



第4章 控制系统的带宽设计(2)

——2023年春季学期

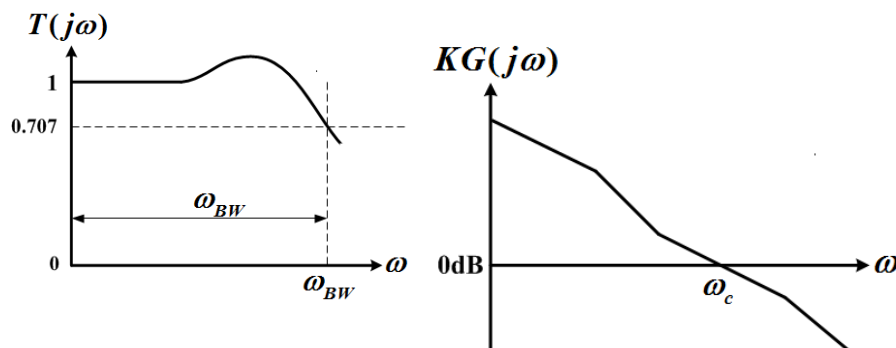
授课教师： 马 杰 (控制与仿真中心)
霍 鑫 (控制与仿真中心)
马克茂 (控制与仿真中心)
陈松林 (控制与仿真中心)



回顾篇

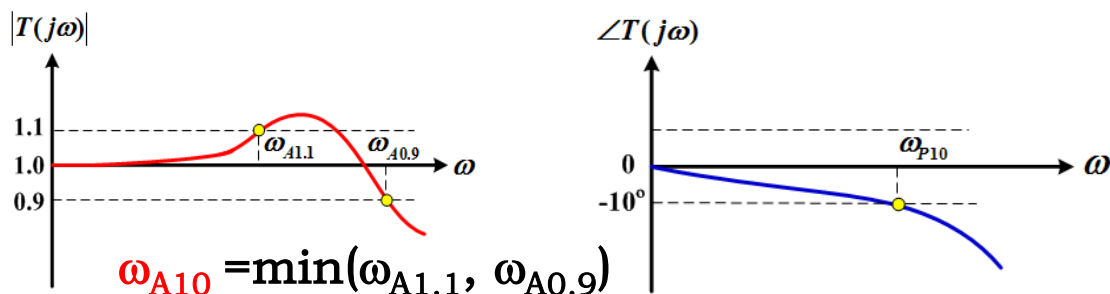
控制系统的带宽定义（闭环）

- 闭环Bode图上，幅频特性首次衰减到0.707（-3dB）时对应的频率 ω_{BW} 。
- 开环幅频特性的穿越频率 ω_c 与闭环系统带宽 ω_{BW} 是同一数量级的，一般满足 $\omega_c < \omega_{BW} < 2\omega_c$ 的关系（仅用闭环校正）。



带宽定义指标的提法

- -3dB
- -90度相移
- 双十指标（双五双三）



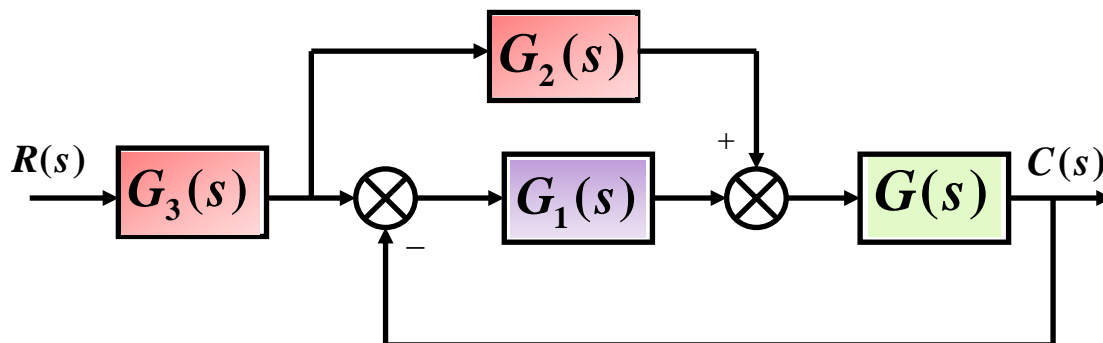
带宽反映了系统响应速度与精度；带宽越宽，输出信号的复现精度越高；



回顾篇

闭环校正和开环校正

- 两种方法方式不同，但是都可以拓展**整个系统**的带宽，提高系统的响应速度和跟踪能力



响应特性和反馈特性

- **响应特性**只反映了闭环系统的带宽，即系统的响应速度和精度
- **反馈特性**则反映了系统对指令跟踪、对模型摄动及扰动的抑制能力

如果系统的**反馈特性**好，系统的**响应特性**一定好；
但是系统的**响应特性**好，并不意味着**反馈特性**一定好；

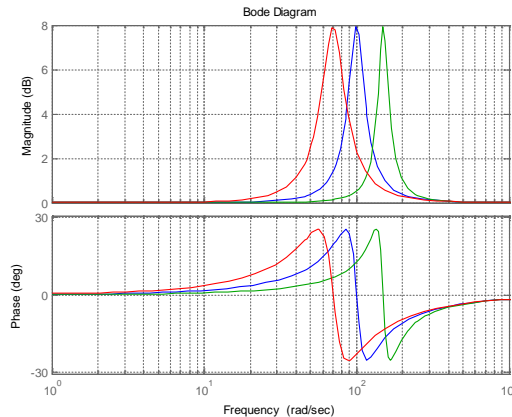
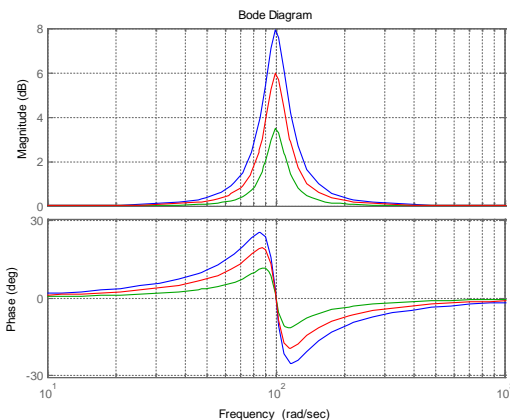


回顾篇

谐振的特征与形式

- 谐振是机电伺服系统固有特性。谐振频率一般与系统的刚度成正比，与惯量成反比

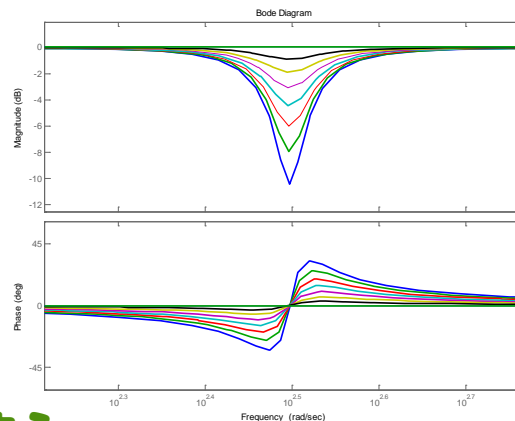
$$W(s) = \frac{s^2 + as + \omega_m^2}{s^2 + bs + \omega_m^2}, \quad a > b$$



谐振的抑制（微创手术刀）

$$G(s) = \frac{s^2 + as + \omega_m^2}{s^2 + bs + \omega_m^2}, \quad a < b$$

应用限波（带阻）滤波器可能带来的**相位滞后**和幅值衰减(系统剪切频率一般都在谐振频率之前，因此添加带阻滤波器一定会损失剪切频率处的相角，减小系统的稳定裕度)

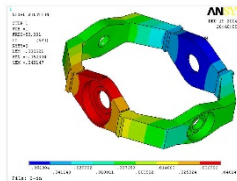




回顾篇

谐振与系统带宽之间的关系—与惯量和刚度有关

如果机械系统还未设计，要根据带宽指标对结构刚度提出下面的要求



若机械系统已设计完成，则要根据它实际的谐振频率来确定系统**穿越频率**。

待设计

$$\omega_m > 5\omega_{BW}$$

给定

待定

$$\omega_c < \frac{\omega_m}{5}$$

实际的

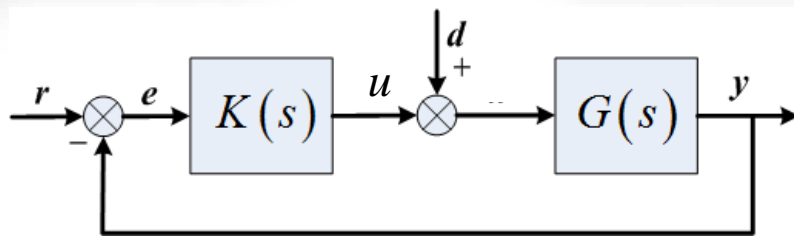
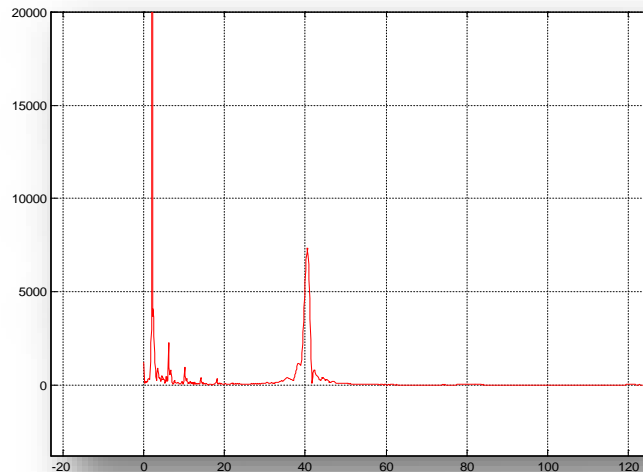
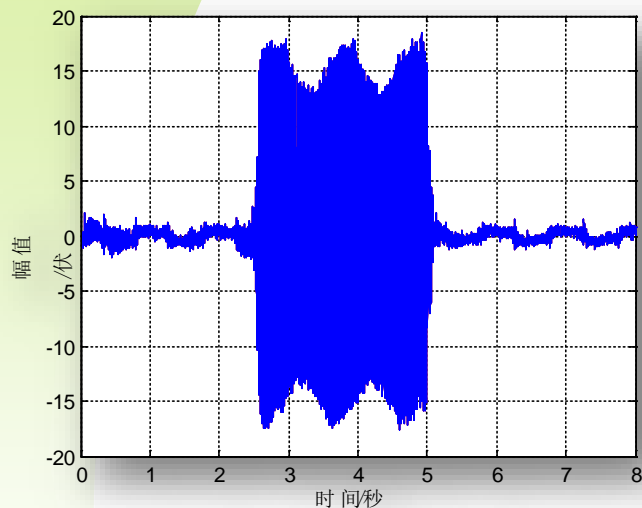
谐振测试与抑制的流程

- 一种是**开环测出谐振特性**，利用滤波器进行校正，使补偿后对象特性Bode图中的谐振特性消失；（这种方法更加规范）
- 另一种开环校正时不做处理，**闭环后出现谐振再进行抑制**。对反馈信号进行傅里叶分析，确定是否存在谐振，如果存在，则确定谐振频率，添加陷波滤波器进行抑制，直至谐振现象消失；（这种方法更加实用）



回顾篇

谐振与系统带宽之间的关系



- 控制器增益远大于1时，从**控制量**上去分析和辨识谐振更好
- 谐振抑制的本质是**让控制器对高频信号不敏感，让振动自然衰减**；



拓展篇

无处不在的反馈***

- 下棋复盘，打球录像，专家点评，排名打分
 - 以事件为节点的复盘，以时间为节点的总结；
 - 摸着石头过河，与时俱进，抬头看路，事事有回应
-
- 正反馈：因果循环，不断增强；（有好有坏，争取开个好头）
 - 负反馈：及时调节，不断纠偏；（延迟效应，提高反馈频率）
-
- 内部反馈：自测、自省、自评，换位置思考，跨时间审视；
 - 外部反馈：用他人评价和客观标准提供更全面准确的反馈；
-
- 给别人提供反馈，帮他人实现闭环。感恩，鼓励，评价，打赏



拓展篇

无处不在的反馈***

乐于接受他人的善意，并能还以积极的反馈



每个人都应该积极反馈和传递正能量，让社会或人与人之间形成闭环



学习目标

本节课需要掌握的内容

- 掌握带宽的设计的基本思想和原则；
- 掌握带宽设计中的手术刀（压低带宽和拓展带宽）；
- 理解各种方法的利与弊，掌握适用条件和使用方法；
- 掌握开环相对稳定性指标及其与闭环指标的关系。



本章主要内容

A1

灵敏度和Bode积分约束

A2

对象的不确定性和鲁棒稳定性约束

A3

带宽设计

A4

相对稳定性及其指标



4.3 带宽及带宽设计

4.3.1

控制系统的带宽

4.3.2

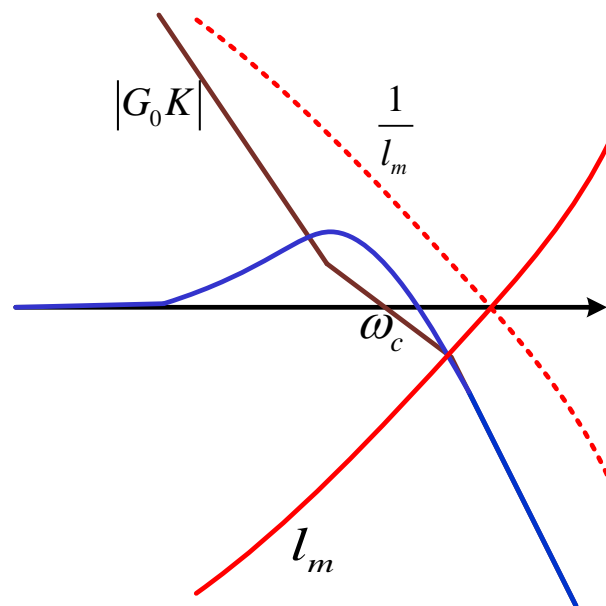
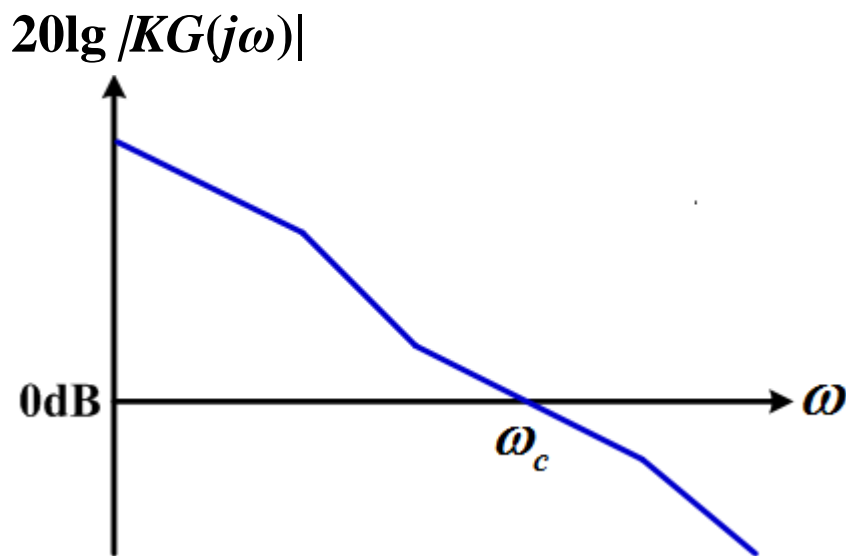
带宽设计



