
4.3 转速、电流反馈控制直流调速系统的设计

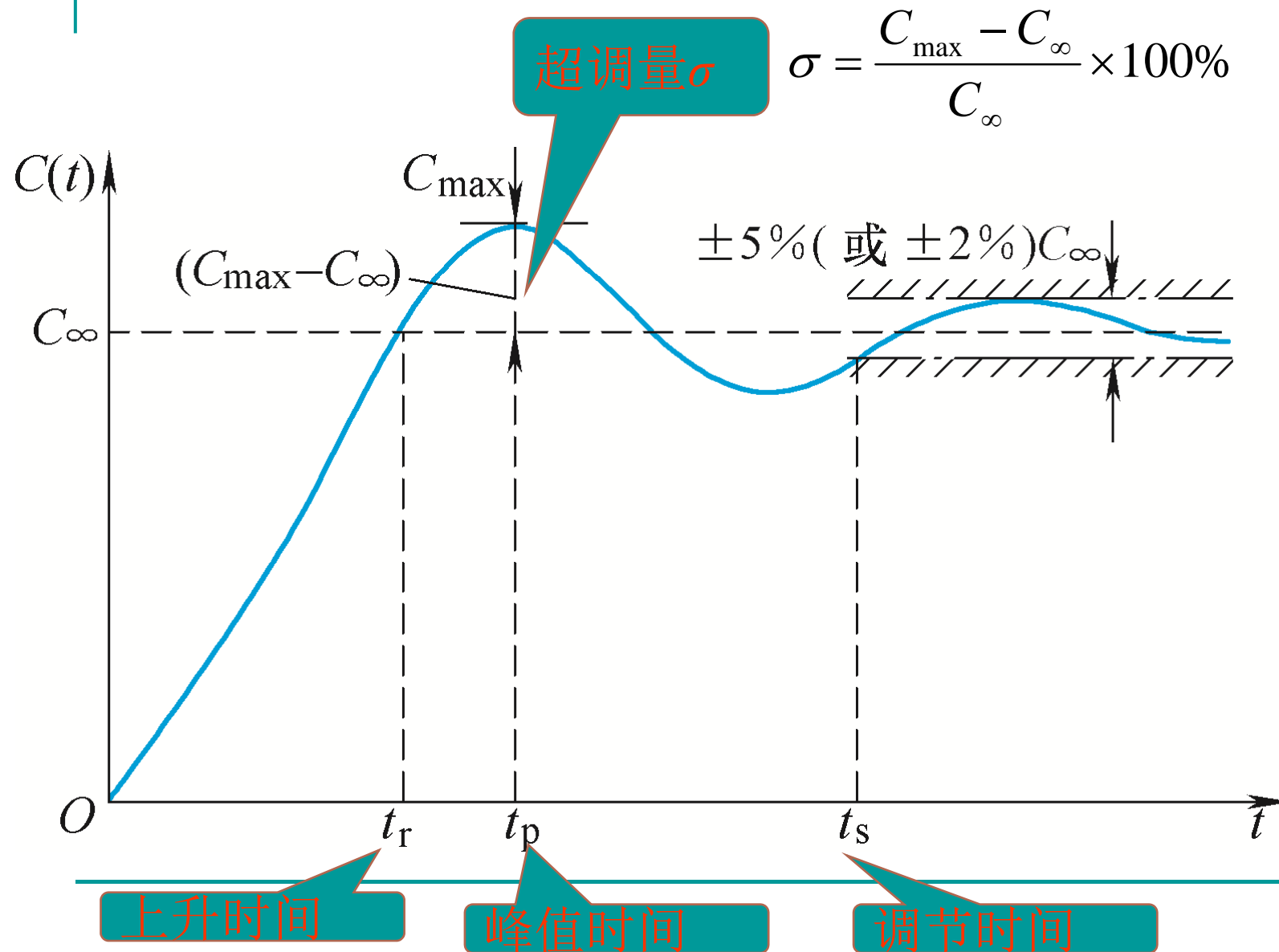
4.3.1 控制系统的动态性能指标

- 在控制系统中设置调节器是为了改善系统的静、动态性能。
 - 控制系统的动态性能指标包括对给定输入信号的跟随性能指标和对扰动输入信号的抗扰性能指标。
-

1. 跟随性能指标

- 以输出量的初始值为零，给定信号阶跃变化下的过渡过程作为典型的跟随过程，
 - 此跟随过程的输出量动态响应称作阶跃响应。
 - 常用的阶跃响应跟随性能指标有上升时间、超调量和调节时间。
-

