



第8章 多回路系统的设计

——2019年春季学期

授课教师：马 杰（控制与仿真中心）

罗 晶（控制科学与工程系）

马克茂（控制与仿真中心）

陈松林（控制与仿真中心）



上一节课内容回顾

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

□ 过程控制的任務

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。



上一节课内容回顾

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
- 平方误差积分

针对特定输入的
分离指标

综合指标

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

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；

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。

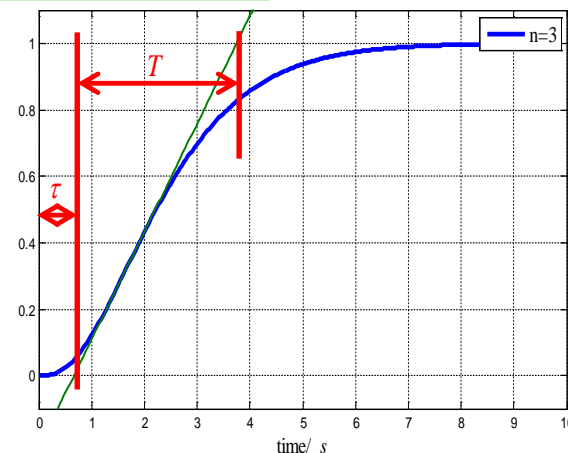


上一节课内容回顾

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



上一节课内容回顾

过程控制系统的PID设计原则

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

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。

先确定剪切频率，确定比例增益，再加微分调阻尼（补相角），再用积分提精度（改型别）。必要时在微调比例增益。微分和积分时间常数应该满足如下关系：

$$\omega_n \Rightarrow K_P$$

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

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



上一节课内容回顾

PID参数整理分类

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，按实际运行曲线进行调整。



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

◆ 单回路系统设计的局限性

矛盾一：

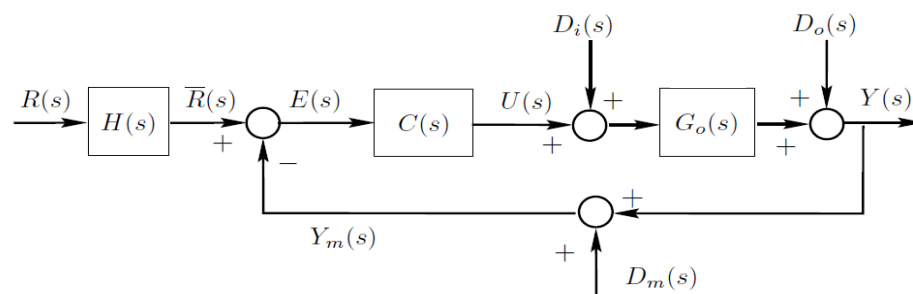
系统中噪声大，输入信号的频谱不宽：要求系统的带宽要窄，但带宽变窄，干扰抑制的效果变差；

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：

要求系统的频率响应较宽：系统的带宽却做不到。



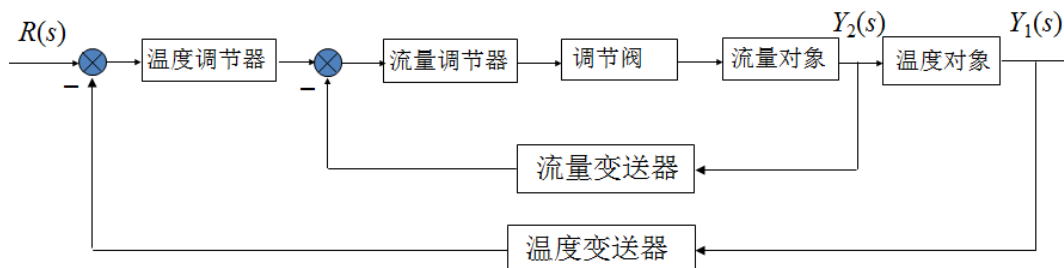
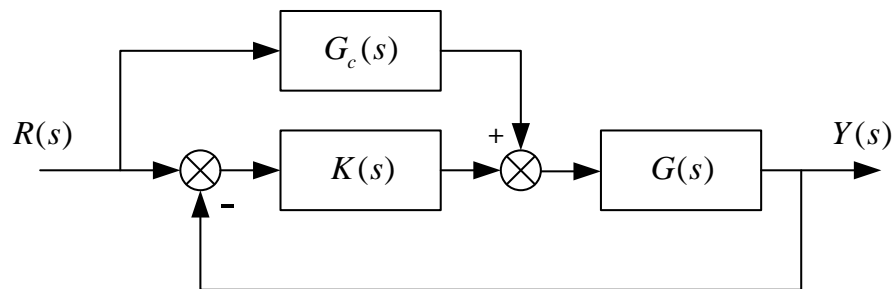
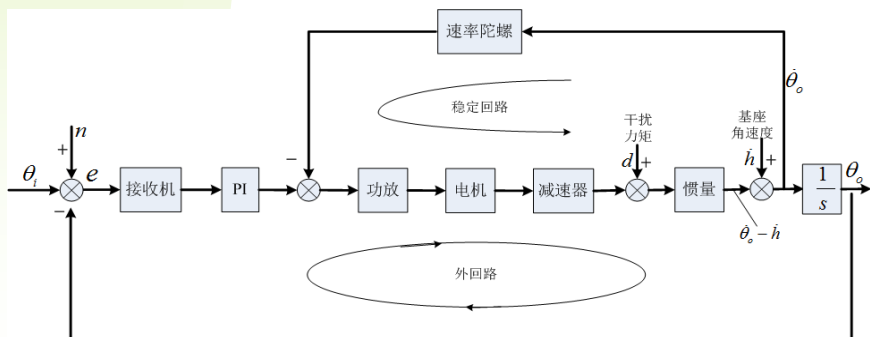


8.1 多回路系统

◆ 多回路系统的设计原则

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。

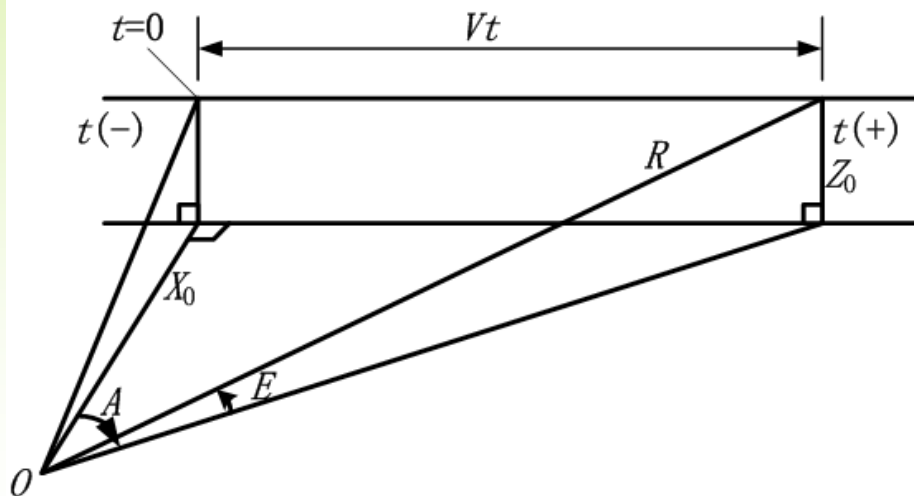
- 用快速回路来抑制扰动或改善带宽
- 主回路用窄带宽的来抑制噪声或稳定性限制





8.1 多回路系统

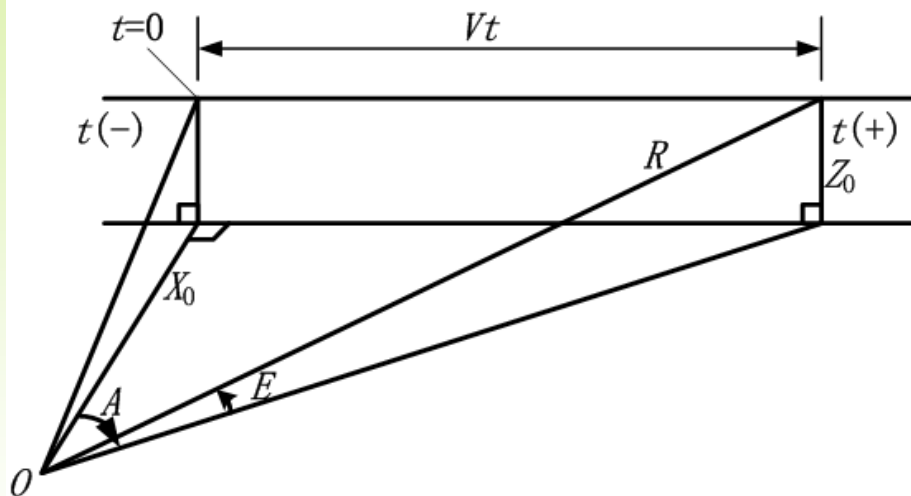
◆ 例1:舰用雷达跟踪系统





8.1 多回路系统

◆ 例1:舰用雷达跟踪系统



系统设计存在的困难:

- ❑ 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

设计指标:

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

◆ 例1:舰用雷达跟踪系统



元部件的类型:

□ 驱动元件: 电机+减速器

□ 测量元件:

