

## ❖ 基本内容

- 校正的一般原理
- PID控制器
- 局部反馈校正

# 校正问题及其实现方式

---

## 控制系统设计的一般流程：

1. 明确系统需要完成任务
2. 选择搭建系统的元部件（综合能量、精度、成本等因素）
3. 检验所搭建系统性能是否满足要求
  - 闭环系统不稳定，无法工作
  - 闭环系统稳定，但稳态误差较大
  - 闭环系统稳定，但响应较慢或振荡较大
4. 如果不满足要求，设计**补偿装置**进行**校正**，直到符合要求

# 校正问题及其实现方式

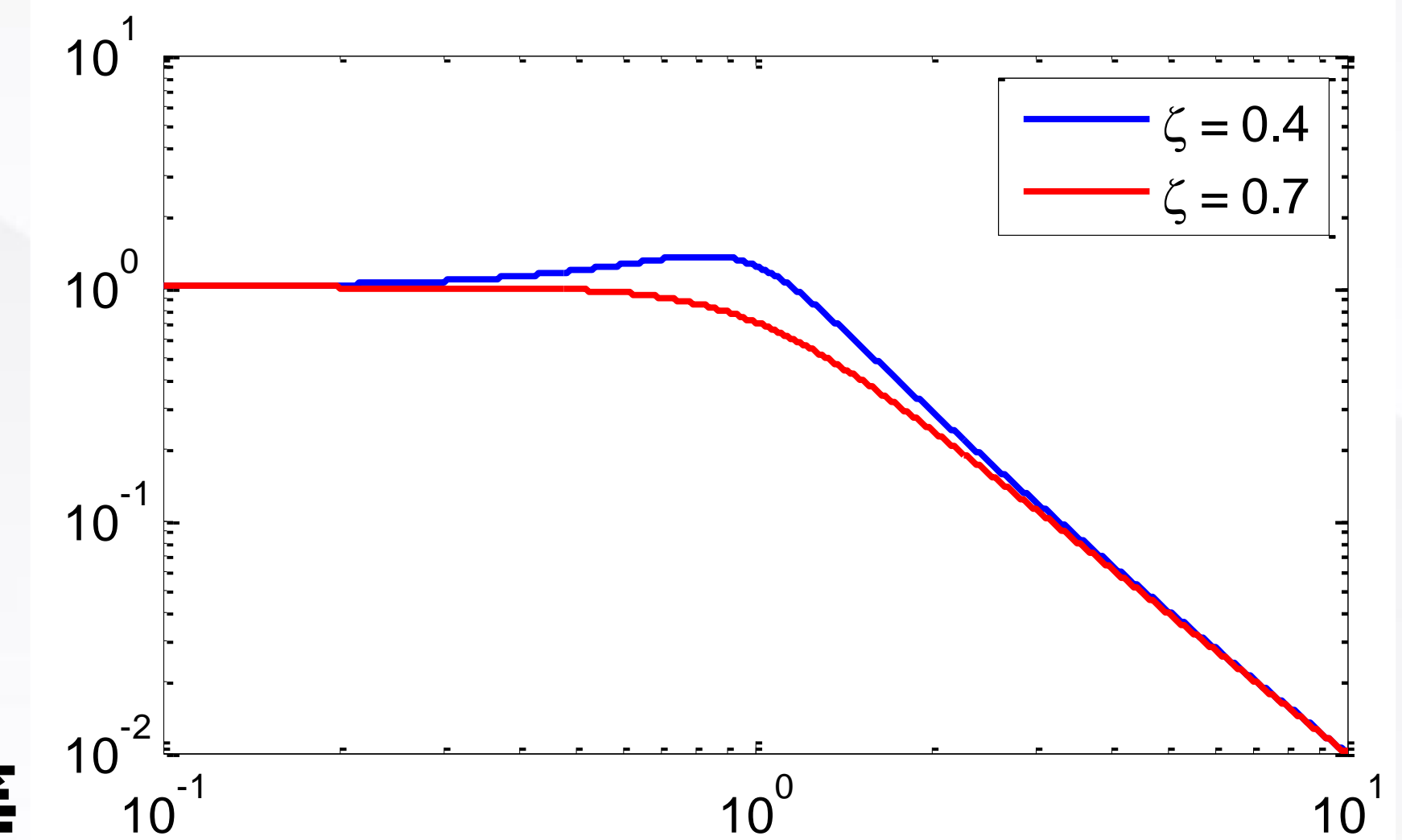
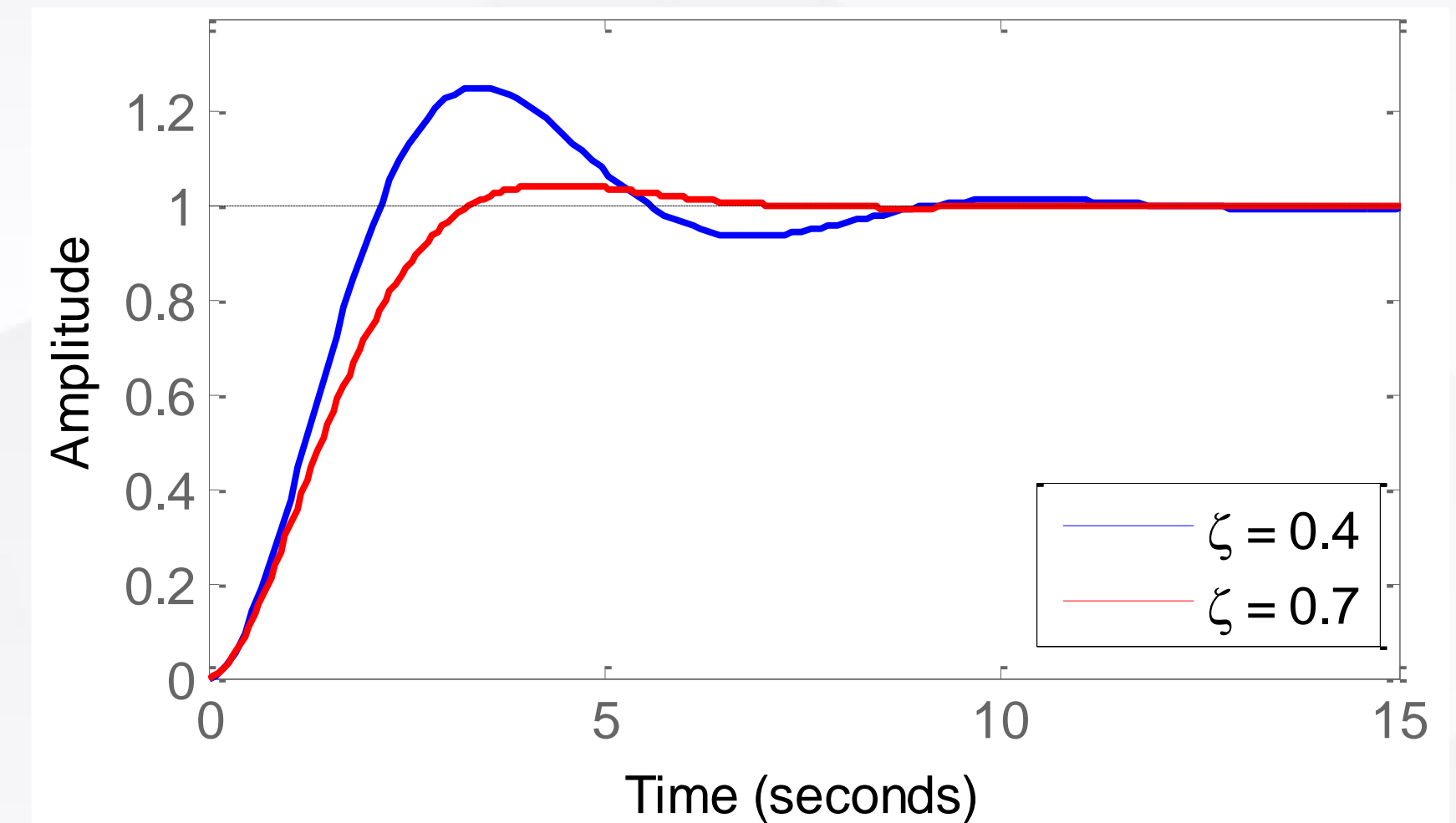
## 典型的二阶系统

