

第六章 自动控制线性系统的校正

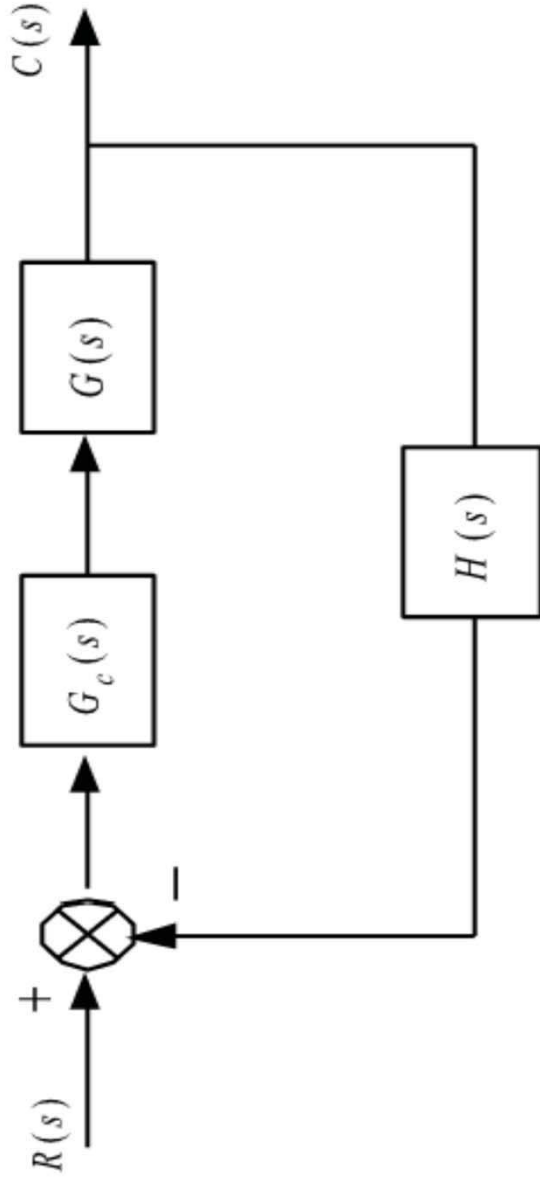
1

- §6-1 线性系统校正的概念
- §6-2 线性系统的基本控制规律
- §6-3 常用校正装置及其特性
- §6-4 校正装置设计的方法和依据
- §6-5 频率法串联校正的设计
- §6-6 反馈校正和复合校正

§6-1 线性系统校正的概念

2

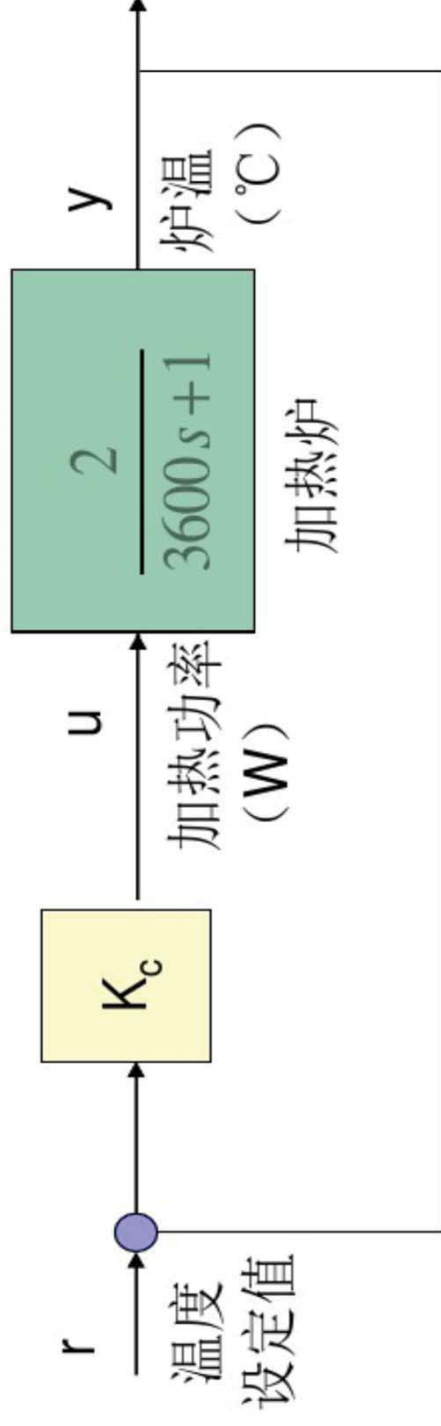
1、系统校正



被控对象确定后，根据要求的**控制目标**，对控制器进行设计的过程叫做系统校正。

§6-1 线性系统校正的概念

3



加热功率变化到炉温稳定，系统调节时间为 $3600 \times 3 = 10800$ 秒

$$\frac{2K_c}{3600s+1} = \frac{2K_c}{3600s+1+2K_c} = \frac{3600}{1+2K_c} \cdot \frac{K'}{T's+1}$$

$$\text{系统调节时间为 } T' \times 3 = \frac{10800}{1+2K_c} \text{ 秒}$$

本例的比例控制器可以提高系统**调节速度**， K_C 还影响开环增益，进而影响**系统的精度**。

§6-1 线性系统校正的概念

4

2、控制目标 - 性能指标

时域指标	
超调量 $\sigma\%$	调节时间 t_s
二阶系统指标计算	
$\sigma\% = e^{-\pi\xi/\sqrt{1-\xi^2}} \times 100\%$	
$t_s = 3.5/\xi\omega_n \quad \omega t_s = 7/tg\gamma$	

频域指标	
谐振峰值 M_r	谐振频率 ω_r
截止频率 ω_c	相位裕度 γ
幅值裕度 h	
二阶系统指标计算	
$M_r = 1/2\xi\sqrt{1-\xi^2} \quad \omega_r = \omega_n\sqrt{1-2\xi^2} \quad \xi \leq \sqrt{2}$	
$\omega_b = \omega_n\sqrt{(1-2\xi^2) + \sqrt{(1-2\xi^2)^2 + 1}}$	
$\omega_c = \omega_n\sqrt{\sqrt{4\xi^4 + 1} - 2\xi^2}$	
$\gamma = \tan^{-1}(2\xi/\sqrt{\sqrt{4\xi^4 + 1} - 2\xi^2})$	