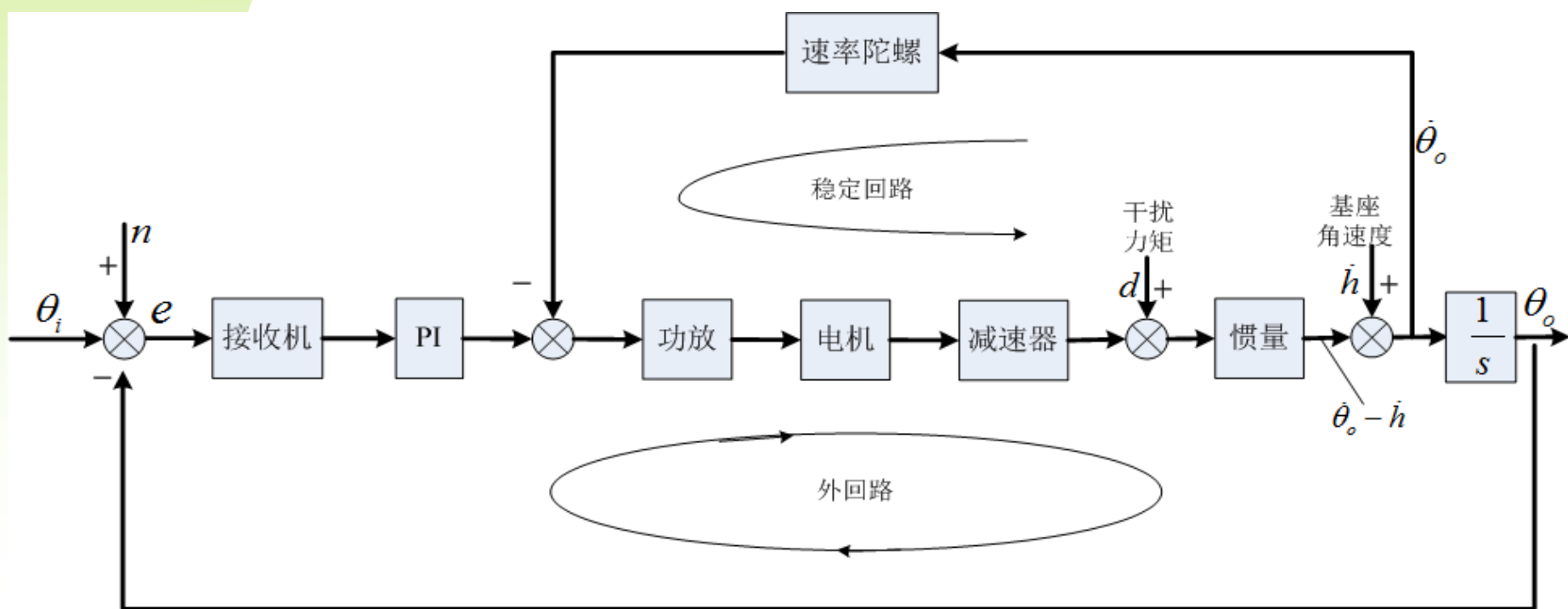
速率陀螺——舰船摇摆

雷达接收机——角位置误差



8.1 多回路系统

例1:舰用雷达跟踪系统



舰用雷达跟踪系统原理框图



8.1 多回路系统

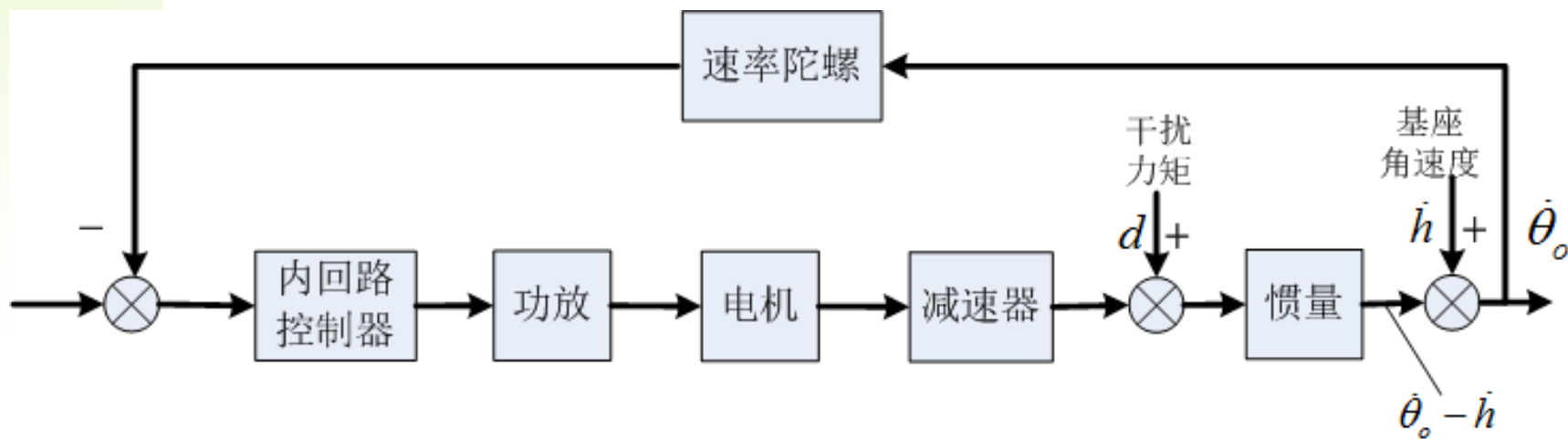
◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

1、内回路设计

内回路的任务——抑制干扰



内回路带宽要宽!



内回路原理框图



8.1 多回路系统

◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

1、内回路设计

内回路的开环传递函数: $K_{in} G(s)$

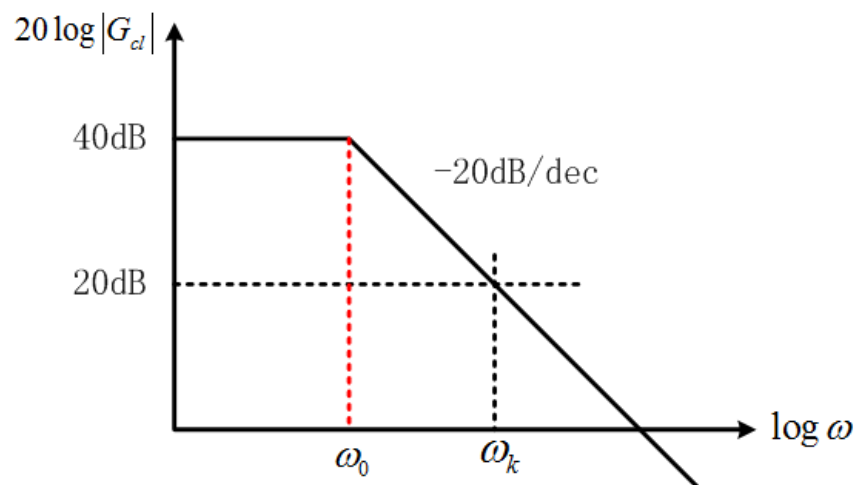
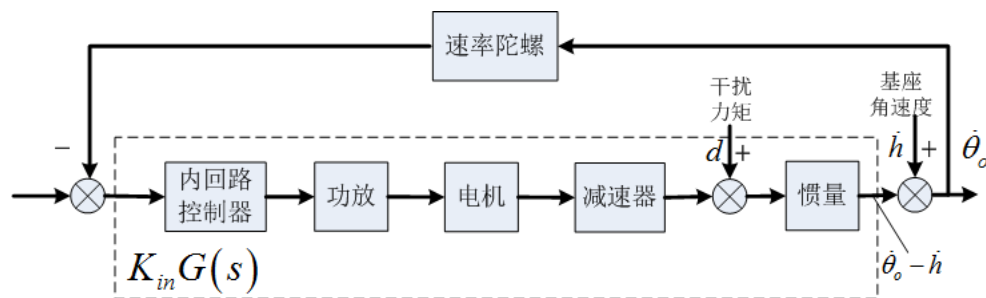
扰动响应: $\frac{\dot{\theta}_0}{\dot{h}} = \frac{1}{1 + K_{in} G(s)}$ \Rightarrow $\frac{\dot{h}}{\dot{\theta}_0} = 1 + K_{in} G(s)$ 称为隔离度

设 $K_{in} = 100$

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

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

内回路原理框图





8.1 多回路系统

◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

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关干扰，通常要分开设计，以便于调试。

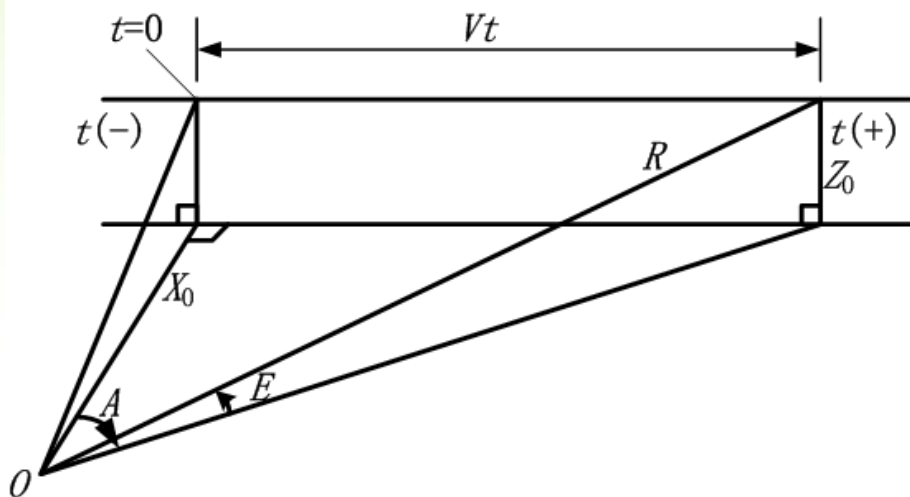


8.1 多回路系统

◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

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**4-32km**，跟踪的均方根误差应该小于 **$0.3 \times 10^{-3} \text{rad}$** 。

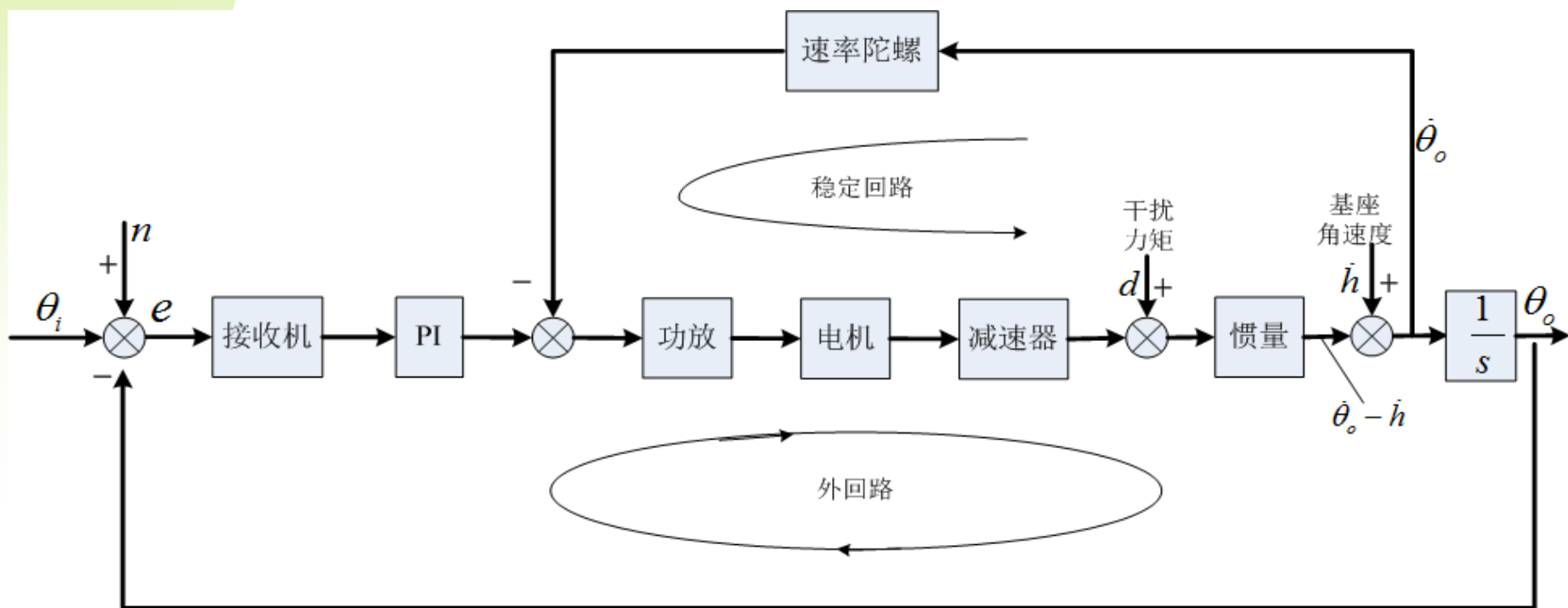




8.1 多回路系统

◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

2、外回路设计——系统框图



舰用雷达跟踪系统原理框图



8.1 多回路系统

◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

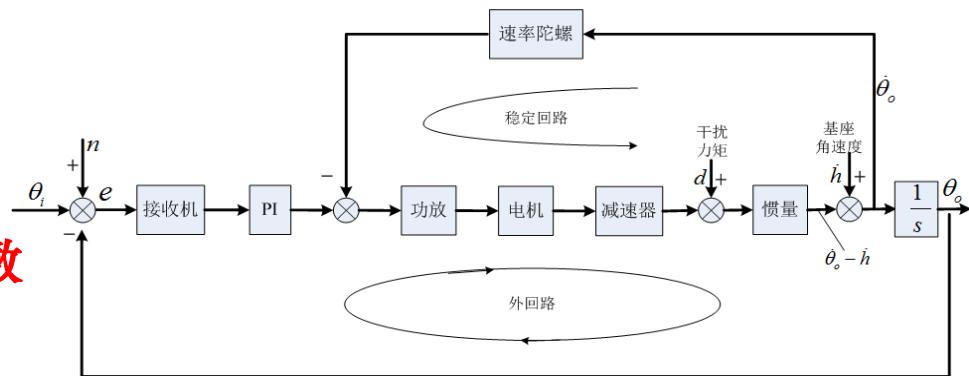
2、外回路设计——对象特性分析

外回路系统特性分析

- (1) 外回路输入信号包括两个信号：噪声和跟踪指令；
- (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) 跟踪误差来源分析——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

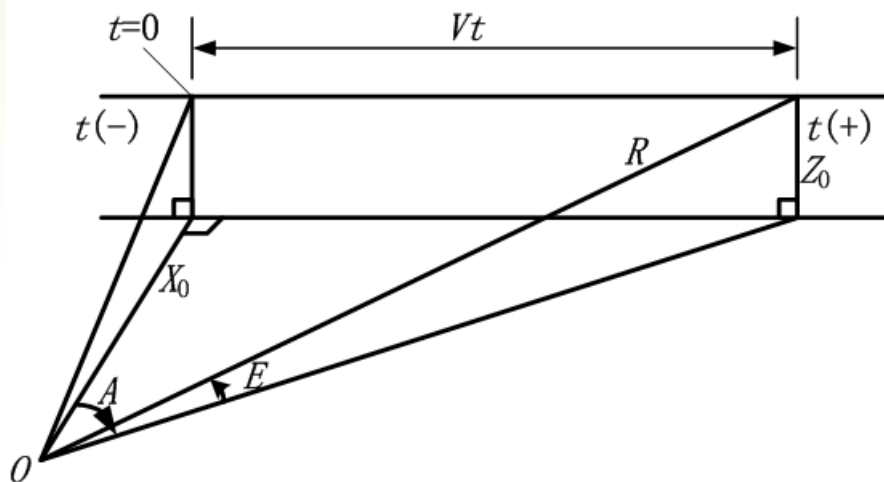
◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