(期望阻尼  $0.4 < \zeta < 0.7$ ) :

$\zeta$	$\gamma$	$\sigma$	$M_r$
0.4	$44^\circ$	25.4%	1.364
0.7	$60^\circ$	4.6%	1.002

(1) 更高的性能指标意味着更高的成本

(2) 多个指标之间可能存在冲突

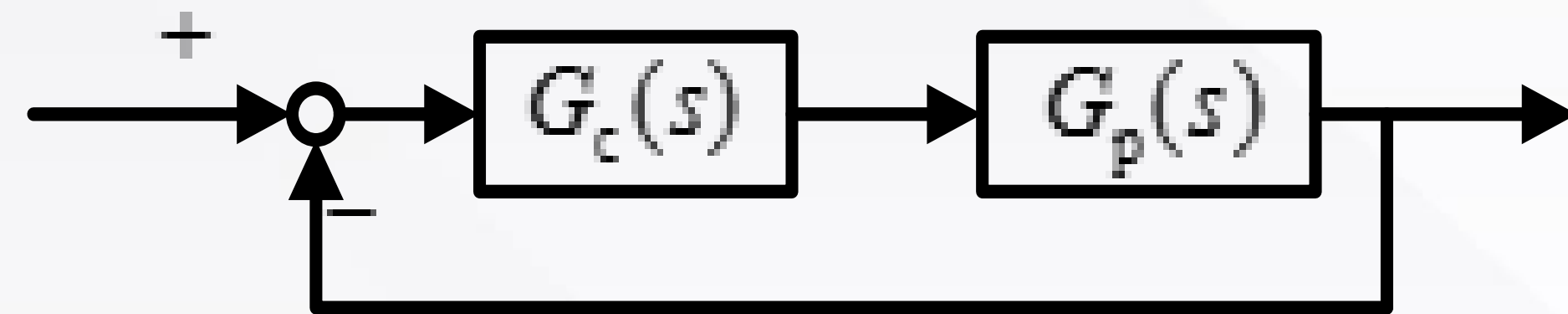


时间域指标：从响应曲线读取，调整时间、超调量等

# 校正问题及其实现方式

## 主要校正方法（按系统结构分）

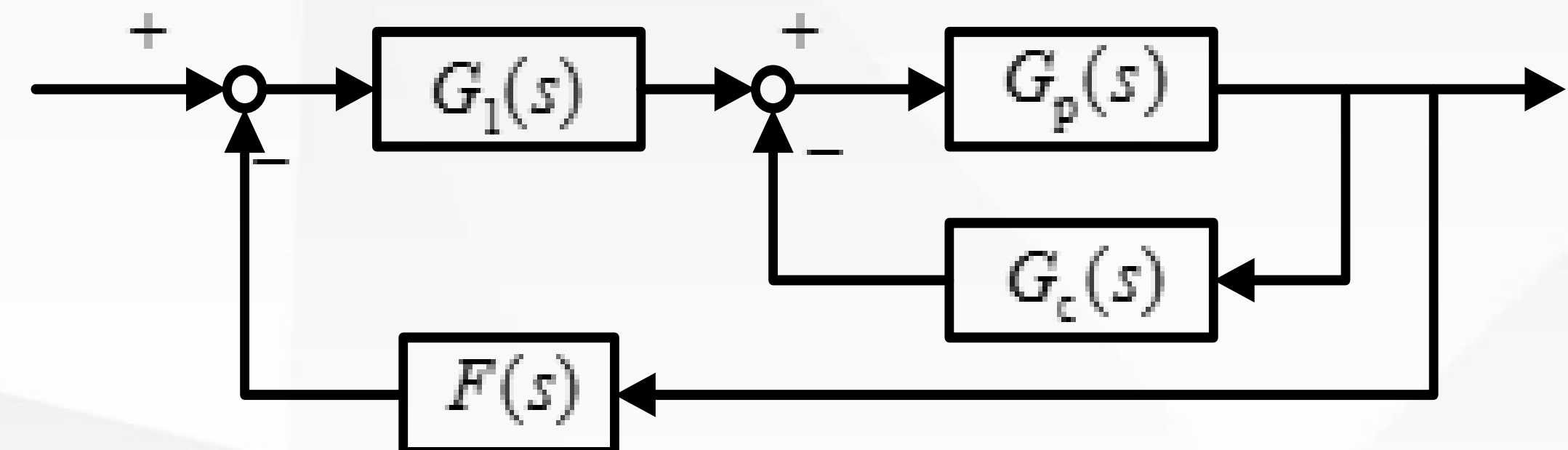