4.3.2 带宽设计

设计思想 | 压低带宽的方法 | 拓展带宽的方法 | 设计实例

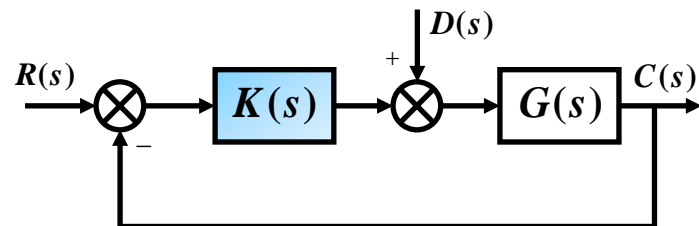
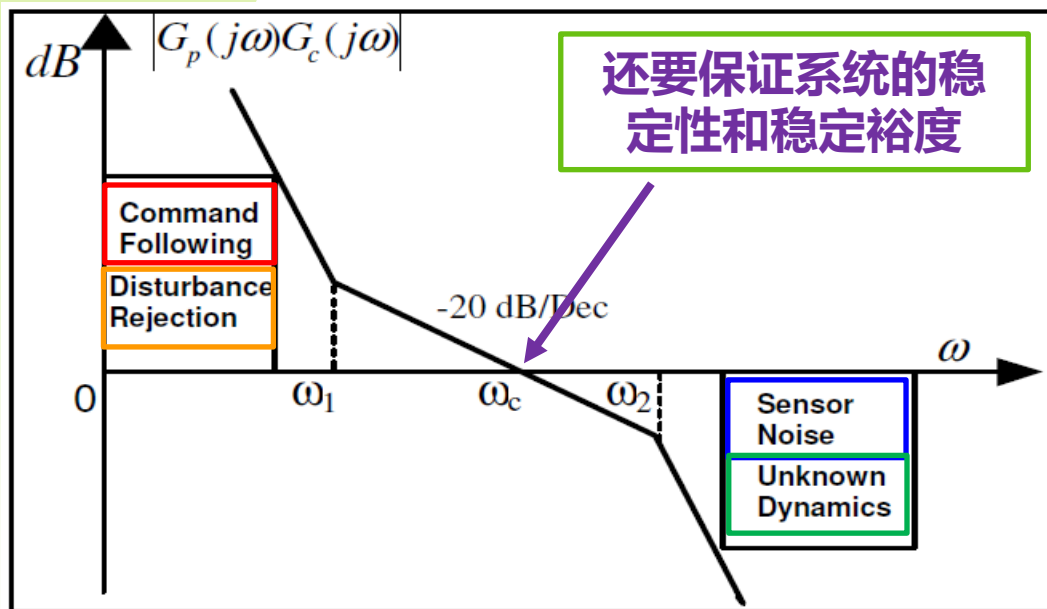
开环系统的带宽（剪切频率），属于闭环校正控制设计应该考虑的内容，不一定会出现在设计任务书中，所以带宽需要结合**对象特性**和**闭环系统指标**进行合理的设计。





4.3.2 带宽设计

设计思想 | 压低带宽的方法 | 拓展带宽的方法 | 设计实例

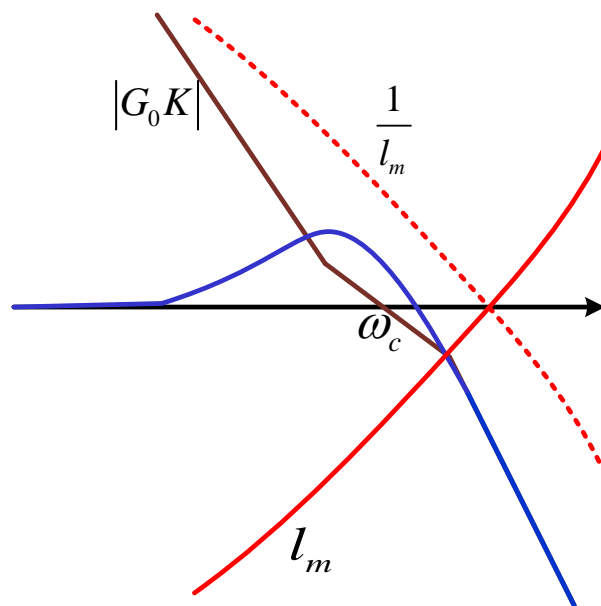


如何设计才能让系统的开环特性具有期望的形式?

- **指令跟踪**对系统低频的斜率和增益提出了要求;
- **扰动抑制**对干扰作用点之前的特性提出了要求;
- **噪声抑制**对系统的带宽和高频特性提出了要求;
- **不确定性**对系统的带宽和高频特性提出了要求;



鲁棒稳定性条件对开环特性提出什么要求？



正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

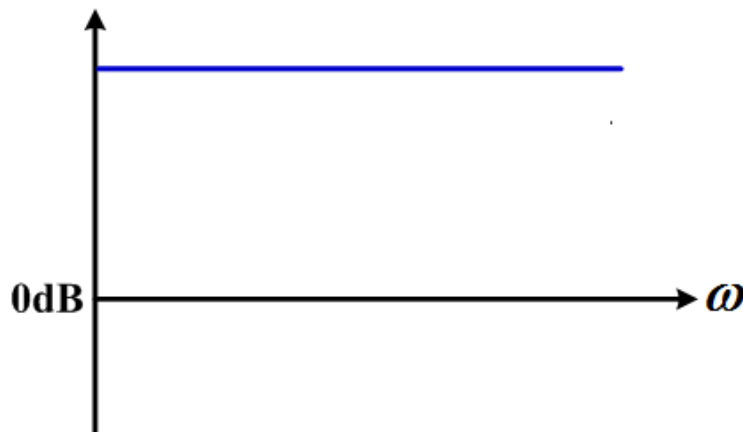


4.3.2 带宽设计

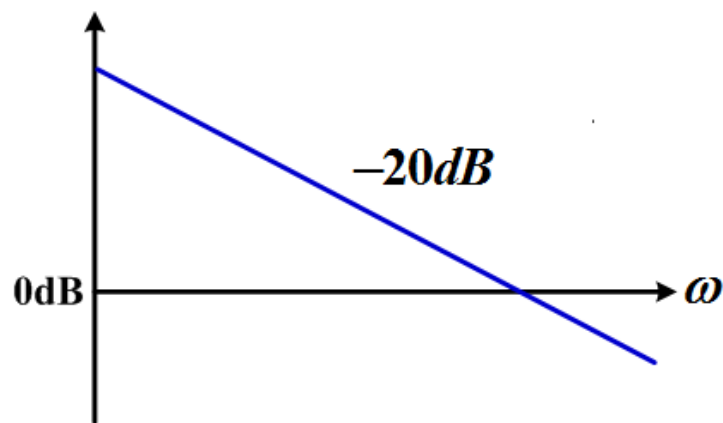
设计思想 | **压低带宽的方法** | 拓展带宽的方法 | 设计实例

1 若对象自身带宽较宽，不能被动地等待 KG 自己衰减下来穿过 0dB 线，否则系统不在规定的频段上穿越 0dB 线，就没有鲁棒性，实际系统将是不稳定的。

$20\lg |G(j\omega)|$

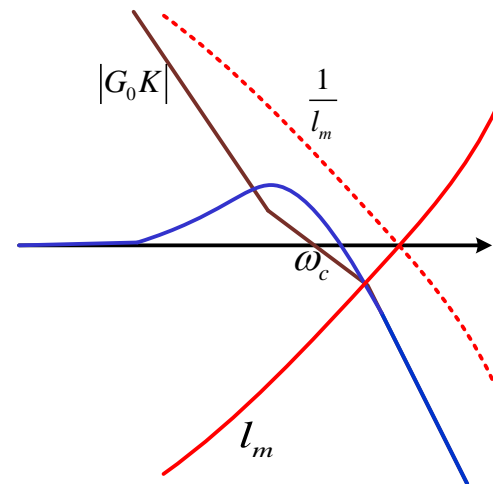


$20\lg |G(j\omega)|$

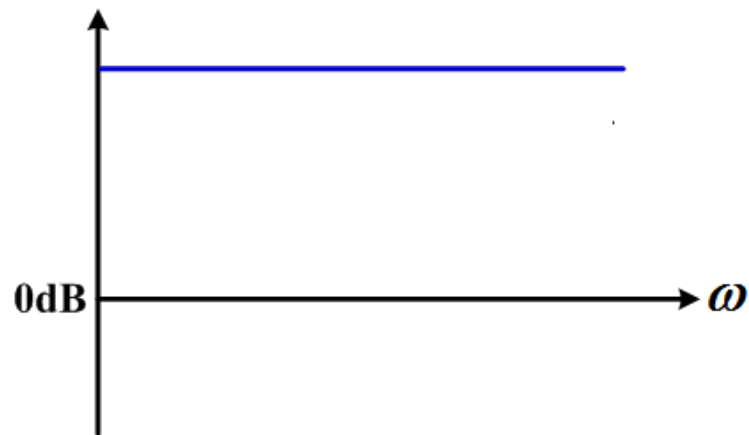




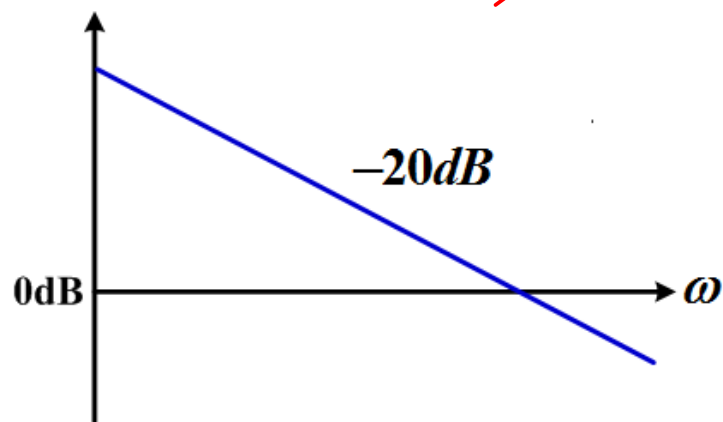
压低系统带宽的方法有哪些？



$20\lg |G(j\omega)|$



$20\lg |G(j\omega)|$



正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答



可以压低系统带宽的方法有哪些

A

降低增益

B

积分，比例加积分

C

惯性环节

D

滞后环节

提交



4.3.2 带宽设计

设计思想 | **压低带宽的方法** | 拓展带宽的方法 | 设计实例

1 比例环节

2 积分环节

传递函数为

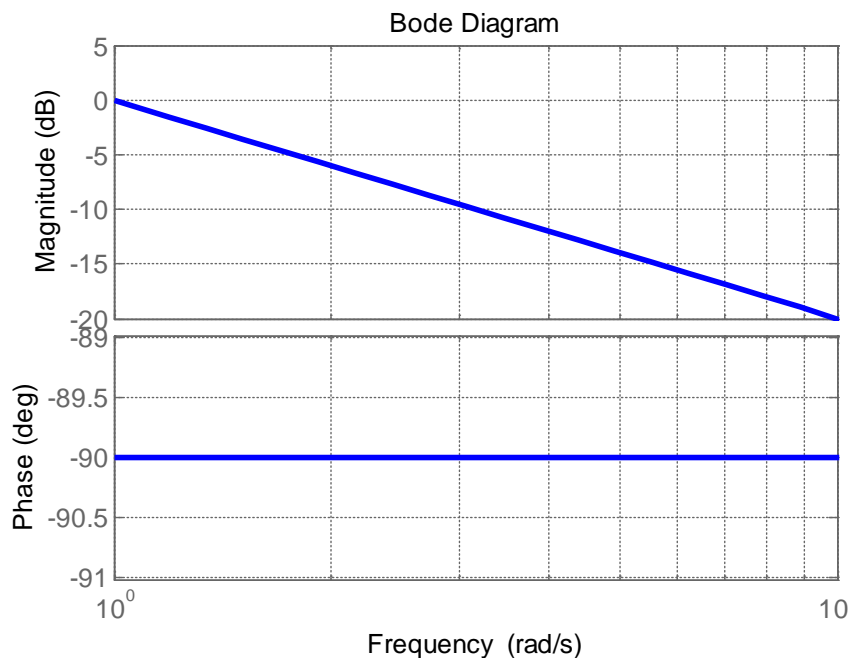
$$G_c(s) = \frac{1}{s}$$

转折频率为

$$\omega_m = 0$$

全频段的相角损失 -90° ,
幅值**衰减率**为 -20dB

比例适合I型系统



积分一般适用于0型系统



4.3.2 带宽设计

设计思想 | 压低带宽的方法 | 拓展带宽的方法 | 设计实例

3 惯性环节

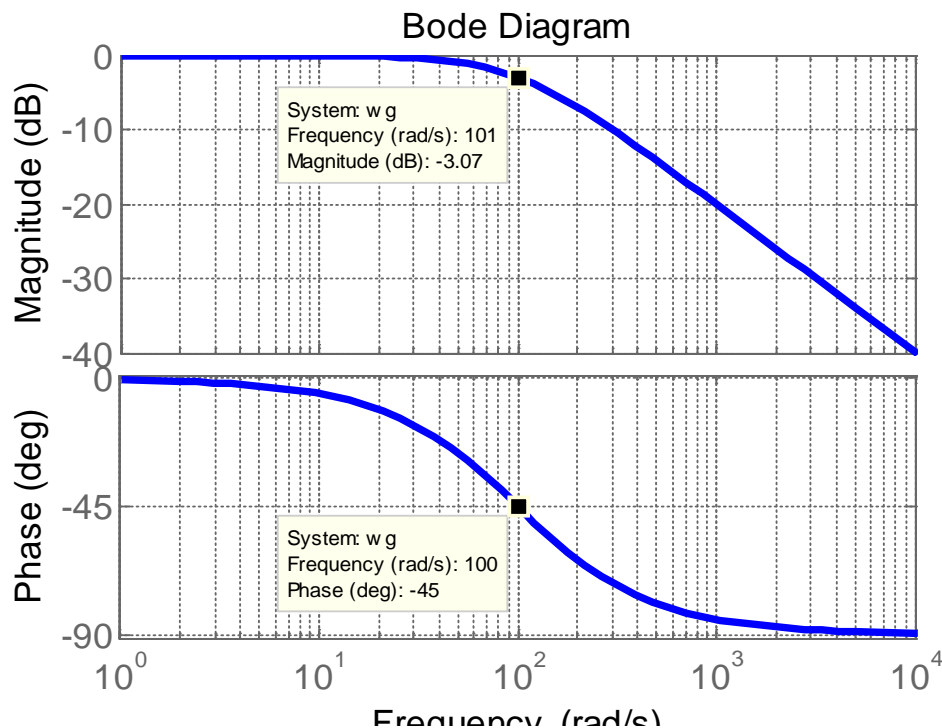
传递函数为

$$G_c(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$$

转折频率为

$$\omega_m = \frac{1}{\tau}$$

转折频率处的相角损失 -45° ,
增益降低-3dB



一般适用于0型和I型系统

也常用来抑制高频噪声 $\omega_m = 3 \sim 5\omega_c$



4.3.2 带宽设计

设计思想 | **压低带宽的方法** | 拓展带宽的方法 | 设计实例

4 滞后环节

传递函数为

$$G_c(s) = \frac{\tau s + 1}{\alpha \tau s + 1} = \frac{1}{\alpha} \frac{(s + z)}{(s + p)}$$

