

自动控制实践B——2022年春季学期

第8章 多回路系统的设计

授课教师：董广忠 (Assoc. Prof.)

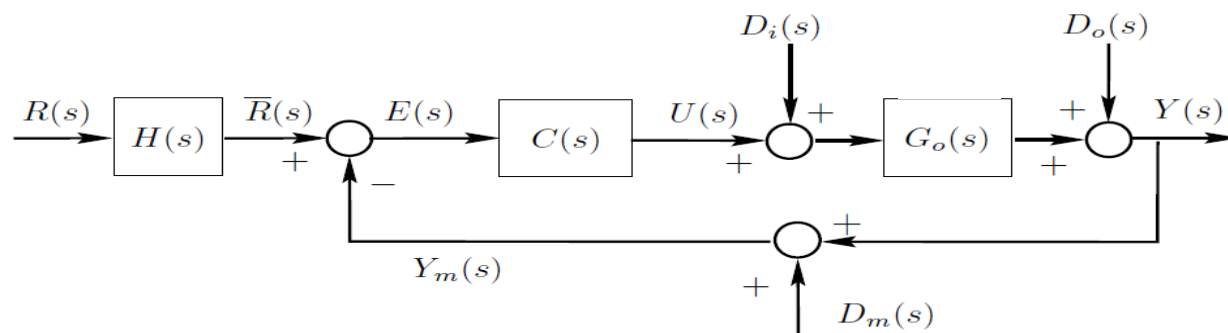
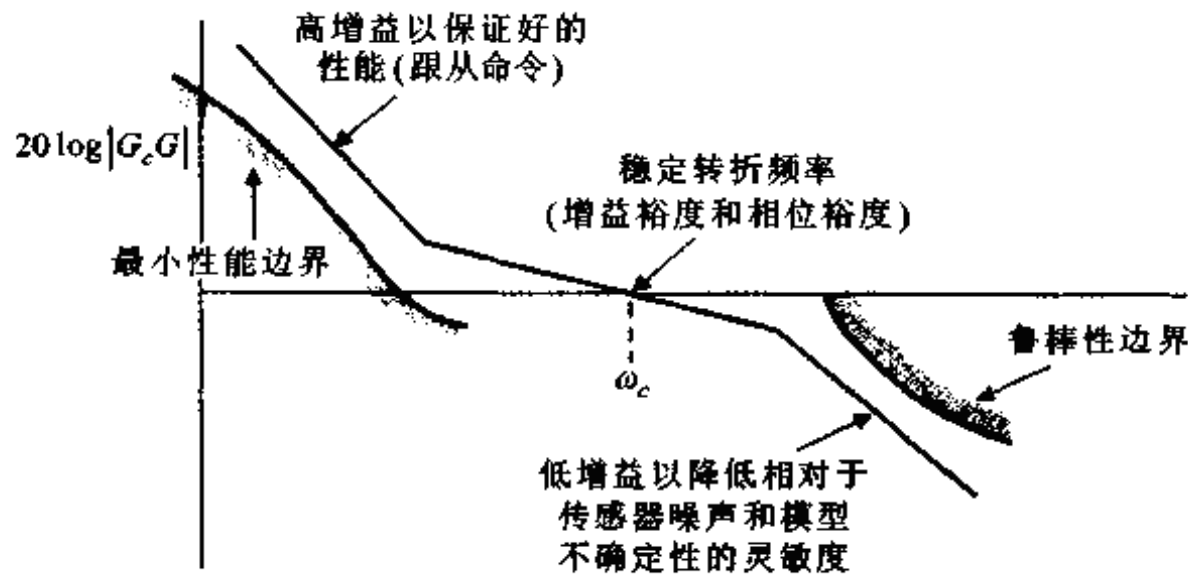
哈尔滨工业大学（深圳），HITsz
机电工程与自动化学院 SMEA



◆ 单回路系统设计

前面各章考虑的设计问题，实际上是追求最大带宽，即鲁棒稳定性条件允许的最大可能带宽，代表了能实现的最佳性能：跟踪性能、干扰抑制能力等。

如果这时系统的跟踪误差、噪声误差、干扰抑制能力等性能都能满足要求，即可以采用这样的单回路控制结构。





◆ 单回路系统设计的局限性

矛盾一：

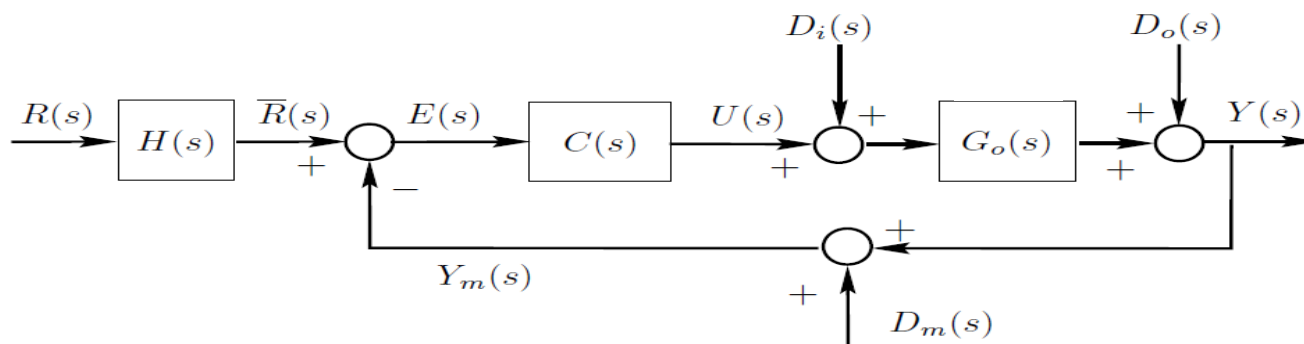
系统中噪声大，输入信号的频谱不宽：要求系统的带宽要窄，但带宽变窄，干扰抑制的效果变差；

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。

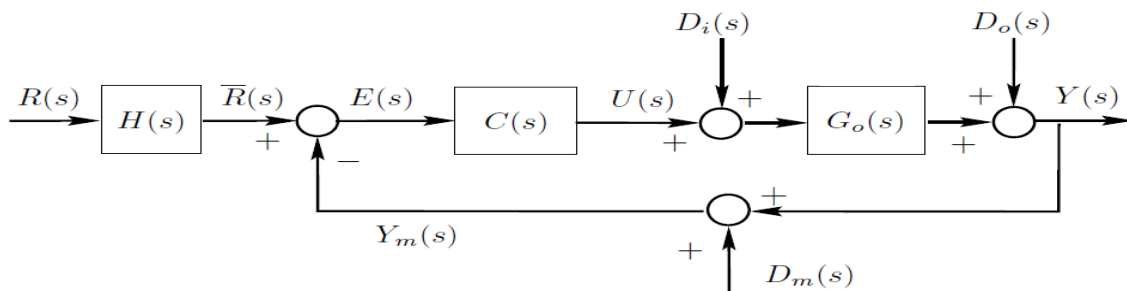
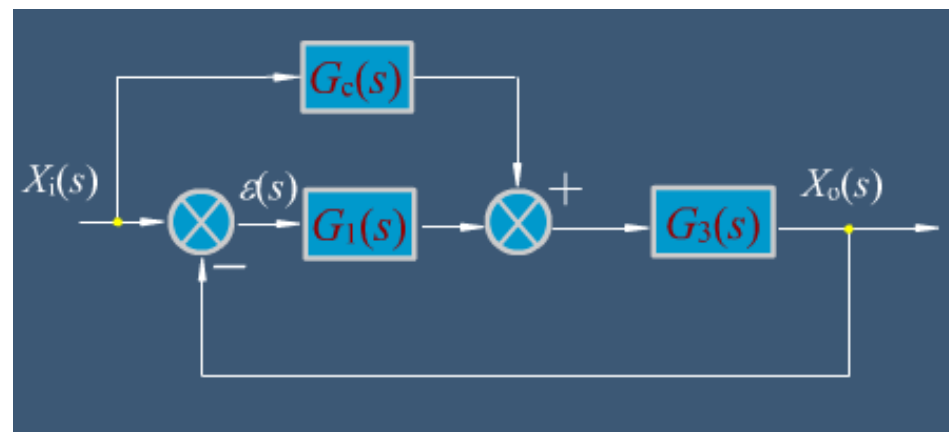
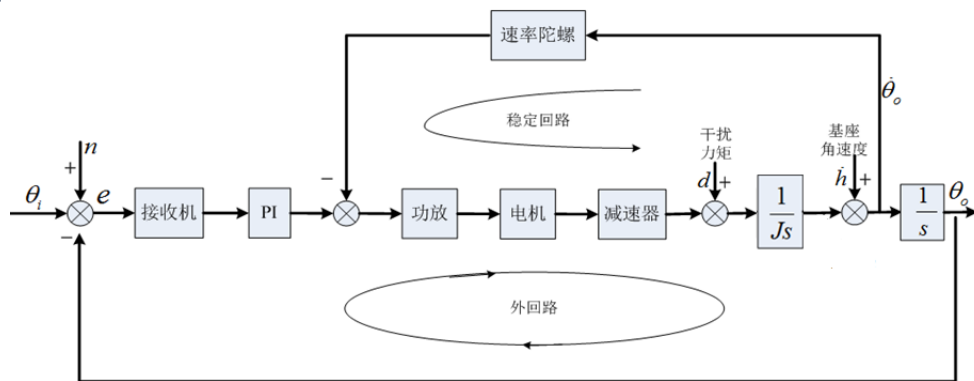
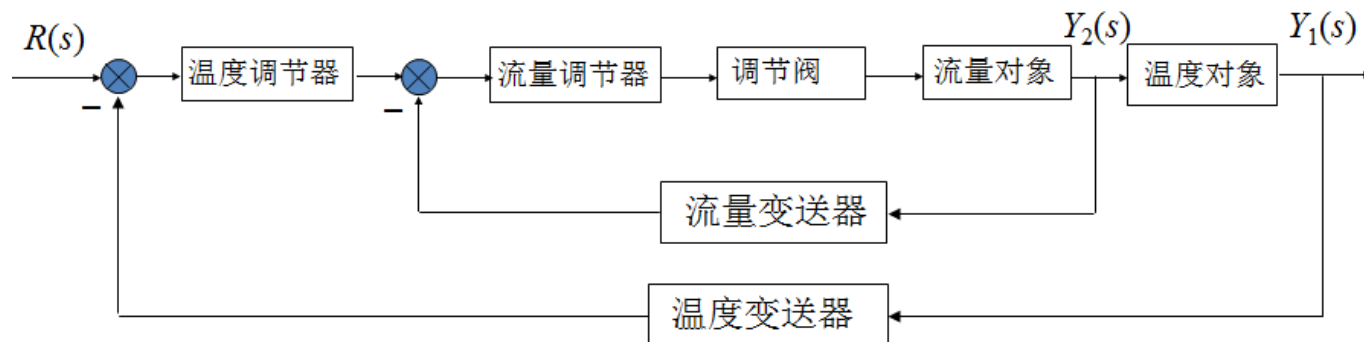