### 串联校正：



#### 特点：

- (1) 分析与设计简单
- (2) 可能需要外加放大器

### 局部反馈校正：



#### 特点：

- (1) 多回路框架，分析与设计较复杂
- (2) 简单的设计可能给出特殊效果

# 控制系统的PID校正

(1) 比例校正 (P) ,  $k(s) = k_p$

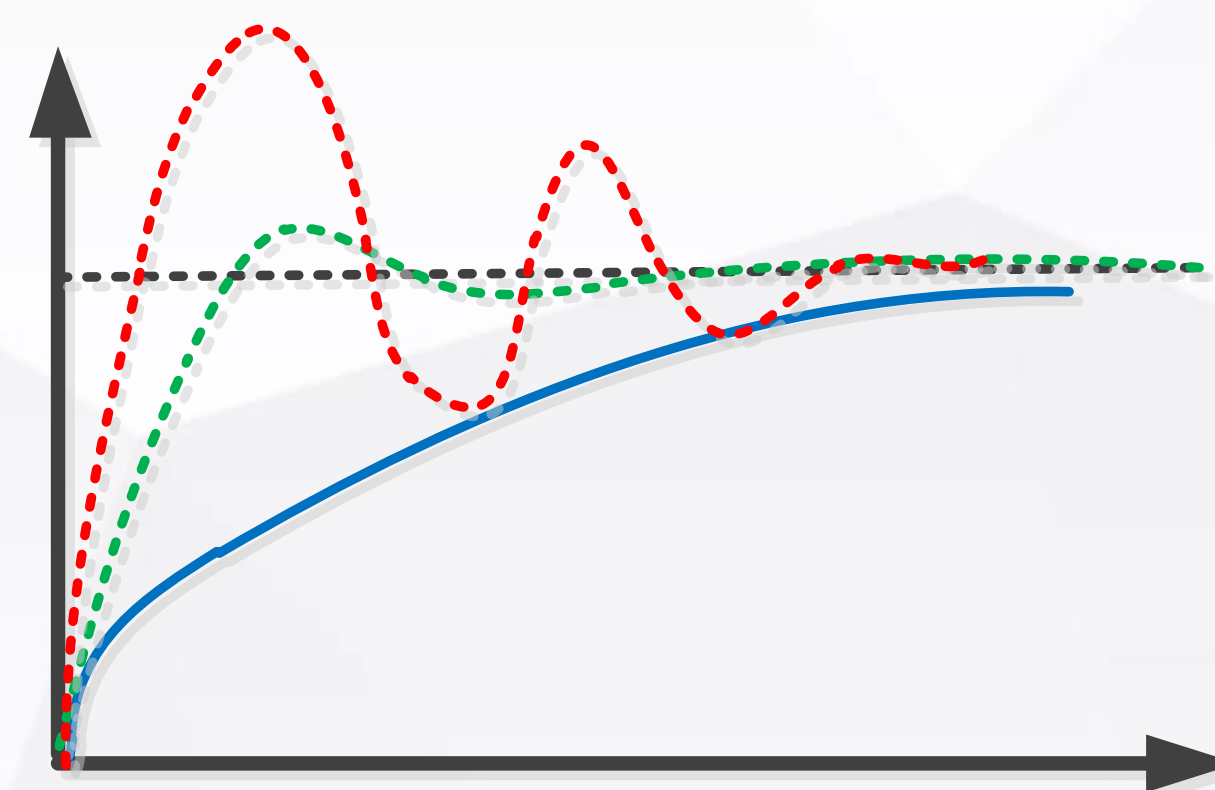
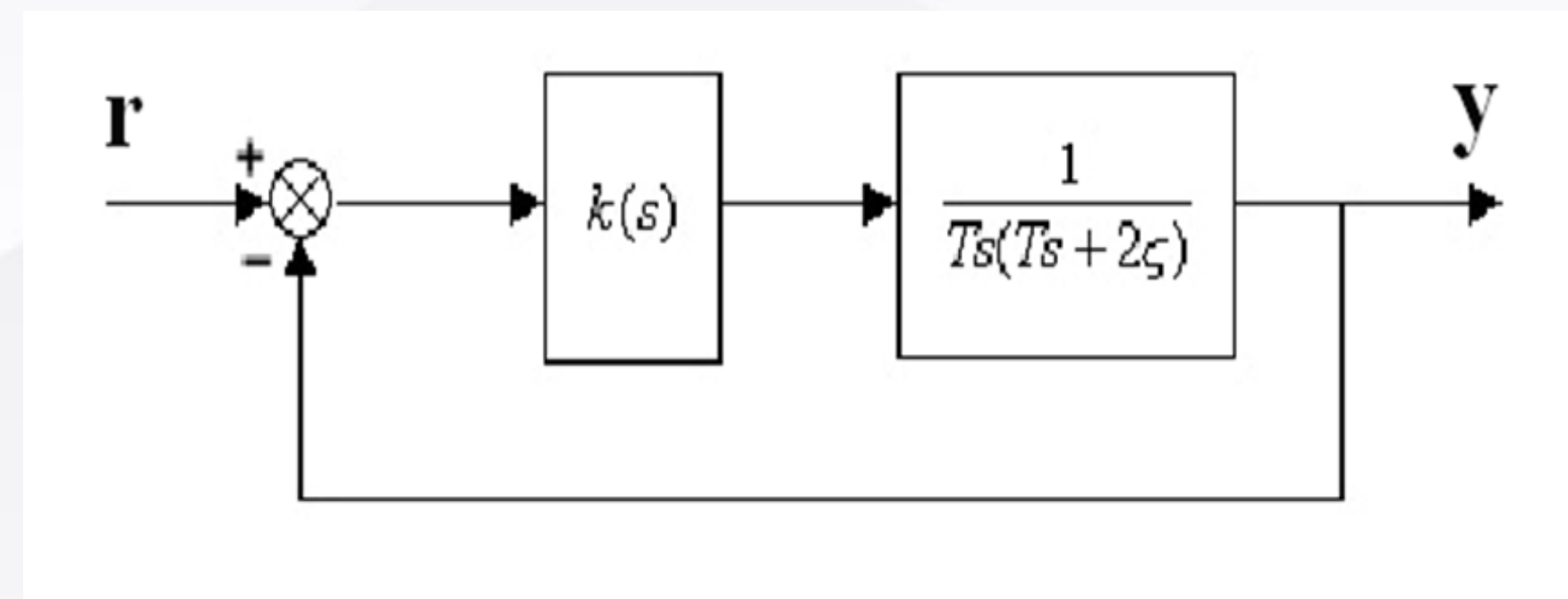
$$\text{设 } G_g(s) = \frac{1}{Ts(Ts+2\zeta)}$$

