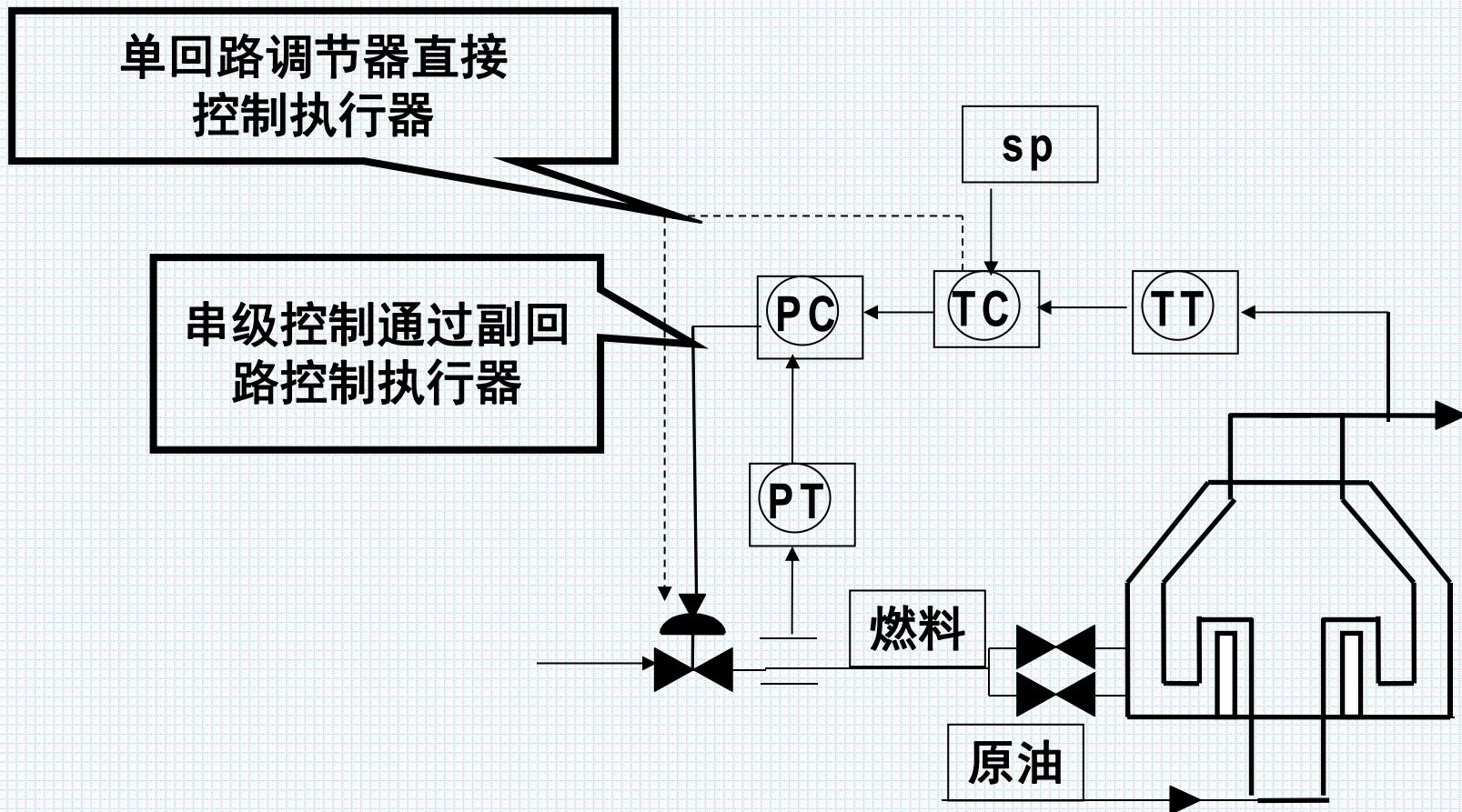


- ◆ 调节器1控制输出作为调节器2压力给定值。
- ◆ 一个执行器完成流量调节。
- ◆ 压力控制回路克服 $f_2(t)$ 保证流量稳定且快速跟随调节器1的给定值(随动控制)
- ◆ 温度控制回路实现温度设定控制(定值控制)。

4.2 串级控制技术

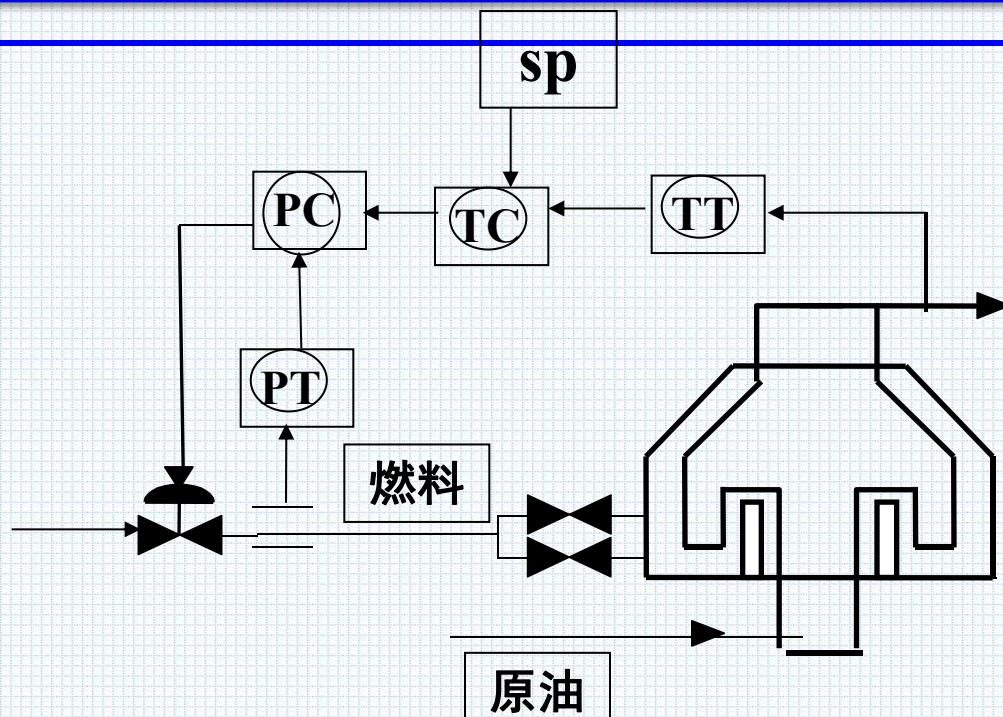


4.2.2 串级控制结构

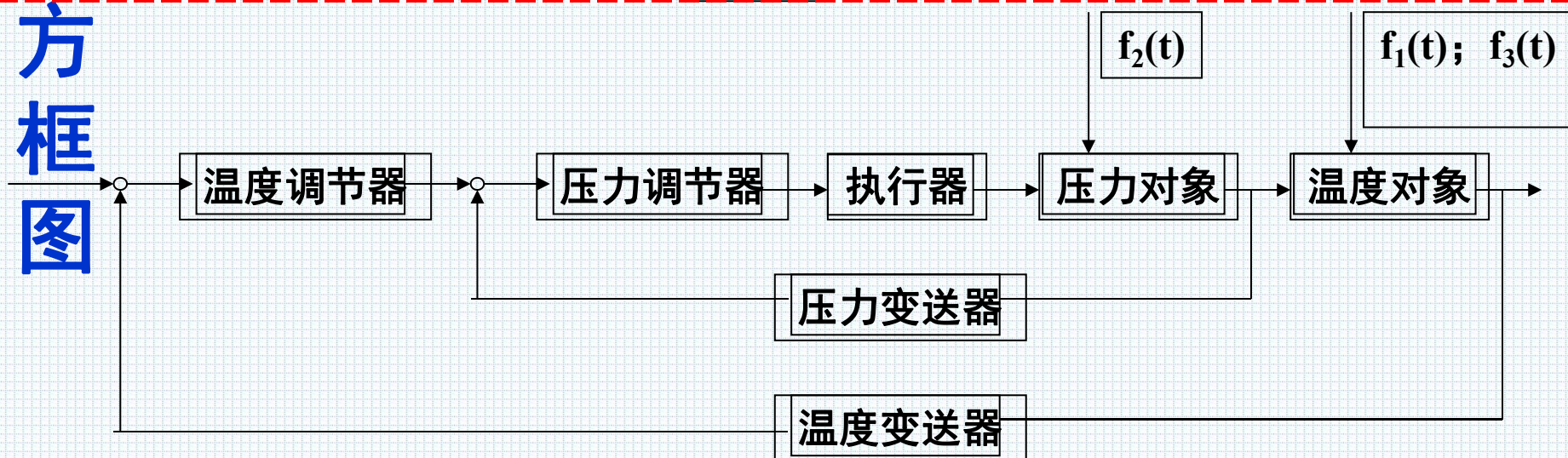


4.2 串级控制技术

结构图



方框图

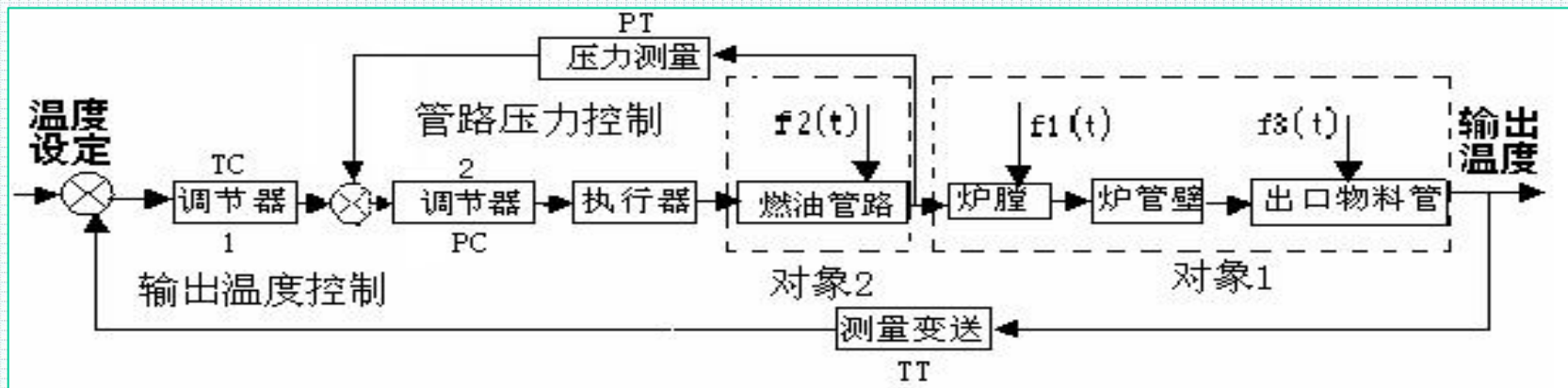


4.2 串级控制技术



4.2.2 串级控制结构

3.串级控制系统各部分名称



- ◆ 主回路:温度控制回路
- ◆ 主调节器: TC
- ◆ 主被控对象:炉膛,炉管壁,出口物料管
- ◆ 主被控变量: 输出温度
- ◆ 测量变送: TT
- ◆ 一次扰动: $f_1(t)$, $f_3(t)$

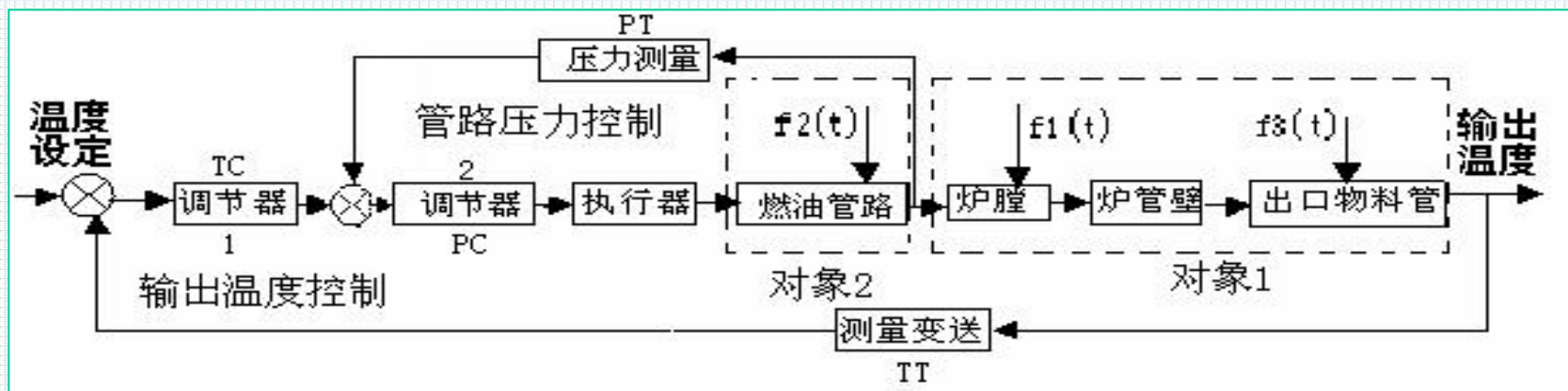
- ◆ 副回路:压力控制
- ◆ 副调节器: PC
- ◆ 副被控对象:燃油管路
- ◆ 副被控变量:燃油管路压力
- ◆ 测量变送:PT
- ◆ 二次扰动: $f_2(t)$

4.2 串级控制技术



4.2.2 串级控制结构

4.串级控制系统结构特点



- **被控对象被分成两个部分**，分别是压力对象和温度对象。两部分对象是串联的关系。（被控对象是串联可分的）
- 系统有两个闭环回路，分别是压力控制和温度控制回路，为双回路控制系统，**称为主回路和副回路**。
- **有两个调节器**，主调节器（主回路）和副调节器（副回路），并且串联工作：主调节器的输出作为副调节器的给定值输入。
- 系统只有**一个执行器**。

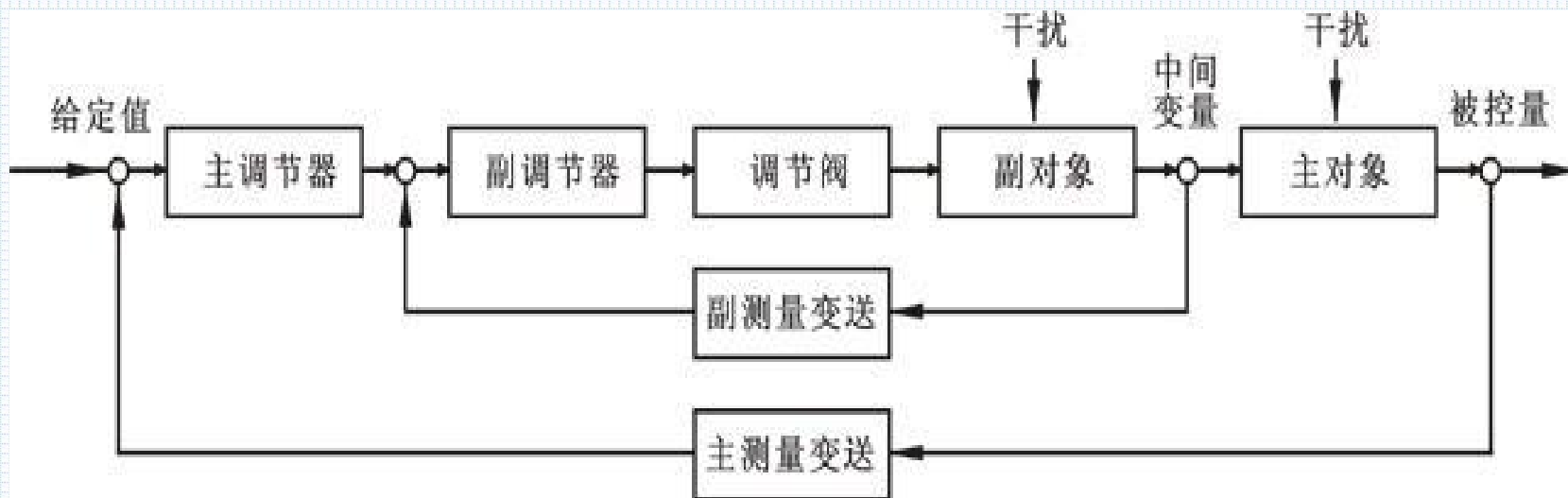
4.2 串级控制技术



4.2.2 串级控制结构

4.随堂练习

- 定义：串级控制系统是由其结构上的特征而得名的。它是由主、副两个控制器串接工作的。



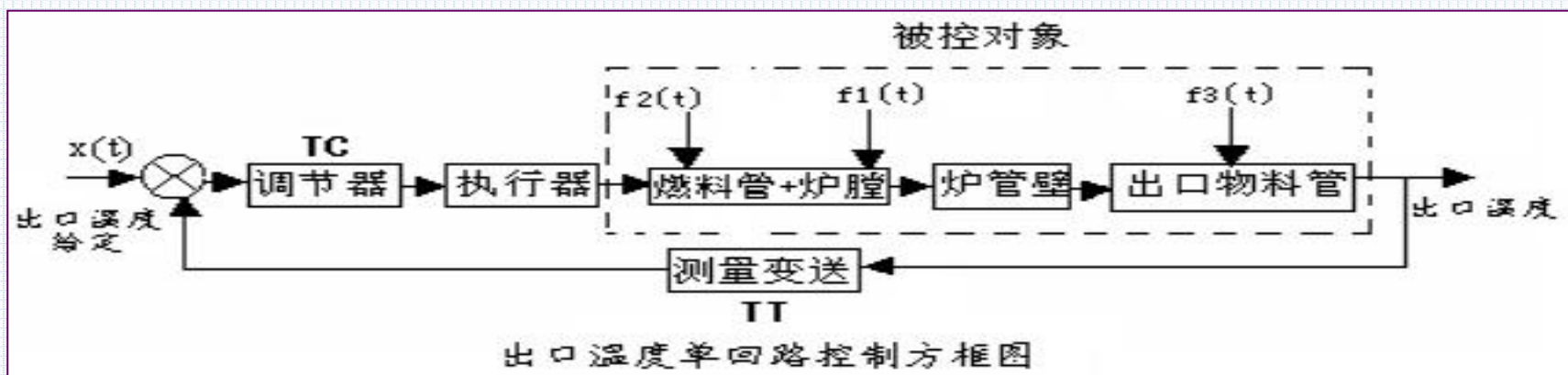
串级控制系统方框图

4.2 串级控制技术



4.随堂练习

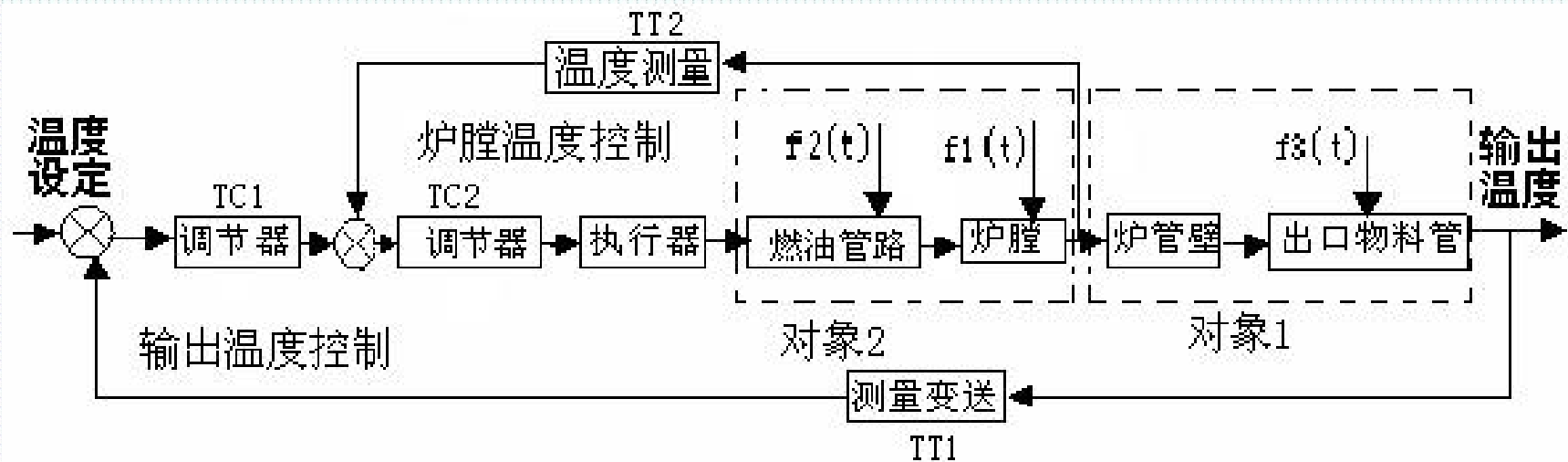
炉管壁温度受扰动较大（做为一个控制点），设计串级控制系统，并画出串级控制方框图和结构图。



