



## 课程回顾

### § 3.6.1 误差与稳态误差

误差定义： (1) 按输入端定义误差； (2) 按输出端定义误差

稳态误差： (1) 静态误差； (2) 动态误差

- (1) 判定系统的稳定性
- (2) 求误差传递函数
- (3) 用终值定理求稳态误差

(1) 静态误差系数：  $K_p, K_v, K_a$

(2) 计算误差方法

(3) 适用条件

- 1) 系统稳定
- 2) 按输入端定义误差
- 3)  $r(t)$ 作用, 且 $r(t)$ 无其他前馈通道



# 自动控制原理

## (第 12 讲)

### § 3 线性系统的时域分析与校正

§ 3.1 概述

§ 3.2 一阶系统的时间响应及动态性能

§ 3.3 二阶系统的时间响应及动态性能

§ 3.4 高阶系统的阶跃响应及动态性能

§ 3.5 线性系统的稳定性分析

§ 3.6 线性系统的稳态误差

§ 3.7 线性系统时域校正



西北工业大学  
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY



# 自动控制原理

(第 12 讲)

§ 3. 6 线性系统的稳态误差

§ 3. 7 线性系统时域校正



## § 3.6.5

## 动态误差系数法(1)

# 动态误差系数法

用静态误差系数法只能求出误差的稳态值  $e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t)$ ；而稳态误差随时间变化的规律无法获得。

用动态误差系数法可以研究误差中的稳态分量  $e_s(t)$  随时间的变换规律。



## § 3.6.5 动态误差系数法(2)

### (1) 动态误差系数法解决问题的思路

$$\Phi_e(s) = \frac{E(s)}{R(s)} = \Phi_e(0) + \frac{1}{1!} \Phi_e'(0)s + \frac{1}{2!} \Phi_e''(0)s^2 + \cdots + \frac{1}{i!} \Phi_e^{(i)}(0)s^i + \cdots$$

$$\downarrow \quad C_i = \frac{1}{i!} \Phi_e^{(i)}(0) \quad i = 0, 1, 2, \cdots$$

$$= C_0 + C_1s + C_2s^2 + \cdots = \sum_{i=0}^{\infty} C_i s^i$$

$$E(s) = \Phi_e(s) \cdot R(s)$$

$$= C_0 R(s) + C_1 s R(s) + C_2 s^2 R(s) + \cdots + C_i s^i R(s) + \cdots$$

$$e_s(t) = C_0 r(t) + C_1 \dot{r}(t) + C_2 \ddot{r}(t) + \cdots + C_i r^{(i)}(t) + \cdots = \sum_{i=0}^{\infty} C_i r^{(i)}(t)$$



## § 3.6.5 动态误差系数法(3)

(2) 动态误差系数的计算方法 — ①系数比较法 ②长除法

例1 两系统如图示, 要求在4分钟内误差不超过6m, 应选用哪个系统?

已知:  $r(t) = 2t + t^2/4$

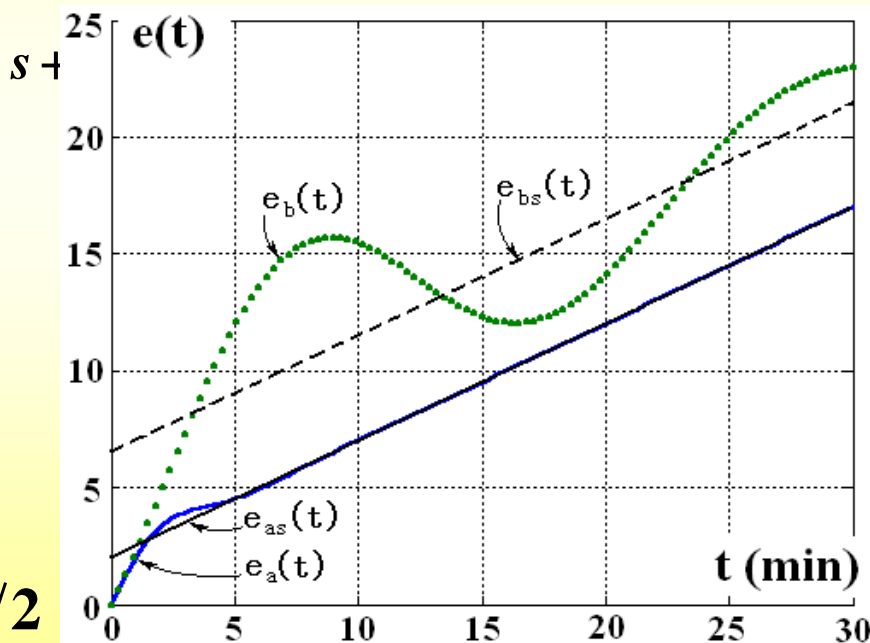
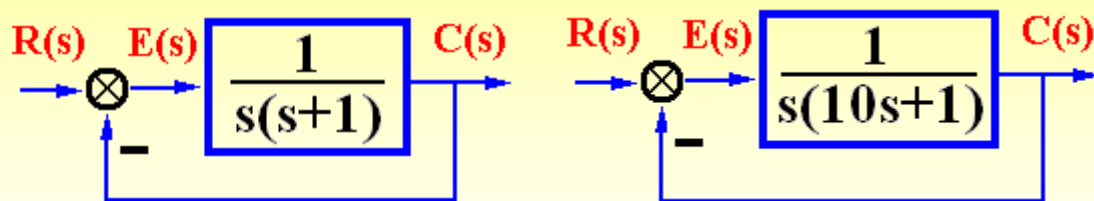
解 ①.  $r'(t) = 2 + t/2$