图4-9 典型的阶跃响应过程和跟随性能指标



2. 抗扰性能指标

- 在调速系统中主要扰动来源于负载扰动和电网电压波动。
 - 当调速系统在稳定运行中，突加一个使输出量降低（或上升）的扰动量 F 之后，输出量由降低（或上升）到恢复到稳态值的过渡过程就是一个抗扰过程。
 - 常用的抗扰性能指标为动态降落和恢复时间。
-

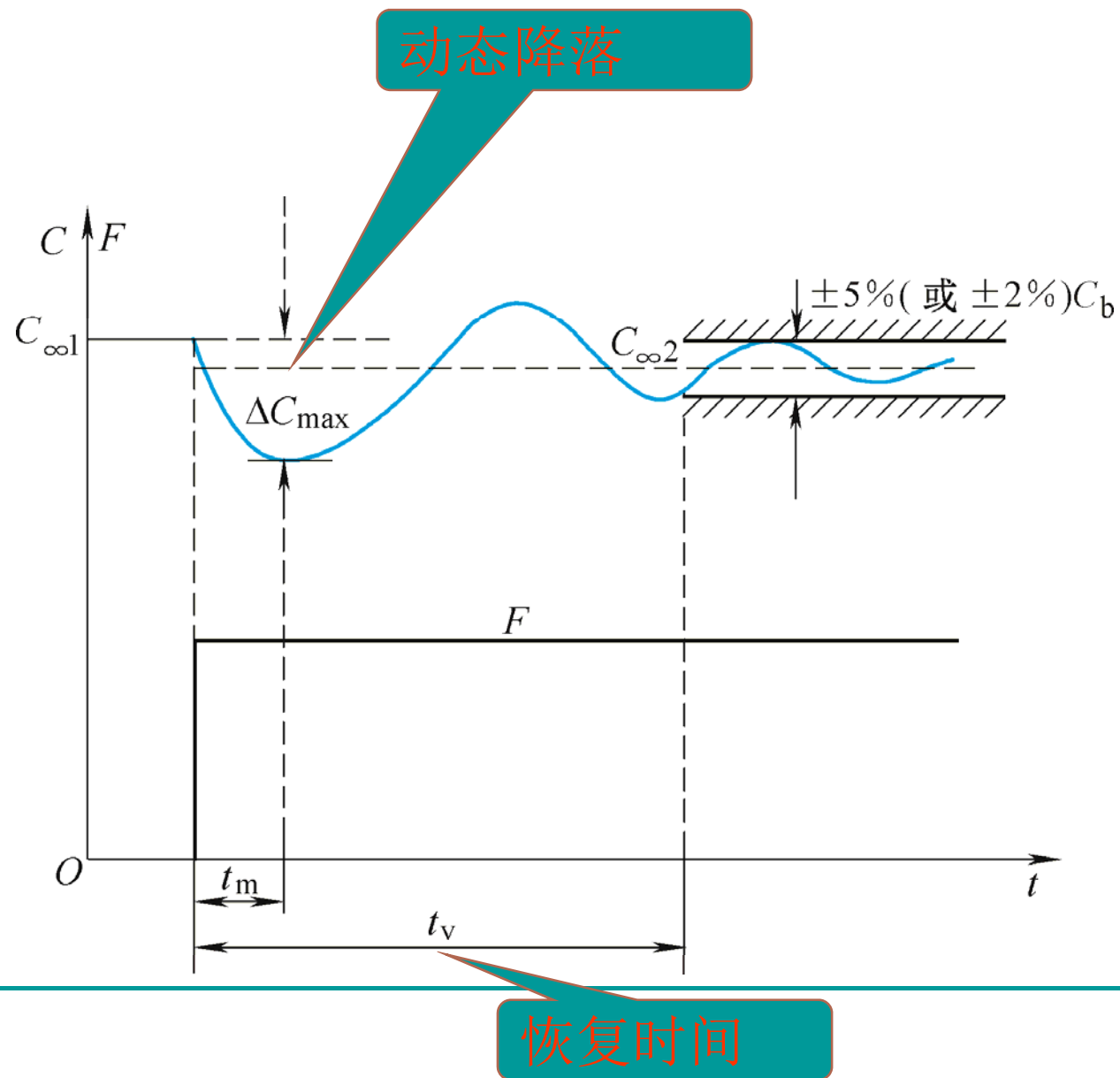


图4-10 突加扰动的动态过程和抗扰性能指标

3. 频域性能指标和伯德图

- (1) 中频段以 -20dB/dec 的斜率穿越零分贝线，而且这一斜率占有足够的频带宽度，则系统的稳定性好。
- (2) 截止频率（或称剪切频率）越高，则系统的快速性越好。
- (3) 低频段的斜率陡、增益高，表示系统的稳态精度好（即静差率小、调速范围宽）。
- (4) 高频段衰减得越快，即高频特性负分贝值越低，说明系统抗高频噪声干扰的能力越强。