4.2 串级控制技术



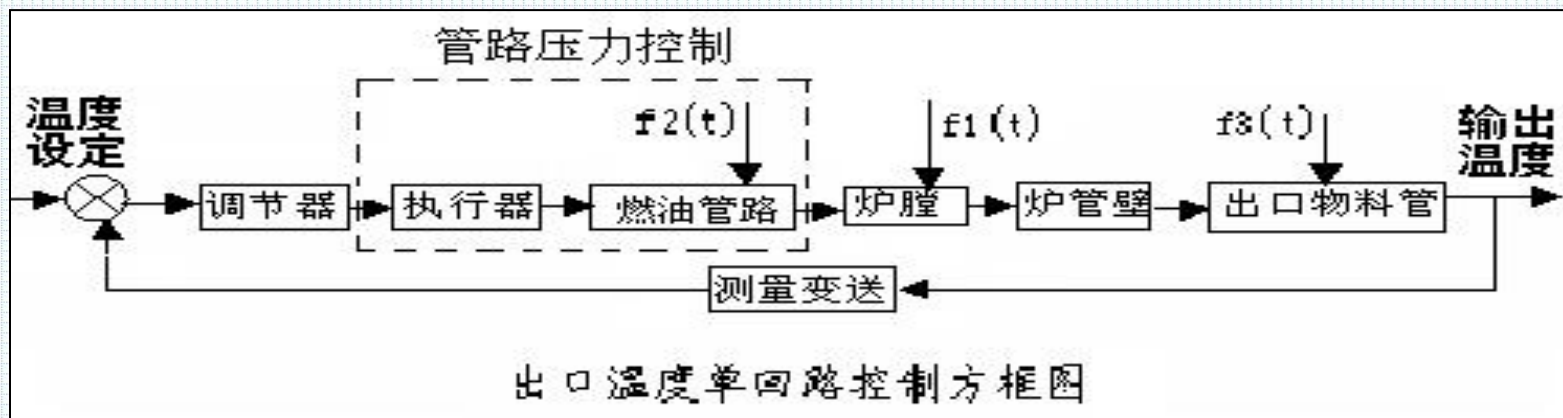
4.随堂练习



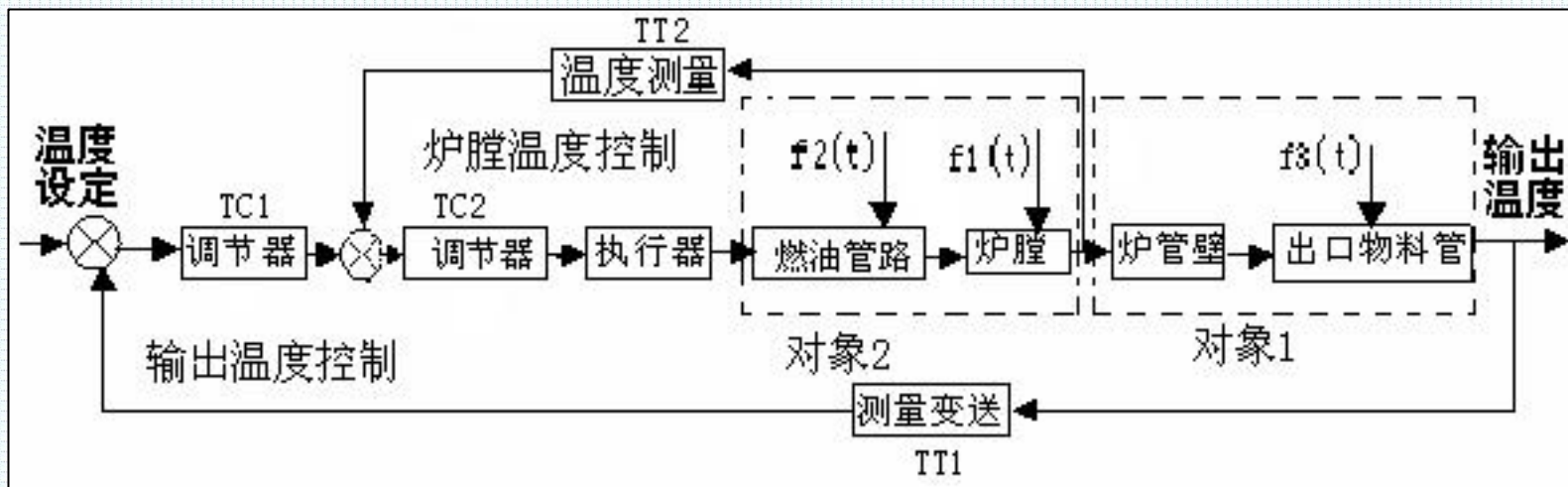
- 主回路:输出温度控制
- 主控制器: TC1;
- 主被控对象:炉管壁,出口物料管
- 主被控变量: 输出温度;
- 测量变送: TT1
- 一次扰动: $f_3(t)$

- 副回路:炉膛温度控制
- 副控制器:TC2;
- 副被控对象:燃油管路,炉膛
- 副被控变量:炉膛温度;
- 测量变送:TT2
- 二次扰动: $f_1(t)$, $f_2(t)$

4.2 串级控制技术



如何实现能够克服炉膛壁扰动的加热炉出口温度控制系统？



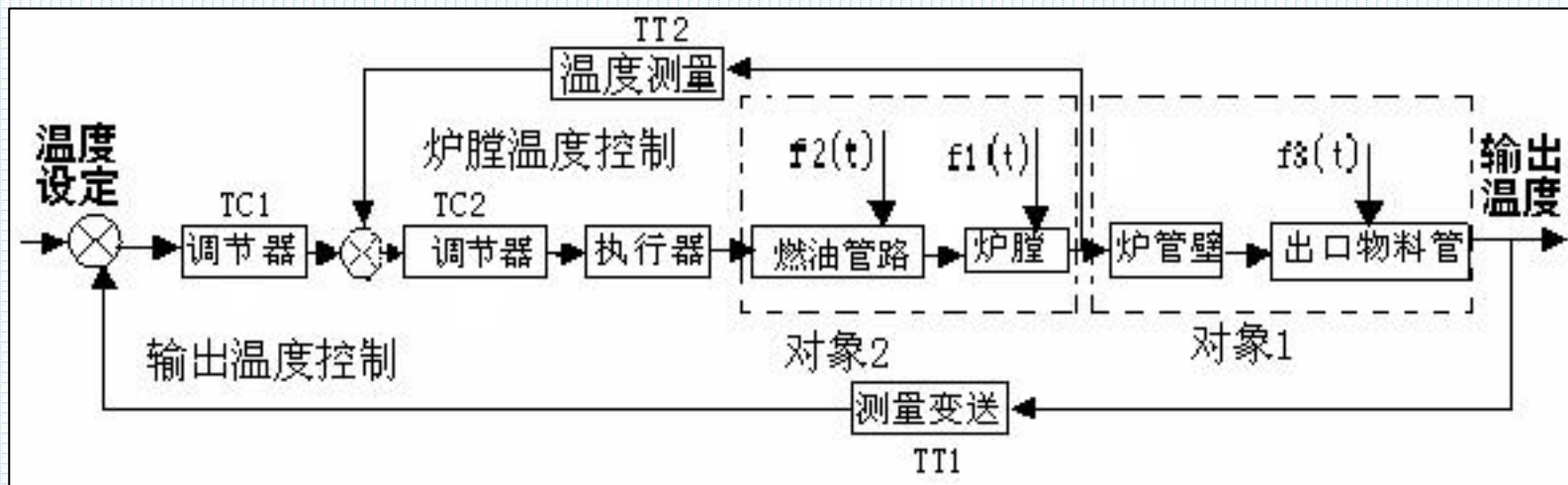
4.2 串级控制技术



4.2.3 串级控制系统工作过程

工作过程：是指在系统处于稳定工作情况下，克服一次，二次扰动的系统过渡过程。

例如：出口温度—炉膛温度串级控制系统。



4.2 串级控制技术

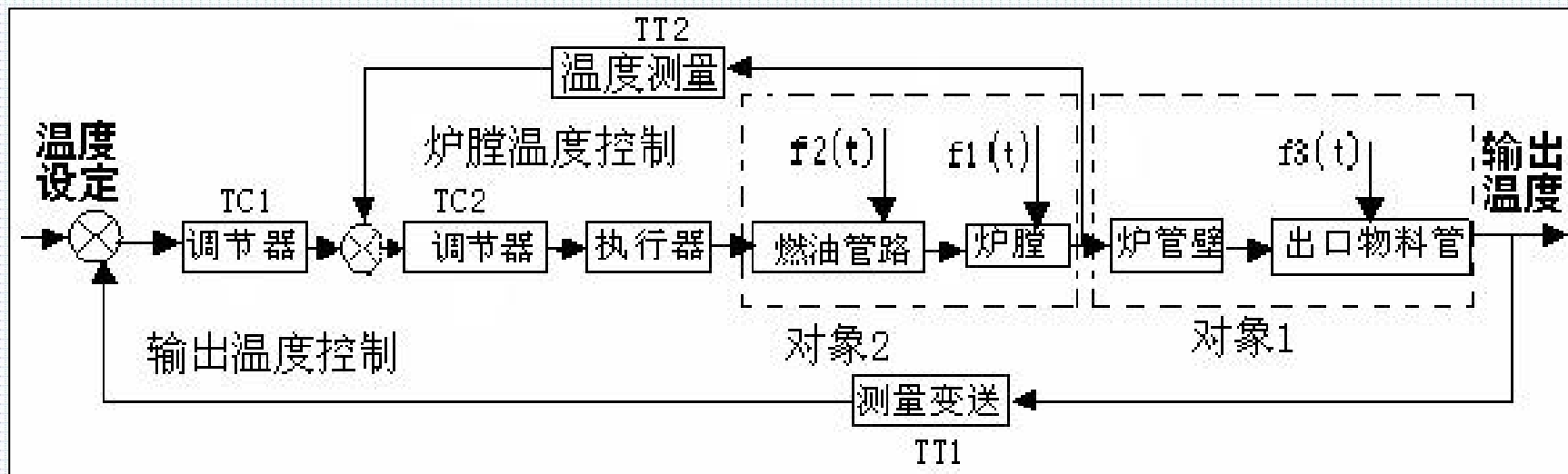


1.二次干扰作用于副环

❖ 副环工作过程:

❖ 二次扰动 f_2 燃油压力波动使得流量 $F \uparrow \rightarrow TT2 \uparrow \rightarrow TC2 \downarrow$ (反作用) $\rightarrow V \downarrow$ (气开阀) $\rightarrow F \downarrow$

❖ 副环具有克服环中扰动 (二次扰动) 能力。对副环外扰动没有抑制作用。



4.2 串级控制技术

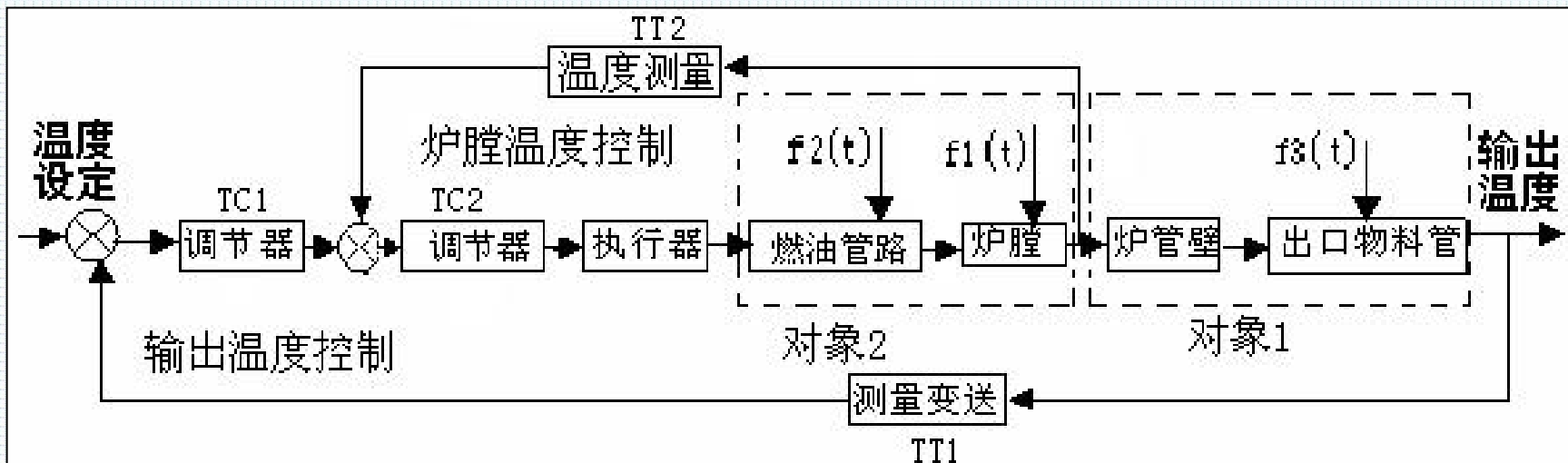


1.二次干扰作用于副环

❖主环工作过程：

❖副环中扰动由副环调节，副环调节过程中输出变化 $TT2 \uparrow \rightarrow TT1 \uparrow \rightarrow TC1 \downarrow$ (反作用) $\rightarrow TC2 \downarrow \rightarrow V \downarrow$ (气开阀) $\rightarrow TT2 \downarrow \rightarrow TT1 \downarrow$

❖二次扰动克服是由副环和主环共同完成的，副环为主，粗调。主环为辅，细调。



1.二次干扰作用于副环

- 二次扰动克服工作过程：
- 假如在副环中有二次扰动（如：燃油压力 f_2 ，原料油流量波动 f_1 ）时，副调节器TC2立即进行调节，使得二次扰动被副环基本克服。

——二次扰动粗调

- 副环二次扰动调节中引起的副环输出TT2变化，其输出波动再由主调节器TC1的主环进行调节。

——二次扰动细调

- 二次扰动经过副环作用，对主环的影响已经远小于其直接作用于主环的影响。

副环具有抑制二次扰动的作用

4.2 串级控制技术



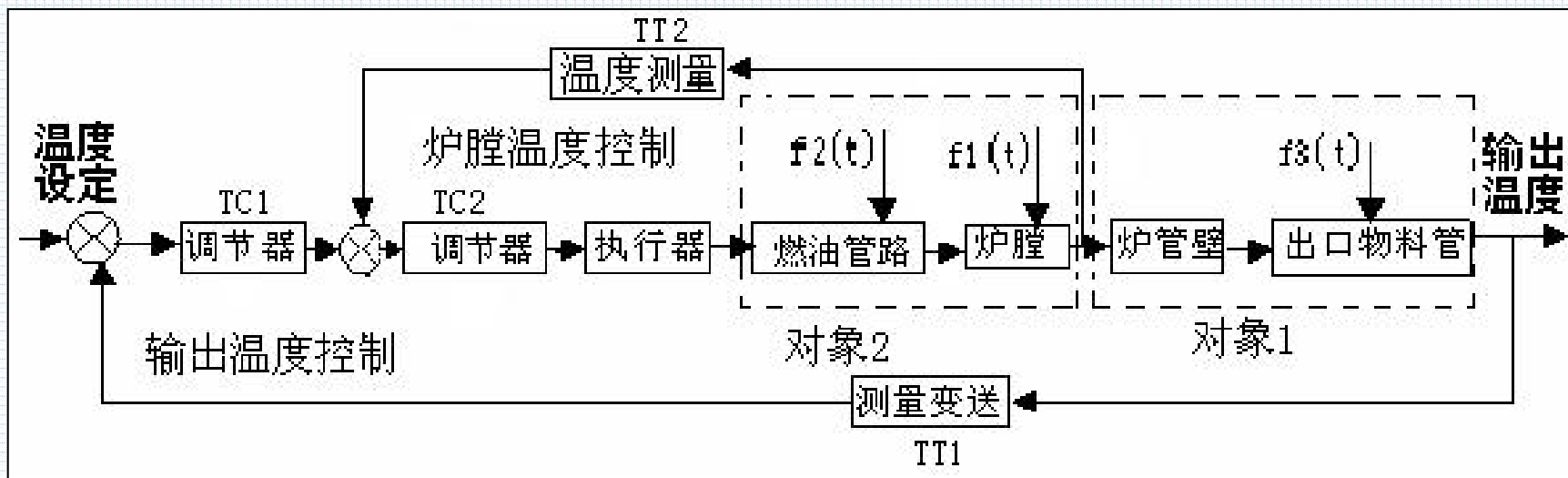
2. 一次干扰

❖ 主环工作过程:

一次干扰 f_3 使得输出温度 $TT1 \uparrow \rightarrow TC1 \downarrow$ (反作用) $\rightarrow TC2$ 给定 $\downarrow \rightarrow TT2 \downarrow \rightarrow TT1 \downarrow$

❖ 副环过程:

$TC2$ 给定 $\downarrow \rightarrow V$ (气开阀) $\downarrow \rightarrow F \downarrow \rightarrow TT2 \downarrow$