◆ 多回路系统的设计

矛盾一：伺服系统

矛盾二：过程控制系统

矛盾三：伺服系统





课程 安排

1

多回路系统

2

串级调节系统

3

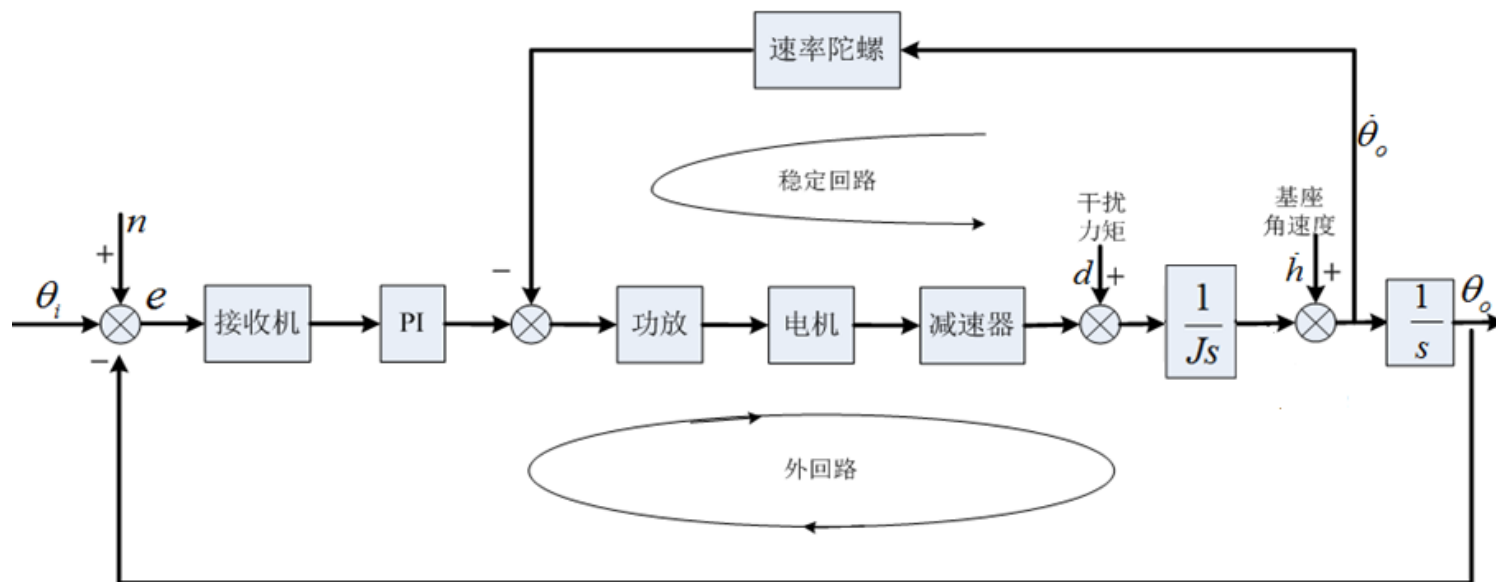
复合控制系统



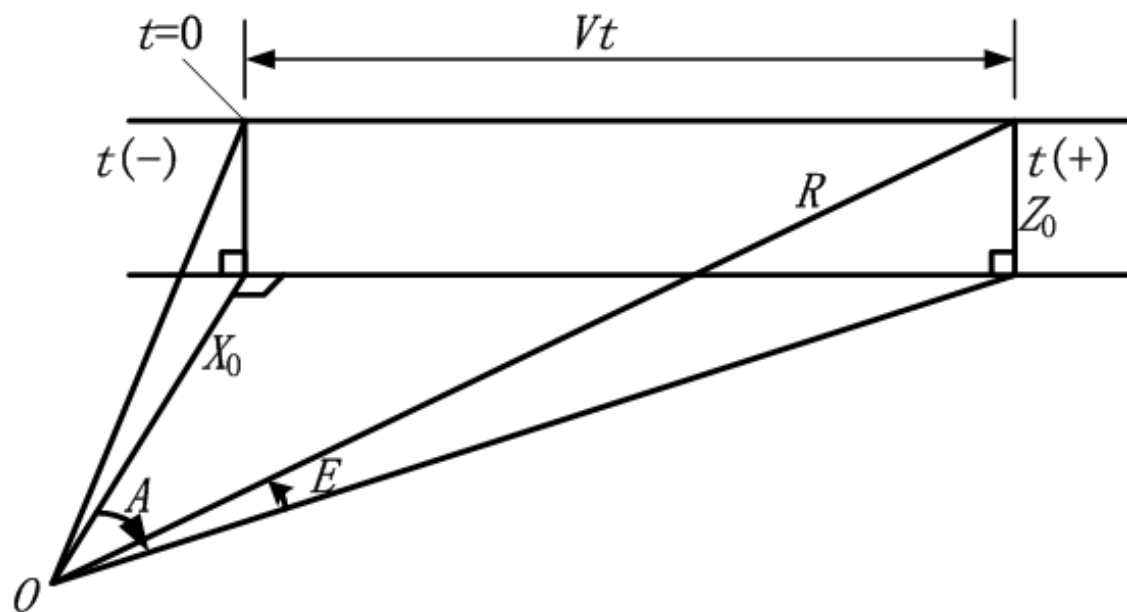
◆ 多回路系统的设计原则

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
- 主回路是窄带宽的：抑制噪声或满足稳定性限制约束



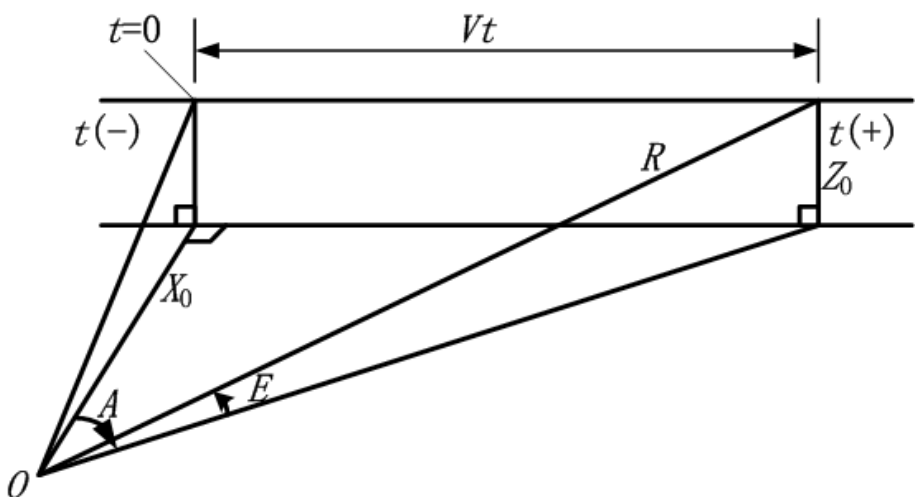
◆ 例1:舰用雷达跟踪系统



高低角跟踪通道



◆ 例1:舰用雷达跟踪系统



系统设计存在的困难:

- 舰船的摇摆 (ω_k) 是一个很大的干扰
- 风载力矩干扰
- 噪声条件下实现目标的跟踪

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 $0.3 \times 10^{-3} \text{rad}$ 。

◆ 例1:舰用雷达跟踪系统



元部件的选择:

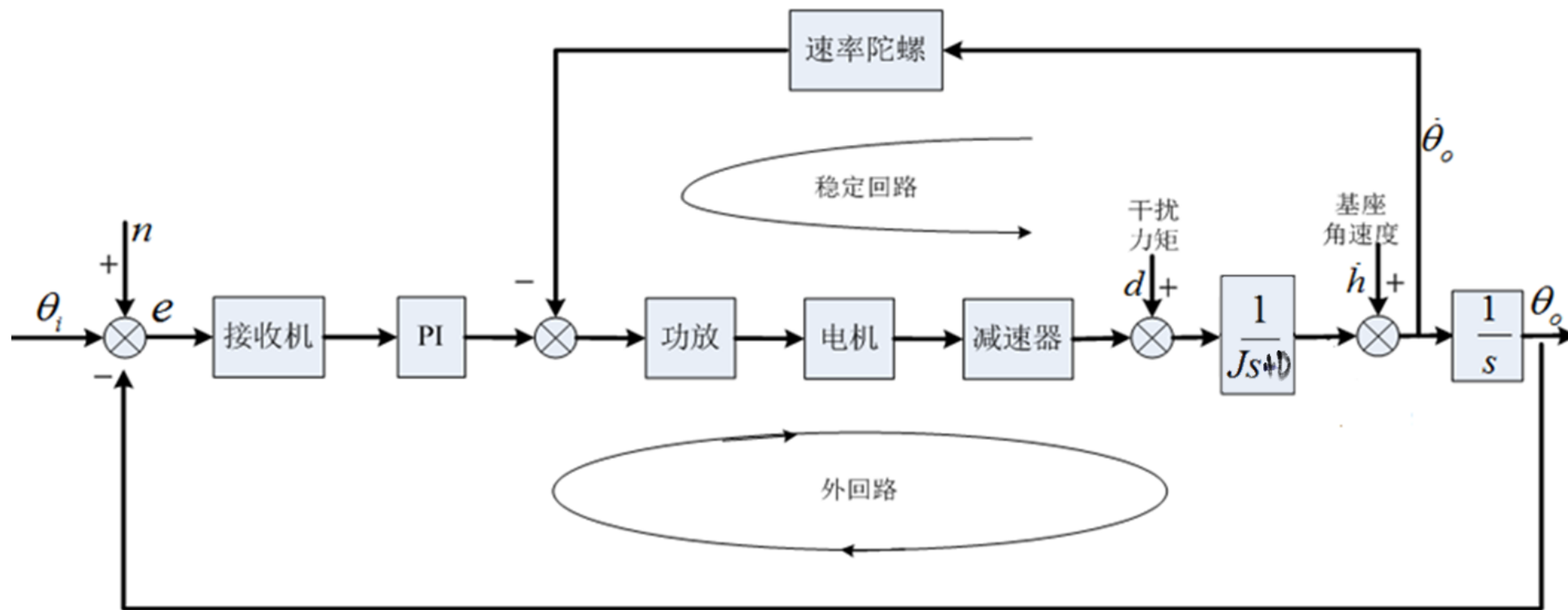
□ 驱动元件: 电机+减速器

□ 测量元件:

速率陀螺——惯性角速度测量

雷达接收机——角位置误差

◆ 例1:舰用雷达跟踪系统



舰用雷达跟踪系统原理框图

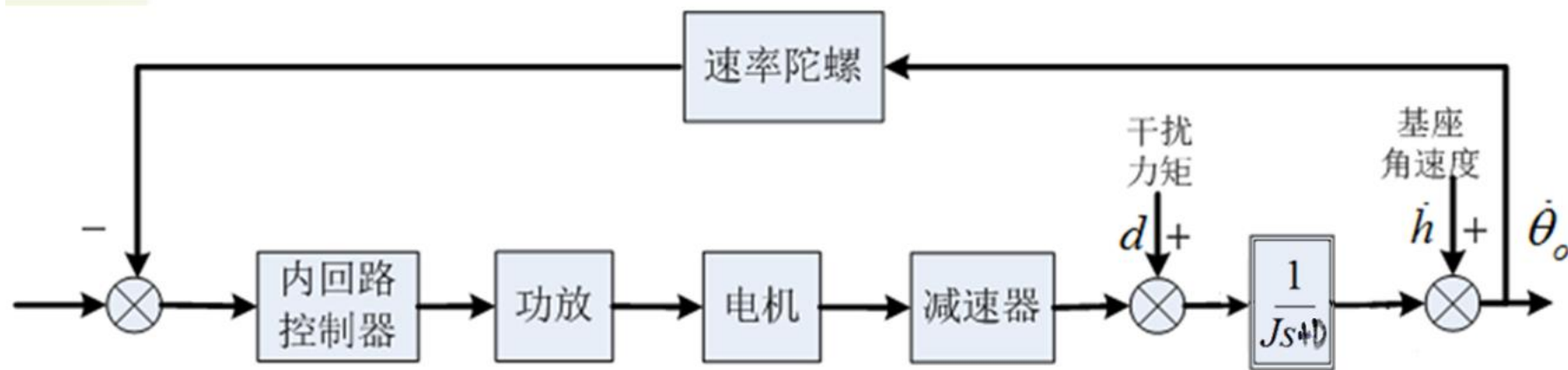
◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

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



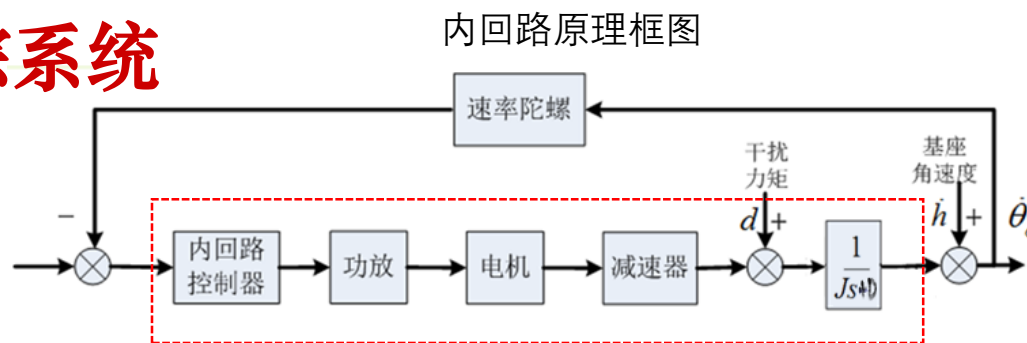
8.1 多回路系统



◆ 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: $K_{in}G(s)$



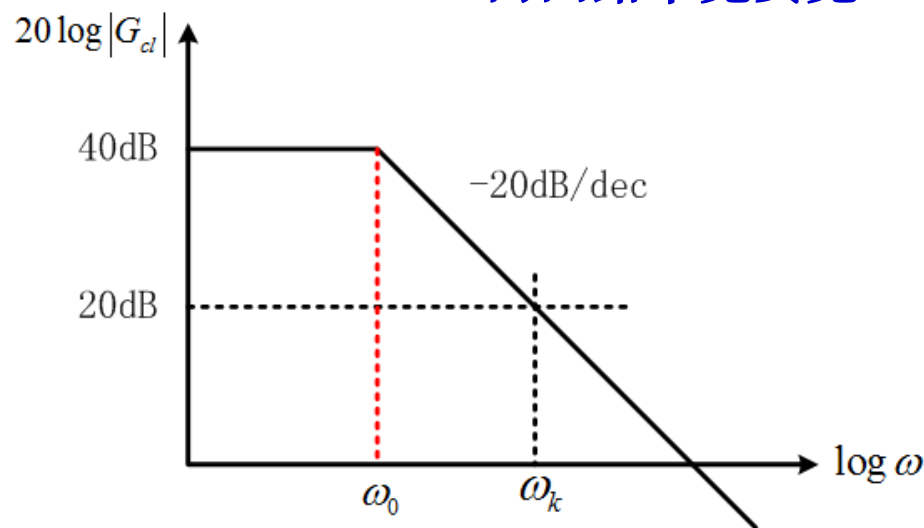
扰动响应: $\frac{\dot{\theta}_0}{\dot{h}} = \frac{1}{1 + K_{in}G(s)}$ $\Rightarrow \frac{\dot{h}}{\dot{\theta}_0}$ 称为隔离度

内回路带宽要宽!

设 $K_{in} = 100$

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

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





◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

1、内回路设计

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地宽。带宽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

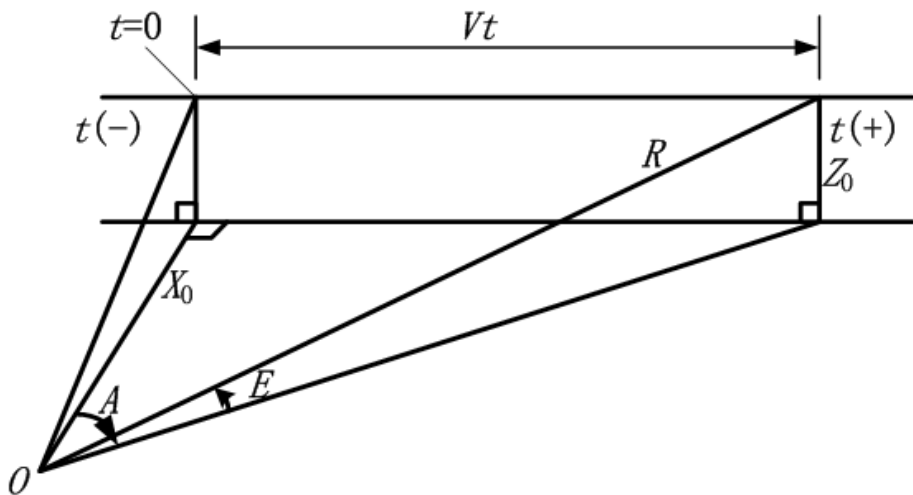
$$\omega_{ni} \geq 5\omega_{no}$$

内外回路的带宽互相错开，使得两个回路不致互相关干扰，可以分开设计，也便于调试。

◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

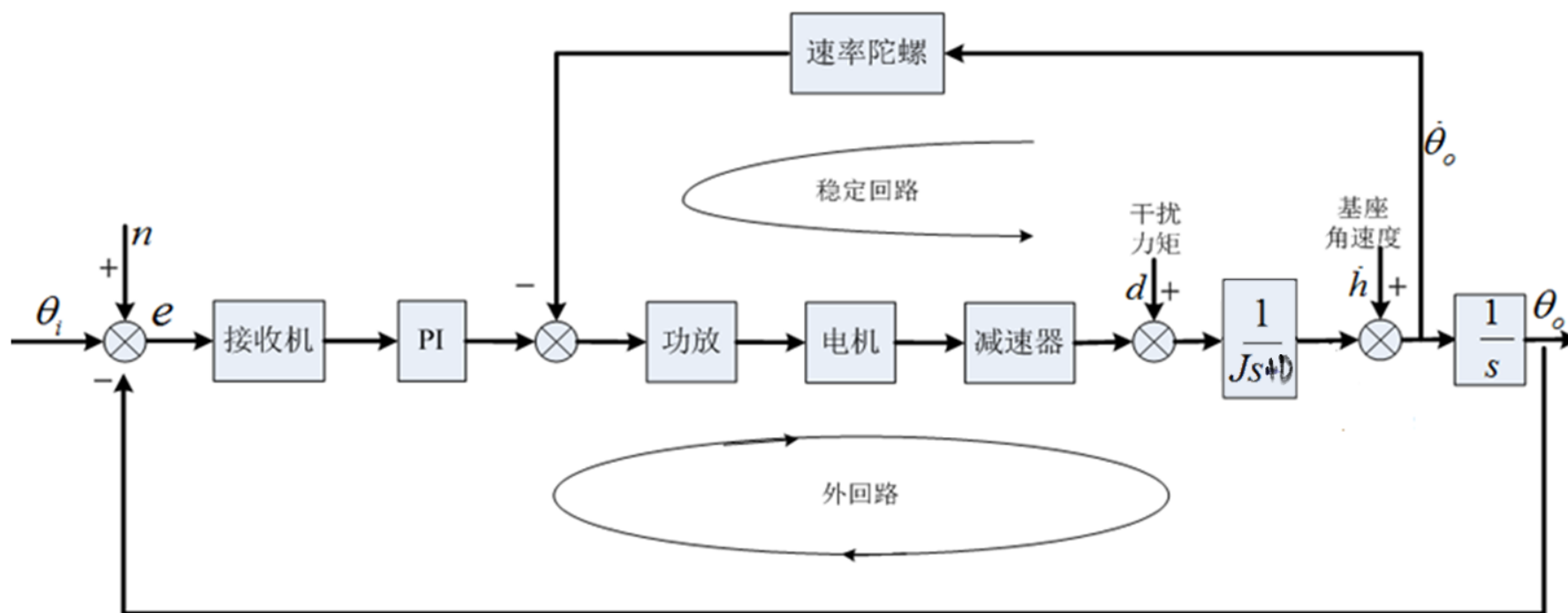
2、外回路设计——满足跟踪性能指标

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 $0.3\times 10^{-3}\text{rad}$ 。



◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

2、外回路设计



舰用雷达跟踪系统原理框图



◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

2、外回路设计

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。

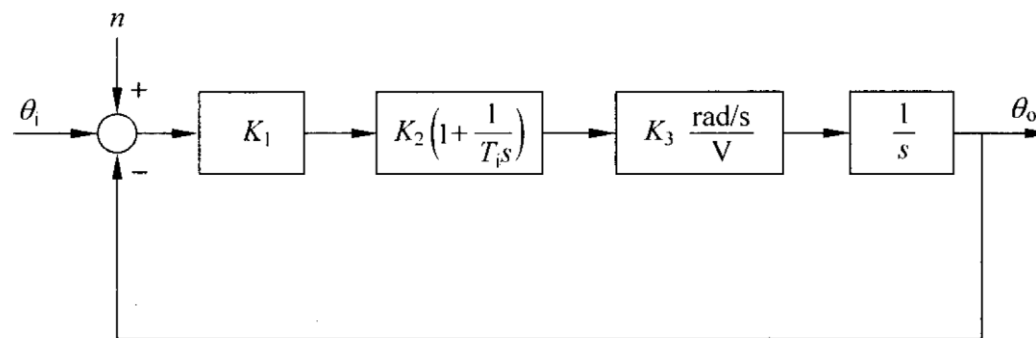


图 10-2 跟踪系统的低频模型

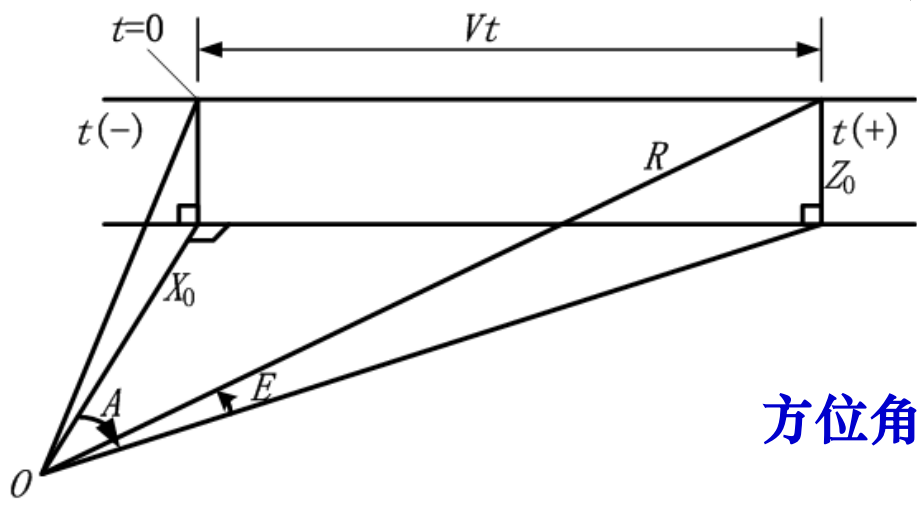


◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

2、外回路设计

(a) 典型输入信号分析

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



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

方位角: $A = \arctan \frac{Vt}{X_0}$

◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

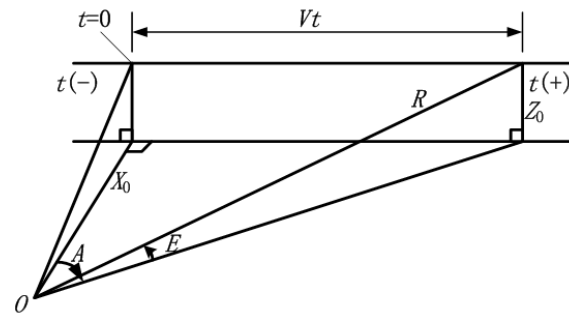
2、外回路设计

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

两边求导，有

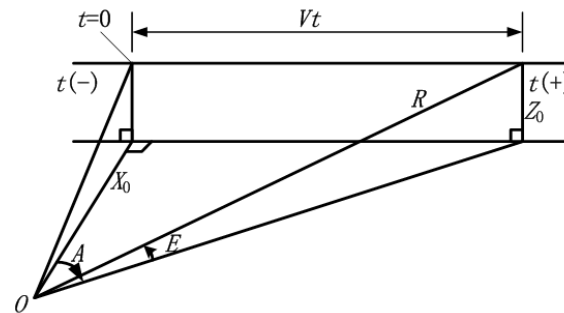
$$\frac{1}{\cos^2 E} \cdot \frac{dE}{dt} = \frac{Z_0}{X_0} \cdot \left(-\frac{1}{2}\right) \left(1 + (Vt / X_0)^2\right)^{-\frac{3}{2}} \cdot 2 \frac{Vt}{X_0} \cdot \frac{V}{X_0}$$

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



◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

2、外回路设计



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

$$\tan A = \frac{Vt}{X_0} \Rightarrow t = \frac{X_0 \tan A}{V}$$

$$\sin E = \frac{Z_0}{R} \left(1 + (Vt/X_0)^2\right)^{-\frac{3}{2}} = \cos^3 A$$

$$\cos^2 A \cos^2 E = \frac{X_0^2}{R_0^2}$$

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

◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

2、外回路设计

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



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

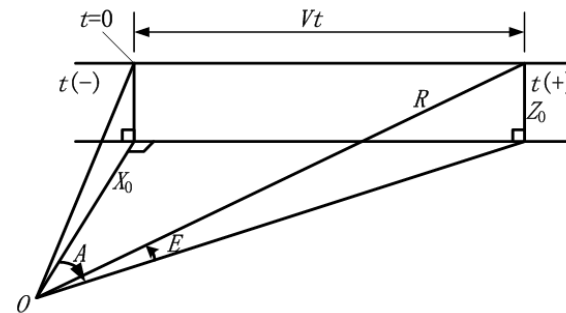
$$\frac{dA}{dt} = \frac{V}{X_0} \cos^2 A$$

$$\cos A = \frac{X_0}{R \cos E}$$

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

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

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



◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

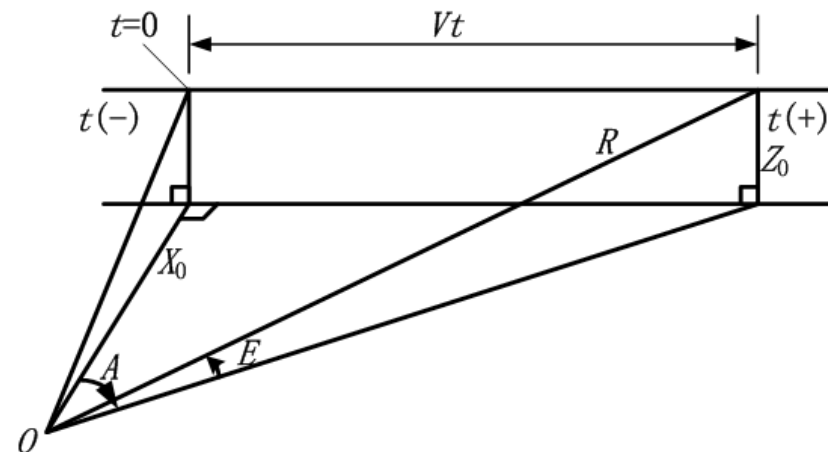
2、外回路设计

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

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

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

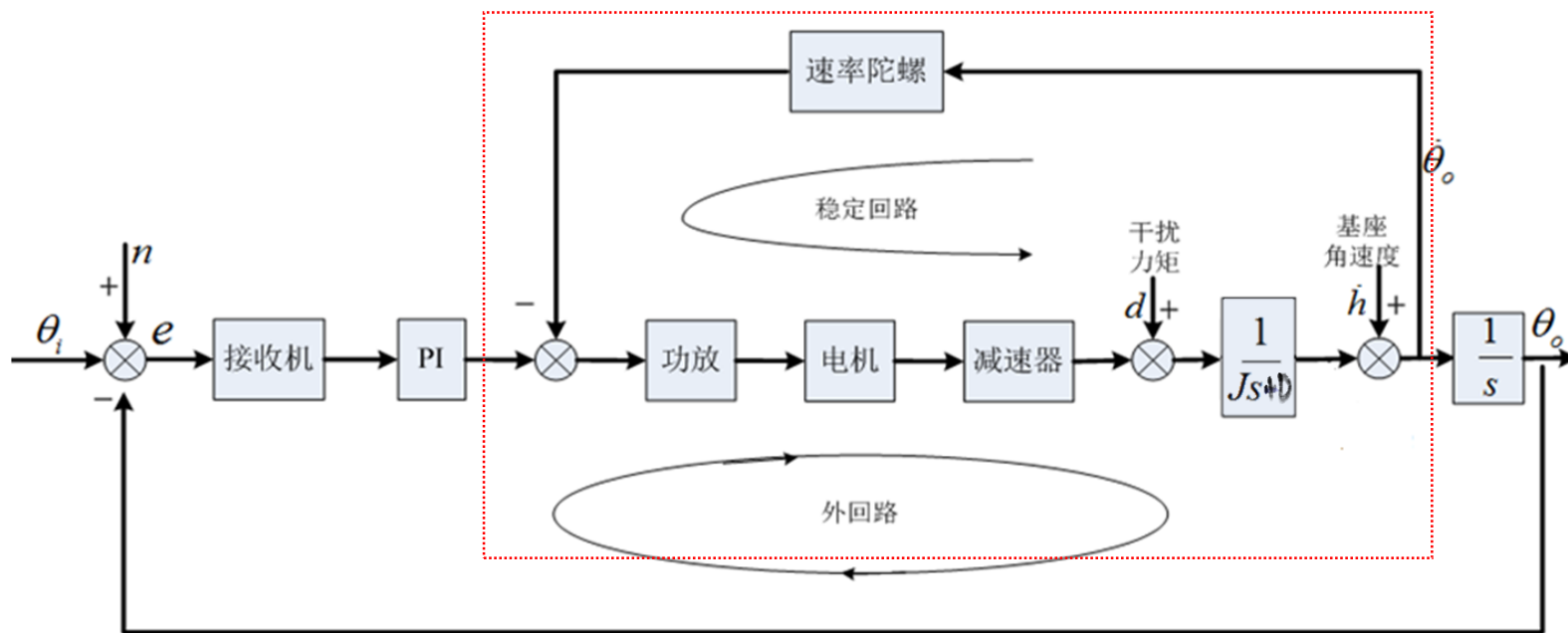
$$\ddot{E}_{\max} = \left| -\frac{V^2}{R_{\min}^2} \right| = \frac{600^2}{(4 \times 10^3)^2} = 2.25 \times 10^{-2} \text{rad/s}^2$$



◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

2、外回路设计

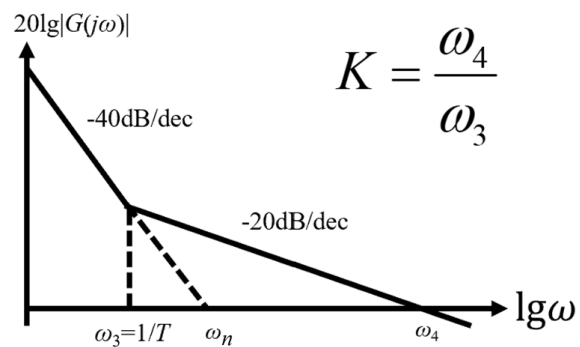
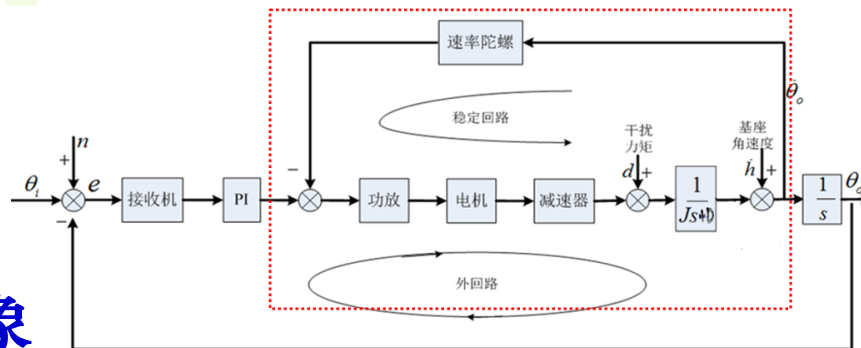
(b) 确定外回路的被控对象



◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

2、外回路设计

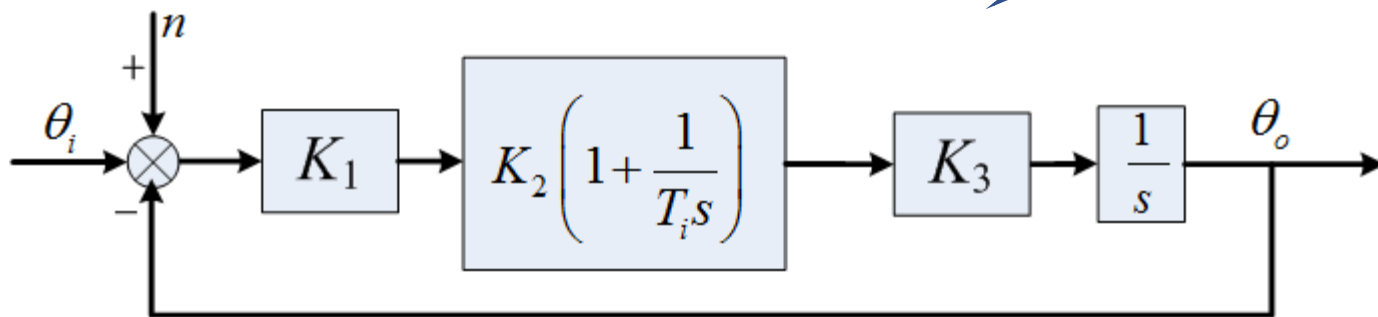
(b) 确定外回路的被控对象



$$K = \frac{\omega_4}{\omega_3}$$

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

II型系统

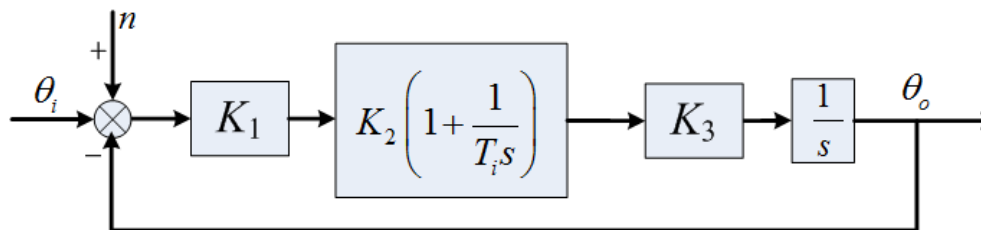




◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

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

$$\ddot{E}_{\max} = 2.25 \times 10^{-2} \text{ rad/s}^2$$

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

考虑噪声的影响:



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

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

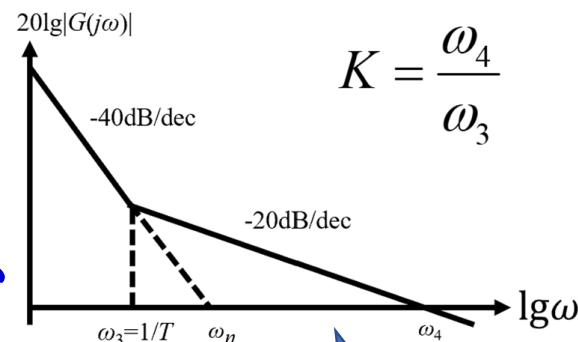
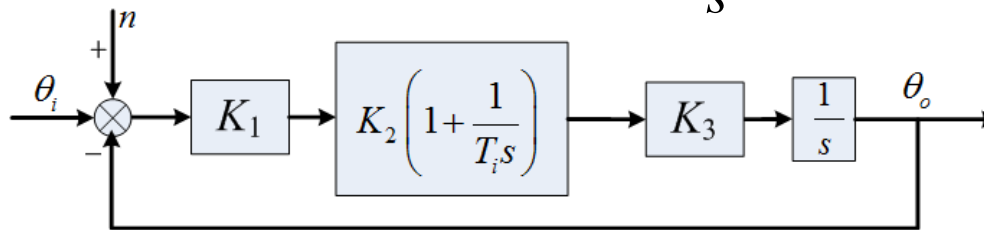
考虑噪声的影响: $K=1$ 时等效噪声带宽最小

$$\omega_3 = \omega_c = \omega_n = 10 \text{ rad/s}$$

再考虑 K_a , 由此可以求出 T_i 、 K_2 , 从而确定外回路PI控制器的参数。

$$K_2 \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

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



基本II型系统





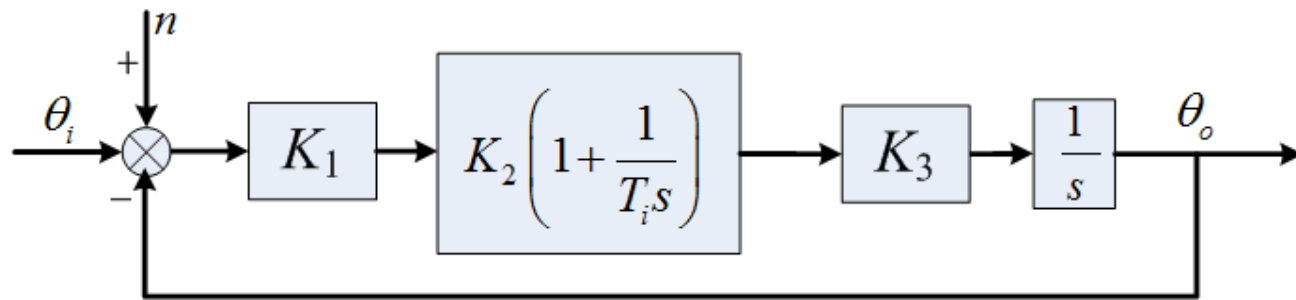
8.1 多回路系统



◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

2、外回路设计

(d) 噪声



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，km， $R_0=1\text{km}$ 。

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。





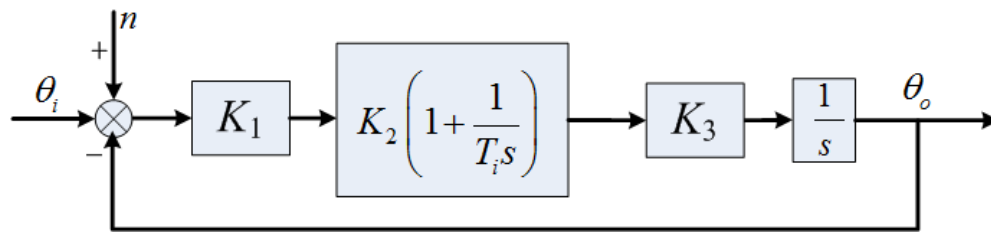
8.1 多回路系统



◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

2、外回路设计

(d) 噪声



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

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

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

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

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

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

设计指标:

作用距离4-32km，高低角

跟踪的均方根误差应该小于

$0.3 \times 10^{-3} \text{rad}$ 。

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





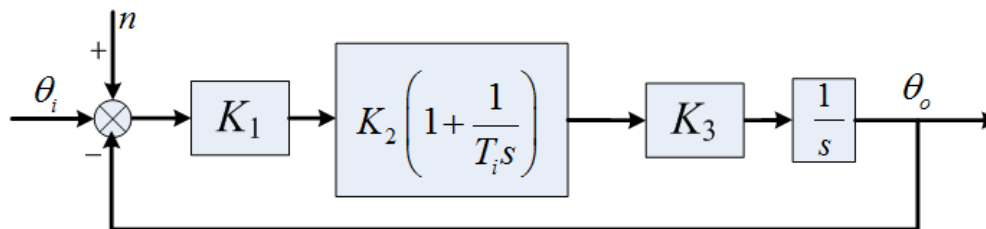
8.1 多回路系统



◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

2、外回路设计

(d) 噪声



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。

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

$$\frac{d^2 E}{dt^2} = -\frac{V^2}{R^2} \tan E \left(1 - \sin^2 A (1 + \cos^2 E) \right) \quad \omega_n^2 \geq \frac{\ddot{E}_{\max}}{e_{\max}}$$

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

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

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

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

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

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

变增益控制：同时调整 K_2 和 T_i ，以保证系统的阻尼比不变 ($K=1$)。





8.1 多回路系统



◆ 例1:舰用雷达跟踪系统

设计思想:

2、外回路设计

在跟踪误差和噪声误差之间进行

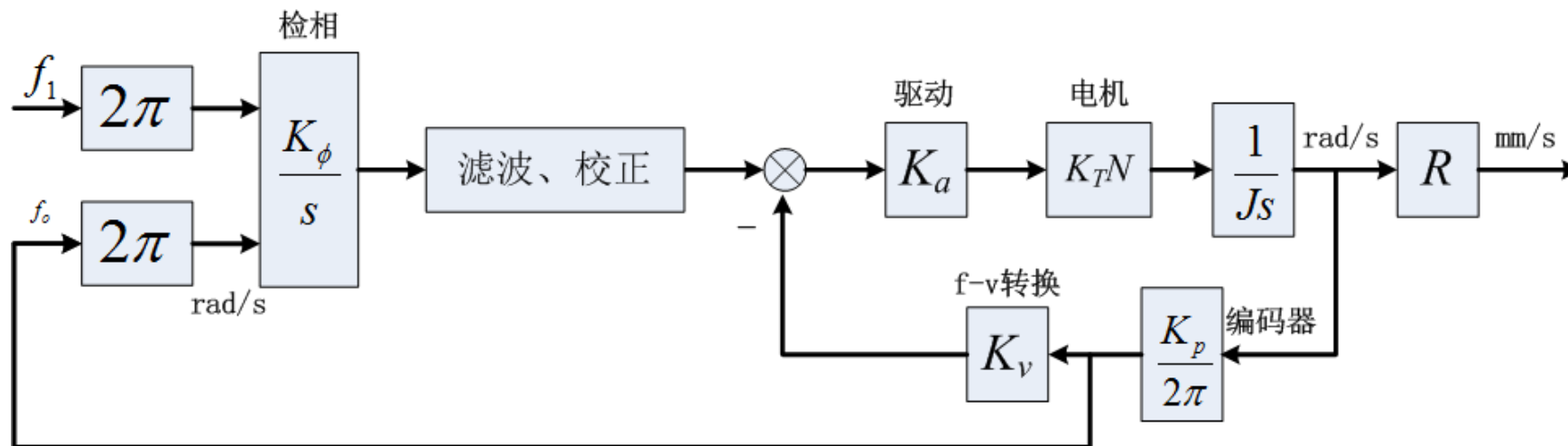
折中。可以进行最优折中。

(d) 噪声

斜距	固定增益(10^{-3}rad)			变增益(10^{-3}rad)			
	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



◆ 例2: 锁相伺服系统



基本参数:

锁相伺服系统

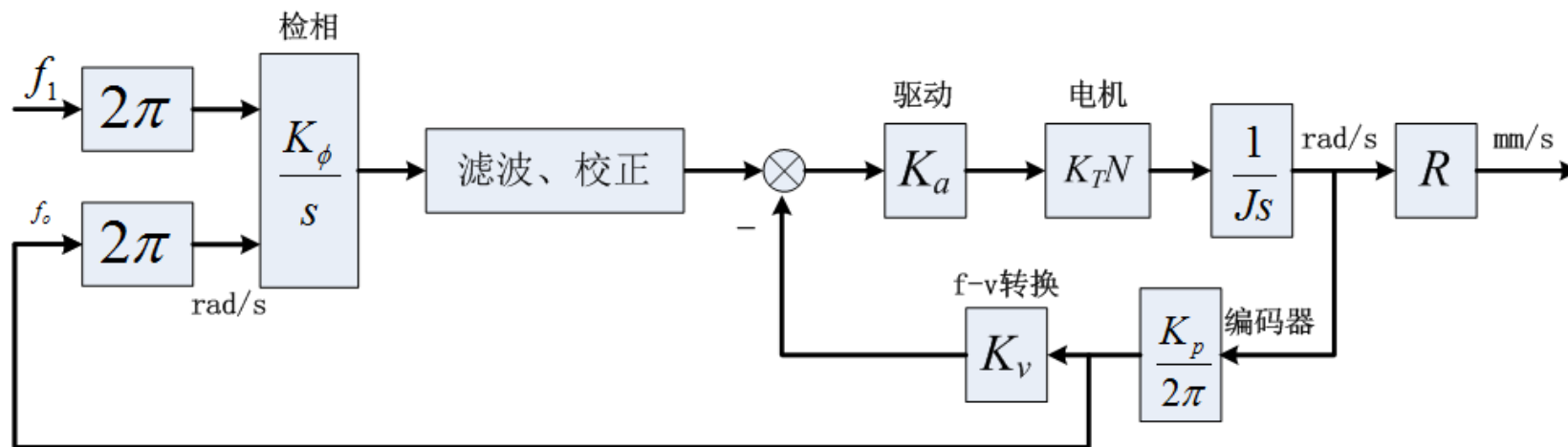
性能要求:

$K_\phi = 1.5\text{V/rad}$, $K_p = 9000$,
 $K_v = 0.024\text{V/Hz}$, $K_T = 348.6\text{g} \cdot \text{cm/A}$,
 $N = 1000$, $J = 1840\text{g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$, $R = 10.85\text{mm}$,
 $f_1 = 170\text{Hz} \Leftrightarrow 1.27\text{mm/s}$

◆ 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, 需要引入反馈 (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。



◆ 例2: 锁相伺服系统

(1) 内回路设计

设计目的——抑制干扰力矩

➤ 轴承噪声、卷轴偏摆等(0.02Hz)

