



第8章 多回路系统的设计

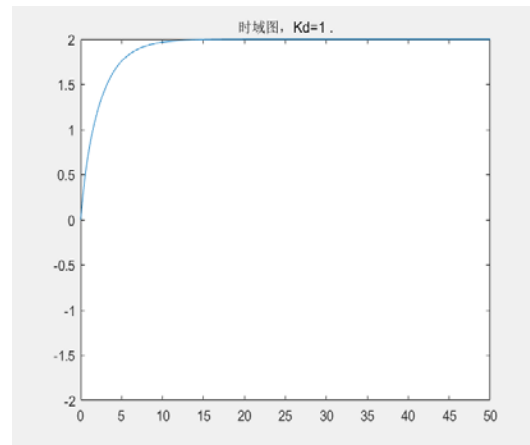
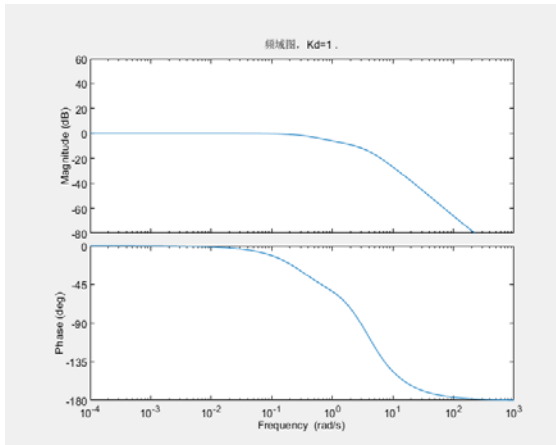
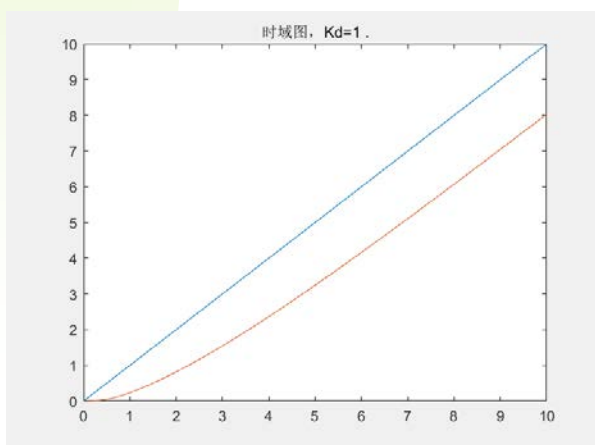
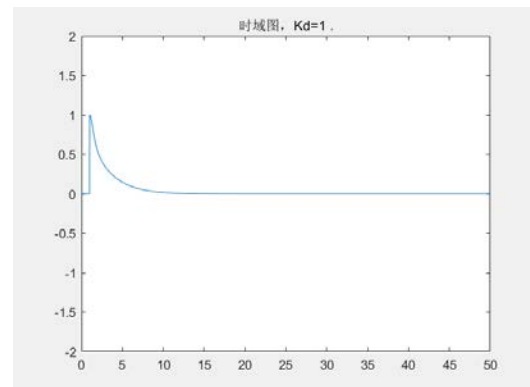
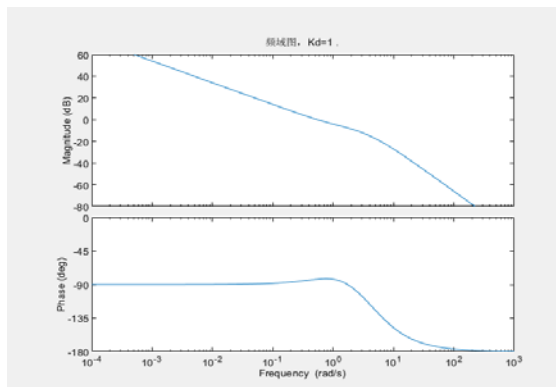
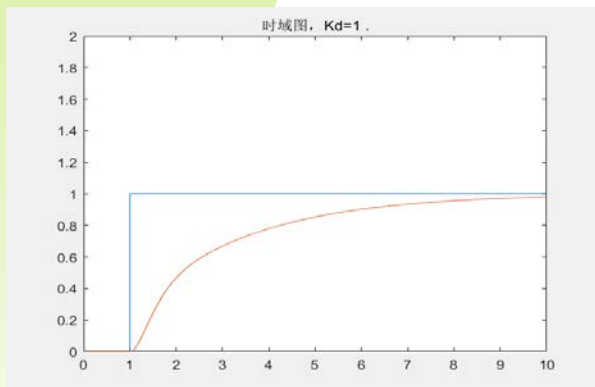
——2023年春季学期

授课教师： 马 杰（控制与仿真中心）
霍 鑫（控制与仿真中心）
马克茂（控制与仿真中心）
陈松林（控制与仿真中心）



展示篇

质疑的精神 (Kd的作用)



要敢于怀疑一切，验证知识的路上一定会有更多的收获，即使你的怀疑是错的。不要怕自己错，而不敢怀疑。



回顾篇

过程控制的定义和特点

一般是指石油、化工、冶金、机械、电力、轻工、建材、原子能等工业部门生产过程的**自动检测、监督和控制**，以达到实现各种优化的技术经济指标、提高**经济效益和劳动生产率、节约能源、改善劳动条件、保护环境卫生**等目的。

□ 工业生产对过程控制的要求

- 安全性 经济性 稳定性

□ 过程控制的任务

在了解、掌握工艺流程和生产过程的静态和动态特性的基础上，根据要求应用理论对控制系统进行分析和综合，最后采用现代化技术手段加以实现。

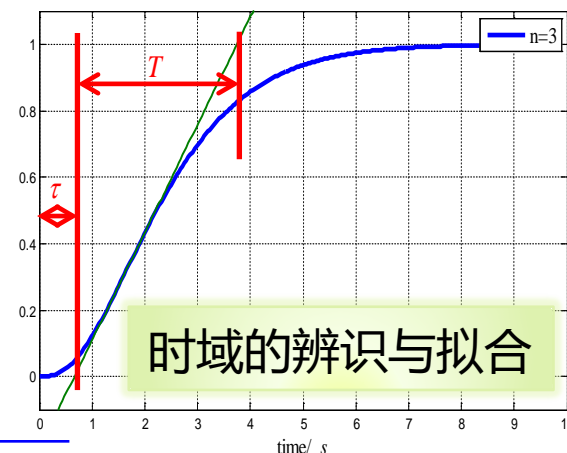


回顾篇

过程控制系统的模型特点

□ 单容对象—— $G(s) = \frac{R}{Ts + 1} e^{-\tau s}$

□ 多容对象—— $G(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1) \dots (T_ns + 1)}$



□ 存在容积滞后 τ_e 和传输滞后 τ_0 —— $\tau = \tau_0 + \tau_e$

容积滞后：由于存在多个容积引起的响应特性滞后

传输滞后：被测量的测量需要一段时间后才能准确获得



过程控制系统的指标

□ 误差积分性能指标

- 衰减度 衰减比
- 最大动差（超调量） 残余偏差
- 调节时间 振荡频率

针对特定输入的
分离指标

综合指标

- 平方误差积分

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

- 有模型时，可以将指标与模型结合，采用合适的控制方法直接达到指标要求（最后也要进行验证）；
- 无模型时，则需要经验，反复调节和试凑，满足指标要求或者尽量优化指标。



过程控制系统的PID设计原则

考虑到过程控制系统中含有**纯滞后环节**，相角衰减很快，PID设计时可参考如下原则。

先用**比例**增速度（**定穿频**），再用**微分**降超调（**补相角**），再用**积分**提精度（**改型别**）。调参应该满足右侧的关系。

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s}$$

$$K_P \Leftrightarrow \omega_n \Leftrightarrow \omega_c$$



$$\frac{1}{T_D} > \omega_c$$



$$\frac{1}{T_I} = \left(\frac{1}{2} \sim \frac{1}{4} \right) \omega_c$$



回顾篇

PID参数整定方法

1. 理论计算整定（依赖于数学模型，科学严谨）

基于数学模型（传递函数、频率特性），按性能指标进行计算，得到整定参数。

2. 工程整定（傻瓜式调参，照葫芦画瓢）

无需模型，根据响应曲线、特征参数，按工程经验数据或经验公式得到整定参数。

3. 直接经验调整（按照一定原则，依赖于个人经验）

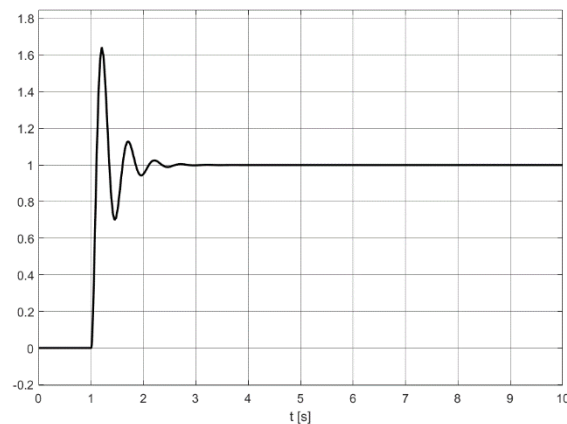
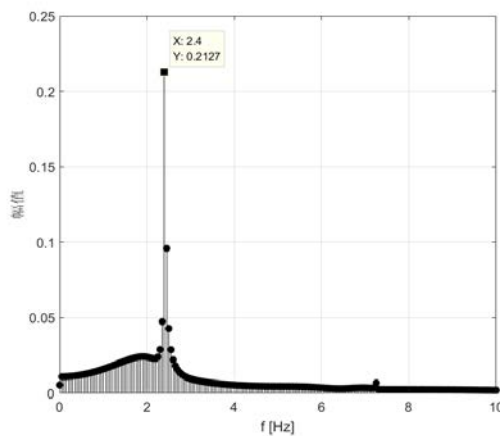
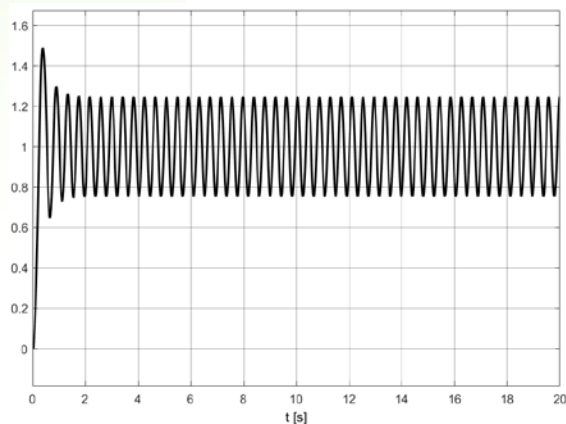
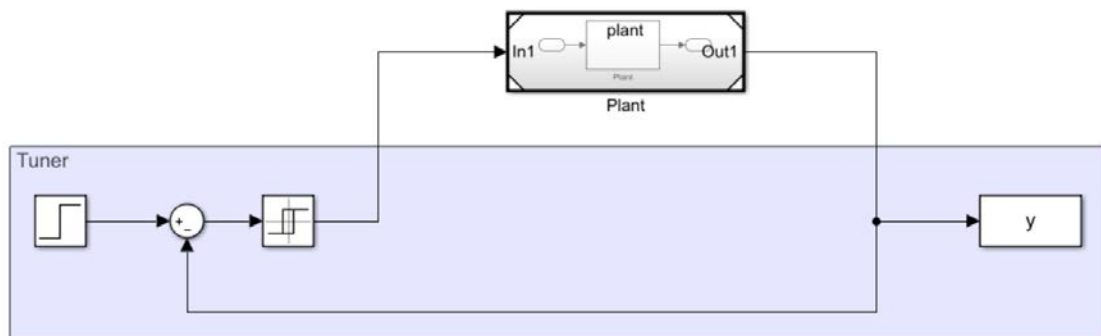
参照性能指标，按实际运行曲线，结合PID控制规律直接调参。



提升篇

自整定PID设计

把规则变成代码，让控制设计自动化



$$\omega_g = 2.4 \text{ Hz}$$

$$\begin{aligned} |G(jw_g)| &= \left| \frac{1}{N(A_0)} \right| \\ &= \left| \frac{\pi A_0}{4d} \right| \\ &= \frac{3.14 * 0.2127}{4 * 10} = -35.5 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$K_p = 0.6h = 0.6 * 35.5 \text{ dB} = 35.9$$

$$K_i = K_p / 0.5T_c = 2 * K_p * 2.4 = 172.3$$

$$K_d = K_p (0.125T_c) = K_p * 0.125 / 2.4 = 1.9$$



如何成为一名优秀的控制工程师（3）

高阶认知

- 能够区分好处和弊端；（P、I、D、超前、滞后、DOB、ADRC）
- 能够区分整体和局部；（方案、选型；算法、参数）
- 能够区分理论与实际；（理论简洁漂亮，实际复杂繁琐）
- 能够区分内因和外因；（扰动、噪声、摄动）
- 能够区分绝对与相对；（指标，频带，优劣）
- 能够区分主要和次要；（稳定性>性能，精度>超调，抗扰>抑噪）
- 能够区分信号与系统；（关心的是信号，设计的是系统）
- 能够区分结构与参数；（调整参数还是改变结构）



如何成为一名优秀的控制工程师（4）

高阶能力

- 能够提出合理而全面的性能指标；
- 能够进行前期的方案设计和论证；
- 能够在系统设计之初上工治未病；
- 能够解释各类现象解决各种难题；
- 能够找到突破约束与限制的方法；
- 能够用控制之外的方法解决问题；
- 能够灵活使用各种方法提升性能；
- 能够应用前沿和高级的控制方法；
- 能够针对特殊问题提出创新方法；
- 能够举一反三融会贯通触类旁通；

► 工程师的五个等级

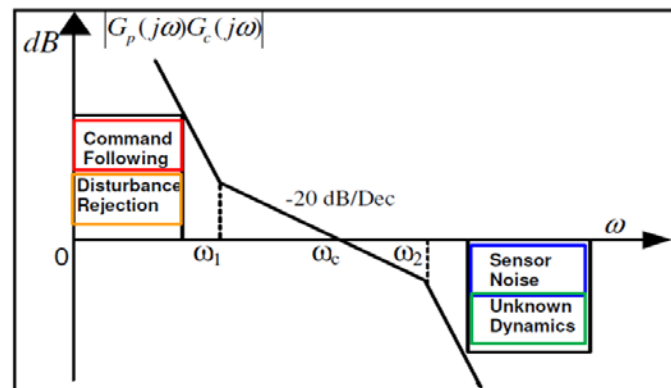
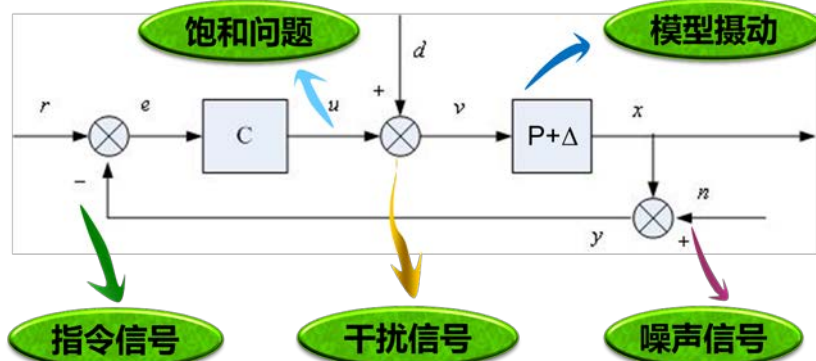




开心篇（知识地图）

一般性设计原则和思想 → 不同的系统 → 共同方法

18
次
课



知识的应用
一般到特殊

因地制宜
活学活用

伺服系统
(运动控制)

调节系统
(过程控制)

特殊到一般

寻找共性

运动控制

多回路控制

过程控制



You are here



学习目标

本节课需要掌握的内容

- 理解多回路控制系统要解决的问题;
- 了解多回路系统的类型;
- 掌握多回路系统设计的原则与方法;
- 加深理解控制系统的设计思路。



Contents

A1

多回路系统

A2

串级调节系统

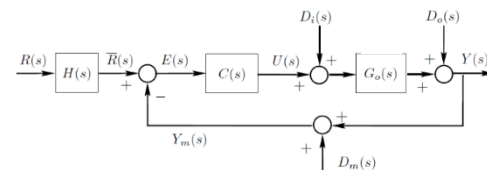
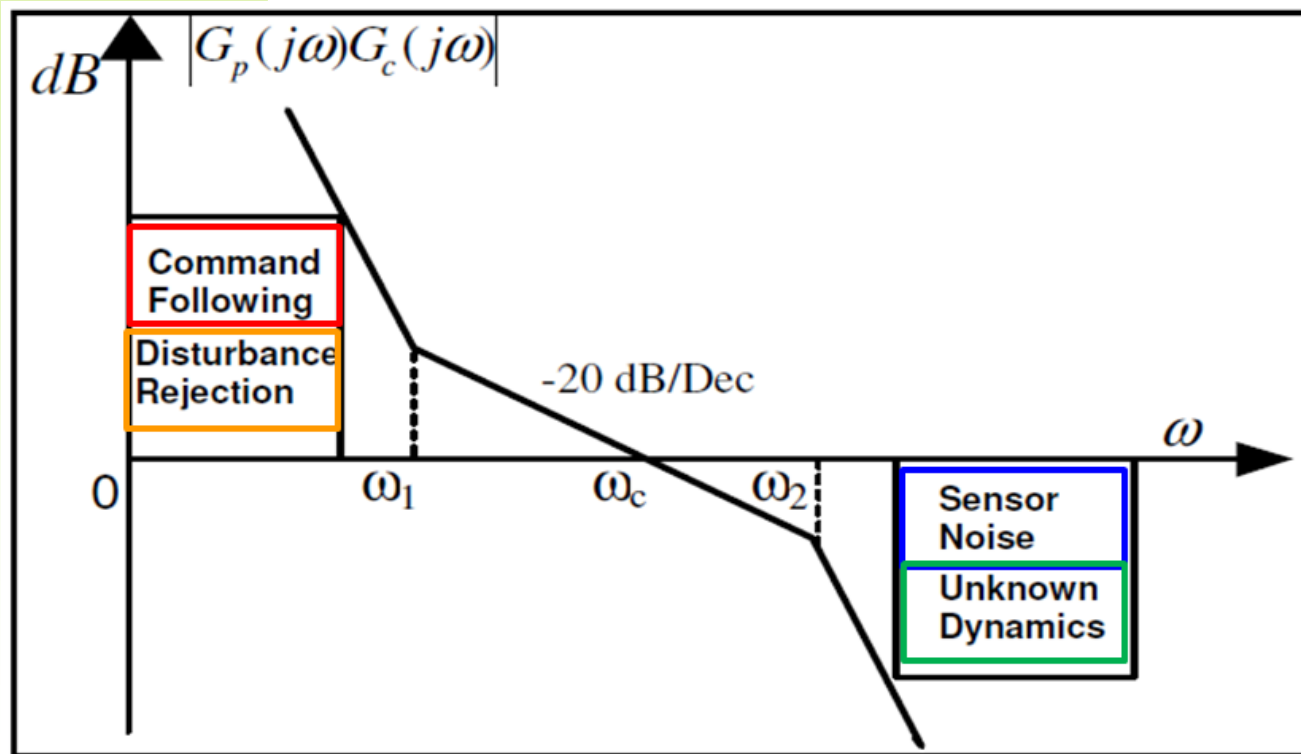
A3