性能指标是系统设计的基础，综合考虑动态、稳态和稳定性特性。

系统带宽的确定

系统校正，多在频域进行，系统带宽是一个重要指标。

系统带宽选择应综合系统的**跟随性**和**抗干扰**性能。较宽的频带，系统响应快，跟随性好，但易受外界干扰影响；而频带窄，不易受干扰影响，但跟随性差。

系统要求一般体现在系统输入信号的频率范围，一般将带宽频率选定在 $\omega_b = (5 \sim 10)\omega_m$ ，其中 ω_m 为输入信号的最大频率。另外要求带宽频率小于干扰信号的频率。

上述频率设定，是一种理想的方案，实际系统干扰往往很复杂，各种频率分量的干扰都会出现，应综合考虑，必要时设计针对某种频率范围的干扰的滤波器。

§6-1 线性系统校正的概念

6

一般要求系统的稳定裕度在 45° 左右 \rightarrow 中频区的斜率为 -20dB/dec ，同时占有一定频率范围

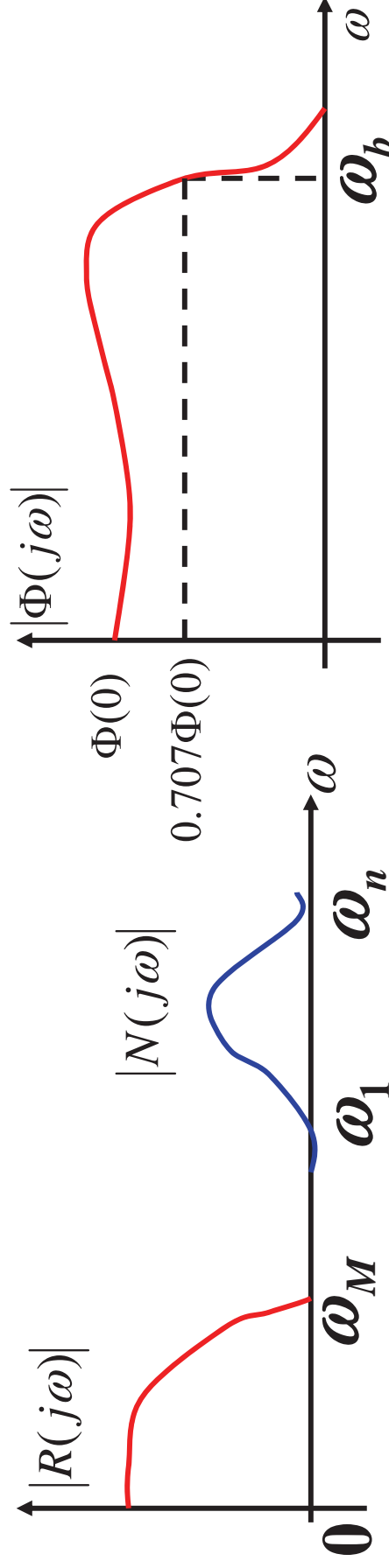
若输入信号的带宽： $0 \sim \omega_M$

噪声信号主要作用的频带为： $\omega_1 \sim \omega_n$

通常取： $\omega_b = (5 \sim 10)\omega_M$

而且使

$\omega_1^{\text{处}} \omega_n$ 之外。 $0 \sim \omega_b$



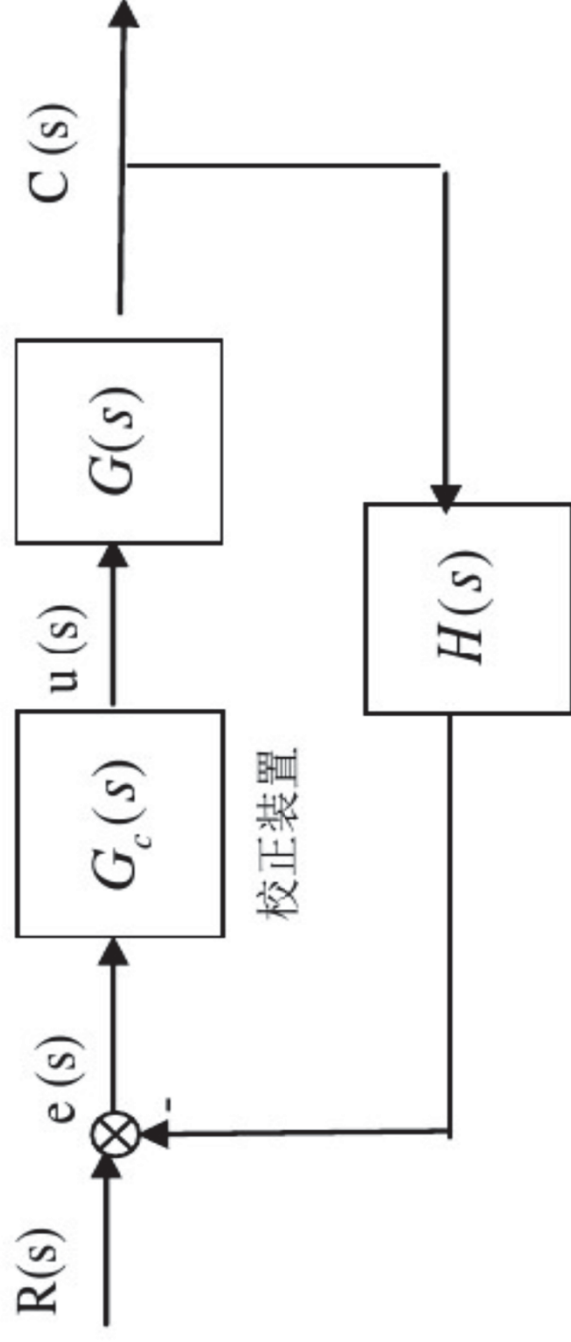
3、为什么校正

闭环系统有自动控制功能，在一定范围内可以通过调节增益 K 改变系统性能，但有时不能满足要求。

4、用什么校正

- 校正装置 – 为了改善系统性能，引入的附加装置叫做校正装置；
- 校正装置可以是电器的、机械的、气动的、液压的或其他形式的元件组成；
- 电气的校正装置分为有源的和无源的两种，应用无源校正装置时，要考虑负载效应。