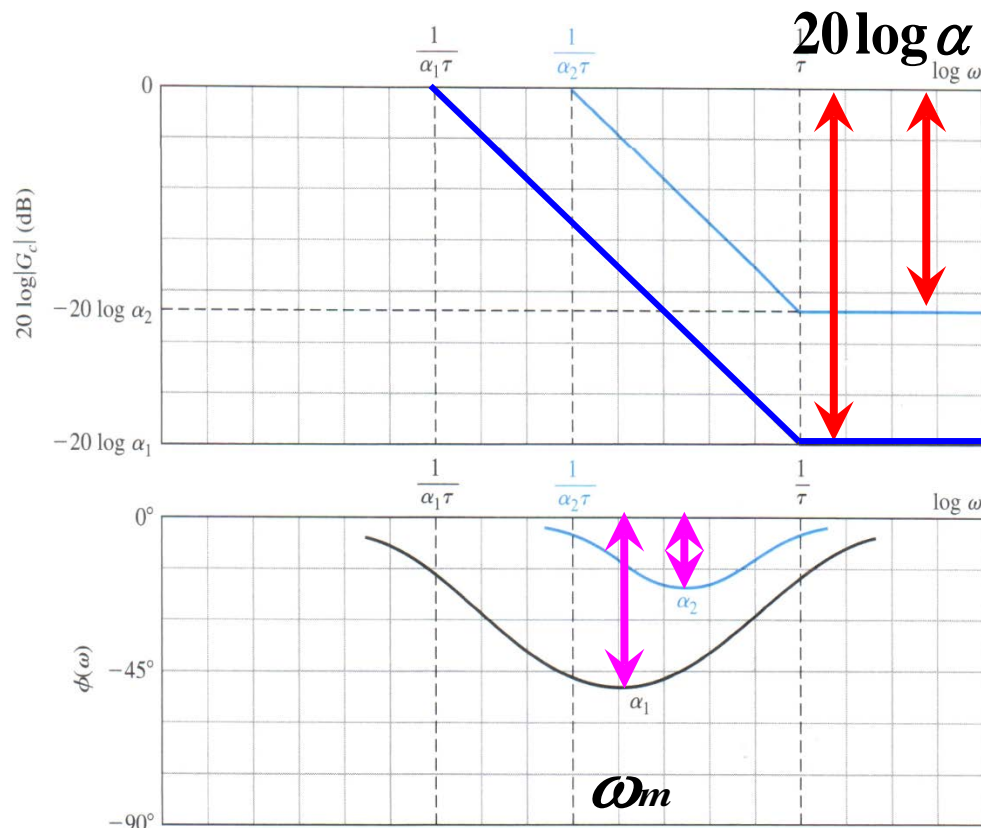
中心频率为

$$\omega_m = \sqrt{zp} = \frac{1}{\tau \sqrt{\alpha}}$$

对高频增益的衰减幅值为

$$20 \log \alpha$$

比惯性环节对相角损失的小，
但对高频增益的衰减有限



一般用在剪切频率处和剪切频率之后

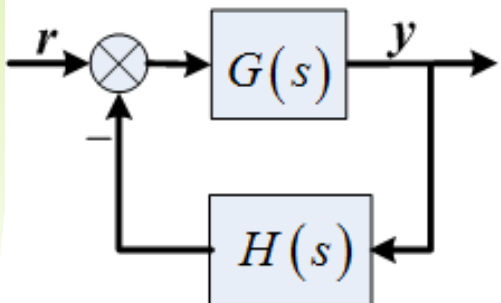


4.3.2 带宽设计

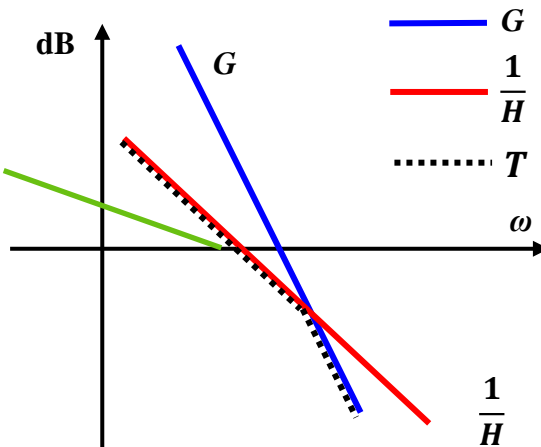
使用

设计思想 | 压低带宽的方法 | 拓展带宽的方法 | 设计实例

5 反馈校正



剪切频率前移



反馈校正的优点：

$$T(s) = \frac{G}{1+GH} = \begin{cases} \frac{1}{H}, & |GH| \gg 1, \text{ 即 } |G| \gg \left| \frac{1}{H} \right| \\ G, & |GH| \ll 1, \text{ 即 } |G| \ll \left| \frac{1}{H} \right| \end{cases}$$

当 G 和 $\frac{1}{H}$ 满足上述条件时，低频 $\frac{1}{H}$ 为主导，高频增益依靠 G 衰减。



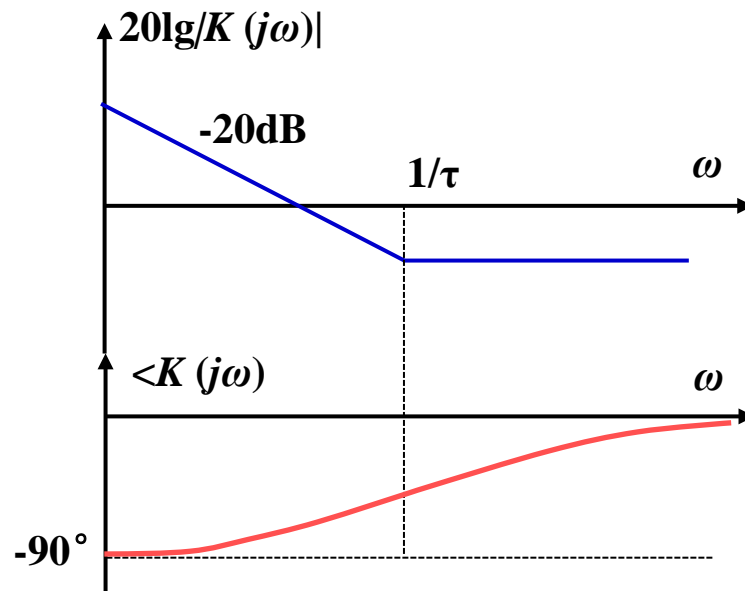
4.3.2 带宽设计

设计思想 | 压低带宽的方法 | 拓展带宽的方法 | 设计实例

6 PI控制器

PI控制器

$$\begin{aligned} K_{PI}(s) &= K_1 + K_1 \frac{1}{\tau} \frac{1}{s} \\ &= \frac{K_1(s + \frac{1}{\tau})}{s} \end{aligned}$$

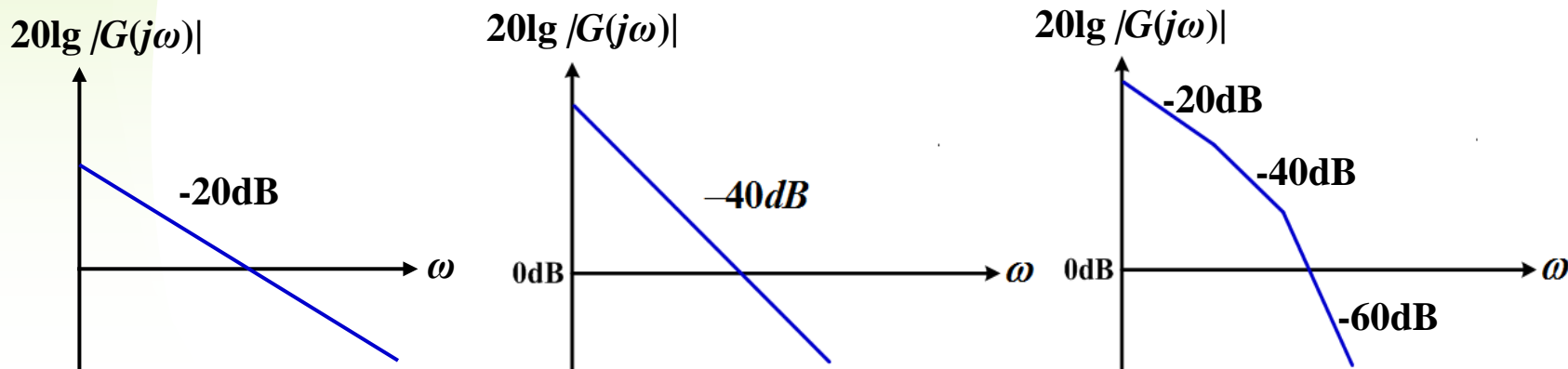




4.3.2 带宽设计

设计思想 | 压低带宽的方法 | **拓展带宽的方法**** | 设计实例

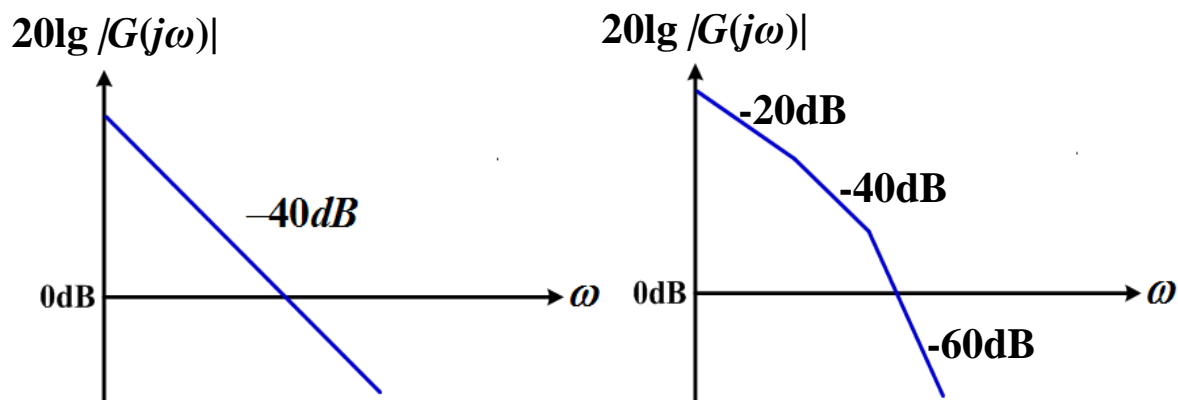
2 对象自身带宽很窄，虽然不存在鲁棒稳定性问题，但是系统的性能很难满足要求，因此必须在满足鲁棒稳定性的前提下，有效扩展系统的带宽。



对于后两类系统，一般相角滞后都很大，必须通过校正环节来**补偿相角**，然后同时调整增益，最终达到提升剪切频率并保证稳定（裕度）的目的。



拓展系统带宽的方法有哪些？



正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答



可以拓展系统带宽的方法有哪些

- ☒ A 提高增益
- ☒ B 超前环节
- ☒ C 近似微分环节
- ☒ D PD和PID控制器

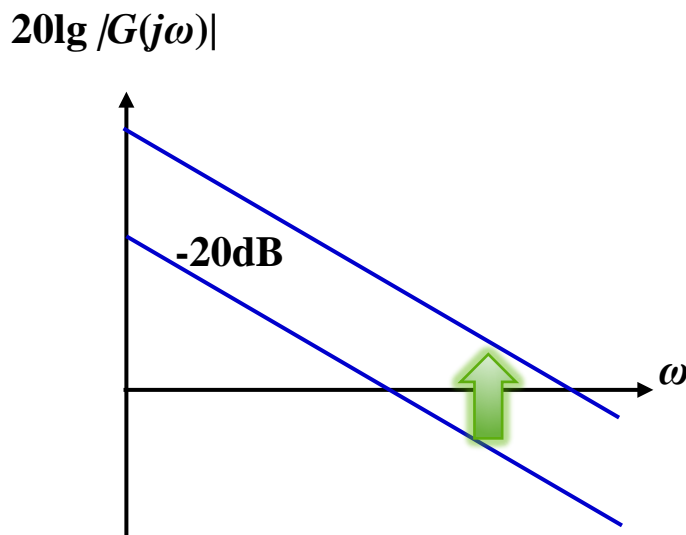
提交



4.3.2 带宽设计

设计思想 | 压低带宽的方法 | **拓展带宽的方法**** | 设计实例

1 提升增益



这种方式只适用于相位裕度足够大的系统，但实际系统高频相角一定会衰减，增益提升会受到限制。



4.3.2 带宽设计

设计思想 | 压低带宽的方法 | **拓展带宽的方法**** | 设计实例

2 超前环节

传递函数

$$G_c(s) = \frac{(1 + \alpha\tau s)}{(1 + \tau s)} = \frac{1}{\alpha} \frac{(s + z)}{(s + p)}$$

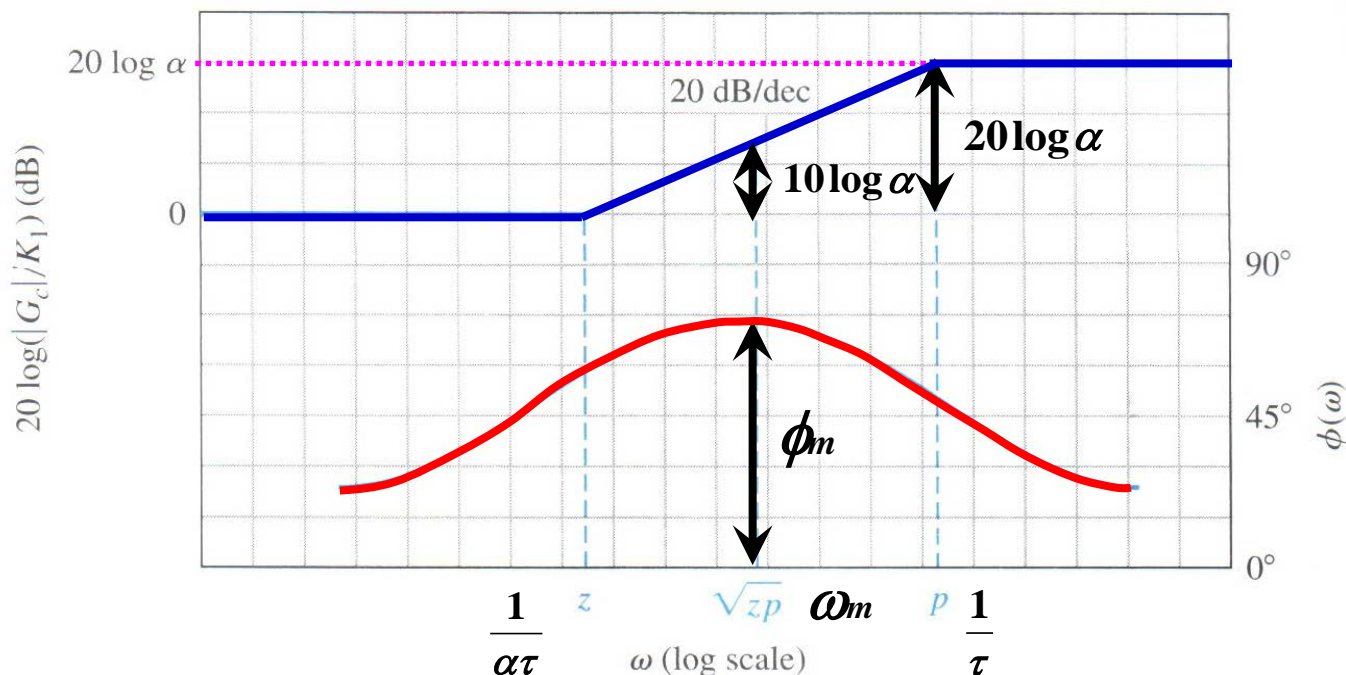
中心频率

$$\omega_m = \sqrt{zp} = \frac{1}{\tau\sqrt{\alpha}}$$

最大补偿相角

$$\phi_m = \tan^{-1} \frac{\alpha - 1}{2\sqrt{\alpha}} = \sin^{-1} \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1}$$