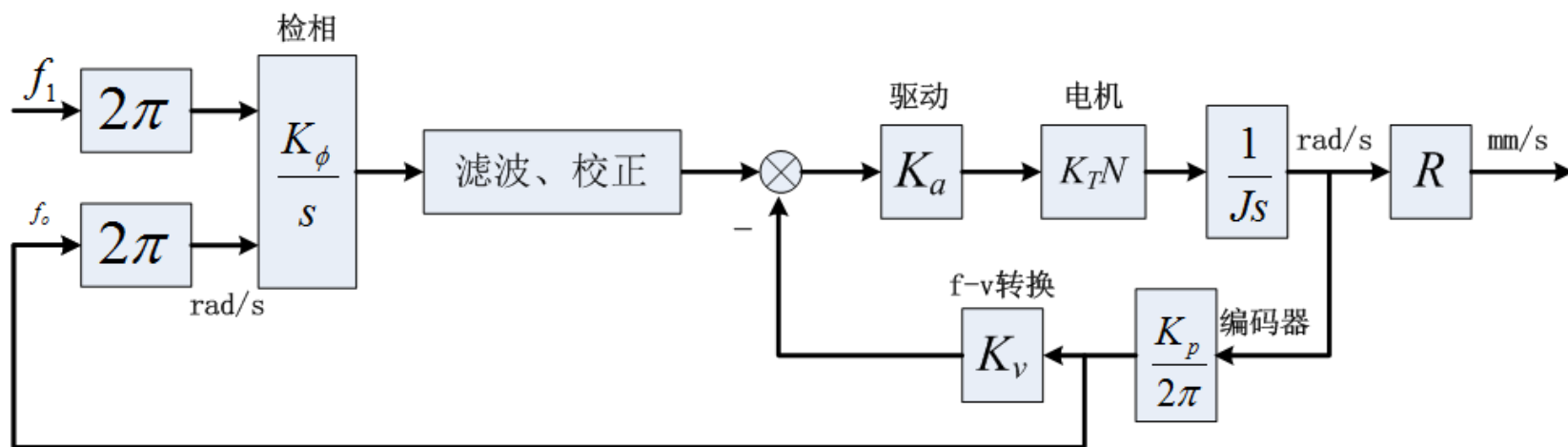
➤ 170Hz的位置方波

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。

$$R = 10.85\text{mm}, K_p = 9000$$

$$f_1 = 170\text{Hz} \Leftrightarrow 1.27\text{mm/s}$$

$$\frac{1.27}{10.85} \cdot \frac{1}{2\pi} < 0.02\text{Hz}$$





8.1 多回路系统



◆ 例2: 锁相伺服系统

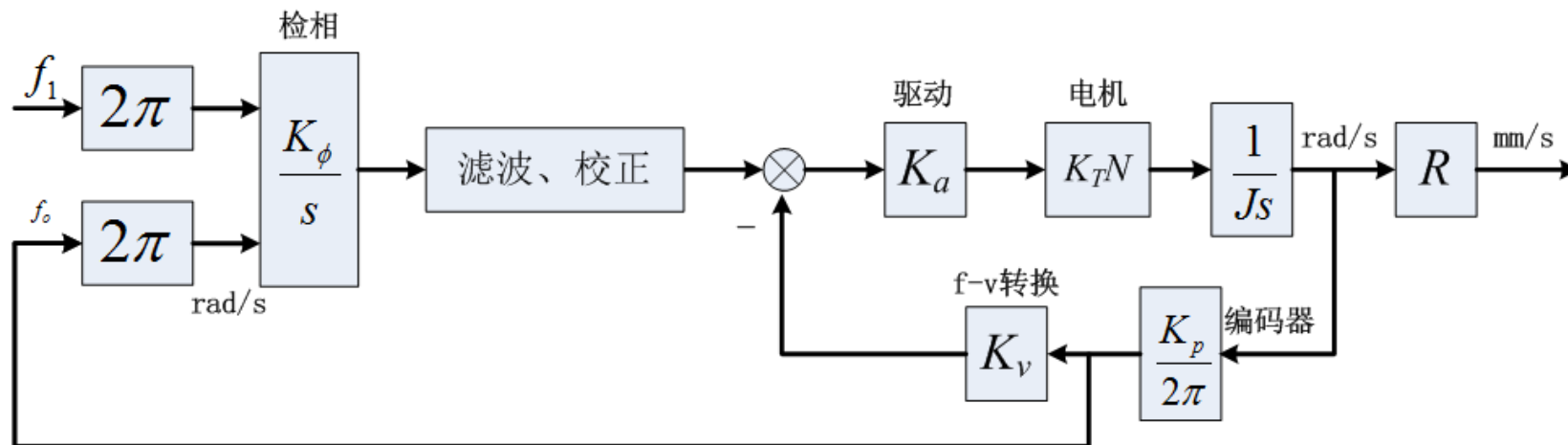
波动干扰力矩的频谱很低，采用静态增益进行计算。

(1) 内回路设计

➤ 轴承噪声、卷轴偏摆等(0.02Hz)

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

$$\left| \frac{e(t)}{R} \right|_{\max} K_d = |d(t)|_{\max}$$





8.1 多回路系统



◆ 例2: 锁相伺服系统

(1) 内回路设计

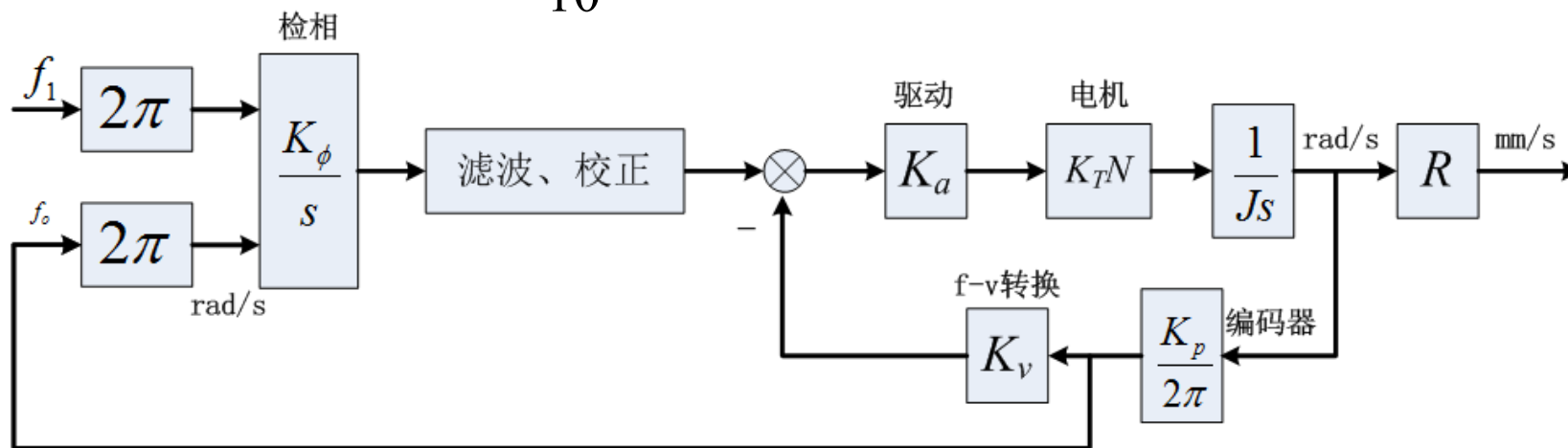
➤ 170Hz的位置方波扰动

内回路带宽满足:

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

$$K = \frac{K_d}{J} = \omega_{ni} \rightarrow \begin{matrix} K_d = 138000 \\ K_a = 0.0115 \end{matrix}$$

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



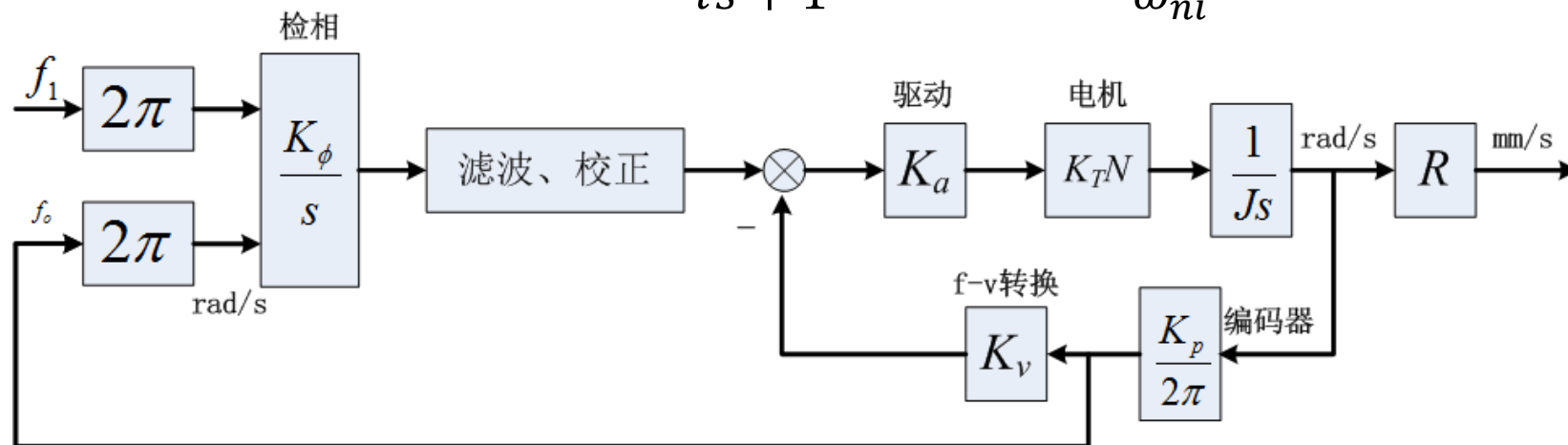
◆ 例2: 锁相伺服系统

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

(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：

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



◆ 例2: 锁相伺服系统

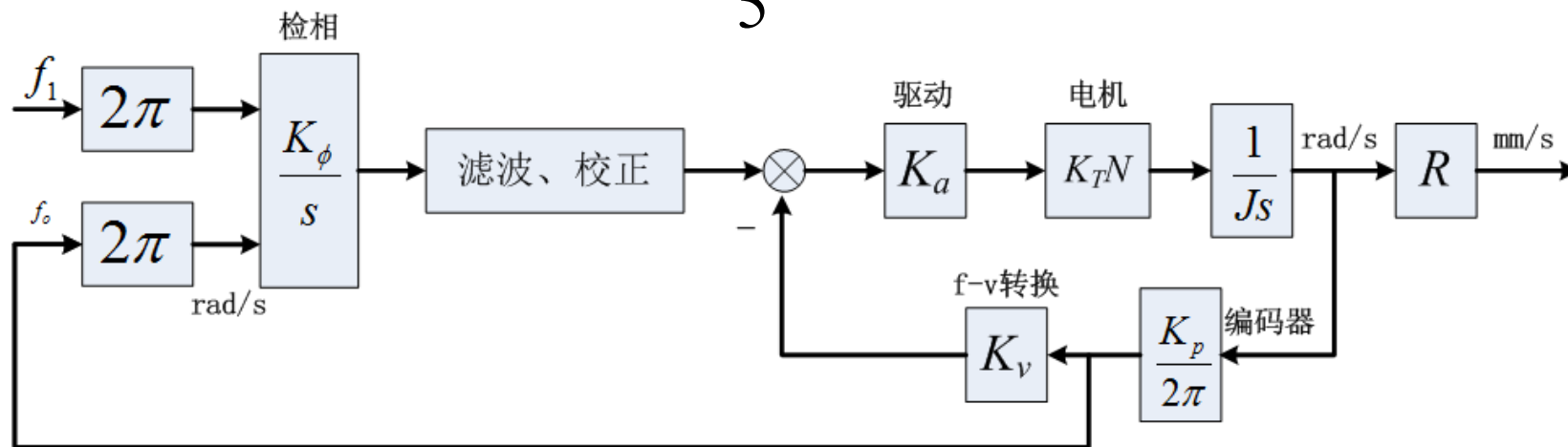
$$\omega_{ni} = 75\text{rad/s}$$

(2) 主回路设计

a) 主回路的被控对象——速度反馈+检相

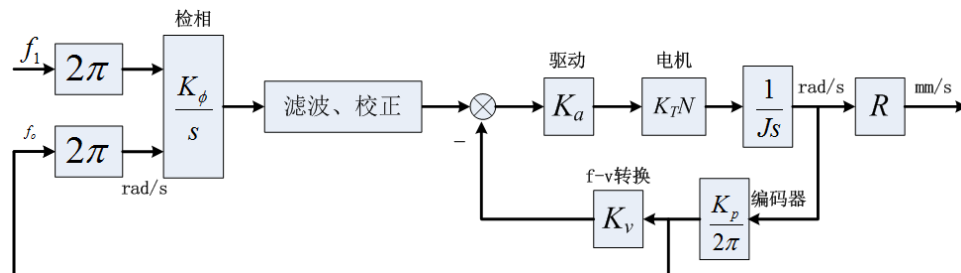
b) 主回路带宽

$$\omega_{no} = \frac{1}{5} \omega_{ni} = 15\text{rad/s}$$



◆ 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:

$$K_{vco} = \frac{1}{K_v}$$

主回路增益:

$$K = 2\pi K_\phi \frac{1}{K_v} = 393s^{-1}$$

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

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

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

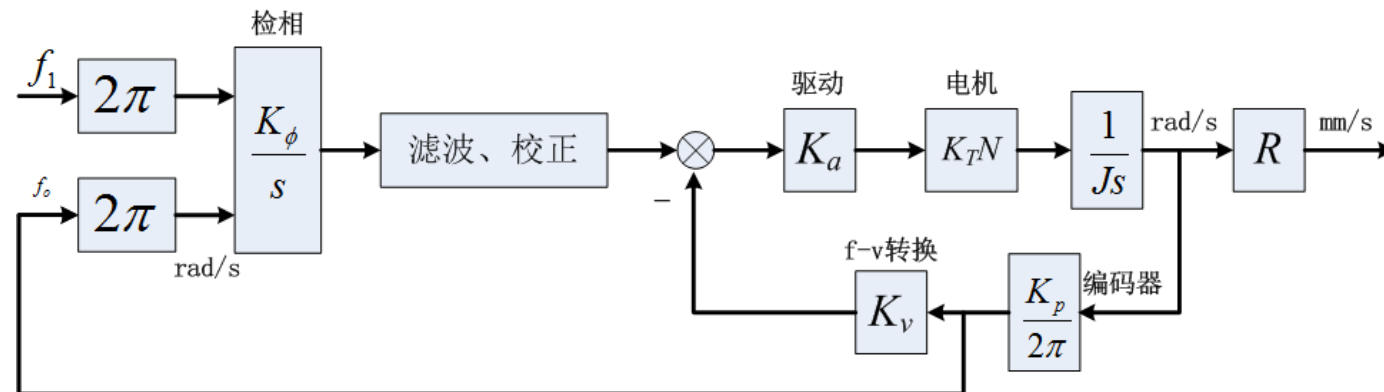
◆ 例2: 锁相伺服系统

(2) 主回路设计

d) 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。



$$G_2(s) = \frac{1}{\tau_3 s + 1}, \quad \tau_3 = 0.01s, \quad \frac{1}{\tau_3} \gg \omega_{no}$$

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



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；
- 每个回路都可以按照单回路进行设计。



8 多回路系统的设计

◆ 单回路系统设计的局限性

矛盾一：

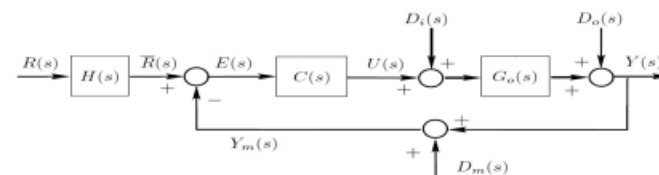
系统中噪声大，输入信号的频谱不宽：要求系统的带宽要窄，但带宽变窄，干扰抑制的效果变差；

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。





课程 安排

1

多回路系统

2

串级调节系统

3

复合控制系统

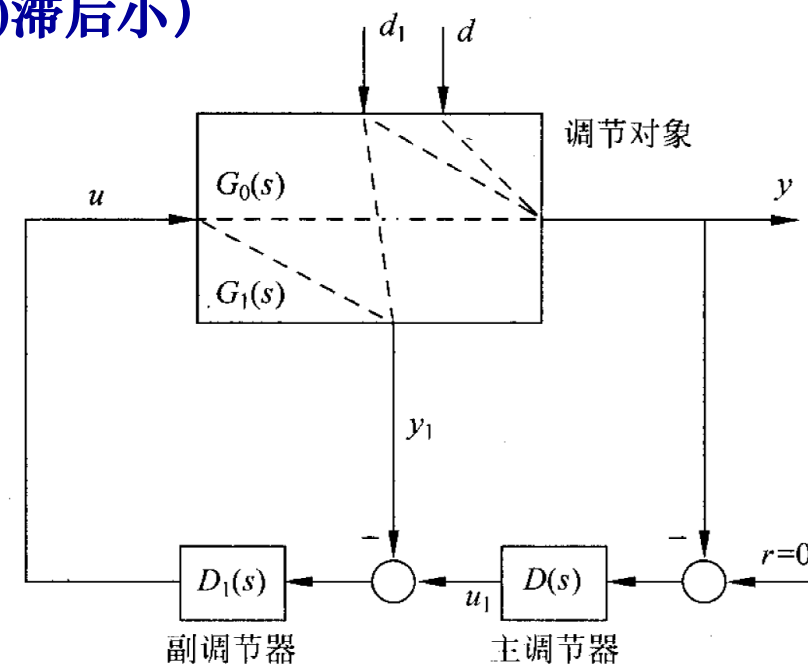


◆ 串级调节系统

- ◆ 过程控制中的多回路控制
- ◆ 过程控制中的大滞后对象
- ◆ 辅助变量能够保证比较快地反映扰动和控制作用 ($G_1(s)$ 滞后小)
- ◆ 利用辅助变量构成调节系统, 镇定辅助变量
- ◆ 内外环带宽错开
- ◆ 主调节器的输出作为副调节器的设定值