复合控制系统



8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统



单回路设计的局限是什么？

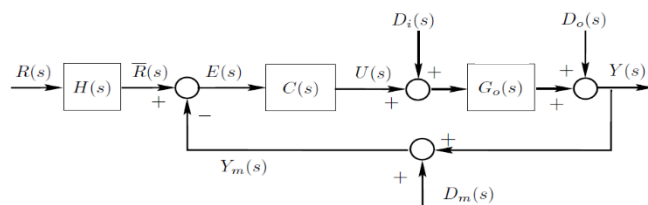


8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

矛盾一（噪声抑制与干扰抑制）

系统中噪声大，输入信号的频谱不宽：要求系统的带宽要窄，但带宽变窄，干扰抑制的效果变差；

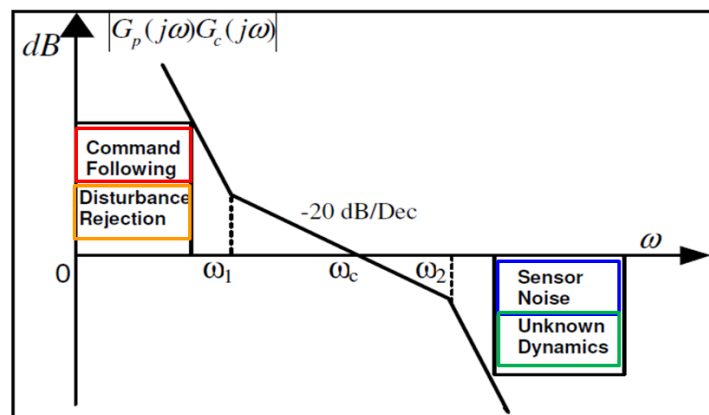


矛盾二（干扰抑制与带宽拓展）

干扰的频谱宽，干扰量大：即使做到了最大带宽，仍有可能满足不了要求；

矛盾三（指令跟踪与带宽拓展）

要求系统的频率响应较宽：系统的带宽却做不到。

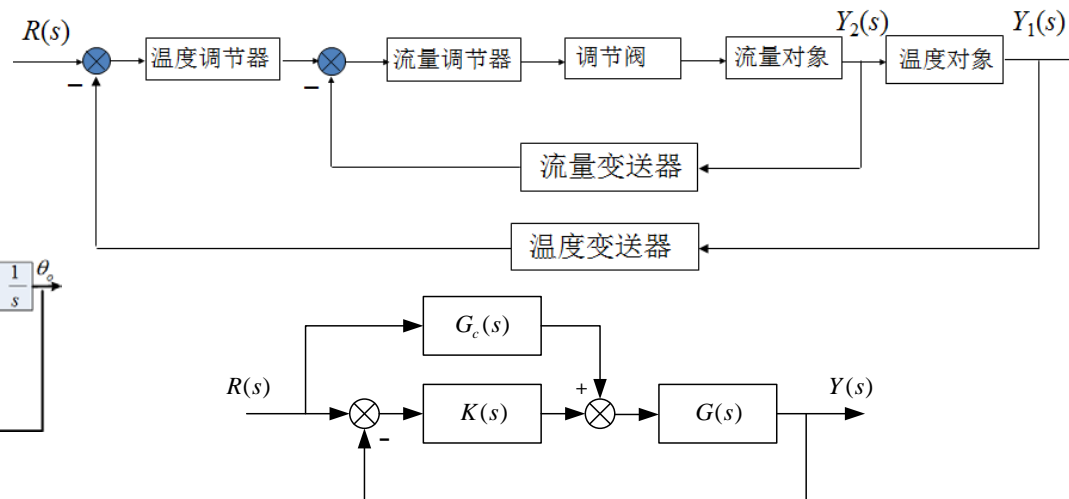
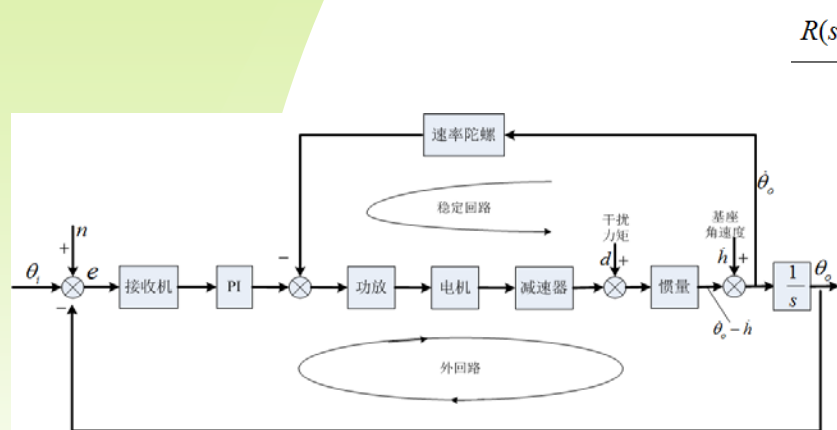




8.1 多回路系统

结构

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统



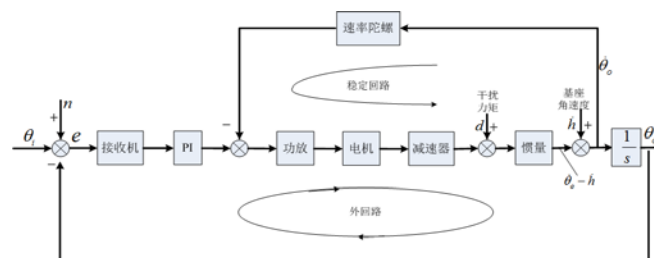
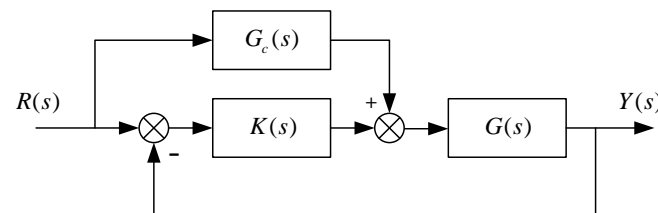
针对单回路系统的局限性，引入一些辅助回路来抑制干扰或改善性能，从而构成多回路系统。

- 用快速回路来抑制扰动或改善带宽
- 主回路用窄带宽的来抑制噪声或满足稳定性



双路控制的设计顺序？

- ☐ A 一定要先设计内回路
- ☐ B 一定要先设计外回路
- ☒ C 满足一定条件下可以不分先后
- ☐ D 任何时候都不分先后



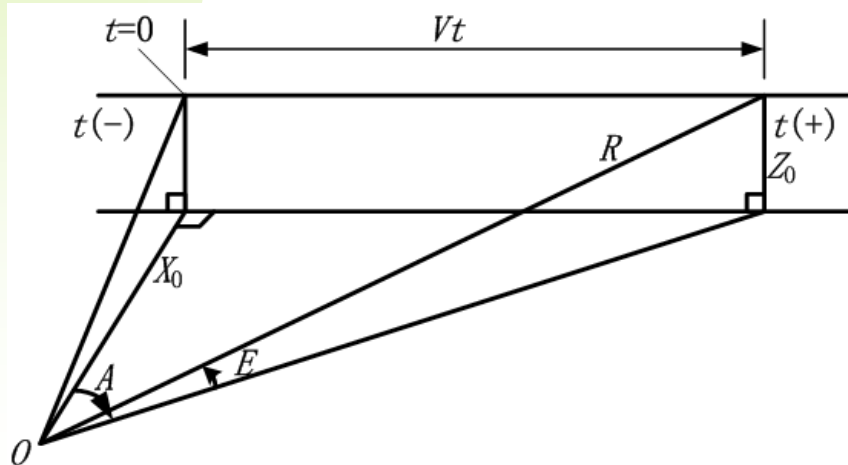
提交



8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

◆ 例1: 舰用雷达跟踪系统





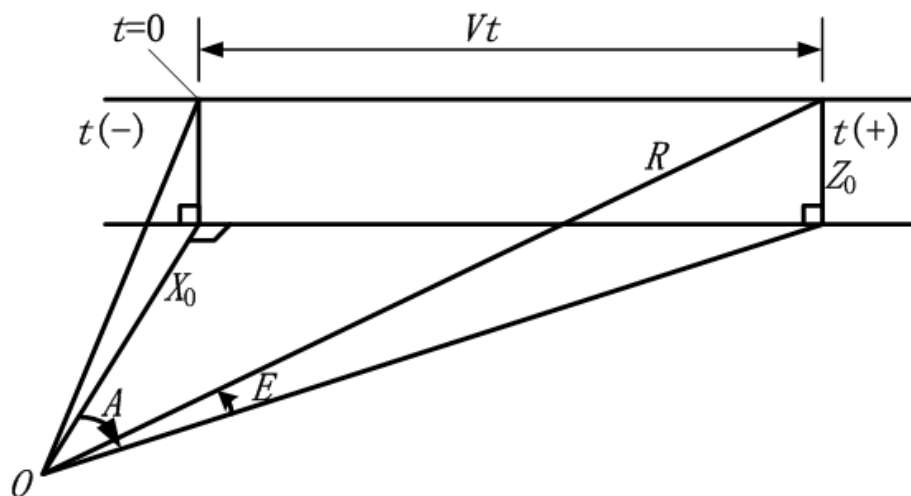
8.1 多回路系统

分析

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

面对的控制问题:

- ❑ 舰船的摇摆干扰 (输出端)
- ❑ 风载力矩干扰 (输入端)
- ❑ 保证目标跟踪精度
- ❑ 雷达热噪声的抑制



工况和指标分析:

需要跟踪的目标飞行速度600m/s，作用距离4-32km，高低角跟踪的均方根误差应该小于 $0.3 \times 10^{-3} \text{rad}$ 。



8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统



元部件的类型:

□ 驱动元件: 电机+减速器

□ 测量元件:

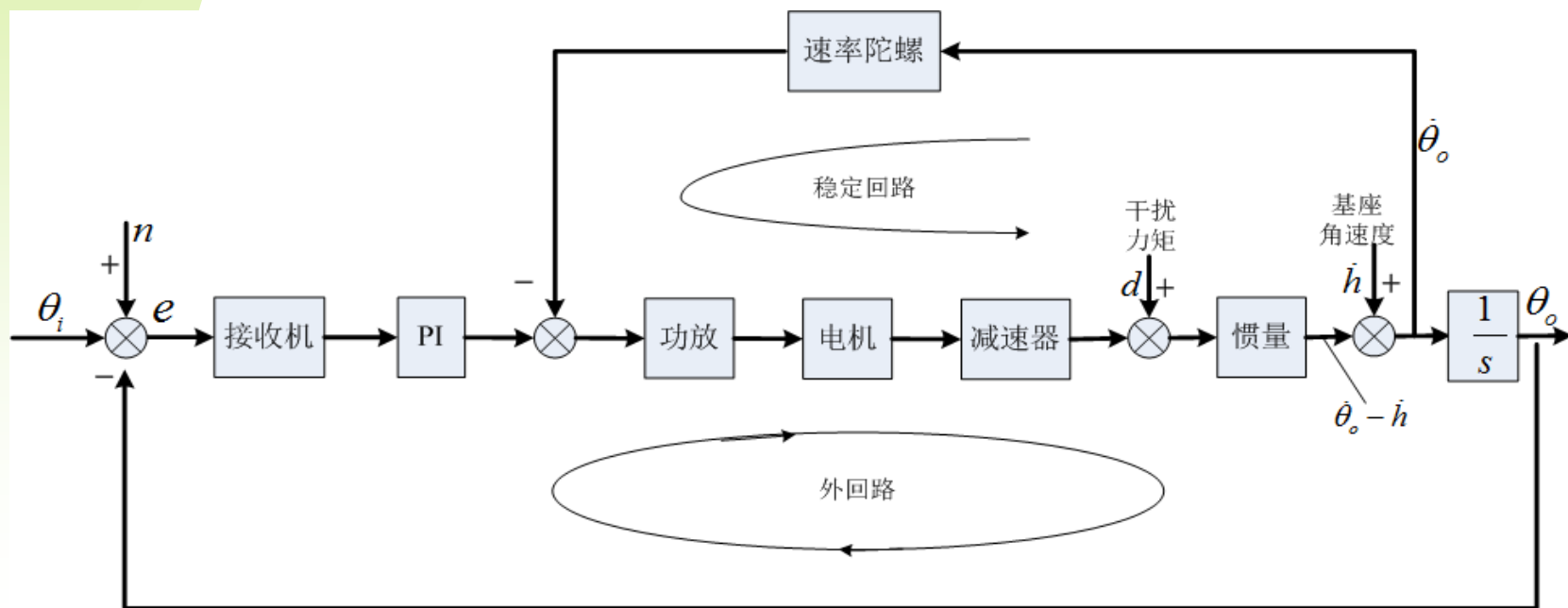
速率陀螺——舰船摇摆角速度

雷达接收机——角位置误差



8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统



舰用雷达跟踪系统原理框图



8.1 多回路系统

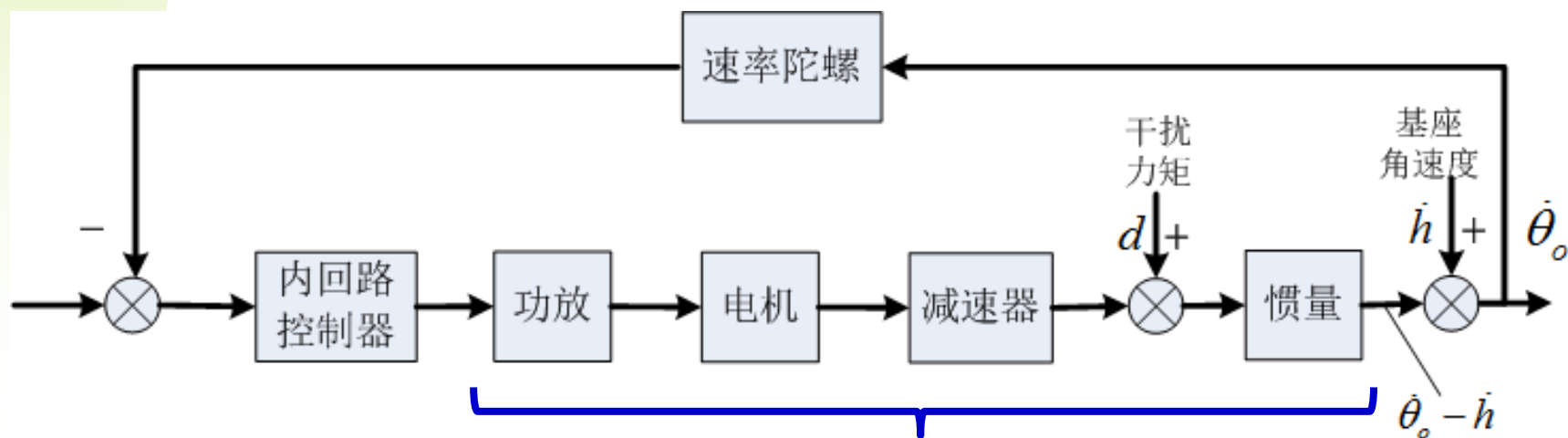
单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

1、内回路设计

内回路的任务——抑制干扰



内回路带宽要宽!



