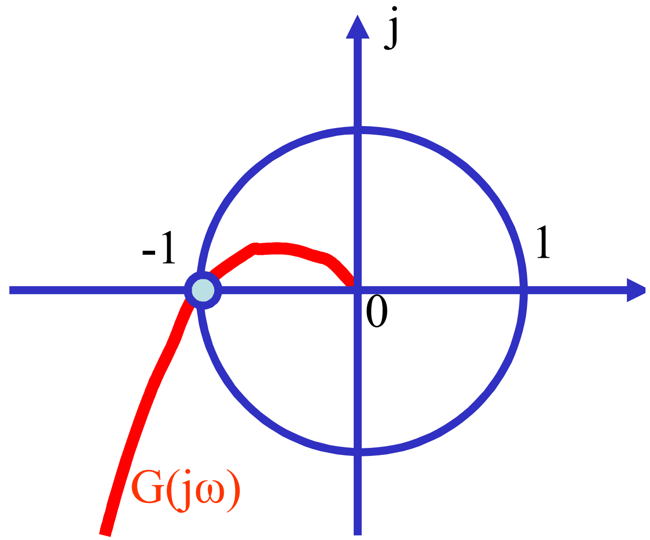
第五章 线性系统的频域分析法

5.4 稳定裕度

开环系统的Γ_{GH} 曲线通过(-1,j0)点时，则闭环系统临界稳定。



特点：

$G(j\omega)\ H(j\omega)$曲线过(-1,j0)点时，

$$\left.\begin{array}{l}|G(j\omega)H(j\omega)|=1\\ \angle G(j\omega)H(j\omega)=-180^{o}\end{array}\right\}$$ 同时成立！

希望曲线离(-1,j0)点近点？远点？

5.4 稳定裕度

在**闭环系统稳定**的前提下：

- 开环系统的Γ_{GH} 曲线离(-1, j0)点越远，则闭环系统的稳定程度越高；

- 开环系统的Γ_{GH} 曲线离(-1, j0)点越近，则闭环系统的稳定程度越低；

通过Γ_{GH} 曲线对点(-1, j0)的靠近程度来度量稳定性能，其定量表示为相角裕度γ和幅值裕度h 。

5.4 稳定裕度

一、相角裕度

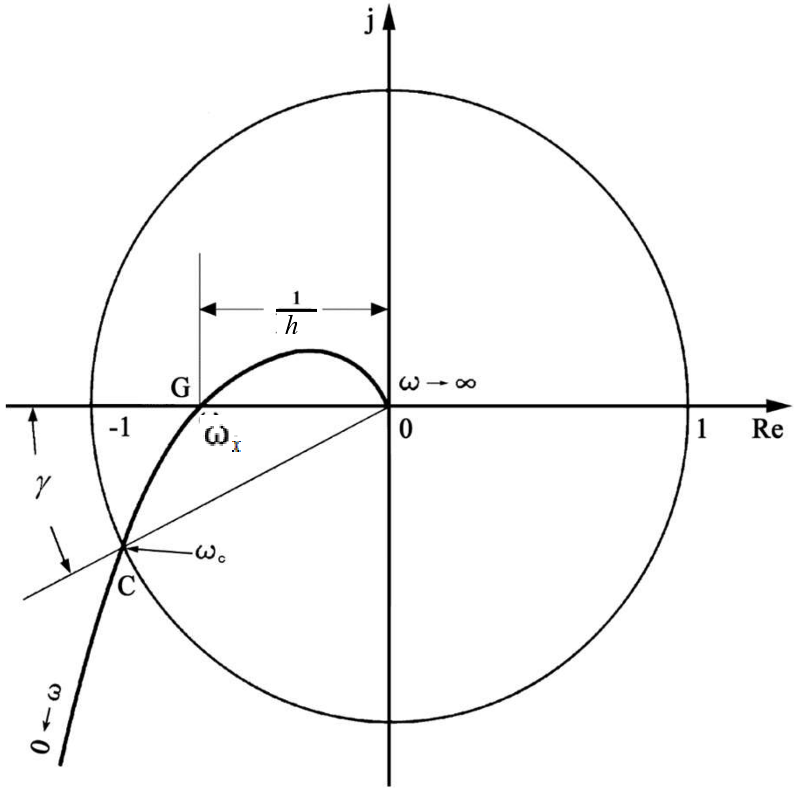
意义：为了表示系统相角变化对系统稳定性的影响，引入相角裕度的概念。

截止频率ω_c：当$A(\omega_c)=|G(j\omega_c)H(j\omega_c)|=1$时，$G(j\omega)H(j\omega)$与单位圆相交于一点，该点处的频率为$\omega_c$，$\omega_c$称截止频率。cut-off frequency

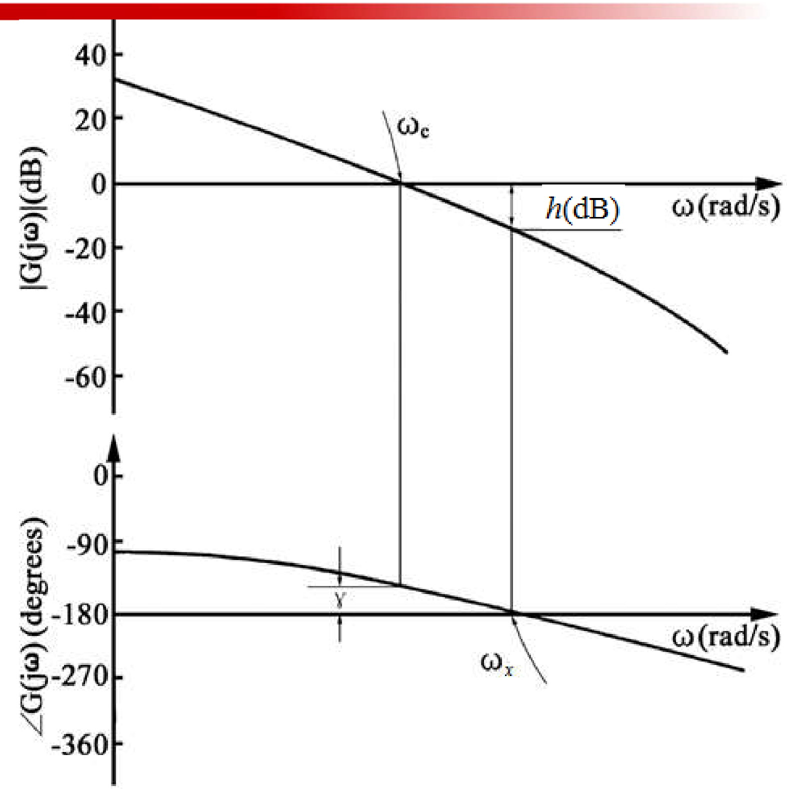
定义：相角裕度γ $\gamma = 180° + \varphi(\omega_c)$ (Phase margin,PM)

含义：对于闭环稳定系统，如果系统开环相频特性再滞后γ度，则系统将处于临界稳定状态。

5.4　稳定裕度



（a）　幅相频率特性



（b）　对数频率特性

相角裕度γ的正负：

- 极坐标图中，从负实轴开始，逆时针为“+”，顺时针为“-”;
- Bode图中，在-180°上方“+”，下方“-”