$r''(t) = 1/2$

$r'''(t) = 0$

$$\begin{aligned}\Phi_{ae}(s) &= \frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{s(s+1)}} \\ &= \frac{s(s+1)}{s^2 + s + 1} \\ &= C_0 + C_1s + C_2s^2 + \dots \\ &= s - s^3 + \dots\end{aligned}$$

$$e_{as}(t) = C_0r + C_1r' + C_2r'' = 2 + t/2$$





## § 3.6.5 动态误差系数法(4)

例1 两系统如图示, 要求在4分钟内系统不超过6m应选用哪个系统?

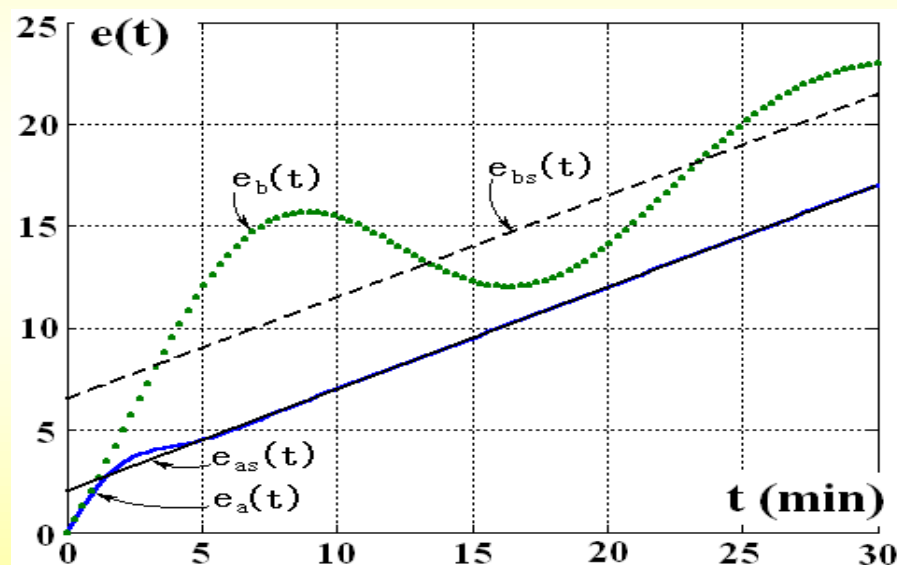
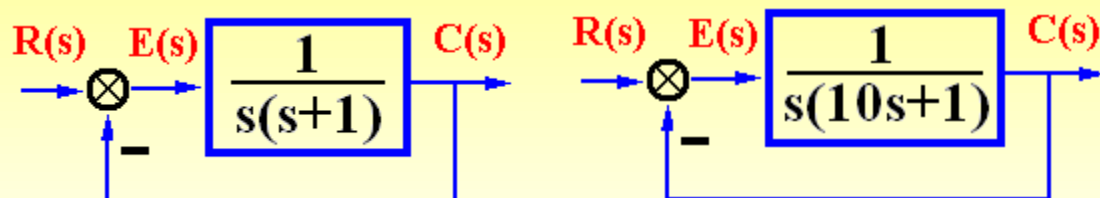
已知:  $r(t) = 2t + t^2/4$