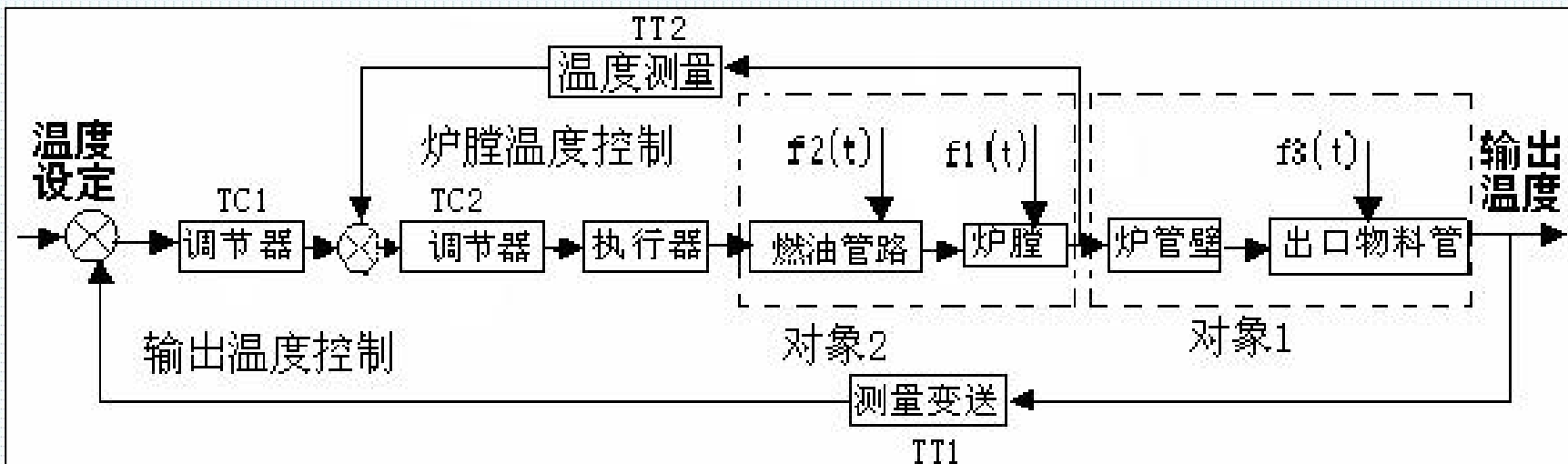


4.2 串级控制技术



4.2.3 串级控制系统工作过程

- **二次扰动**经过副环(粗调)，消除了大部分二次扰动对系统的影响，余下的经过主环(细调)克服。
- 副环使得系统具有两次克服二次扰动的过程。
- **一次扰动**由主环克服，副环实现跟随作用。
- 一次、二次扰动同时作用时，相同时相互叠加，调节作用增强；影响相反时相互抵消，调节作用减弱。



4.2 串级控制技术



4.2.3 串级控制系统工作过程

串级控制系统的主回路是一个定值控制系统，可以按照单回路系统的设计原则进行。

副回路设计是串级控制系统设计的主要内容。

副回路设计是根据生产工艺要求的具体情况，选择一个合适的副变量，从而组成一个以副变量为被控变量的副回路。

4.2 串级控制技术



4.2.3 串级控制系统工作过程

- (1) 使系统中主要干扰包含在副环内。
- (2) 在可能情况下，应使副环包含更多一些的干扰。
- (3) 当对象具有非线性环节时，在设计时应使非线性环节位于副环之中。
- (4) 当对象具有较大纯滞后时，在设计时应使副回路尽量少包括或不包括纯滞后。
- (5) 所设计的副回路需考虑到方案的经济性和工艺的合理性。

总结

主要内容：

4.2.1 串级控制介绍

4.2.2 串级控制的结构和原理

4.2.3 串级控制系统工作过程

学习要求：

1. (4.2.1) 了解串级控制作用和应用：产生、定义和特点。
2. (4.2.2) 掌握串级控制结构和原理：方框图和结构图。
3. (4.2.3) 掌握串级控制调节过程：调节过程和设计方法。
4. 加热炉出口温度串级控制：压力-温度控制，温度-温度控制

习题

- 1.什么是串级控制。
- 2.画出一一般串级控制系统的典型方块图，并说出各部分名称及作用。
- 3.串级控制系统有哪些特点？主要使用在哪些场合？
- 4.串级控制系统中主、副变量应如何选择？
- 5.为什么说串级控制系统中的主回路是定值控制系统，而副回路是随动控制系统？
- 6.怎样选择串级控制系统中主、副控制器的控制规律？
- 7.能够根据给定控制要求进行串级控制系统设计。

第四章 常规及复杂控制技术



学习内容及学习要点

4.1 数字PID控制器的连续化设计技术

PID控制技术介绍

PID定义、作用、历史、应用

数字PID控制器的设计

模拟PID、数字PID、位置型/增量型PID、特点及区别

数字PID控制器的改进

积分改进（积分分离、抗积分饱和、梯形积分等）、微分改进（不完全微分、微分先行）

数字PID控制器的参数整定

定义、整定参数、整定方法（扩充临界比例度法、扩充响应曲线法、归一法、试凑法）

实验：数字PID控制技术实验

位置型PID控制算法

传递函数离散化、位置型PID算法、画图

分析PID参数对系统的稳定性及过渡过程影响

调整参数并进行分析

积分分离PID控制算法

基于位置型PID算法编写程序

4.2 串级控制技术

串级控制技术介绍

定义、作用、特点、应用

串级控制结构

结构图及各部分名称，加热炉实例

串级控制系统工作过程

副回路调节过程，主回路调节过程

4.3 前馈-反馈控制技术

总结及习题

第四章 常规及复杂控制技术



常规控制技术

4.1 数字PID控制器的连续化设计技术

PID控制技术介绍

PID定义、作用、历史、应用

数字PID控制器的设计

模拟PID、数字PID、位置型/增量型PID、特点及区别

数字PID控制器的改进

积分改进（积分分离、抗积分饱和、梯形积分等）、微分改进（不完全微分、微分先行）

数字PID控制器的参数整定

定义、整定参数、整定方法（扩充临界比例度法、扩充响应曲线法、归一法、试凑法）

常规控制技术

实验：数字PID控制技术实验

位置型PID控制算法

传递函数离散化、位置型PID算法、画图

分析PID参数对系统的稳定性及过渡过程影响

调整参数并进行分析

积分分离PID控制算法

基于位置型PID算法编写程序

4.2 串级控制技术

串级控制技术介绍

定义、作用、特点、应用

串级控制结构

结构图及各部分名称，加热炉实例

串级控制系统工作过程

副回路调节过程，主回路调节过程

4.3 前馈-反馈控制技术

总结及习题

学习
内容
及
学习
要点

第四章 常规及复杂控制技术



常规控制技术

4.1 数字PID控制器的连续化设计技术

PID控制技术介绍

PID定义、作用、历史、应用

数字PID控制器的设计

模拟PID、数字PID、位置型/增量型PID、特点及区别

数字PID控制器的改进

积分改进（积分分离、抗积分饱和、梯形积分等）、微分改进（不完全微分、微分先行）

数字PID控制器的参数整定

定义、整定参数、整定方法（扩充临界比例度法、扩充响应曲线法、归一法、试凑法）

常规控制技术

实验：数字PID控制技术实验

位置型PID控制算法

传递函数离散化、位置型PID算法、画图

分析PID参数对系统的稳定性及过渡过程影响

调整参数并进行分析

积分分离PID控制算法

基于位置型PID算法编写程序

复杂控制技术

4.2 串级控制技术

串级控制技术介绍

定义、作用、特点、应用

串级控制结构

结构图及各部分名称，加热炉实例

串级控制系统工作过程

副回路调节过程，主回路调节过程

4.3 前馈-反馈控制技术

总结及习题

学习
内容
及
学习
要点

第四章 常规及复杂控制技术



常规控制技术

4.1 数字PID控制器的连续化设计技术

PID控制技术介绍

PID定义、作用、历史、应用

数字PID控制器的设计

模拟PID、数字PID、位置型/增量型PID、特点及区别

数字PID控制器的改进

积分改进（积分分离、抗积分饱和、梯形积分等）、微分改进（不完全微分、微分先行）

数字PID控制器的参数整定

定义、整定参数、整定方法（扩充临界比例度法、扩充响应曲线法、归一法、试凑法）

常规控制技术

实验：数字PID控制技术实验

位置型PID控制算法

传递函数离散化、位置型PID算法、画图

分析PID参数对系统的稳定性及过渡过程影响

调整参数并进行分析

积分分离PID控制算法

基于位置型PID算法编写程序

复杂控制技术

4.2 串级控制技术

串级控制技术介绍

定义、作用、特点、应用

串级控制结构

结构图及各部分名称，加热炉实例

串级控制系统工作过程

副回路调节过程，主回路调节过程

复杂控制技术

4.3 前馈-反馈控制技术

总结及习题

学习内容及学习要点

4.3 前馈-反馈控制技术



主要内容：

4.3.1 前馈控制技术介绍

4.3.2 前馈控制结构

4.3.3 前馈-反馈符合控制系统

学习要求：

1. (4.3.1) 了解前馈控制技术、特点及与反馈控制区别。
2. (4.3.2) 掌握前馈控制结构。
3. (4.3.3) 熟悉前馈-反馈复合控制系统。
4. (综合) 能够根据给出的工艺过程和控制要求，设计前馈控制系统和复合控制系统。

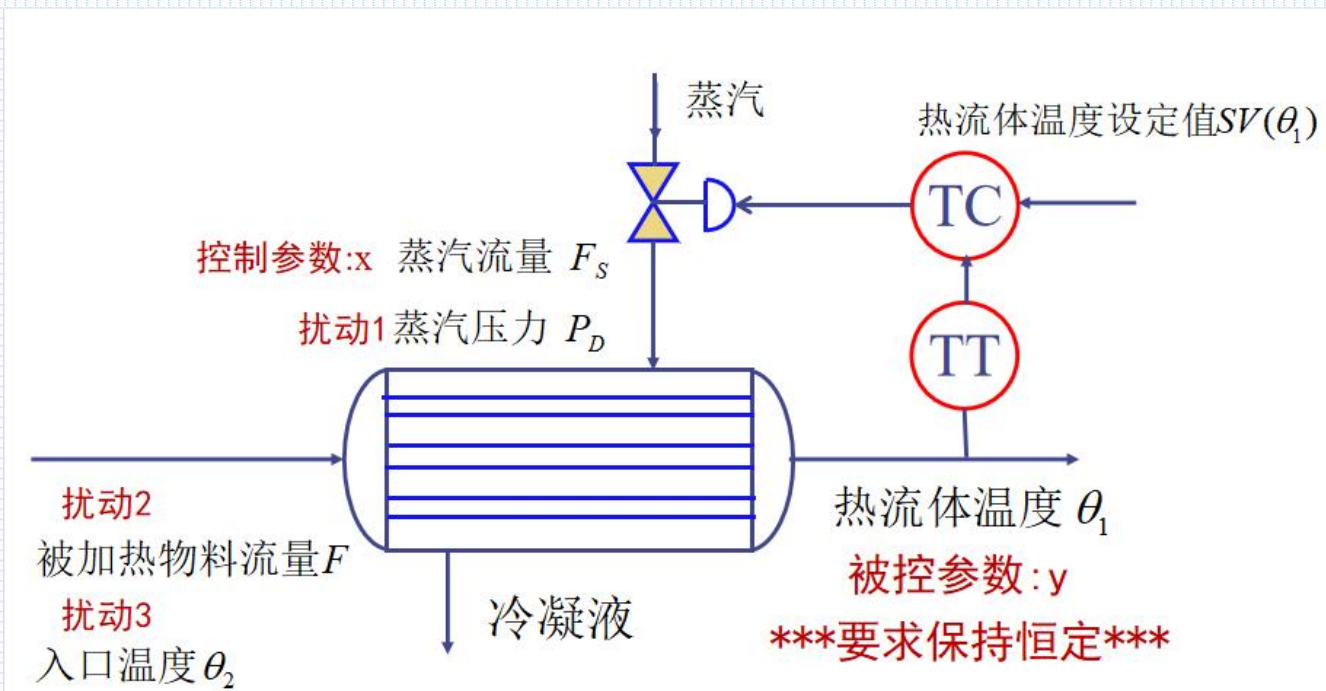
4.3 前馈-反馈控制技术



4.3.1 前馈控制技术介绍

【举例】换热器

- 控制要求
- 被控变量
- 控制变量
- 主要扰动



4.3 前馈-反馈控制技术

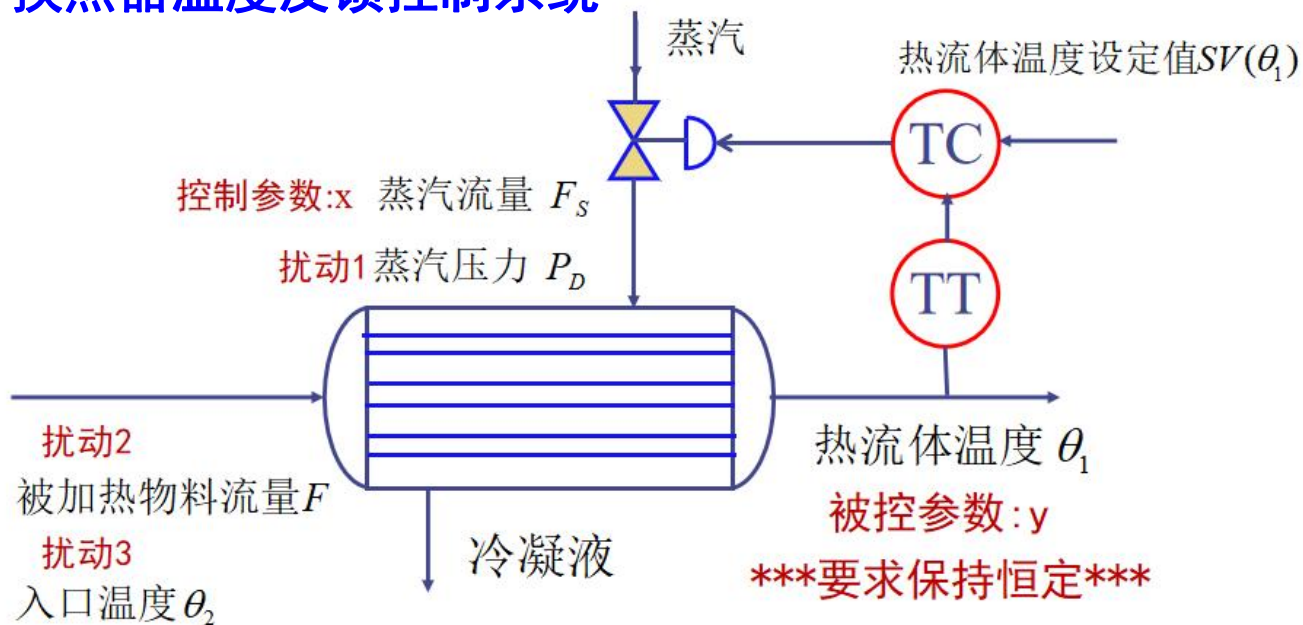


4.3.1 前馈控制技术介绍

【举例】换热器

- 控制要求
- 被控变量
- 控制变量
- 主要扰动
- 反馈控制

换热器温度反馈控制系统



4.3 前馈-反馈控制技术

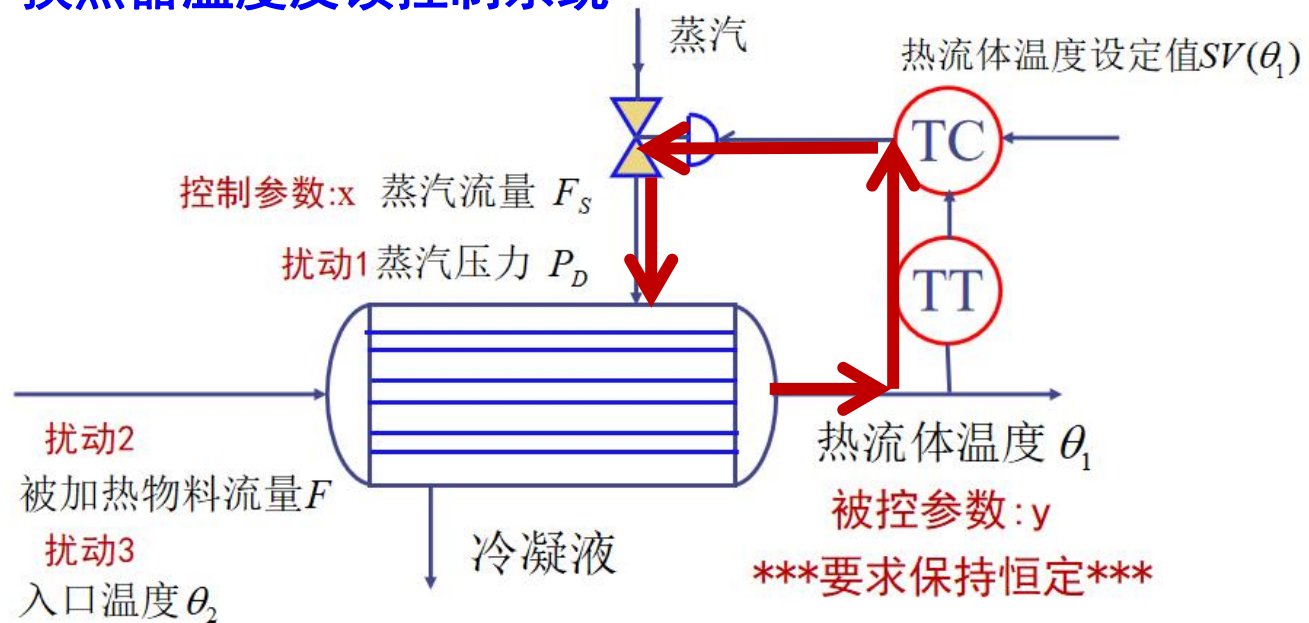


4.3.1 前馈控制技术介绍

【举例】换热器

- 控制要求
- 被控变量
- 控制变量
- 主要扰动
- 反馈控制

换热器温度反馈控制系统



4.3 前馈-反馈控制技术

？反馈控制存在问题：

对于某些工业，如果工艺过程没有滞后，一旦扰动发生，被控量立刻发生偏差，从而导致生产后果不可控制。

反馈控制本质：“基于偏差来消除偏差”

换热器温度反馈控制系统



扰动已经发生，是一种“**不及时**”控制。

无论扰动发生在哪里，总要等到被控量发生偏差后，调节器才开始调节，调节器的动作总要落后扰动作用的发生。

4.3 前馈-反馈控制技术



? 反馈控制存在问题:

对于某些工业, 如果工艺过程没有滞后, 一旦扰动发生, 被控量立刻发生偏差, 从而导致生产后果不可控制。

解决反馈控制存在问题:

一旦扰动发生,
但被控量不发生偏差。

前馈控制技术:

扰动发生后, 通过控制将扰动消除, 使得被控量不发生偏差。

4.3 前馈-反馈控制技术



4.3.1 前馈控制技术介绍

◆ 1.定义

当**扰动**一旦出现，控制器就会**根据扰动的大小和性质进行控制**，补偿扰动对系统的影响，使被控变量稳定（不发生偏差变化），此控制技术为**前馈控制**。

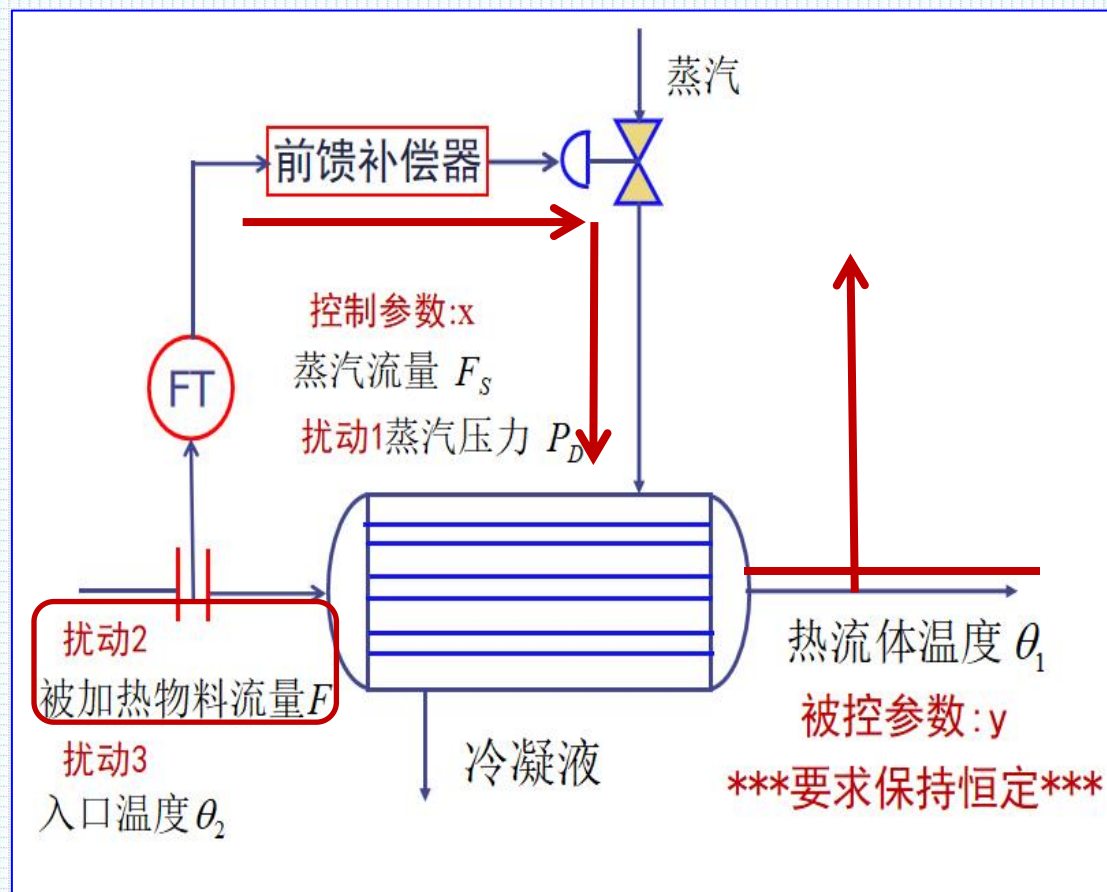
4.3 前馈-反馈控制技术



4.3.1 前馈控制技术介绍

◆ 1.定义

当**扰动**一旦出现，控制器就会**根据扰动的大小和性质进行控制**，补偿扰动对系统的影响，使被控变量稳定（不发生偏差变化），此控制技术为**前馈控制**。



4.3.1 前馈控制技术介绍

◆ 2.特点

- 前馈控制器是通过**测量扰动**来消除扰动对被控变量的影响。
- 当干扰发生时，**前馈控制器动作及时**，通过前馈调节器改变的量刚好**补偿干扰对对象**的影响。
- 前馈控制属于**开环控制**，只要系统中各个环节稳定，控制系统必然稳定。
- 只适合于**可测不可控**的扰动。
- **一种前馈控制只能克服一种扰动**。

4.3 前馈-反馈控制技术



4.3.1 前馈控制技术介绍

◆ 3.前馈与反馈的比较

1.检测信号

2.控制依据

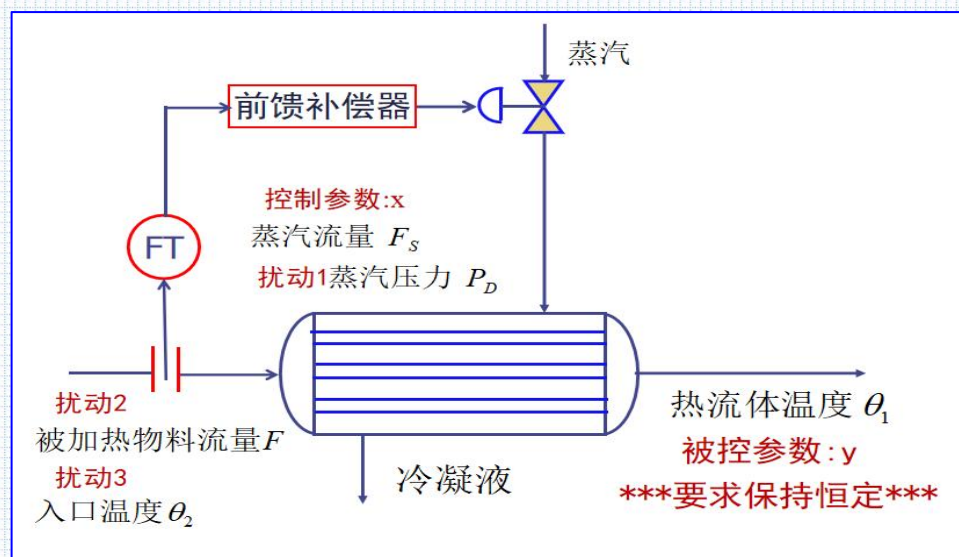
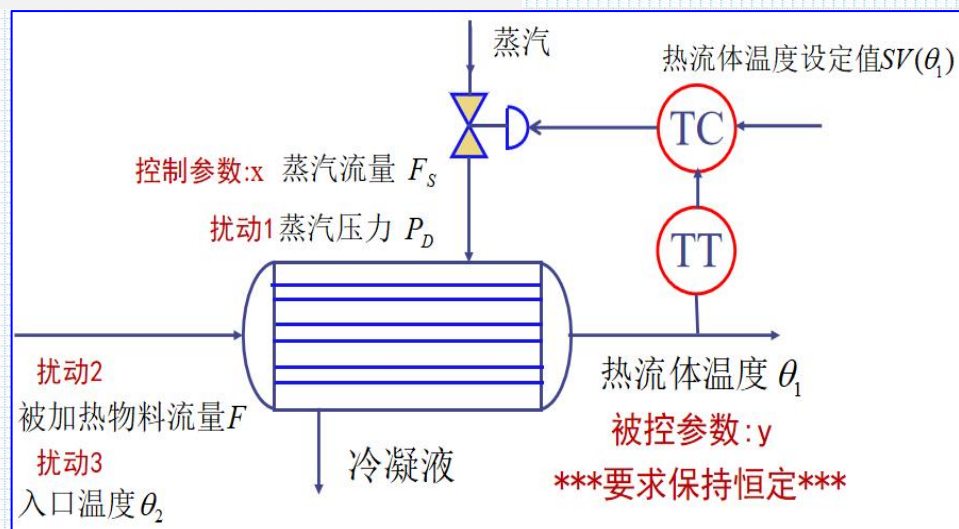
3.控制作用发生时间

4.系统结构

5.控制质量

6.对应干扰

7.控制器



1.检测信号

反馈:

前馈:

2.控制依据

反馈:

前馈:

3.控制作用发生时间

反馈:

前馈:

4.系统结构

反馈:

前馈:

5.控制质量

反馈:

前馈:

6.对应干扰

反馈:

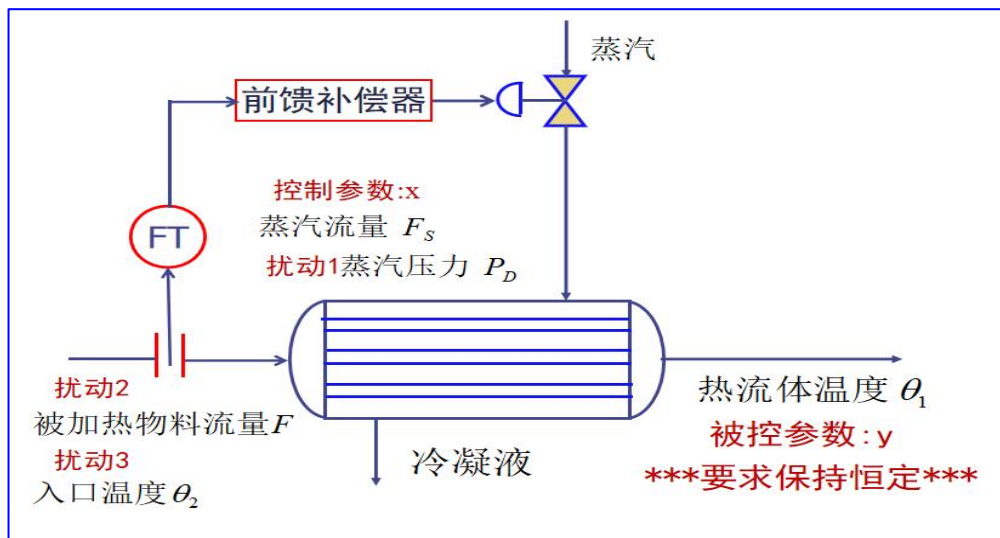
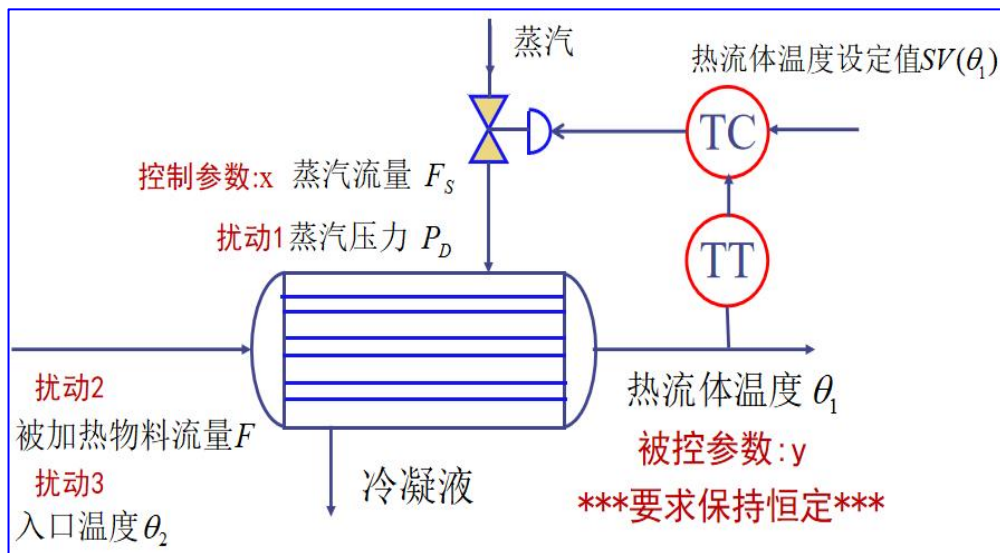
前馈:

7.控制器

反馈:

前馈:

◆ 3.前馈与反馈的比较



4.3 前馈-反馈控制技术



4.3.1 前馈控制技术介绍

4.3 前馈-反馈控制技术



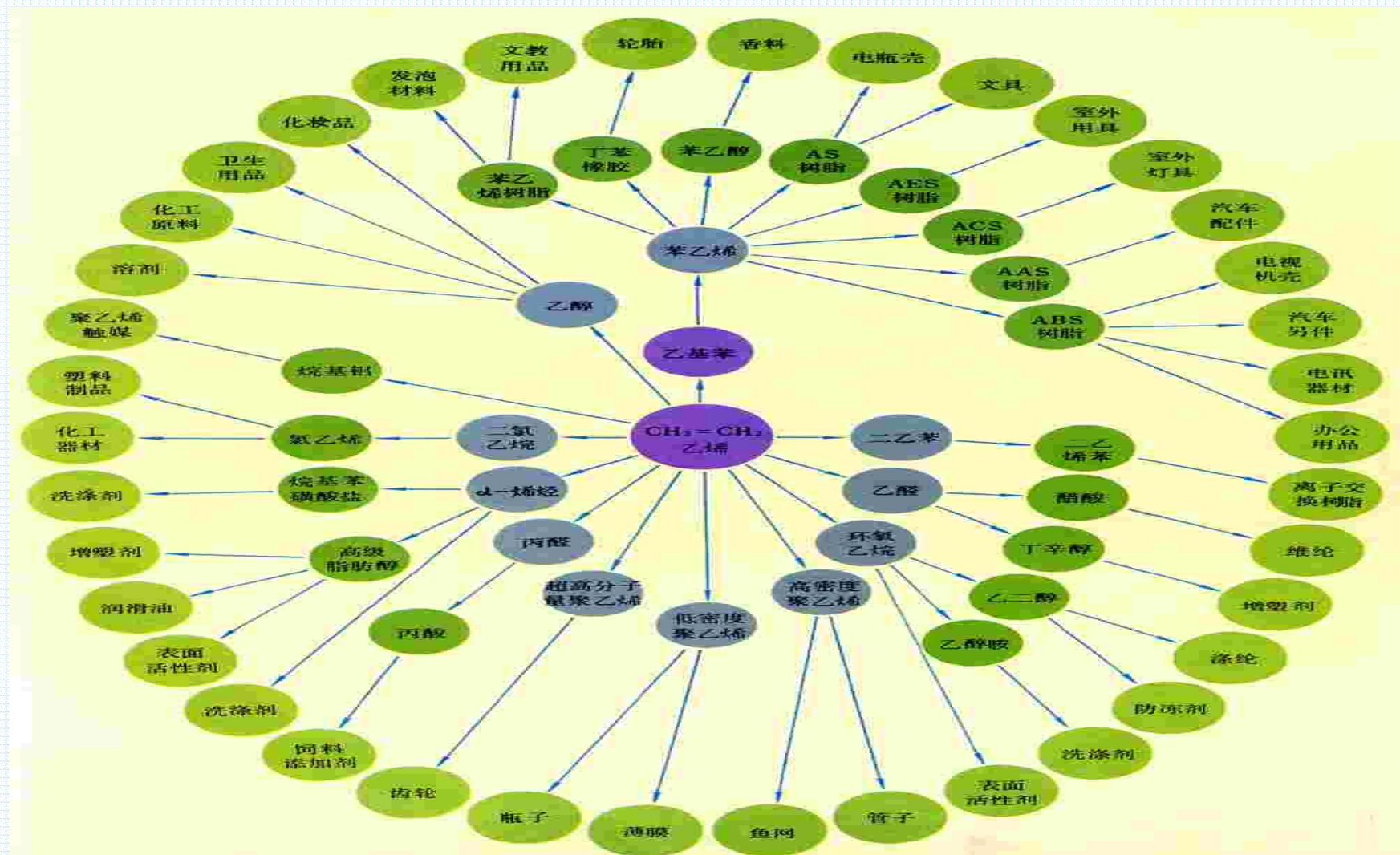
4.2.1 串级控制技术介绍

- ◆ **乙烯**：化学式为 C_2H_4 。
- ◆ **应用**：合成纤维、合成橡胶、合成塑料（聚乙烯及聚氯乙烯）、合成乙醇（酒精）的基本化工原料，也用于制造氯乙烯、苯乙烯、环氧乙烷、醋酸、乙醛、乙醇和炸药等应用。
- ◆ **乙烯工业**：是世界上产量最大的化学产品之一，乙烯工业是石油化工产业的核心，乙烯产品占石化产品的75%以上，在国民经济中占有重要的地位。世界上已将乙烯产量作为衡量一个国家石油化工发展水平的重要标志之一。

4.3 前馈-反馈控制技术



4.2.1 串级控制技术介绍



4.3 前馈-反馈控制技术



4.2.1 串级控制技术介绍

◆ 以乙烯生产厂为例，它共有421个控制回路

其中：常规PID单回路占75%，多回路系统占25%(以串级为主)