对于最小相位系统（P=0）

- 当$\gamma>0$时，闭环系统稳定（因为N=0）
- 当$\gamma<0$时，闭环系统不稳定（因为$N\neq0$）

5.4　稳定裕度

二、幅值裕度

意义：幅值裕度表示$G(j\omega)H(j\omega)$曲线在负实轴上相对于(-1,j0)点的靠近程度。

穿越频率ω_x：$G(j\omega)H(j\omega)$曲线与负实轴交于一点时，该点的频率ω_x称为相位穿越频率，此时ω_x处的相角为$(2k+1)\pi$，幅值为$|G(j\omega_x)H(j\omega_x)|$。

cross-over frequency

定义：幅值裕度h

$$h=\frac{1}{|G(j\omega_x)H(j\omega_x)|}$$

(Gain margin,GM)

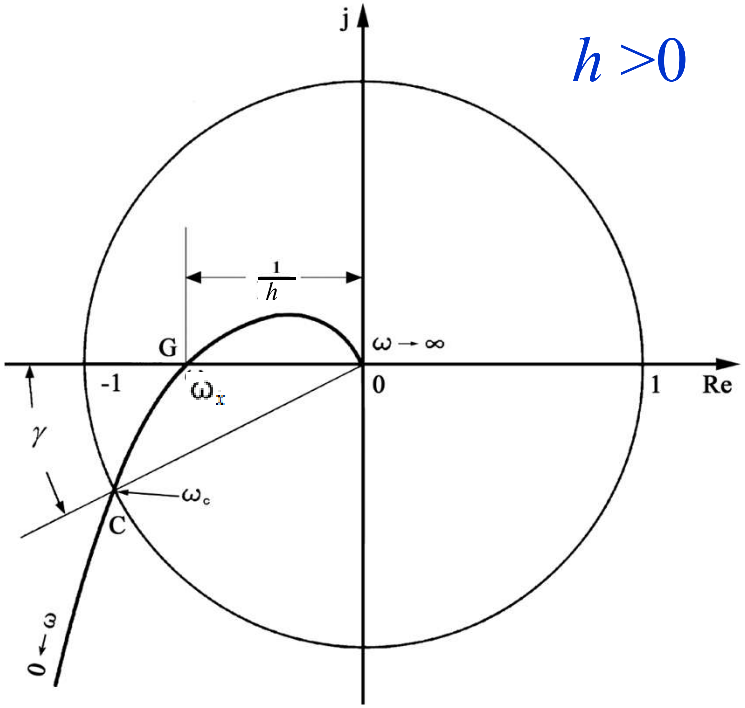
含义：如果系统开环幅频特性再变化h倍，则闭环系统将处于临界稳定状态。

5.4 稳定裕度

如何理解“如果系统开环幅频特性再变化h倍，则闭环系统将处于临界稳定状态。

$$h=\frac{1}{\left|G(j\omega_x)H(j\omega_x)\right|}$$

$$\left|GH\right|\times ?=1 \quad \Rightarrow \quad ?=\frac{1}{\left|GH\right|}=h$$



幅相频率特性

对于最小相位系统(P=0)：

- 当$\left|GH\right|<1$，则$h>1$ 。

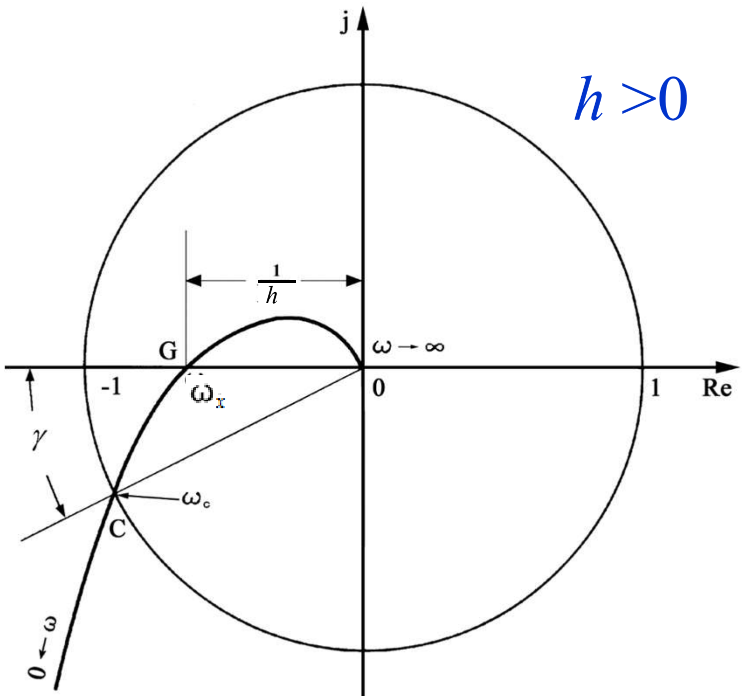
  开环幅频特性曲线若变化(增大)h倍，从稳定变为临界稳定。

- 当$\left|GH\right|>1$，则$0<h<1$ 。

  开环幅频特性曲线若变化(减小)h倍，从不稳定变为临界稳定。

5.4 稳定裕度

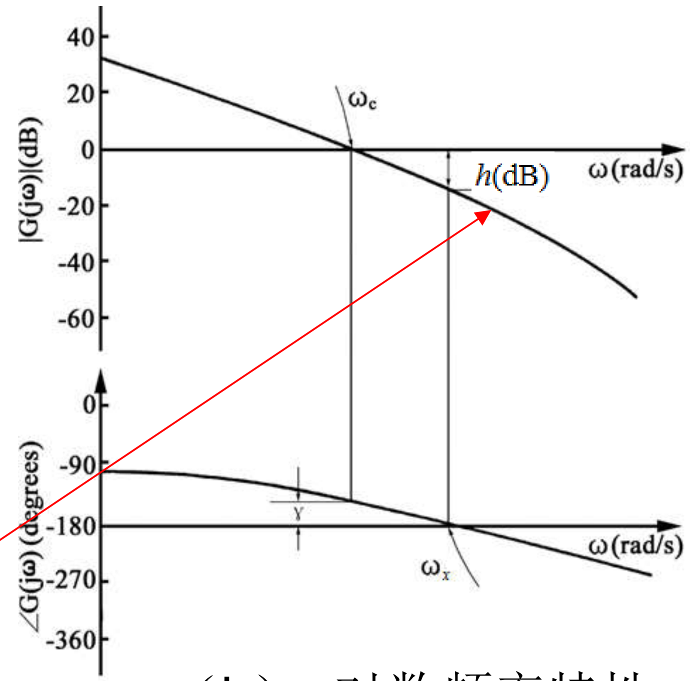
$$h = \frac{1}{|G(j\omega_x)H(j\omega_x)|}$$