当  $k_p = 1$  特征方程为:  $T^2s^2 + 2\zeta Ts + 1 = 0$

当  $k_p \neq 1$  特征方程为:  $T^2s^2 + 2\zeta Ts + k_p = 0$

$$T' = \frac{T}{\sqrt{k_p}}, \quad \zeta' = \frac{\zeta}{\sqrt{k_p}}$$

当  $k_p$  变大,  $T'$  变小, 系统的响应快, 但是  $\zeta'$  也变小, 振荡加剧



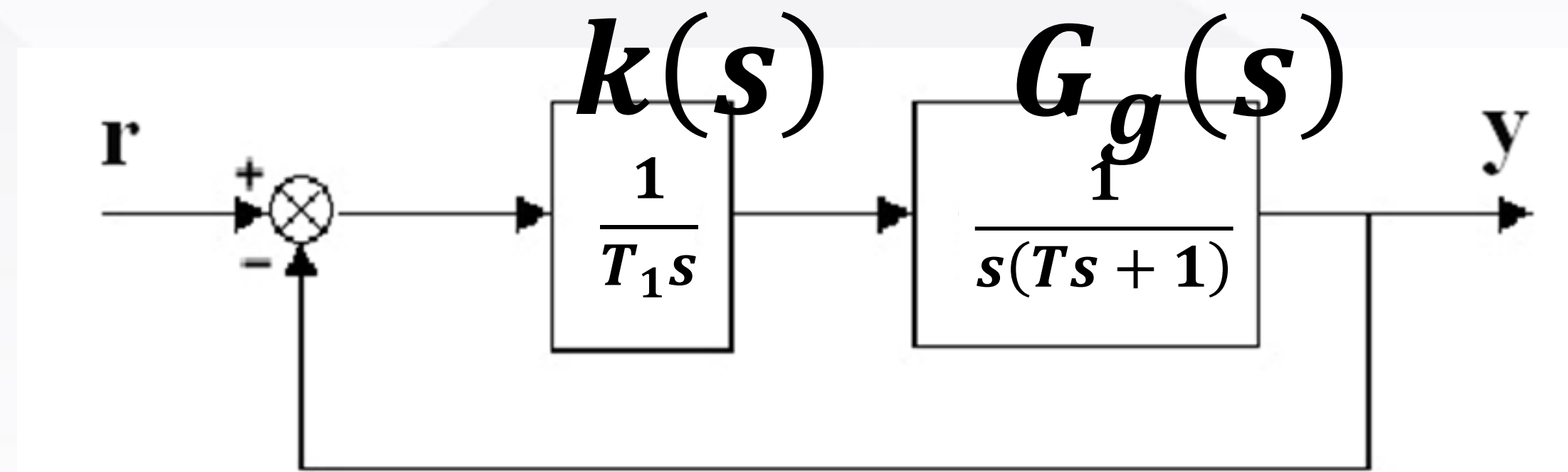
# 控制系统的PID校正

(2) 积分校正 (I)  $k(s) = \frac{1}{T_1 s}$

设  $G_g(s) = \frac{1}{s(Ts+1)}$ ,  $G_{\text{开}}(s) = \frac{1}{T_1 s^2 (Ts+1)}$

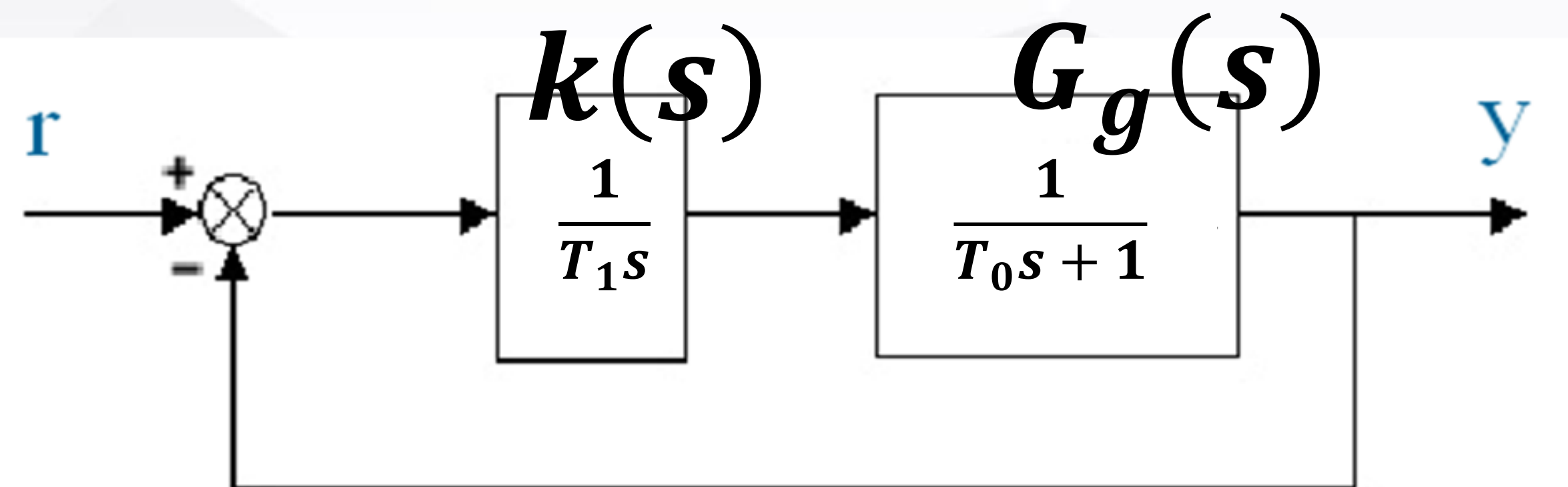
特征方程:  $T_1 T s^3 + T_1 s^2 + 1 = 0$

显然系统不稳定



如果  $G_g(s) = \frac{1}{T_0 s + 1}$ ,  $k(s) = \frac{1}{T_1 s}$

特征方程  $T_1 s(T_0 s + 1) + 1 = 0$





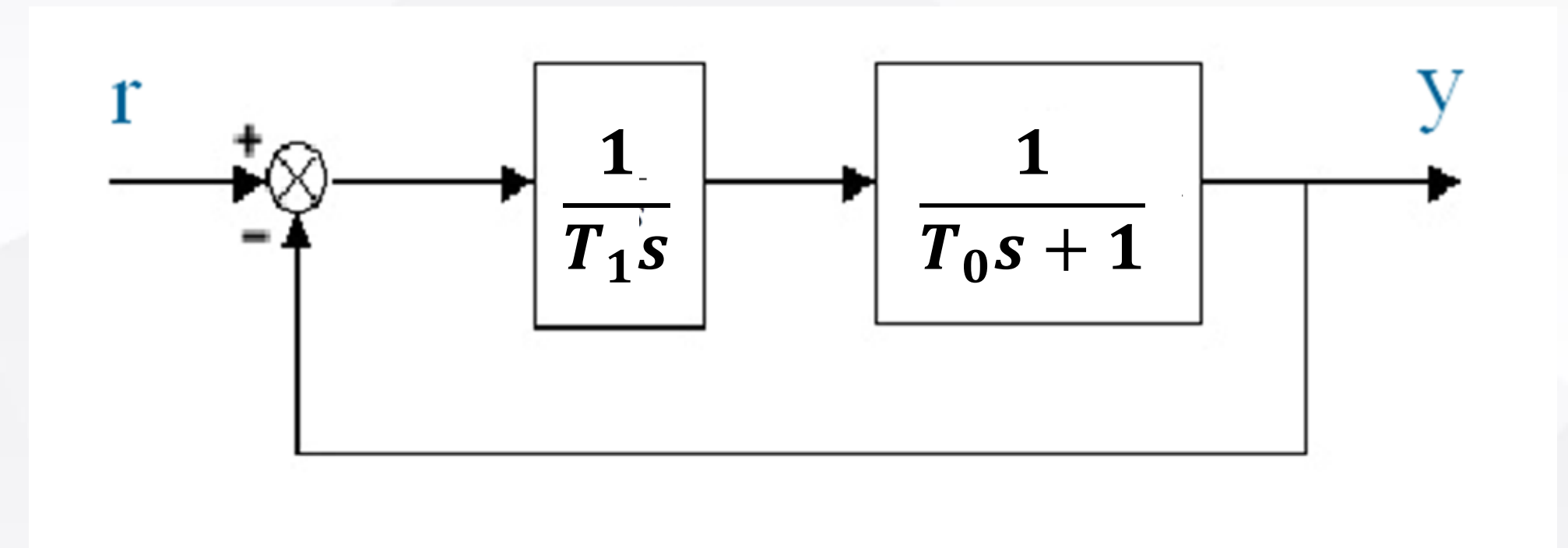
# 控制系统的PID校正

$$T_1 T_0 s^2 + T_1 s + 1 = 0$$

$$T' = \sqrt{T_1 T_0}, \zeta' = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_1}{T_0}}$$

$$t_s \approx \frac{3T'}{\zeta'} = 6T_0, \quad \text{与不加积分比较, 系统响应变慢}$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{不加积分的特征方程为: } T_0 s + 1 + 1 = 0 \\ T' = \frac{T_0}{2}, t_s = 3T' = \frac{3T_0}{2} \end{array} \right]$$