最大增益与相角关系 $\alpha = \frac{1 + \sin \phi_m}{1 - \sin \phi_m}$



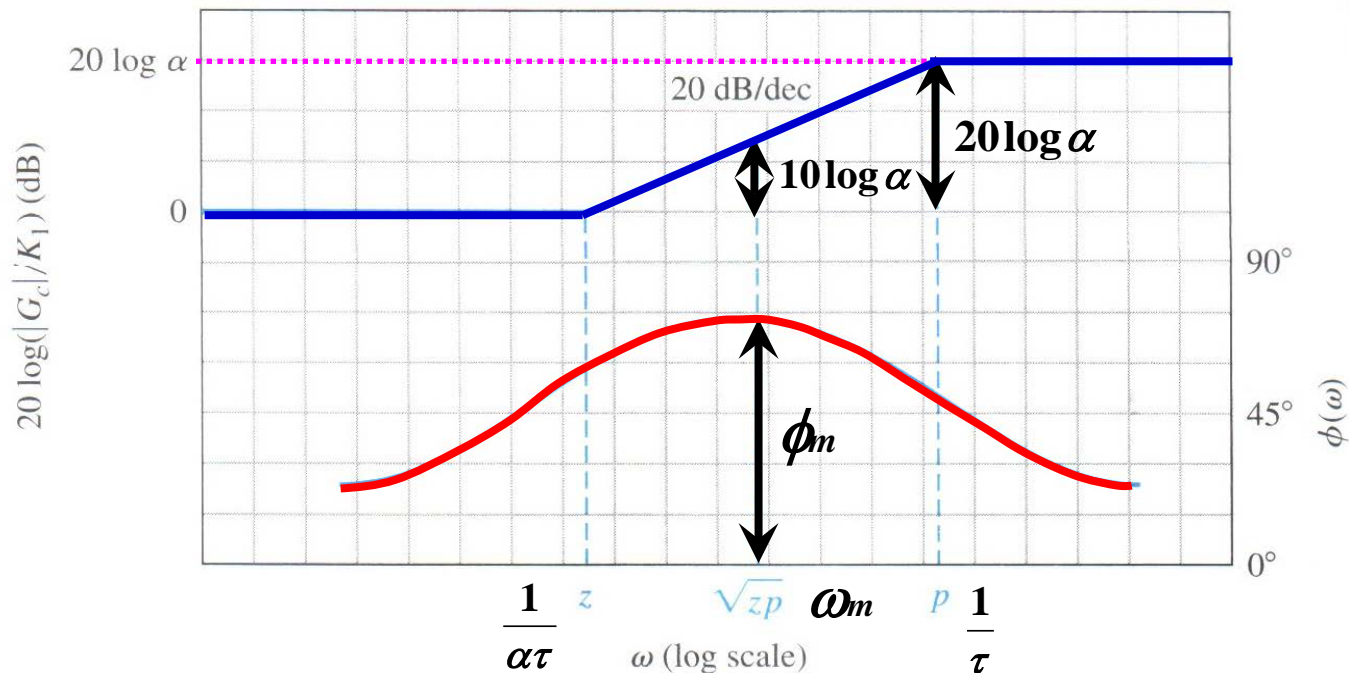


4.3.2 带宽设计

设计思想 | 压低带宽的方法 | 拓展带宽的方法** | 设计实例

2 超前环节

对于超前环节，我们要利用的是**相角**，其副作用是对高频增益的提升。

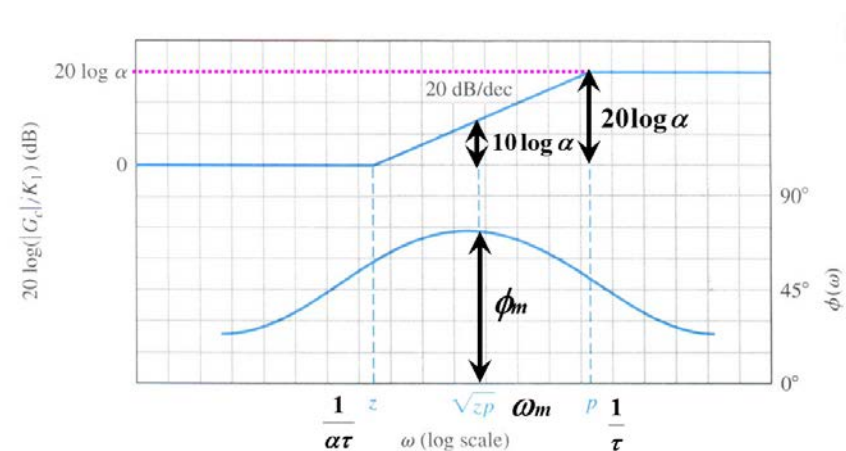


超前环节的中心频率要和期望的剪切频率一致，即 $\omega_m = \omega_c$ ，以保证补偿相角最大化。补偿后，还要调整系统增益，使 ω_c 处的增益变为 1 (0dB)。（用宽度换深度）



设计思想 | 压低带宽的方法 | 拓展带宽的方法** | 设计实例

一个超前环节最多能补偿多大的相角？



如果要补偿60度的相角，用一个超前环节好，还是用两个超前环节更好？

作答



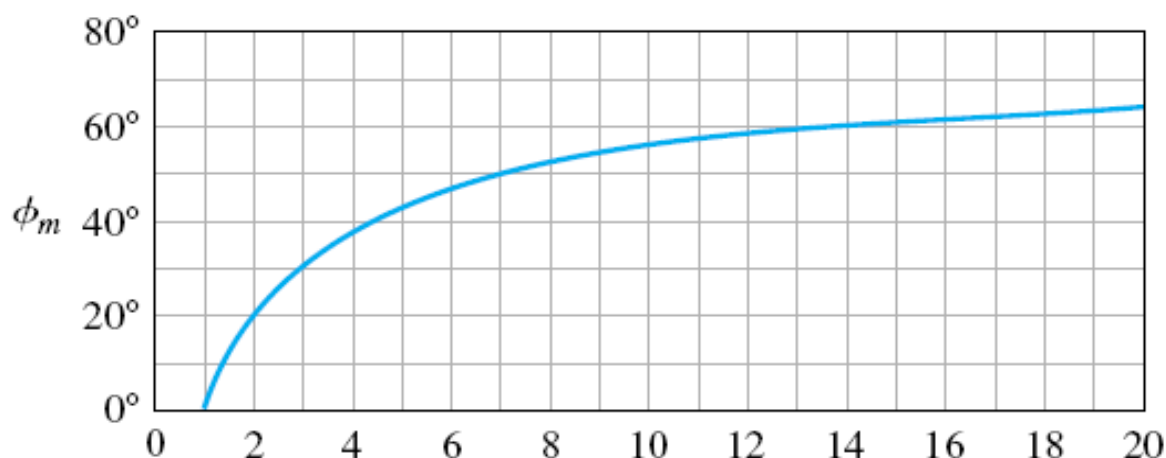
4.3.2 带宽设计

优化

设计思想 | 压低带宽的方法 | **拓展带宽的方法**** | 设计实例

一阶超前校正环节可提供的最大超前相角 ϕ_m 与增益 α 的关系

一个校正环节的
参数也有优化设计
的问题，大家
考虑其它环节是
否也有类似的优
化问题，比如滞
后环节



- 一阶超前校正环节可提供的**最大超前角不超过70°**，若需更大的超前角度，可串联多个环节；
- 为了避免用单个超前补偿相角过多导致高频增益被抬高的过大，尽量使用**小相角**（15-30）的超前环节来补偿相角；
- 超前环节适用于I型或者II型系统或者相位不足的系统，在应用时必须结合增益的提升；



4.3.2 带宽设计

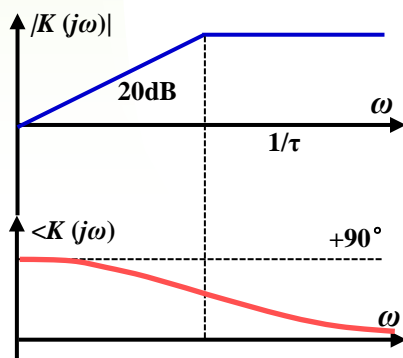
多样

设计思想 | 压低带宽的方法 | 拓展带宽的方法* | 设计实例

3 其它环节

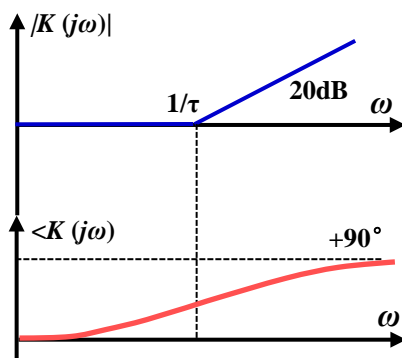
近似微分

$$K(s) = \frac{Ks}{1 + \tau s}$$



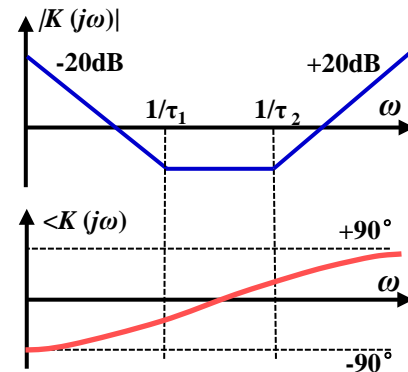
PD控制器

$$\begin{aligned} K_{PD}(s) &= K_1 + K_1 \tau s \\ &= K_1 (\tau s + 1) \end{aligned}$$



PID控制器

$$\begin{aligned} K_{PID}(s) &= \frac{K_1}{s} + K_2 + K_3 s \\ &= \frac{K_1 (\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}{s} \end{aligned}$$

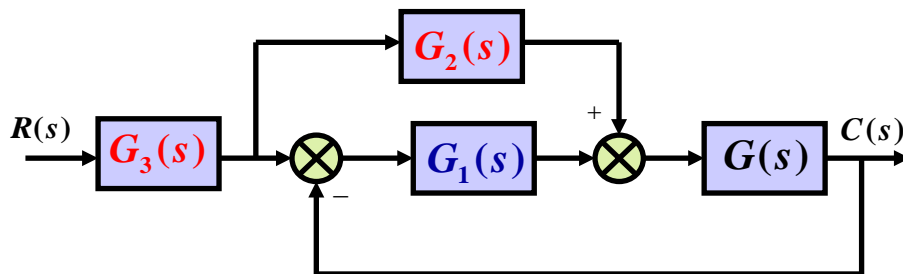
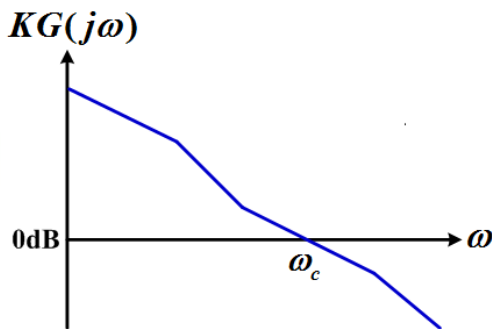
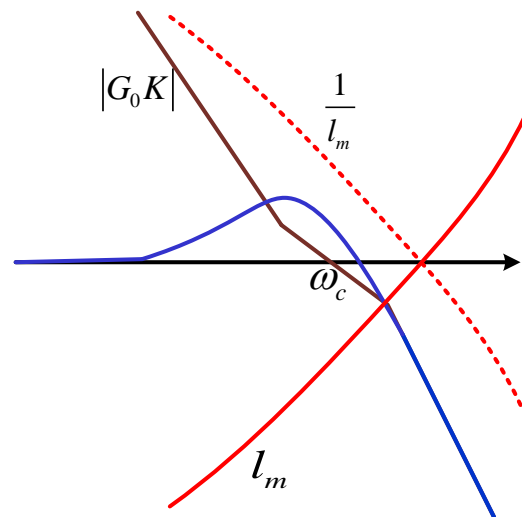




4.3.2 带宽设计

设计思想 | 压低带宽的方法 | **拓展带宽的方法*** | 设计实例

若剪切频率已经提高到极限了
(通过串联校正和反馈校正设计)，
但闭环带宽指标仍不满足要求。此
时还可以**采用顺馈和前置滤波器**来
提高整个系统的带宽（响应特性）。

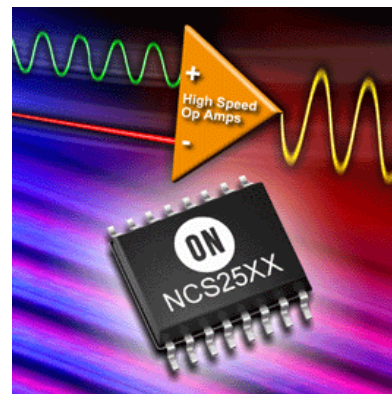
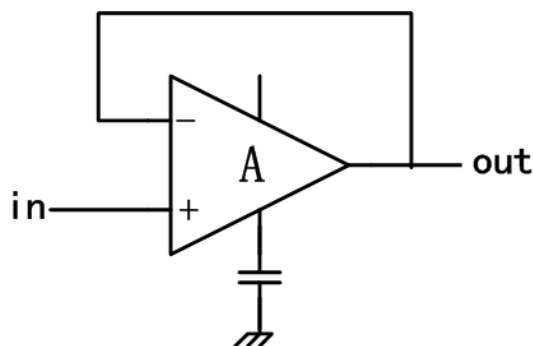




4.3.2 带宽设计

设计思想 | 压低带宽的方法 | 拓展带宽的方法 | 设计实例

◆ 例1：运算放大器的校正



- 放大器的增益 $A=100\text{dB}$ ，可以看做0型系统
- 要求放大器校正后在 1MHz 前穿越， 1MHz 以后放大器不确定性非常大，所以穿越频率要求为 $f_c=500\text{kHz}$ （压低带宽）