（a） 幅相频率特性

在对数坐标下， 幅值裕度用分贝数 h(dB)来表示:

$$h(\mathrm{dB}) = 20\lg h = -20\lg|G(j\omega_x)H(j\omega_x)| \ \mathrm{dB}$$



（b） 对数频率特性

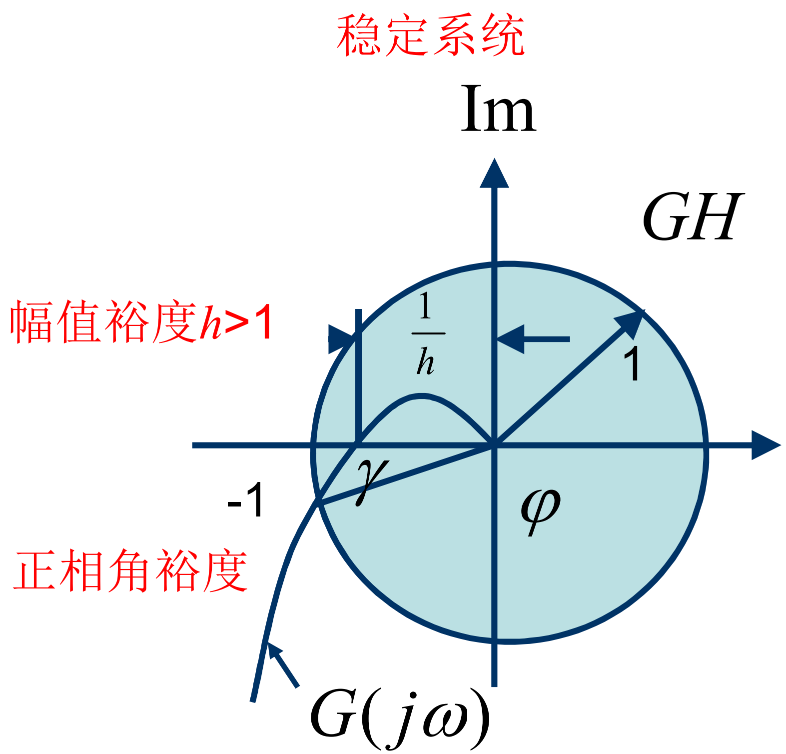
幅值裕度h(dB)的正负：h(dB)在ω轴下方“+”，ω轴上方“-”