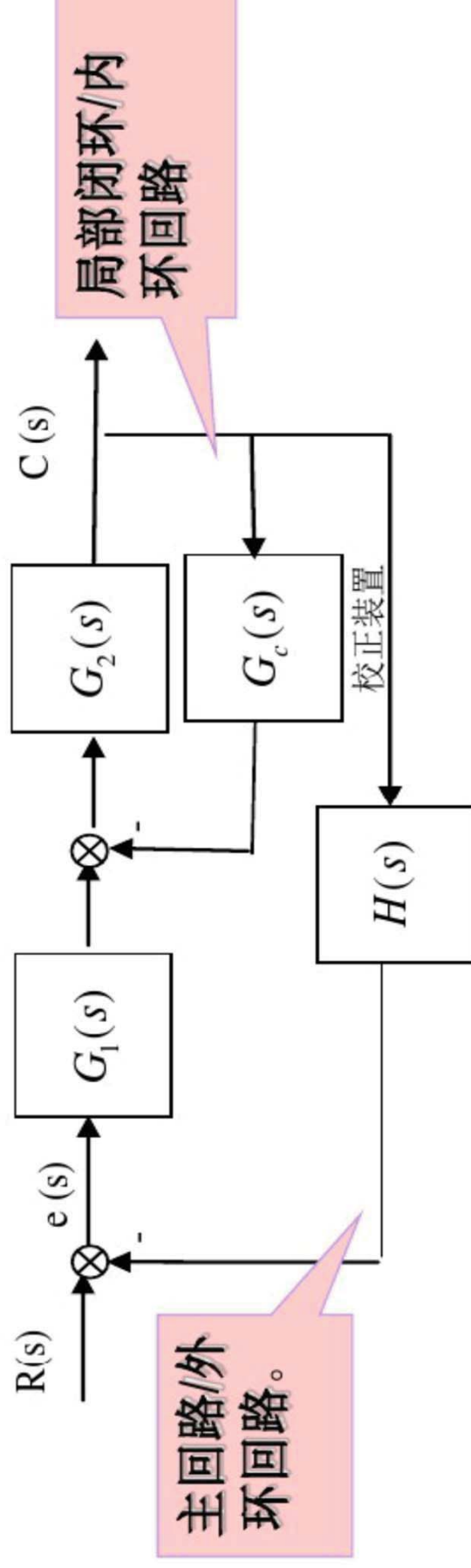
5、常用的校正方法 - 串联校正



作用：对系统中的误差信号进行比例、积分、微分等运算，形成适当的控制信号，以获得满意的控制性能。

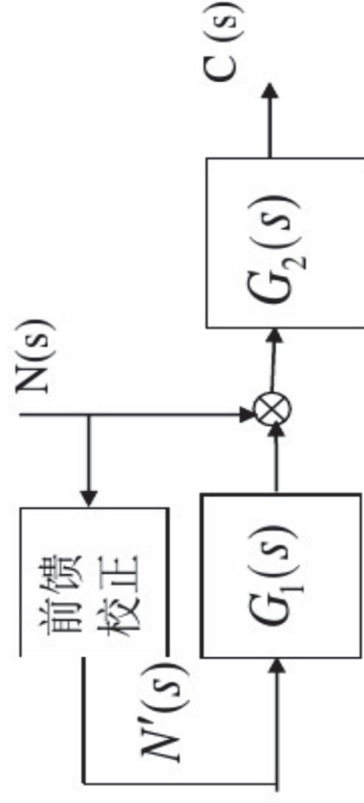
特点：设计简单，但通常需要附加放大器，以提高增益和提供隔离。

5、常用的校正方法 - 反馈校正

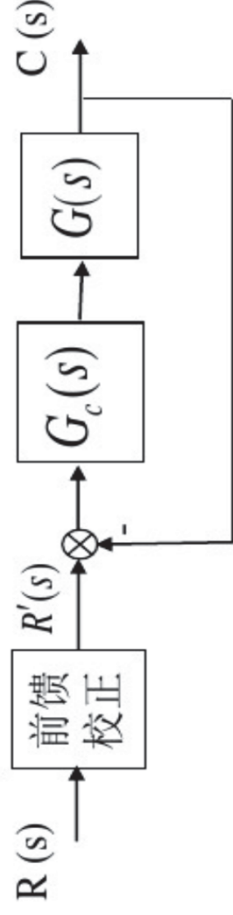


特点：反馈校正一般无需附加放大器，同时还可消除系统原有部分参数波动或非线性因素对系统性能的影响。但是局部反馈校正过多依赖设计人员的设计经验。

5、常用的校正方法 - 前馈校正



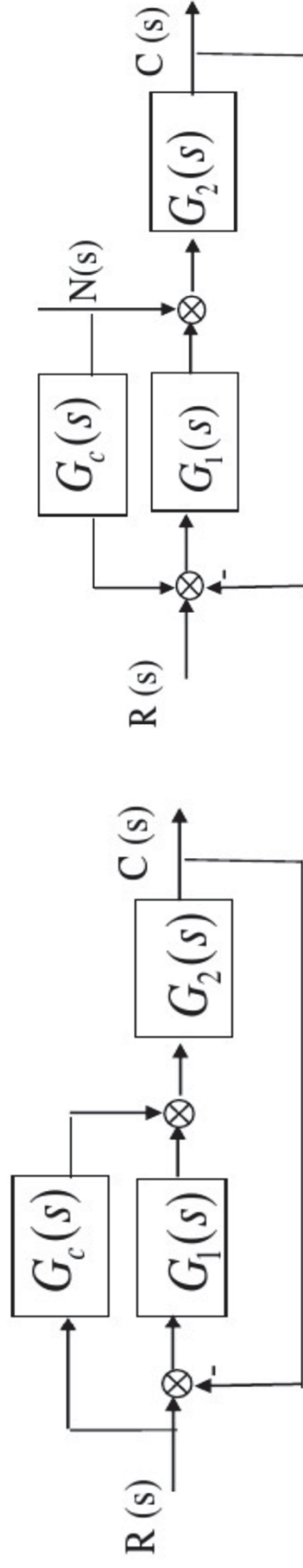
扰动前馈校正



参考输入前馈校正

特点：前馈校正实现的是开环控制，不需要等到输出量发生变化并形成偏差以后才产生纠正偏差的控制作用，而是在控制作用施加于系统的同时，前馈校正作用就产生了。前馈校正没有延迟，但是校正中的误差会作用在被控对象上。