串级调节的特点:

- ◆ 对象的主要扰动在输入端
- ◆ 串级调节对于辅助变量之后的扰动无作用

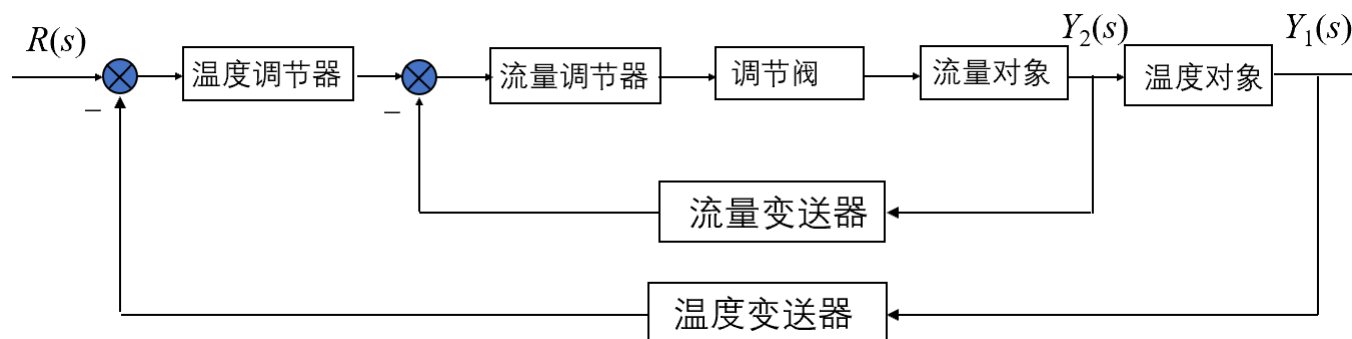


◆ 串级调节系统的结构组成

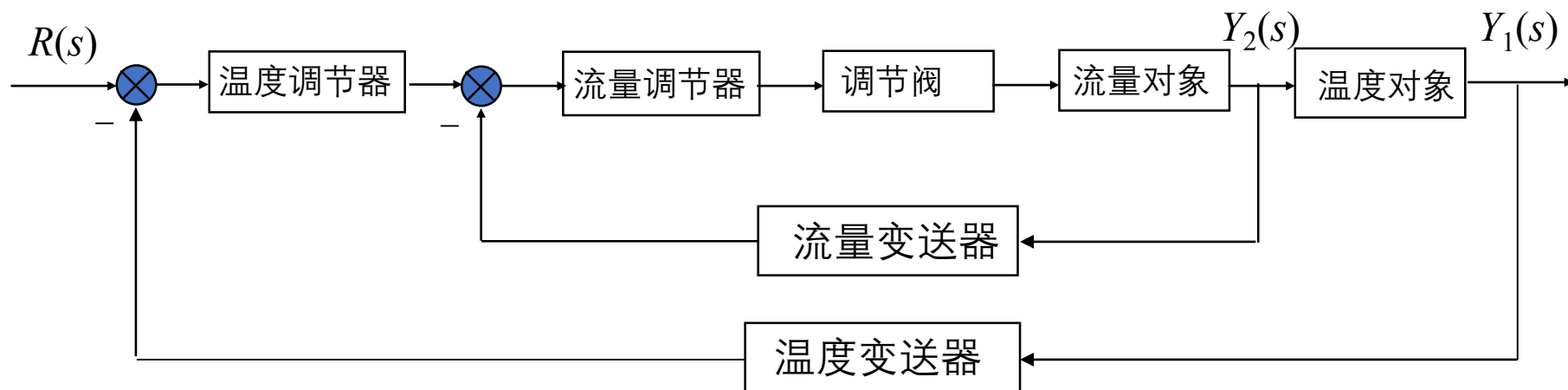
整个系统包括两个控制回路：主回路和副回路。副回路由副变量检测变送、副调节器、调节阀和副过程构成；主回路由主变量检测变送、主调节器、副调节器、调节阀、副过程和主过程构成。

一次扰动：作用在主被控过程上，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，即包括在副回路范围内的扰动。

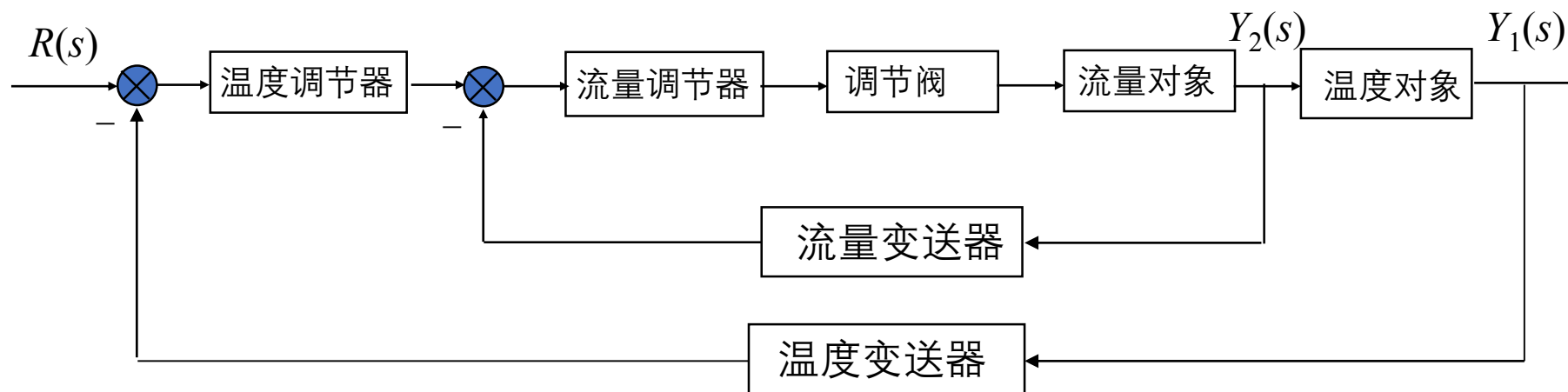


◆ 串级调节系统的结构组成



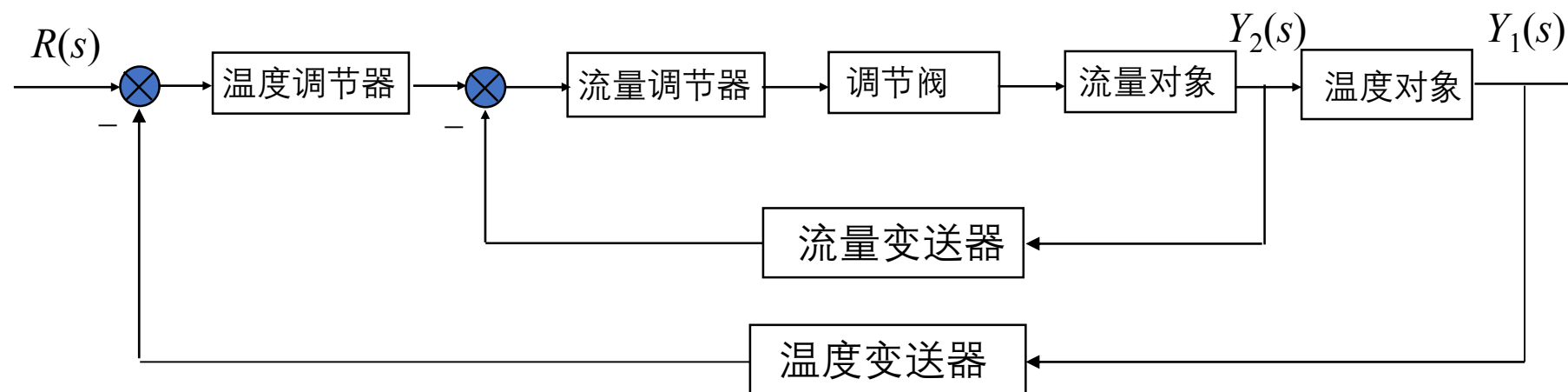
主参数（主被控变量 y_1 ）： 生产工艺过程中主要控制的工艺指标；在串级调节系统中起主导作用的那个被调参数即为主参数，如氧化炉反应温度。

◆ 串级调节系统的结构组成



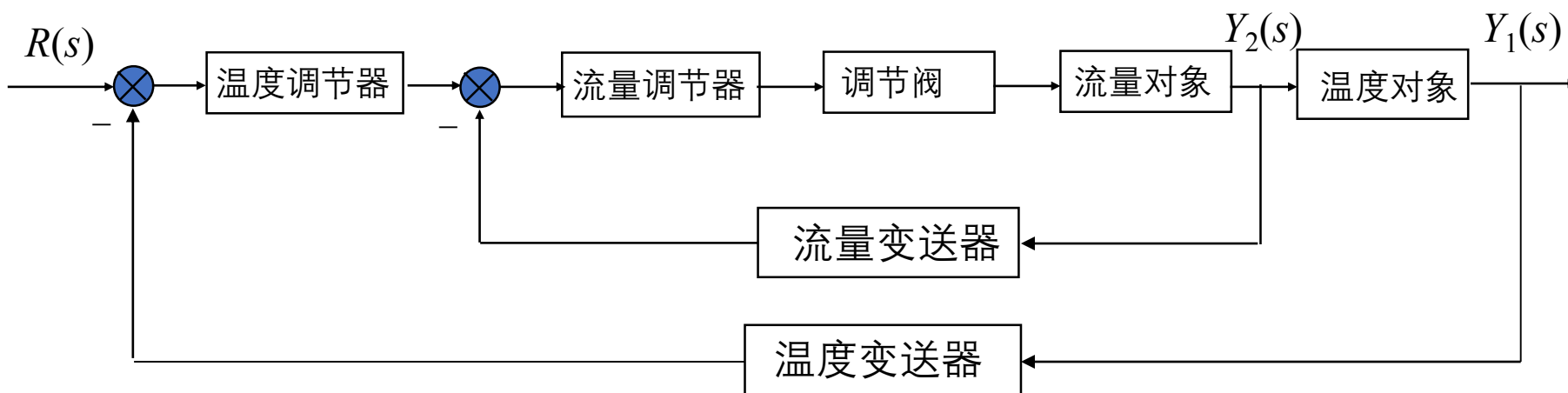
副参数（副被控变量 y_2 ）：影响主参数的主要变量和中间变量（如后面例子中的氨气流量）。

◆ 串级调节系统的结构组成



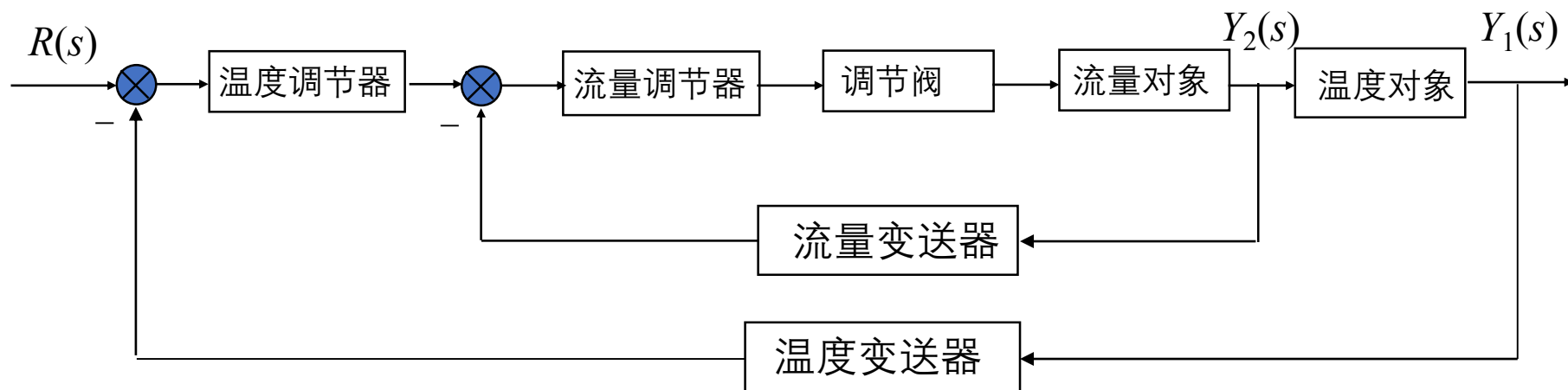
主被控对象（温度对象）：为生产中所要控制的，由主参数表征其主要特性的工艺生产设备（如氧化炉）；一般指副参数检测点到主参数检测点的全部工艺设备。