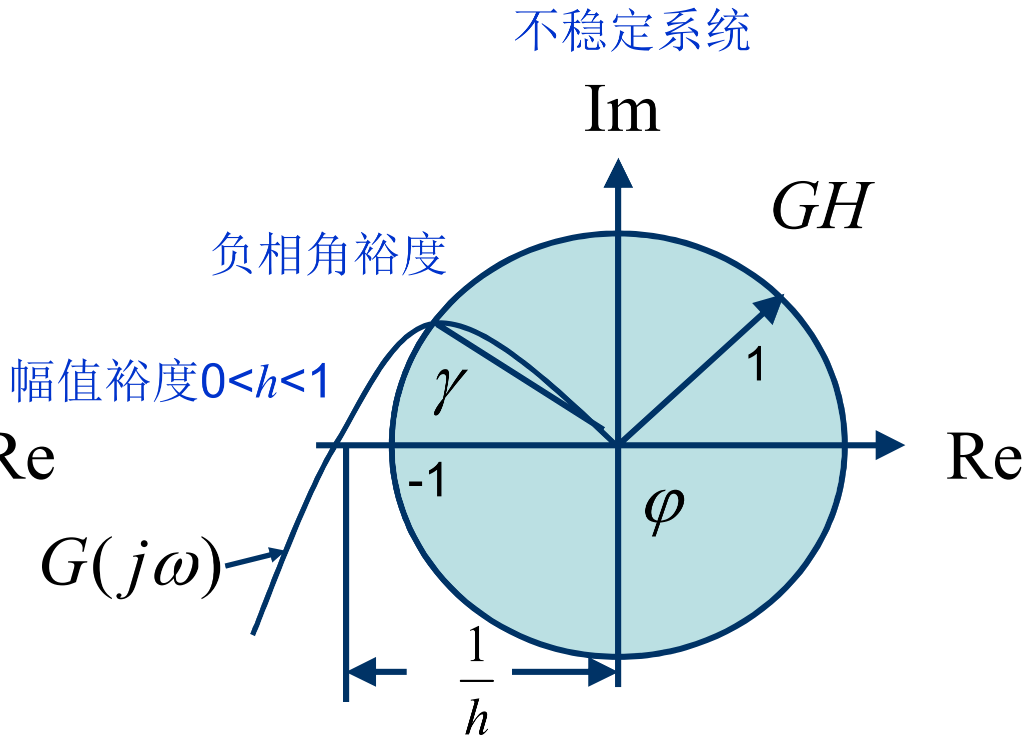
5.4　稳定裕度

$$h = \frac{1}{|G(j\omega_x)H(j\omega_x)|}$$

$$h(\text{dB}) = -20\lg|GH|\ \text{dB}$$

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



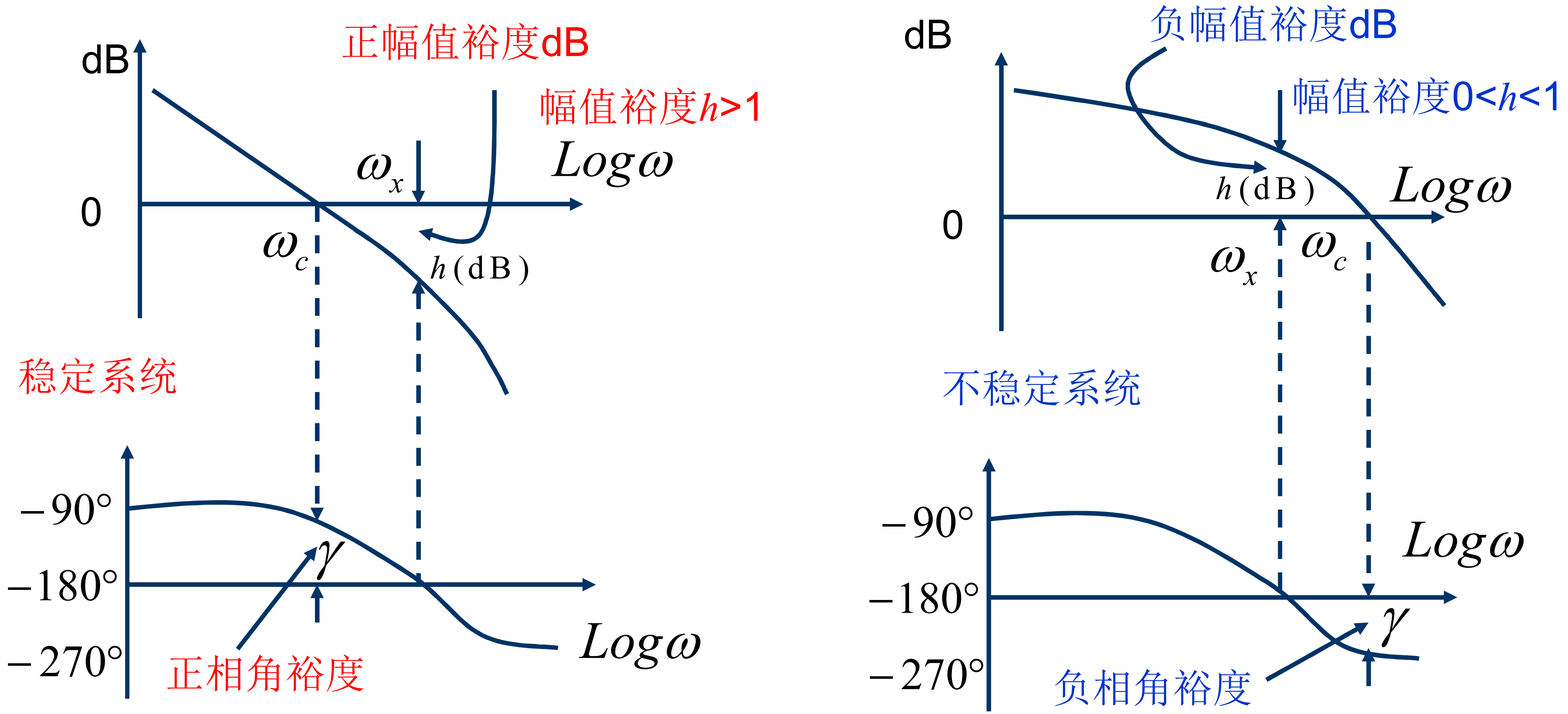


对于最小相位系统(P=0)，在穿越频率处：

- 当$|G(j\omega_x)H(j\omega_x)|<1$，闭环系统稳定
- 当$|G(j\omega_x)H(j\omega_x)|>1$，闭环系统不稳定
- 当$|G(j\omega_x)H(j\omega_x)|=1$，系统处于临界状态

稳定：单位圆内部
(最小相位系统)

5.4　稳定裕度



对于最小相位系统(P=0)，在穿越频率处：

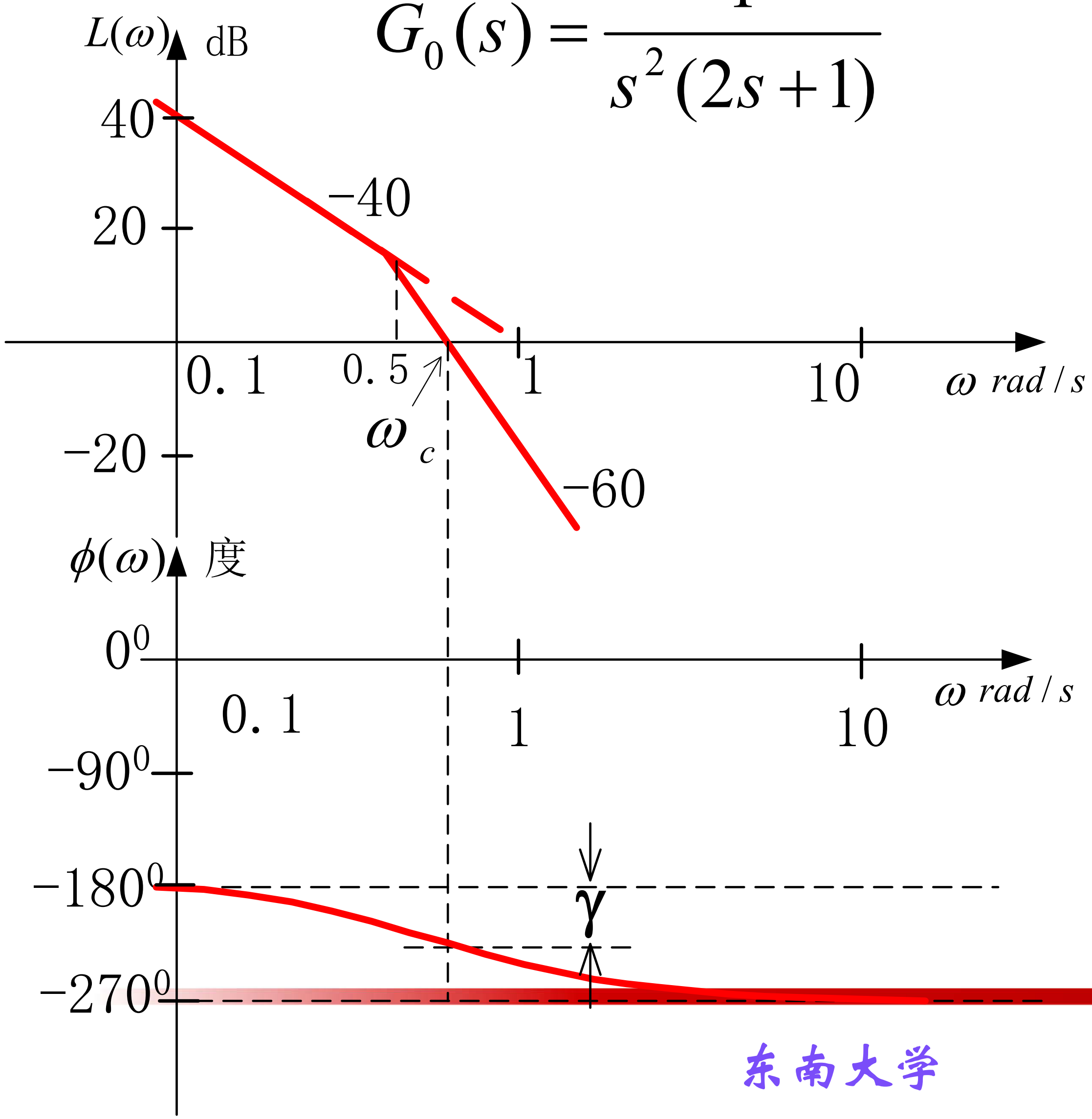
- 当$20\lg|G(j\omega_x)H(j\omega_x)|<0$时，闭环系统稳定
- 当$20\lg|G(j\omega_x)H(j\omega_x)|>0$时，闭环系统不稳定
- 当$20\lg|G(j\omega_x)H(j\omega_x)|=0$时，系统处于临界状态

稳定：中间区域
(最小相位系统)

5.4 稳定裕度

例 计算相角裕度

$$G_0(s)=\frac{1}{s^2(2s+1)}$$



①低频段 -40dB/dec

②转折段 -60dB/dec

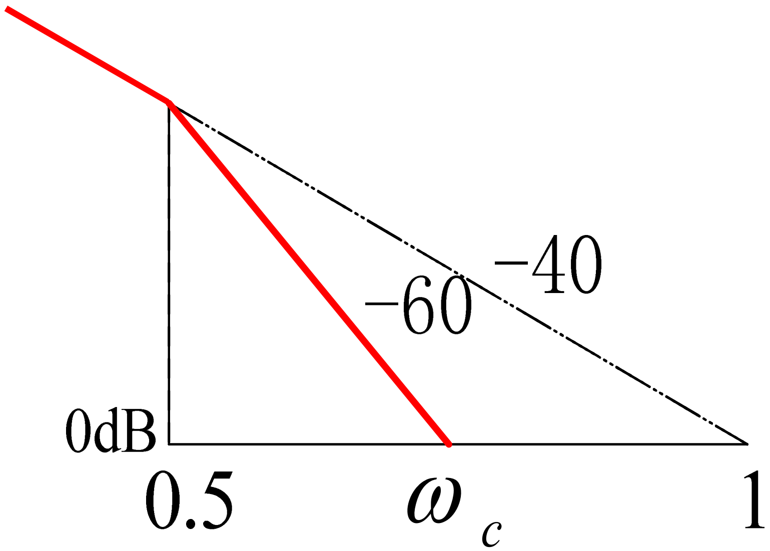
交接频率

$$\omega=\frac{1}{T}=\frac{1}{2}=0.5$$

相频特性低频段为-180^0，高频段为-270^0。

$$k = \frac{L_a(\omega_2) - L_a(\omega_1)}{\lg\omega_2 - \lg\omega_1}$$

计算相角裕度 $\gamma = 180^0 + \varphi(\omega_c)$



$$-40 = \frac{0 - L_a(0.5)}{\lg 1 - \lg 0.5} \Rightarrow L_a(0.5)$$

$$-60 = \frac{0 - L_a(0.5)}{\lg\omega_c - \lg 0.5}$$

$$\Downarrow$$

$\lg\omega_c = -0.1$ $\omega_c = 0.79$

$$\gamma = 180^0 + \varphi(\omega_c) = 180^0 - 180^0 - \arctan(2\omega_c) = -\arctan(2\omega_c) = -57.7^0$$