**可见加积分**      **优点-对克服静差有利**  
**缺点-系统变慢, 甚至于不稳定**

# 控制系统的PID校正

## (3) 比例+积分 (PI)

$$k(s) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_1 s} \right) = k_p \frac{T_1 s + 1}{T_1 s}, \quad \text{设 } G_g(s) = \frac{1}{T_0 s + 1}$$

$$\begin{aligned} G_{\text{闭}}(s) &= \frac{k_p (T_1 s + 1)}{T_1 s (T_0 s + 1) + k_p (T_1 s + 1)} = \frac{k_p (T_1 s + 1)}{T_1 T_0 s^2 + (k_p + 1) T_1 s + 1} \\ &= \frac{T_1 s + 1}{\frac{T_1 T_0 s^2}{k_p} + \frac{k_p + 1}{k_p} T_1 s + 1} \xrightarrow{k_p \gg 1} \frac{T_1 s + 1}{\frac{T_1 T_0}{k_p} s^2 + T_1 s + 1} \\ &\approx \frac{T_1 s + 1}{(T_1 s + 1) \left( \frac{T_0}{k_p} s + 1 \right)} = \frac{1}{\frac{T_0}{k_p} s + 1} \end{aligned}$$



# 控制系统的PID校正

---

## PI 控制的优点:

1) 积分对克服静态误差有利

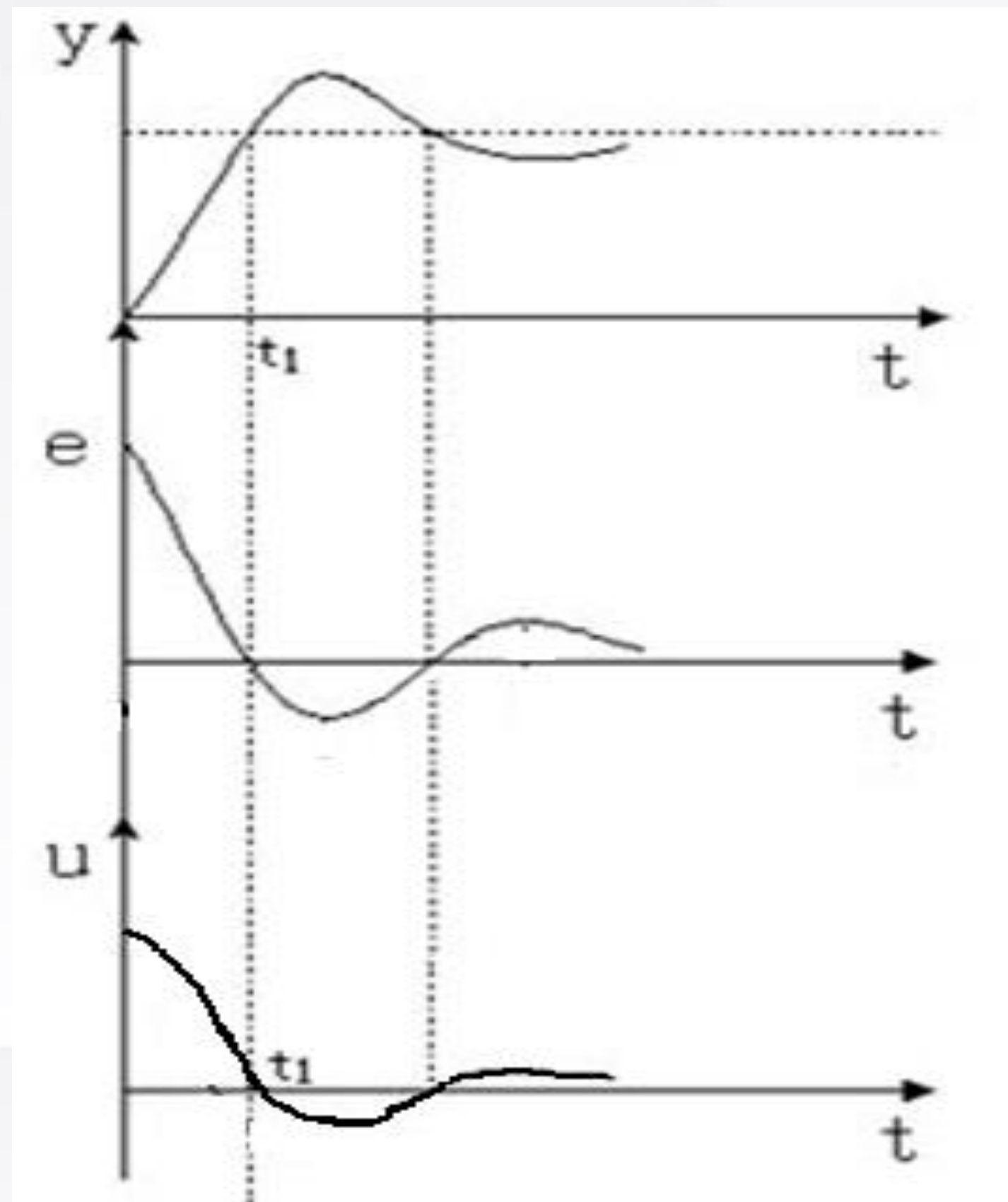
2) 使响应可达到非振荡状态且  $t_s$  不长,  $t_s = 3 \frac{T_0}{k_p}$

(不加比例积分:  $t_s = \frac{3T_0}{2}$  )

3) 从本质上看增加一个负实零点, 改善动态性能, 缓和极点带来的不利影响

# 控制系统的PID校正

## (4) 超调的控制



考虑比例控制器

$$k(s) = k_p$$

控制信号

$$u(t) = k_p e(t)$$

只要  $y(t) < 1, e(t) > 0$ , 就产生使  $y(t)$  增大的控制作用, 当  $t = t_1, e = 0$  时,  $y(t)$  还在增加, 会出现超调现象