解. ②  $r'(t) = 2 + t/2$

$r''(t) = 1/2$

$r'''(t) = 0$

$$\begin{aligned}\Phi_{be}(s) &= \frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{s(10s+1)}} \\ &= \frac{s(10s+1)}{10s^2 + s + 1} \\ &= s + 9s^2 - 19s^3 + \dots\end{aligned}$$



$$e_{bs}(t) = C_0 r + C_1 r' + C_2 r'' = 0 + r' + 9r'' = 6.5 + t/2$$





## § 3.6.5 动态误差系数法(5)

$$r(t) = 2t + t^2/4$$

说明:  $e_s(t)$  是  $e(t)$  中的稳态分量

例2 以例1中系统(1)为例  $\Phi_{ae}(s) = \frac{s(s+1)}{s^2 + s + 1}$

解.  $E_a(s) = \Phi_{ae}(s) \cdot R(s) = \frac{s(s+1)}{s^2 + s + 1} \left[ \frac{2}{s^2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{s^3} \right]$

$$= \frac{(s+1)(4s+1)}{2s^2(s^2 + s + 1)} = \frac{A_2}{s^2} + \frac{A_1}{s} + \frac{A_3s + A_4}{s^2 + s + 1}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A_2 = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{(s+1)(4s+1)}{2(s^2 + s + 1)} = \frac{1}{2} \\ A_1 = \frac{1}{1!} \lim_{s \rightarrow 0} \frac{d}{ds} \frac{(s+1)(4s+1)}{2(s^2 + s + 1)} = 2 \\ \text{比较系数得} \begin{cases} A_3 = -2 \\ A_4 = -0.5 \end{cases} \end{array} \right.$$

$$E_a(s) = \frac{0.5}{s^2} + \frac{2}{s} - \frac{2(s+0.5)}{(s+0.5)^2 + \sqrt{0.75}^2} + \frac{0.5}{\sqrt{0.75}} \frac{\sqrt{0.75}}{(s+0.5)^2 + \sqrt{0.75}^2}$$

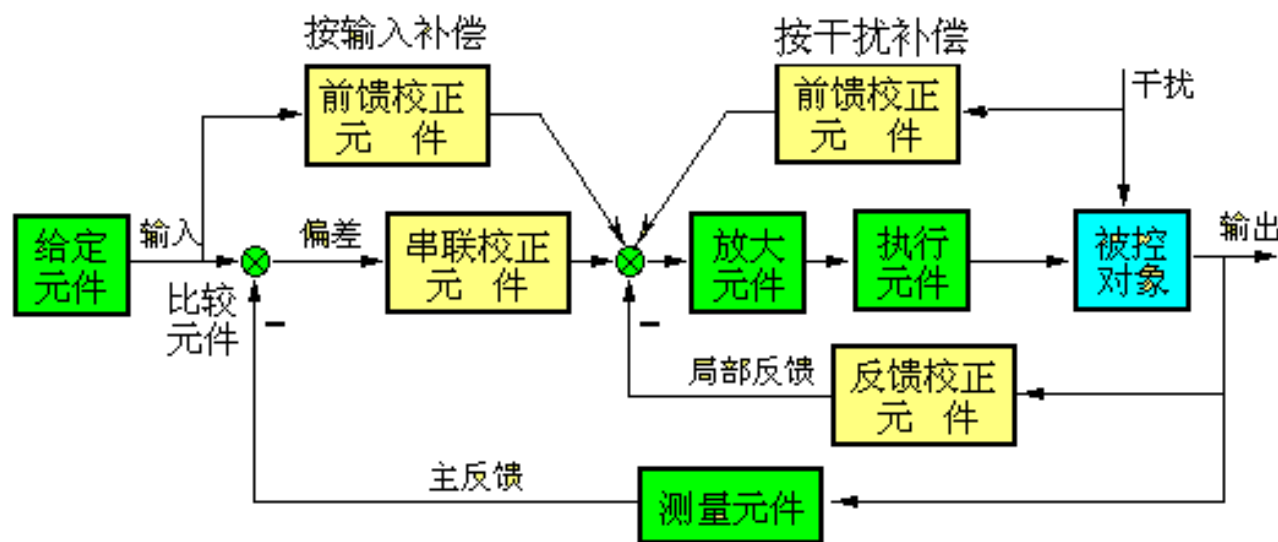
$$e_a(t) = \underbrace{0.5t + 2}_{\text{稳态分量}} - \underbrace{2e^{-0.5t} \cos \sqrt{0.75}t + \frac{0.5}{\sqrt{0.75}} e^{-0.5t} \sin \sqrt{0.75}t}_{\text{瞬态分量}}$$