系统不稳定

例　单位负反馈系统的开环传递函数为 $G(s)=\dfrac{K}{s(1+0.2s)(1+0.05s)}$

①K=1时系统的相角裕度和幅值裕度。②要求通过调整增益K，使系统的幅值裕度h(dB)=20dB，相角裕度 $\gamma \geq 40°$。

解：　①幅值裕度 ⇨ 根据相位求穿越频率 ω_x

$$\varphi(\omega_x)=\angle G(j\omega_x)H(j\omega_x)=-180°$$

$$\varphi(\omega_x)=-90°-\arctan 0.2\omega_x-\arctan 0.05\omega_x=-180°$$

即 $\arctan 0.2\omega_x+\arctan 0.05\omega_x=90°$ ⇦ $\tan(\theta_1\pm\theta_2)=\dfrac{\tan\theta_1\pm\tan\theta_2}{1\mp\tan\theta_1\tan\theta_2}$

$$\frac{0.2\omega_x+0.05\omega_x}{1-0.2\omega_x\times 0.05\omega_x}=\infty \;\rightarrow\; 1-0.2\omega_x\times 0.05\omega_x=0 \;\rightarrow\; \omega_x=10$$

5.4 稳定裕度

在 $\omega_x = 10$ 处的开环对数频率特性的幅值裕度为

$$h(\mathrm{dB}) = -20\lg\left|G(j\omega_x)H(j\omega_x)\right|$$

$$= -20\lg\left|\frac{1}{j\omega_x(1+j0.2\omega_x)(1+j0.05\omega_x)}\right|$$

$$= 20\lg 10 + 20\lg\sqrt{1+(0.2\times 10)^2} + 20\lg\sqrt{1+(0.05\times 10)^2}$$

$$= 20 + 7 + 1 = 28 \ \ \mathrm{dB}$$

5.4 稳定裕度

$$G(s)=\frac{K}{s(1+0.2s)(1+0.05s)}$$

①相角裕度 ➡ 根据幅值求截止频率 ω_c

开环传递函数（K=1）的幅频特性的模等于1，对应截止频率。

$$|G(j\omega_c)|=\left|\frac{1}{j\omega_c(1+j0.2\omega_c)(1+j0.05\omega_c)}\right|$$

$$=\frac{1}{\omega_c\sqrt{(1+0.04\omega_c^2)(1+0.0025\omega_c^2)}}=1 \quad \rightarrow \quad \omega_c=1$$

相角裕度

$$\varphi(\omega_c)=-90^\circ-\arctan 0.2\omega_c-\arctan 0.05\omega_c=-104^\circ$$

$$\gamma=180^\circ+\varphi(\omega_c)=180^\circ-104^\circ=76^\circ$$

5.4 稳定裕度

要求通过调整增益K，使系统的幅值裕度h(dB)=20dB，相角裕度 $\gamma \geq 40°$。

$$G(s) = \frac{K}{s(1+0.2s)(1+0.05s)}$$

- 调整增益K，对数幅频特性有什么变化？截止频率如何变化？

1）增益*K* 参与对数幅频特性的计算，对数幅频特性形状不变，上下移动。

2）增益*K* 参与对数幅频特性的计算，截止频率左右移动。

- 调整增益K，对数相频特性有什么变化？穿越频率如何变化？

1）增益*K*不参与对数相频特性的计算，对数相频特性不变。

2）增益*K* 不参与对数相频特性的计算，穿越频率不变。

要求通过调整增益K，使系统的幅值裕度h(dB)=20dB，相角裕度$\gamma \geq 40°$。

$$G(s)=\frac{K}{s(1+0.2s)(1+0.05s)}$$

改变K值，截止频率改变，穿越频率不变，因此：$\omega_x=10$

② 根据 $\omega_x=10$ ，要求 $h(\mathrm{dB})=20\mathrm{dB}$

$$20(\mathrm{dB})=h(\mathrm{dB})=-20\lg\underline{\left|G(j\omega_x)H(j\omega_x)\right|} \quad =-1$$

$$\left|G(j\omega_x)H(j\omega_x)\right|=0.1 \qquad \frac{K}{\omega_x\sqrt{(1+0.04\omega_x^2)(1+0.0025\omega_x^2)}}=0.1$$

$$K=0.1\times10\sqrt{1+4}\sqrt{1+0.25}=2.5$$

当K=2.5时，相角裕度是否满足要求？

5.4　稳定裕度

当K=2.5时，验证是否满足相角裕度$\gamma \geq 40°$的要求

当K=2.5时，计算新的截止频率ω_c。 $G(s)=\dfrac{2.5}{s(1+0.2s)(1+0.05s)}$

在新的截止频率处，有： $$\frac{2.5}{\omega_c\sqrt{(1+0.04\omega_c^2)(1+0.0025\omega_c^2)}}=1$$

计算(可以简略计算，忽略(1+0.05s)环节，得： $\omega_c=\sqrt{5.17}\approx 2.27$

在新的截止频率处的相角为：

$$\varphi(\omega_c)=-90°-\arctan 0.2\omega_c-\arctan 0.05\omega_c$$

$$=-90°-24.4°-6.47° \quad \approx -121°$$

相角裕度满足要求

当K=2.5时，新的截止频率处的相角裕度：$\gamma=180°+\varphi(\omega_c)=59°$

若相角裕度 $\gamma = 40^\circ$ ，K为何值？

根据 $\gamma = 40^\circ$ 的要求，计算新的截止频率ω_c 。 $\gamma = 180^\circ + \varphi(\omega_c)$

$$\varphi(\omega_c) = 40^\circ - 180^\circ = -140^\circ$$

$$\varphi(\omega_c) = -90^\circ - \arctan 0.2\omega_c - \arctan 0.05\omega_c = -140^\circ$$

$$\arctan 0.2\omega_c + \arctan 0.05\omega_c = 50^\circ \;\rightarrow\; \frac{0.2\omega_c + 0.05\omega_c}{1 - 0.2\omega_c \times 0.05\omega_c} = 1.2$$

$$\rightarrow\; \omega_c = 4$$

在新的截止频率处要求$A(\omega)$=1，则

$$\frac{K}{\omega_c \sqrt{(1+0.04\omega_c^2)(1+0.0025\omega_c^2)}} = 1 \;\rightarrow\; K = 4 \times 1.28 \times 1.02 = 5.2$$