忽略电机特性, 近似为惯性特性

内回路原理框图

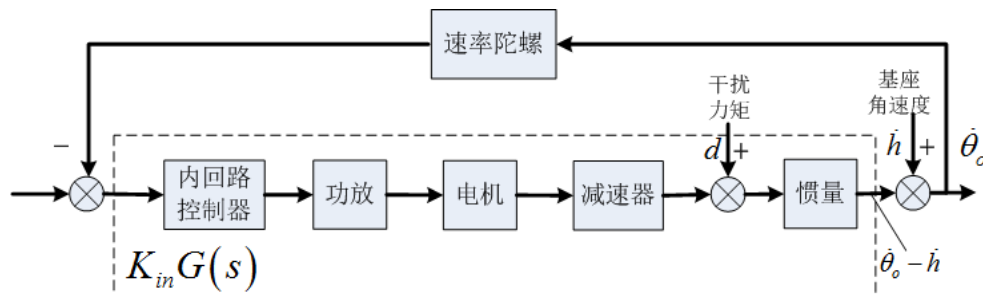


8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

1、内回路设计

内回路的开环传递函数: $K_{in} G(s)$

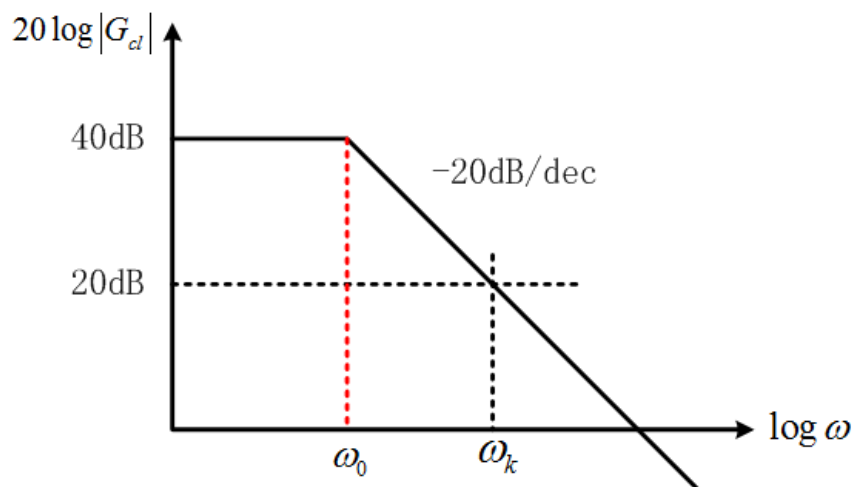


扰动响应: $\frac{\dot{\theta}_0}{\dot{h}} = \frac{1}{1 + K_{in} G(s)}$ \Rightarrow $\frac{\dot{h}}{\dot{\theta}_0} = 1 + K_{in} G(s)$ 称为隔离度

设 $K_{in} = 100$

$$\omega < \omega_0 \quad \frac{\dot{h}}{\dot{\theta}_0} = 40\text{dB}$$

$$\omega = \omega_k \quad \frac{\dot{h}}{\dot{\theta}_0} = 20\text{dB}$$





8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

1、内回路设计——带宽选取原则

内回路设计时增益要高，为抑制干扰，内回路的带宽也要尽可能的宽，但带宽的拓展受到对象不确定性的限制，也不可能做得太高，一般要求满足

$$\omega_{ni} \geq 5\omega_{no}$$

内外回路的带宽互相错开，使得两个回路不会互相影响，可以同时设计，以提高效率。

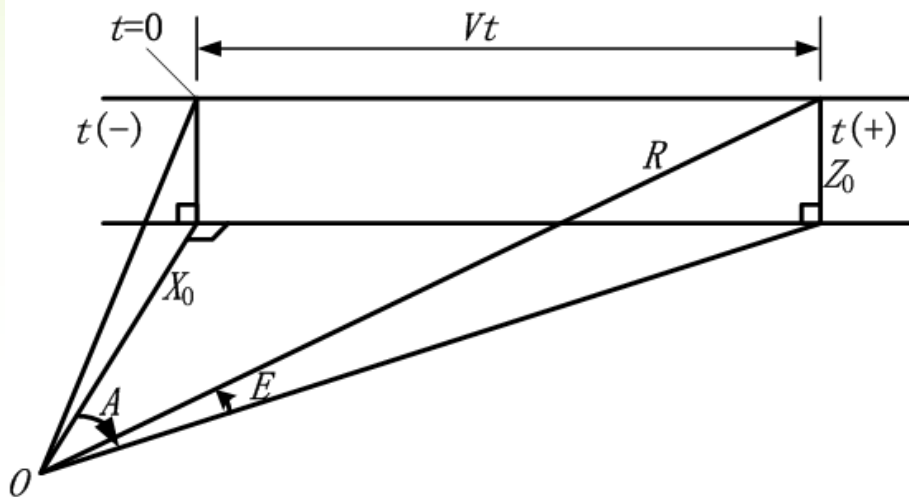


8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

2、外回路设计——输入条件和需求分析

需要跟踪的目标飞行速度 600m/s ，作用距离 $4\text{-}32\text{km}$ ，跟踪的均方根误差应该小于 $0.3 \times 10^{-3}\text{rad}$ 。

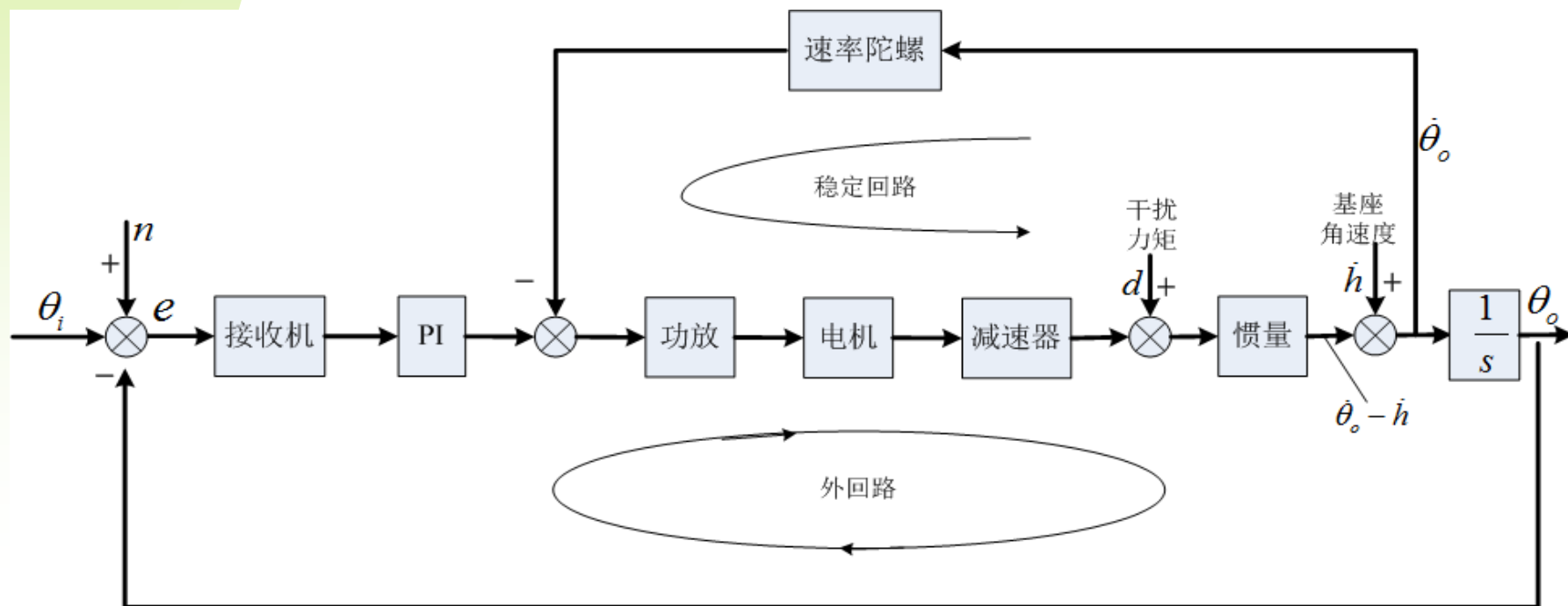




8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

2、外回路设计——系统框图



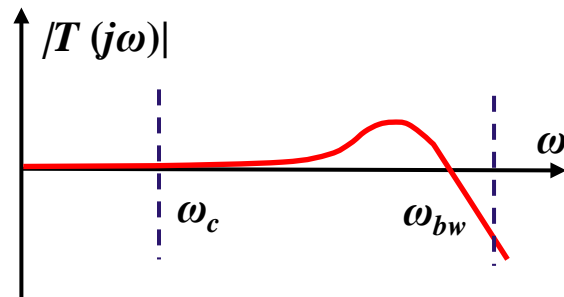
舰用雷达跟踪系统原理框图




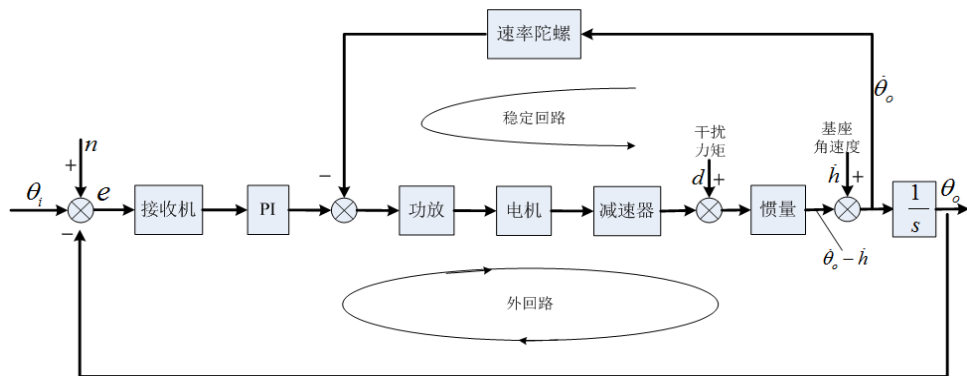
单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

2、外回路设计——对象特性分析

外回路系统特性分析



- (1) **输入信号分析**: 噪声和指令;
- (2) **系统型别分析**: 稳定回路 (内回路) 可以等效为 K_3 , 采用PI控制, 外回路可以看做一个典型的II型系统;
- (3) **跟踪误差分析**——II型系统, 当跟踪加速度信号时, 输出产生误差。
- 



分析典型的输入信号，根据**误差系数**确定外回路开环增益或自然频率。

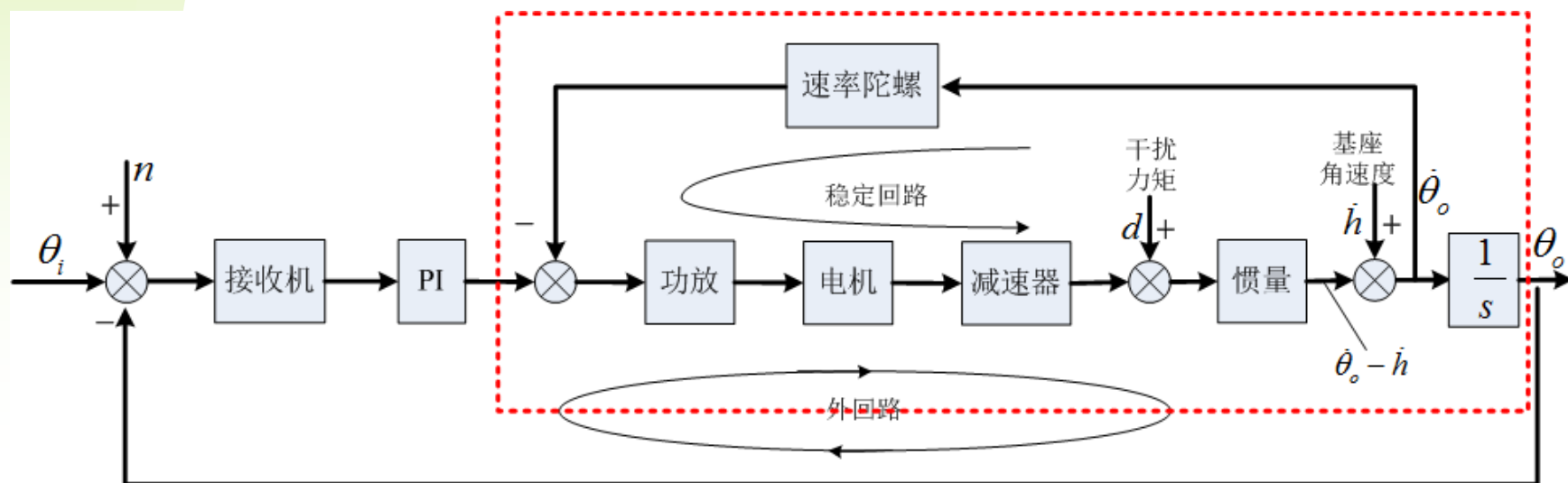


8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

2、外回路设计

(a) 确定外回路的被控对象



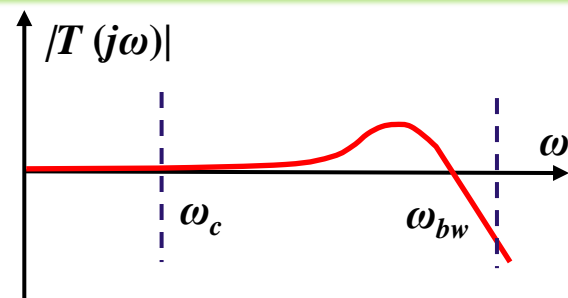
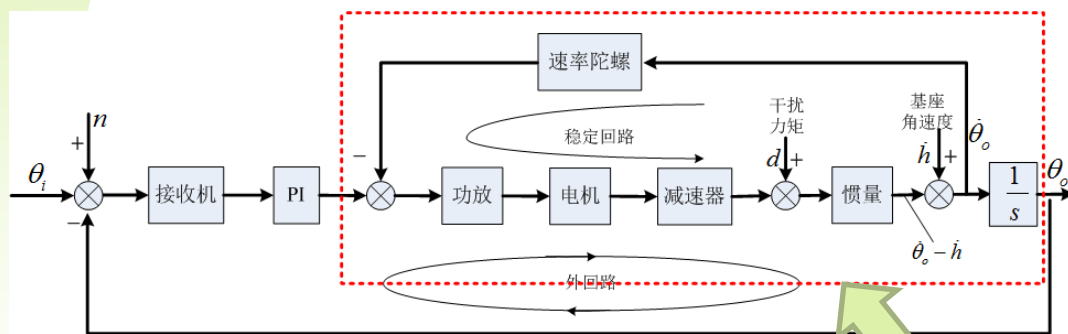


8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

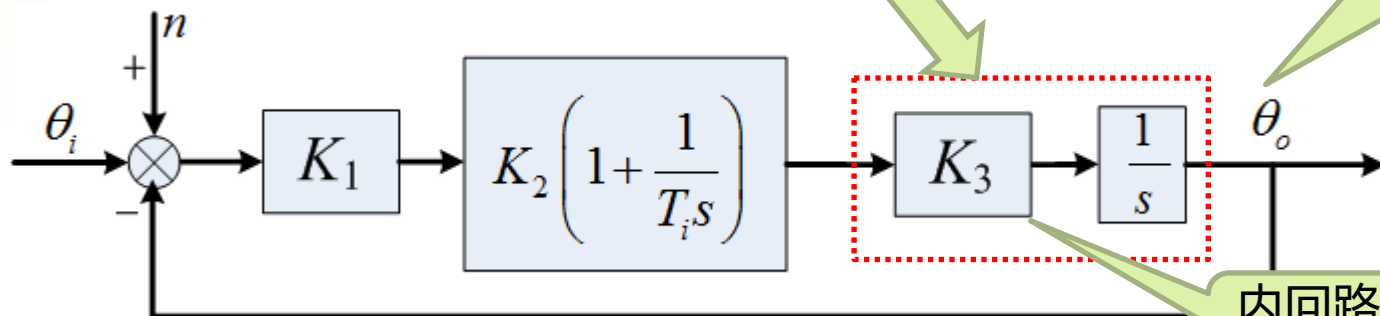
2、外回路设计

(a) 确定外回路的被控对象



$$G(s) = \frac{K_a(1+s/\omega_3)}{s^2}$$

II型系统



内回路反馈通道系数的倒数



8.1 多回路系统

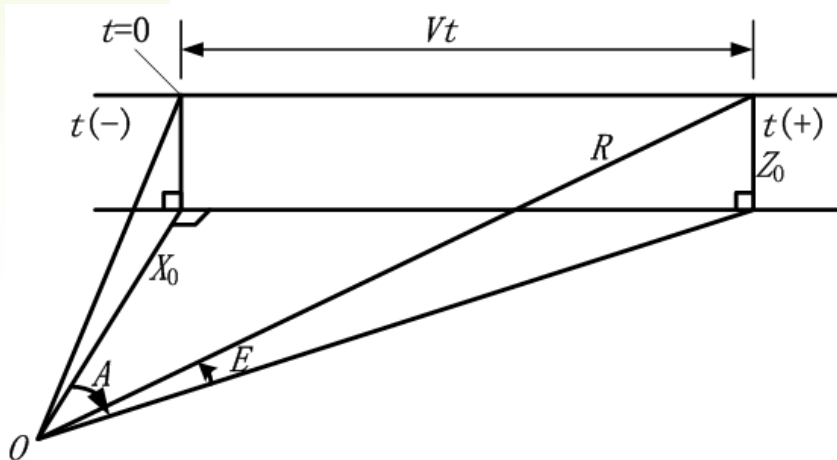
单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

2、外回路设计——输入条件分析（最大角加速度）

(b) 典型输入信号分析

以高低角 E 为例。

$$\tan E = \frac{Z_0}{\sqrt{X_0^2 + (Vt)^2}} = \frac{Z_0/X_0}{\sqrt{1 + (Vt/X_0)^2}}$$



$$E = \arctan \frac{Z_0/X_0}{\sqrt{1 + (Vt/X_0)^2}}$$

$$\text{方位角: } A = \arctan \frac{Vt}{X_0}$$



8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

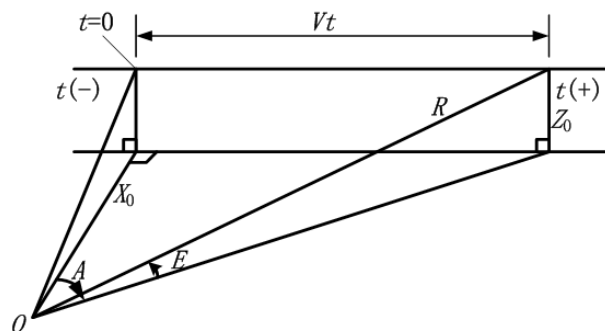
2、外回路设计——最大加速度计算

$$E = \arctan \frac{Z_0 / X_0}{\sqrt{1 + (Vt / X_0)^2}}$$

两边求导，有

$$\frac{1}{\cos^2 E} \cdot \frac{dE}{dt} = \frac{Z_0}{X_0} \cdot \left(-\frac{1}{2} \right) \left(1 + (Vt / X_0)^2 \right)^{-\frac{3}{2}} \cdot 2 \frac{Vt}{X_0} \cdot \frac{V}{X_0}$$

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{Z_0}{X_0} \cdot \left(\frac{V}{X_0} \right)^2 t \cdot \left(1 + (Vt / X_0)^2 \right)^{-\frac{3}{2}} \cdot \cos^2 E$$