5、常用的校正方法 - 复合校正



按输入补偿

按扰动补偿

特点：将前馈校正最为反馈控制系统的附加校正组合而成。既具有前馈校正及时快速的特点又兼备反馈校正精确的特点。

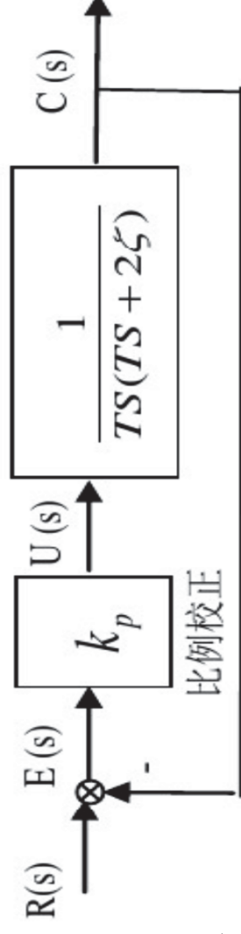
6、方案选择

- ◆ 技术性能、经济指标、可靠性等方面进行全面比较，权衡利弊，得到方案。
- ◆ 提出合适的性能指标，选择测量元件、执行元件、放大器。

比例P(Proportional)、积分I(Integral)、微分D(Derivative)

1、比例(P)控制器 $G_c(s) = k_p$

作用： 调整系统的开环比例系数，以提高系统的静态精度，降低系统的惰性，加快其响应速度。



$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{k_p}{T^2 s^2 + 2\zeta Ts + k_p} = \frac{k_p}{k_p} \frac{T^2}{s^2 + \frac{2\zeta T}{k_p} s + 1}$$

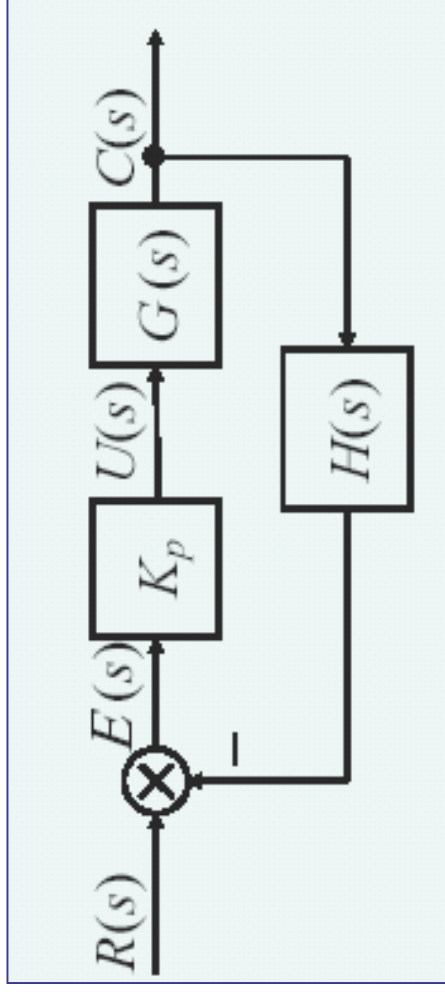
$$\text{时间常数 } T' = \frac{T}{\sqrt{k_p}}, \quad \text{阻尼系数为 } \zeta' = \frac{\zeta}{\sqrt{k_p}}$$