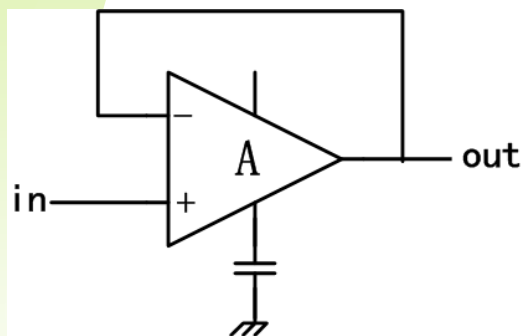
如何校正？



4.3.2 带宽设计

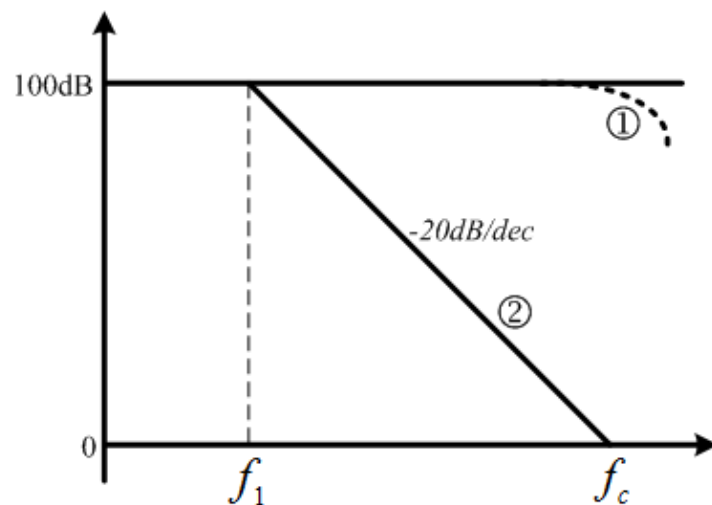
设计思想 | 压低带宽的方法 | 拓展带宽的方法 | 设计实例

◆ 例1：运算放大器的校正



采用惯性环节校正

$$G_c(s) = \frac{1}{\tau s + 1}, \tau = \frac{1}{f_1}$$



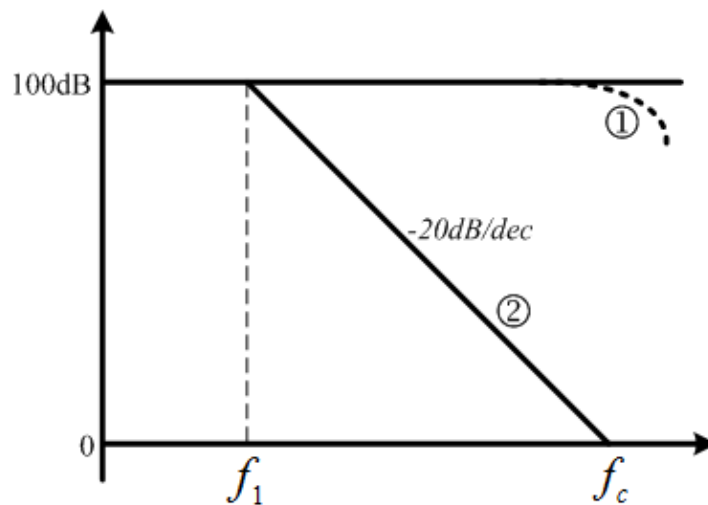
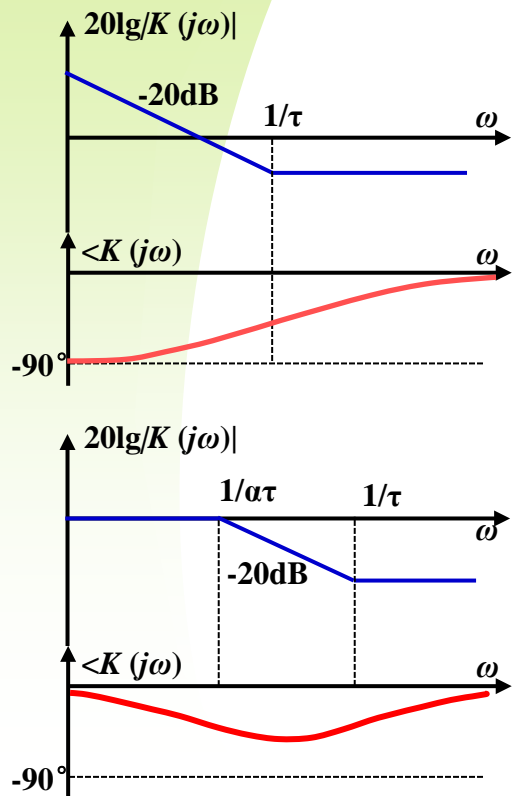
$$\frac{f_c}{f_1} = 100dB = 10^5$$

↓

$$f_1 = 5\text{Hz}$$



用积分、PI或滞后校正是否合适？



正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

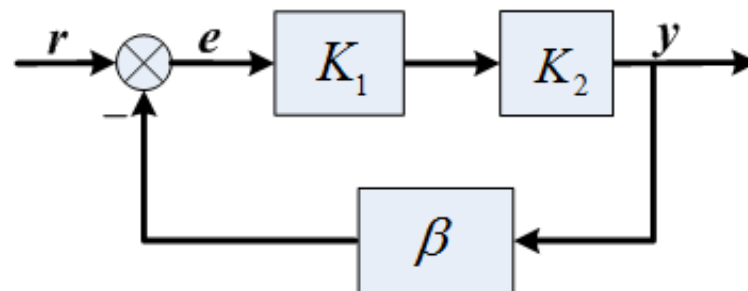
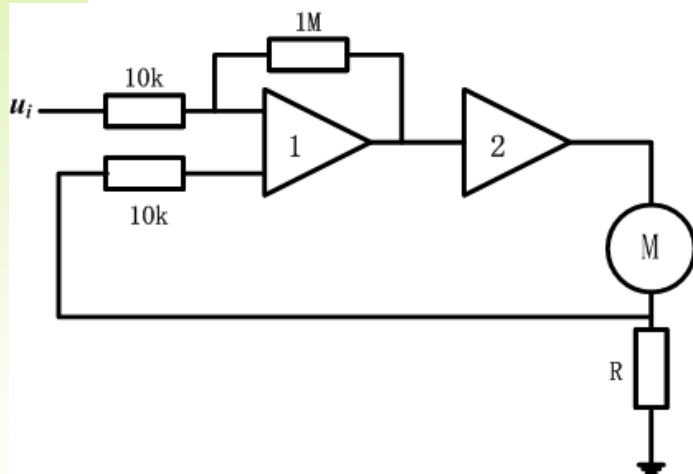
作答



4.3.2 带宽设计

设计思想 | 压低带宽的方法 | 拓展带宽的方法 | 设计实例

◆ 例2：功率放大器的设计



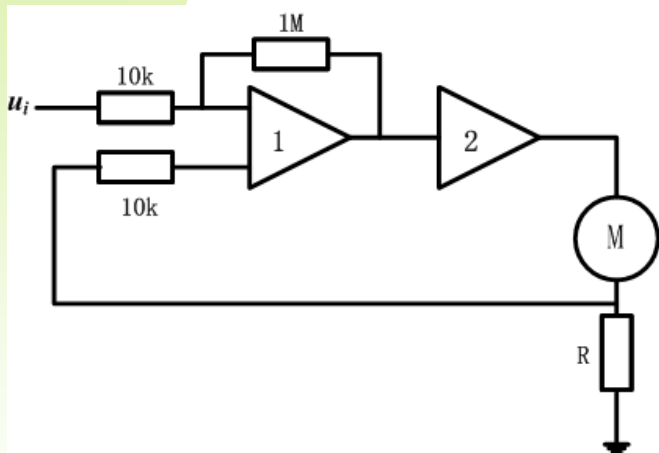
- 放大器驱动直流电机，采用非稳压电源供电，需要引入电流反馈以保证性能稳定（压低带宽）；
- 1为运算放大器，2为功率放大器



4.3.2 带宽设计

设计思想 | 压低带宽的方法 | 拓展带宽的方法 | 设计实例

◆ 例2：功率放大器的设计

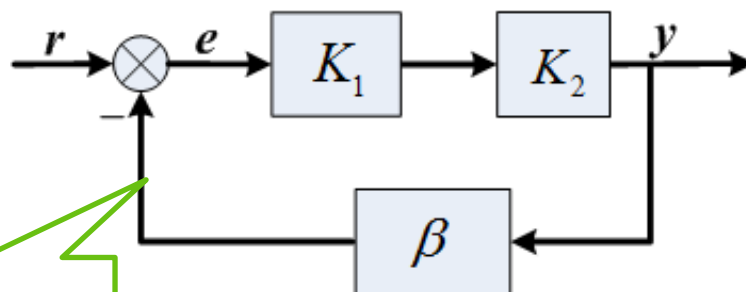


振荡!

$$K_1 = 100$$

$$K_2 = 1.57 \text{ A/V}$$

$$\beta = 0.6 \text{ V/A}$$



这个模型准吗?

- 高频增益没有衰减, 工作时会发生振荡
- 因此必须经过校正 使系统增益在40Hz 前衰减到0dB以下

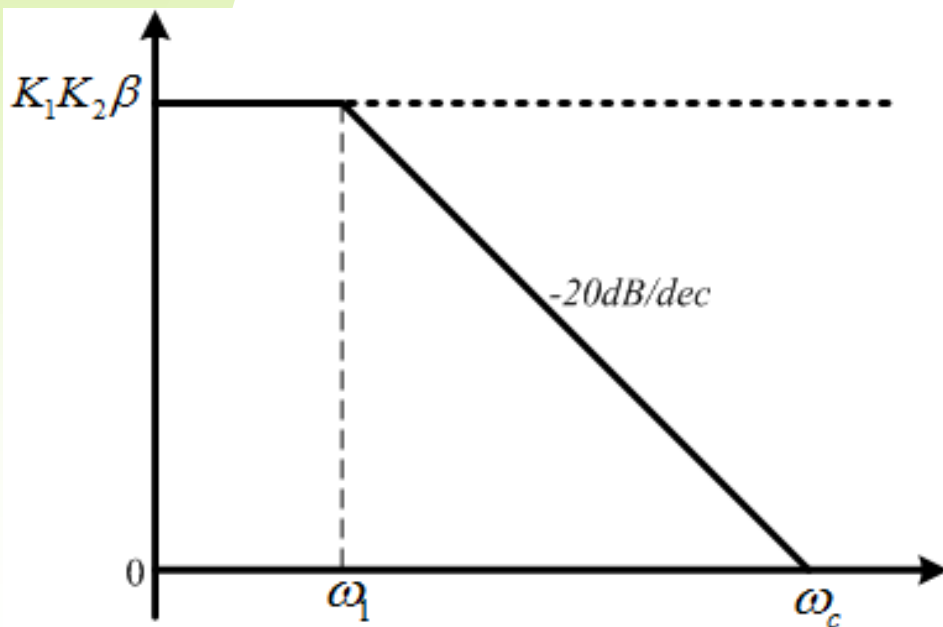
$$y = \frac{K_1 K_2}{1 + K_1 K_2 \beta} u_i = 1.6492 u_i$$



4.3.2 带宽设计

设计思想 | 压低带宽的方法 | 拓展带宽的方法 | 设计实例

◆ 例2：功率放大器的设计



同样采用惯性环节进行校正

$$G_c(s) = \frac{1}{\tau s + 1}, \tau = \frac{1}{\omega_1}$$

$$\omega_c = 250 \text{ rad/s}$$

$$\frac{\omega_c}{\omega_1} = K_1 K_2 \beta = 94.2$$

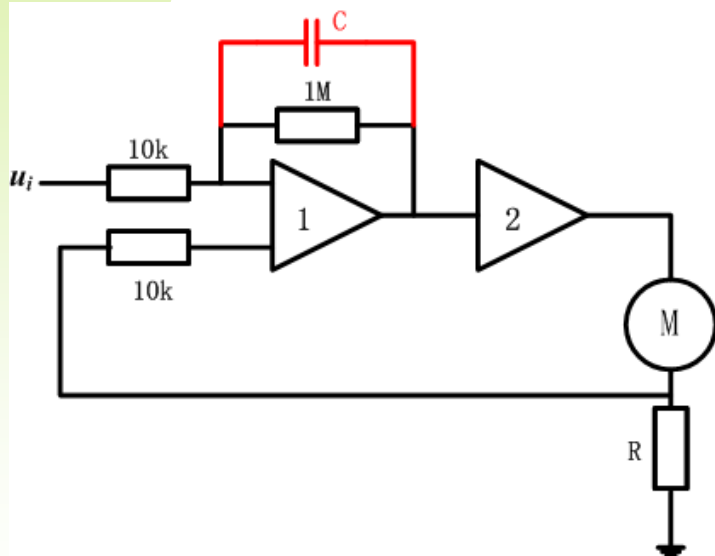
$$\tau = \frac{1}{\omega_1} = 0.3768 \text{ s}$$