8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

2、外回路设计——最大加速度计算

(b) 典型输入信号分析

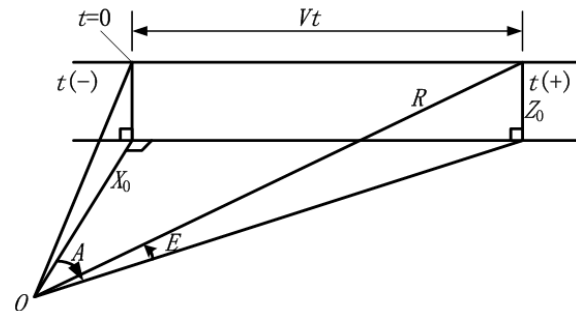
$$\frac{dE}{dt} = -\frac{Z_0}{X_0} \cdot \left(\frac{V}{X_0} \right)^2 t \cdot \left(1 + (Vt/X_0)^2 \right)^{-\frac{3}{2}} \cdot \cos^2 E$$

$$\sin A = \frac{Vt}{R \cos E} \quad \tan A = \frac{Vt}{X_0}$$



$$\sin E = \frac{Z_0}{R}$$

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{V}{R} \cdot \sin A \cdot \sin E$$





8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

2、外回路设计

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{V}{R} \cdot \sin A \cdot \sin E$$



$$\frac{d^2 E}{dt^2} = -\frac{V}{R} \cdot \left(\cos A \sin E \cdot \frac{dA}{dt} + \sin A \cos E \cdot \frac{dE}{dt} \right)$$

$$\frac{dA}{dt} = \frac{V}{X_0} \cos^2 A$$

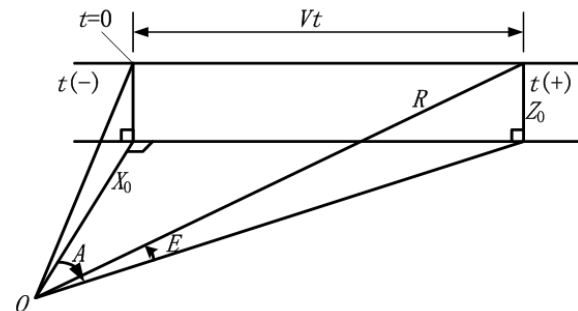
$$\sin A = \frac{Vt}{R \cos E}$$

$$\tan A = \frac{Vt}{X_0}$$

$$= -\frac{V}{R} \cdot \left(\cos A \sin E \cdot \frac{V}{X_0} \cos^2 A - \sin A \cos E \cdot \frac{V}{R} \sin A \sin E \right)$$

$$= -\frac{V^2}{R^2} \tan E \left(\cos^2 A - \sin^2 A \cos^2 E \right)$$

$$= -\frac{V^2}{R^2} \tan E \left(1 - \sin^2 A (1 + \cos^2 E) \right)$$





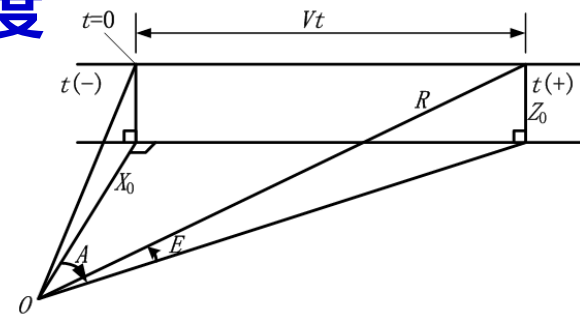
8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

2、外回路设计——典型工况下最大加速度

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{V}{R} \cdot \sin A \cdot \sin E$$

$$\frac{d^2 E}{dt^2} = -\frac{V^2}{R^2} \tan E \left(1 - \sin^2 A (1 + \cos^2 E) \right)$$



假设 $E \leq 45^\circ$ ，则当 $A=0^\circ$ ， $E=45^\circ$ 时，有

不限定行不行？

$$\ddot{E}_{\max} = \left| -\frac{V^2}{R_{\min}^2} \right| = \frac{600^2}{(4 \times 10^3)^2} = 2.25 \times 10^{-2} \text{ rad/s}^2$$

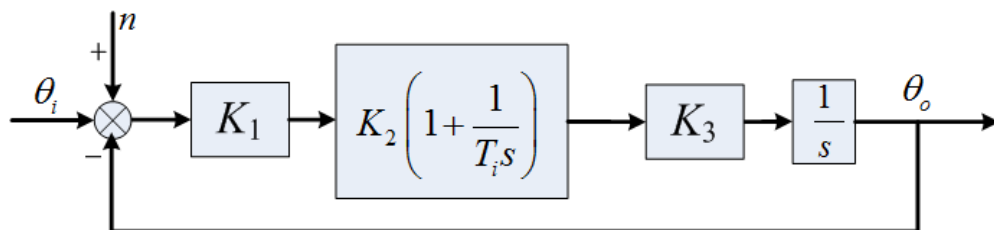


8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

2、外回路设计

(c) 确定带宽



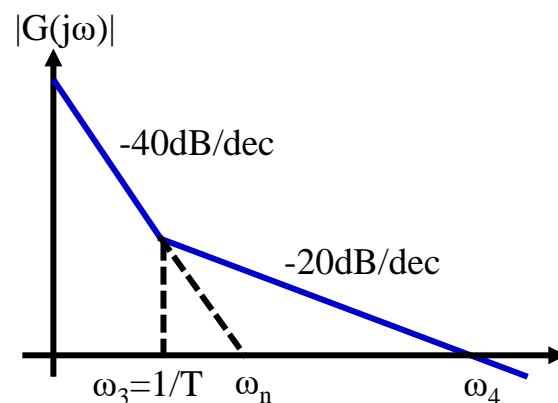
系统增益: $K_a = \omega_n^2 = K_1 K_2 K_3 / T_i$

跟踪误差: $e(t) = \frac{1}{K_a} \cdot \ddot{E} = \frac{1}{\omega_n^2} \cdot \ddot{E}$

$$e_{\max} = 0.3 \times 10^{-3} \text{ rad} \Rightarrow \omega_n^2 \geq \frac{\ddot{E}_{\max}}{e_{\max}} = 75 \text{ s}^{-2}$$

$$\omega_n = 10 \text{ rad/s}$$

$$G(s) = \frac{K_a(1+s/\omega_3)}{s^2}$$



$$K = \omega_4 \cdot T = \omega_4 / \omega_3 = K_a T^2$$



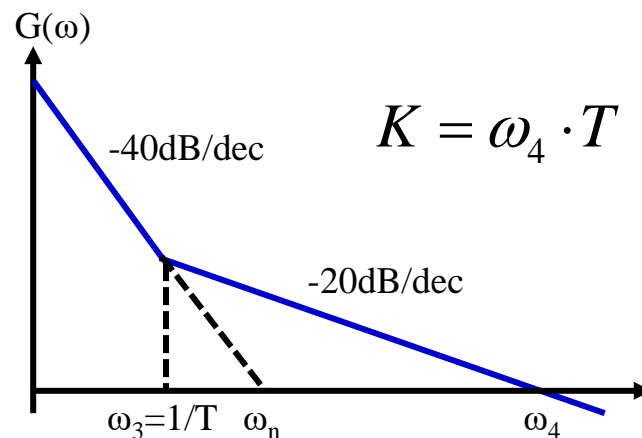
8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

$$G(s) = \frac{K_a(1+s/\omega_3)}{s^2}$$

闭环频率特性:

$$\Phi(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} = \frac{K_a s + K_a / T}{s^2 / T + K_a s + K_a / T}$$



$K = \omega_4 / \omega_3$	1	2
单位阶跃输入下输出的峰值	1.3	1.22
阻尼比	0.5	0.707
等效噪声带宽	$\sqrt{K_a}$	$1.06\sqrt{K_a}$

$$1 < K \leq 2$$

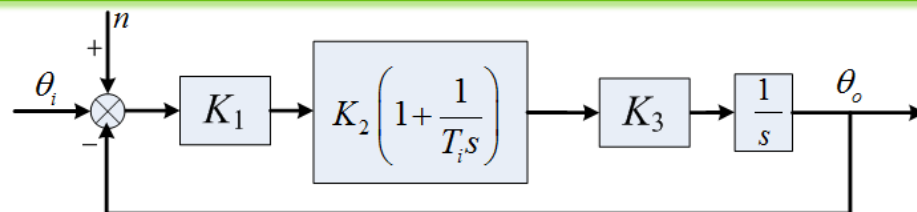


8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

2、外回路设计

(d) 噪声抑制



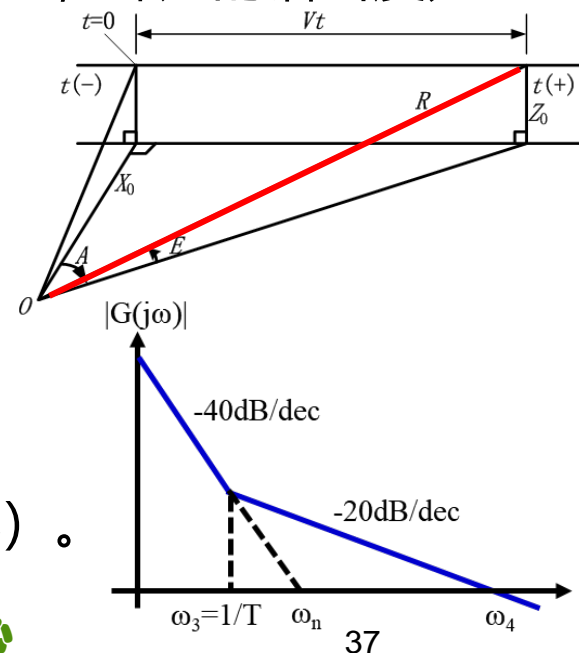
系统的噪声主要是雷达接收系统的热噪声，这种噪声可以看作是白噪声，接收机的均方噪声输出与斜距 R 的四次方成正比，噪声的谱密度为

$$\phi(\omega) = K_N^2 = 4 \times 10^{-15} R^4 / R_0^4$$

R ——目标的实际斜距， $R_0=1\text{km}$ 。

噪声误差： $\sigma_n^2 = 2K_N^2 \omega_{bN} = 8 \times 10^{-15} R^4 \cdot \omega_{bN}$

ω_{bN} ——系统的等效噪声带宽，与 ω_n 有关（成正比）。



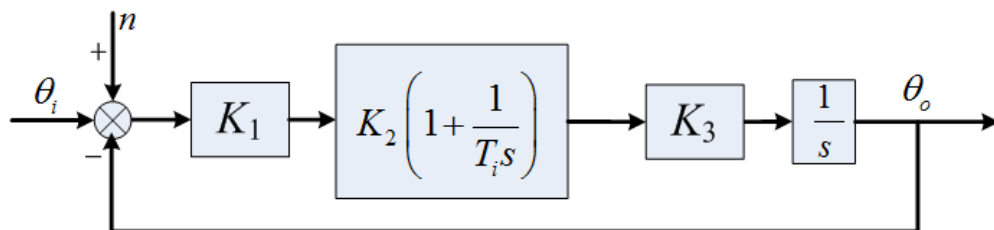


8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

2、外回路设计

(d) 噪声抑制



$$\left. \begin{aligned} \sigma_n^2 &= 2K_N^2 \omega_{bN} = 8 \times 10^{-15} R^4 \cdot \omega_{bN} \\ \omega_{bN} &= 1.5\pi \omega_n \end{aligned} \right\} \Rightarrow \sigma_n = 6.13 \times 10^{-7} R^2$$

$$R = 4\text{km}, \quad \sigma_n = 0.01 \times 10^{-3} \text{rad}$$

$$R = 8\text{km}, \quad \sigma_n = 0.04 \times 10^{-3} \text{rad}$$

$$R = 16\text{km}, \quad \sigma_n = 0.16 \times 10^{-3} \text{rad}$$

$$R = 24\text{km}, \quad \sigma_n = 0.35 \times 10^{-3} \text{rad}$$

$$R = 32\text{km}, \quad \sigma_n = 0.63 \times 10^{-3} \text{rad}$$

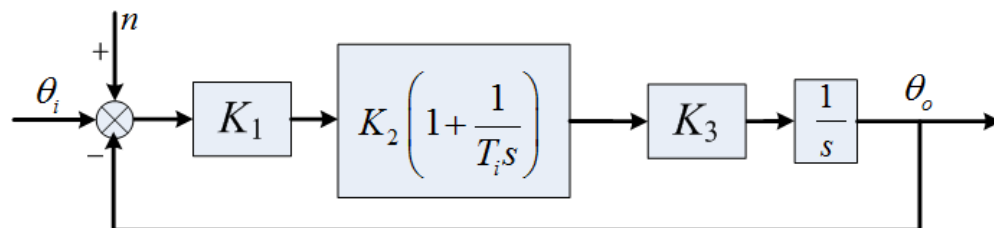


8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

2、外回路设计

(d) 噪声抑制



带宽过宽导致噪声误差随着斜距的增加而增大，指令跟踪与噪声抑制相矛盾。

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_r^2}$$

$$R = 4\text{km}, \quad \sigma_n = 0.01 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

$$R = 8\text{km}, \quad \sigma_n = 0.04 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

$$R = 16\text{km}, \quad \sigma_n = 0.16 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

$$R = 24\text{km}, \quad \sigma_n = 0.35 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

$$R = 32\text{km}, \quad \sigma_n = 0.63 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

$$\Phi_\varepsilon(\omega) = |G_{re}(j\omega)|^2 \cdot \Phi_r(\omega) + |G_{yn}(j\omega)|^2 \cdot \Phi_n(\omega) \quad \bar{\varepsilon}^2 = \frac{2}{2+K} + \frac{K}{4+K}$$



如何改进提升性能?

- ☐ A 提升增益
- ☐ B 减小增益
- ☐ C 优化增益找到一个最优的带宽
- ☒ D 还有更好的方法

$$R = 4\text{km}, \quad \sigma_n = 0.01 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

$$R = 8\text{km}, \quad \sigma_n = 0.04 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

$$R = 16\text{km}, \quad \sigma_n = 0.16 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

$$R = 24\text{km}, \quad \sigma_n = 0.35 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

$$R = 32\text{km}, \quad \sigma_n = 0.63 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_r^2}$$



8.1 多回路系统

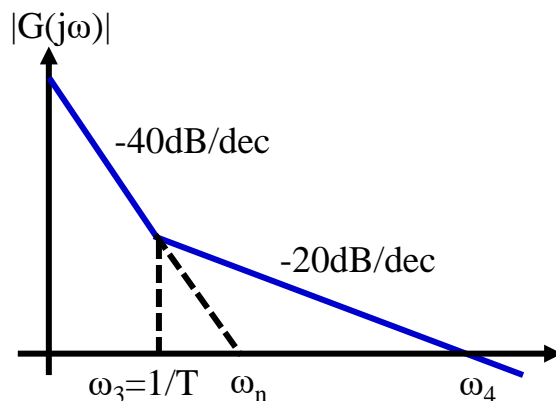
信息

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

2、外回路设计

(d) 噪声抑制

一个简单的设计化解了矛盾



斜距	固定增益			变增益			
	σ_r	σ_n	σ_t	ω_n	σ_r	σ_n	σ_t
4km	0.225	0.01	0.225	10	0.225	0.01	0.225
8km	0.056	0.04	0.069	10	0.056	0.04	0.069
16km	0.014	0.16	0.16	5	0.056	0.09	0.11
24km	0.006	0.35	0.35	2.5	0.1	0.14	0.17
32km	0.003	0.63	0.63	1.4	0.175	0.19	0.26

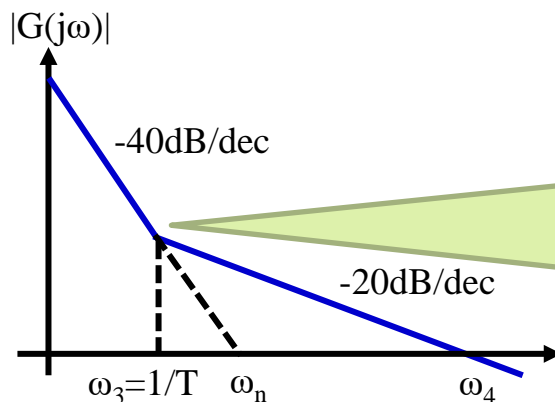
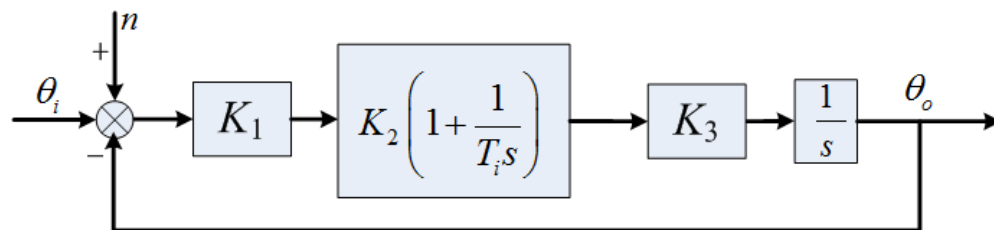


8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

2、外回路设计

(d) 噪声抑制



最后考虑转折频率的设计，来确定 T_i ，要保证系统在增益变化范围内，都有足够相位裕度，不会失稳。当然，这个参数也可以随增益改变。

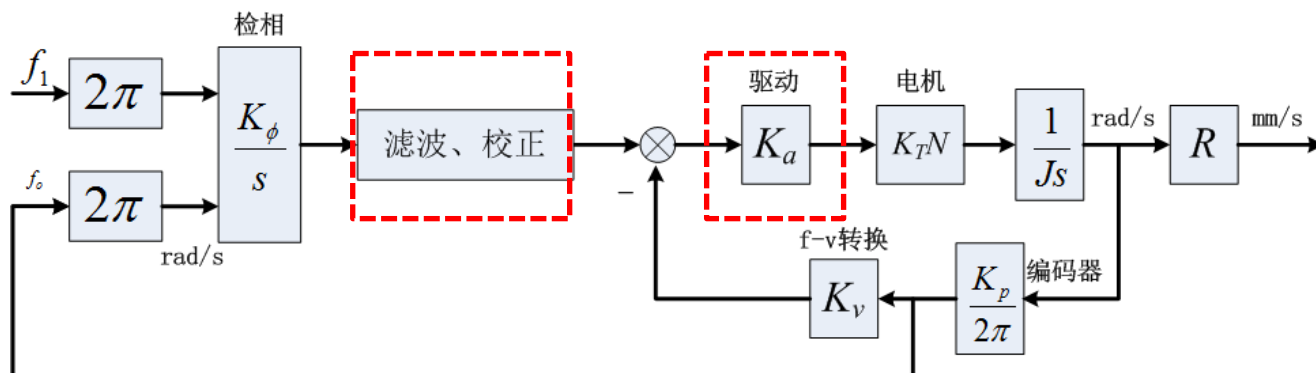
$$K = \omega_4 \cdot T = \omega_4 / \omega_n = K_a T^2$$