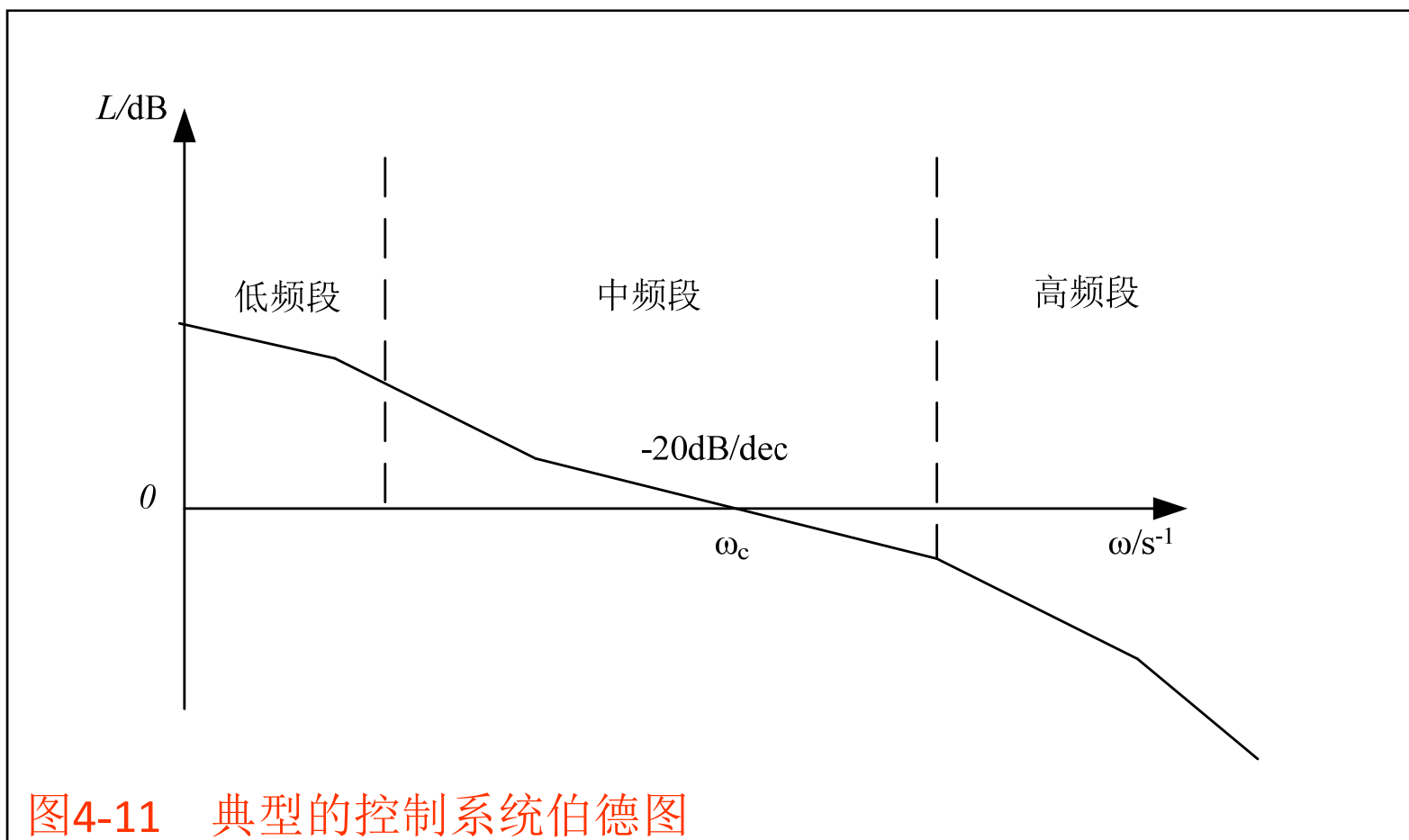


图4-11 典型的控制系统伯德图

4.3.2 调节器的工程设计方法

■ 工程设计方法:

在设计时，把实际系统校正或简化成典型系统，可以利用现成的公式和图表来进行参数计算，设计过程简便得多。

■ 调节器工程设计方法所遵循的原则是:

- (1) 概念清楚、易懂;
 - (2) 计算公式简明、好记;
 - (3) 不仅给出参数计算的公式，而且指明参数调整的方向;
 - (4) 能考虑饱和非线性控制的情况，同样给出简单的计算公式;
 - (5) 适用于各种可以简化成典型系统的反馈控制系统。
-

- 工程设计方法的基本思路

- 选择调节器的结构

- 设计调节器的参数

典型系统的选择

- 控制系统的开环传递函数都可以表示成

$$W(s) = \frac{K \prod_{i=1}^m (\tau_i s + 1)}{s^r \prod_{j=1}^n (T_j s + 1)} \quad (4-9)$$

分母中的 s^r 项表示该系统在 $s=0$ 处有 r 重极点，或者说，系统含有 r 个积分环节，称作 r 型系统。

- 为了使系统对阶跃给定无稳态误差，不能使用0型系统（ $r=0$ ），至少是I型系统（ $r=1$ ）；当给定是斜坡输入时，则要求是II型系统（ $r=2$ ）才能实现稳态无差。
- 选择调节器的结构，使系统能满足所需的稳态精度。由于III型（ $r=3$ ）和III型以上的系统很难稳定，而0型系统的稳态精度低。因此常把I型和II型系统作为系统设计的目标。