2、外回路设计——输入条件分析（最大角加速度）

(a) 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

◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

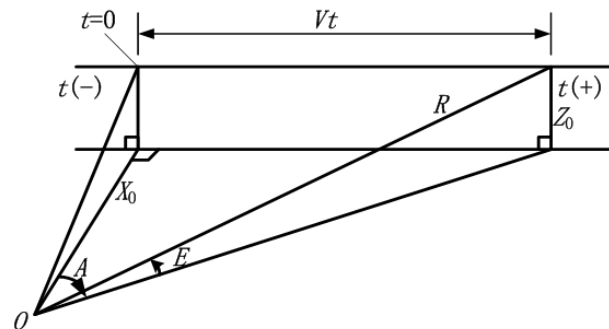
2、外回路设计——最大加速度计算

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

两边求导，有

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

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

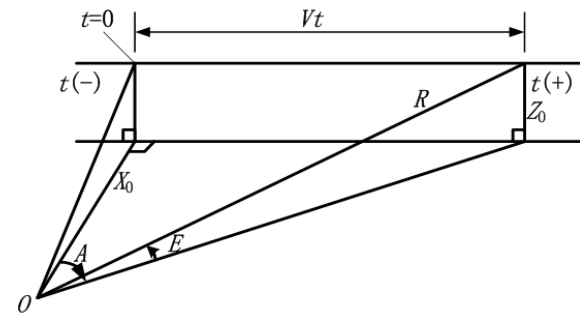




8.1 多回路系统

◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

2、外回路设计——最大加速度计算



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

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



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

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



8.1 多回路系统

例1:舰用雷达跟踪系统

2、外回路设计

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

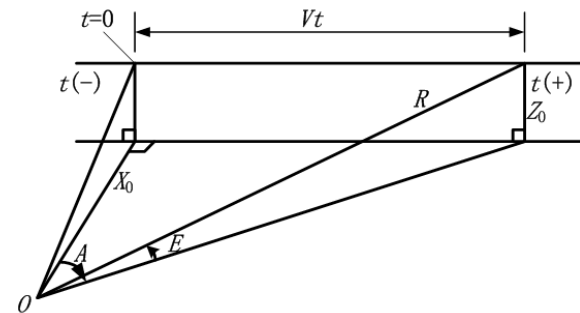


$$\begin{aligned} \frac{d^2 E}{dt^2} &= -\frac{V}{R} \cdot \left(\cos A \sin E \cdot \frac{dA}{dt} + \sin A \cos E \cdot \frac{dE}{dt} \right) \\ &= -\frac{V}{R} \cdot \left(\cos A \sin E \cdot \frac{V}{X_0} \cos^2 A - \sin A \cos E \cdot \frac{V}{R} \sin A \sin E \right) \\ &= -\frac{V^2}{R^2} \tan E \left(\cos^2 A - \sin^2 A \cos^2 E \right) \\ &= -\frac{V^2}{R^2} \tan E \left(1 - \sin^2 A (1 + \cos^2 E) \right) \end{aligned}$$

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

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

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





8.1 多回路系统

◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

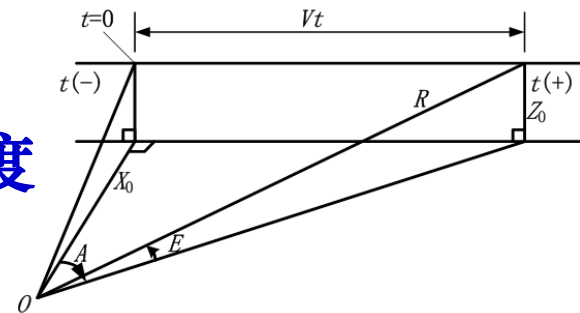
2、外回路设计——典型工况下最大加速度

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

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

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

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



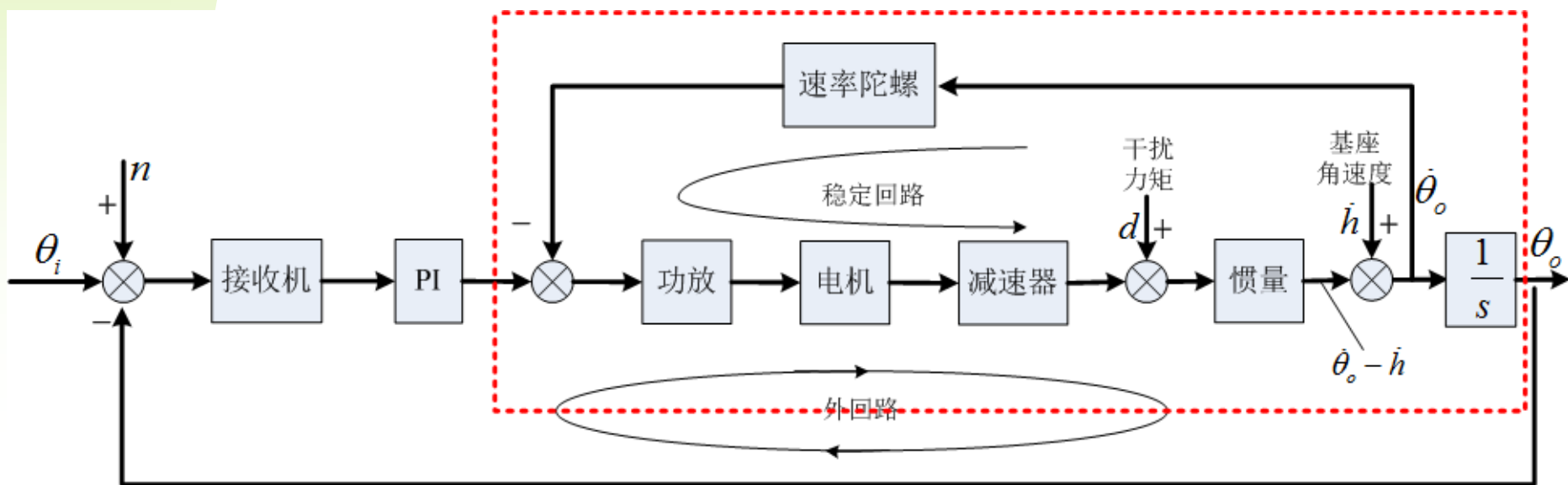


8.1 多回路系统

◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

2、外回路设计

(b) 确定外回路的被控对象



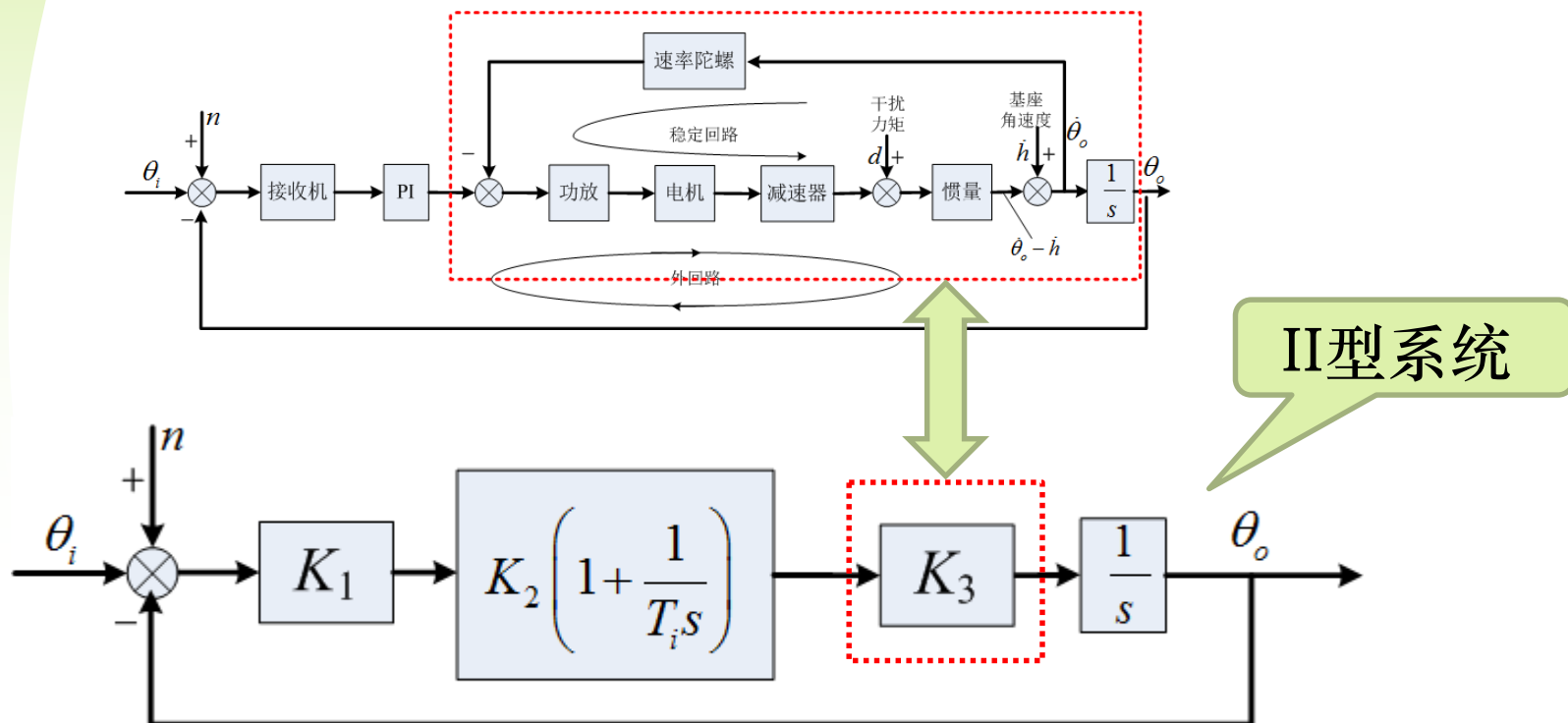


8.1 多回路系统

◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

2、外回路设计

(b) 确定外回路的被控对象



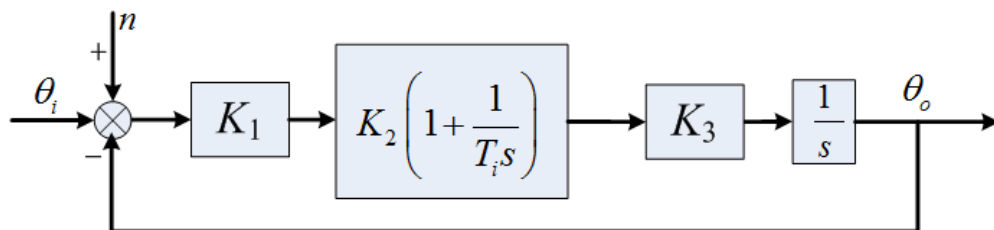


8.1 多回路系统

◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

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

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

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

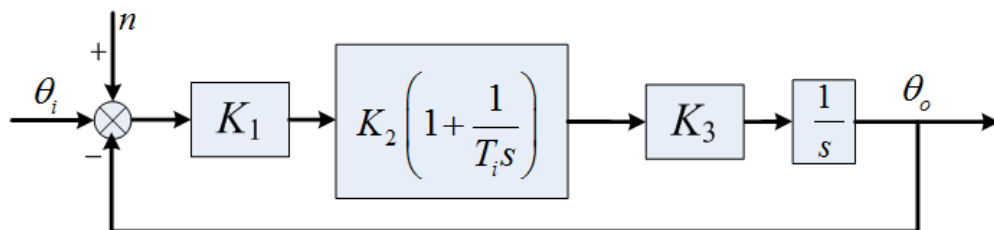


8.1 多回路系统

◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

2、外回路设计

(d) 噪声抑制



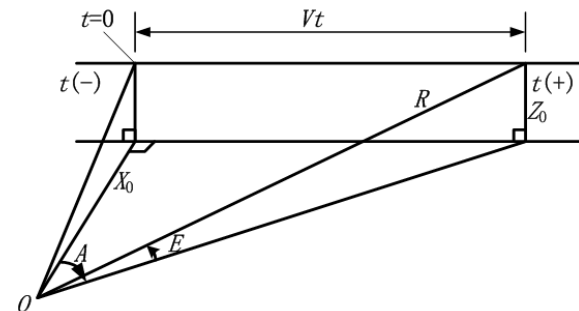
系统的噪声主要是雷达接收系统的热噪声，这种噪声可以看作是白噪声，接收机的均方噪声输出与斜距 R 的四次方成正比，噪声的谱密度为