◆ 串级调节系统的结构组成



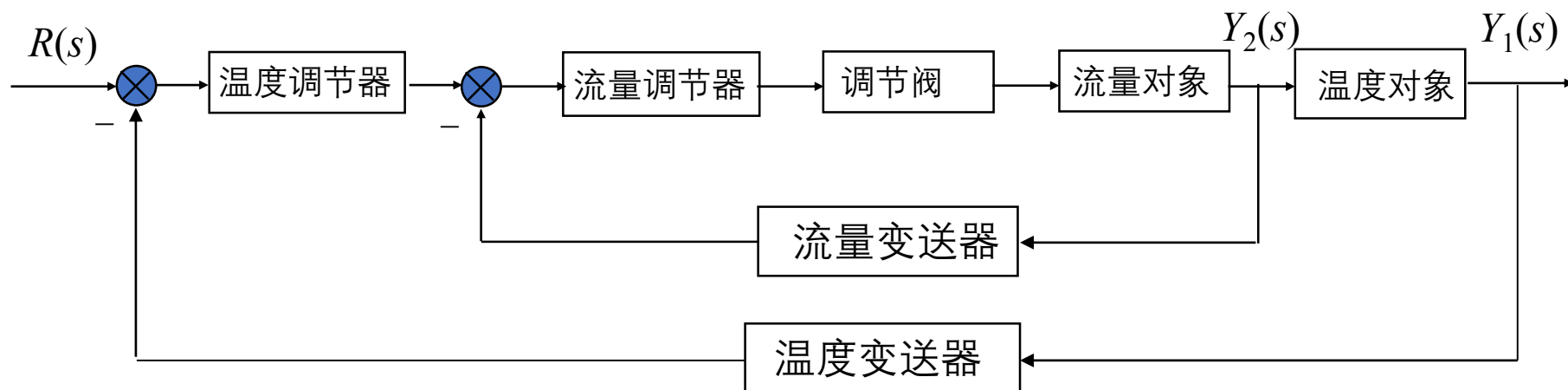
副被控对象（流量对象）：调节阀到副参数测量点之间的工艺设备。

◆ 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。

◆ 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。



◆ 串级调节系统的工作过程

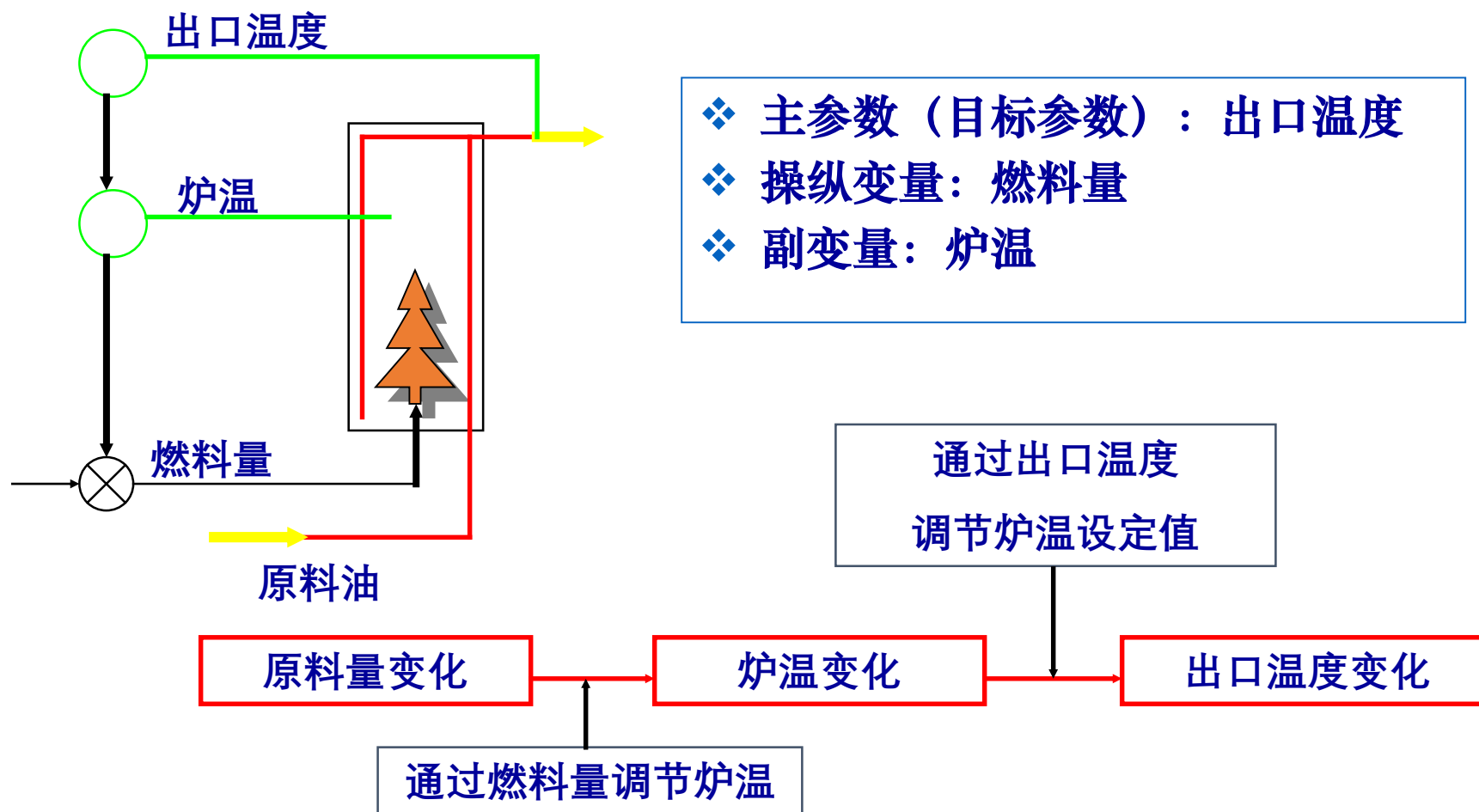
当扰动发生时，破坏了稳定状态，调节器进行工作。根据扰动施加点的位置不同，分种情况进行分析：

- * 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。

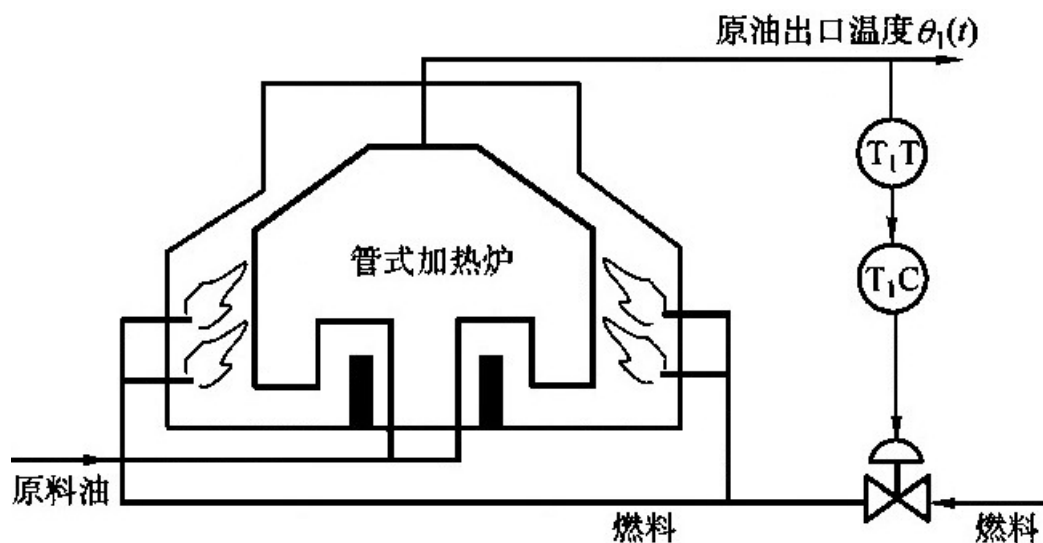


◆ 串级调节系统——管式加热炉的控制



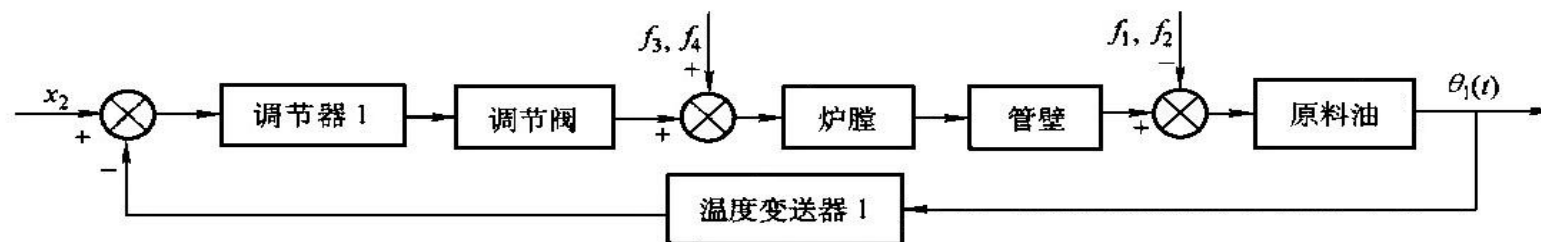
◆ 串级调节系统——管式加热炉的控制

出口温度单回路控制系统



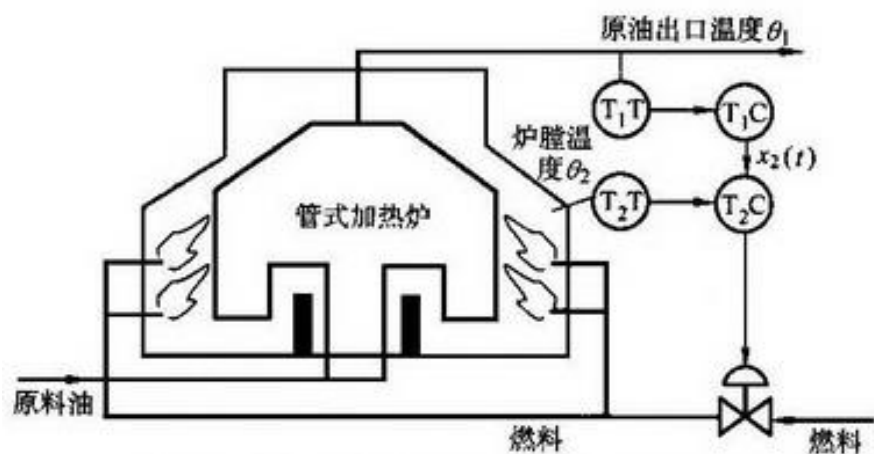
影响原油出口温度的干扰:

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



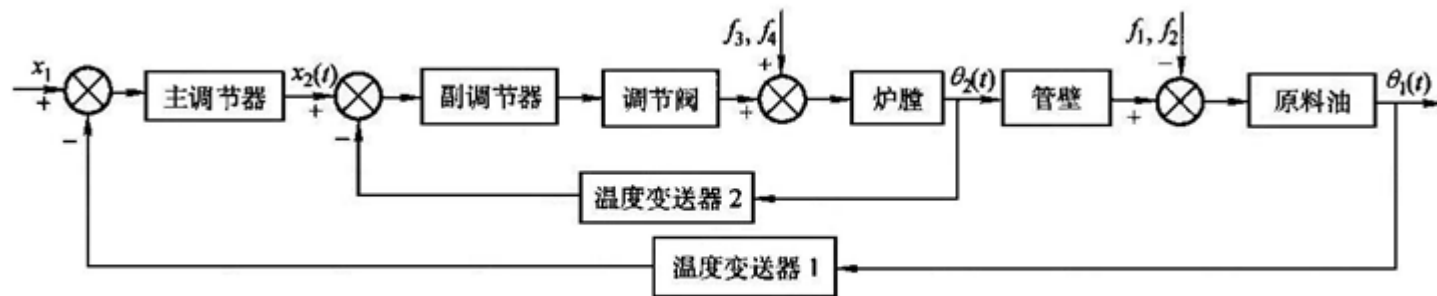
◆ 串级调节系统——管式加热炉的控制

出口温度串级控制系统



影响原油出口温度的干扰：

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



管式加热炉出口温度串级控制系统框图

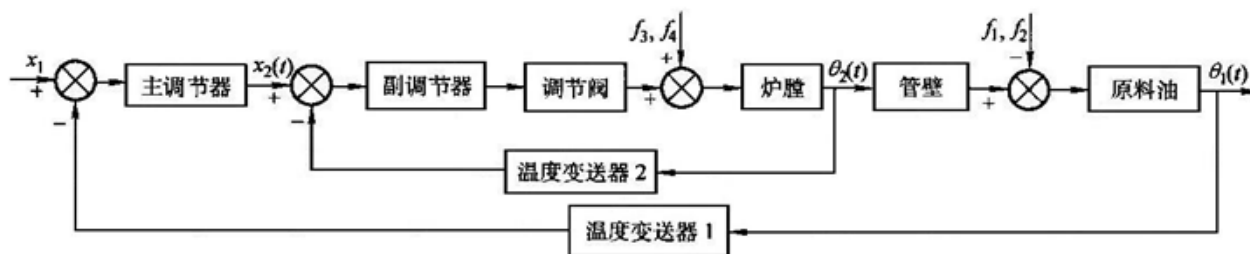
◆ 串级调节系统——管式加热炉的控制

出口温度串级控制系统

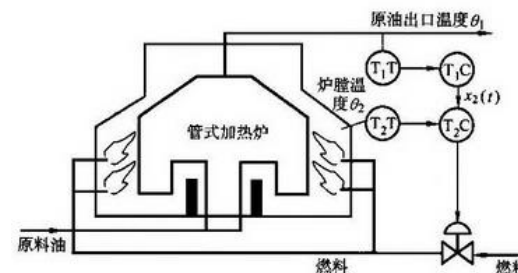
控制原理的简单分析

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



管式加热炉出口温度串级控制系统框图



◆ 串级调节系统——管式加热炉的控制

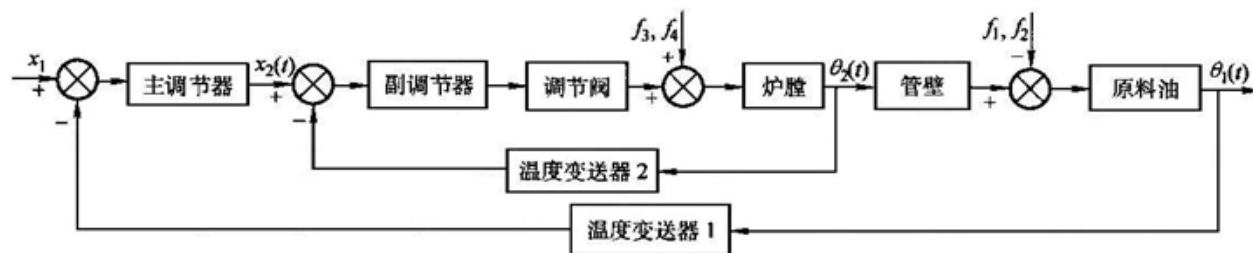
出口温度串级控制系统

控制原理的简单分析

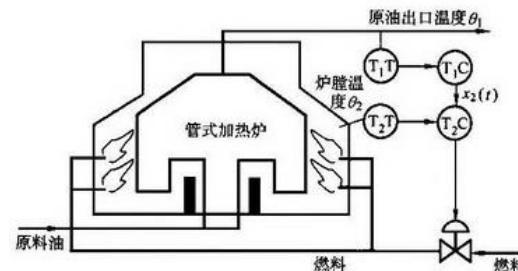
副回路具有先调、粗调、快调的特点；

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较为彻底地加以消除。

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



◆ 串级调节系统

例：氧化炉温度调节。

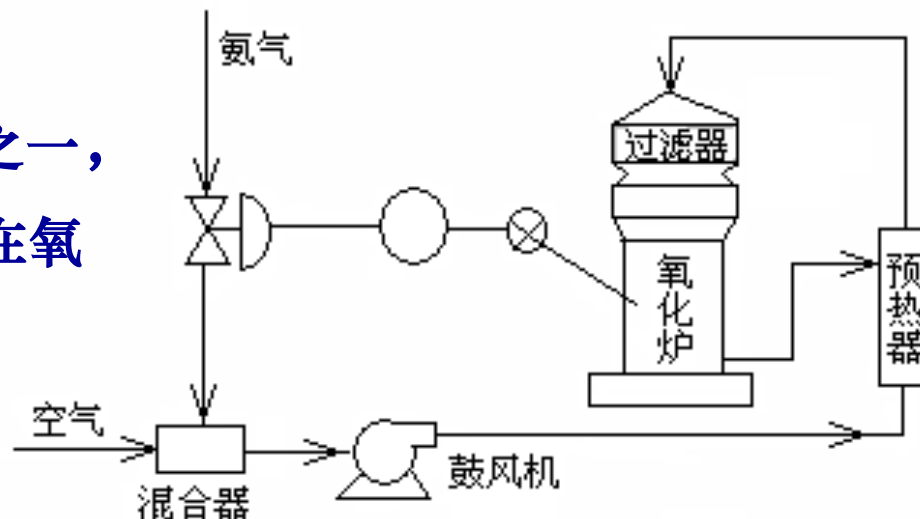
硝酸生产中，氧化炉是关键设备之一，氨气和空气在铂触媒的作用下，在氧化炉内进行氧化反应：