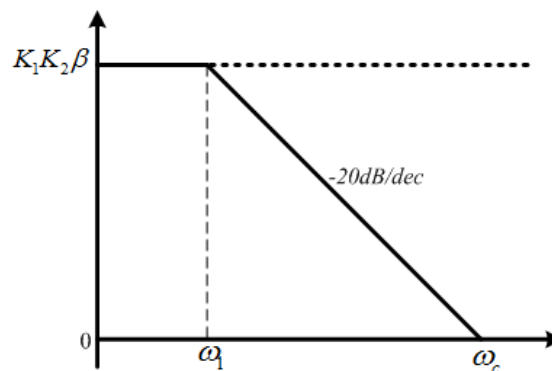
4.3.2 带宽设计

设计思想 | 压低带宽的方法 | 拓展带宽的方法 | 设计实例

◆ 例2：功率放大器的设计



并联一个电容就完成了校正，当然电容大小与要求并不完全一致，但不会对性能造成太大的影响



$$\tau = \frac{1}{\omega_1} = RC = 0.3768 \text{ s}$$



$$C = 0.3768 \text{ } \mu\text{F} \approx 0.44 \text{ } \mu\text{F}$$

$$\omega_1 = 2.27 \text{ rad/s}$$

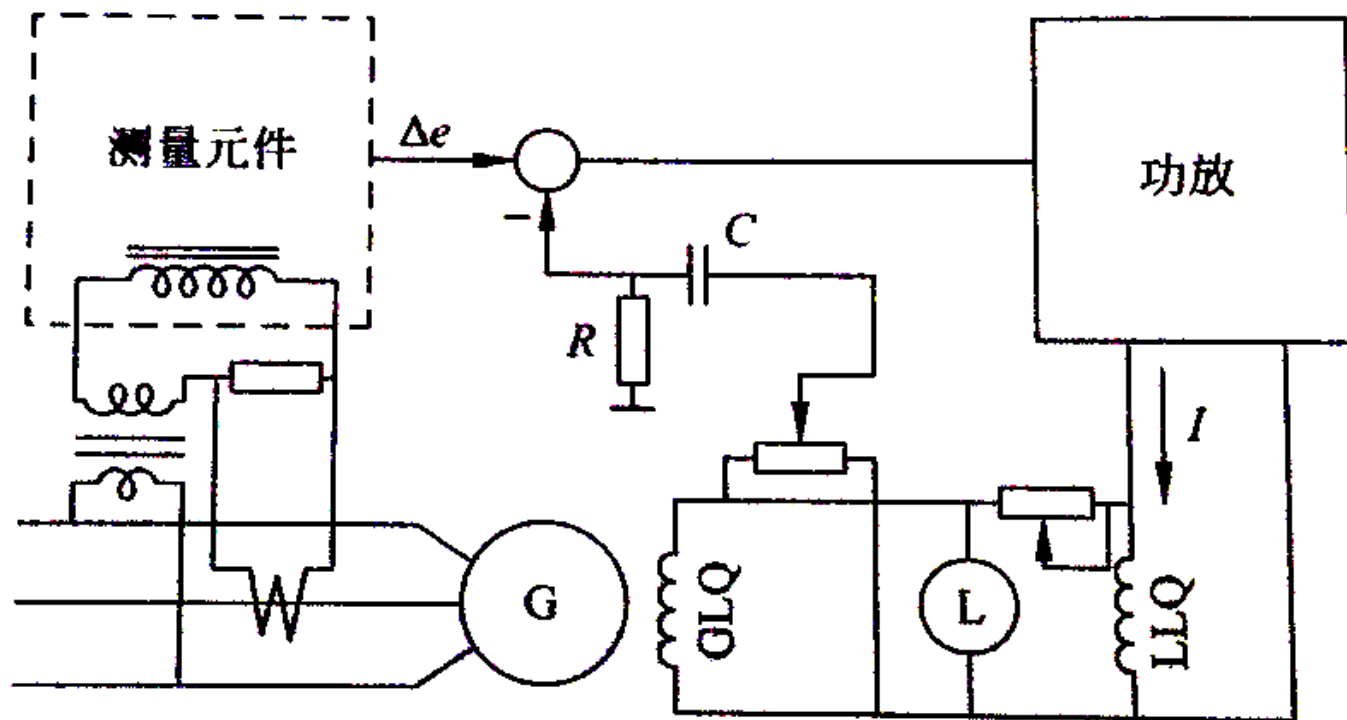
只能用0.44 μ F的标准电容，并非精确设计



4.3.2 带宽设计

设计思想 | 压低带宽的方法 | 拓展带宽的方法 | 设计实例

◆ 例3：电压调节器（发电机）



控制目的：通过励磁电压的调整来保证发电机输出电压恒定



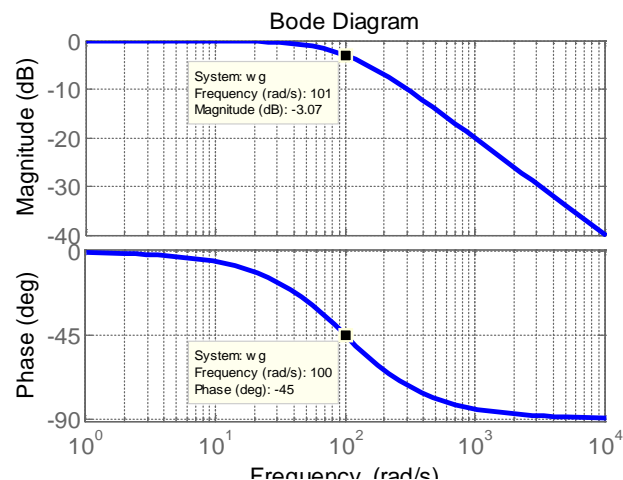
4.3.2 带宽设计

设计思想 | 压低带宽的方法 | 拓展带宽的方法 | 设计实例

◆ 例3：电压调节器

零型系统设计—— $G(s) = \frac{k}{T_p s + 1}$ (被控对象)

- 带宽： $\omega_c = \frac{3}{T_p}$
- 增益：根据穿越频率确定增益，再核定误差或精度要求
- 校正：高频 $G(s)$ 本身的衰减特性穿越0dB。低频利用反馈校正提升型别。