增大 k_p ，可以使系统的时间常数和阻尼系数都减小，提高精度，加快动态响应。

缺点： 若参数选择不当，会造成阻尼系数过小，使系统的动态响应变坏，相对稳定性降低，甚至造成闭环系统不稳定。

§6-2 线性系统的基本控制规律

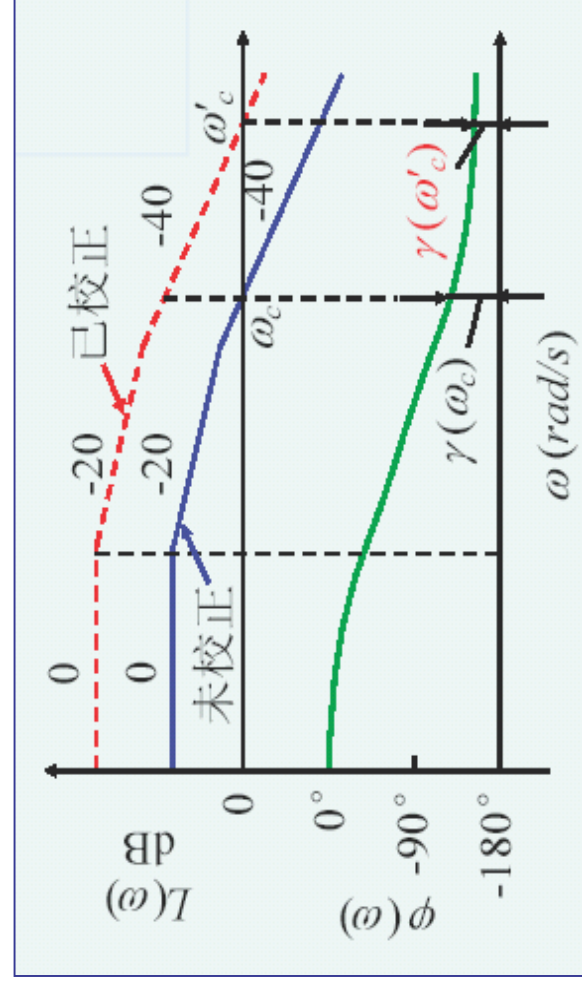
14



$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad \varphi_c(\omega) = 0$$

$$G_c(j\omega) = K_p \quad L_c(\omega) = 20 \lg K_p$$

$$K_p > 1$$



开环增益加大，稳态误差减小；截止频率增大，过渡过程时间缩短；系统稳定程度变差（很少单独使用）。
原系统稳定裕量充分大时才采用比例控制。

$$K_p < 1$$

对系统性能的影响正好相反。

2、比例积分(PI)控制器

$$G_c(s) = k_p + \frac{k_i}{s}$$

特点: 当误差信号为零时，控制信号（PI控制器的输出）可以不为零，仍保持一定的控制作用。

作用: 可提高系统的无静差度，消除系统的静态误差。

缺点: 若参数选择不当，积分控制可能会使系统的响应速度变慢，同时，也会影响系统的稳定性。

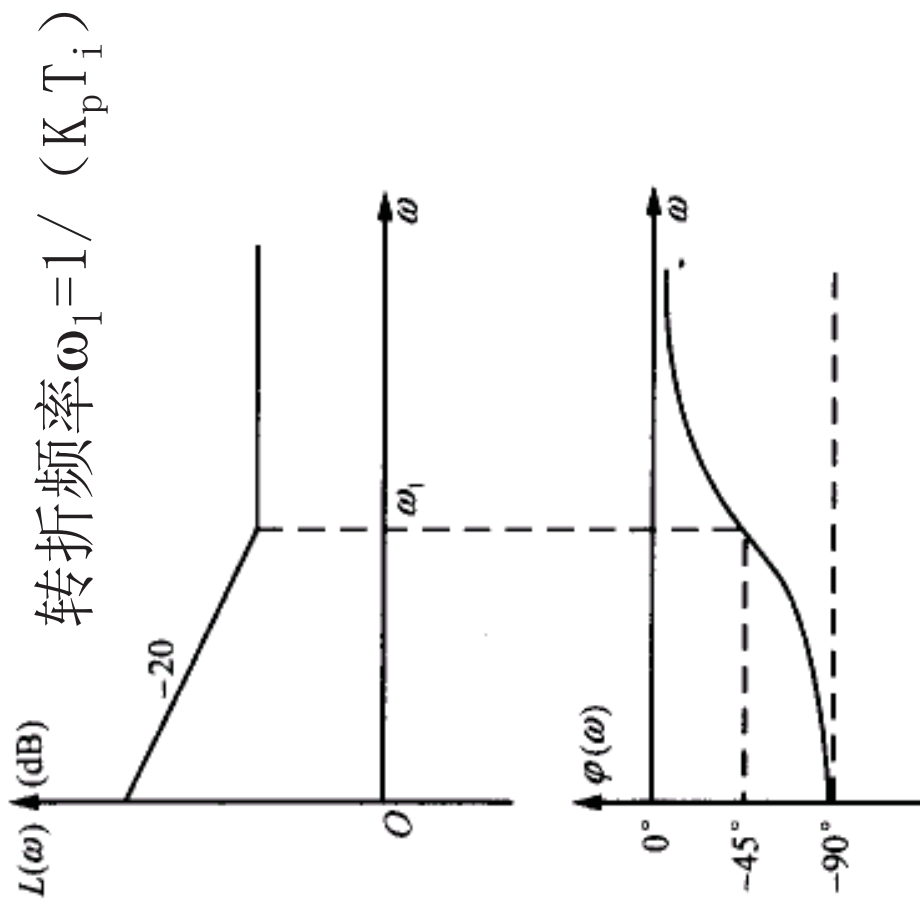
$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

$$= K_p \frac{T_i s + 1}{T_i s}$$

$$G_c(j\omega) = K_p \frac{1 + jT_i\omega}{jT_i\omega}$$

$$L_c(\omega) = 20 \lg K_p + 20 \lg \sqrt{1 + T_i^2 \omega^2} - 20 \lg T_i \omega$$

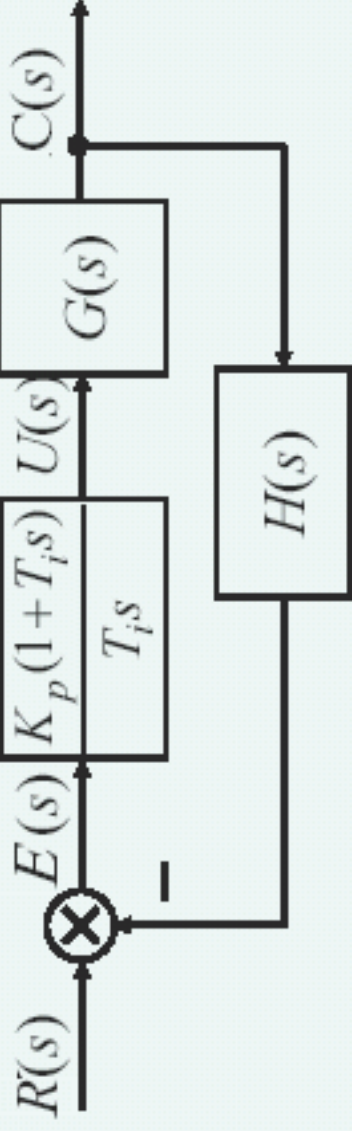
$$\varphi_c(\omega) = \lg^{-1} T_i \omega - 90^\circ$$