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 $840 \pm 5^\circ \text{C}$ 。

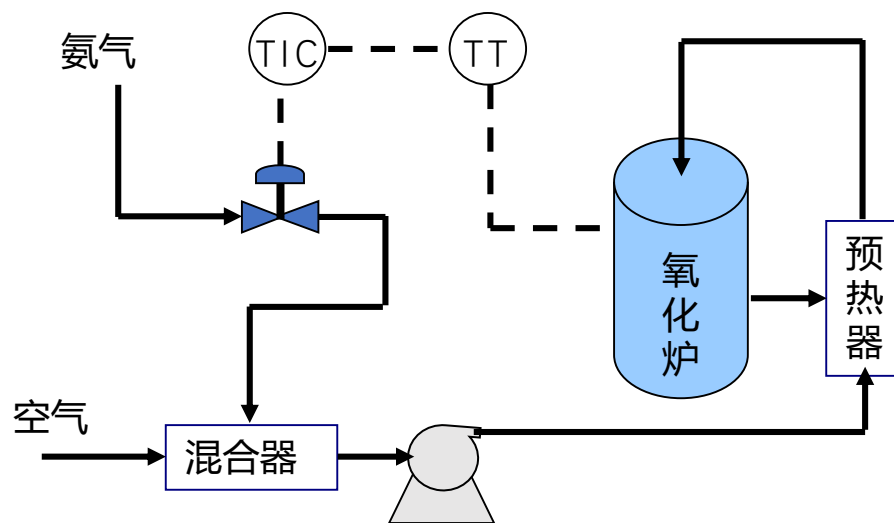


通过氨气流量控制氧化炉，
即控制量为氨气流量阀。

◆ 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。

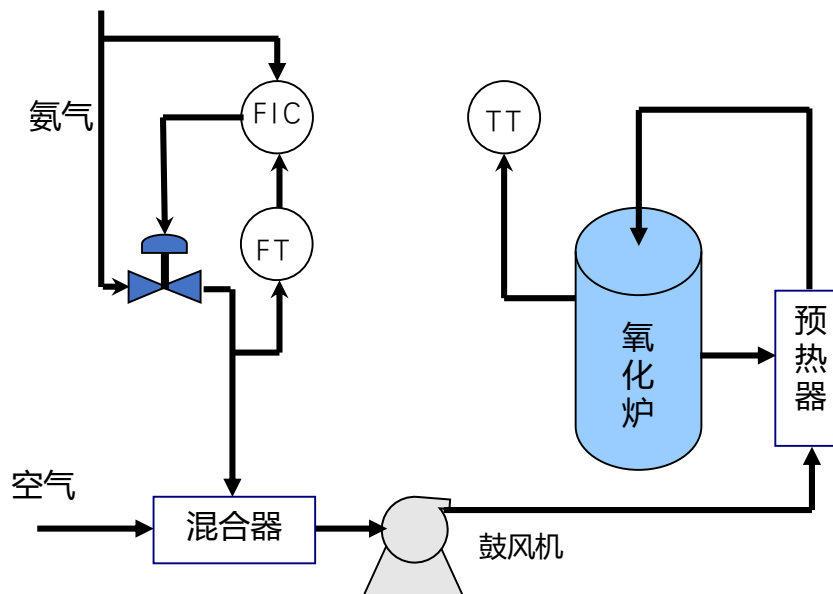


工艺要求：氧化率达到97%以上，为此要将氧化炉温度控制在 $840 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

◆ 串级调节系统

例：氧化炉温度调节。

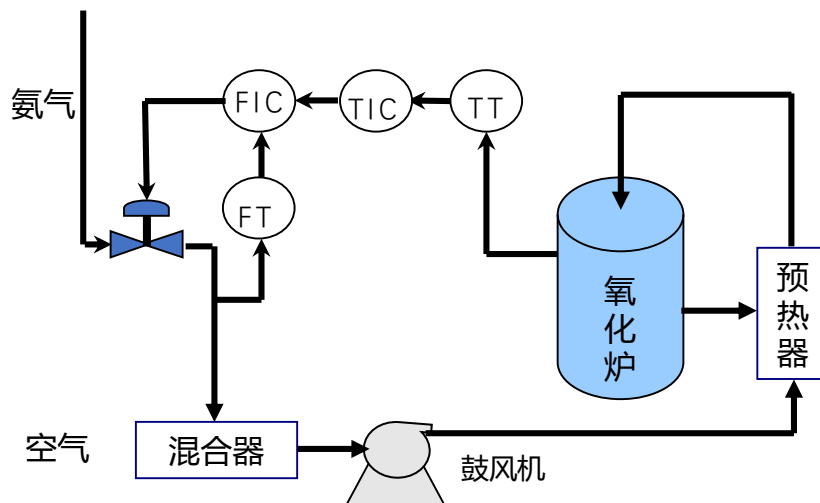
方案②：氨气流量调节系统。工艺上氨气流量变化1%，氧化炉温度变化64°C。设计氨气流量调节系统能迅速克服氨气流量的干扰，这样把氨气流量变化克服在影响反应温度之前，但偏差仍达8°C。这是因为氧化炉还存在其他干扰，如空气量、触媒老化等问题。



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

◆ 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。

上述即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。



8.2 串级调节系统



小结

对于串级调节系统：

- 过程控制系统带宽受到限制；
- 存在比较快反映扰动和控制作用的中间变量；
- 主变量和辅助变量都配上相应的调节器，主调节器的输出作为副调节器的设定值。



8 多回路系统的设计

单回路系统设计的局限性

矛盾一：

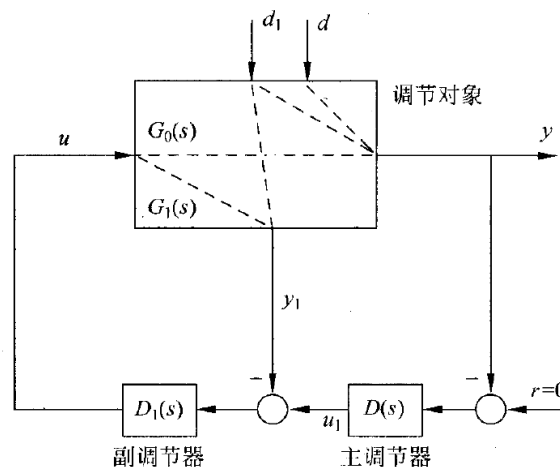
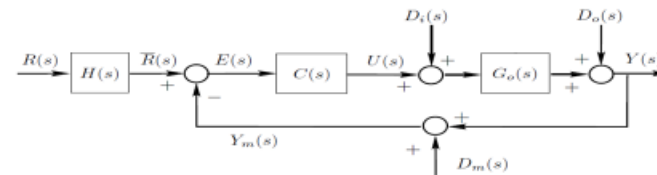
系统中噪声大，输入信号的频谱不宽：要求系统的带宽要窄，但带宽变窄，干扰抑制的效果变差；

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。





课程 安排

1

多回路系统

2

串级调节系统

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，受外部扰动、噪声、传感器精度等因素的影响，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别来解决，但做往往会导致系统稳定性变差，甚至使系统不稳定。



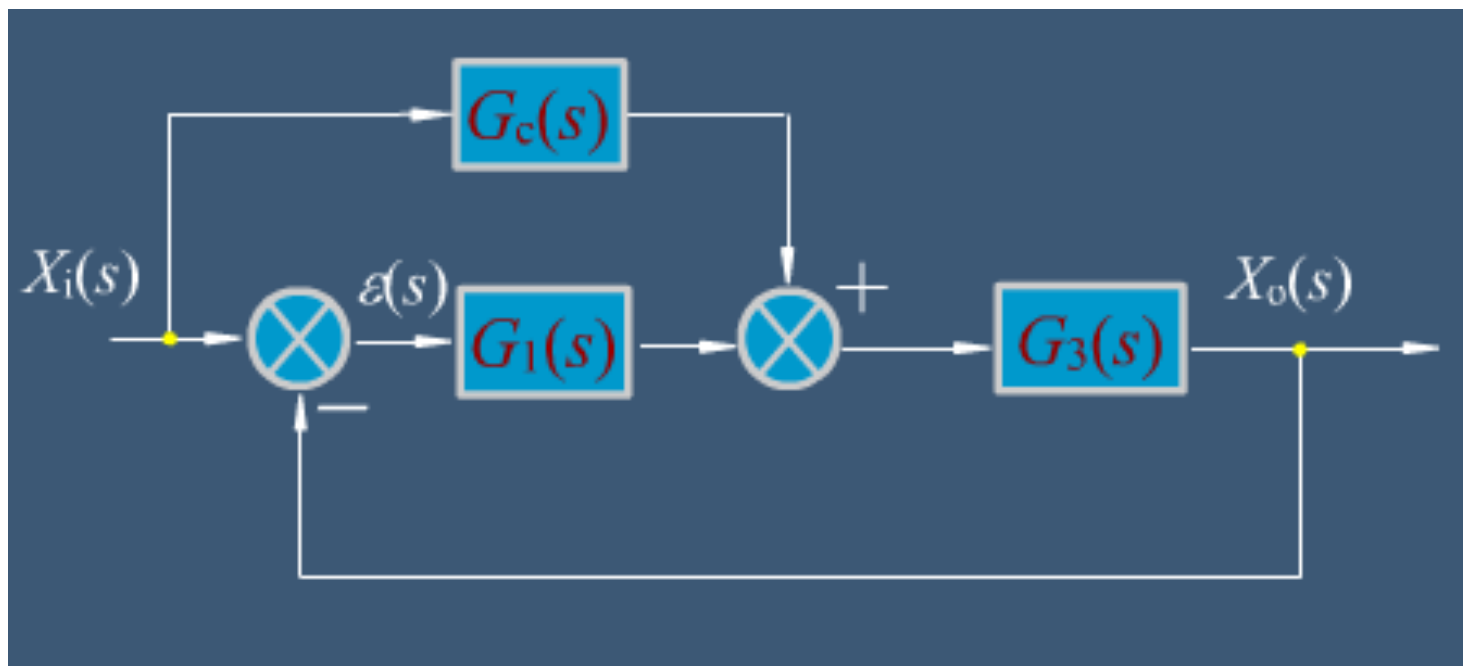


◆ 复合控制系统

为解决这个矛盾，常把开环控制与闭环控制结合起来，组成复合控制。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。



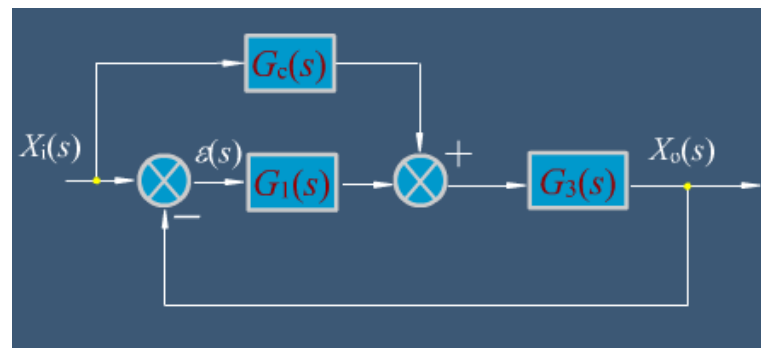
◆ 复合控制系统



复合控制系统结构框图

◆ 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

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

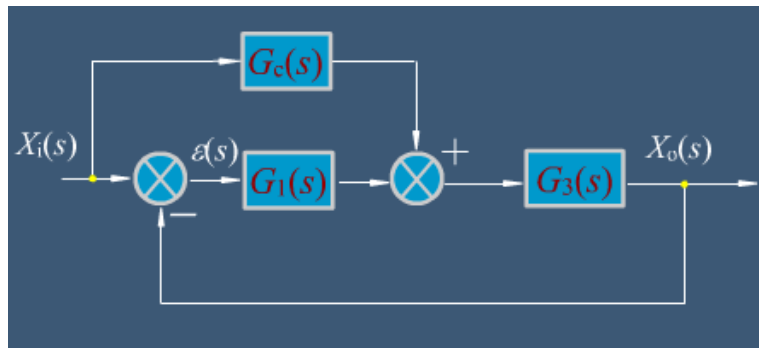
在加入顺馈补偿通道后，复合控制系统的传递函数

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

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。

◆ 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条件

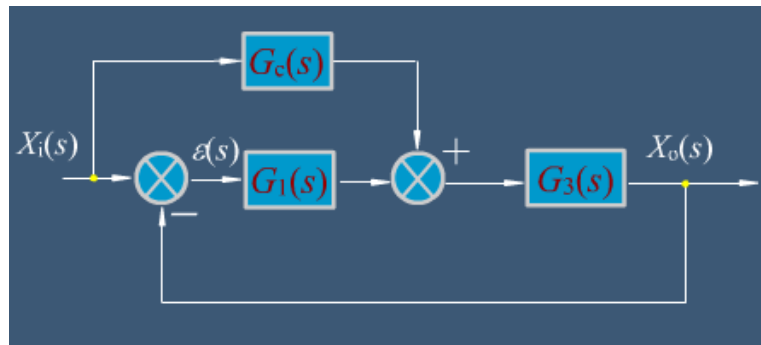
$$G_c(s) = \frac{1}{G_3(s)}$$

往往很困难，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

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



8 多回路系统的设计



◆ 单回路系统设计的局限性

矛盾一：

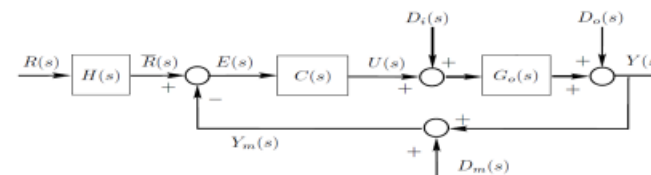
系统中噪声大，输入信号的频谱不宽：要求系统的带宽要窄，但带宽变窄，干扰抑制的效果变差；

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。





Thanks for your attention!