## § 3.7 线性系统时域校正 (1)

**校正：**采用适当方式，在系统中加入一些结构和参数可调整的装置（校正装置），用以改善系统性能，使系统满足指标要求。



**校正方式：** 串联校正， 反馈校正， 复合校正



## § 3.7 线性系统时域校正 (2)

### § 3.7.1 反馈校正

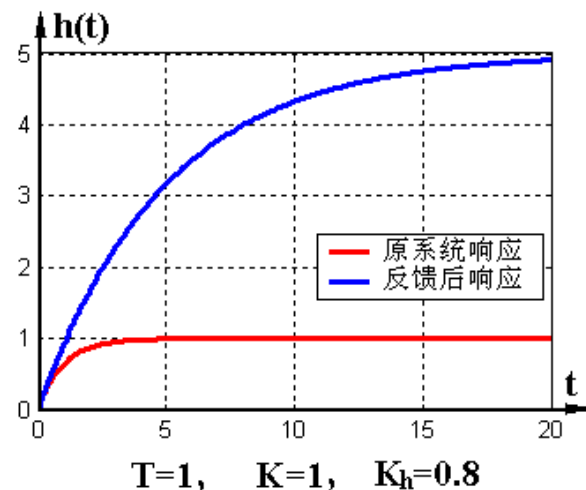
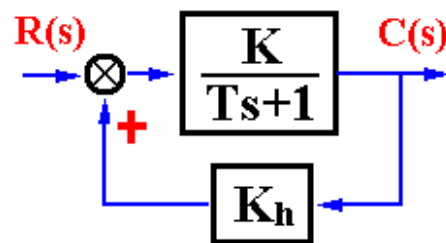
反馈的作用

(3) 局部正反馈可提高环节增益

$$\Phi(s) = \frac{\frac{K}{Ts+1}}{1 - \frac{KK_h}{Ts+1}} = \frac{K}{Ts+1 - KK_h}$$

$$= \frac{\frac{K}{1 - KK_h}}{\frac{T}{1 - KK_h}s + 1} = \frac{K'}{T's + 1}$$

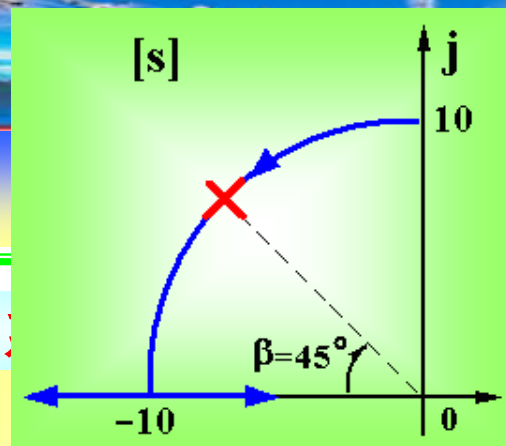
$$K' = \frac{K}{1 - KK_h} > K \quad T' = \frac{T}{1 - KK_h} > T$$





## § 3.7.1

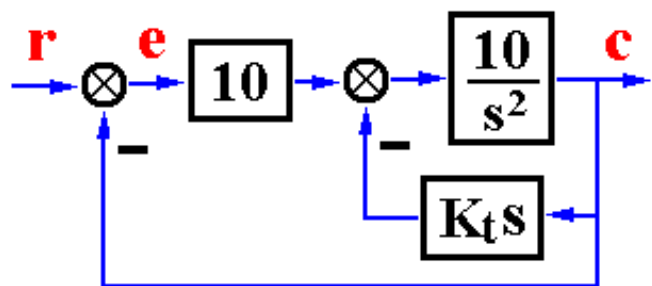
## 反馈校正 (1)



例2 系统结构图如图所示。

解. (1)  $K_t = 0$  时

(2)  $K_t > 0$  时



(1)  $K_t = 0$  时系统的性能?

(2)  $K_t \uparrow$  时,  $\sigma\%$ ,  $t_s$  变化趋势?

$\xi = 0.707$  时,  $\sigma\%$ ,  $t_s = ?$

(3)  $K_t \uparrow$ ,  $r(t) = t$ ,  $e_{ss}$  变化趋势?

$\xi = 0.707$  时,  $e_{ss} = ?$

$$K_t < 2: K_t \uparrow \Rightarrow \xi \uparrow \Rightarrow \begin{cases} \sigma\% \downarrow \\ t_s = 3.5/\xi\omega_n \downarrow \end{cases}$$

$$K_t \geq 2: K_t \uparrow \Rightarrow \begin{cases} \sigma\% = 0 \\ t_s \uparrow \end{cases}$$

$$\begin{cases} \xi = 0.707 \\ K_t = 1.414 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sigma\% = 5\% \\ t_s = 0.495 \end{cases}$$

$$(3) \quad G(s) = \frac{100}{s(s + 10K_t)} \quad \begin{cases} K = \frac{10}{K_t} \\ \nu = 1 \end{cases}$$