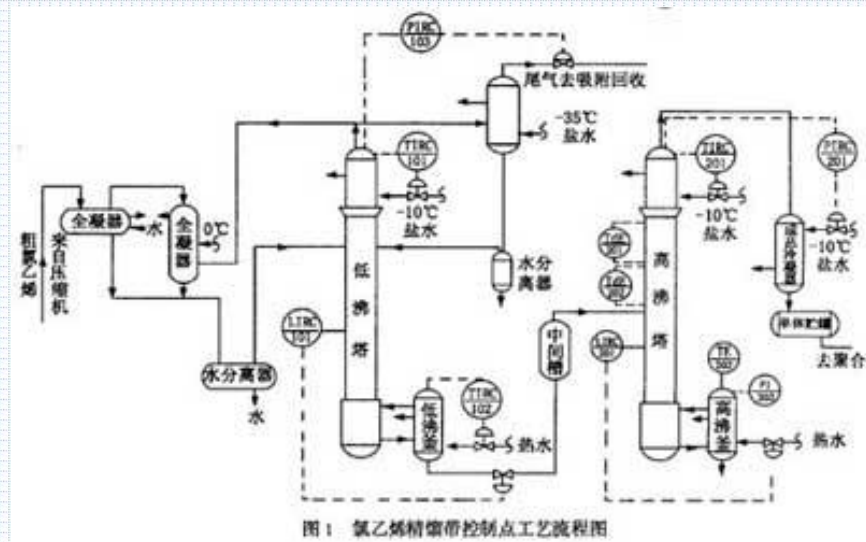


图1 氯乙烯精馏带控制点工艺流程图

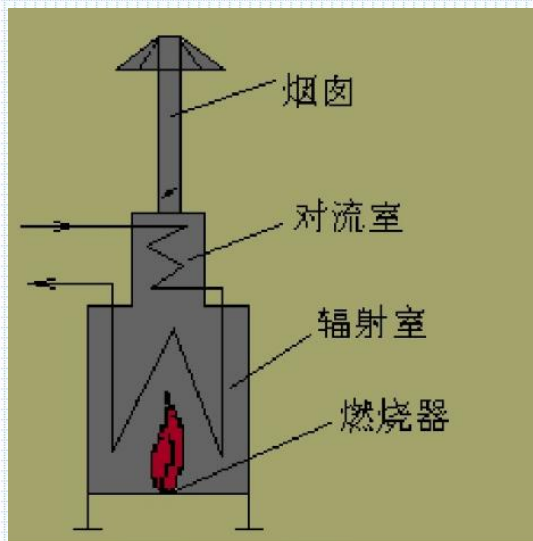
4.3 前馈-反馈控制技术



4.2.2 串级控制的结构原理

1. 加热炉出口温度单回路控制

例：管式加热炉是炼油、化工生产中的重要装置之一，它的任务是把原油加热到一定温度，以保证下道工艺的顺利进行。因此，需要控制原油加热后的出口温度。



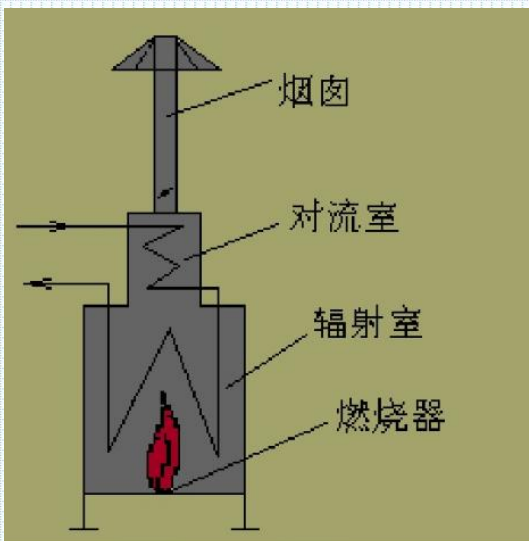
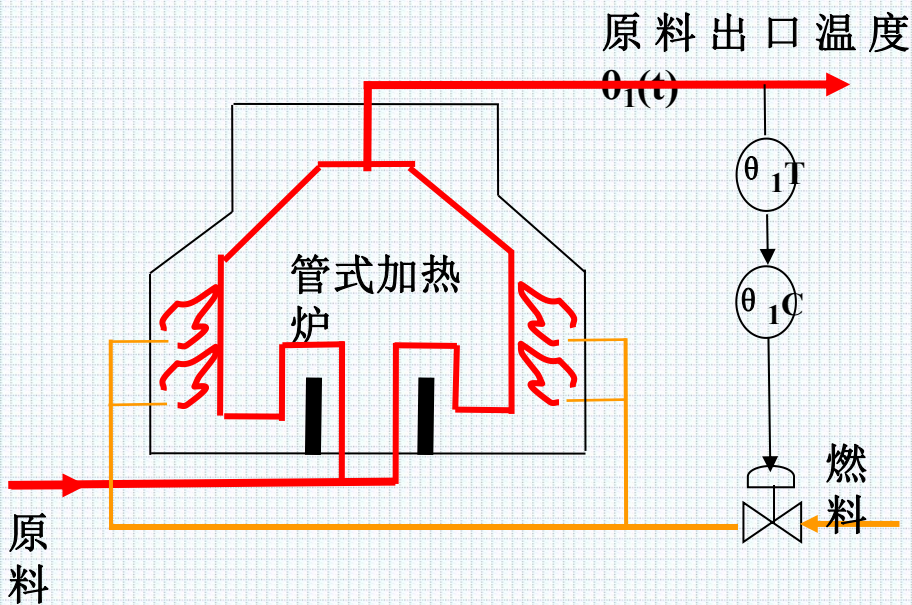
4.3 前馈-反馈控制技术



4.2.2 串级控制的结构原理

1. 加热炉出口温度单回路控制

例：管式加热炉是炼油、化工生产中的重要装置之一，它的任务是把原油加热到一定温度，以保证下道工艺的顺利进行。因此，需要控制原油加热后的出口温度。



4.3 前馈-反馈控制技术

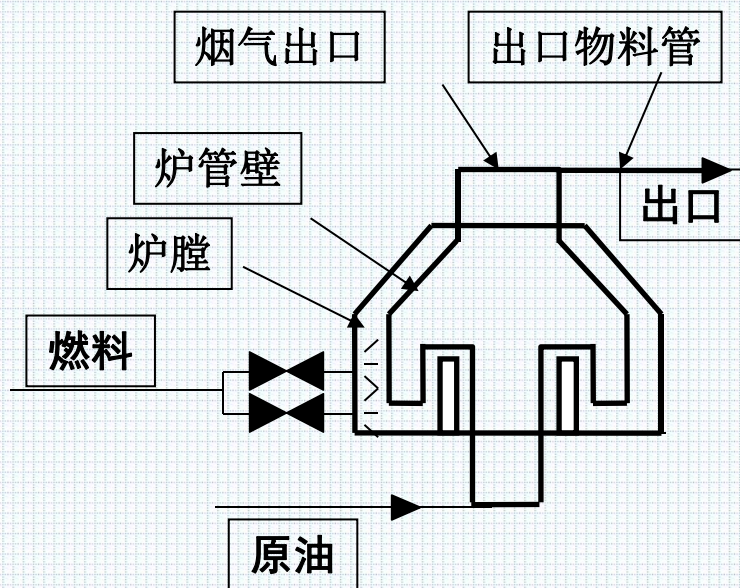


4.2.2 串级控制的结构原理

1. 加热炉出口温度单回路控制

- ❖ 被控参数：原油出口温度
- ❖ 控制参数：燃料流量

- ❖ 测量变送器：温度传感器 (TT)
- ❖ 执行器：调节阀 (气开式)
- ❖ 控制器：温度控制器 (TC)



4.3 前馈-反馈控制技术

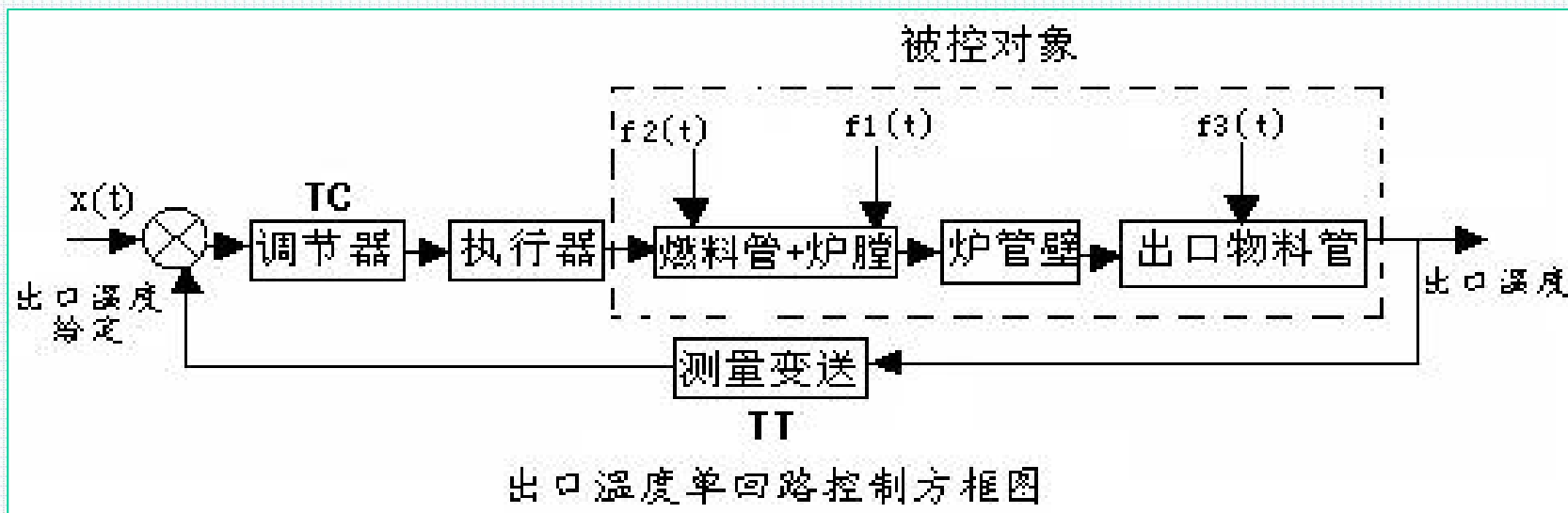


4.2.2 串级控制的结构原理

1. 加热炉出口温度单回路控制

- ❖ 被控参数：原油出口温度
- ❖ 控制参数：燃料流量

- ❖ 测量变送器：温度传感器 (TT)
- ❖ 执行器：调节阀 (气开式)
- ❖ 控制器：温度控制器 (TC)

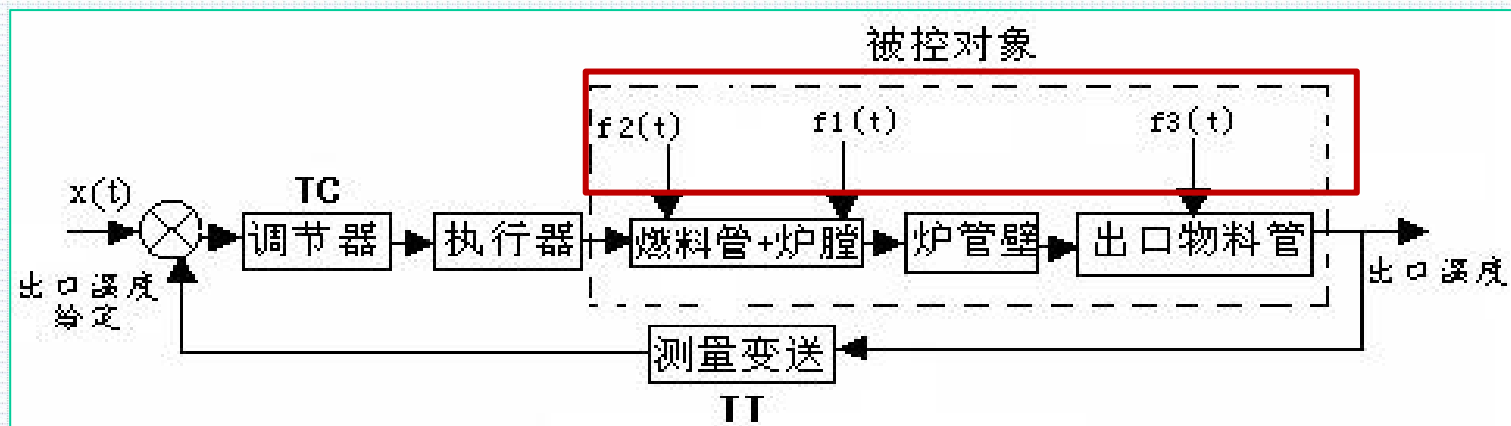


4.3 前馈-反馈控制技术



4.2.2 串级控制的结构原理

1. 加热炉出口温度单回路控制



- 系统主要扰动:

$f_1(t)$: 炉膛温度波动

$f_2(t)$: 燃料油流量 (压力)
的波动

$f_3(t)$: 加热炉烟气排量波动

当干扰很大时, 将影响控制质量, 单回路控制系统不能满足要求。需要在单回路系统基础上, 设计克服扰动措施。

4.3 前馈-反馈控制技术



4.2.2 串级控制的结构原理

1. 加热炉出口温度单回路控制

设计单回路克服扰动 $f_2(t)$:

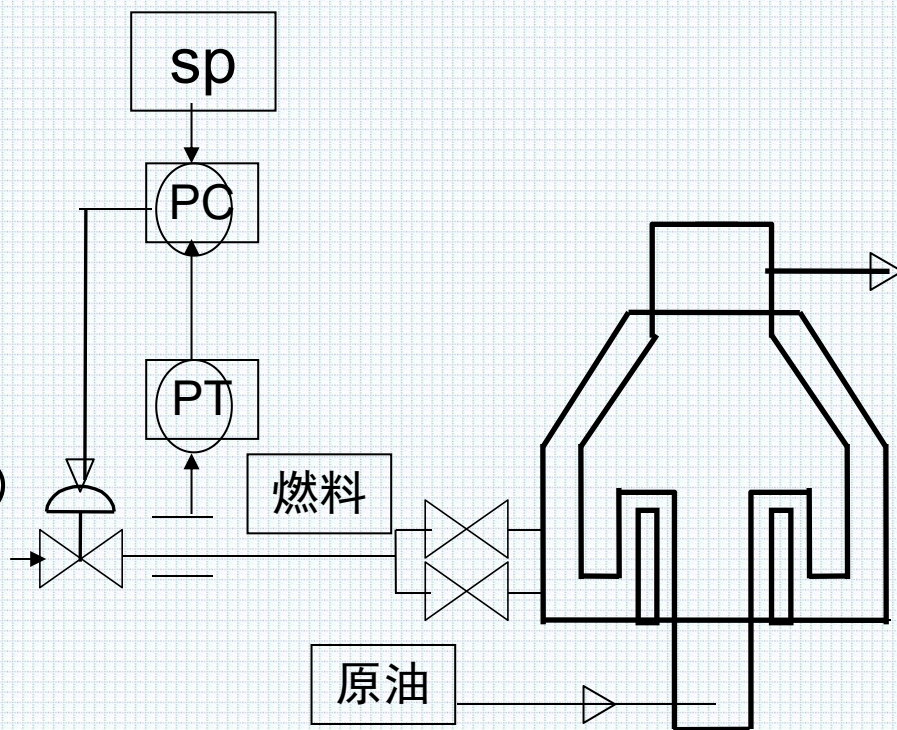
被控参数：燃料管路压力

控制参数：燃料流量

测量变送器：压力传感器 (PT)

执行器：调节阀

控制器：压力控制器 (PC)



系统目的: 燃料管路压力克服 f_2 ，稳定在设定值。

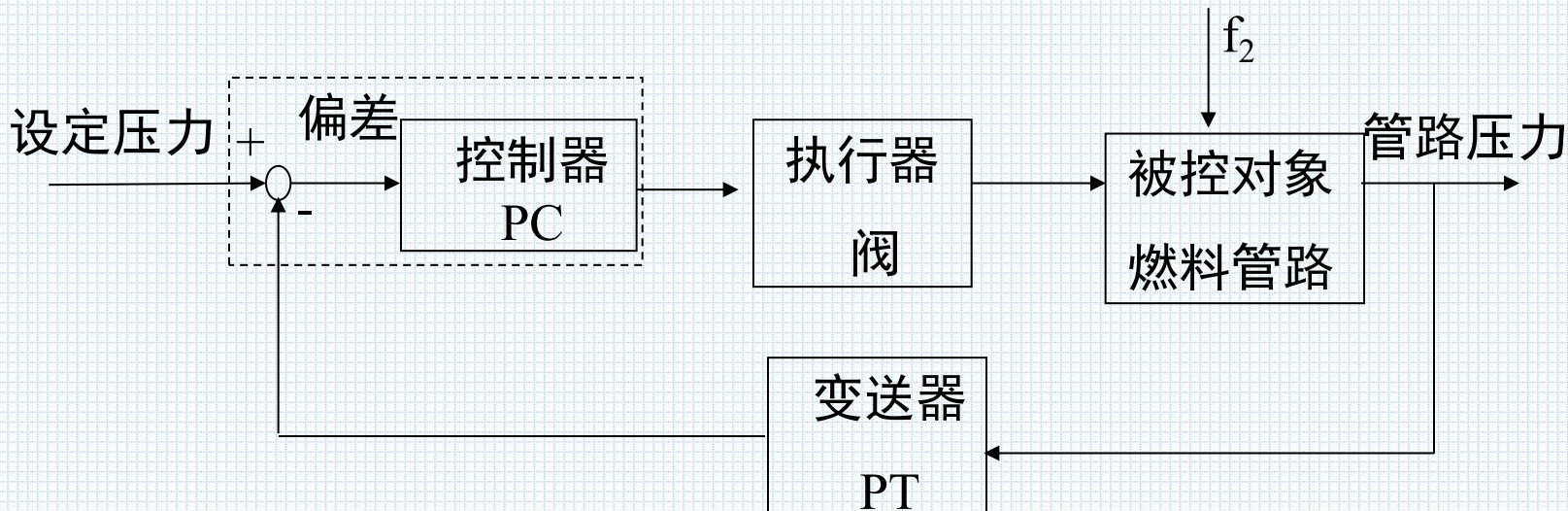
4.3 前馈-反馈控制技术



4.2.2 串级控制的结构原理

1. 加热炉出口温度单回路控制

管路压力控制方框图：

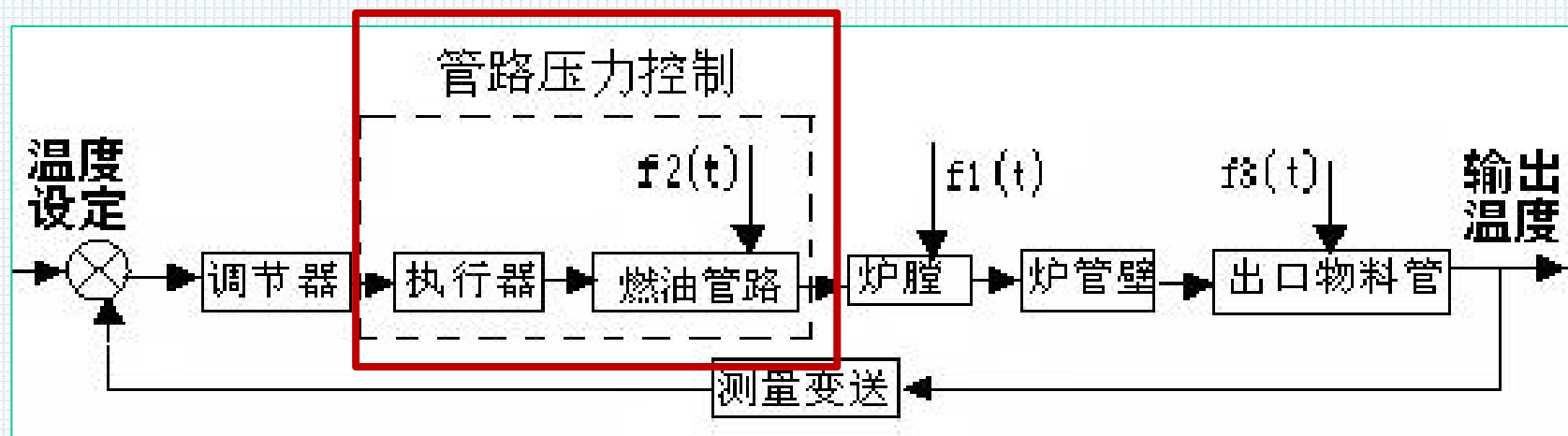
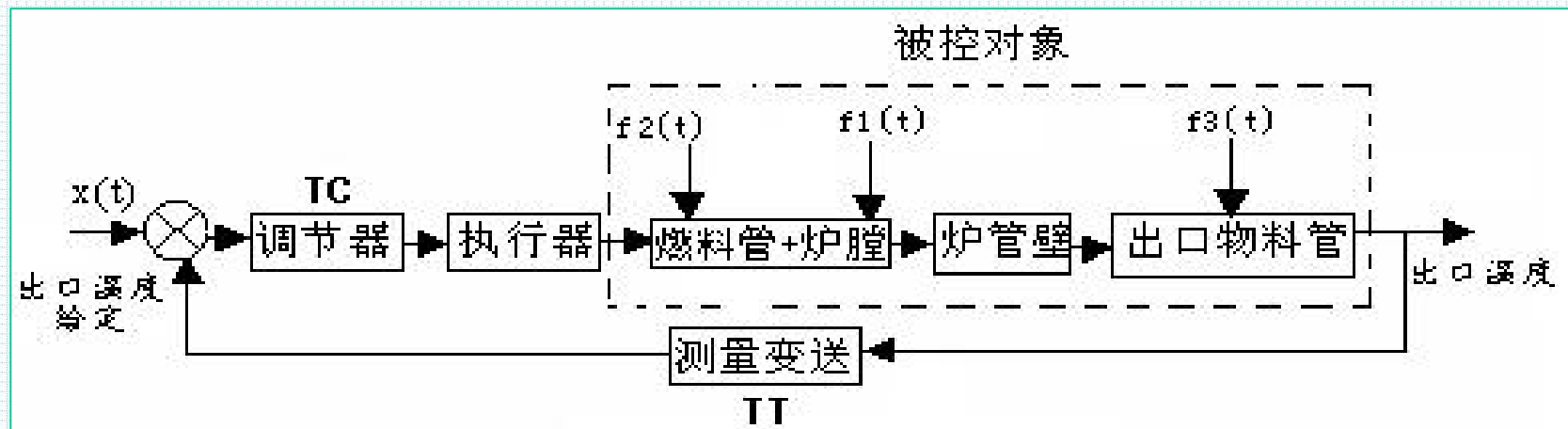