一个积分环节 → 提高系统的稳态精度
一个开环零点弥补积分环节对系统稳定性的不利影响

§6-2 线性系统的基本控制规律

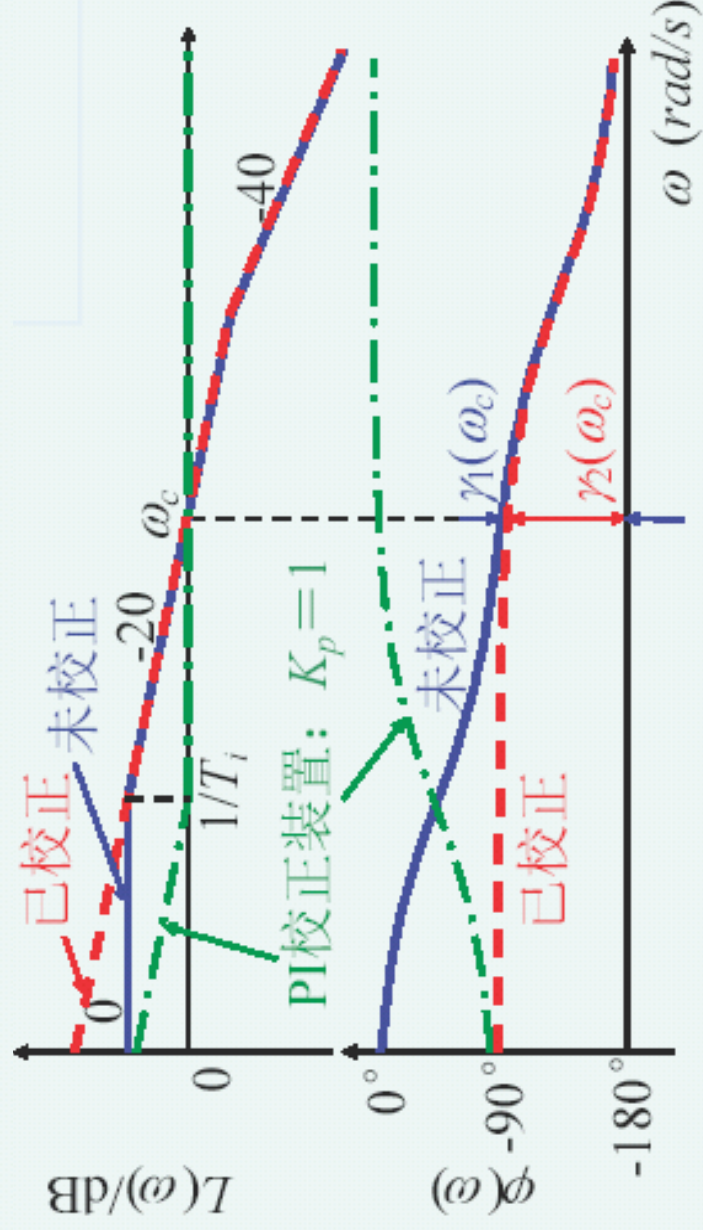
17

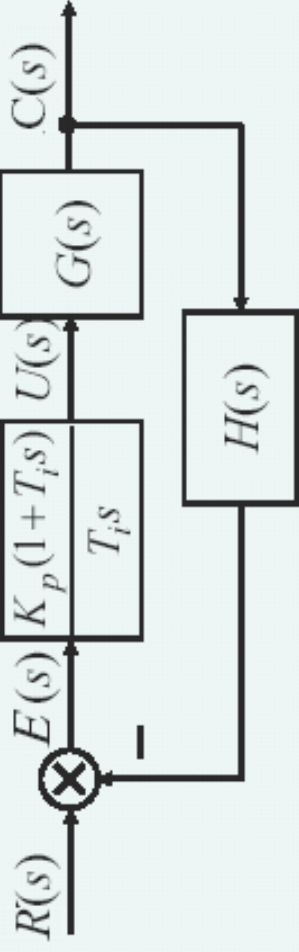


$$K_p = 1$$

➤系统型次提高，稳态性能改善。

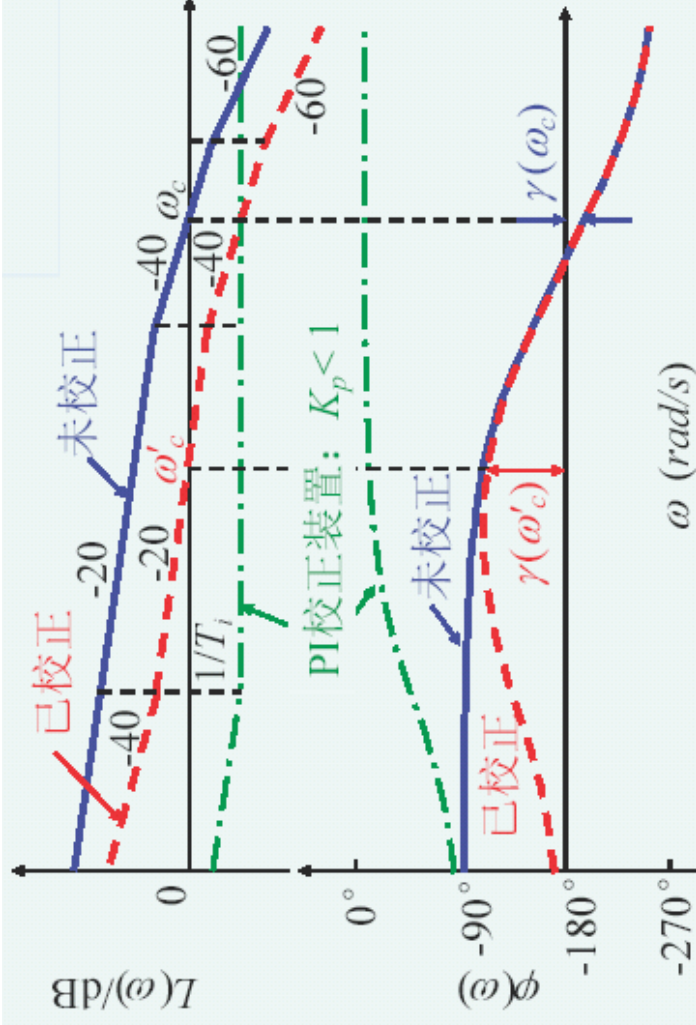
➤相位裕量减小，稳定程度变差。





$$K_p < 1$$

- 系统型次提高，稳态性能改善；
- 系统从不稳定变为稳定；
- ω_c 减小，快速性变差。



由于 $\varphi_c(\omega) = \lg^{-1} T_i \omega - 90^\circ < 0^\circ$ ，导致引入PI控制器后，系统的相位滞后增加，因此，若要通过PI控制器改善系统的稳定性，必须有 $K_p < 1$ ，以降低系统的截止频率。

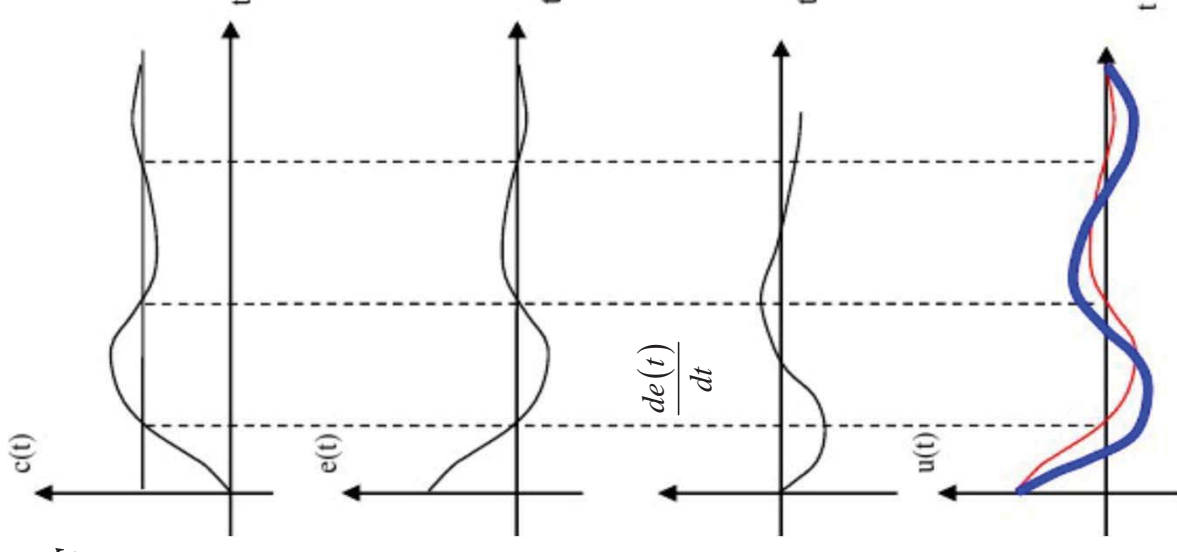
- 通过引入积分控制作用以改善系统的稳态性能。
- 通过比例控制作用来调节积分作用所导致相角滞后对系统的稳定性所带来的不利影响。