$$K = 10 / K_t$$

$$K_t \uparrow \Rightarrow e_{ss} = \frac{1}{K} = \frac{K_t}{10} \uparrow$$

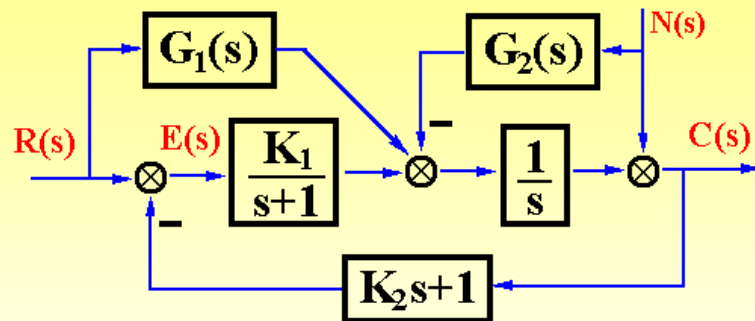


## § 3.7.2

## 复合校正

例4 系统结构图如图所示

- (1) 确定 $K_1, K_2$ , 配置极点于 $\lambda_{1,2} = -5 \pm j5$ ;
- (2) 设计 $G_1(s)$ , 使 $r(t)=t$ 作用下 $e_{ssr}=0$ ;
- (3) 设计 $G_2(s)$ , 使 $n(t)$ 作用下 $e_n(t) \equiv 0$ 。



解. (1) 
$$\begin{cases} K_1 = 50 \\ K_2 = 0.18 \end{cases}$$

(2) 
$$G_1(s) = \frac{s}{K_2 s + 1}$$

(3) 
$$\Phi_{en}(s) = \frac{E(s)}{N(s)} = \frac{-(K_2 s + 1) + \frac{K_2 s + 1}{s} G_2(s)}{1 + \frac{K_1 (K_2 s + 1)}{s(s+1)}} = \frac{-(K_2 s + 1)(s+1)[s - G_2(s)]}{s(s+1) + K_1 (K_2 s + 1)} \equiv 0$$

$$G_2(s) = s$$



西北工业大学  
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY



# 线性系统的时域分析与校正

## 第三章小结



## 时域分析法小结 (1)

### 自动控制原理1~3章测验题

一. 单项选择题（ 在每小题的四个备选答案中，选出一个正确的答案，将其题号写入题干的○内，每小题2分，共32分）

1. 适合于应用传递函数描述的系统是



- |             |             |
|-------------|-------------|
| A. 非线性定常系统； | B. 线性时变系统；  |
| C. 线性定常系统；  | D. 非线性时变系统。 |



## 时域分析法小结 (2)

2. 某0型单位反馈系统的开环增益为K, 则在

(B)

$r(t) = \frac{1}{2}t^2$  输入下, 系统的稳态误差为

A. 0;      B.  $\infty$ ;      C.  $1/K$ ;      D.  $A/K^*$ 。

3. 动态系统 0 初始条件是指  $t < 0$  时系统的

(B)

A. 输入为 0;

B. 输入、输出以及它们的各阶导数为 0;

C. 输入、输出为 0;

D. 输出及其各阶导数为 0。





## 时域分析法小结 (3)

4. 若二阶系统处于无阻尼状态，则系统的阻尼比  $\xi$  应为

D

A.  $0 < \xi < 1$ ; B.  $\xi = 1$ ; C.  $\xi > 1$ ; D.  $\xi = 0$ 。

5. 在典型二阶系统传递函数  $\Phi(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$  中，再串入一个闭环零点，则

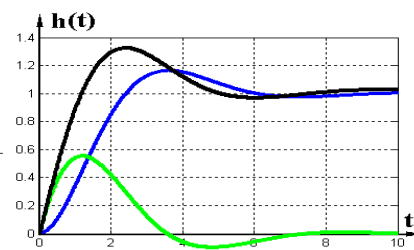
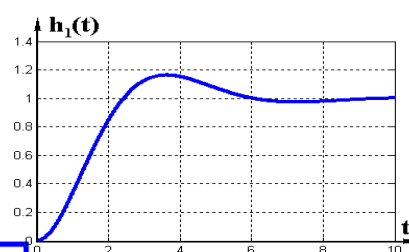
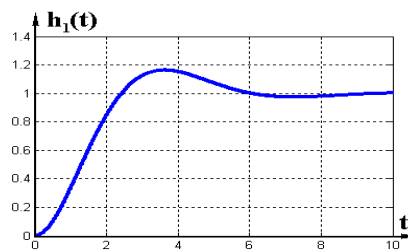
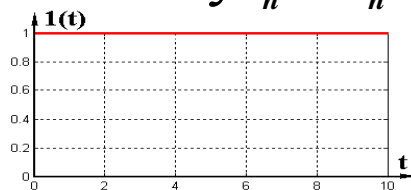
A

- A. 超调量增大;
- B. 对系统动态性能没有影响;
- C. 峰值时间增大;
- D. 调节时间增大。



## 附加闭环零、极点对系统动态性能的影响

$$\Phi(s) = \frac{\omega_n^2(\tau s + 1)}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$