5.4 稳定裕度

要求通过调整增益K，使系统的幅值裕度h(dB)=20dB，相角裕度 $\gamma \geq 40°$ 。

当K=5.2时，幅值裕度是多少？满足要求？

$$G(s)=\frac{5.2}{s(1+0.2s)(1+0.05s)}$$

穿越频率保持不变，$\omega_x=10$，则：

$$h(\text{dB})=-20\lg\left|G(j\omega_x)H(j\omega_x)\right|$$

$$=-20\lg\left|\frac{5.2}{j\omega_x(1+j0.2\omega_x)(1+j0.05\omega_x)}\right|$$

$$=20\lg\frac{10}{5.2}+20\lg\sqrt{1+(0.2\times10)^2}+20\lg\sqrt{1+(0.05\times10)^2}$$

$$=5.68+7+1=13.68\ \text{dB} \qquad <20\ \text{dB}$$ 不满足要求

5.4 稳定裕度

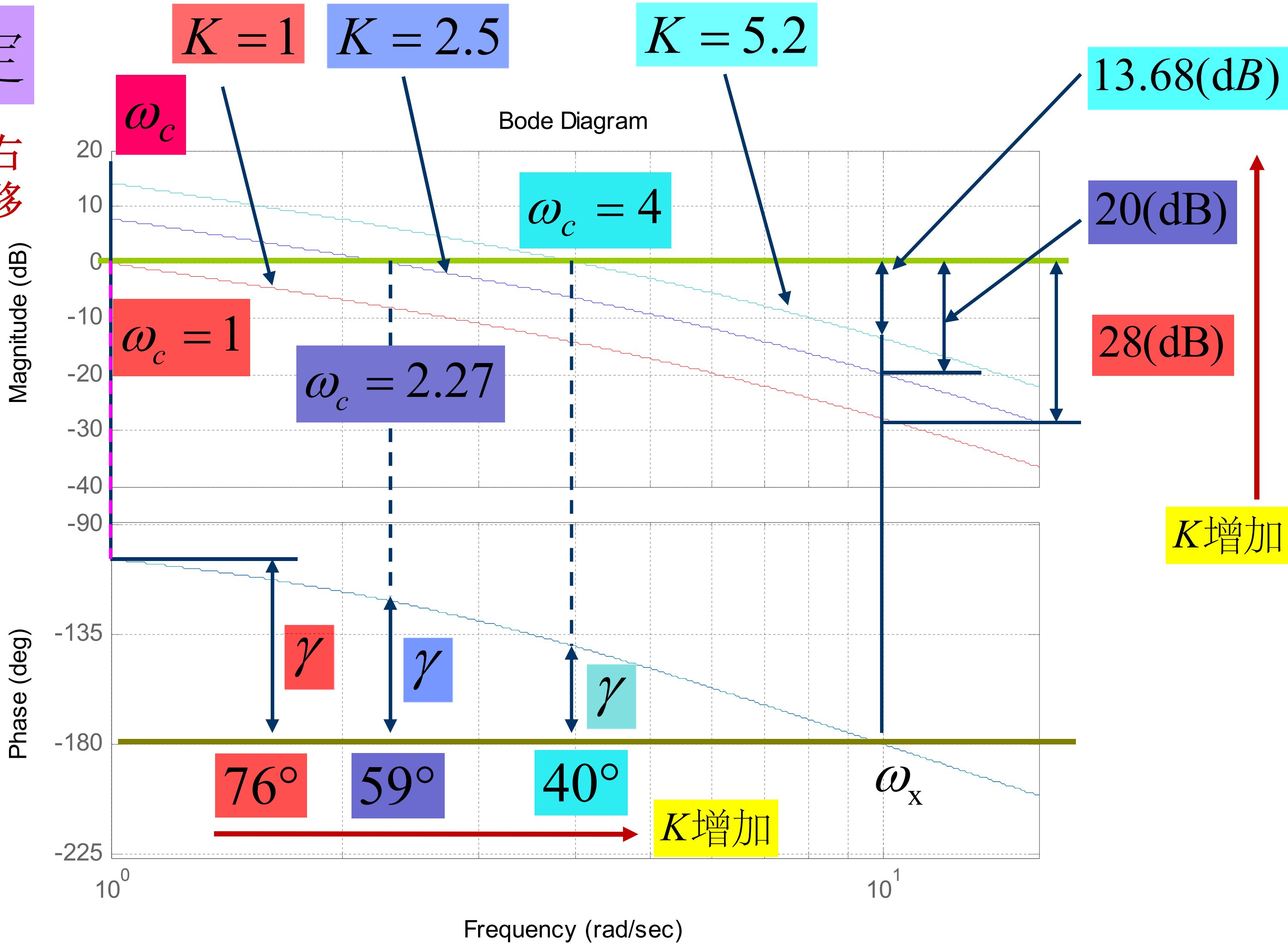
$K\uparrow \Rightarrow \omega_x$恒定

$K\uparrow \Rightarrow \omega_c\uparrow$ 右移

K增加，两个裕度都变小

K 取(2.5和5.2)中小的，2.5，同时满足相角裕度和幅值裕度的要求。

K 变化与根轨迹变化联想分析。



5.4 稳定裕度

特殊说明：

1）最小相位系统，幅值裕度和相角裕度为正，闭环系统稳定。☆☆

2）非最小相位系统($P\neq 0$)，GH曲线应包围(-1, j0)点，幅值裕度和相角裕度为负，闭环系统稳定。且最好采用极坐标图，而不是伯德图。☆☆

3）只用幅值裕度或只用相角裕度都不足以说明系统的相对稳定性。为确定系统稳定，必须同时给出两个量。☆☆

4）条件稳定系统将具有多个穿越频率，并且某些高阶系统可能具有多个截止频率。具有多个截止频率的稳定系统，相角裕度计算应选择最高的截止频率。☆

5）为得到满意性能，相角裕度一般选为30~60°、幅值裕度一般大于6dB。☆

6）为实现上述相角裕度，在截止频率处，伯德图曲线的斜率一般为-20dB/dec。☆☆

5.5 闭环系统的频域性能指标

时域指标：超调量、调节时间、上升时间等描述系统输出响应。

频域指标：相角裕度、幅值裕度用来描述闭环系统稳定程度。

另外，还有谐振峰值、谐振频率、带宽频率等描述系统性能。

关系？

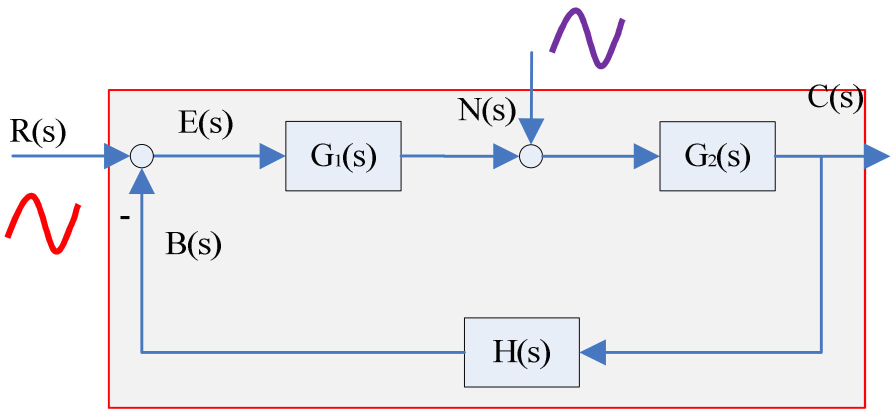
例如：系统阻尼大，调节时间长，稳定裕度大还是小？

频域指标		时域指标	
谐振峰值M_r	⇧	超调量σ%	⇧
频带宽度ω_b	⇧	上升时间t_r	⇩
截止频率(高频衰减快慢)		调节时间t_s	

高频衰减速度⇧ $\xrightarrow{\text{矛盾}}$ M_r⇧

超调量σ%⇩ $\xrightarrow{\text{矛盾}}$ t_r⇧

闭环系统特性，关注$R(s)$和$C(s)$的相互关系！



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

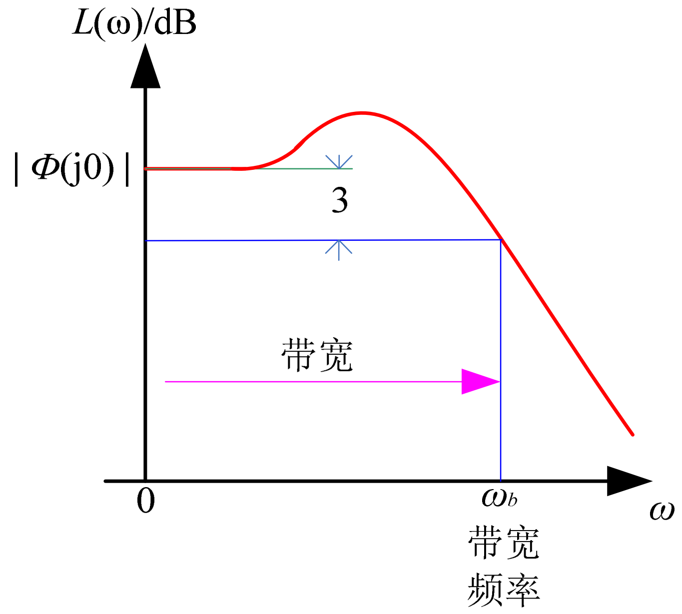
5.5 闭环系统的频域性能指标

一、控制系统的频带宽度

- 设$\Phi(j\omega)$为闭环系统频率特性，当闭环系统的对数幅频特性下降到 频率为零时的分贝(dB)值以下 3dB时，对应的频率称为闭环系统的带宽频率，记为ω_b。

即：$20\lg|\Phi(j\omega_b)| = 20\lg|\Phi(j0)| - 3\text{ dB}$

而：$-3\text{dB} = 20\lg 0.707 = 20\lg\dfrac{1}{\sqrt{2}}$