8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

◆ 例2: 锁相伺服系统



性能指标: $|e| \leq 1 \times 10^{-3} \text{ mm/s}$

基本参数:

$$K_\phi = 1.5 \text{ V/rad},$$

$$K_p = 9000,$$

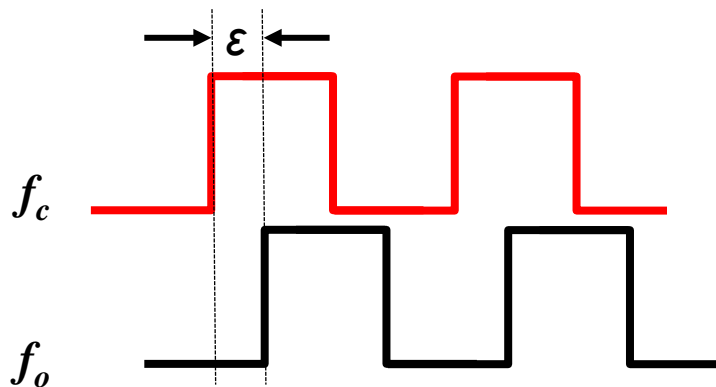
$$K_v = 0.024 \text{ V/Hz}$$

$$K_T = 348.6 \text{ g} \cdot \text{cm/A},$$

$$N = 1000 \text{ (减速比)},$$

$$J = 1840 \text{ g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2,$$

$$R = 10.85 \text{ mm}$$



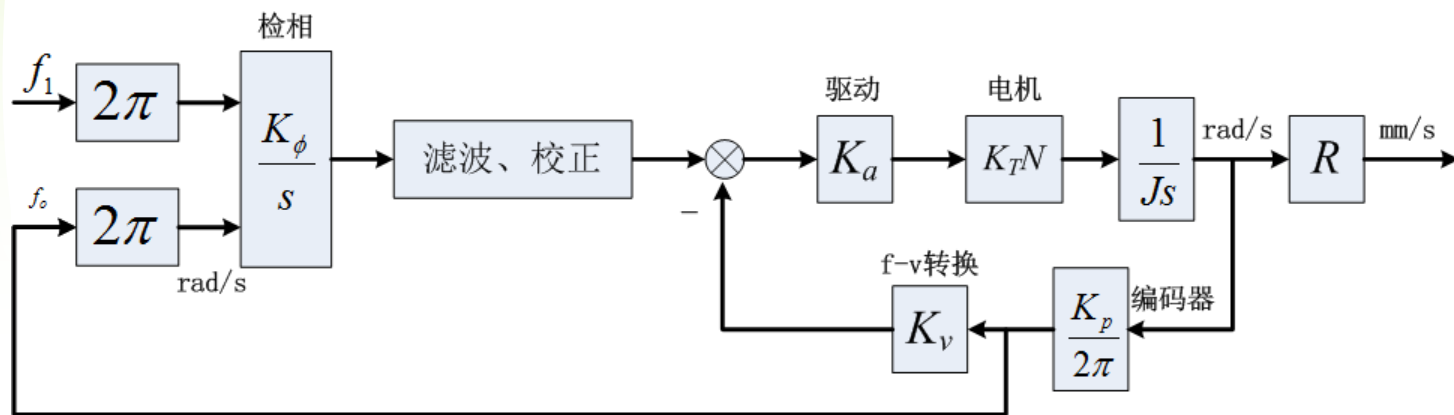


8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

设计思想:

- 外回路中有两个积分环节，若只由这个外回路来组成反馈系统，将缺阻尼项，可以加一速率反馈来提供阻尼，同时更好抑制干扰；
- 除稳定性外，还要保证伺服精度的要求。



为什么不用超前校正?



8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

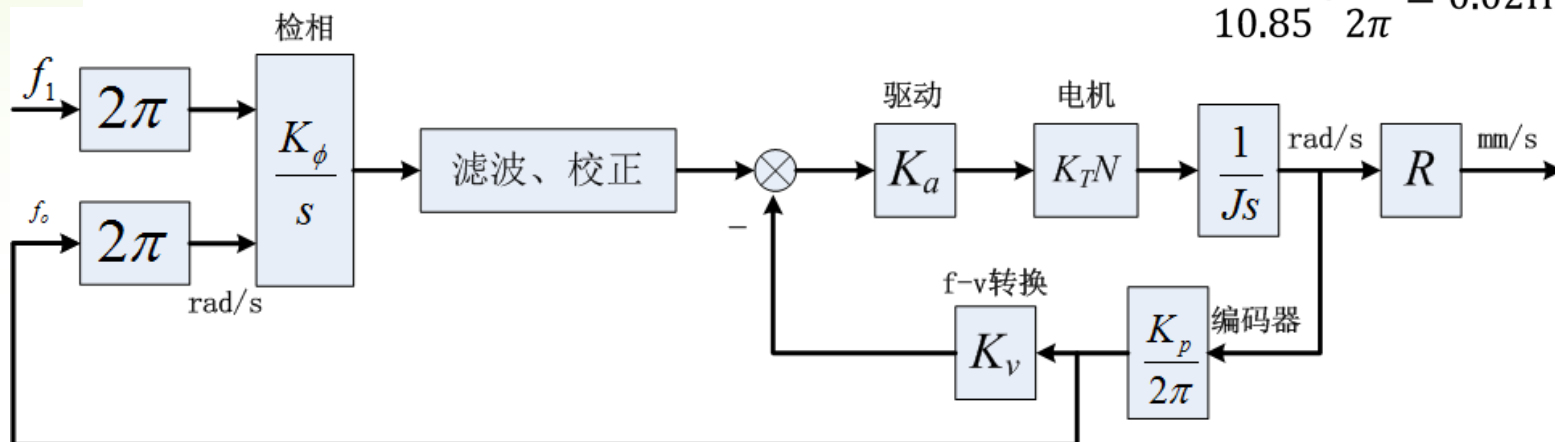
(1) 内回路设计

设计目的——抑制干扰和噪声

- 轴承噪声、摩擦力矩等（周期性0.02Hz）
- 170Hz的位置方波噪声

内回路为I型系统，带宽为回路增益，要求带宽尽可能宽，但需要滤掉位置方波信号。

$$R = 10.85\text{mm},$$
$$f_1 = 170\text{Hz} \Leftrightarrow 1.27\text{mm/s}$$
$$\frac{1.27}{10.85} \cdot \frac{1}{2\pi} = 0.02\text{Hz}$$





8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

(1) 内回路设计

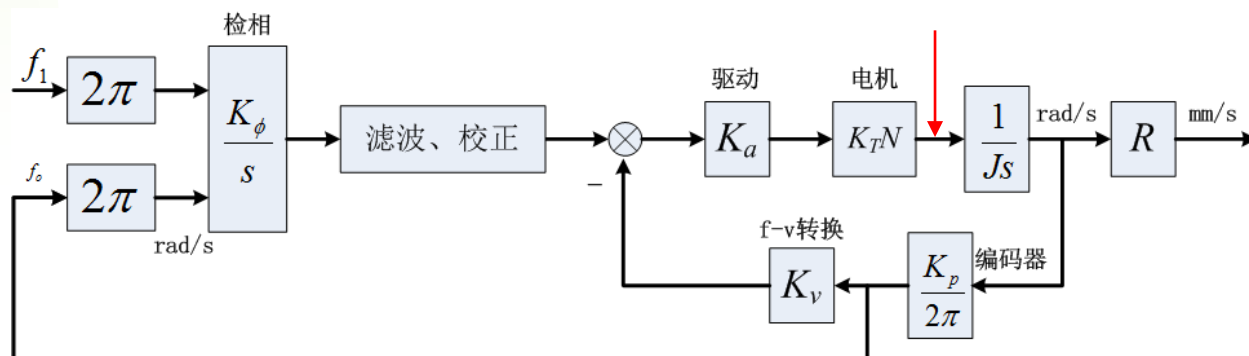
设计目的——抑制干扰

➤ 轴承噪声、摩擦力矩等 (周期性0.02Hz)

$$e_{ssd} = -\lim_{s \rightarrow 0} \frac{s^{u+1} D(s)}{K_1}$$

$$K_d = \frac{K_p K_v K_a K_T N}{2\pi}$$

$$|e(t)|_{\max} K_d = |d(t)|_{\max}$$



波动干扰力矩的频谱很低，可以用静态增益设计保证扰动下的精度。



8.1 多回路系统

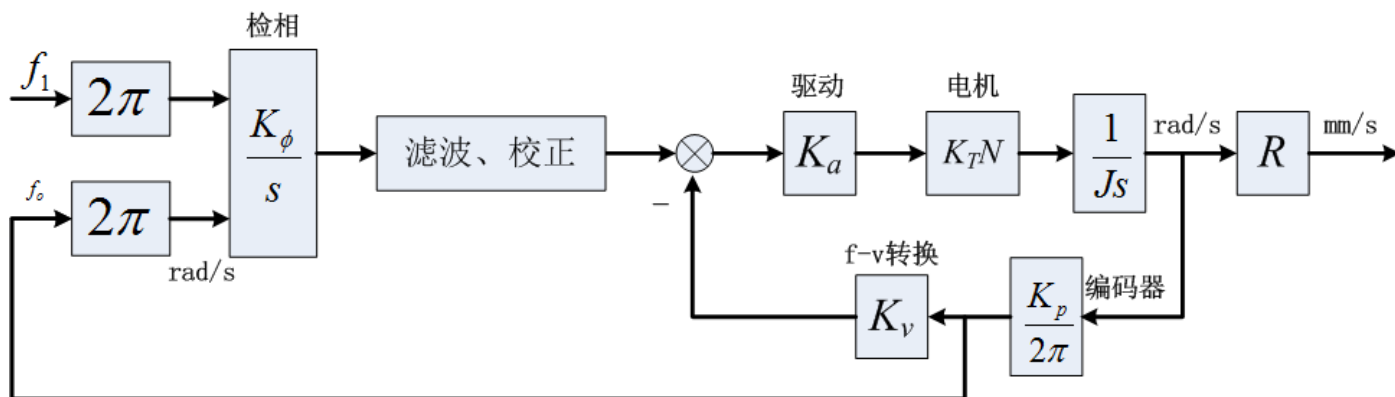
单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

(1) 内回路设计

➤ 170Hz的位置方波噪声（特定频率噪声，非白噪声）

为抑制方波噪声，内回路带宽设为噪声频率的1/10：

$$\omega_{ni} \leq \frac{2\pi \cdot 170}{10} = 107 \text{ rad/s} \quad \Rightarrow \quad \omega_{ni} = 75 \text{ rad/s}$$



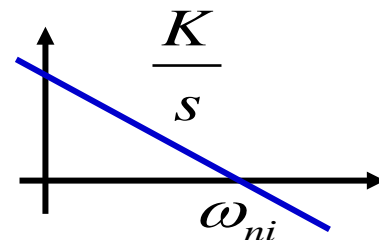


8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

(1) 内回路设计

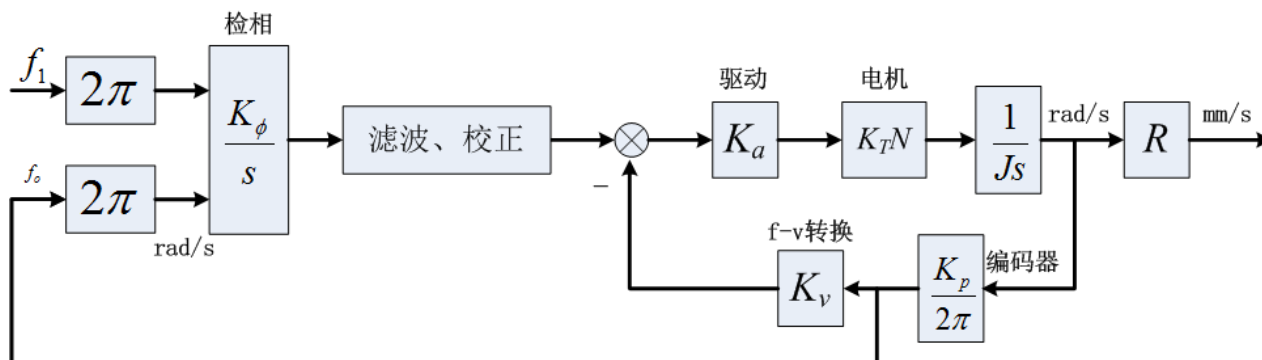
$$\omega_{ni} = 75 \text{ rad/s}$$



内回路为 I 型系统 \Rightarrow 增益 $K = \frac{K_d}{J} = \omega_{ni}$

$$K_d = K_p K_v K_a K_T N / 2\pi$$

$$K_a = 0.0115$$





8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

(1) 内回路设计

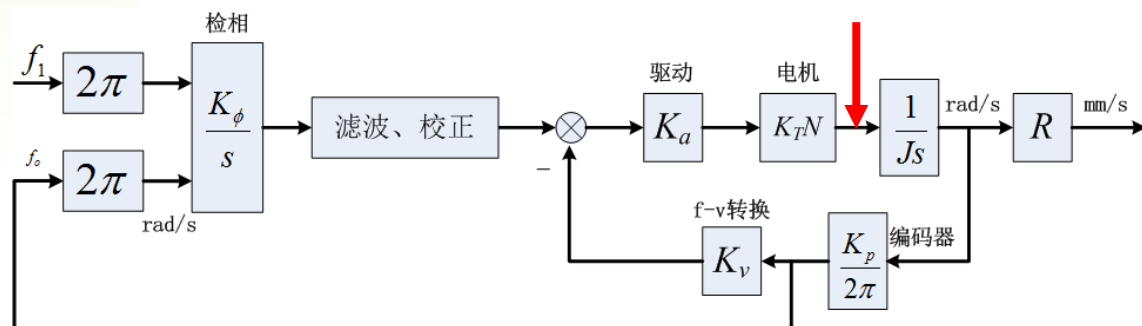
$$\omega_{ni} = 75 \text{ rad/s}$$

$$K_d = K_p K_v K_a K_T N / 2\pi$$

要求卷轴的速率跟踪误差小于0.001 mm/s:

$$e_{ssd} = -\frac{1}{K_1}$$

$$e = \frac{1}{K_d / R} \cdot d_{\text{扰动}} \leq 0.001 \quad \Rightarrow \quad d_{\text{扰动}} \leq 12.7 \text{ g} \cdot \text{cm}$$



这里内回路设计以抑制噪声为主，确定增益后，再验证抗扰能力，如果实际扰动小于给定值，那么内回路的速率精度就满足要求。

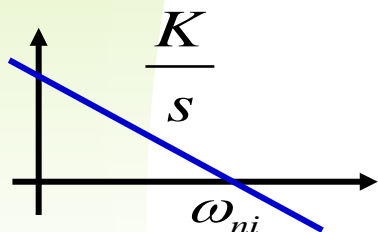


8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

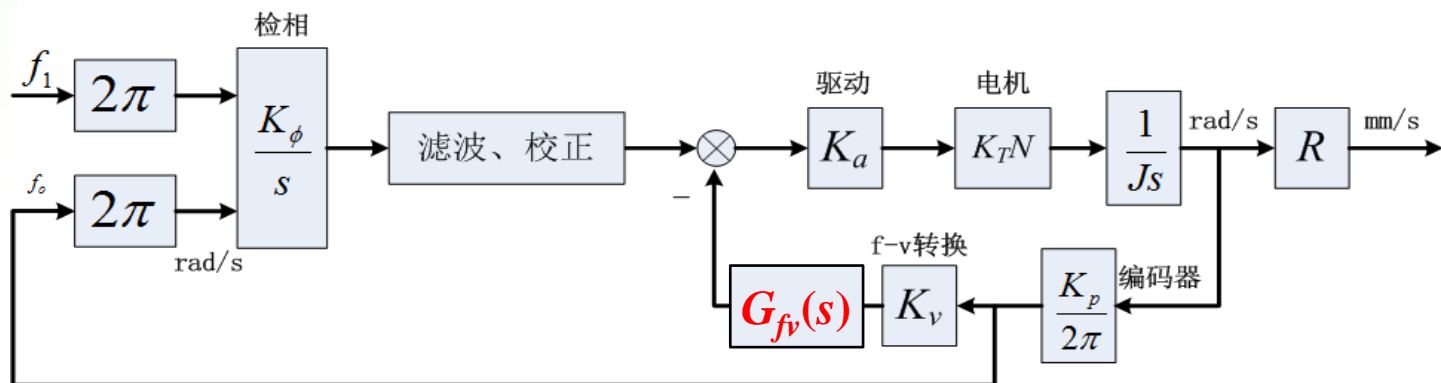
(1) 内回路设计

内回路为积分环节，增加转折频率，将其变为基本I型系统。在反馈通道f-v转换线路中增加滤波器，同时可以滤去编码器信号中的脉动



$$G_{fv}(s) = \frac{1}{\tau s + 1}, \tau = 0.01s \approx \frac{1}{\omega_{ni}}$$

转折频率在剪切频率之后，相位裕度满足要求

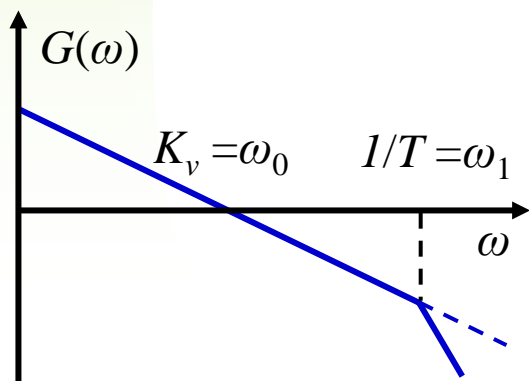




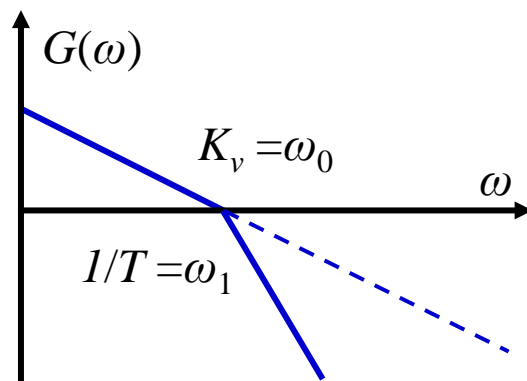
8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