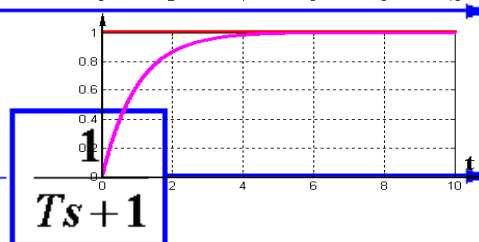
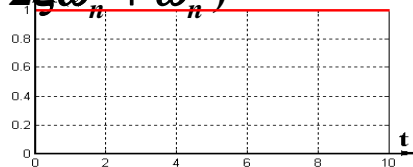
$$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

1

$\tau s$

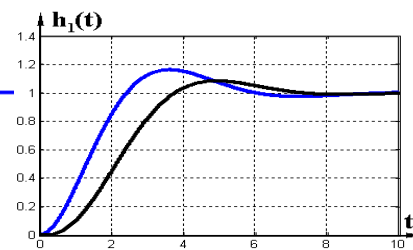


$$\Phi(s) = \frac{\omega_n^2}{(Ts + 1)(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)}$$



$$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

$$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$





## 时域分析法小结 (4)

6. 讨论系统的动态性能时，通常选用的典型输入信号为

A

- A. 单位阶跃函数 ; B. 单位速度函数 ;  
C. 单位脉冲函数 ; D. 单位加速度函数。

7. 某 I 型单位反馈系统，其开环增益为  $K$ ，

D

则在  $r(t) = \frac{1}{2}t^2$  输入下，系统的稳态误差

- A. 0 ; B.  $\infty$  ; C.  $\frac{2}{K}$  ; D.  $\frac{1}{2K}$  。



## 时域分析法小结 (5)

8. 典型欠阻尼二阶系统的超调量  $\sigma\% > 5\%$ ，  
则其阻尼比的范围为

**D**

A.  $\xi > 1$ ;

B.  $0 < \xi < 1$  ;

C.  $0.707 < \xi < 1$ ;

D.  $0 < \xi < 0.707$ 。

9. 二阶系统的闭环增益加大

**D**

A. 快速性越好;

B. 超调量越大;

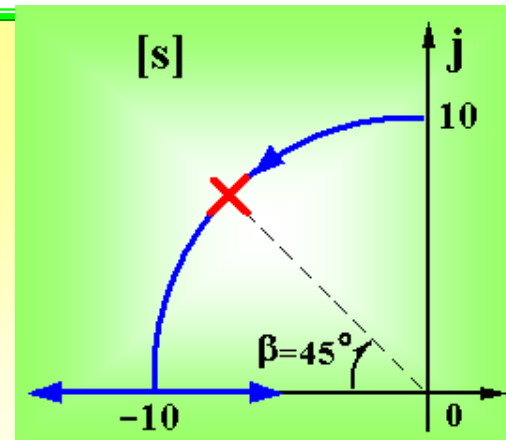
C. 峰值时间提前;

D. 对动态性能无影响。



## 时域分析法小结 (6)

10. 欠阻尼二阶系统的  $\xi$ ,  $\omega_n$ , 都与  
A.  $\sigma\%$  有关; B.  $\sigma\%$  无关;  
C.  $t_P$  有关 D.  $t_P$  无关。



11. 典型欠阻尼二阶系统若  $\omega_n$  不变,  $\xi$  变化时



- A. 当  $\xi > 0.707$  时,  $\xi \uparrow \rightarrow t_s \downarrow$ ;  
B. 当  $\xi > 0.707$  时,  $\xi \uparrow \rightarrow t_s \uparrow$ ;  
C. 当  $\xi < 0.707$  时,  $\xi \uparrow \rightarrow t_s \uparrow$ ;  
D. 当  $\xi < 0.707$  时,  $\xi \uparrow \rightarrow t_s$  不变。



## 时域分析法小结 (7)

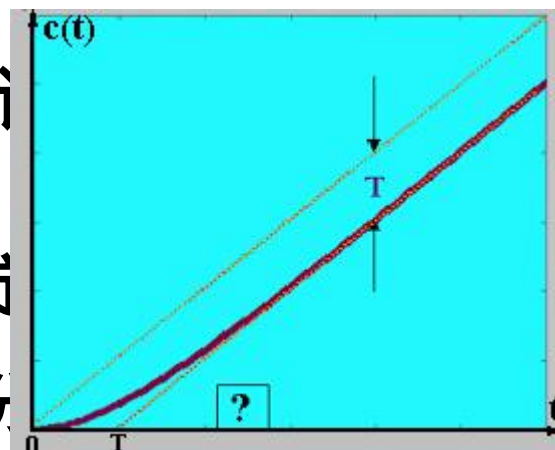
12. 稳态速度误差的正确含义为 ( $A$ 为常值) :