# 控制系统的PID校正

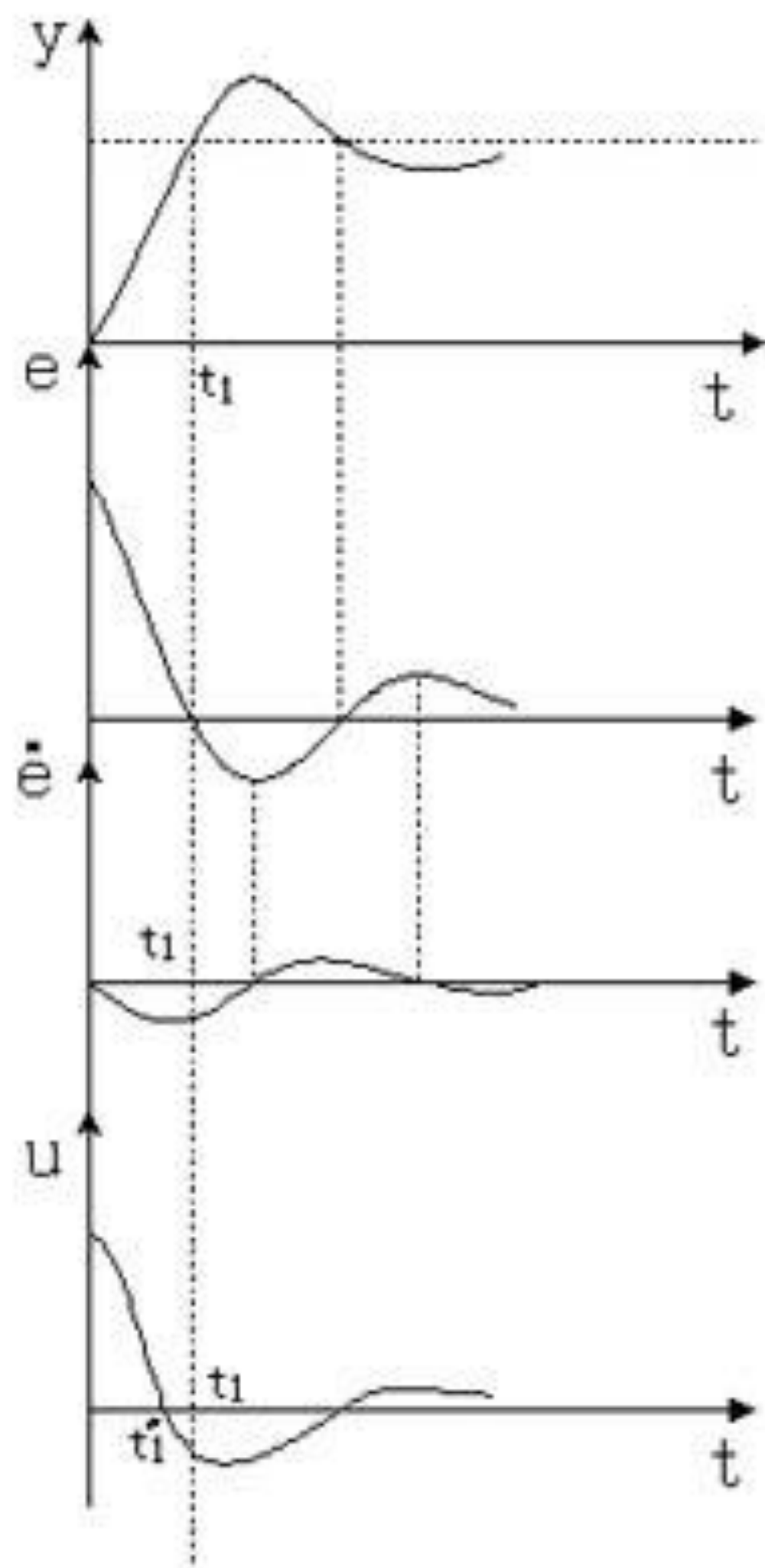
## 比例+微分 (PD)

$$k(s) = k_p(1 + T_D s)$$

$$\text{控制信号 } u(t) = k_p e(t) + k_p T_D \frac{de(t)}{dt}$$

加了微分作用  $u(t)$  在  $t = t_1' < t_1$  时为零，在  $t_1'$  到  $t_1$  这段时间内  $u(t) < 0$ ，抑制  $y(t)$  的增加，好像在车辆到达目标之前，提前制动一样。

微分控制器可以预测被控量的变化趋势，抑制超调，改善动态性能。相当于增加了一个零点。



# 控制系统的PID校正

---

## (5) 比例+积分+微分 (PID)

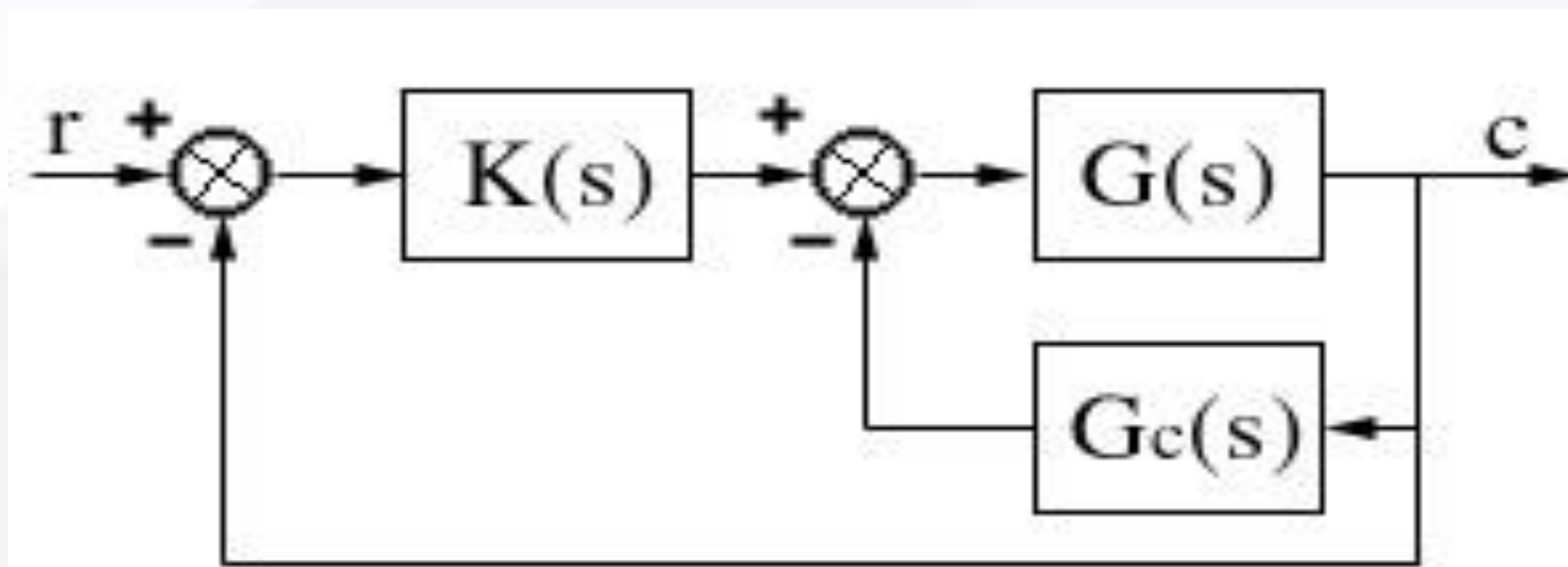
$$K(s) = K_p + \frac{1}{T_I s} + T_D s$$