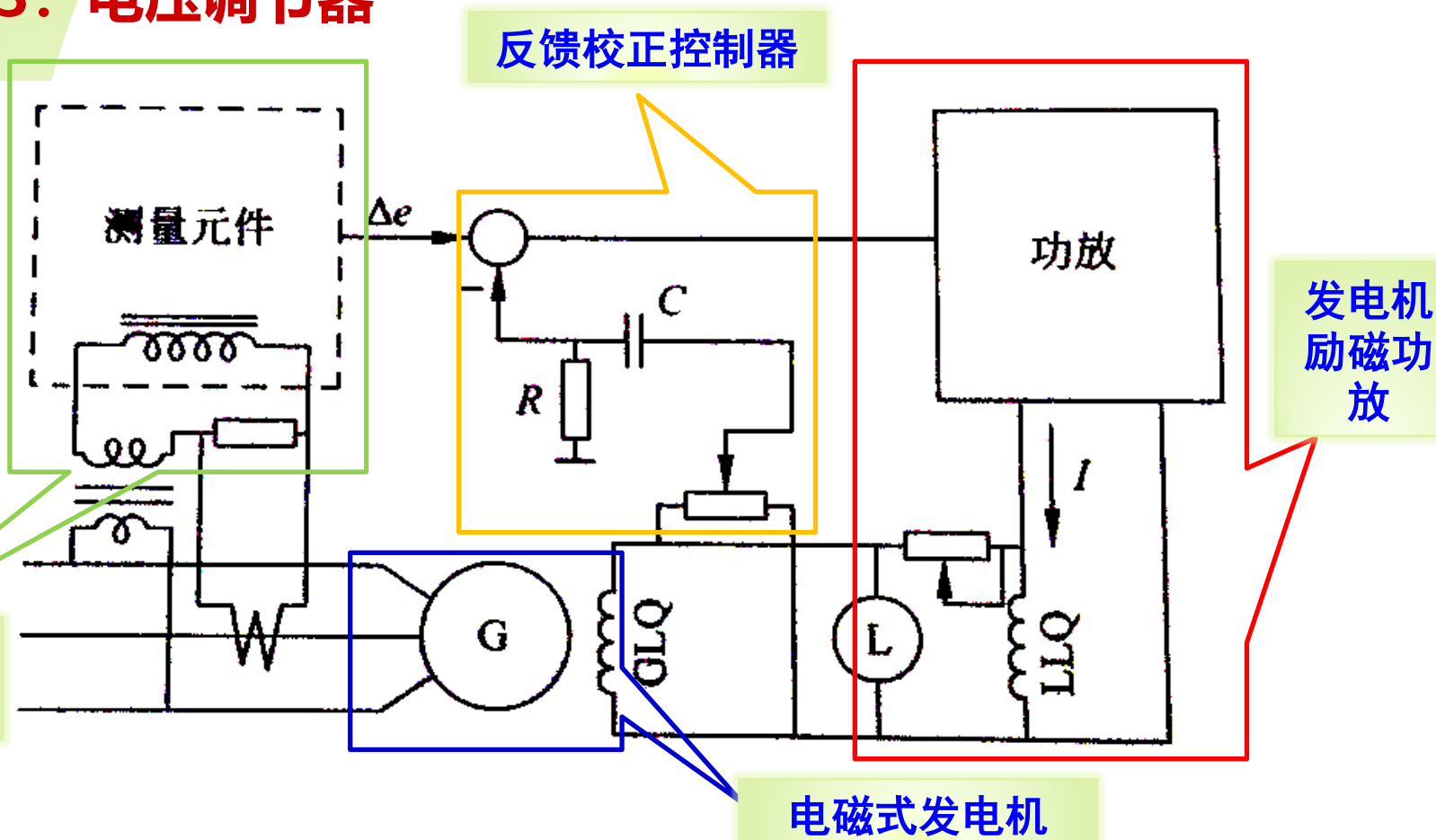




4.3.2 带宽设计

设计思想 | 压低带宽的方法 | 拓展带宽的方法 | 设计实例

◆ 例3：电压调节器



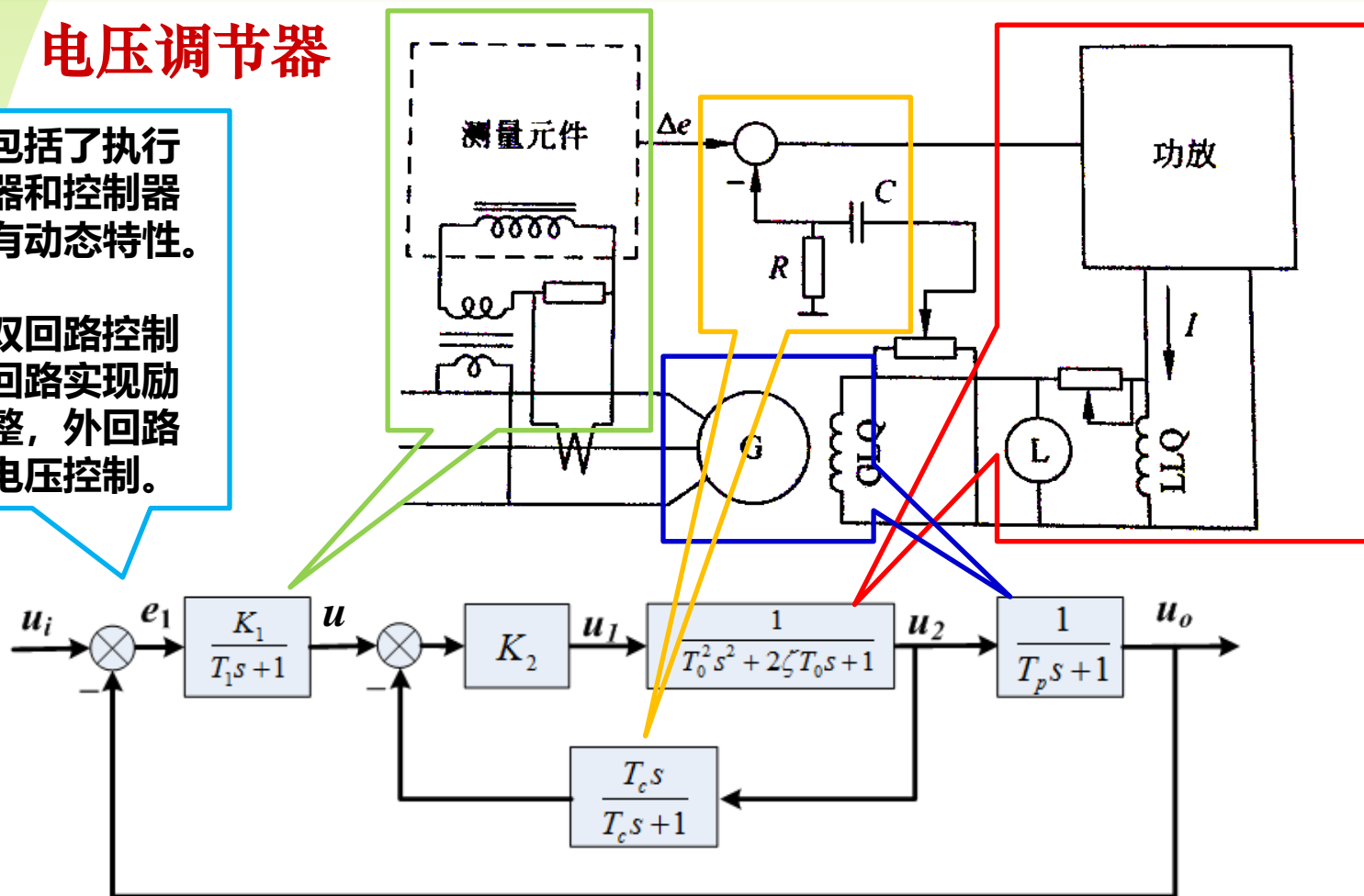


4.3.2 带宽设计

设计思想 | 压低带宽的方法 | 拓展带宽的方法 | 设计实例

◆ 例3：电压调节器

- 这个模型包括了执行器和传感器和控制器在内的所有动态特性。
- 这是一个双回路控制系统，内回路实现励磁电压调整，外回路实现输出电压控制。



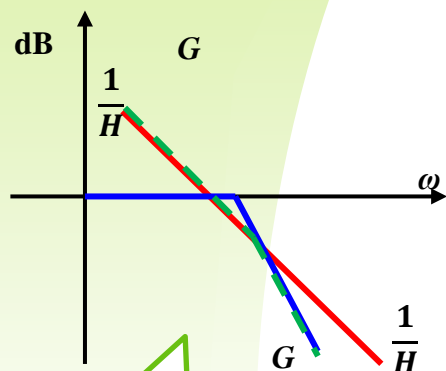


4.3.2 带宽设计

简化

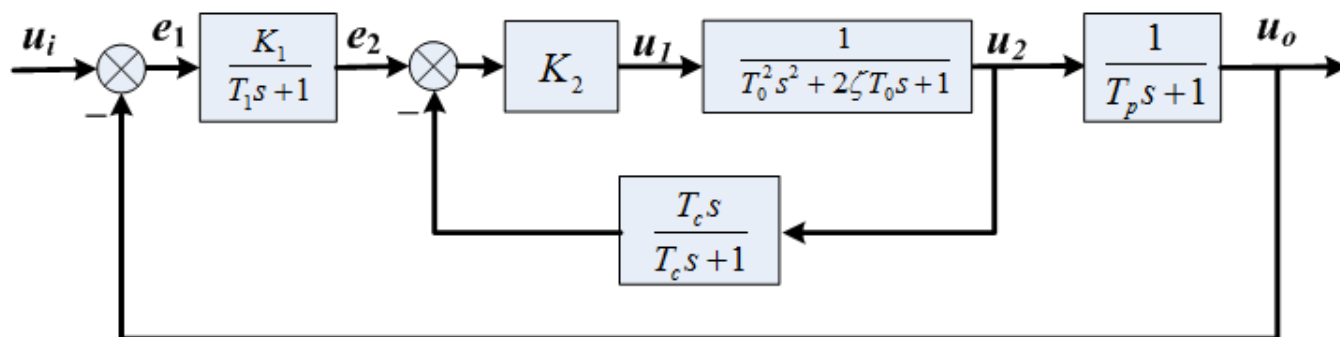
设计思想 | 压低带宽的方法 | 拓展带宽的方法 | 设计实例

例3：电压调节器

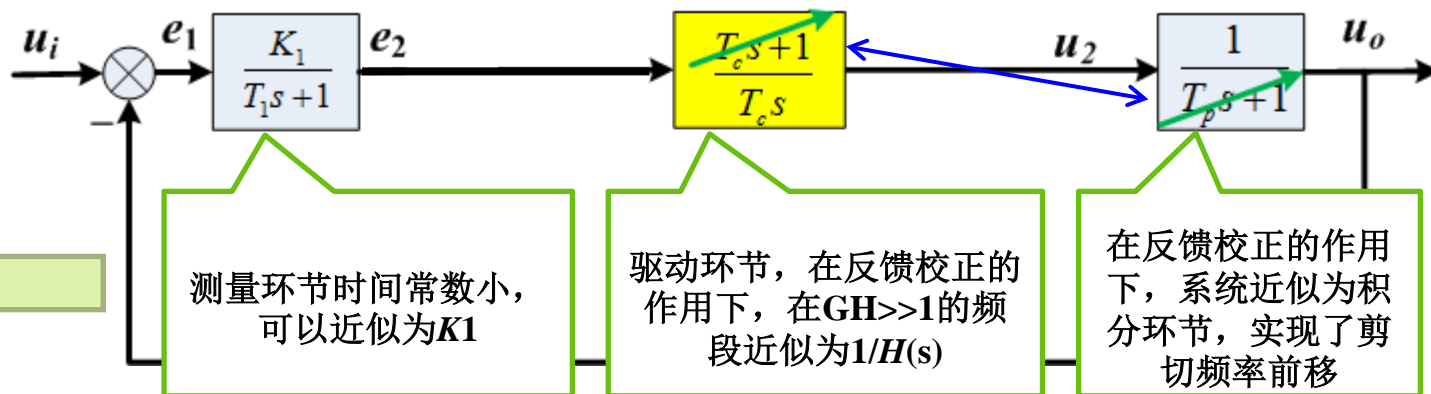


校正的结果，改变了型别，提高了精度，同时压低了穿越频率，保证了鲁棒稳定性

$$KG(s) \approx \frac{K_1}{T_c s}$$



内回路增益较高时





本章主要内容

A1

灵敏度和Bode积分约束

A2

对象的不确定性和鲁棒稳定性约束

A3

带宽设计约束

A4

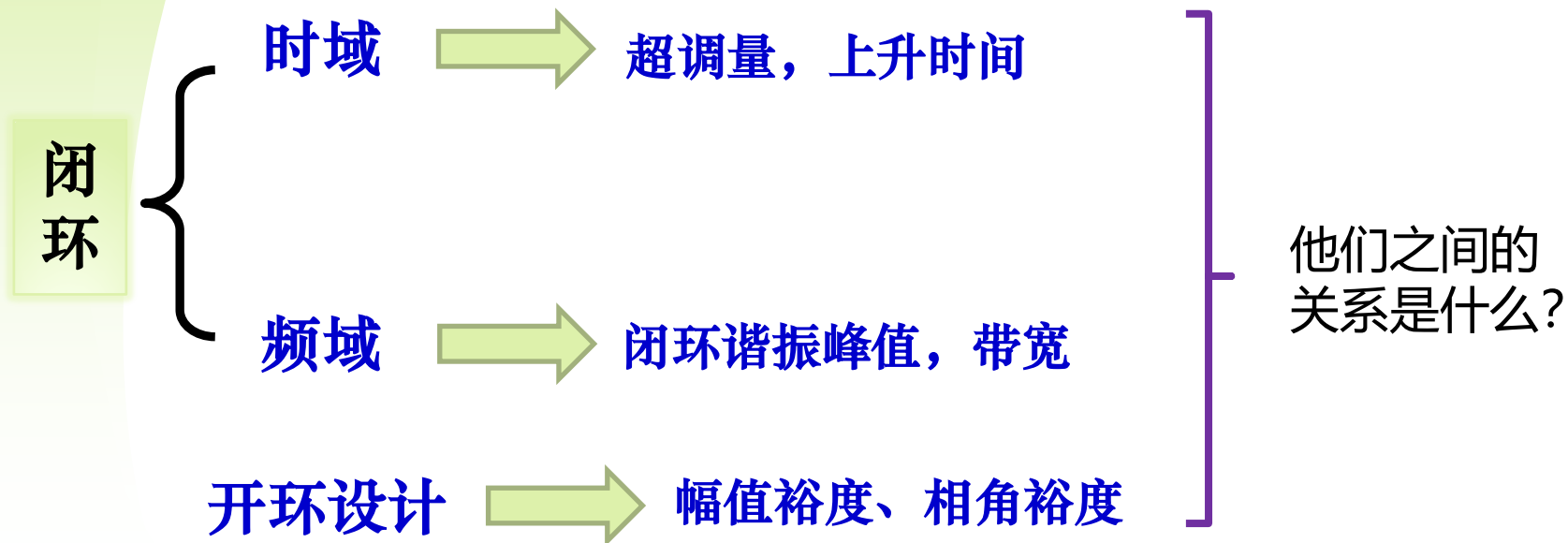
相对稳定性及其指标



4.4 相对稳定性

相对稳定性及其指标

相对稳定性是指闭环系统离开稳定边界的程度。

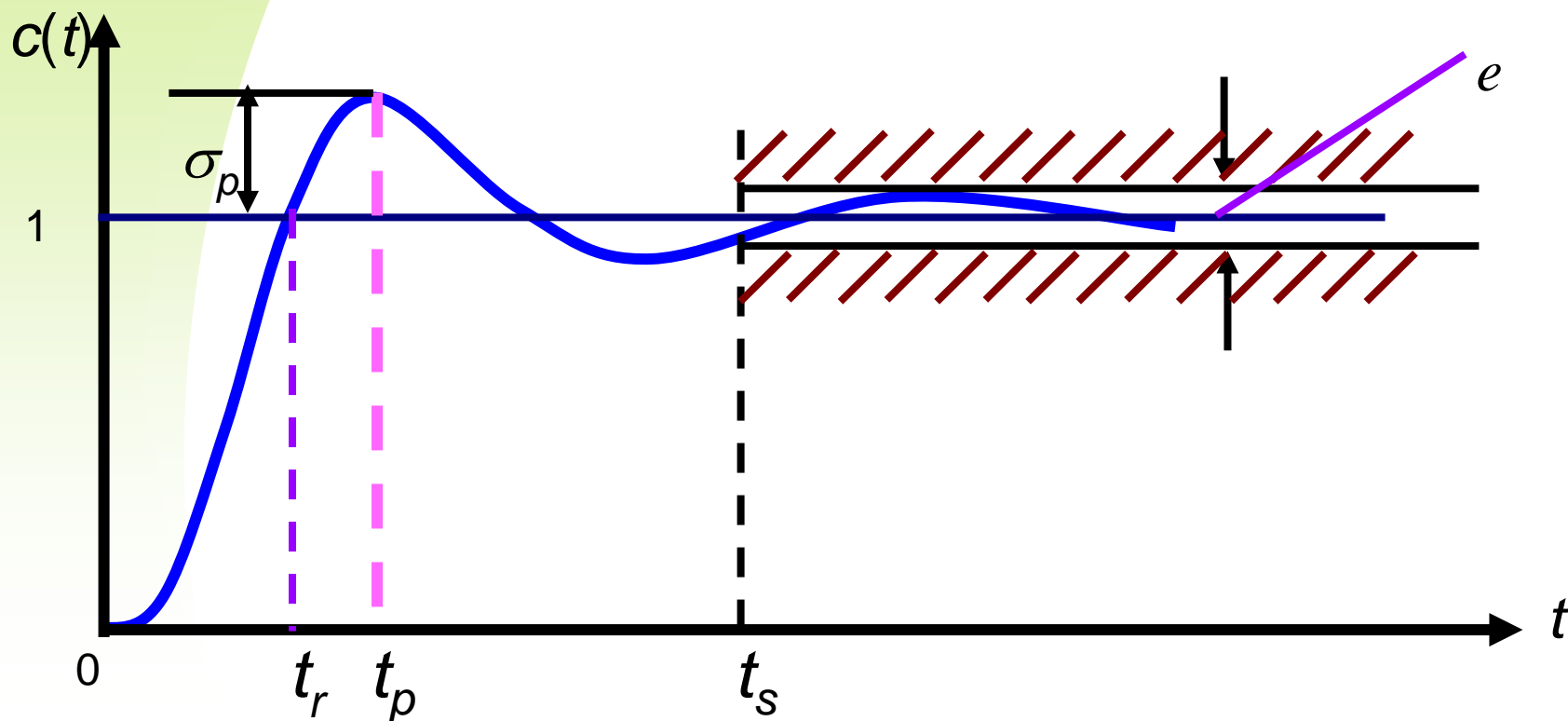


假若给定的是闭环频域指标和时域指标，如何转换成开环的频域指标（剪切频率、相位裕度和幅值裕度）？



4.4 相对稳定性

时域指标 | 闭环频域指标 | 相对稳定性指标 | 指标之间的关系



用 t_r , σ_p , t_p , t_s 四个性能指标来阶跃响应的好坏。

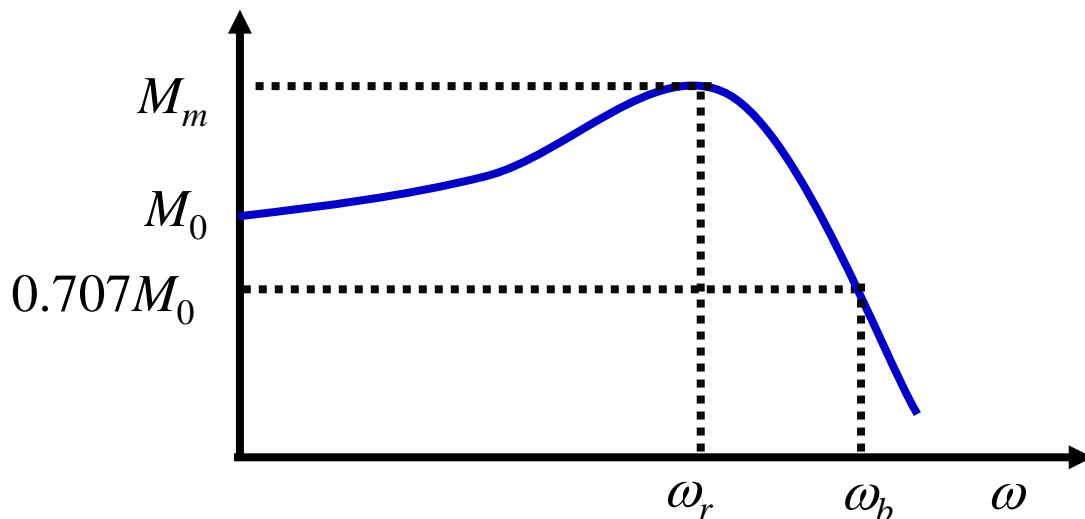


4.4 相对稳定性

时域指标 | 闭环频域指标 | 相对稳定性指标 | 指标之间的关系

■ 零频幅值特性 M_0
为 $\omega = 0$ 时的闭环幅
频特性值。

■ 谐振峰值 M_r ：幅频
特性极大值与零频幅
值之比 $M_r = M_m/M_0$



■ 谐振频率 ω_r ：出现谐振峰值时的频率。

■ 系统带宽 ω_b ：幅频特性值减小到 $0.707 M_0$ 时的频率，称为
带宽频率，用 ω_b 表示。频率范围 $0 \leq \omega \leq \omega_b$ 称为系统带宽。



4.4 相对稳定性

时域指标 | 闭环频域指标 | **相对稳定性指标** | 指标之间的关系

(1) **幅值裕度 h** ：令相角为 -180° 时对应的频率为 ω_g （相角穿越频率），频率为 ω_g 时对应的幅值 $A(\omega_g)$ 的倒数，定义为幅值裕度 h ，即

$$h = 1 / A(\omega_g) \qquad 20\lg h = -20\lg A(\omega_g)$$

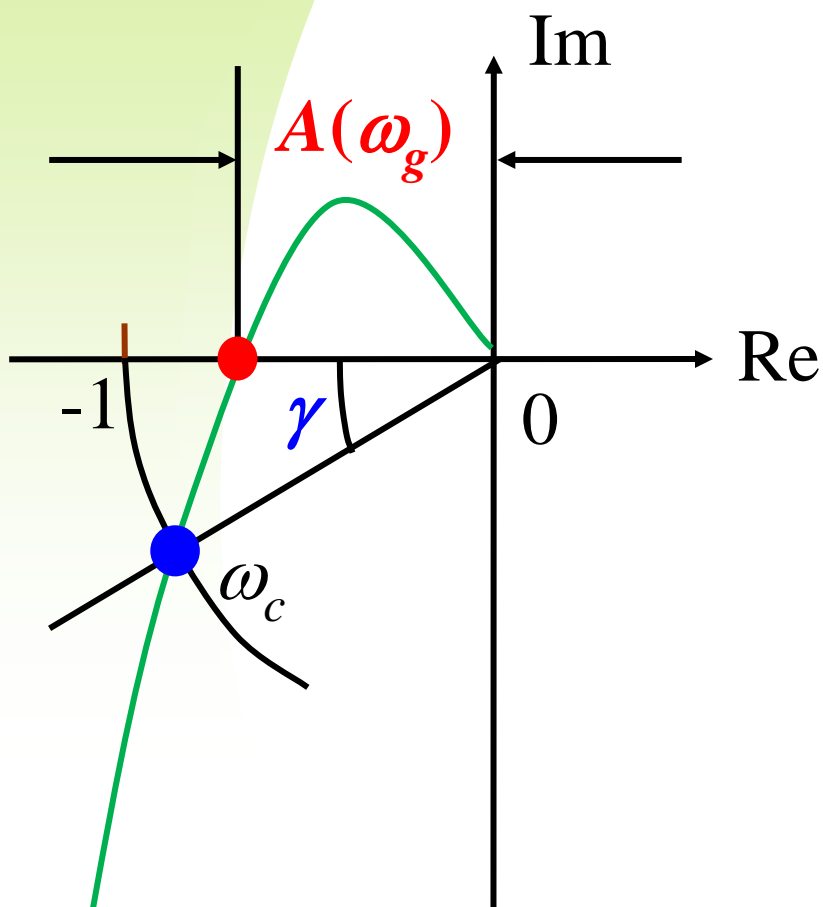
(2) **相角裕度 γ** ：令幅频特性过零分贝时的频率为 ω_c （幅值穿越频率），则定义相角裕度 γ 为

$$\gamma = 180^\circ + \varphi(\omega_c)$$



4.4 相对稳定性

时域指标 | 闭环频域指标 | **相对稳定性指标** | 指标之间的关系



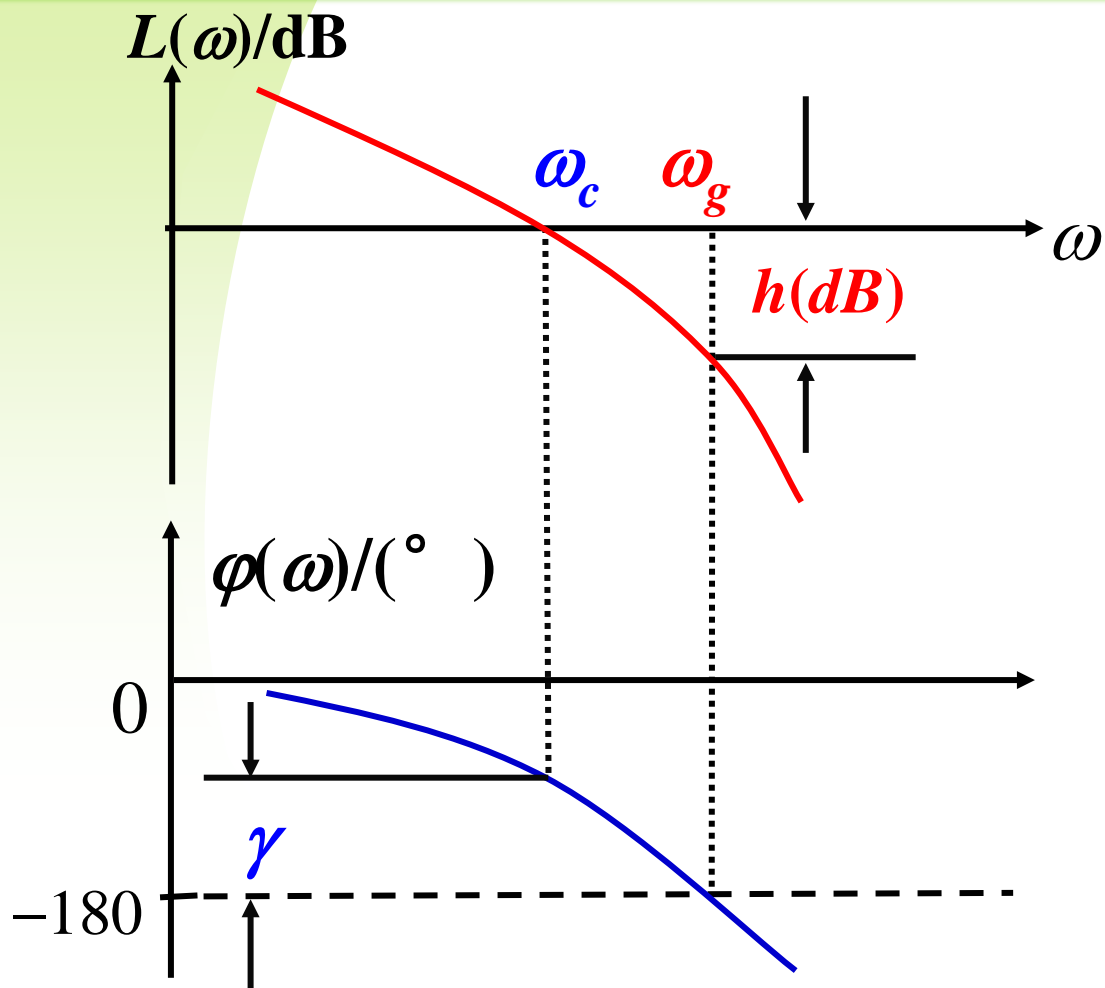
h 具有如下含义：如果系统是稳定的，那么系统的开环增益增大到原来的 h 倍时，则系统就处于临界稳定了。