$$
\begin{aligned}
20\lg|\Phi(j\omega_b)| &= 20\lg|\Phi(j0)| - 3\text{dB} \\
&= 20\lg|\Phi(j0)| + 20\lg 0.707 \\
&= 20\lg 0.707|\Phi(j0)|
\end{aligned}
$$

$$|\Phi(j\omega_b)| = 0.707|\Phi(j0)|$$

即：闭环系统对数幅频特性下降至 0.707 | Φ(j0) |(dB)时，对应的频率称为带宽频率。

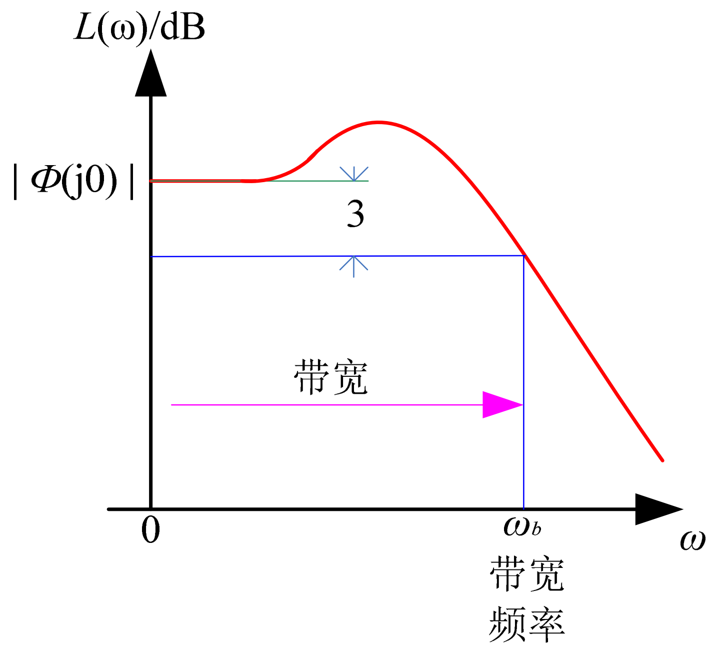
5.5 闭环系统的频域性能指标

- 当$\omega>\omega_b$ 时，有：$20\lg|\Phi(j\omega)|<20\lg|\Phi(j0)|-3\ \text{dB}$

- 频率范围$(0，\omega_b)$称为系统带宽。

- 高于带宽频率的正弦输入信号，系统输出将呈现较大的衰减。

- 可以将带宽频率视为信号分辨能力的表征：带宽频率越高，分辨能力越强。



上述定义对所有系统都成立，带宽的普遍定义。

5.5 闭环系统的频域性能指标

I型和II型闭环系统的带宽频率可进一步具体化（计算）

标准的I型和II型闭环系统：$\dfrac{1}{Ts+1}\quad \dfrac{\omega_n^2}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2}=\dfrac{1}{T^2s^2+2\zeta Ts+1}$

对于标准的I型和II型闭环系统，有：

$$\begin{cases} |\Phi(\mathrm{j}0)|=1 \\ 20\lg|\Phi(\mathrm{j}0)|=0(\mathrm{dB}) \end{cases}$$

为什么强调标准型？ $\dfrac{30}{Ts+1}$

因此，当$\omega>\omega_b$时，有： $20\lg|\Phi(\mathrm{j}\omega)|<20\lg|\Phi(\mathrm{j}0)|-3\ (\mathrm{dB})$

$20\lg|\Phi(\mathrm{j}\omega)|<\ 0-3(\mathrm{dB})$ 或： $20\lg|\Phi(\mathrm{j}\omega)|<\ -3(\mathrm{dB})$

带宽频率：闭环系统对数幅频特性等于-3dB对应的频率。

5.5　闭环系统的频域性能指标

1）一阶系统的闭环传递函数：$\Phi(s)=\dfrac{1}{Ts+1}$

$$\begin{cases} |\Phi(\mathrm{j}0)|=1, \\ 20\lg|\Phi(\mathrm{j}0)|=0(\mathrm{dB}) \end{cases}$$

$$20\lg|\Phi(\mathrm{j}\omega_b)|=20\lg\left|\frac{1}{\sqrt{1+T^2\omega_b^2}}\right| \overset{-3\mathrm{dB}}{=} 20\lg\frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow T^2\omega_b^2=1 \Rightarrow \omega_b=\frac{1}{T}$$

$$\boxed{\text{一阶系统的带宽频率和时间常数}T\text{成反比}}$$

问：某一阶系统的闭环传递函数：$\Phi(s)=\dfrac{3}{Ts+3}$，求其带宽频率。

$$\Phi(s)=\frac{3}{Ts+3}=\frac{1}{\frac{T}{3}s+1} \Rightarrow \omega_b=\frac{3}{T}$$