- A.  $r(t) = A \cdot 1(t)$  时, 输出速度与输入速度之间的稳态误差;
- B.  $r(t) = A \cdot 1(t)$  时, 输出位置与输入位置之间的稳态误差;
- C.  $r(t) = A \cdot t$  时, 输出位置与输入位置之间的稳态误差;
- D.  $r(t) = A \cdot t$  时, 输出速度与输入速度之间的稳态误差。

13. 某系统单位斜坡输入时  $e_{ss} = \infty$  , 则

- A. 是0型系统;
- B. 闭环不稳定
- C. 闭环传递函数中至少有一个纯积分
- D. 开环一定不稳定。





## 时域分析法小结 (8)

14. I 型单位反馈系统的闭环增益为

C

- A. 与开环增益有关;
- B. 与的形式有关;
- C. 1;
- D. 与各环节的时间常数有关。

15. 闭环零点影响系统的

D

- A. 稳定性;
- B. 稳态误差;
- C. 调节时间;
- D. 超调量。





## 时域分析法小结 (9)

16. 单位反馈系统的闭环传递函数为

$$\Phi(s) = \frac{2}{3s^2 + 5s + 4}, \text{ 则其闭环增益 } K_{\Phi},$$

阻尼比  $\xi$  和无阻尼自然频率  $\omega_n$  分别为:

A.  $\frac{1}{2}, \frac{5\sqrt{2}}{12}, \sqrt{2}$

B.  $\frac{1}{2}, \frac{5\sqrt{3}}{12}, \frac{2}{\sqrt{3}}$

C.

; D.

。

D



## 时域分析法小结 (10)

二. 多项选择题(在每小题的五个备选答案中, 选出二至五个正确的答案, 将其号码写入题干的○○○○○内, 正确答案没有选全、多选或有选错的, 该题无分, 每小题 2分, 共 14分)

ⓑⓒⓔ○○○

1. 减小系统超调量的有效措施有

- A. 增大闭环增益;
- B. 引入输出的速度反馈;
- C. 减小开环增益;
- D. 增大开环增益;
- E. 引入误差的比例-微分进行控制。



## 时域分析法小结 (11)

Ⓐ Ⓓ Ⓔ ○ ○

2. 某系统的开环传递函数为  $G(s) = \frac{K}{s(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$ ,  
则称该系统是

- A. I 型系统;
- B. II 型系统;
- C. 二阶系统;
- D. 三阶系统;
- E. 一阶无差系统。



## 时域分析法小结 (12)

Ⓐ Ⓑ ○ ○ ○ ○

### 3. 提高输入作用下控制系统精度的主要措施有

- A. 增大开环增益;
- B. 加比例-微分控制;
- C. 增大系统的型别;
- D. 加测速反馈;
- E. 对干扰进行补偿。

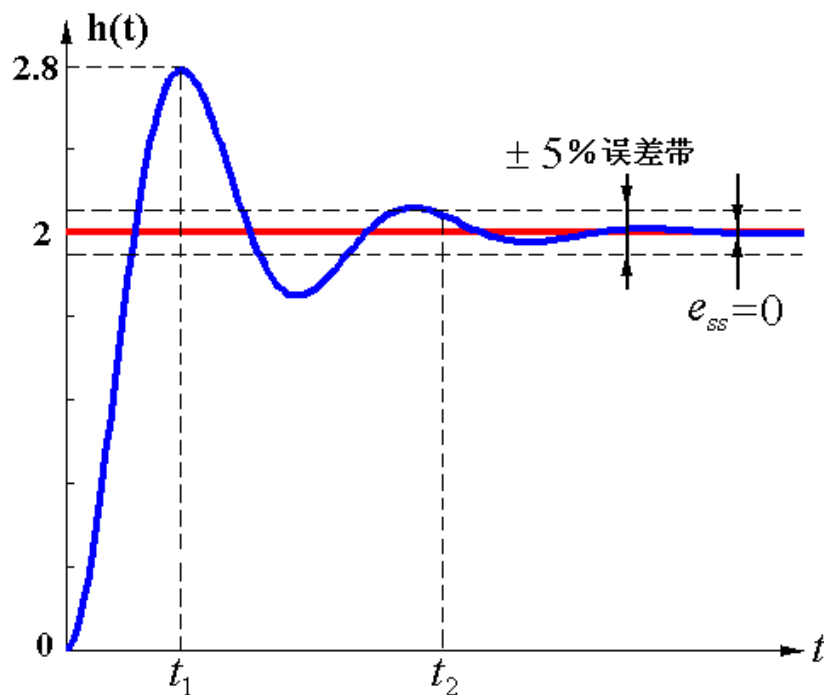


## 时域分析法小结 (13)

Ⓐ Ⓒ Ⓓ ○ ○

4. 典型二阶系统单位阶跃响应如图所示，  
可以确定该系统

- A. 是的欠阻尼系统；
- B. 开环增益  $K = 2$ ；
- C. 超调量  $\sigma\% = 40\%$ ；
- D. 调节时间  $t_s = t_2$ ；
- E. 是0型系统。