3、比例微分(PD)控制器 $G_c(s) = k_p + k_D s$

特点：控制作用不仅反映误差信号，同时也反映了误差信号随时间的变化。微分环节起到“提前预报”的作用。

作用：系统的超调减小，振荡减弱，过渡过程加快。

缺点：对噪声过于敏感。

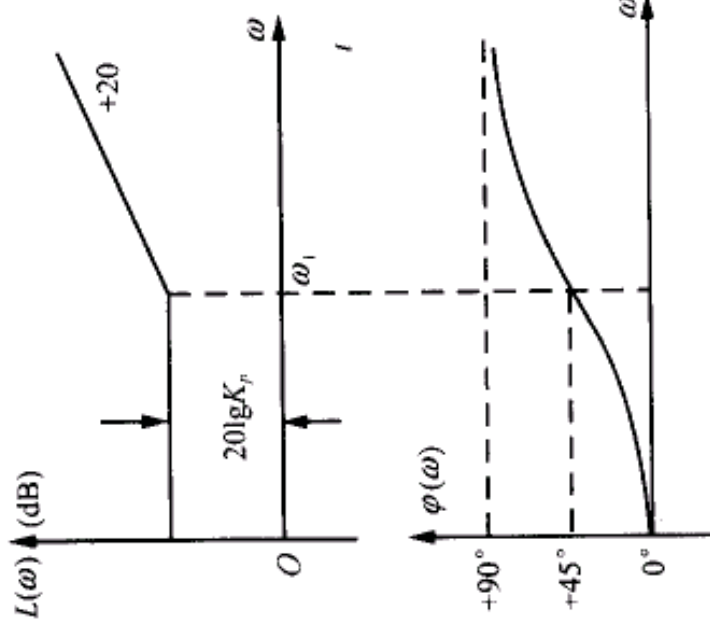


$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p(1 + T_d s)$$

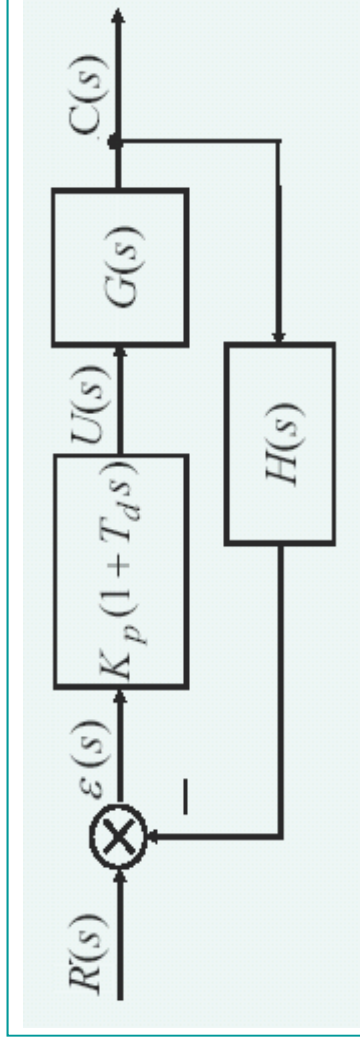
$$G_c(j\omega) = K_p(1 + jT_d\omega)$$

$$L_c(\omega) = 20\lg K_p + 20\lg \sqrt{1 + T_d^2 \omega^2}$$

$$\varphi_c(\omega) = \tan^{-1} T_d \omega$$



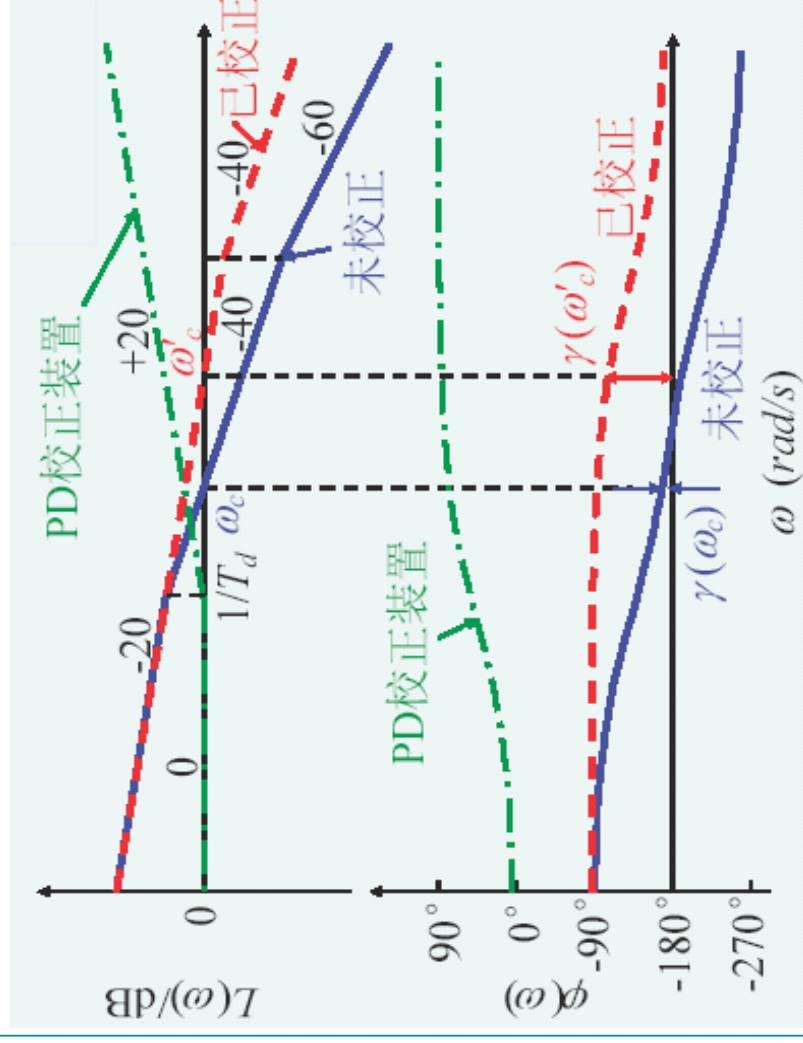
转折频率 $\omega_1 = 1/T_d$



PD控制通过引入微分作用改善了系统的动态性能

- 高频段增益上升，可能导致执行元件输出饱和，并且降低了系统抗干扰的能力；
- 相位裕量增加，稳定性提高；
- ω_c 增大，快速性提高
- $K_p=1$ 时，系统的稳态性能没有变化。