思考：$\Phi(s)=\dfrac{6}{Ts+3}$

5.5 闭环系统的频域性能指标

2）无零点的二阶系统的闭环传递函数： $\Phi(s)=\dfrac{\omega_n^2}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2}$

$$\Phi(s)=\frac{1}{\dfrac{1}{\omega_n^2}s^2+\dfrac{2\zeta}{\omega_n}s+1}$$

幅频特性： $|\Phi(j\omega)|=\dfrac{1}{\sqrt{(1-\dfrac{\omega^2}{\omega_n^2})^2+\dfrac{4\zeta^2\omega^2}{\omega_n^2}}}$

$$\begin{cases}|\Phi(j0)|=1, \\ 20\lg|\Phi(j0)|=0(\mathrm{dB})\end{cases} \Rightarrow \sqrt{(1-\frac{\omega^2}{\omega_n^2})^2+\frac{4\zeta^2\omega^2}{\omega_n^2}}=\sqrt{2}$$

$$\Rightarrow \omega_b=\omega_n\sqrt{(1-2\zeta^2)+\sqrt{(1-2\zeta^2)^2+1}}$$

二阶系统的带宽频率和自然振荡频率ω_n成正比

对比记忆

$$\omega_d=\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

$$\omega_r=\omega_n\sqrt{1-2\zeta^2}$$

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

二阶系统的带宽频率和阻尼比ζ成反比　略，见教材P233。

5.5　闭环系统的频域性能指标

时域指标

频域指标

上升时间t_r　$t_r = \dfrac{\pi-\theta}{\omega_d} = \dfrac{\pi-\theta}{\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}}$

峰值时间t_p　$t_p = \dfrac{\pi}{\omega_d} = \dfrac{\pi}{\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}}$

调节时间t_s　$t_s \approx \dfrac{3.5}{\zeta\omega_n}$

与ω_n成反比

带宽频率ω_b和自然振荡频率ω_n成正比

或：速度与ω_b成正比

⇨ 时间与ω_b成反比

- 为了加快响应，需要提高带宽频率ω_b。
- 为了跟踪（或复现）输入信号，需要提高带宽频率ω_b。
- 但是，增大带宽频率ω_b的同时，抑制输入端高频干扰的能力变弱。

5.5 闭环系统的频域性能指标

二、系统带宽与信号频谱的关系

若系统的控制输入为阶跃输入（矩形波）时，系统的跟踪能力取决于带宽频率ω_b覆盖矩形波频谱的范围，带宽大则处于较高频率范围的谱线衰减小，失真小。

三、闭环系统频域指标和时域指标的转换

闭环系统频域指标 ⇨1 开环系统频域指标 ⇨2 时域指标

ω_b, M_r　　　$\omega_c, \omega_x, \gamma, h, h(\mathrm{dB})$　　　$\zeta, \omega_n, t_r, t_p, t_s, \sigma\%$

⇧

系统校正工作在该环节完成

5.5 闭环系统的频域性能指标

1. 系统闭环和开环**频域指标**的关系

1) 若闭环系统和开环系统的**稳定程度相似**，则系统闭环带宽频率ω_b和系统开环截止频率ω_c关系密切。

- 对于ω_b大的系统，ω_c也大；对于ω_b小的系统，ω_c也小，**两者成正相关**。
- 因为带宽频率ω_b大系统响应速度快，所以截止频率ω_c大系统响应速度也快。因此，**可以用ω_c衡量系统的响应速度。**

2) 闭环系统振荡性能指标谐振峰值M_r和开环系统相角裕度γ都表征系统的稳定程度，建立两者的关系。

M_r也表征了相对稳定性

如果　$1.0<M_r<1.4$

$0\text{dB}<M_r(\text{dB})<3\text{dB}$

相当于 $0.4<\zeta<0.7$

$$M_r \approx \left.\frac{1}{|\sin\gamma|}\right|_{\text{尤其在小}\gamma}$$

证明过程：略

闭环 → 开环

$\omega_b \rightarrow \omega_c$

$M_r \rightarrow \gamma$

步骤1：由闭环频域指标确定开环频率指标。

步骤2：再选择校正网络的结构并确定参数。

2. 开环频域指标和时域指标的关系

对于标准的二阶开环系统：

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

$\omega_c = f(\zeta)$

$\gamma = f(\zeta)$

$\left.\begin{matrix}\omega_c \\ \gamma\end{matrix}\right\} \Rightarrow \xi \Rightarrow \left\{\begin{matrix}\sigma\% \\ t_s\end{matrix}\right.$

给定ω_n

公式已知

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

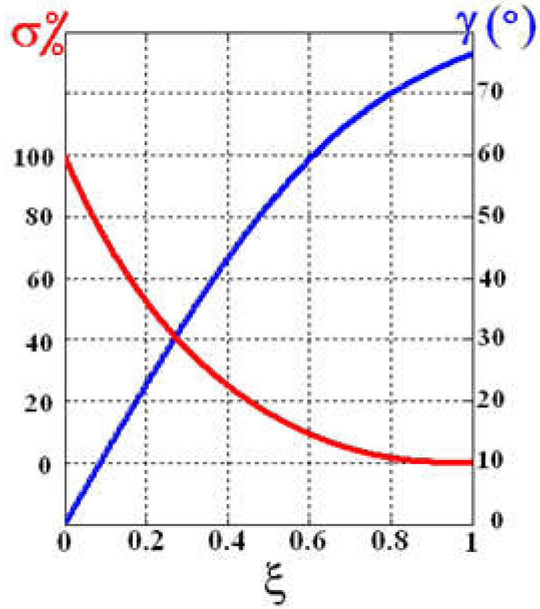
$$\gamma = \arctan\frac{2\zeta\omega_n}{\omega_c} = \arctan\left[2\zeta\left(\sqrt{4\zeta^4+1}-2\zeta^2\right)^{\frac{1}{2}}\right]$$

闭环 → 开环 → 时域

$\omega_b \rightarrow \omega_c \quad \omega_n$

$M_r \rightarrow \gamma \rightarrow \zeta$

根据选定的相角裕度γ，查表确定阻尼比ζ，再计算时域指标。



典型标准二阶系统的γ-ζ-$\sigma\%$曲线

本章结束

总结

1. 三种频率特性曲线——数学模型 ☆☆
2. 各环节的频率特性 ☆☆☆
3. 系统开环频率特性 ☆☆☆
4. 奈奎斯特判据（基于幅相曲线）☆☆☆☆
5. 对数频率稳定判据基于对数频率曲线）☆☆☆☆
6. 稳定裕度(幅值裕度和相角裕度)☆☆☆
7. 掌握闭环系统带宽频率，理解指标折算 ☆☆

作业：5-9　5-11(1)(3)

5-12　5-14(7)、(8)、(9)、(10)

5-15　5-16