**综合了比例、积分和微分的优点，本质上增加了两个零点**

- **PID控制器综合了比例积分加微分的优点，兼顾了控制系统的静态和动态性能**
- **参数具有明显的物理意义，直观易用**
- **在工业生产中应用极为广泛，直到今日，仍是最常用的控制器**
- **实际应用中有多种变化，需要深入学习**

# 局部反馈校正

# 局部反馈校正



通常用局部反馈改善局部特性，再配以串联校正

设  $G(s) = \frac{K}{Ts + 1}$ ,  $G_c(s) = k$

小闭环等效为  $\frac{\frac{K}{Ts + 1}}{1 + \frac{Kk}{Ts + 1}} = \frac{K}{Ts + 1 + kK} = \frac{\frac{K}{1 + kK}}{\frac{T}{1 + kK}s + 1}$

当  $kK \gg 1$  时  $\Rightarrow \frac{1}{k}$

当  $G$  中  $T$  较大时，采用局部反馈可减少惰性。



# 反馈校正

例：对开环对象  $G(s) = \frac{K}{1+0.1s}$  设计和比较不同的校正装置，使得闭环系统在阶跃输入下的稳态输出为  $c(\infty) = 0.9$

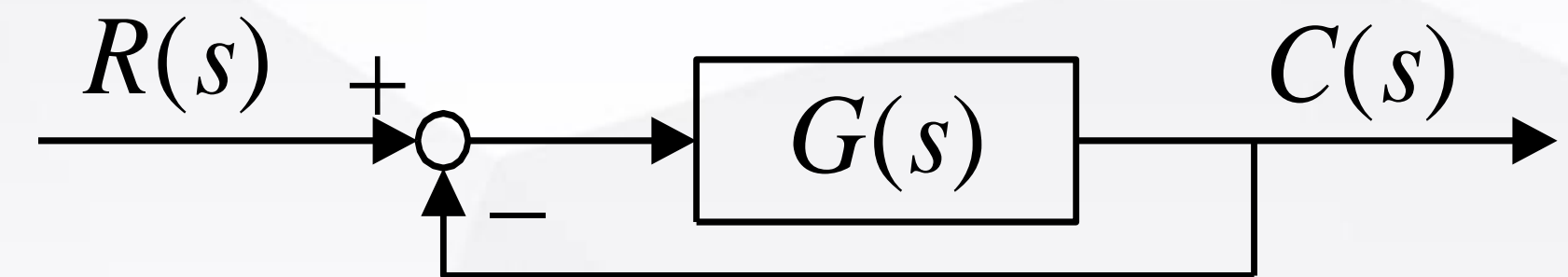
(1) 根据终值定理, 当  $K = 0.9$  时开环系统的输出稳态值为 0.9, 此时系统的时间常数为  $T = 0.1 \text{ s}$

(2) 单位反馈下, 闭环传递函数为

$$G_1(s) = \frac{K}{1+K+0.1s}$$

此时,  $K = 9$  时输出稳态值为 0.9

时间常数  $T = 0.01 \text{ s}$



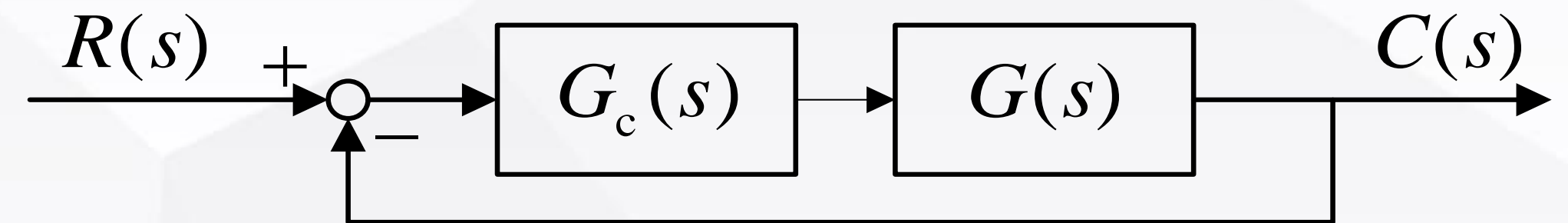


# 反馈校正

## (3) 串联校正

超前校正  $G_c(s) = 0.5 \frac{1+0.1s}{1+0.05s}$

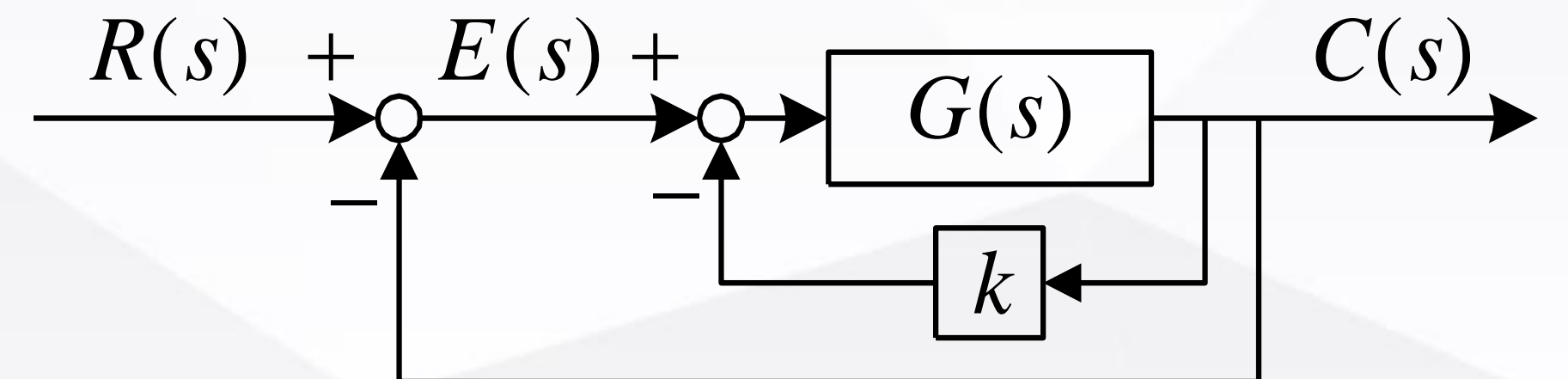
$$G_{R \rightarrow C}(s) = \frac{0.5K}{1+0.5K+0.05s}$$