系统目的: 燃料管路压力克服 f_2 , 稳定在设定值。

4.3 前馈-反馈控制技术



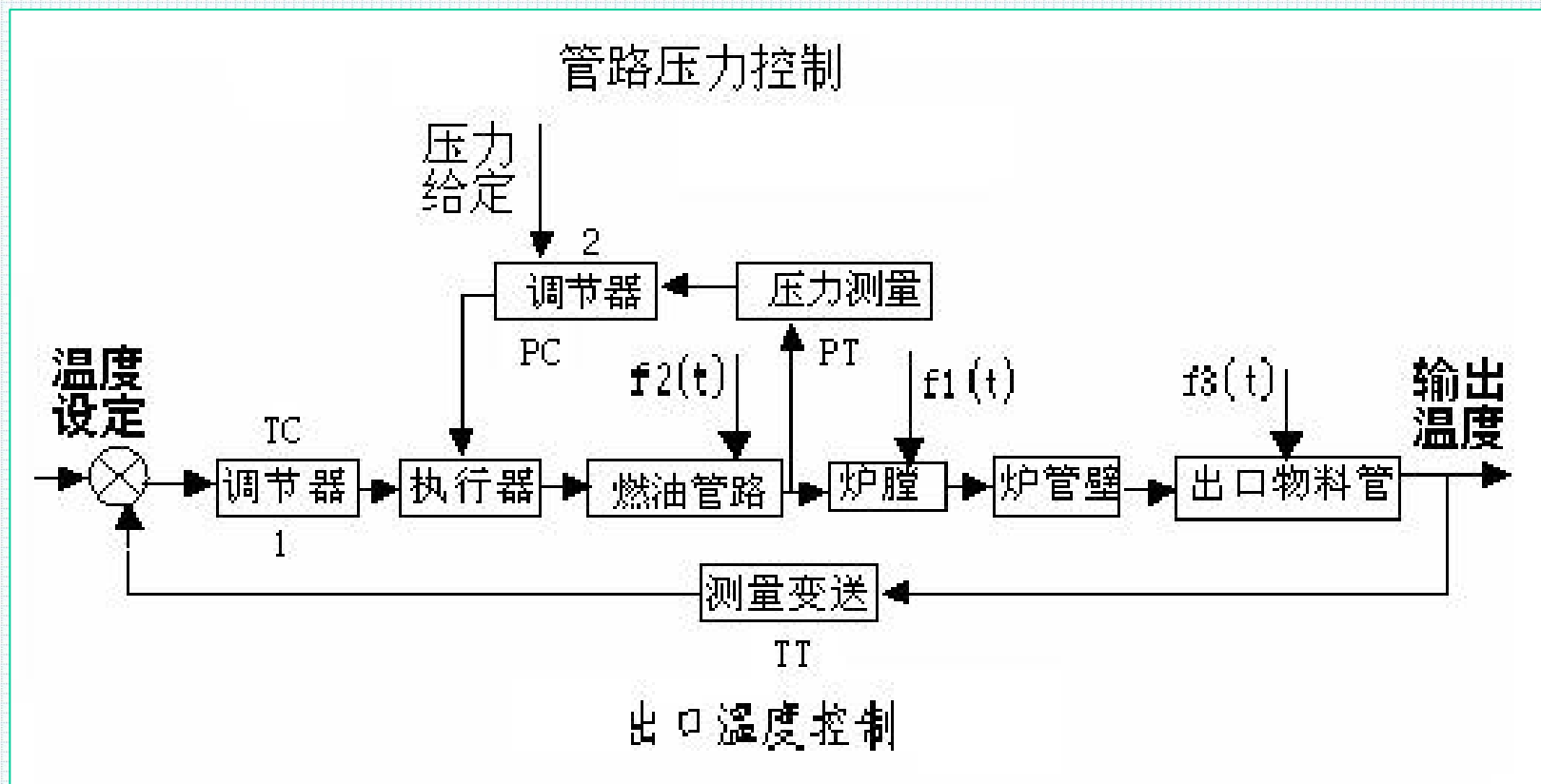
4.2.2 串级控制的结构原理



4.3 前馈-反馈控制技术



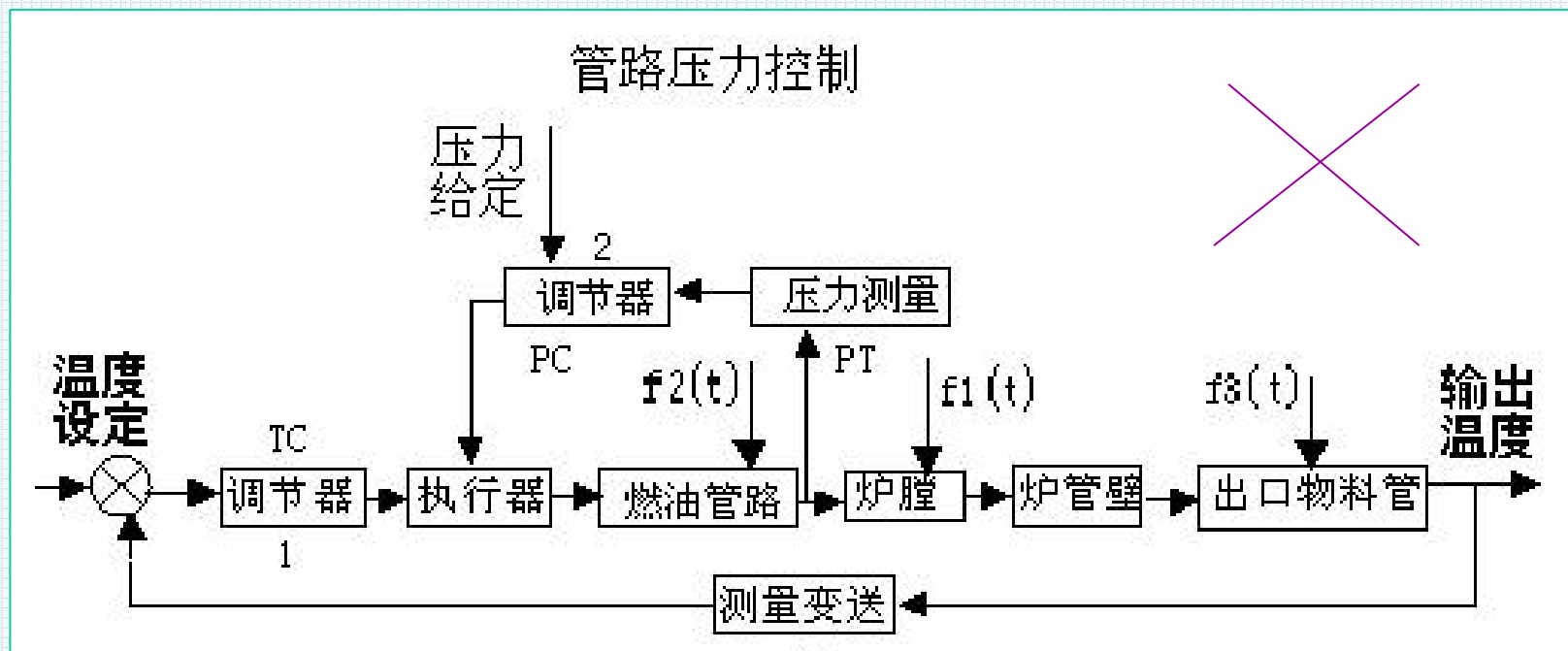
4.2.2 串级控制的结构原理



4.3 前馈-反馈控制技术

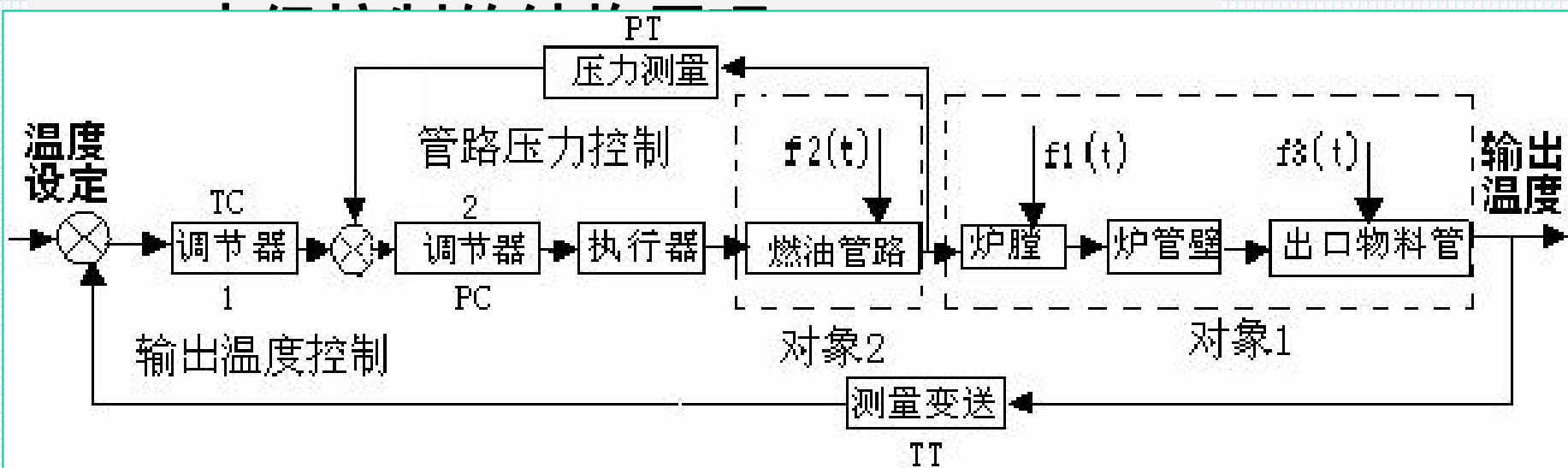


4.2.2 串级控制的结构原理



**执行器只有一个，如何听从两个调节器的调节？
方案不可行。**

4.3 前馈-反馈控制技术



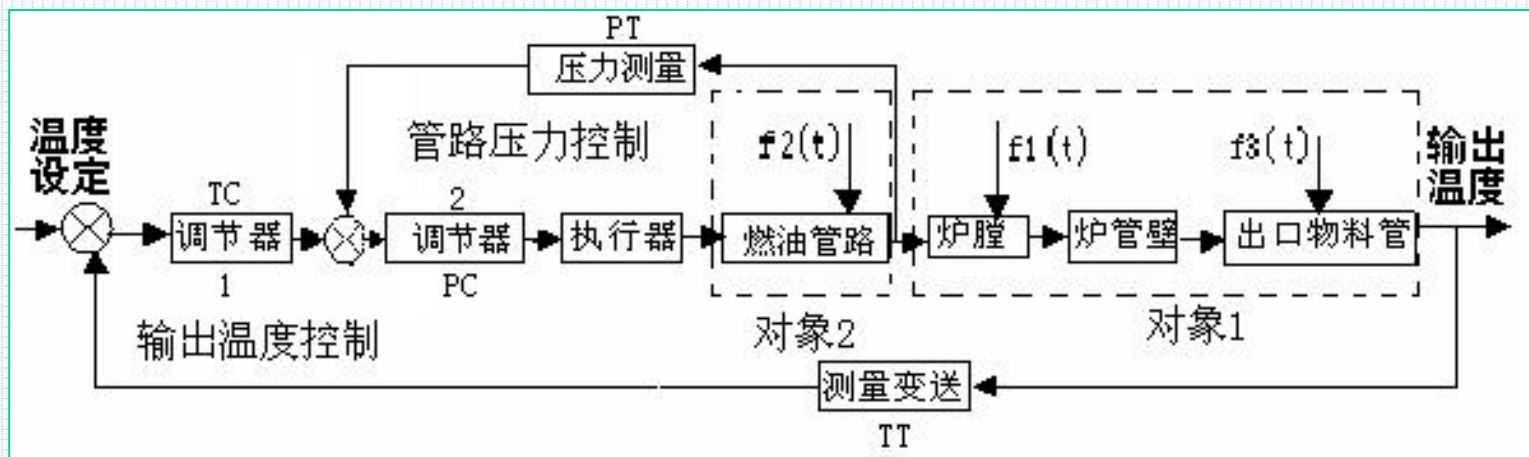
- 1、**压力控制回路（内路）**目的是保证管路中压力稳定，即保证管路中流量稳定。给定值实际是要求流量大小。
- 2、**调节器2**是要求调节阀的开度，就是对应的燃料流量的要求给定值。
- 3、因此，把调节器1的输出作为压力控制回路的给定值。
即**调节器1输出作为调节器2的给定值。**
- 4、**控制回路作用**:通过调节器2克服压力扰动 $f_2(t)$ ，实现管路实际流量跟踪调节器1的要求流量。

4.3 前馈-反馈控制技术



4.2.2 串级控制的结构原理

2. 加热炉出口温度串级控制

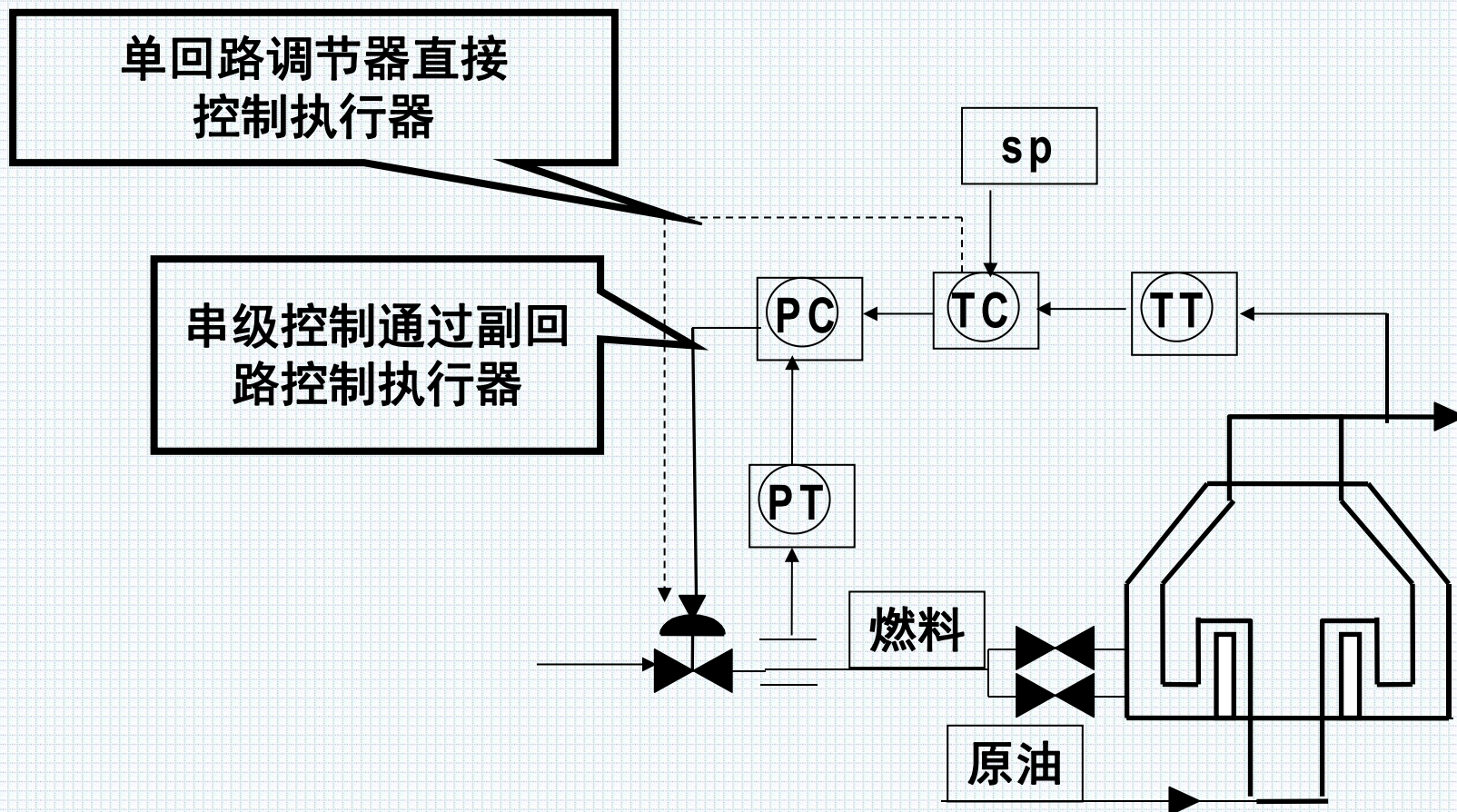


- ◆ 调节器1控制输出作为调节器2压力给定值。
- ◆ 一个执行器完成流量调节。
- ◆ 压力控制回路克服 $f_2(t)$ 保证流量稳定且快速跟随调节器1的给定值(随动控制)
- ◆ 温度控制回路实现温度设定控制(定值控制)。