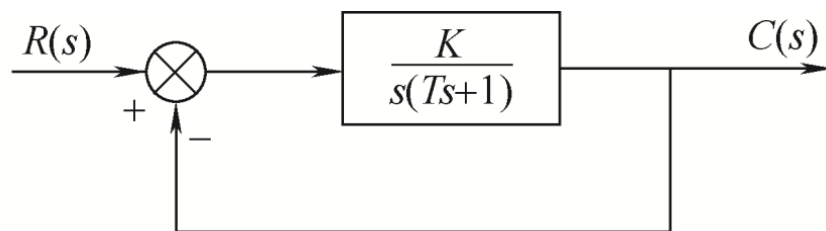
典型 I 型系统

- 作为典型的I型系统，其开环传递函数选择为

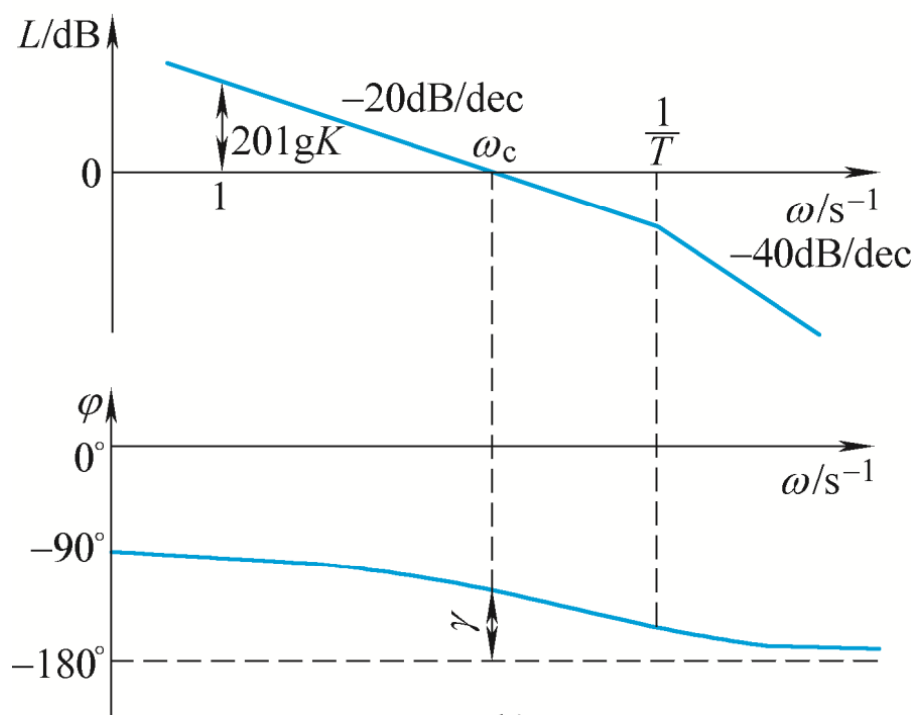
$$W(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)} \quad (4-10)$$

式中， T ——系统的惯性时间常数； K ——系统的开环增益。