γ 具有如下含义：如果系统是稳定的，那么系统的开环相频特性变化 γ 角度时，则系统就处于临界稳定了。



4.4 相对稳定性

时域指标 | 闭环频域指标 | **相对稳定性指标** | 指标之间的关系



h 具有如下含义：如果系统是稳定的，那么系统的开环增益增大到原来的 h 倍时，则系统就处于临界稳定了。

γ 具有如下含义：如果系统是稳定的，那么系统的开环相频特性变化 γ 角度时，则系统就处于临界稳定了。



4.4 相对稳定性

时域指标 | 闭环频域指标 | 相对稳定性指标 | 指标之间的关系**

- 开环频域指标和时域指标的关系 γ ω_c
 - (1) γ 越大, $\sigma\%$ 越小; γ 越小, $\sigma\%$ 越大。一般希望 $30^\circ \leq \gamma \leq 70^\circ$
 - (2) ω_c 越大, t_s 越小;
- 闭环频域指标和时域指标的关系 M_r ω_r ω_b
 - (1) M_r 反映系统的平稳性。
 - (2) ω_b 反映系统的响应速度。
- 开环频域指标和闭环频域指标的关系

$$M_r \quad \gamma \quad \omega_b \quad \omega_c$$



4.4 相对稳定性

时域指标 | 闭环频域指标 | 相对稳定性指标 | 指标之间的关系**

➤ 开环频域指标、闭环频域与时域指标的关系

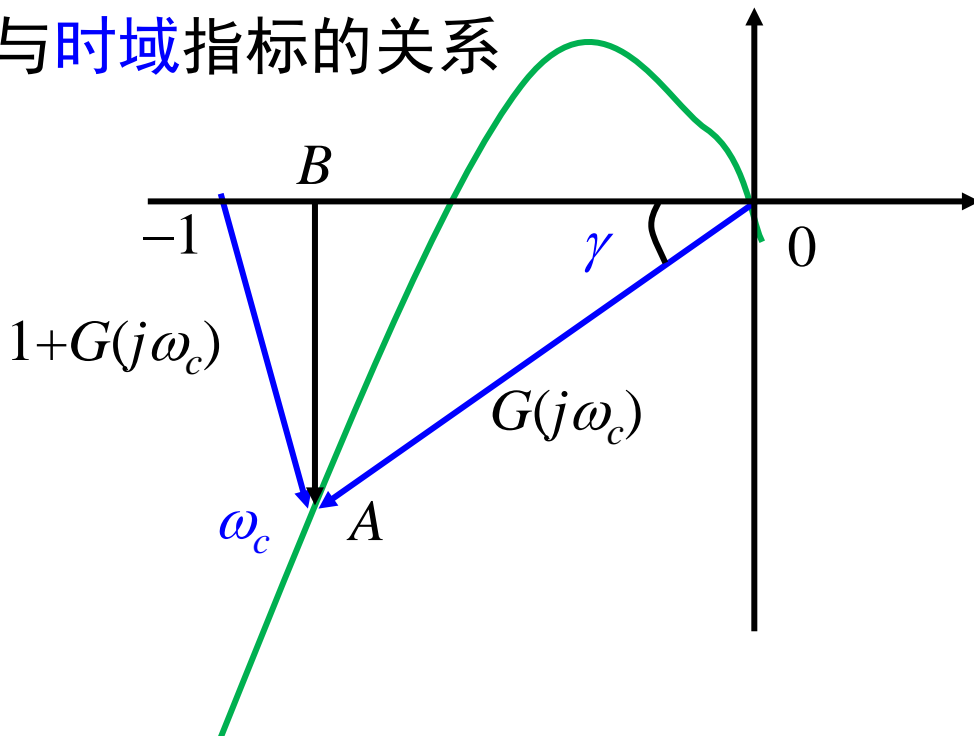
1. γ 与 M_r 的关系

一般, M_r 出现在 ω_c 附近, 就是说用 ω_c 代替 ω_r 来计算 M_r , 并且 γ 较小, 可近似认为

$$AB = |1 + G(j\omega_c)|$$

于是有

$$M_r \approx \frac{|G(j\omega_c)|}{|1 + G(j\omega_c)|} \approx \frac{|G(j\omega_c)|}{AB} = \frac{|G(j\omega_c)|}{|G(j\omega_c)| \cdot \sin \gamma} = \frac{1}{\sin \gamma}$$





4.4 相对稳定性

时域指标 | 闭环频域指标 | 相对稳定性指标 | 指标之间的关系**

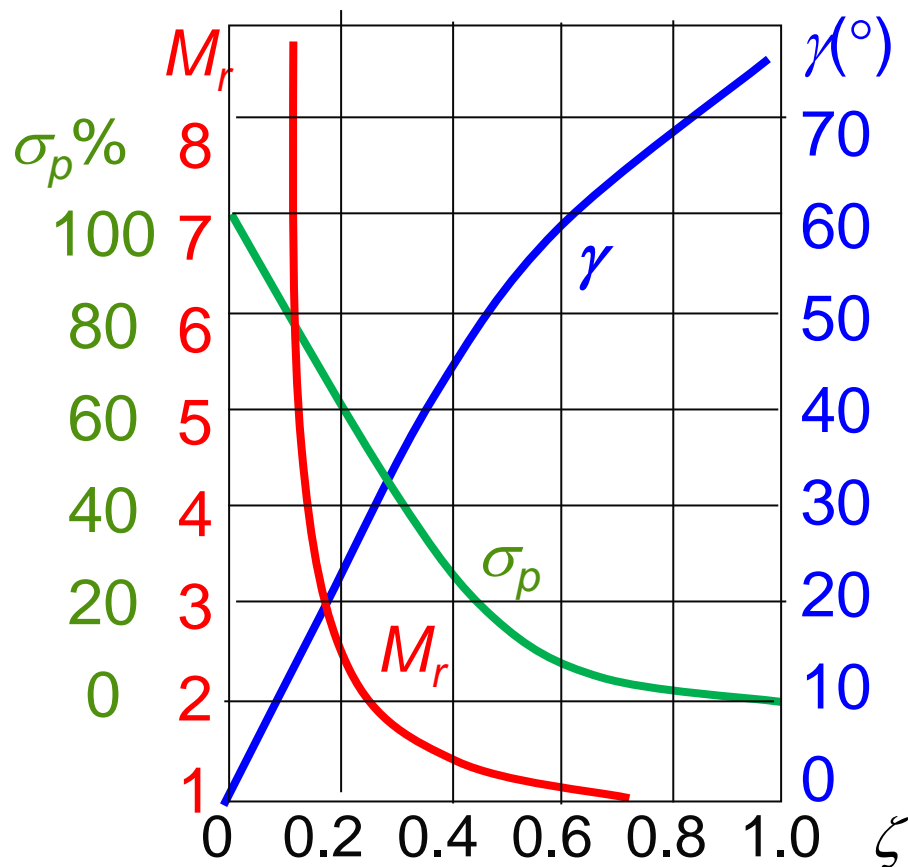
➤ 开环频域指标、闭环频域与时域指标的关系

1. γ 与 M_r 的关系

$$M_r \approx \frac{1}{\sin \gamma}$$

2. M_r 与 $\sigma_p\%$ 的关系

$$M_r = \frac{1}{2\zeta \sqrt{1-\zeta^2}}$$





4.4 相对稳定性

时域指标 | 闭环频域指标 | 相对稳定性指标 | 指标之间的关系**

3. M_r 、 ω_b 与 t_s 的关系

$$\Phi(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

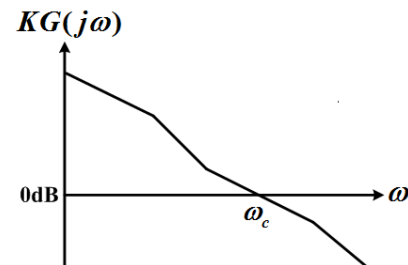
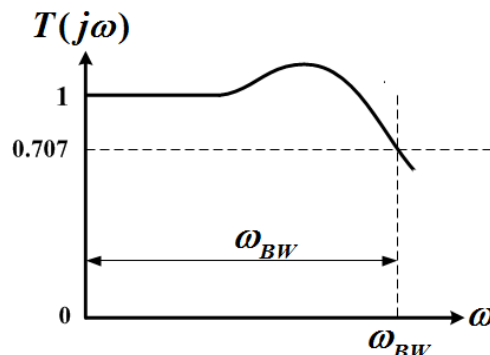
$$M(\omega_b) = \frac{\omega_n^2}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega_b^2)^2 + 4(\zeta\omega_n\omega_b)^2}} = 0.707$$

$$\omega_b = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2} + \sqrt{2 - 4\zeta^2 + 4\zeta^4}$$

$$t_s = \frac{3}{\zeta\omega_n} \quad \omega_b \cdot t_s = \frac{3}{\zeta} \sqrt{1 - 2\zeta^2} + \sqrt{2 - 4\zeta^2 + 4\zeta^4}$$

↑ ↓

➤ 增大 ω_b , 可以减小 t_s





4.4 相对稳定性

时域指标 | 闭环频域指标 | 相对稳定性指标 | 指标之间的关系**

4. ω_b 与 ω_c 的关系

对于二阶系统，有

$$\frac{\omega_b}{\omega_c} = \sqrt{\frac{1 - 2\zeta^2 + \sqrt{2 - 4\zeta^2 + 4\zeta^4}}{-2\zeta^2 + \sqrt{4\zeta^4 + 1}}}$$

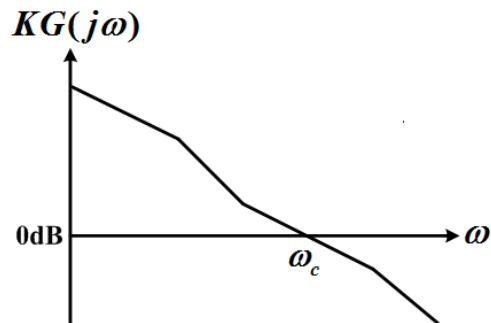
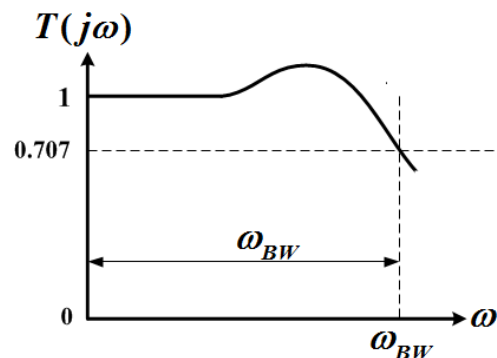
可见， ω_b 与 ω_c 的比值是 ζ 的函数，有

$$\zeta = 0.4 \quad \omega_b = 1.6\omega_c$$

$$\zeta = 0.7 \quad \omega_b = 1.55\omega_c$$

对于高阶系统，初步设计时，可近似取

$$\omega_b = 1.6\omega_c$$





总结

本节课内容回顾

- 介绍两种情形下带宽的设计原则;
- 重点介绍带宽设计方法（压低和拓展）及副作用;
- 通过示例说明具体设计时的灵活处理;
- 介绍了开环稳定裕度及其与闭环性能之间的关系。



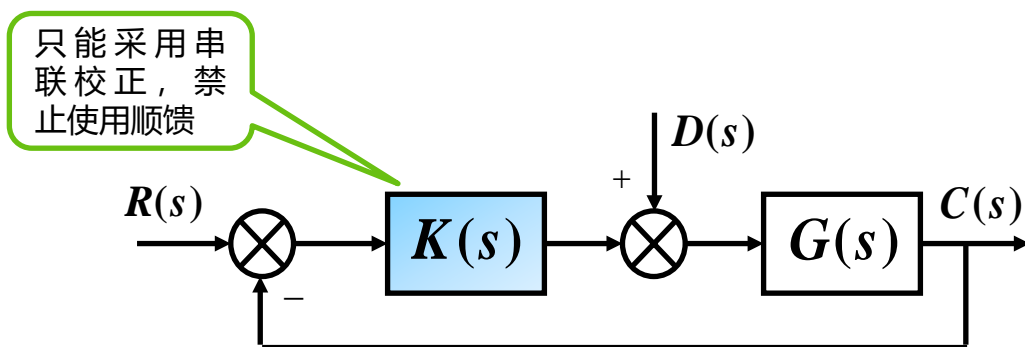
第17次 课后作业

1 必选作业

17-1 仿真题：对给定系统采用合适的带宽设计方法，剪切频率自行设定，相位裕度为40-60度之间，幅值裕度不小于2，尽可能提升系统的双十指标；

(1) $G(s) = \frac{s+2}{s+10} e^{-0.1s}$ 保证系统跟踪阶跃指令无静差

(2) $G(s) = \frac{1}{s(0.2s+1)(0.02s+1)}$



17-2 自学4.4节，理解时域指标与频域指标，闭环频域指标与开环频域指标之间的关系；



第17次 课后作业

2 可选作业

- 17.1 从课上讲过的各种方法，试分析压低带宽和拓展带宽本质是什么，看看是否还有课上没有提到过的方法；
- 17.2 总结一下滞后环节不同的用途；
- 17.3 滞后环节用于提升系统低频增益时，其相角损失的副作用也能像超前环节那样优化吗，具体应该怎么做？
- 17.4 如果人生也有带宽，你觉得应该如何设计？
- 17.5 说一说你对控制系统设计的三个要素的理解？



拓展思考

自己总结，无需上交

- a. 控制理论和方法的能力边界（控制不是万能的）；
- b. 每一种控制方法的利与弊（硬币总有正反两面）；
- c. 控制系统中的各种约束与限制（你不能随心所欲）；
- d. 各种方法都有自己的适用条件（看准了再用）
- e. 控制系统设计中的优化问题（处处有优化）；
- f. 哪些是针对信号的，哪些又是针对系统的，如何进行转化（信号与系统）；
- g. 控制系统中的各种性能指标（为什么这么多）；
- h. 控制系统设计中的各种概念和原理给我们的人生启发（你可以控制好人生）；
- i. 控制系统中各种概念的联系与区别（对比才能深刻理解）
- j. 控制系统中主动和被动的办法（上工治未病）；
- k. 分析仿真和实验，理论与实际的差别（纵然无法解决，也要给出解释）；
- l. 开环与闭环的特性（为什么一定要闭环）；
- m. 控制设计中可用的信息有哪些（信息有多重要）



拓展思考

自己总结，无需上交

- n 反馈的力量，闭环的作用（日用而不知）；
- o 时域和频域的联系与区别（形式不同，本质相通）；
- p 高与低，宽与窄，谁相对于谁（相对与绝对）；



Thank You !



哈尔滨工业大学控制与仿真中心