## 时域分析法小结 (14)

Ⓐ Ⓓ Ⓔ ○ ○

### 5. 若系统

- A. 开环稳定，闭环不一定稳定；
- B. 开环稳定，闭环一定不稳定；
- C. 开环不稳定，闭环一定不稳定；
- D. 开环不稳定，闭环不一定不稳定；
- E. 开环临界稳定，闭环不一定稳定。



## 时域分析法小结 (15)

Ⓐ Ⓑ ○ ○ ○

6. 为能同时减少输入和干扰引起的稳态误差，  
采用的有效措施是
- A. 增大干扰作用点前的前向通道增益；
  - B. 增加干扰作用点前的前向通道的积分环节的个数；
  - C. 增大干扰作用点到输出的前向通道增益；
  - D. 增大干扰作用点至输出的前向通道的积分环节个数；
  - E. 在反馈通道中增加积分环节。





## 时域分析法小结 (16)

7. 由以下条件，可以确定闭环  
系统的动态性能 (  $\sigma\%$ ,  $t_s$  )

☒ ☒ ☐ ☐ ☐

A. 闭环极点;

$$G(s) = \frac{M_G}{N_G}, \quad H(s) = \frac{M_H}{N_H}$$

B. 开环零极点;

$$G(s)H(s) = \frac{M_G M_H}{N_G N_H}$$

C. 闭环零极点;

D. 开环零极点  
及开环增益;

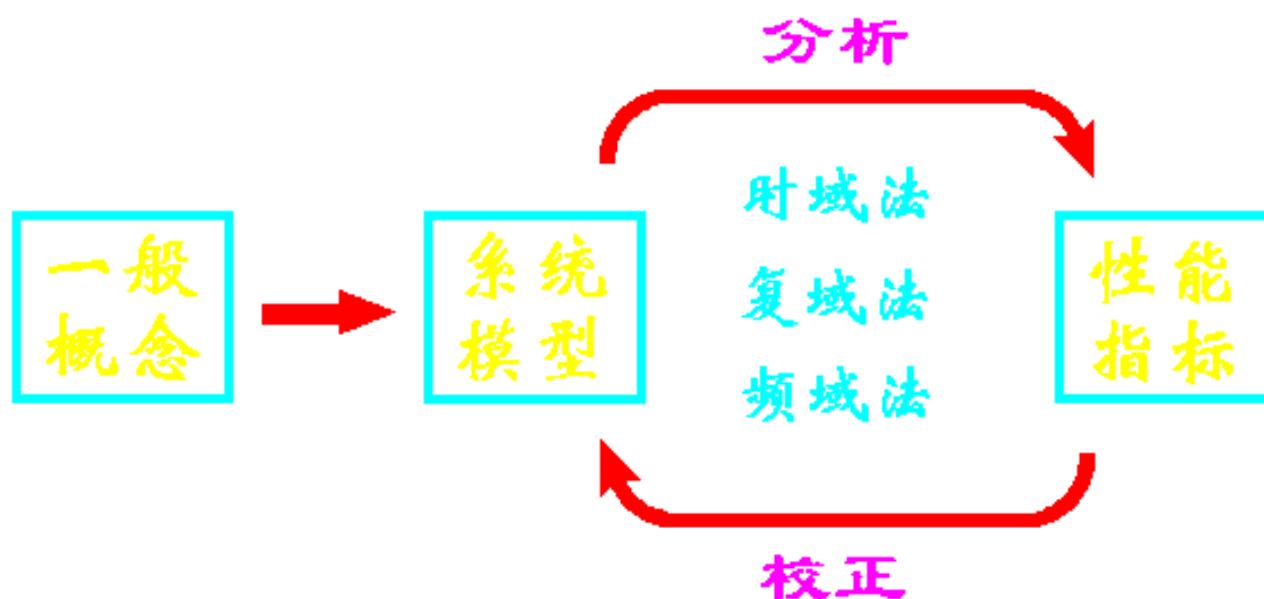
$$\Phi(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

E. 闭环零极点  
及闭环增益。

$$\begin{aligned} &= \frac{\frac{M_G}{N_G}}{1 + \frac{M_G M_H}{N_G N_H}} = \frac{M_G N_H}{N_G N_H + M_G M_H} \end{aligned}$$



# 自动控制原理课程的任务与体系结构



## 课程的体系结构