- 对数幅频特性的中频段以-20dB/dec的斜率穿越零分贝线，只要参数的选择能保证足够的中频带宽，系统就一定是稳定的。
- 只包含开环增益 K 和时间常数 T 两个参数，时间常数 T 往往是控制对象本身固有的，**唯一可变的只有开环增益 K** 。设计时，需要按照**性能指标**选择参数 K 的大小。



a)



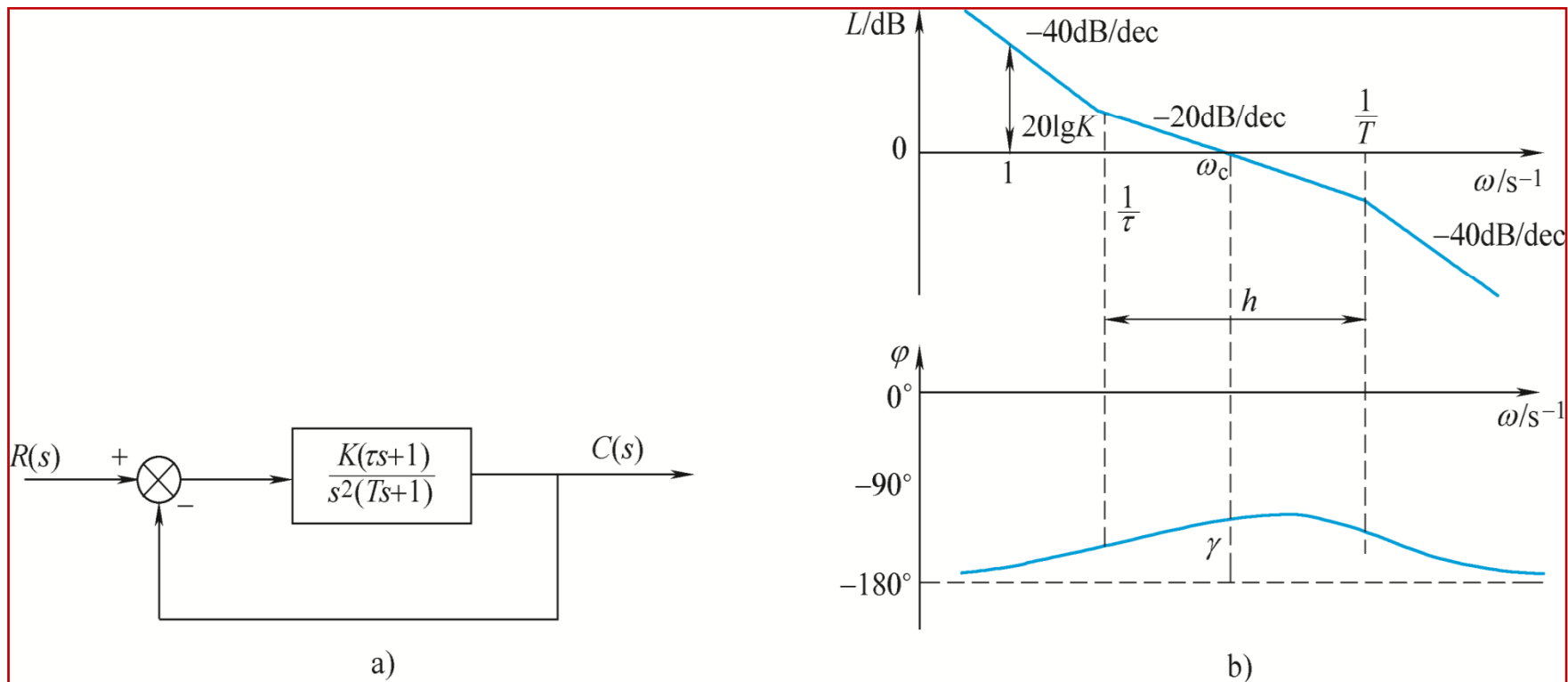
b)