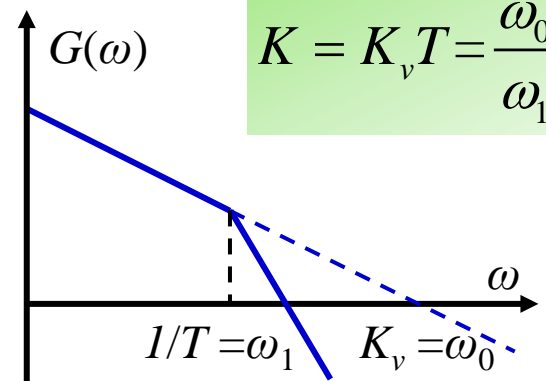
K	0.5	1	2
单位阶跃输入下输出的峰值	1.05	1.15	1.3
阻尼比 $1/2\sqrt{K}$	0.707	0.5	0.35
相位裕度	66°	52°	39°
闭环谐振峰值 M_p	≤ 1	1.15	1.5



$K = 0.5$



$K = 1$



$K = 2$

$$K = K_v T = \frac{\omega_0}{\omega_1}$$



8.1 多回路系统

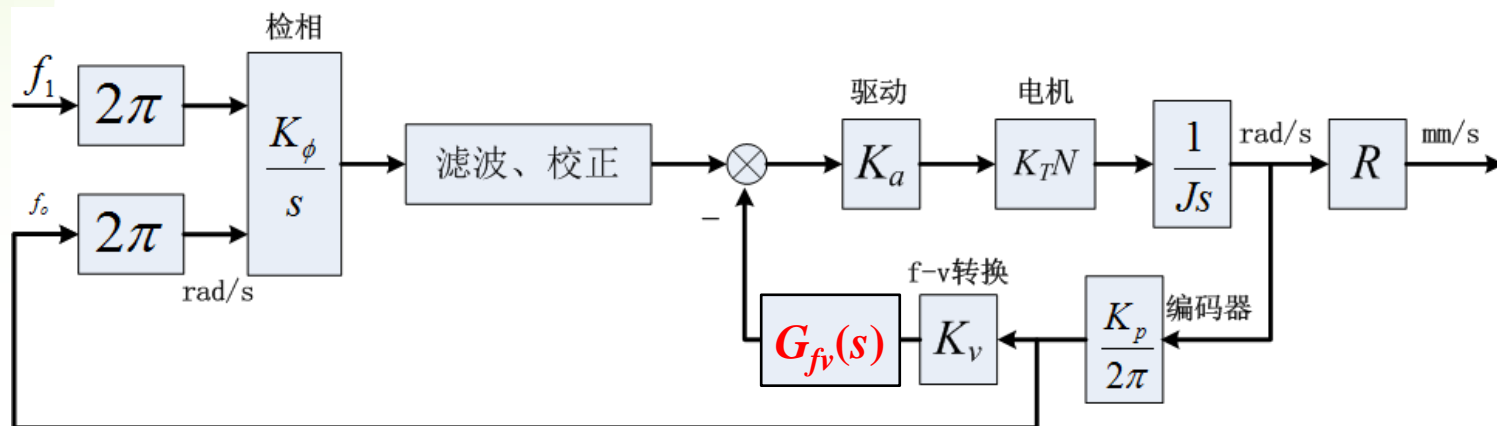
单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

(2) 主回路（外回路）设计

$$\omega_{ni} = 75 \text{ rad/s}$$

a) 主回路的被控对象——速度反馈+检相

b) 主回路带宽 $\omega_{no} = \frac{1}{5} \omega_{ni} = 15 \text{ rad/s}$





8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

(2) 主回路设计

c) 主回路增益

内回路相当于压控振荡器 ($V-f$), 其闭环增益等效为反馈环节的倒数:

$$K_{VCO} = \frac{1}{K_V}$$

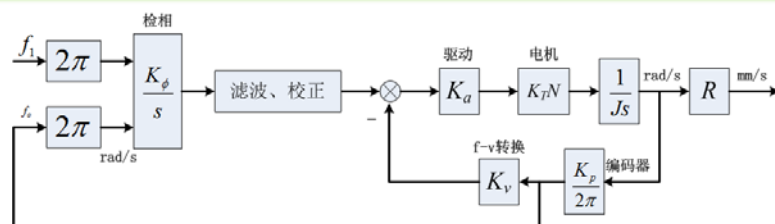
$$\text{主回路增益: } K = 2\pi K_\phi \frac{1}{K_V} = 393s^{-1}$$

$$\omega_{no} = 15\text{rad/s}$$

d) 主回路校正

主回路增益较主回路带宽高出25倍: 引入滞后校正

$$G_1(s) = \frac{\tau_1 s + 1}{\alpha \tau_1 s + 1}, \quad \alpha = 25 \quad \tau_1 \leq \omega_{no}/2 \Rightarrow \tau_1 = 0.2s$$



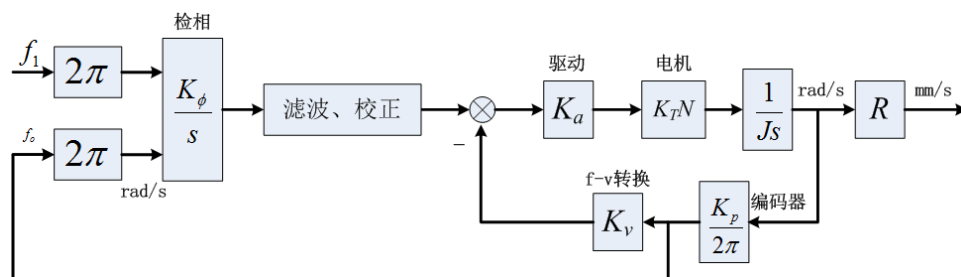


8.1 多回路系统

单回路局限 | 多回路设计原则 | 例1. 舰载雷达系统 | 例2. 锁相伺服系统

(2) 主回路设计

e) 主回路校正



检相器输出中含有的170Hz噪声：

不影响主回路的稳定裕度的条件下，引入低通滤波。

$$G_2(s) = \frac{1}{\tau_3 s + 1}, \quad \tau_3 = 0.01s$$

最终控制器（滞后+惯性）

$$G_c(s) = G_1(s) G_2(s) = \frac{\tau_1 s + 1}{(\alpha \tau_1 s + 1)(\tau_3 s + 1)} = \frac{0.2s + 1}{(5s + 1)(0.01s + 1)}$$



8.1 多回路系统

小结

对于多回路系统：

- 以宽带内回路抑制干扰；
- 以窄带外回路保证精度；
- 调试时先调试内回路，再调试外回路；
- 设计外回路时，将内回路当做一个比例环节。

$$\omega_{no} \leq \frac{1}{5} \omega_{ni}$$



内容

A1

多回路系统

A2

串级调节系统

A3

复合控制系统



8.2 串级调节系统

游泳馆体验之控制问题思考



初级：这个系统应该是开环控制，灵敏度高，抗扰性太差；

中级：为了保证出口水温恒定，应采用闭环控制，最好是多回路控制；

高级：大数据分析结合多回路进行智能优化控制，实现安全、舒适、节能目标；



8.2 串级调节系统

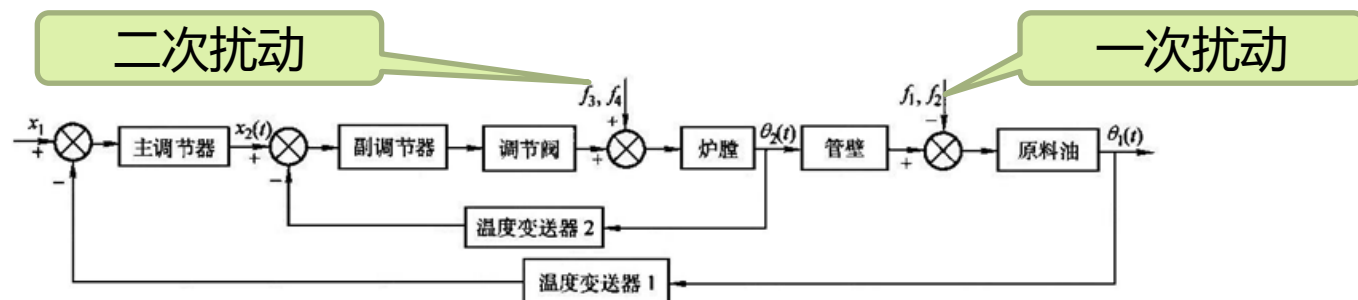
结构组成 | 工作过程 | 例1. 管式加热炉 | 例2. 氧化炉温度调节

◆ 串级调节系统的结构组成

整个系统包括两个控制回路，**主回路和副回路**。副回路由**副变量检测变送、副调节器、调节阀和副过程**构成；主回路由**主变量检测变送、主调节器、副调节系统（整个副回路）和主过程**构成。