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

R ——目标的实际斜距，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）。



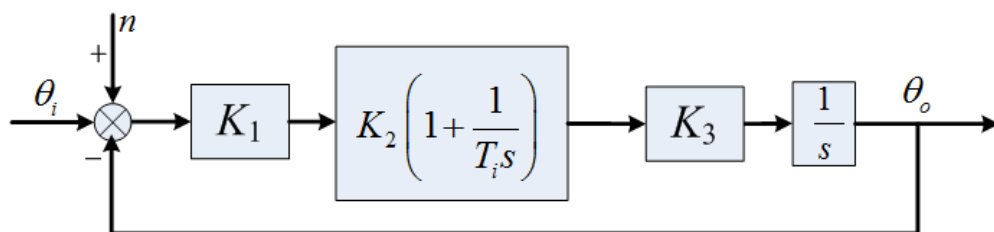


8.1 多回路系统

◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

2、外回路设计

(d) 噪声抑制



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

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

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

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

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

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

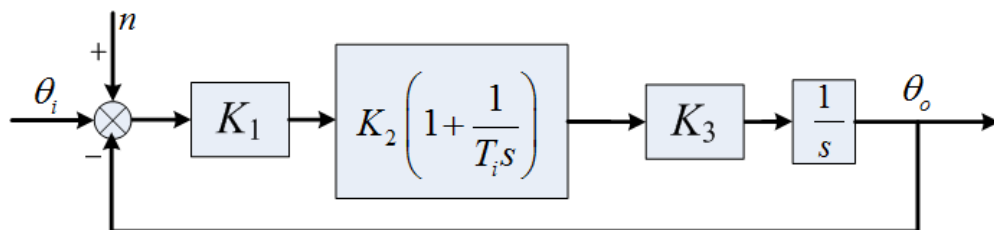


8.1 多回路系统

◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

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，为此应保证跟踪误差的条件下，减小带宽。

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

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

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

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

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

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



8.1 多回路系统

◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

2、外回路设计

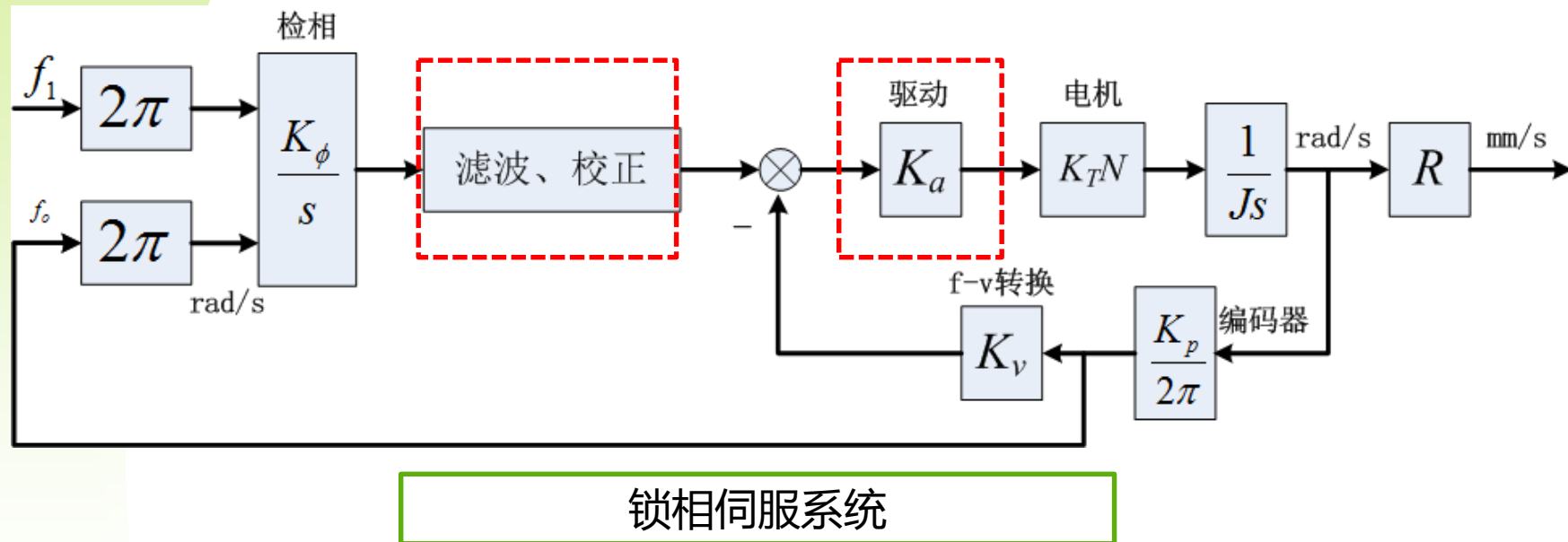
(d) 噪声抑制

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

◆ 例2: 锁相伺服系统



基本参数:

$$K_\phi = 1.5 \text{ V/rad}, K_p = 9000, K_v = 0.024 \text{ V/Hz}$$

$$K_T = 348.6 \text{ g} \cdot \text{cm/A}, N = 1000, J = 1840 \text{ g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2, R = 10.85 \text{ mm}$$

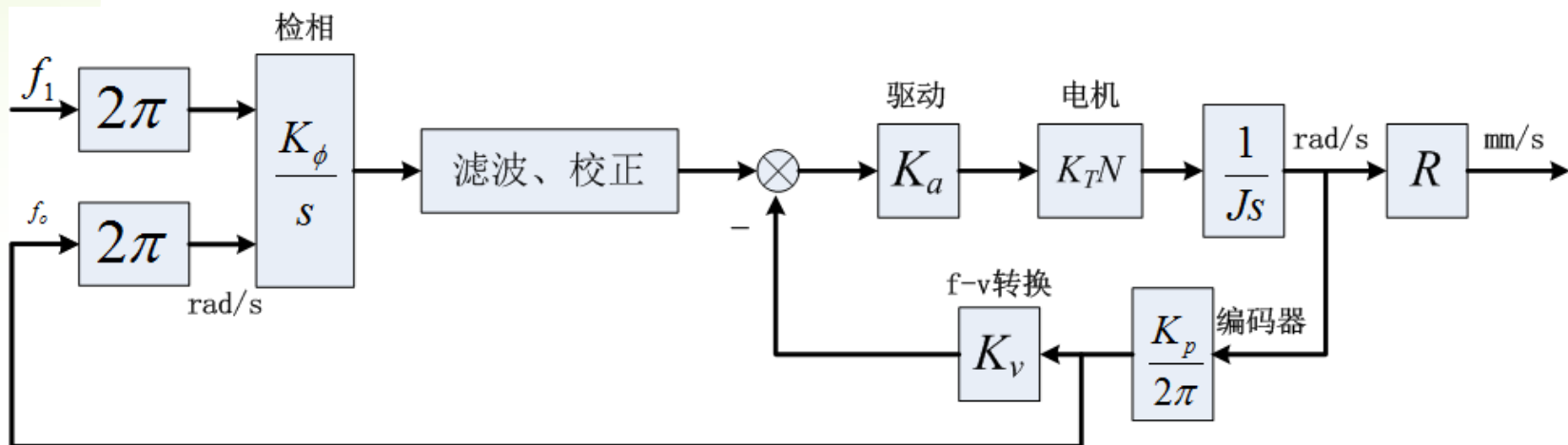


8.1 多回路系统

◆ 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，将缺一阻尼项，需要加一速率反馈来提供阻尼；
- 除稳定性外，还要保证伺服精度的要求。





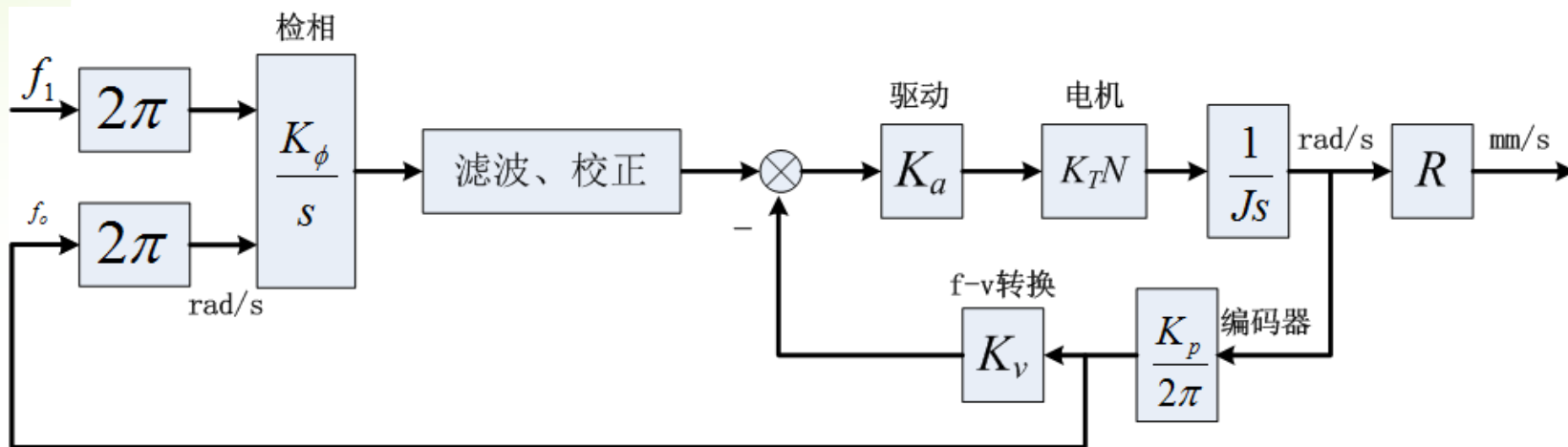
8.1 多回路系统

◆ 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）
- 170Hz的位置方波





8.1 多回路系统

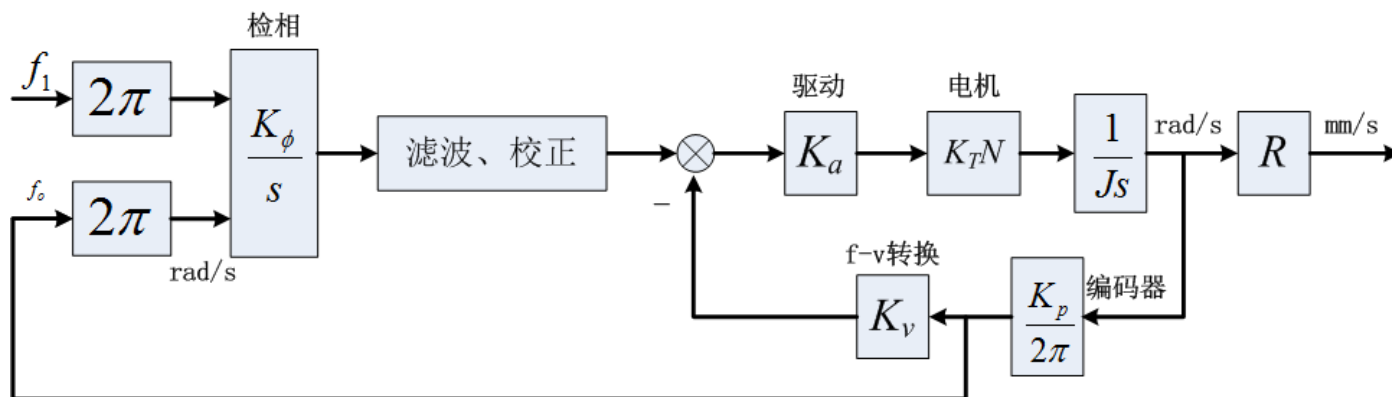
◆ 例2: 锁相伺服系统

(1) 内回路设计

➤ 170Hz的位置方波扰动

内回路带宽满足:

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

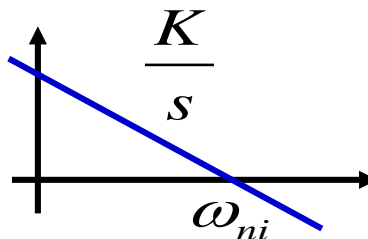




8.1 多回路系统

◆ 例2: 锁相伺服系统

(1) 内回路设计

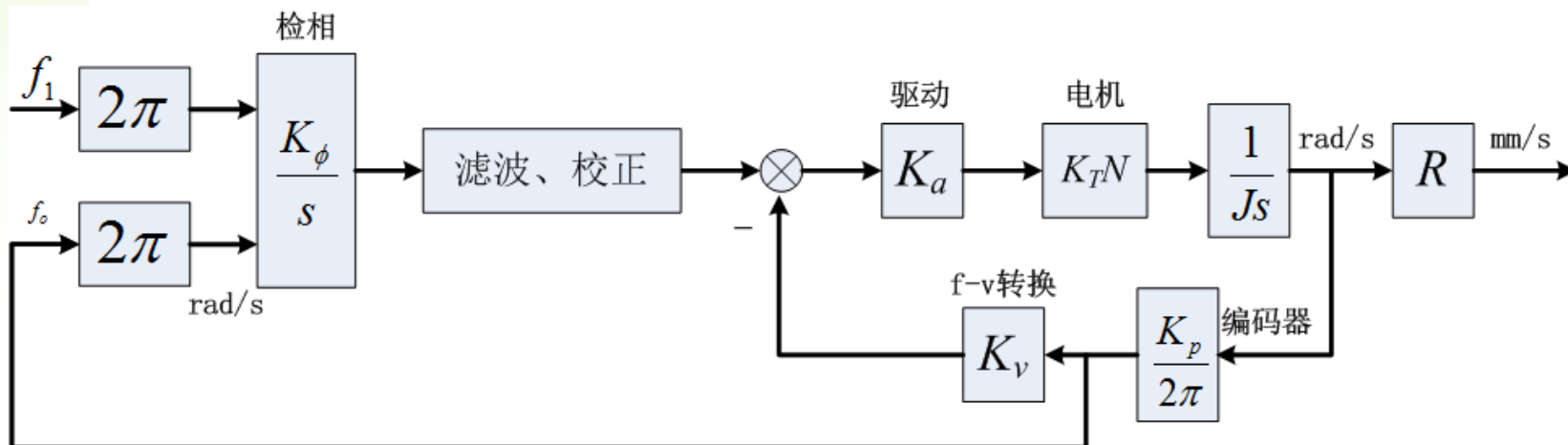


$$\omega_{ni} = 75 \text{ rad/s}$$

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

◆ 例2: 锁相伺服系统

(1) 内回路设计

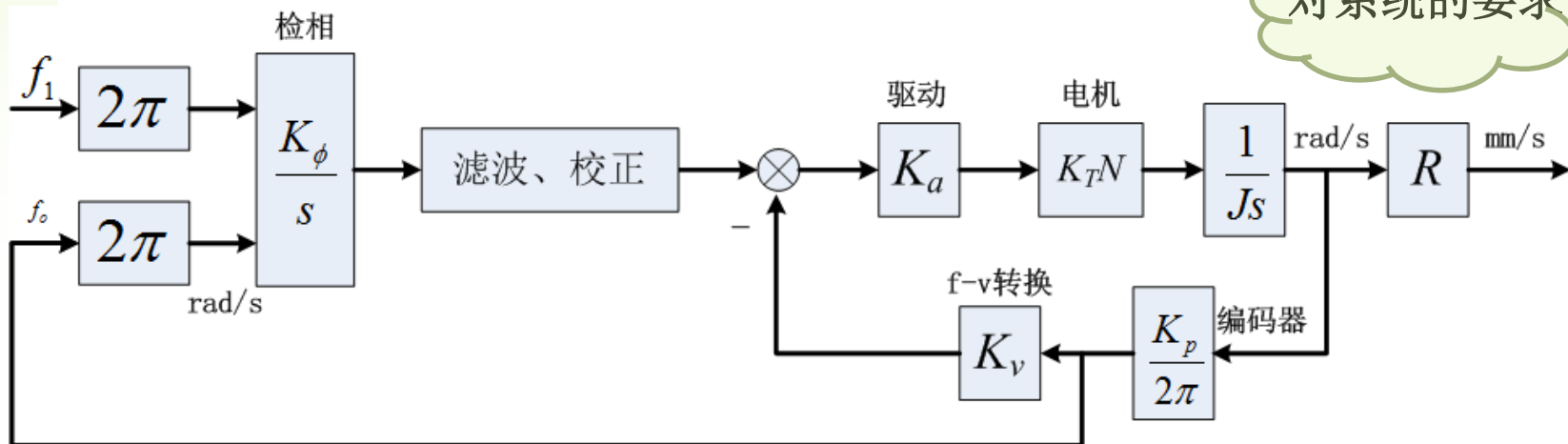
$$\omega_{ni} = 75 \text{ rad/s}$$

$$K_a = 0.0115$$

要求卷轴的速率跟踪误差小于0.001mm/s:

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

对系统的要求





8.1 多回路系统

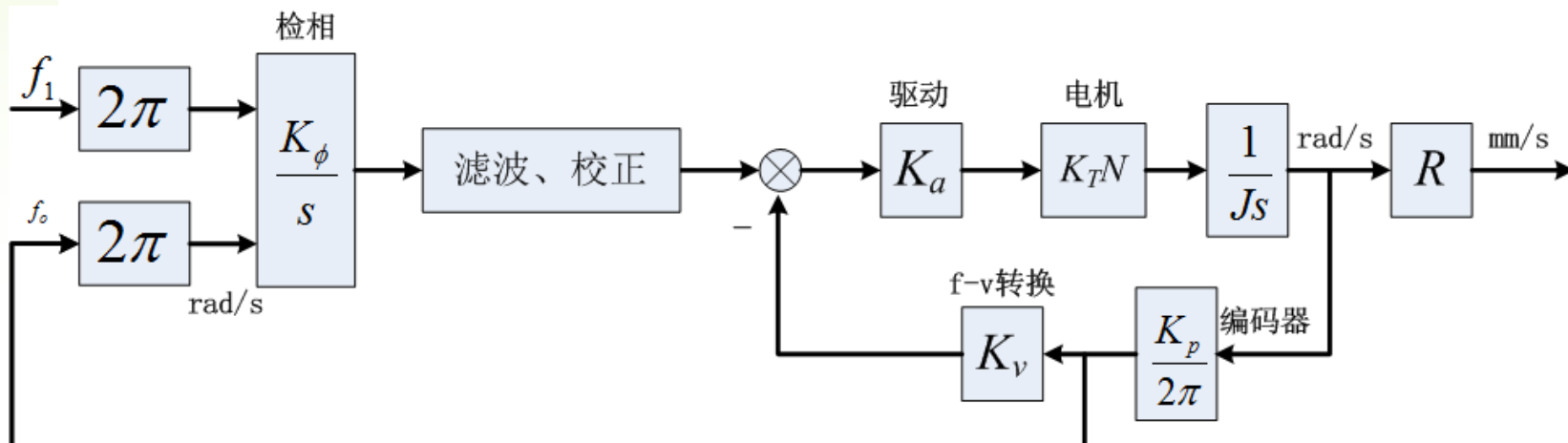
◆ 例2: 锁相伺服系统

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

(2) 主回路设计

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

◆ 例2: 锁相伺服系统

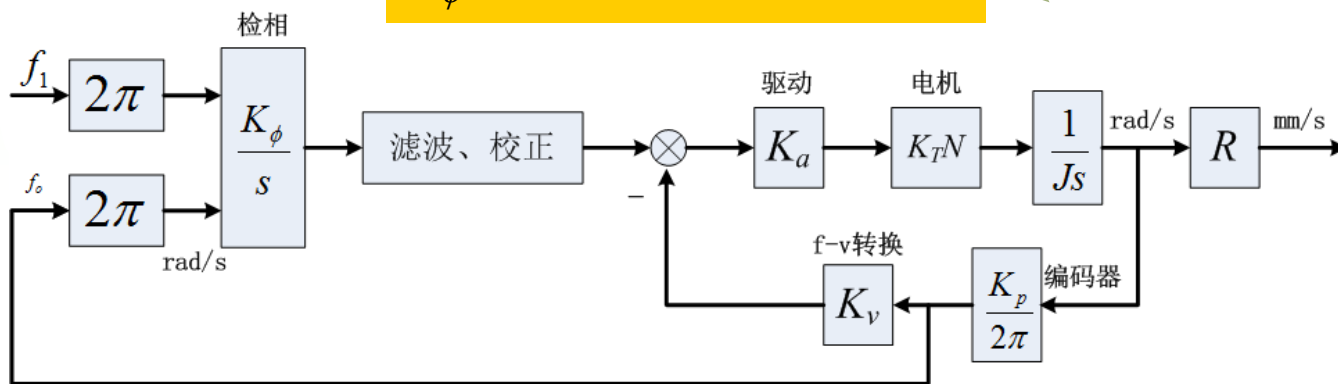
$$\omega_{no} = 15 \text{ rad/s}$$

(2) 主回路设计

- c) 伺服刚度——相位误差到电机输出轴之间的增益，用以验证检相器选择是否满足精度要求。

$$S = K_{\phi} K_a K_T N = 6000 \text{ g} \cdot \text{cm/rad} \quad e = \frac{1}{S} \cdot d_{\text{扰动}} = \frac{1}{6000} d_{\text{扰动}}$$

K_{ϕ} 满足静态精度要求



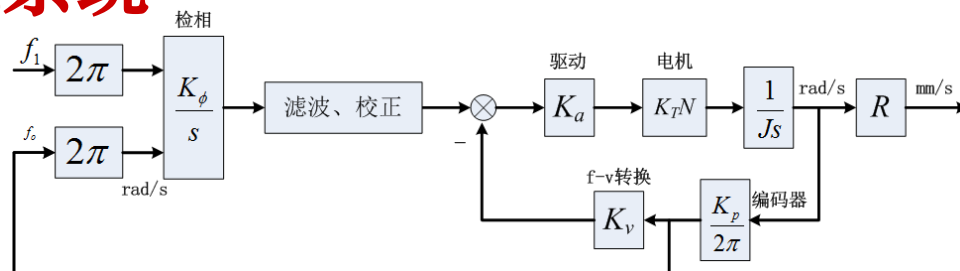


8.1 多回路系统

◆ 例2: 锁相伺服系统

(2) 主回路设计

d) 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：
$$K_{VCO} = \frac{1}{K_V}$$