图4-12 典型 I 型系统
(a)闭环系统结构图
(b)开环对数频率特性

典型 II 型系统

- 典型 II 型系统的开环传递函数表示为

$$W(s) = \frac{K(\tau s + 1)}{s^2(Ts + 1)} \quad (4-22)$$



1. 典型 I 型系统

- 典型 I 型系统的对数幅频特性的幅值为
得到

$$20\lg K = 20(\lg \omega_c - \lg 1) = 20\lg \omega_c$$

$$K = \omega_c \quad \left(\text{当 } \omega_c < \frac{1}{T} \text{ 时} \right) \quad (4-11)$$

- 相角裕度为

$$\gamma = 180^\circ - 90^\circ - \arctg \omega_c T = 90^\circ - \arctg \omega_c T$$

- K 值越大，截止频率 ω_c 也越大，系统响应越快，相角稳定裕度 γ 越小，快速性与稳定性之间存在矛盾。
- 在选择参数 K 时，须在快速性与稳定性之间取折衷。

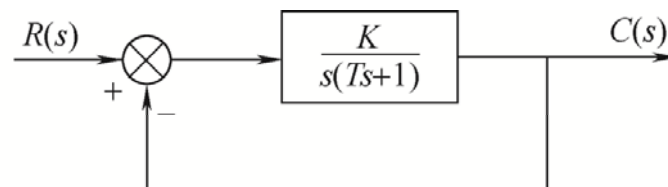
(1) 动态跟随性能指标

- 典型 I 型系统的闭环传递函数为

$$W_{cl}(s) = \frac{W(s)}{1+W(s)} = \frac{\frac{K}{s(Ts+1)}}{1+\frac{K}{s(Ts+1)}} = \frac{\frac{K}{T}}{s^2 + \frac{1}{T}s + \frac{K}{T}} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4-11)$$

式中, $\omega_n = \sqrt{\frac{K}{T}}$ ——自然振荡角频率; $\xi = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{1}{KT}}$ ——阻尼比。

- $\xi < 1$, 欠阻尼的振荡特性,
- $\xi > 1$, 过阻尼的单调特性;
- $\xi = 1$, 临界阻尼。
- 过阻尼动态响应较慢, 一般把系统设计成欠阻尼, 即 $0 < \xi < 1$ 。



(2) 动态跟随性能指标

- 超调量 $\sigma = e^{-(\xi\pi/\sqrt{1-\xi^2})} \times 100\%$ (4-13)

- 上升时间 $t_r = \frac{2\xi T}{\sqrt{1-\xi^2}} (\pi - \arccos \xi)$ (4-14)

- 峰值时间 $t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}}$ (4-15)

- 当调节时间在 $\xi < 0.9$ 、误差带为 $\pm 5\%$ 的条件下可近似计算得 $t_s \approx \frac{3}{\xi\omega_n} = 6T$ (4-16)

- 截止频率（按准确关系计算） $\omega_c = \omega_n [\sqrt{4\xi^4 + 1} - 2\xi^2]^{\frac{1}{2}}$ (4-17)

- 相角稳定裕度 $\gamma = \arctg \frac{2\xi}{[\sqrt{4\xi^4 + 1} - 2\xi^2]^{\frac{1}{2}}}$ (4-18)