当  $K = 18$  时，稳态输出误差为 0.9，此时闭环系统时间常数  $T = 0.005 \text{ s}$

## (4) 局部反馈校正

$$G_{R \rightarrow C}(s) = \frac{G(s)}{1+(1+k)G(s)} = \frac{K}{1+K+kK+0.1s}$$



对于同样的  $K = 18$ ，取  $k = 1/18$  时

可使输出稳态值到达 0.9，此时闭环系统时间常数为  $T = 0.005 \text{ s}$

可见，简单的反馈与超前校正达到相同的效果

# 反馈校正

## (5) 反馈滞后校正

$$G_{R \rightarrow C}(s) = \frac{100K(s + a)}{s^2 + (10 + a)s + 10(a + kK)}$$

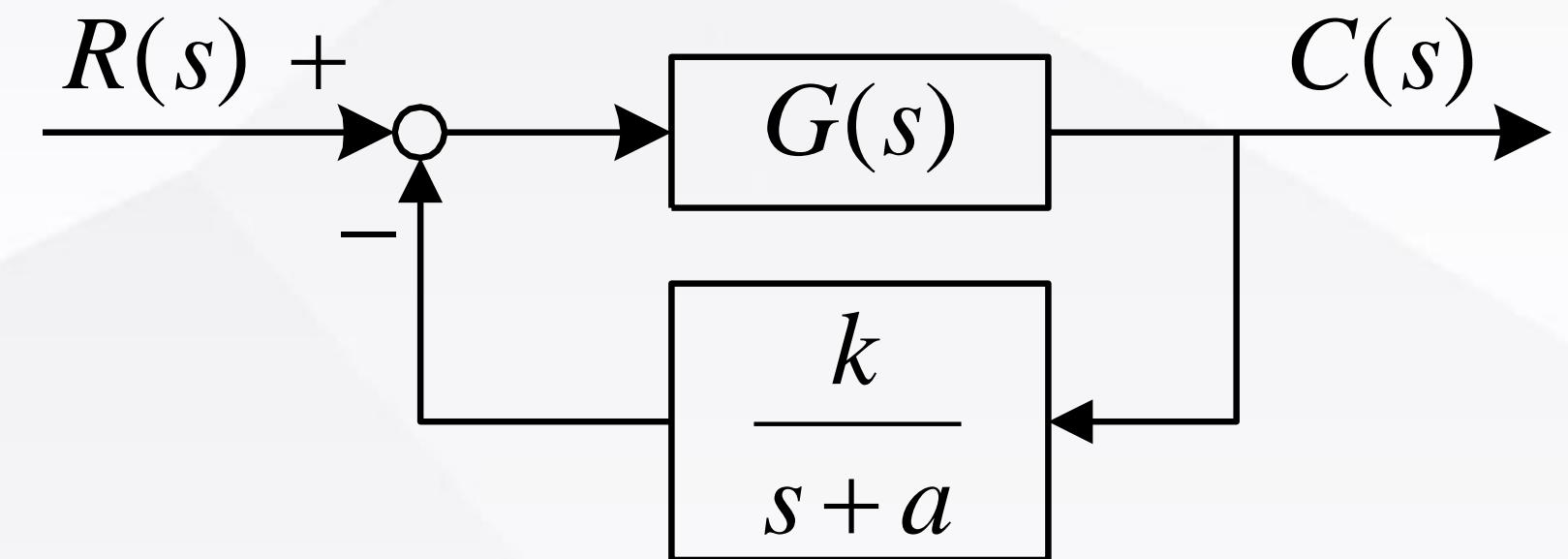
容易计算，当

$$K = 9.23 \quad k = 391.12 \quad a = 390$$

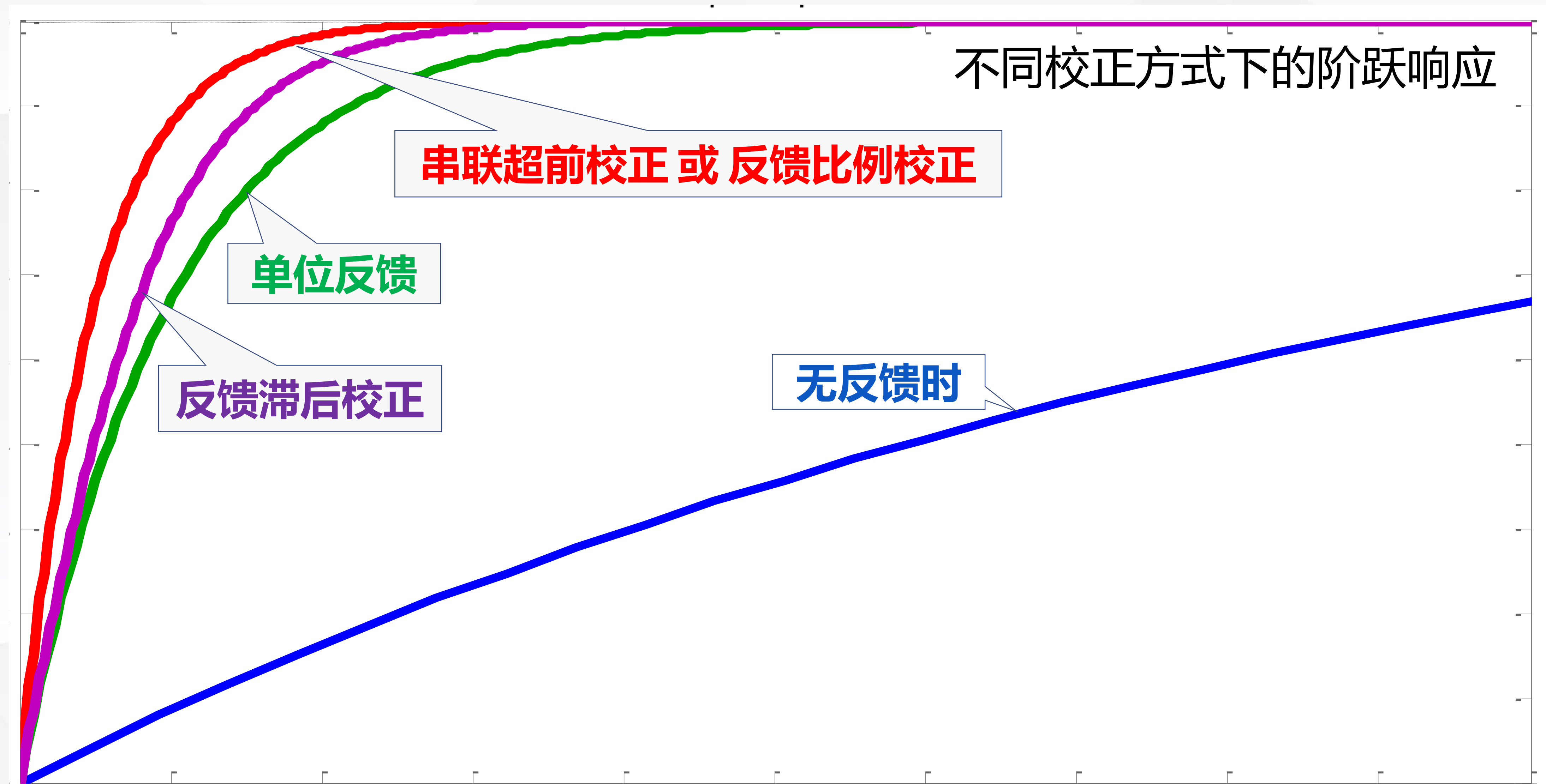
闭环系统输出稳态值为0.9，二阶环节特征时间常数为

$T = 0.005 \text{ s}$ ，阻尼系数  $\zeta = 1$ 。

因此，反馈滞后校正加快了系统的响应速度，效果类似于串联超前校正



# 反馈校正



---

**本章结束**