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

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

e) 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

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

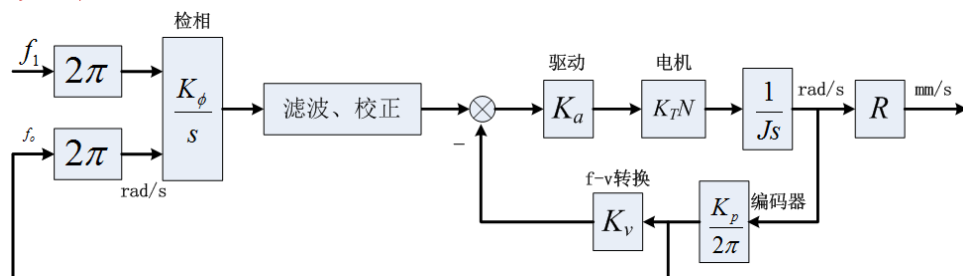


8.1 多回路系统

◆ 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。

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

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



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；
- 调试外回路时，将内回路当做一个比例环节。

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



Contents

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

◆ 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、副调节器、调节阀、副过程和主过程构成。

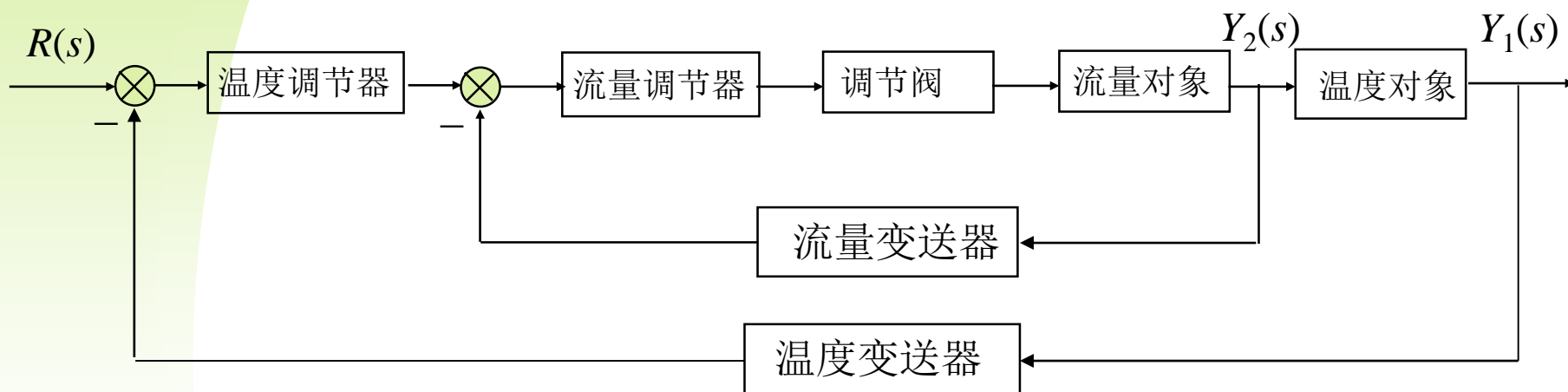
一次扰动：作用在主被控过程上的，而不包括在副回路范围内的扰动。

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。



8.2 串级调节系统

串级调节系统的结构组成

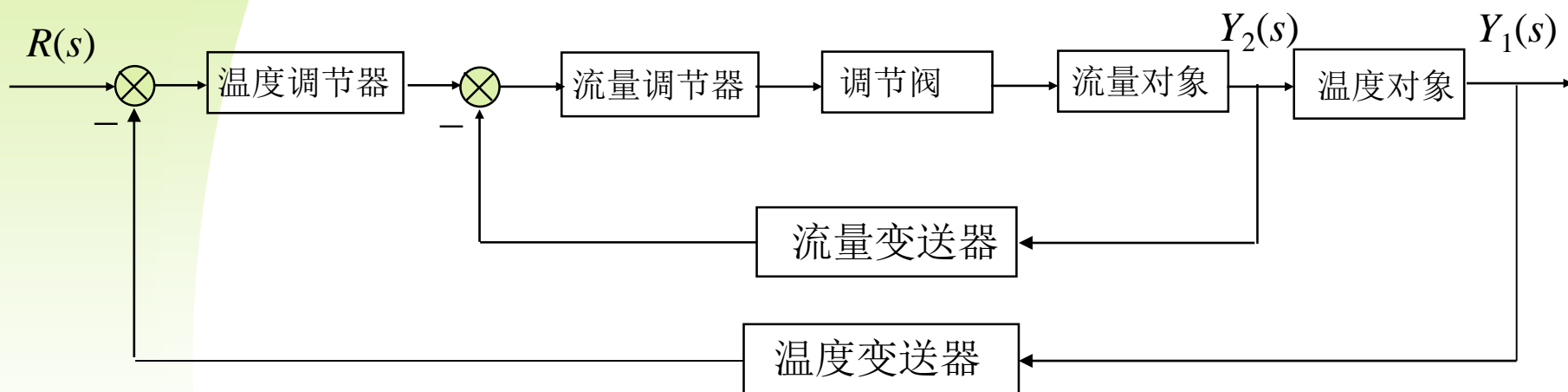


主参数（主被控变量 y_1 ）：生产工艺过程中主要控制的工艺指标，在串级调节系统中起主导作用的那个被调参数即为主参数，如氧化炉反应温度。



8.2 串级调节系统

串级调节系统的结构组成

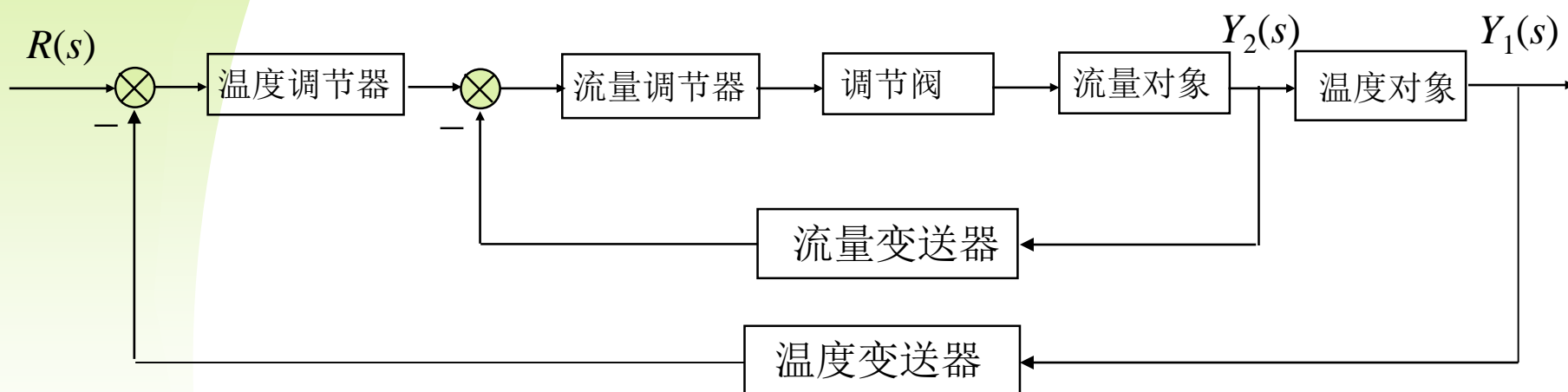


副参数（副被控变量 y_2 ）：影响主参数的主要变量和中间变量（如上述系统的氨气流量）。



8.2 串级调节系统

串级调节系统的结构组成

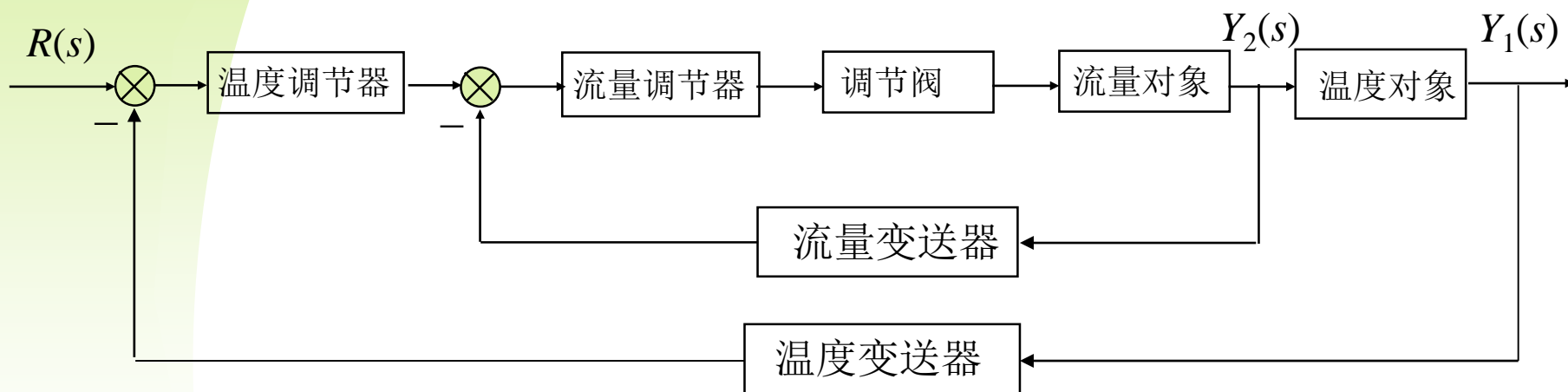


主被控对象（温度对象）：为生产中所要控制的，由主参数表征其主要特性的工艺生产设备（如氧化炉）。一般指副参数检测点到主参数检测点的全部工艺设备。



8.2 串级调节系统

串级调节系统的结构组成

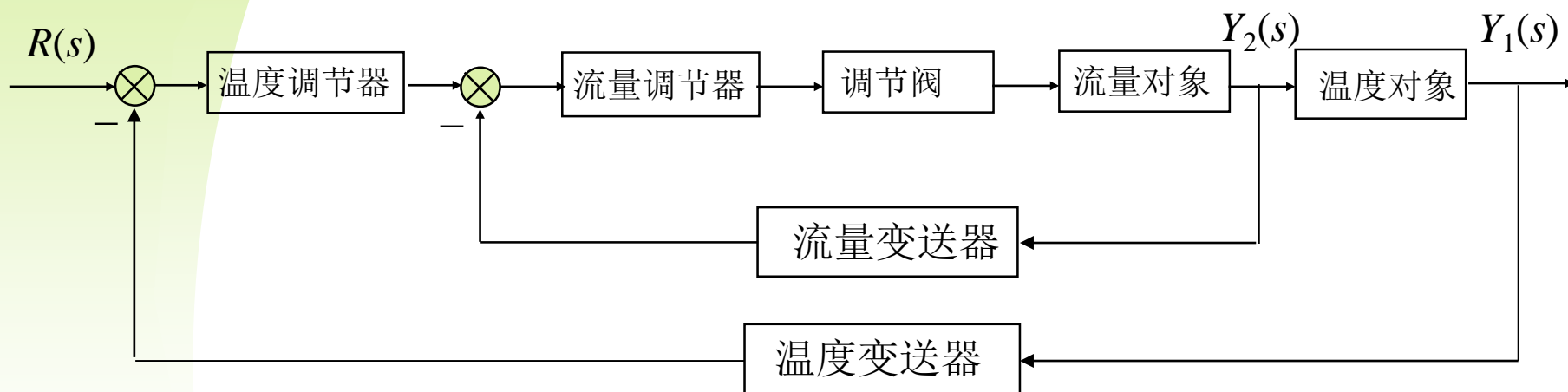


副被控对象（流量对象）：调节阀到副参数测量点之间的工艺设备。



8.2 串级调节系统

串级调节系统的结构组成

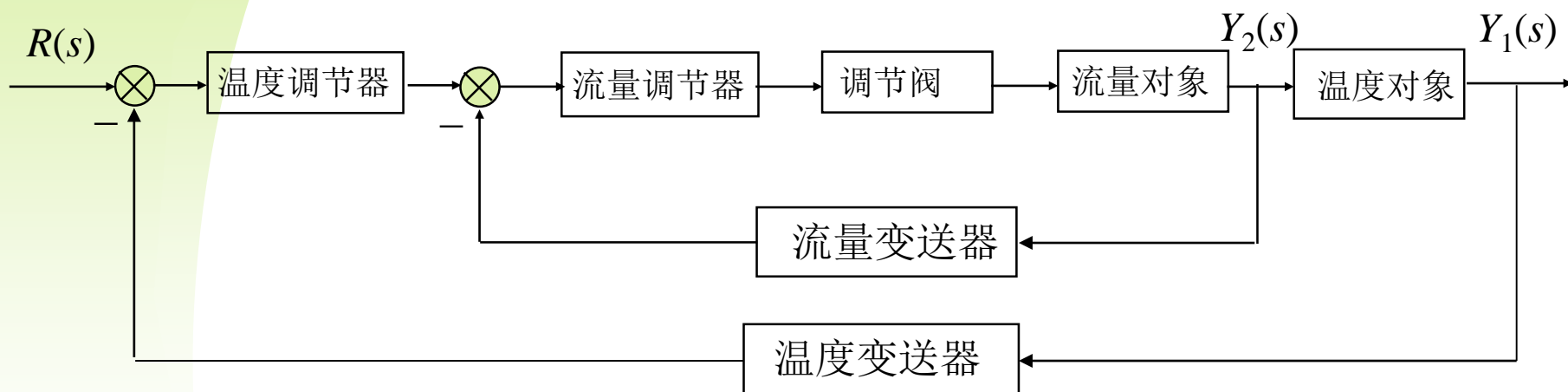


主调节器（温度调节器）：在系统中起主导作用，为恒定主参数设置的调节器。主调节器，按主参数与给定值的偏差而动作，其输出作为副参数的给定值。



8.2 串级调节系统

串级调节系统的结构组成



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

◆ 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：

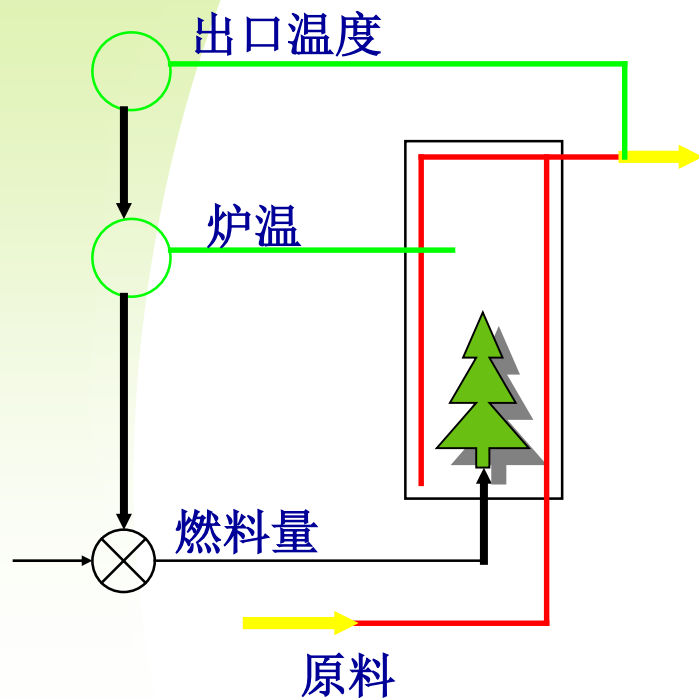
- * 扰动作用于副回路
- * 扰动作用于主过程
- * 扰动同时作用于副回路和主过程