表4-1 典型 I 型系统动态跟随性能指标和频域指标与参数的关系

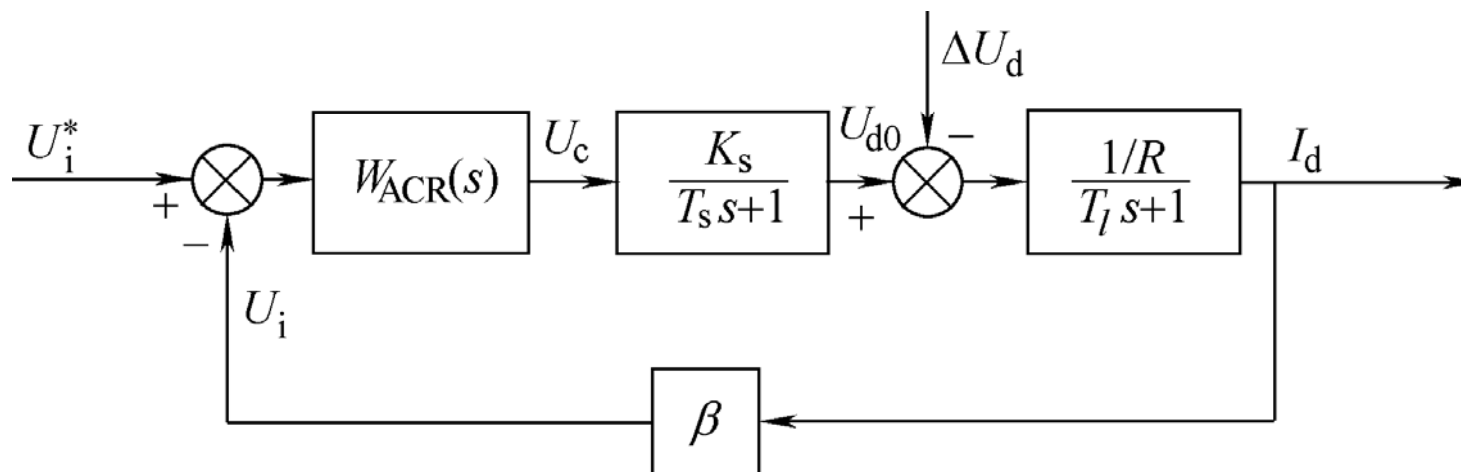
参数关系 KT	0.25	0.39	0.5	0.69	1.0
阻尼比 ζ	1.0	0.8	0.707	0.6	0.5
超调量 σ	0 %	1.5%	4.3 %	9.5 %	16.3 %
上升时间 t_r	∞	$6.6T$	$4.7T$	$3.3T$	$2.4T$
峰值时间 t_p	∞	$8.3T$	$6.2T$	$4.7T$	$3.2T$
相角稳定裕度 γ	76.3°	69.9°	65.5°	59.2°	51.8°
截止频率 ω_c	$0.243/T$	$0.367/T$	$0.455/T$	$0.596/T$	$0.786/T$

（2）动态抗扰性能指标

- 影响到参数 K 的选择的第二个因素是它和抗扰性能指标之间的关系，
 - 典型 I 型系统已经规定了系统的结构，分析它的抗扰性能指标的关键因素是扰动作用点，
 - 某种定量的抗扰性能指标只适用于一种特定的扰动作用点。
-