微分控制仅仅在系统的瞬态过程中起作用，一般不单独使用。



4、比例-积分-微分(PID)控制器

$$G_c(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_D s$$

- 对系统的模型要求低

实际系统要建立精确的模型往往很困难。而**PID**控制器对模型要求不高，甚至在模型未知的情况下，也能进行调节。

- 调节方便

控制作用相互独立，最后以求和的形式出现的，人们可改变其中的某一种调节规律，大大地增加了使用的灵活性。**P**、**I**提高系统稳态性能；**D**改善系统动态性能。

- 适应范围广

一般校正装置，系统参数改变，调节效果差，而**PID**控制器的适应范围广，在一定的变化区间中，仍有很好的调节效果。

§6-3 线性系统的基本控制规律

24

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

$$K_p = 1$$

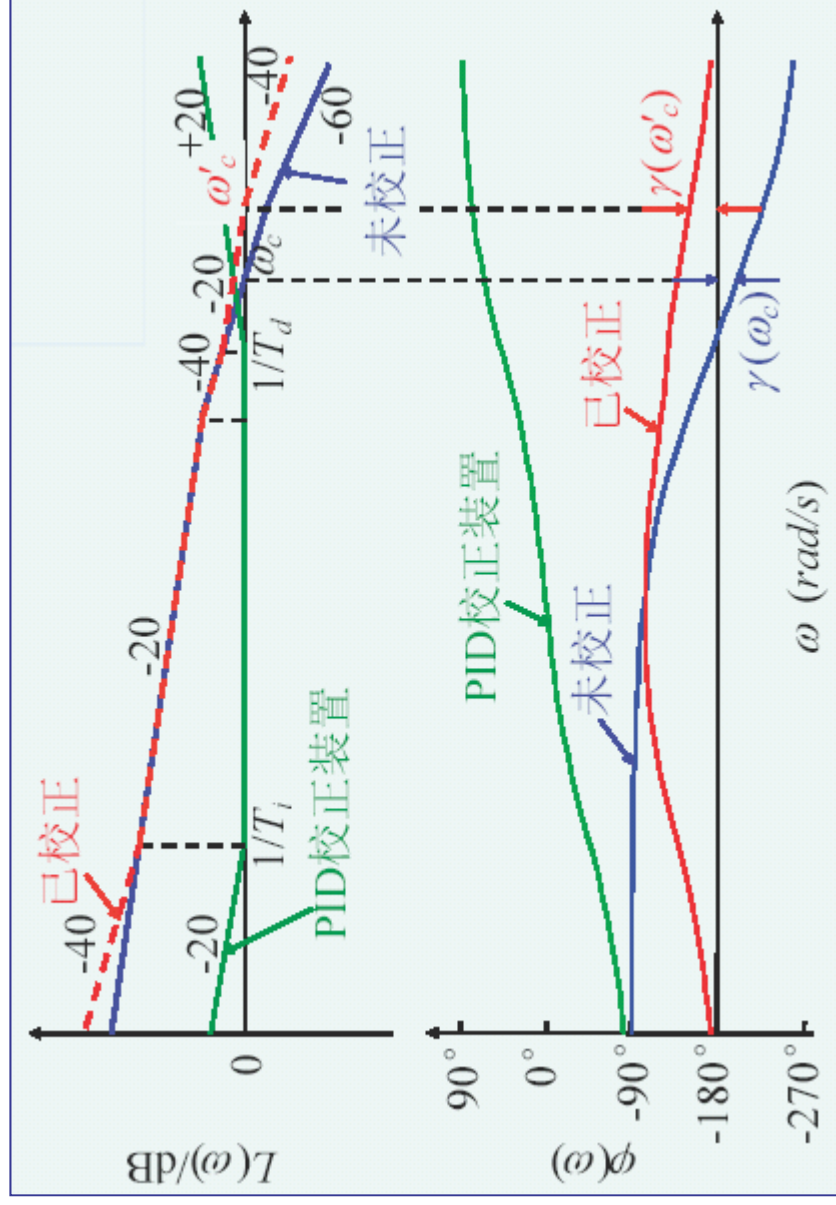
$$G_c(j\omega) = 1 + \frac{1}{jT_i\omega} + jT_d\omega = \frac{1 + j\frac{\omega}{\omega_i} - \frac{\omega^2}{\omega_i\omega_d}}{j\frac{\omega}{\omega_i}}$$

$$\omega_i = \frac{1}{T_i}, \omega_d = \frac{1}{T_d} \quad L_c(\omega) = 20 \lg \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_i\omega_d}\right)^2 + \frac{\omega^2}{\omega_i^2}} - 20 \lg \frac{\omega}{\omega_i}$$

$$\varphi_c(\omega) = \tan^{-1} \frac{\frac{\omega}{\omega_i}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_i\omega_d}} - 90^\circ$$

通常PID 控制器中 $\omega_i < \omega_d$ (即 $T_i > T_d$)

- 在低频段，PID控制器通过积分控制作用，改善了系统的稳态性能；
- 在中频段，PID控制器通过微分控制作用，有效地提高了系统的动态性能。



近似有：

$$L_c(\omega) = \begin{cases} -20 \lg \omega \frac{\omega}{\omega_i}, (\omega < \omega_i) \\ 0, (\omega_i < \omega < \omega_d) \\ 20 \lg \frac{\omega}{\omega_d}, (\omega > \omega_d) \end{cases}$$

$$\varphi_c(\omega) = \begin{cases} -90^\circ, (\omega \rightarrow 0) \\ 0^\circ, (\omega = \sqrt{\omega_i \omega_d}) \\ +90^\circ, (\omega \rightarrow \infty) \end{cases}$$

比例控制:

提高系统开环增益，减小系统稳态误差，但会降低相对稳定性或使系统闭环不稳定；

积分控制:

提高系统的型，改善稳态性能，应发生在低频段；但增加开环极点，使相角滞后；

微分控制:

改善系统的动态性能，应发生在中频段；但对噪声敏感；

因此这三者都不宜单独使用

开环频率特性三频段特征：

1) 低频段：表征闭环系统的稳态性能，增益充分大，以保证稳态误差的要求；

2) 中频段：表征闭环系统的动态性能，一般斜率为 -20dB/dec ，并占据充分宽的频带，以保证适当的相角裕度；

3) 高频段：表征闭环系统的复杂程度和抑制噪声的能力，增益尽快减小以削弱噪声的影响，若原有系统的高频段已满足要求，则校正时可保持原高频段的形状不变。