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。

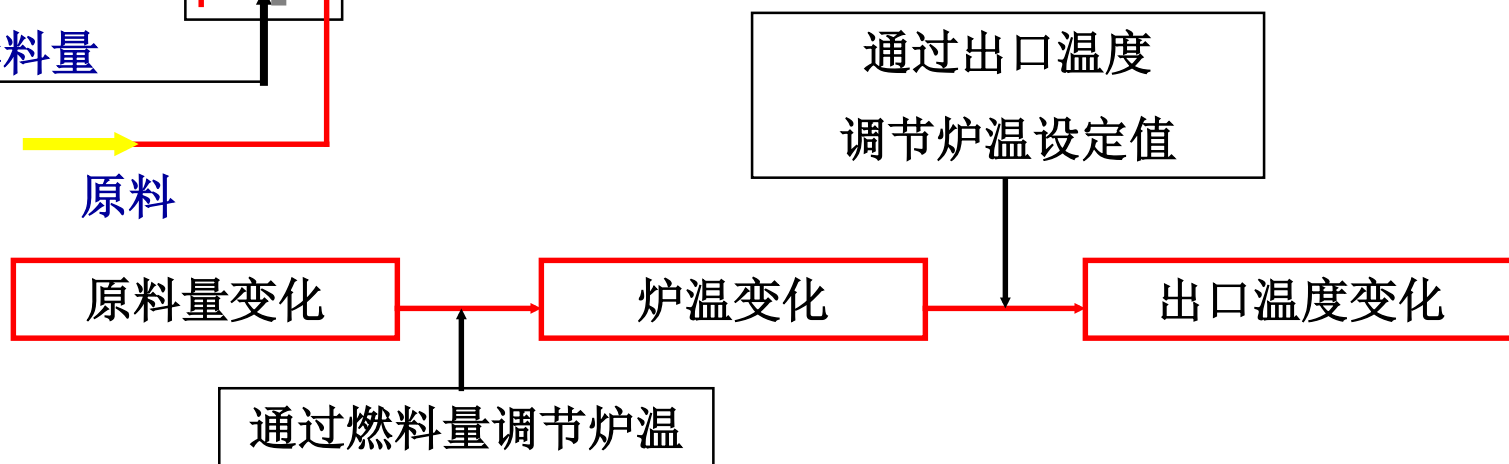


8.2 串级调节系统

◆ 串级调节系统——管式加热炉的控制



- ❖ 主参数（目标参数）：出口温度
- ❖ 操纵变量：燃料量
- ❖ 副变量：炉温

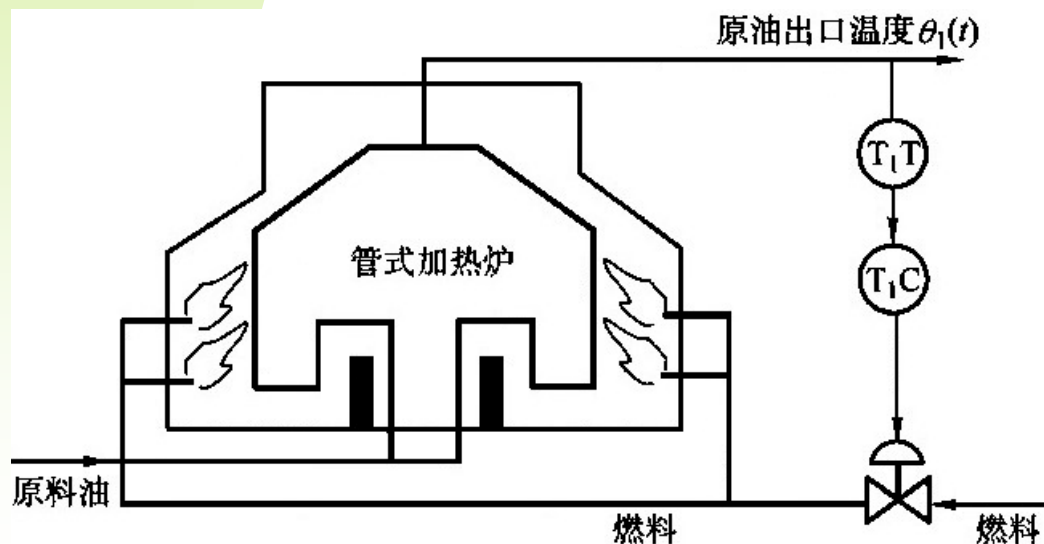




8.2 串级调节系统

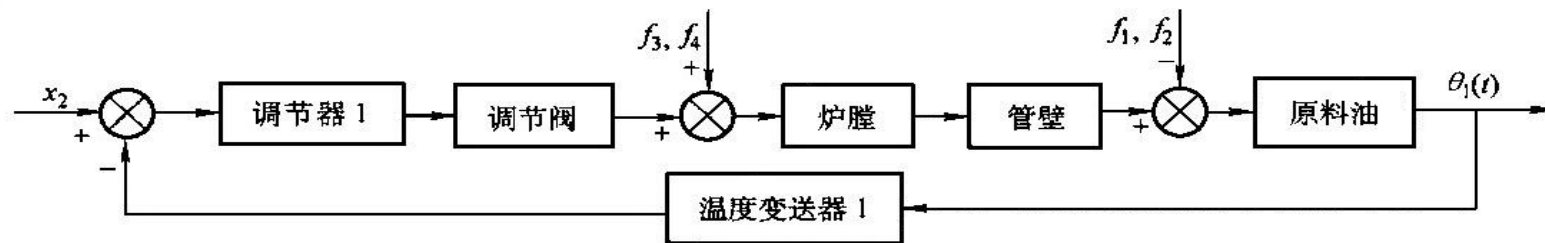
◆ 串级调节系统——管式加热炉的控制

出口温度单回路控制系统



影响原油出口温度的干扰:

- (1) 原油流量 $f_1(t)$
- (2) 原料油入口温度 $f_2(t)$
- (3) 燃油压力 $f_3(t)$
- (4) 燃料热值 $f_4(t)$

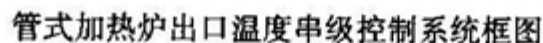




出口温度串级控制系统



- (1) 原油流量 $f_1(t)$
- (2) 原料油入口温度 $f_2(t)$
- (3) 燃油压力 $f_3(t)$
- (4) 燃料热值 $f_4(t)$





8.2 串级调节系统

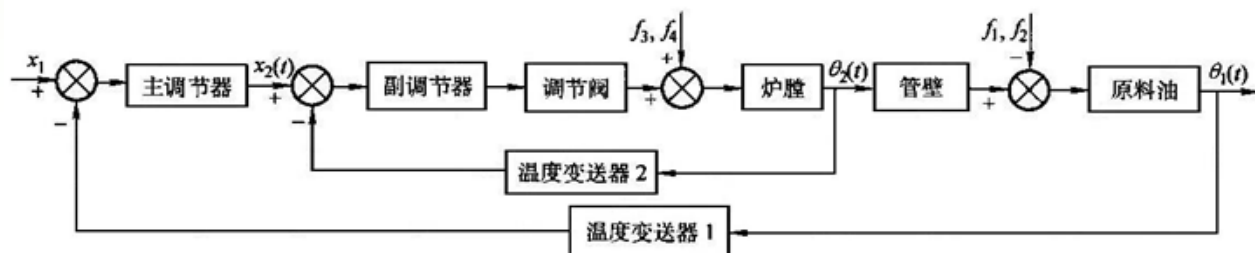
串级调节系统——管式加热炉的控制

出口温度串级控制系统

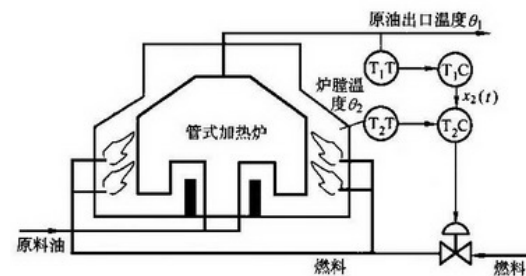
控制原理的简单分析

扰动的三种情况：

1. 燃料压力 f_3 、燃料热值 f_4 发生扰动——干扰进入副回路
2. 原料油流量 f_1 、原料油入口温度 f_2 发生扰动——干扰进入主回路
3. 干扰 f_3 、 f_4 、 f_1 、 f_2 同时作用于副回路和主回路



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

串级调节系统——管式加热炉的控制

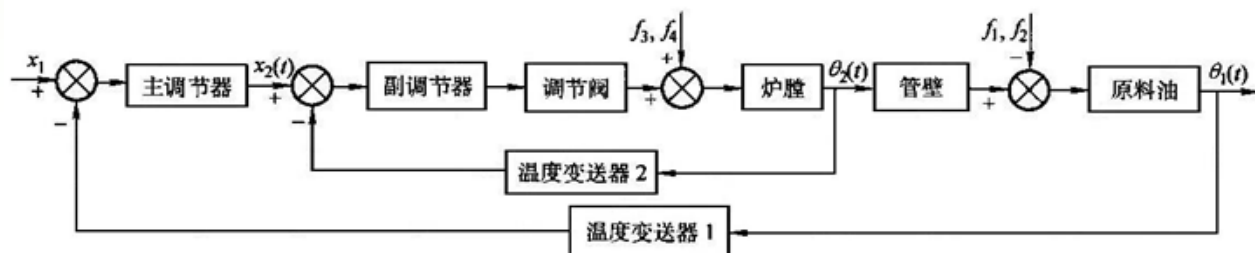
出口温度串级控制系统

控制原理的简单分析

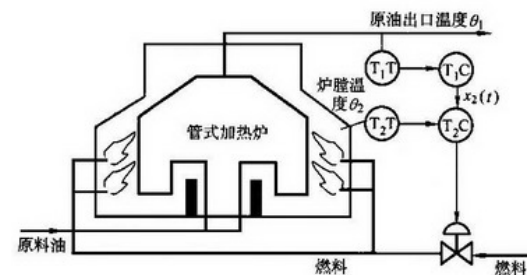
副回路具有先调、粗调、快调的特点；

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。

由于主、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



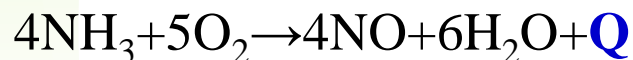


8.2 串级调节系统

◆ 串级调节系统

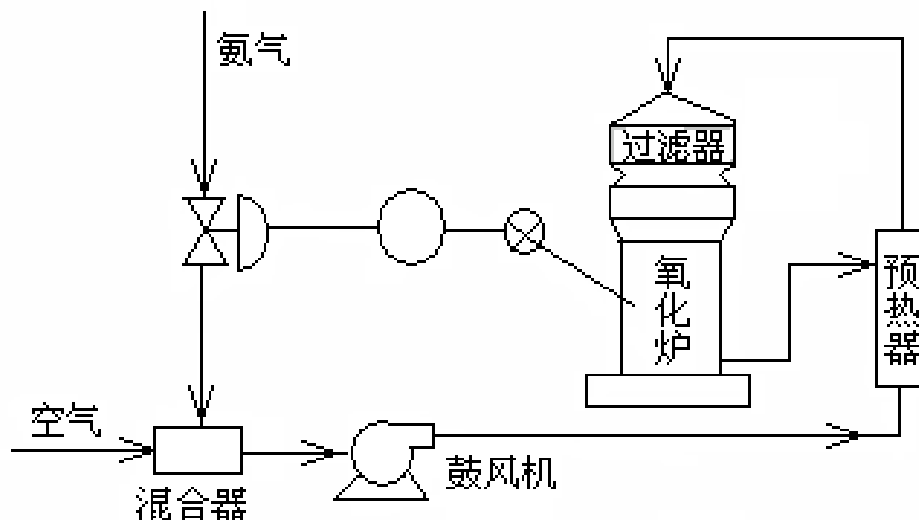
例：氧化炉温度调节。

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 $840 \pm 5^\circ \text{C}$ 。