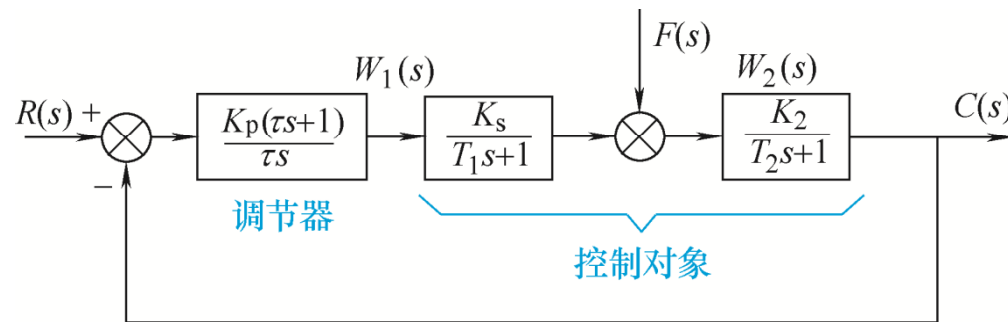
(2) 动态抗扰性能指标

图4-13 电流环的在电压扰动作用下的动态结构图

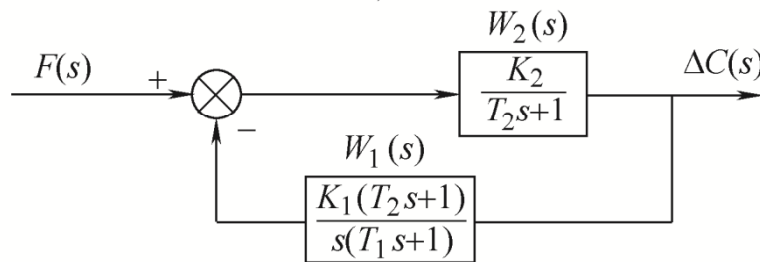


- 电压扰动作用点前后各有一个一阶惯性环节，
- $W_{ACR}(s)$ 采用PI调节器

图4-14 电流环校正成一类典型 I 型系统在一种扰动作用下的动态结构图
(a)一种扰动作用下的结构 (b)等效结构图



a)



b)

- 在只讨论抗扰性能时，令输入变量 $R=0$ ，
- 将输出量写成 ΔC

$$T_1 = T_s \quad T_2 = T_l$$

$$\tau = T_2$$

在阻尼系数一定时，典 I 系统的上升时间取决于系统的惯性时间常数 T ，
对消掉大惯性而留下小惯性环节，就可以提高系统的快速性。

- 在阶跃扰动下, $F(s) = \frac{F}{s}$, 得到

$$\Delta C(s) = \frac{F}{s} \frac{W_2(s)}{1 + W_1(s)W_2(s)} = \frac{\frac{FK_2}{T_2s+1}}{s + \frac{K_1K_2}{T_2s+1}} = \frac{FK_2(Ts+1)}{(T_2s+1)(Ts^2+s+K)}$$

- 在选定 $KT=0.5$ 时,

$$\Delta C(s) = \frac{2FK_2T(Ts+1)}{(T_2s+1)(2T^2s^2+2Ts+1)} \quad (4-19)$$

- 阶跃扰动后输出变化量的动态过程函数为

$$\Delta C(t) = \frac{2FK_2m}{2m^2-2m+1} \left[(1-m)e^{-t/T_2} - (1-m)e^{-t/2T} \cos \frac{t}{2T} + me^{-t/2T} \sin \frac{t}{2T} \right] \quad (4-20)$$

式中 $m = \frac{T_1}{T_2} < 1$ 为时间常数与大时间常数

的比值。取不同 m 值, 可计算出相应的动态过程曲线。

- 为消除系统参数对抗扰性能指标的影响，输出量的最大动态降落 ΔC_{\max} 用基准值 C_b 的百分数表示,取开环系统输出值作为基准值，即

$$C_b = FK_2 \quad (4-24)$$

- 考虑到在电流环中电机的电磁时间常数 T_2 是不变的，因此在计算抗扰性能中把 T_2 作为基准，
- 允许误差带为 $\pm 5\% C_b$ 时的恢复时间 t_v 也用 T_2 的倍数表示。

表4-2 典型I型系统动态抗扰性能指标与参数的关系

$$KT = 0.5 \quad C_b = FK_2$$

$m = \frac{T_1}{T_2} = \frac{T}{T_2}$	1/5	1/10	1/20	1/30
$\frac{\Delta C_{\max}}{C_b} \times 100\%$	27.78%	16.58%	9.27%	6.45%
t_m / T_2	0.566	0.336	0.19	0.134
t_v / T_2	2.209	1.478	0.741	1.014

- 抗扰性能分析结论:

当控制对象的两个时间常数相距较大时，动态降落减小，恢复时间的变化不是单调的，在时恢复时间最短。

$$m = \frac{1}{20}$$