4.3 前馈-反馈控制技术

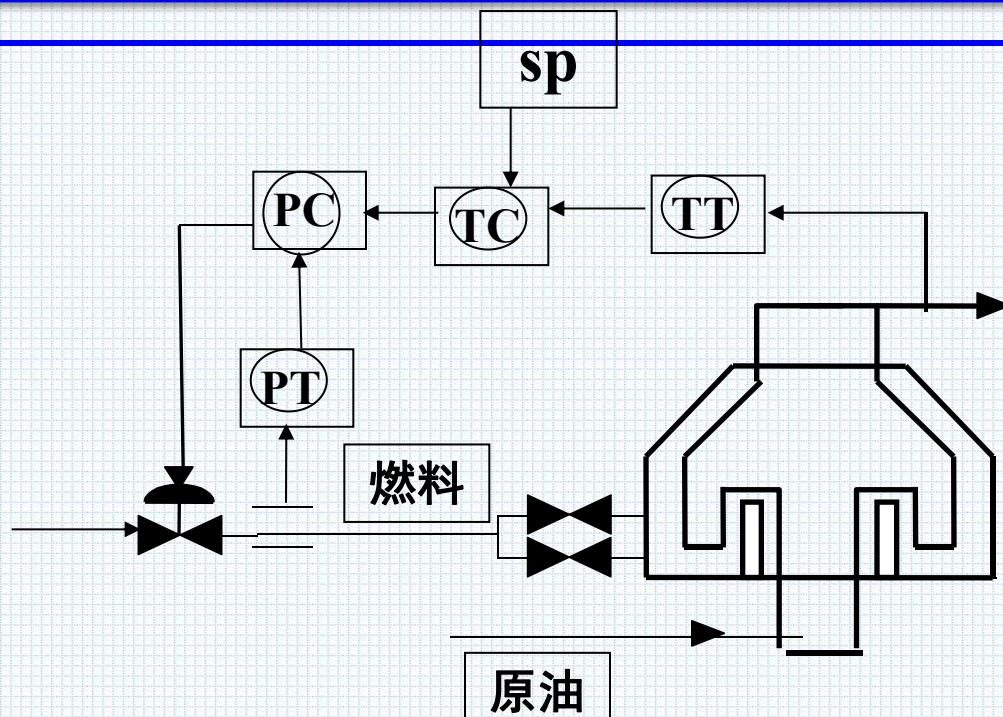


4.2.2 串级控制的结构原理

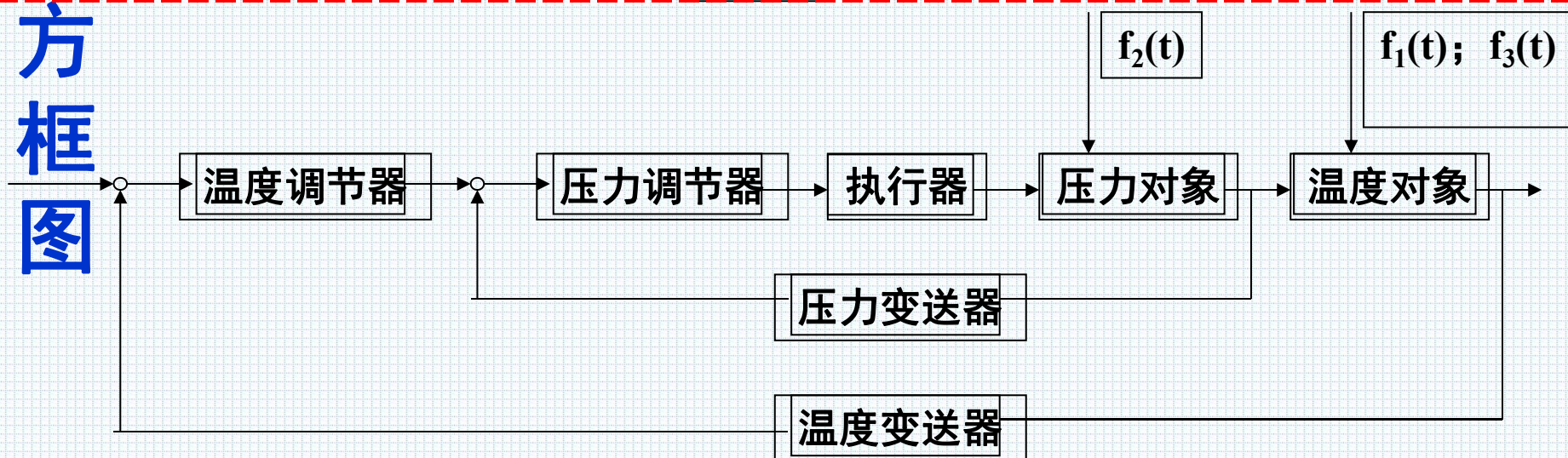


4.3 前馈-反馈控制技术

结构图



方框图

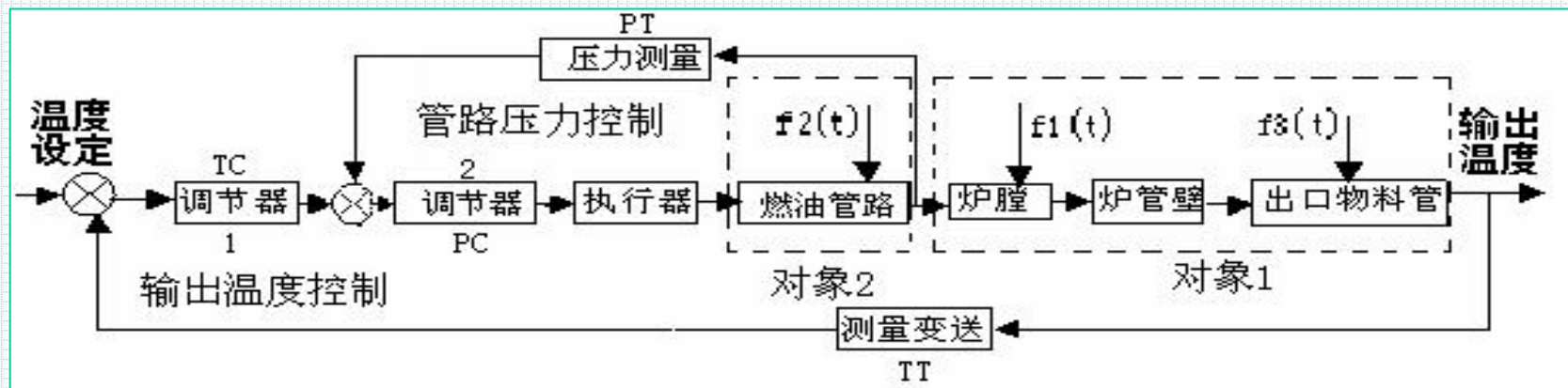


4.3 前馈-反馈控制技术



4.2.2 串级控制的结构原理

3.串级控制系统各部分名称



- ◆ 主回路:温度控制回路
- ◆ 主调节器: TC
- ◆ 主被控对象:炉膛,炉管壁,出口物料管
- ◆ 主被控变量: 输出温度
- ◆ 测量变送: TT
- ◆ 一次扰动: $f_1(t)$, $f_3(t)$

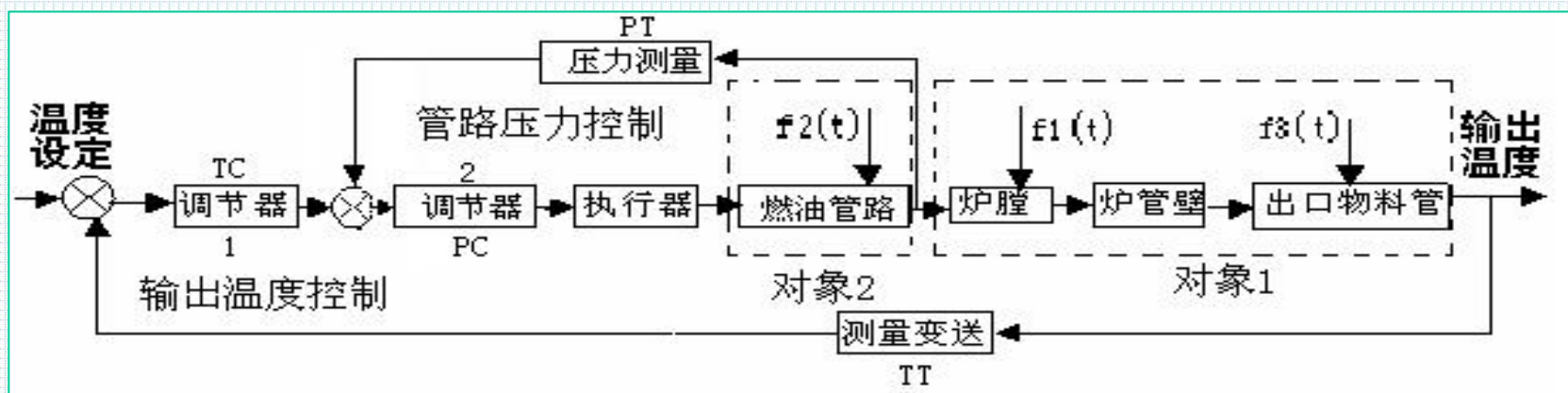
- ◆ 副回路:压力控制
- ◆ 副调节器: PC
- ◆ 副被控对象:燃油管路
- ◆ 副被控变量:燃油管路压力
- ◆ 测量变送:PT
- ◆ 二次扰动: $f_2(t)$

4.3 前馈-反馈控制技术



4.2.2 串级控制的结构原理

4.串级控制系统结构特点



- **被控对象被分成两个部分**，分别是压力对象和温度对象。两部分对象是串联的关系。（被控对象是串联可分的）
- 系统有两个闭环回路，分别是压力控制和温度控制回路，为双回路控制系统，**称为主回路和副回路**。
- **有两个调节器**，主调节器（主回路）和副调节器（副回路），并且串联工作：主调节器的输出作为副调节器的给定值输入。
- 系统只有**一个执行器**。

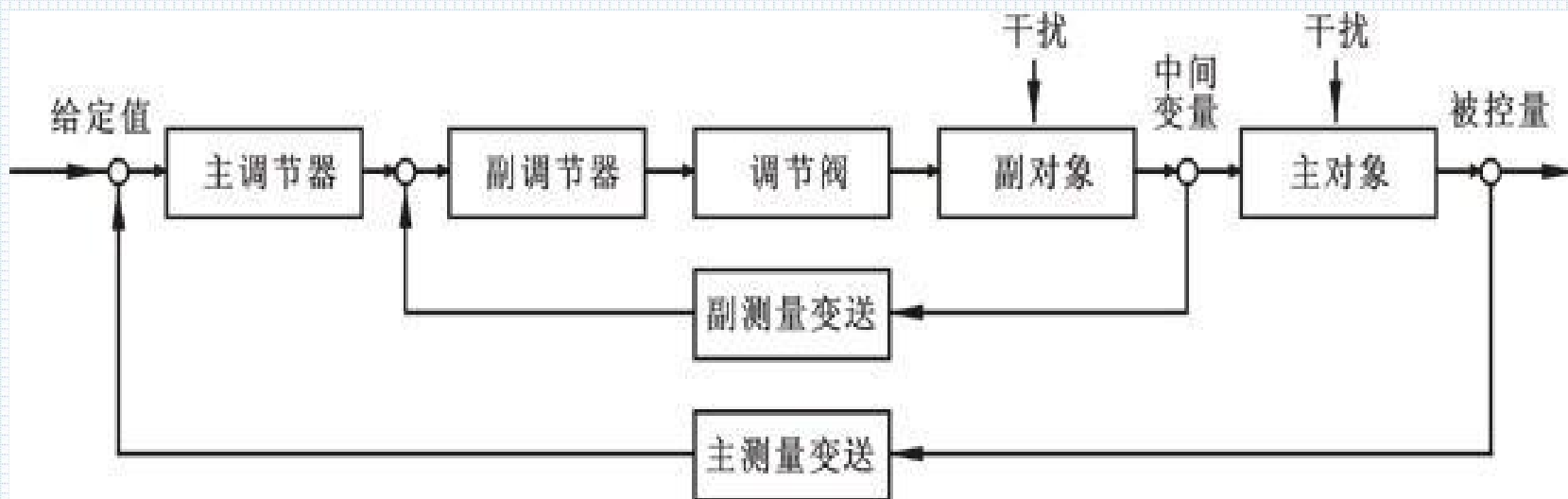
4.3 前馈-反馈控制技术



4.2.2 串级控制的结构原理

4.随堂练习

- 定义：串级控制系统是由其结构上的特征而得名的。它是由主、副两个控制器串接工作的。



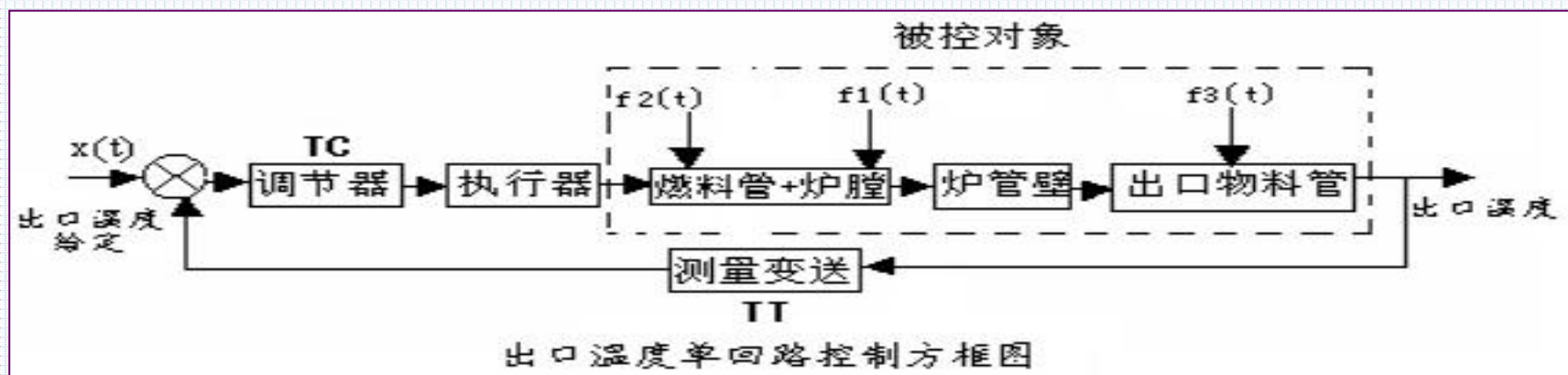
串级控制系统方框图

4.3 前馈-反馈控制技术



4.随堂练习

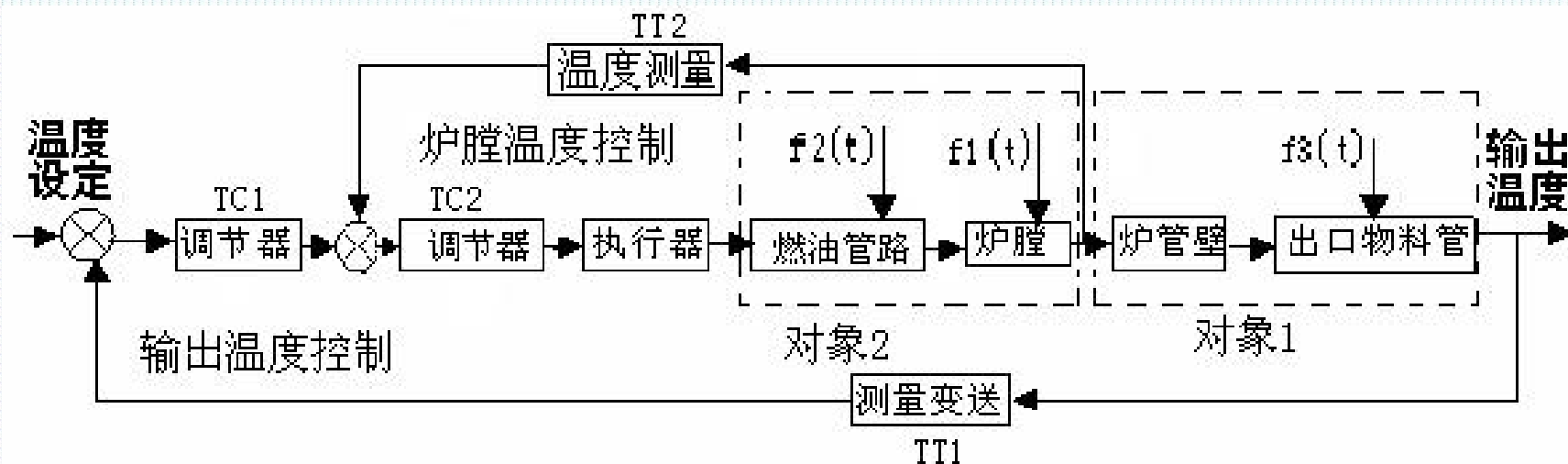
炉管壁温度受扰动较大（做为一个控制点），设计串级控制系统，并画出串级控制方框图和结构图。



4.3 前馈-反馈控制技术



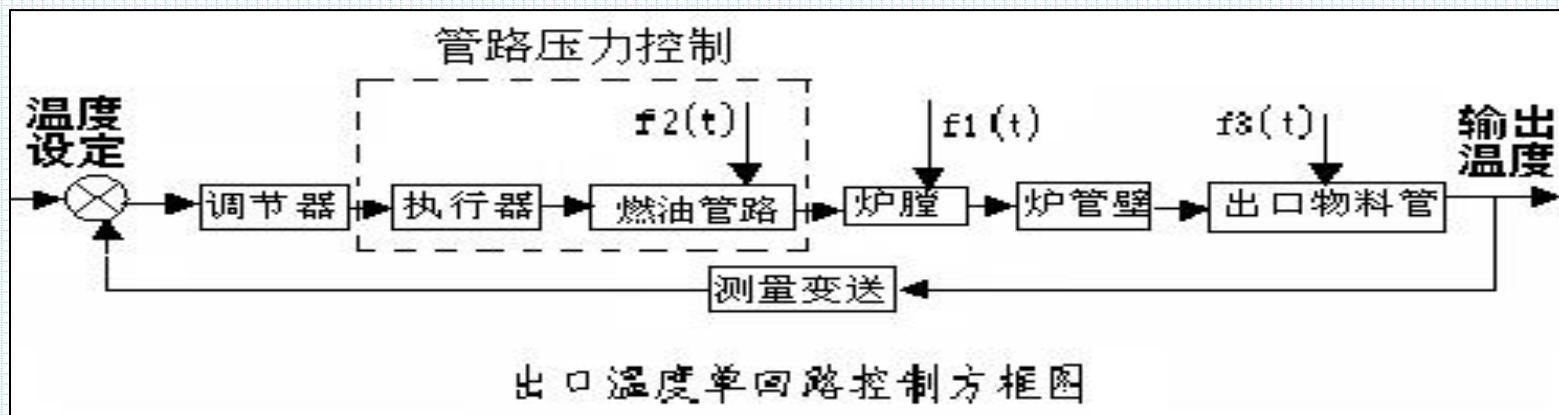
4.随堂练习



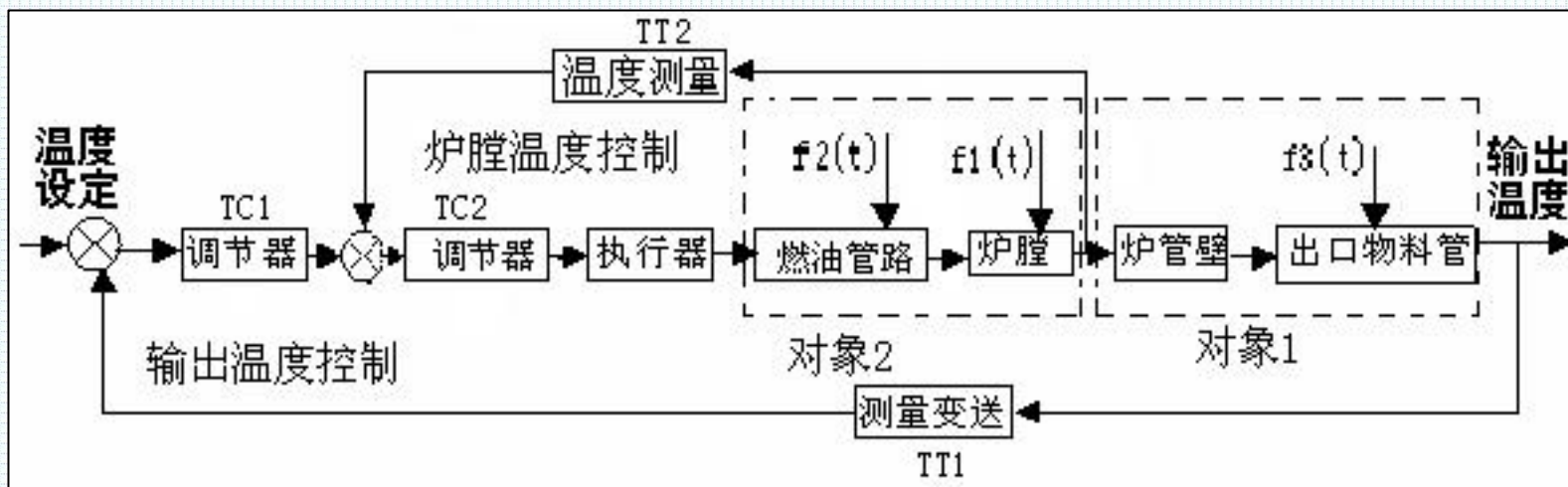
- 主回路:输出温度控制
- 主控制器: TC1;
- 主被控对象:炉管壁,出口物料管
- 主被控变量: 输出温度;
- 测量变送: TT1
- 一次扰动: $f_3(t)$