一次扰动：作用在主被控过程上的，而不包括在副回路范围内的扰动。

二次扰动：作用在副被控过程上的，即包括在副回路范围内的扰动。



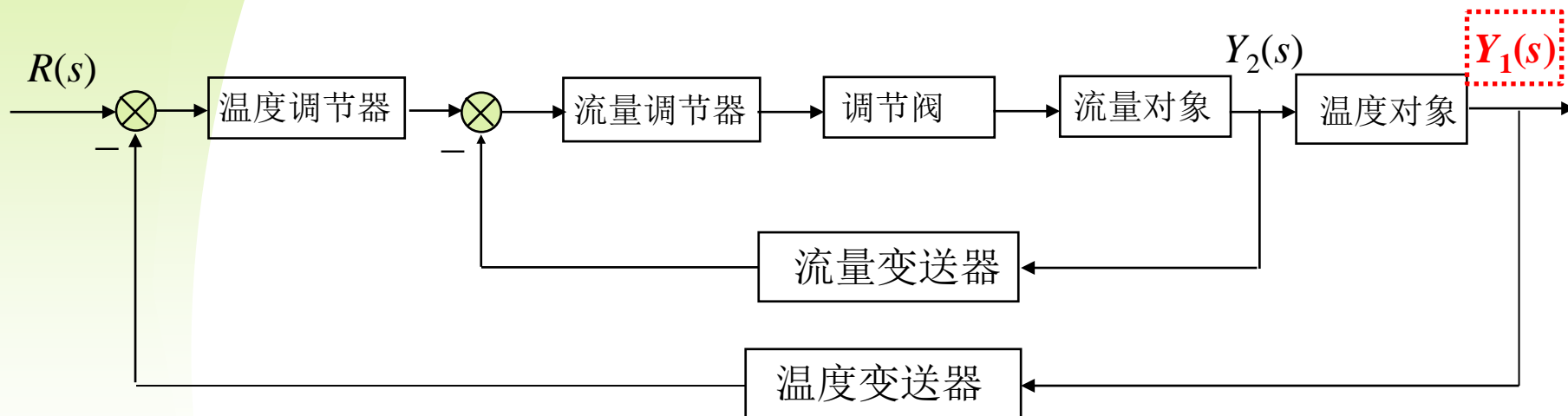
管式加热炉出口温度串级控制系统框图



8.2 串级调节系统

结构组成 | 工作过程 | 例1. 管式加热炉 | 例2. 氧化炉温度调节

◆ 串级调节系统的结构组成

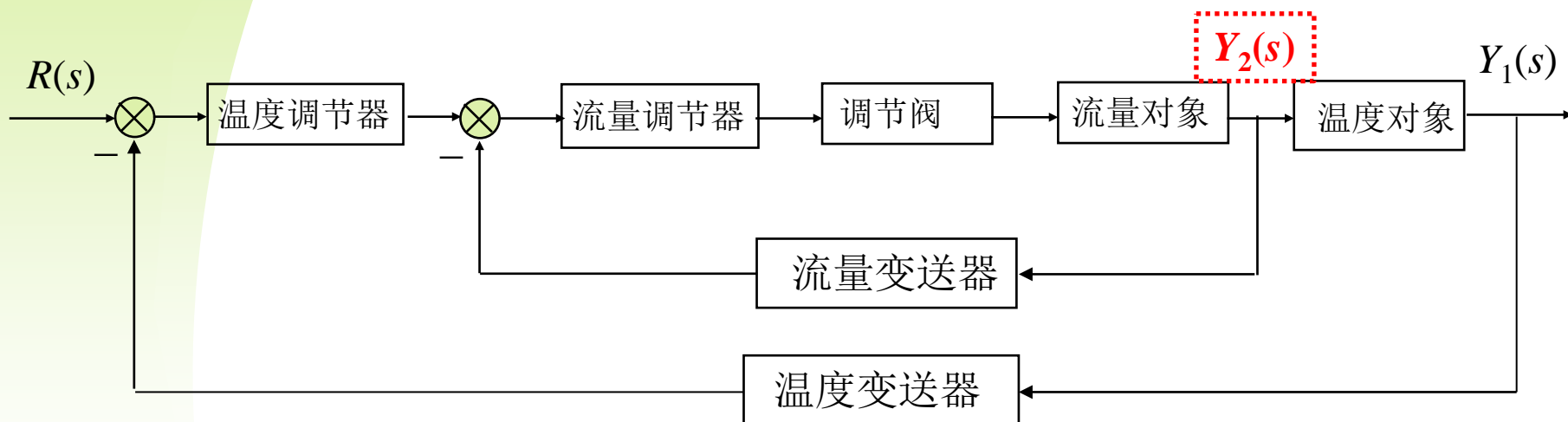


主参数（主被控变量 y_1 ）：生产工艺过程中主要控制的工艺指标，在串级调节系统中起主导作用的那个被调参数即为主参数，如淋浴的出水温度。



8.2 串级调节系统

结构组成 | 工作过程 | 例1. 管式加热炉 | 例2. 氧化炉温度调节

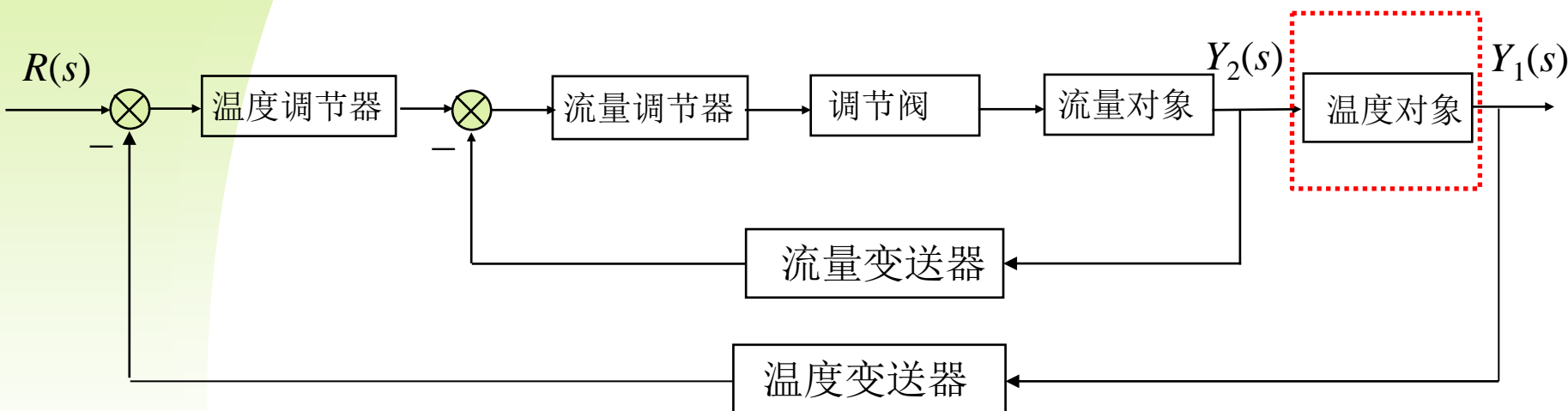


副参数（副被控变量 Y_2 ）：影响主参数的**主要变量**和**中间变量**（如上述系统的液体流量）。



8.2 串级调节系统

结构组成 | 工作过程 | 例1. 管式加热炉 | 例2. 氧化炉温度调节

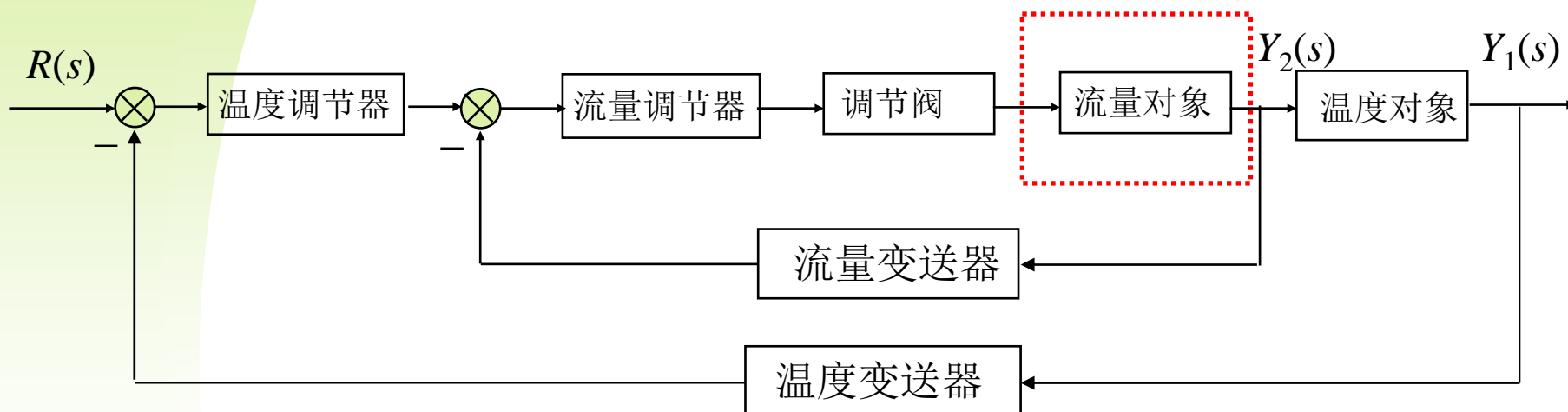


主被控对象（温度对象）：为生产中所要控制的，由主参数表征其主要特性的工艺生产设备，一般指副参数检测点到主参数检测点的全部工艺设备。



8.2 串级调节系统

结构组成 | 工作过程 | 例1. 管式加热炉 | 例2. 氧化炉温度调节

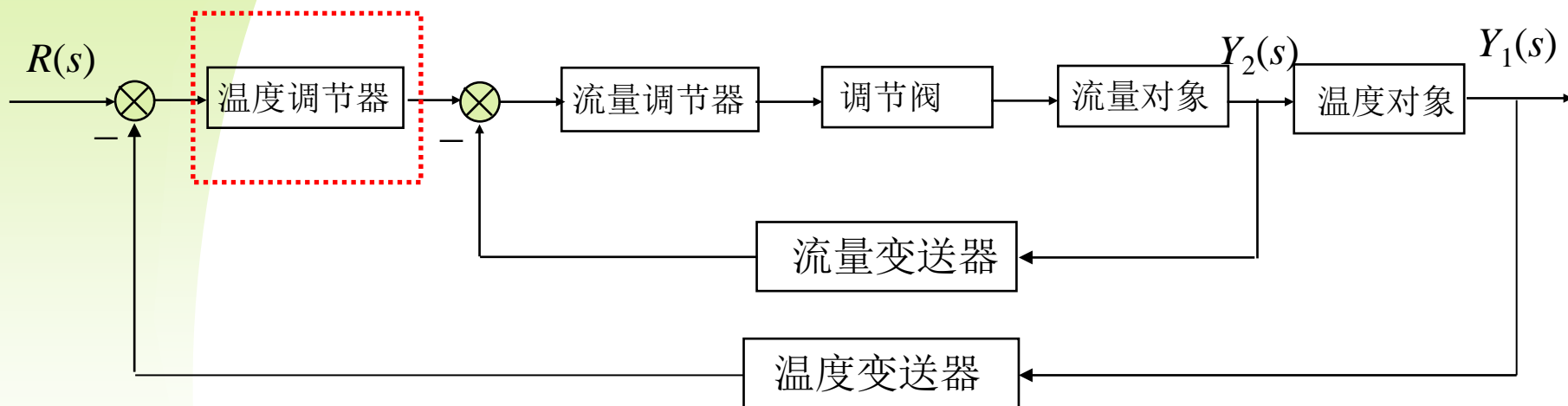


副被控对象（流量对象）：调节阀到副参数测量点之间的工艺设备。



8.2 串级调节系统

结构组成 | 工作过程 | 例1. 管式加热炉 | 例2. 氧化炉温度调节

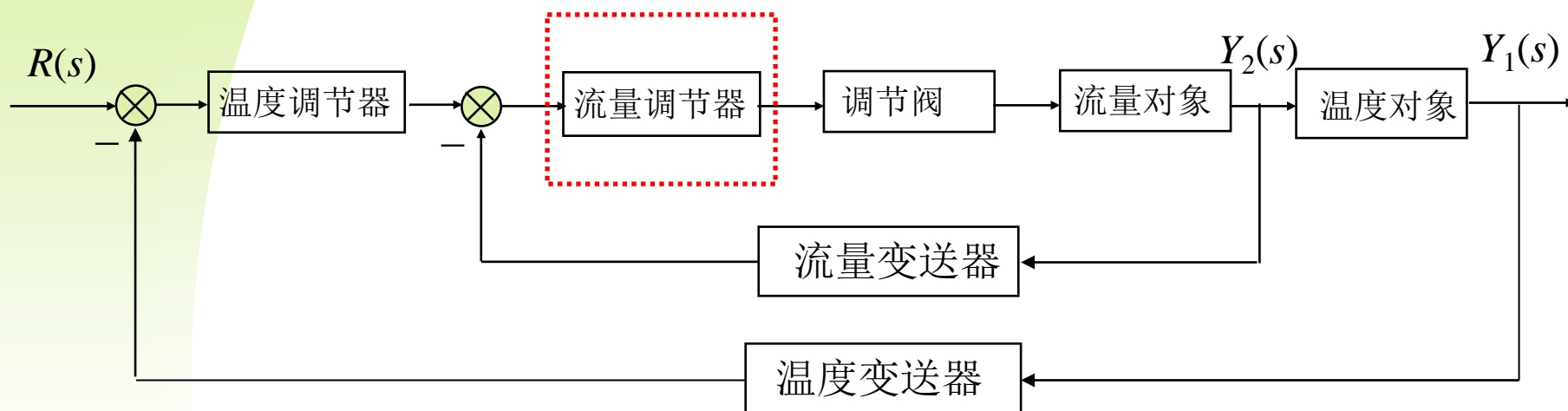


主调节器（温度调节器）：在系统中起主导作用，为恒定主参数设置的调节器。主调节器，按主参数与给定值的偏差而动作，其输出作为副参数的给定值。



8.2 串级调节系统

结构组成 | 工作过程 | 例1. 管式加热炉 | 例2. 氧化炉温度调节



副调节器（流量调节器）： 给定值由主调节器的输出所决定，输出直接控制阀门。



8.2 串级调节系统

结构组成 | **工作过程** | 例1. 管式加热炉 | 例2. 氧化炉温度调节

◆ 串级调节系统的工作过程

当扰动发生时，破坏了稳定状态，调节器进行工作。根据扰动施加点的位置不同，分几种情况进行分析：

- 扰动作用于**副回路**
- 扰动作用于**主过程**
- 扰动同时作用于**副回路和主过程**

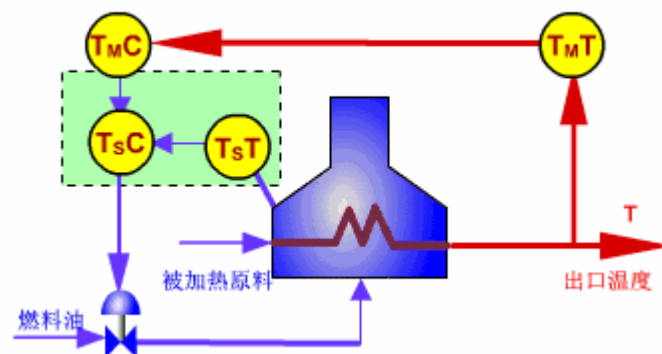
在串级控制系统中，由于引入了一个副回路，不仅能及早克服进入副回路的扰动，而且又能改善过程特性。副调节器具有“粗调”的作用，主调节器具有“细调”的作用，从而使其控制品质得到进一步提高。