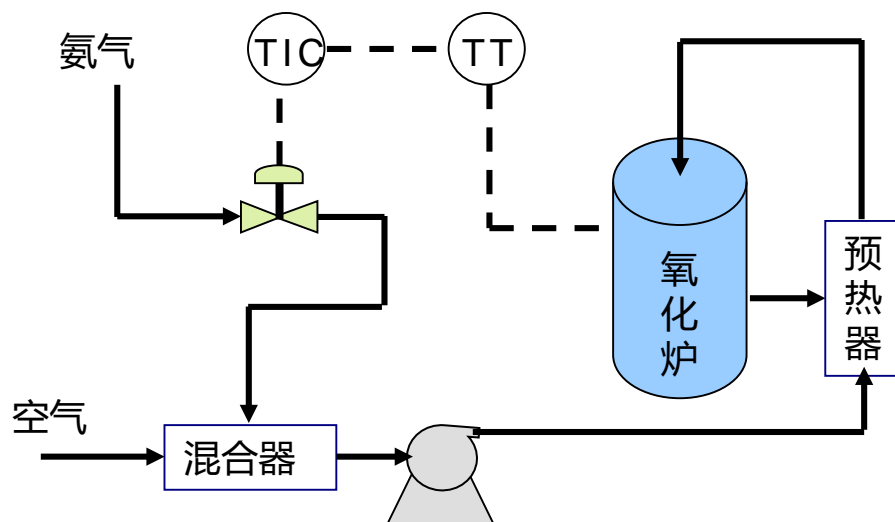


8.2 串级调节系统

◆ 串级调节系统

例：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。



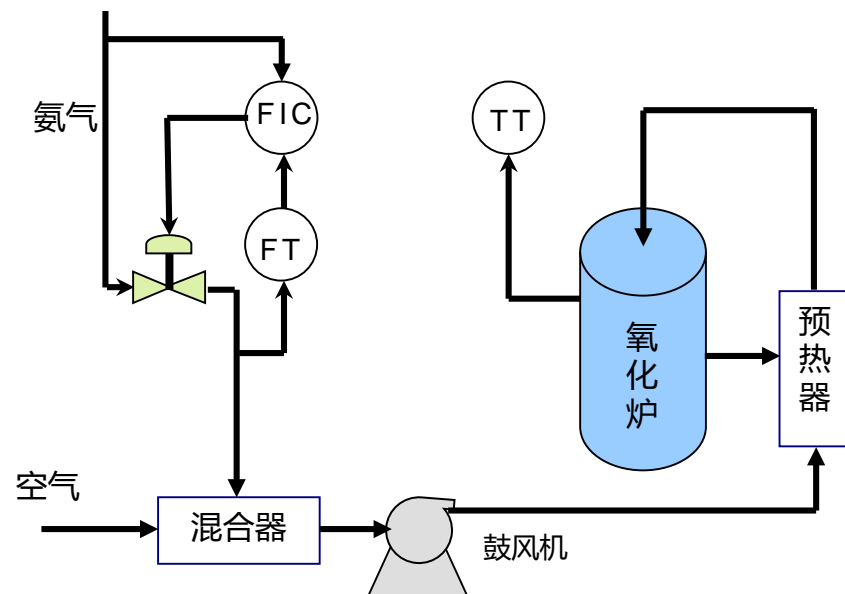


8.2 串级调节系统

◆ 串级调节系统

例：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。





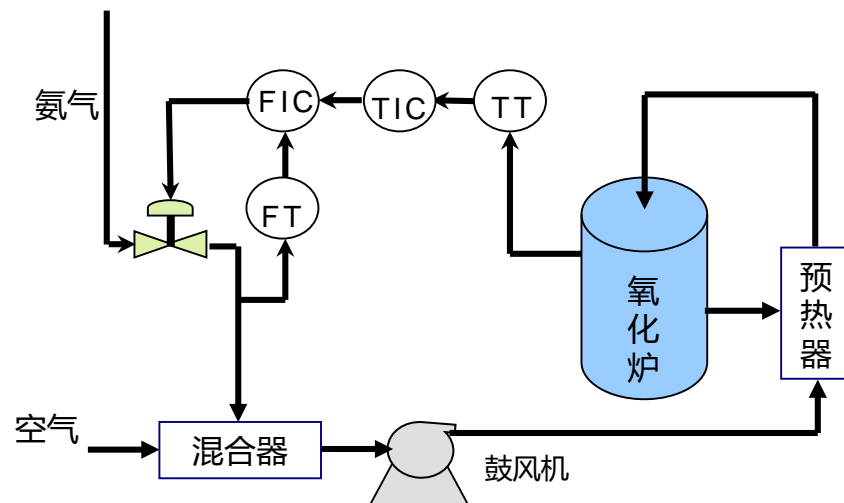
8.2 串级调节系统

串级调节系统

例：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。



因此，出现了反应温度信号自动地校正流量调节器给定值的方案，即串级调节系统。



Contents

A1

多回路系统

A2

串级调节系统

A3

复合控制系统



8.3 复合控制系统

◆ 复合控制系统

利用串联和并联校正在一定程度上可以改善系统的性能。对于实际的控制系统来说，由于外部扰动、噪声、传感器精度等因素的影响，导致偏差是不可避免的。对于稳态精度要求很高的控制系统，为了减少误差，通常用提高系统的开环增益或提高系统的型次来解决，但做往往会导致系统稳定性变差，甚至使系统不稳定。



8.3 复合控制系统

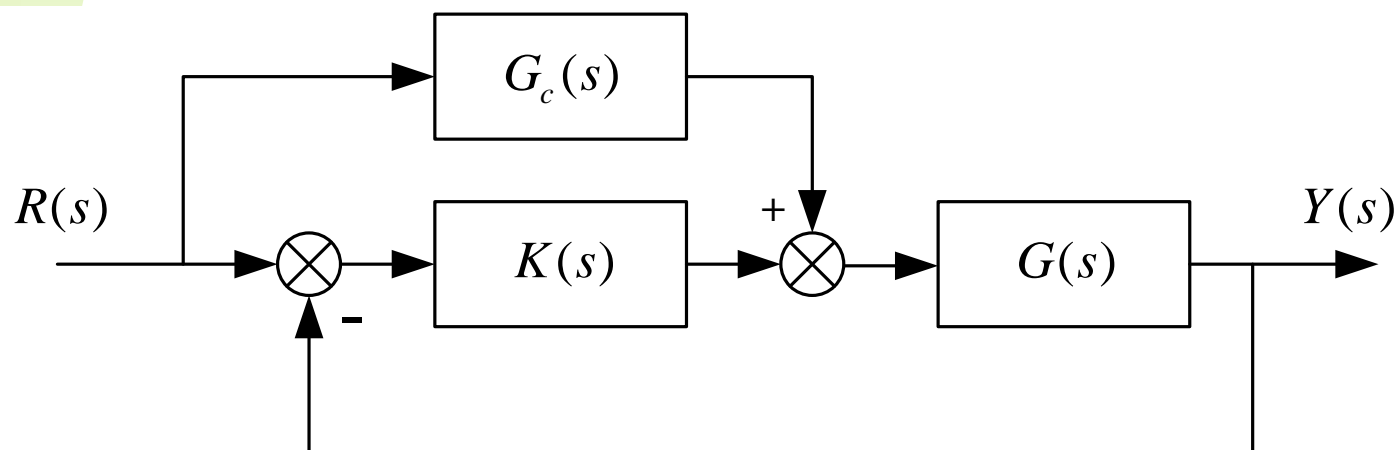
◆ 复合控制系统

为解决这个矛盾，常常把开环控制与闭环控制结合起来，组成复合控制。复合控制也是复合校正的形式之一。这种复合控制有两个通道，一个是顺馈补偿通道，是开环控制；另一个是主控制通道，是闭环控制。系统的输出量不仅由误差值所确定，而且还与补偿信号有关，后者的输出作用，可补偿原来的误差。



8.3 复合控制系统

◆ 复合控制系统



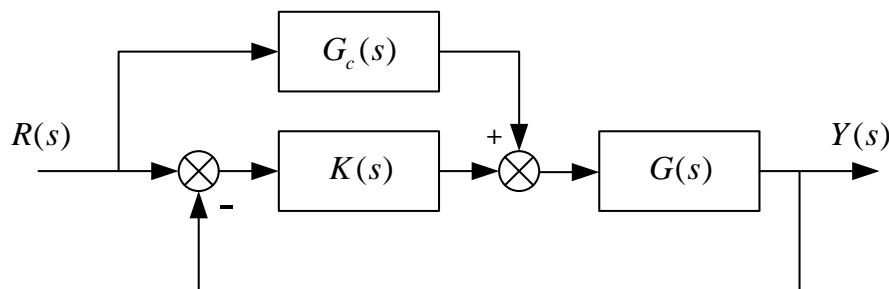
复合控制系统结构框图



8.3 复合控制系统

◆ 复合控制系统

■ 顺馈补偿



系统按偏差 $\varepsilon(t)$ 控制时的闭环传递函数为

$$\Phi(s) = \frac{G_1(s)G_3(s)}{1 + G_1(s)G_3(s)}$$

在加入顺馈补偿通道后，复合控制系统的传递函数

$$\Phi(s) = \frac{X_0(t)}{X_i(t)} = \frac{[G_1(s) + G_c(s)]G_3(s)}{1 + G_1(s)G_3(s)}$$

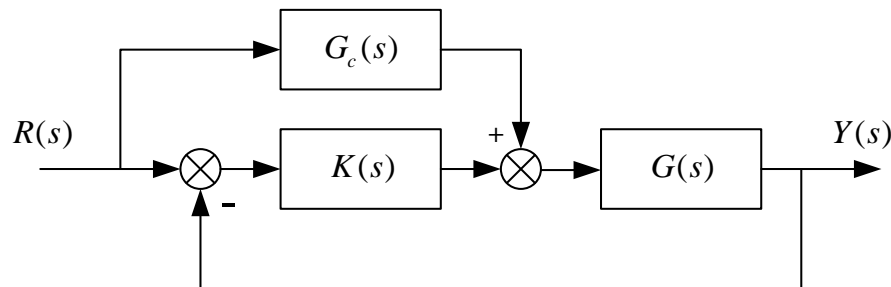
复合校正后的系统特征多项式与未校正的闭环系统的特征多项式是完全一致的，因此，系统虽然增加了补偿通道，但其稳定性不受影响。



8.3 复合控制系统

◆ 复合控制系统

■ 顺馈补偿



分析稳态精度和快速性方面的影响。加入顺馈补偿通道后，系统的偏差传递函数推导如下：

$$\Phi_e(s) = \frac{\varepsilon(s)}{X_i(s)} = \frac{1 - G_c(s)G_3(s)}{1 + G_1(s)G_3(s)}$$

当 $G_c(s) = \frac{1}{G_3(s)}$ 时， $\varepsilon(s) = 0$ 。

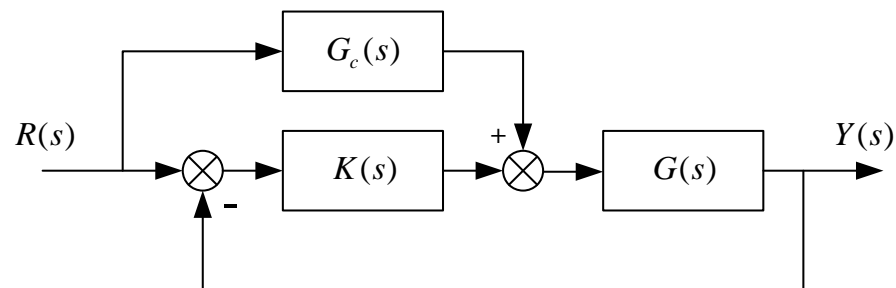
采用复合校正既能消除稳态误差，又能保证系统动态性能！



8.3 复合控制系统

◆ 复合控制系统

■ 顺馈补偿



在工程实际中要完全满足 $G_c(s) = \frac{1}{G_3(s)}$ 的条件往往是困难的，因为它意味着系统要以极大的速度运动，需要极大的功率。因此，通常采用部分顺馈的办法来补偿，即

$$G_c(s) \approx \frac{1}{G_3(s)}$$



Thank You !

授课教师：马 杰（控制与仿真中心）

罗 晶（控制科学与工程系）

马克茂（控制与仿真中心）

陈松林（控制与仿真中心）