- 副回路:炉膛温度控制
- 副控制器:TC2;
- 副被控对象:燃油管路,炉膛
- 副被控变量:炉膛温度;
- 测量变送:TT2
- 二次扰动: $f_1(t)$, $f_2(t)$

4.3 前馈-反馈控制技术



如何实现能够克服炉膛壁扰动的加热炉出口温度控制系统？



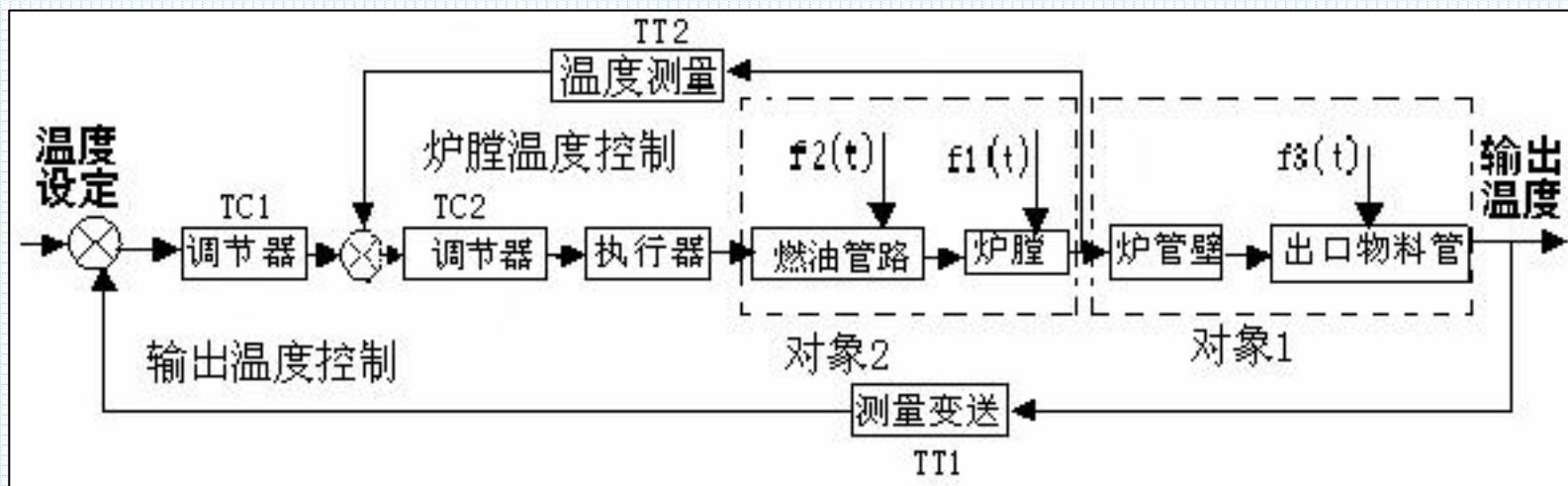
4.3 前馈-反馈控制技术



4.2.3 串级控制系统工作过程

工作过程：是指在系统处于稳定工作情况下，克服一次，二次扰动的系统过渡过程。

例如：出口温度—炉膛温度串级控制系统。



4.3 前馈-反馈控制技术

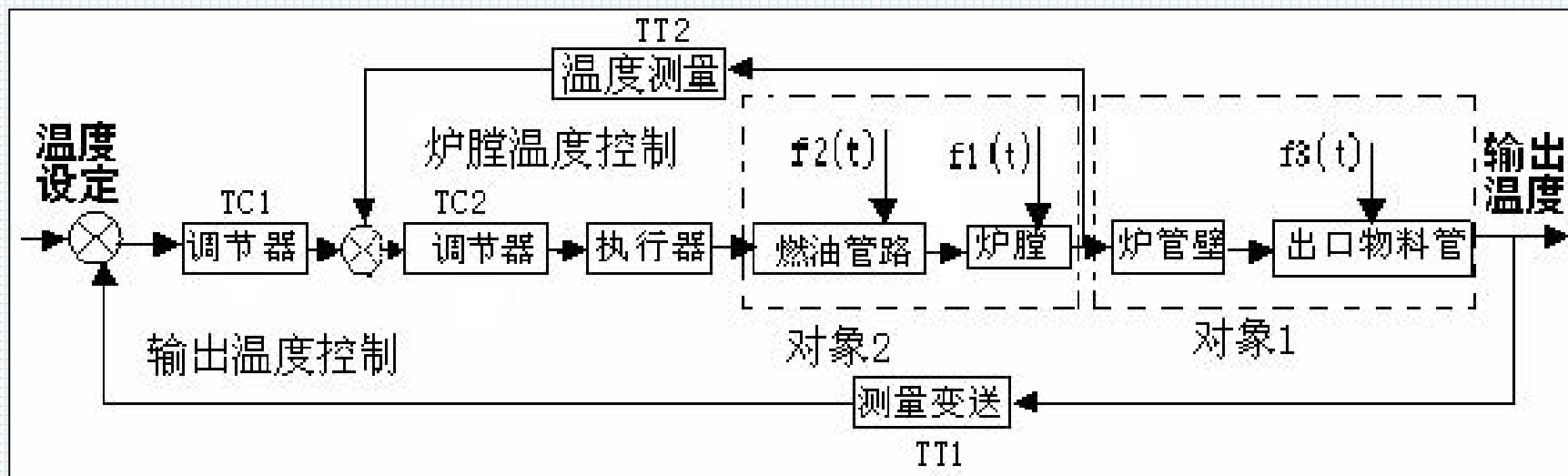


1.二次干扰作用于副环

❖ 副环工作过程:

❖ 二次扰动 f_2 燃油压力波动使得流量 $F \uparrow \rightarrow TT2 \uparrow \rightarrow TC2 \downarrow$ (反作用) $\rightarrow V \downarrow$ (气开阀) $\rightarrow F \downarrow$

❖ 副环具有克服环中扰动 (二次扰动) 能力。对副环外扰动没有抑制作用。



4.3 前馈-反馈控制技术

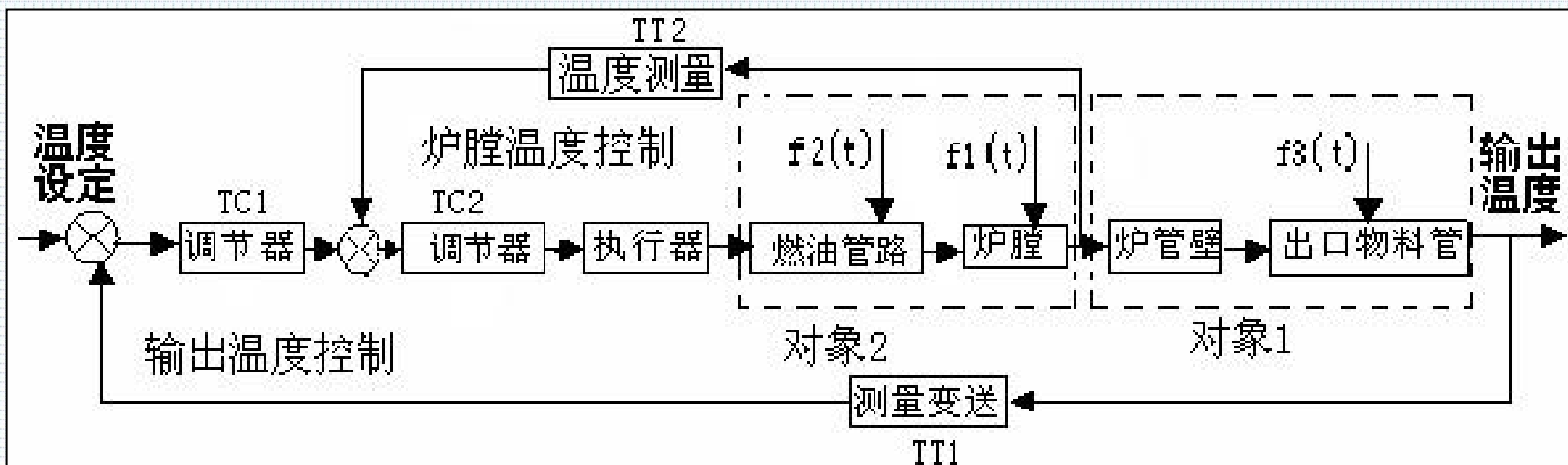


1.二次干扰作用于副环

❖主环工作过程：

❖副环中扰动由副环调节，副环调节过程中输出变化 $TT2 \uparrow \rightarrow TT1 \uparrow \rightarrow TC1 \downarrow$ (反作用) $\rightarrow TC2 \downarrow \rightarrow V \downarrow$ (气开阀) $\rightarrow TT2 \downarrow \rightarrow TT1 \downarrow$

❖二次扰动克服是由副环和主环共同完成的，副环为主，粗调。主环为辅，细调。



1.二次干扰作用于副环

- 二次扰动克服工作过程：
 - 假如在副环中有二次扰动（如：燃油压力 f_2 ，原料油流量波动 f_1 ）时，副调节器TC2立即进行调节，使得二次扰动被副环基本克服。
 - 二次扰动粗调
 - 副环二次扰动调节中引起的副环输出TT2变化，其输出波动再由主调节器TC1的主环进行调节。
 - 二次扰动细调
 - 二次扰动经过副环作用，对主环的影响已经远小于其直接作用于主环的影响。

副环具有抑制二次扰动的作用。

4.3 前馈-反馈控制技术



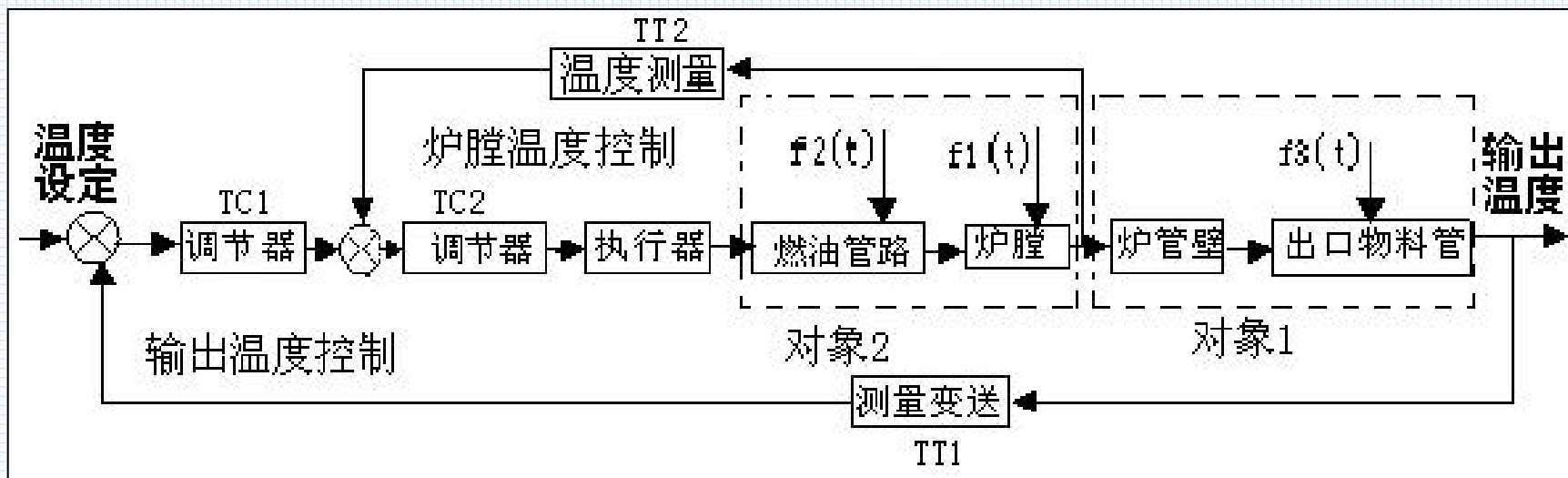
2. 一次干扰

❖ 主环工作过程:

一次干扰 f_3 使得输出温度 $TT1 \uparrow \rightarrow TC1 \downarrow$ (反作用) $\rightarrow TC2$ 给定 $\downarrow \rightarrow TT2 \downarrow \rightarrow TT1 \downarrow$

❖ 副环过程:

$TC2$ 给定 $\downarrow \rightarrow V$ (气开阀) $\downarrow \rightarrow F \downarrow \rightarrow TT2 \downarrow$

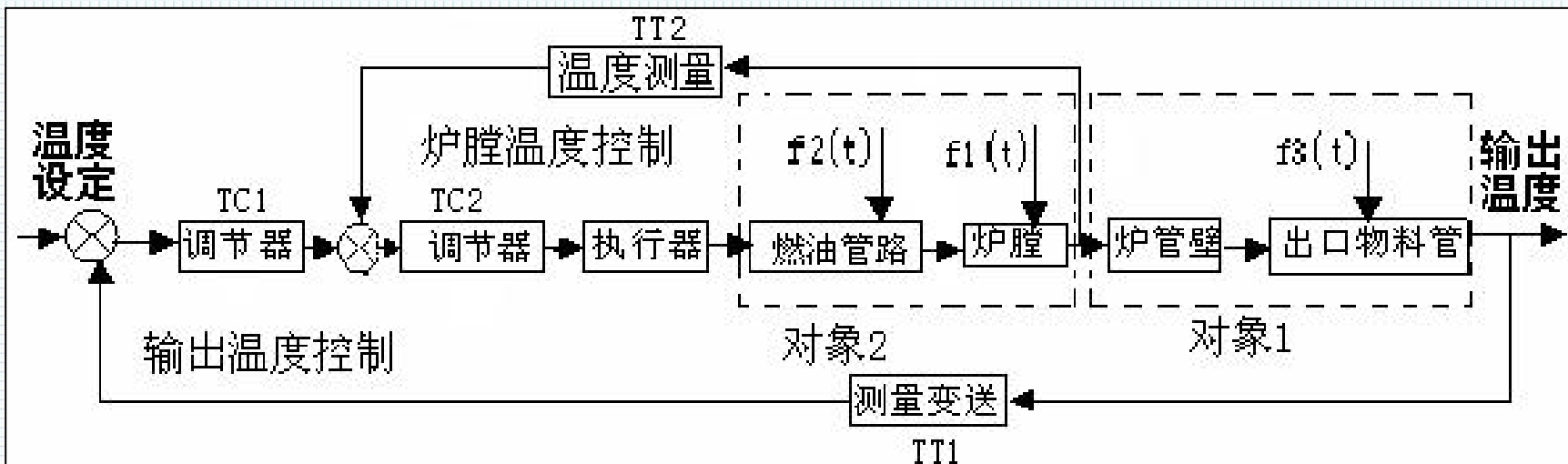


4.3 前馈-反馈控制技术



4.2.3 串级控制系统工作过程

- **二次扰动**经过副环(粗调)，消除了大部分二次扰动对系统的影响，余下的经过主环(细调)克服。
- 副环使得系统具有两次克服二次扰动的过程。
- **一次扰动**由主环克服，副环实现跟随作用。
- 一次、二次扰动同时作用时，相同时相互叠加，调节作用增强；影响相反时相互抵消，调节作用减弱。



4.2.3 串级控制系统工作过程

串级控制系统的主回路是一个定值控制系统，可以按照单回路系统的设计原则进行。

副回路设计是串级控制系统设计的主要内容。

副回路设计是根据生产工艺要求的具体情况，选择一个合适的副变量，从而组成一个以副变量为被控变量的副回路。

4.3 前馈-反馈控制技术



4.2.3 串级控制系统工作过程

- (1) 使系统中主要干扰包含在副环内。
- (2) 在可能情况下，应使副环包含更多一些的干扰。
- (3) 当对象具有非线性环节时，在设计时应使非线性环节位于副环之中。
- (4) 当对象具有较大纯滞后时，在设计时应使副回路尽量少包括或不包括纯滞后。
- (5) 所设计的副回路需考虑到方案的经济性和工艺的合理性。

总结

主要内容：

4.2.1 串级控制介绍

4.2.2 串级控制的结构和原理

4.2.3 串级控制系统工作过程

学习要求：

1. (4.2.1) 了解串级控制作用和应用：产生、定义和特点。
2. (4.2.2) 掌握串级控制结构和原理：方框图和结构图。
3. (4.2.3) 掌握串级控制调节过程：调节过程和设计方法。
4. 加热炉出口温度串级控制：压力-温度控制，温度-温度控制

4.3 前馈-反馈控制技术



习题：

- 1.什么是串级控制。
- 2.画出一一般串级控制系统的典型方块图，并说出各部分名称及作用。
- 3.串级控制系统有哪些特点？主要使用在哪些场合？
- 4.串级控制系统中主、副变量应如何选择？
- 5.为什么说串级控制系统中的主回路是定值控制系统，而副回路是随动控制系统？
- 6.怎样选择串级控制系统中主、副控制器的控制规律？
- 7.能够根据给定控制要求进行串级控制系统设计。