8.2 串级调节系统

结构组成 | 工作过程 | 例1. 管式加热炉 | 例2. 氧化炉温度调节

◆ 例1 管式加热炉的控制



这个系统有哪些干扰？

A

原料油初始温度

B

原料油流量

C

燃料的流量

D

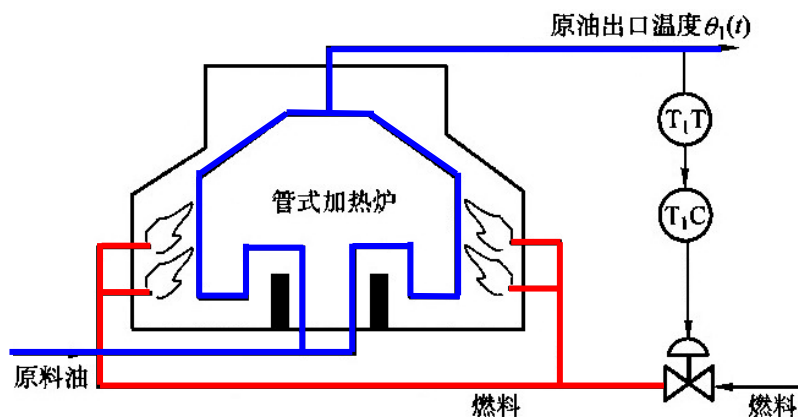
燃料的温度

E

燃料的燃值

F

环境的温度



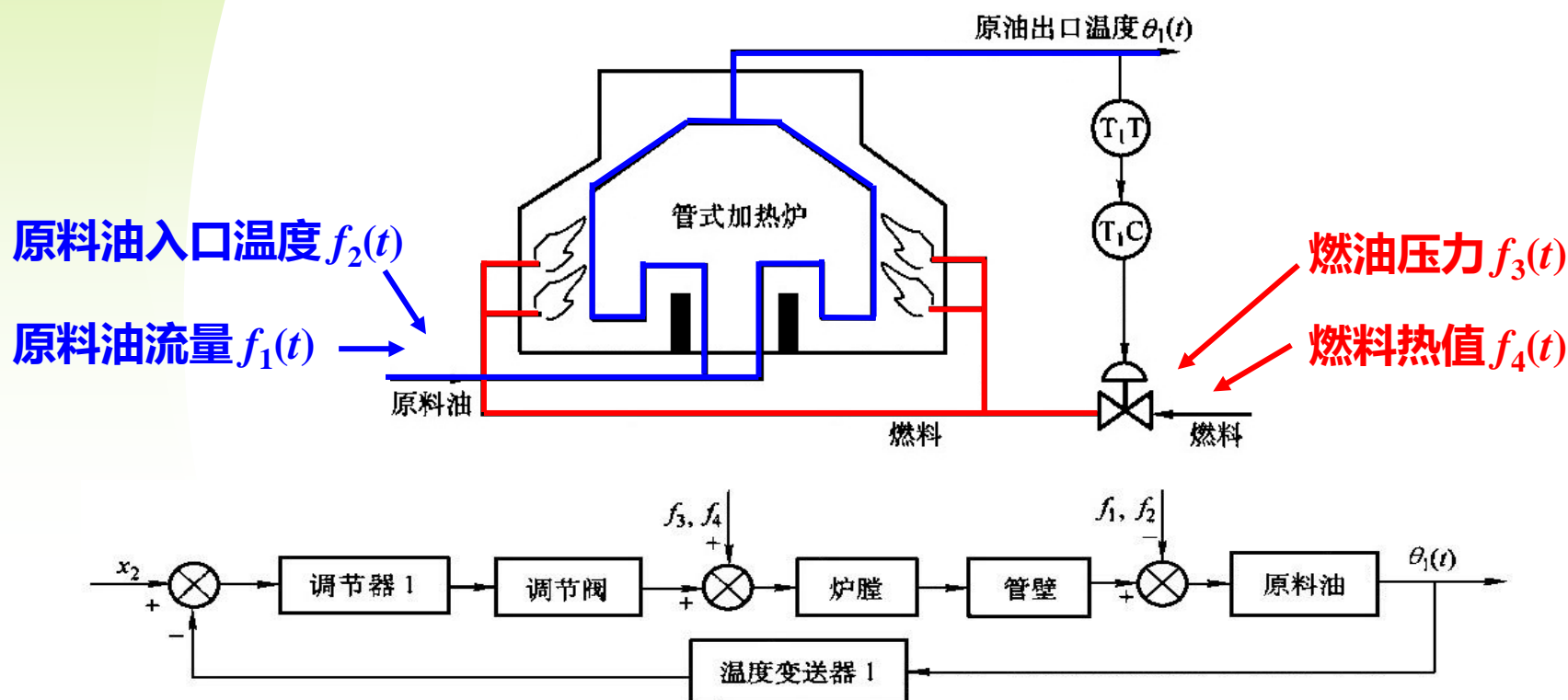
提交



8.2 串级调节系统

结构组成 | 工作过程 | 例1. 管式加热炉 | 例2. 氧化炉温度调节

(1) 出口温度单回路控制方式

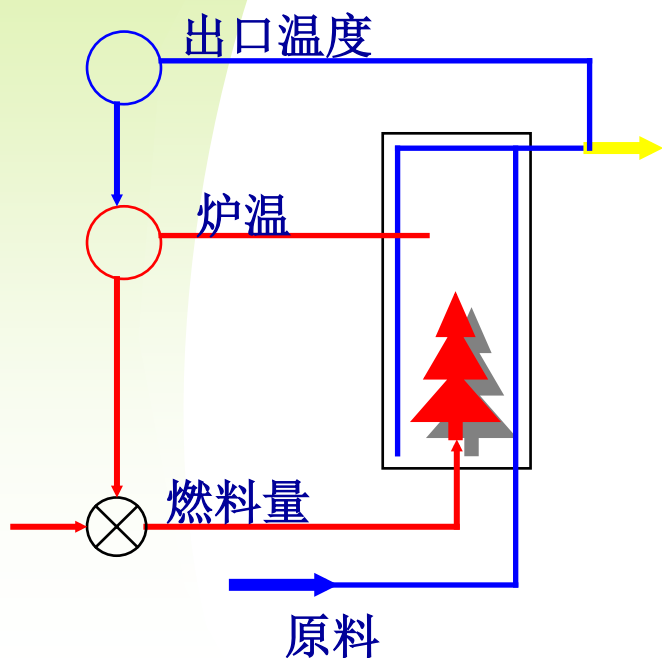




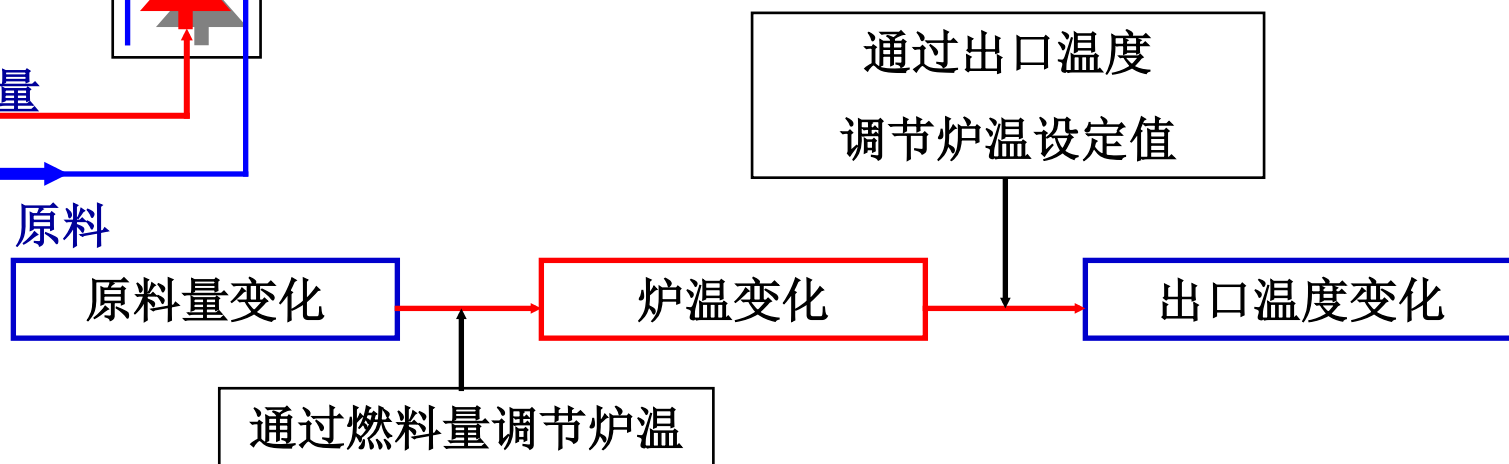
8.2 串级调节系统

结构组成 | 工作过程 | 例1. 管式加热炉 | 例2. 氧化炉温度调节

◆ 例1 管式加热炉的控制



- 主参数（被控量）：出口温度
- 操纵变量（控制量）：燃料量
- 副变量：炉温

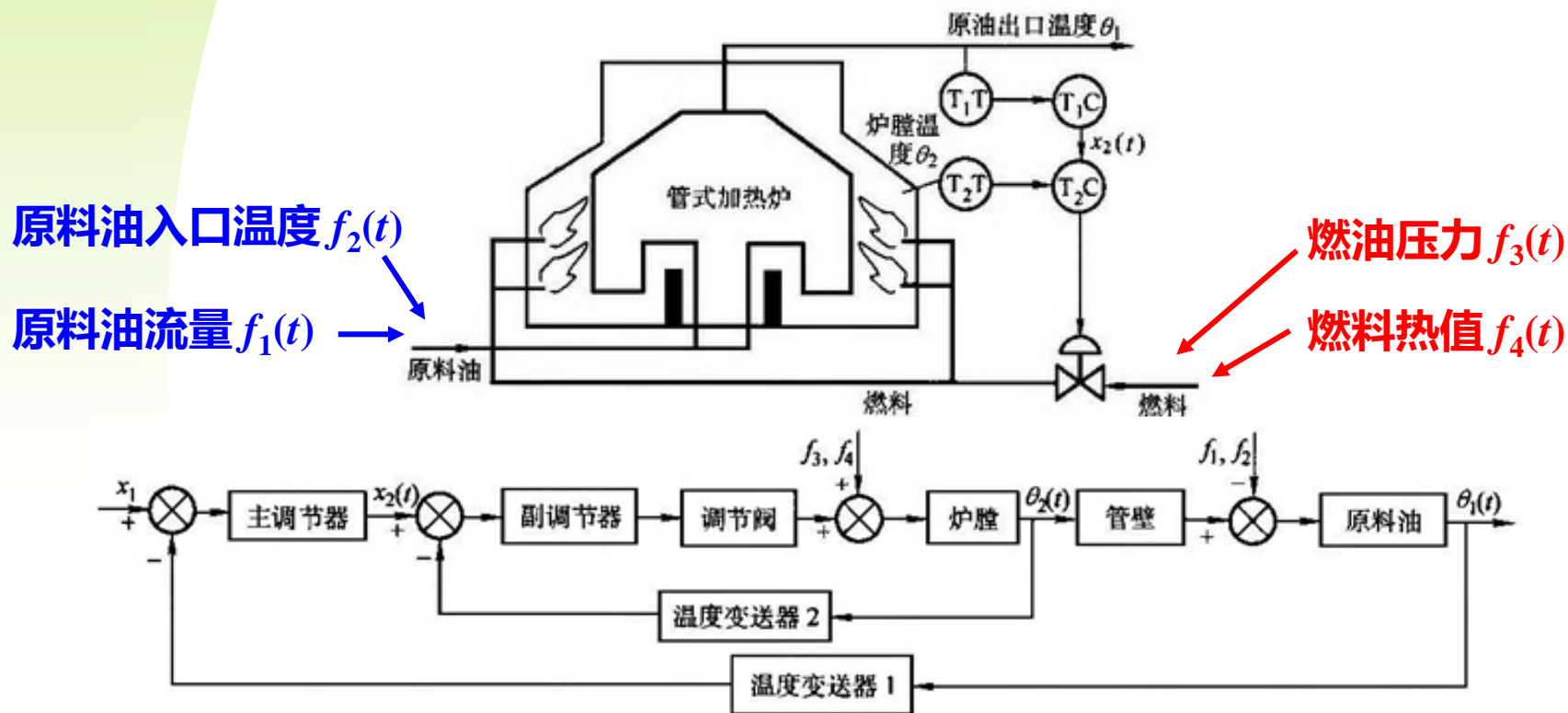




8.2 串级调节系统

结构组成 | 工作过程 | 例1. 管式加热炉 | 例2. 氧化炉温度调节

(2) 出口温度串级控制方式



管式加热炉出口温度串级控制系统框图



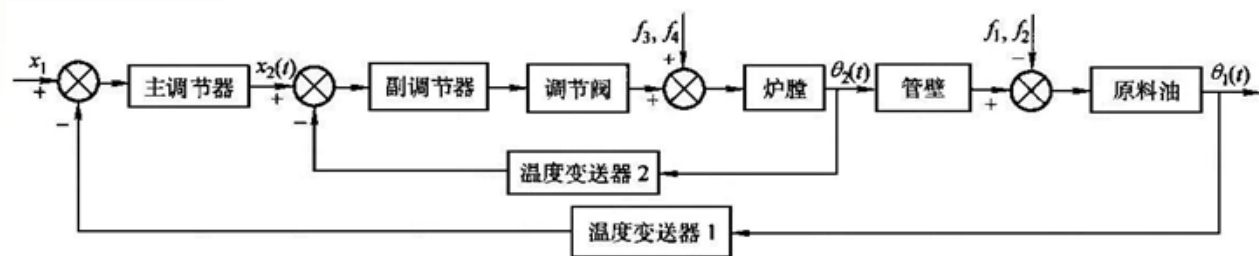
8.2 串级调节系统

结构组成 | 工作过程 | 例1. 管式加热炉 | 例2. 氧化炉温度调节

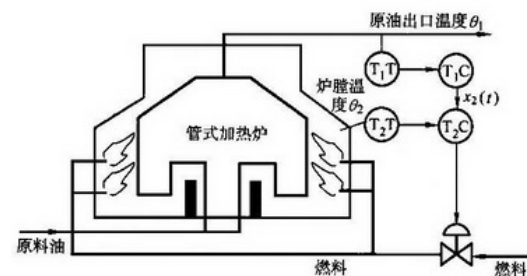
(2) 出口温度串级控制系统

控制原理的简单分析

- 副回路具有先调、粗调、快调的特点；
- 主回路具有后调、细调、慢调的特点，对副回路没有完全克服掉的干扰影响能彻底加以消除。
- 主副回路相互配合、相互补充，使控制质量显著提高。



管式加热炉出口温度串级控制系统框图





8.2 串级调节系统

结构组成 | 工作过程 | 例1. 管式加热炉 | 例2. 氧化炉温度调节

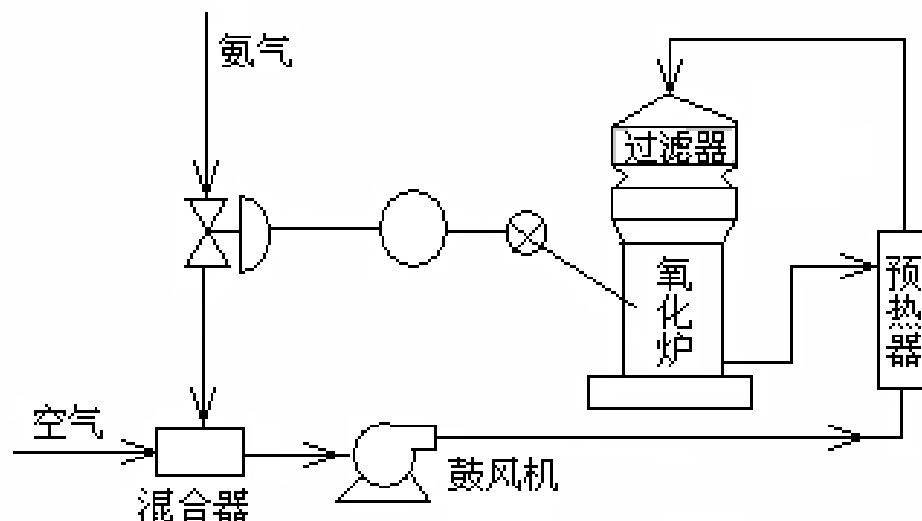
例2：氧化炉温度调节。

硝酸生产中，氧化炉是关键设备之一，氨气和空气在铂触媒的作用下，在氧化炉内进行氧化反应：



反应结果得到NO气体。

工艺要求：氧化率达到97%以上，为此要将氧化炉温度控制在 $840 \pm 5^\circ\text{C}$ 。





8.2 串级调节系统

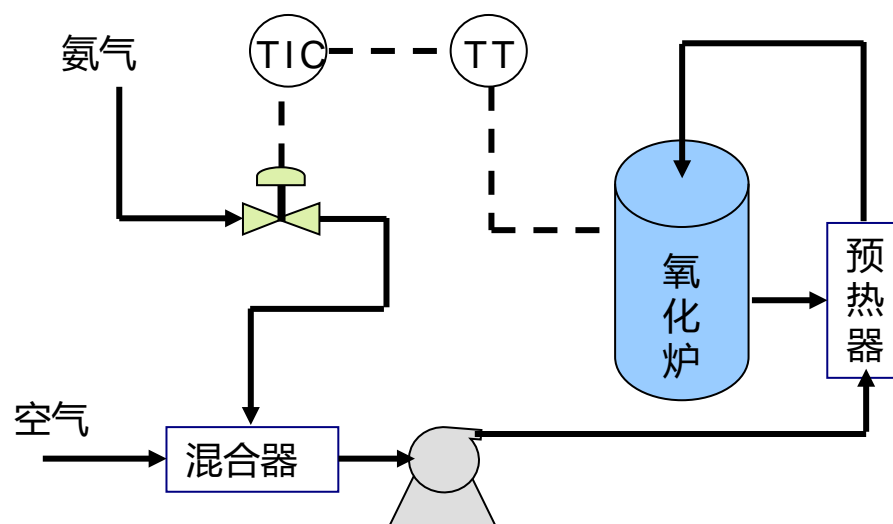
结构组成 | 工作过程 | 例1. 管式加热炉 | 例2. 氧化炉温度调节

例2：氧化炉温度调节。

方案①：温度单回路调节系统，

最大偏差为 10°C ，手动时最大偏差 $20 \sim 30^{\circ}\text{C}$ 。

偏差较大原因是，温度单回路调节系统虽包括了全部扰动，但调节通道**滞后大**，对于氨气总管压力和流量的频繁变化不能及时克服。





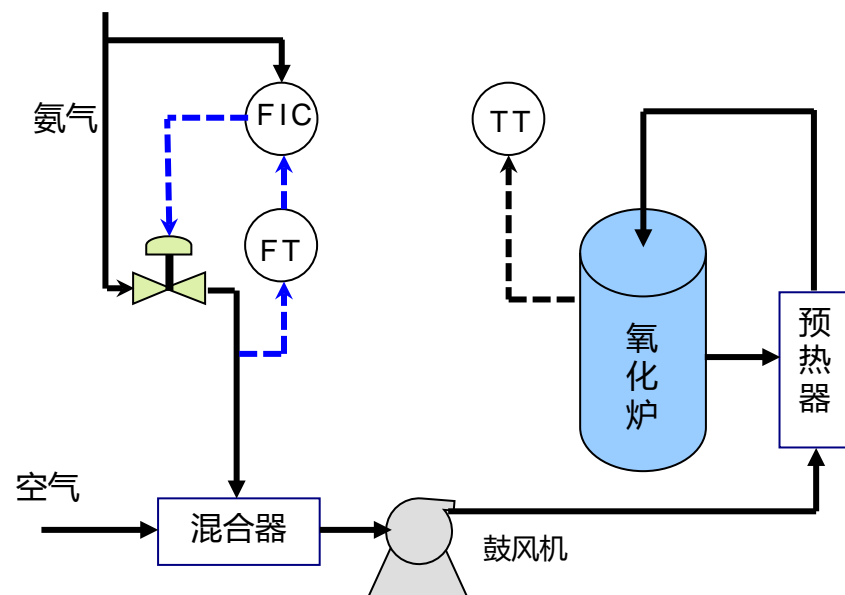
8.2 串级调节系统

结构组成 | 工作过程 | 例1. 管式加热炉 | 例2. 氧化炉温度调节

例2：氧化炉温度调节。

方案②：氨气流量调节系统

- 工艺提供氨气流量变化1%，氧化炉温度变64℃；
- 设计氨气流量调节系统能迅速克服氨气流量的干扰，这样把氨气流量变化克服在影响反应温度之前，但偏差仍达8℃；
- 这是因为氧化炉还存在其他干扰：如空气量，触煤老化等问题；





8.2 串级调节系统

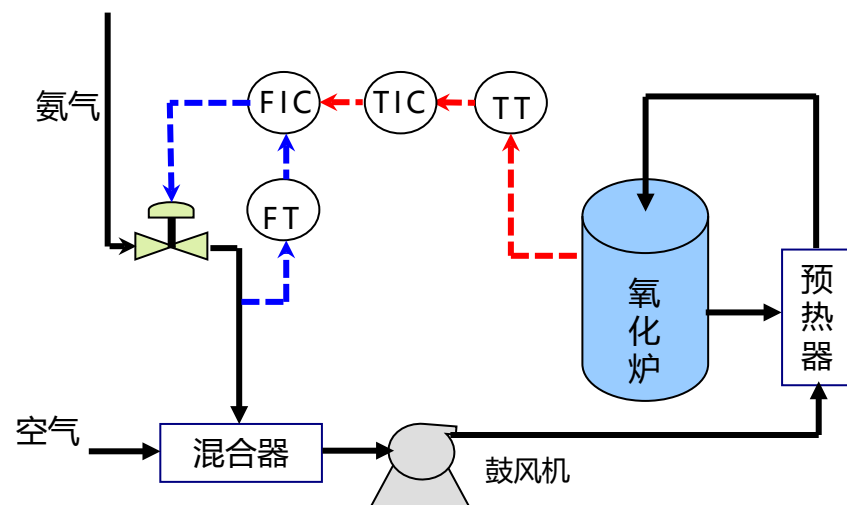
结构组成 | 工作过程 | 例1. 管式加热炉 | 例2. 氧化炉温度调节

例2：氧化炉温度调节。

方案③：**温度**为主参数，**流量**为副参数的串级调节系统。

由温度调节器来决定氨气的需要量，而氨气的需要量是由流量调节系统来决定的，即流量调节器的给定值由温度调节器的需要来决定：

- (i) 变还是不变；
- (ii) 变化多少；
- (iii) 朝哪个方向变。





预告篇

正餐已过，还有甜点

- 1 QQ线上答疑不间断；
- 2 每周一次腾讯会议答疑持续到考试前；
- 3 两天的集中线下答疑，22日和23日，科学园E1栋303,304,305；
- 4 问卷调查，收集反馈；

感谢同学们的支持与配合！
这是人生一段愉快的旅程！



总结

本节课内容回顾

- 介绍了单回路控制系统的局限；
- 给出了多回路控制系统的设计原则；
- 通过例子说明多回路控制系统的设计步骤和流程；
- 通过两个实例讲解了串级调节系统的相关概念和原理；



第23讲课后作业

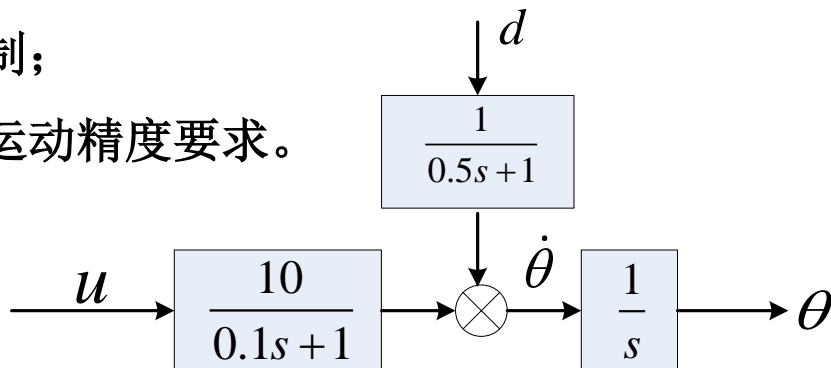
1 必选作业

23.1 考虑两轴雷达跟踪系统，试设计方位轴控制系统，已知执行电机的传递函数和风扰的传递函数分别为 $G(s) = \frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{10}{0.1s+1} \cdot \frac{1}{s}$ $D(s) = \frac{\dot{\theta}(s)}{d(s)} = \frac{1}{0.5s+1}$

要求在 d 是幅值为10Nm的阶跃扰动下，方位轴跟踪1°阶跃响应的跟踪误差不大于0.002°，方位轴跟踪2Hz，5°正弦信号的误差不超过0.05°

试采用位置和速度双回路控制完成如下设计任务：

- ① 确定内外两个回路的输入和输出量，绘制多回路控制结构框图；
- ② 设计内回路控制器，实现扰动抑制；
- ③ 设计外回路控制器，满足方位轴运动精度要求。
- ④ 进行仿真验证



可以尝试单回路设计，并对比性能



第22讲课后作业

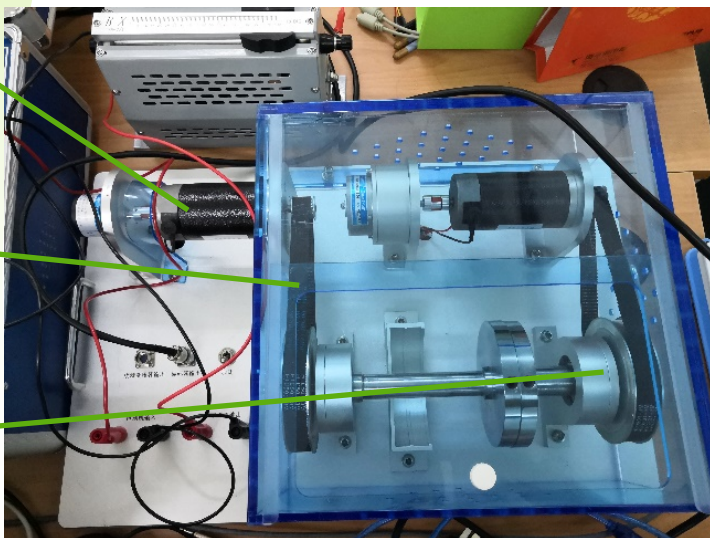
2 必选作业

22-2 总结实验过程中踩过的坑和犯过的错误，还有你的成长与收获

电机

皮带

负载



学以致用，用复盘总结的方式为自己提供一次反馈和校正



第23讲课后作业

2 可选作业

- 23.1 回顾前面讲到过的单回路控制设计内容，总结单回路与多回路控制设计的主要区别；
- 23.2 总结解决噪声抑制与指令跟踪矛盾的各种方法，并给出其适用条件；
- 23.3 思考基于伺服系统和调节系统视角的人生观，什么需要及时改变，什么又需要坚持不变；
- 23.4 结合伺服系统和多回路控制课程的内容，总结基于各种指标的控制器设计方法；
- 23.5 总结课程所讲到过的各种经验公式或设计原则（比如内回路带宽一般是外回路的5倍），从原理上理解这些经验公式的道理；



第23讲课后作业

2 可选作业

23.6 总结课程中所有涉及多回路控制的内容，并试着分析它们的共性与区别；

23.7 分析运动控制系统的多回路和过程控制系统的串级调节之间的异同；

23.8 总结课程中提到过的能够解决单回控制矛盾的各种方法，并尝试提出其他可能的方法；

23.9 参考四篇“如何成为一名优秀的控制工程师”内容，谈谈你自己的想法；

23.8 尝试完成关于多回路控制系统的20个判断题（见后两页），并试着提出其他问题；



第23讲课后作业

视角

2 可选作业

判断辨析题

- A. 多回路的各个回路的反馈量一般不是同一个物理量;
- B. 多回路的各个回路的输入量的物理意义不同;
- C. 回路数量不能超过两个;
- D. 多回路系统中, 传感器与执行器的数量与回路个数相同;
- E. 运动控制系统中, 采用双回路可以获得更好的低速性能;
- F. 运动控制系统中, 采用双回路可以获得更大的带宽;
- G. 采用多回路控制可以获得更好的控制精度;
- H. 采用多回路控制可以获得更好的扰动抑制能力;
- I. 采用多回路控制可以获得更好的鲁棒性;
- J. 采用多回路的重要作用之一是更好地抑制噪声;

特点

性能



第23讲课后作业

视角

2 可选作业

判断辨析题

- K. 多回路控制中，内回路的带宽一定要足够高，才能有效抑制扰动；
- L. 多回路控制中，内回路和外回路控制器形式没有严格的限制；
- M. 多回路控制中，外回路的带宽是由内回路的带宽决定的；
- N. 运动控制系统中，内回路设计时不用考虑谐振的影响；
- O. 多回路控制中，外回路抑制噪声，内回路完全不用考虑噪声的影响；
- P. 多回路控制设计中，内回路的静差大小对外回路没有直接影响；
- Q. 如果采用数字控制实现多回路控制，内外回路的控制周期可以不同；
- R. 多回路原理可以理解为把高阶对象分成多个低阶对象再进行控制；
- S. 多回路控制能解决单回路的矛盾可以理解为结构的改变和信息的利用；
- T. 现代控制理论中的全状态反馈也可以看做是多回路控制；
- U. 多回路的结构形式提供了打破单回路的约束与限制的可能；

设计

原理



Thank You !

授课教师： 马 杰 (控制与仿真中心)
霍 鑫 (控制与仿真中心)
马克茂 (控制与仿真中心)
陈松林 (控制与仿真中心)