中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

§6.5 负反馈放大器的稳定性

lugh@ustc.edu.cn

2016年11月29日

提纲

1. 稳定性问题
2. 反馈深度对闭环极点的影响
3. 稳定性判断

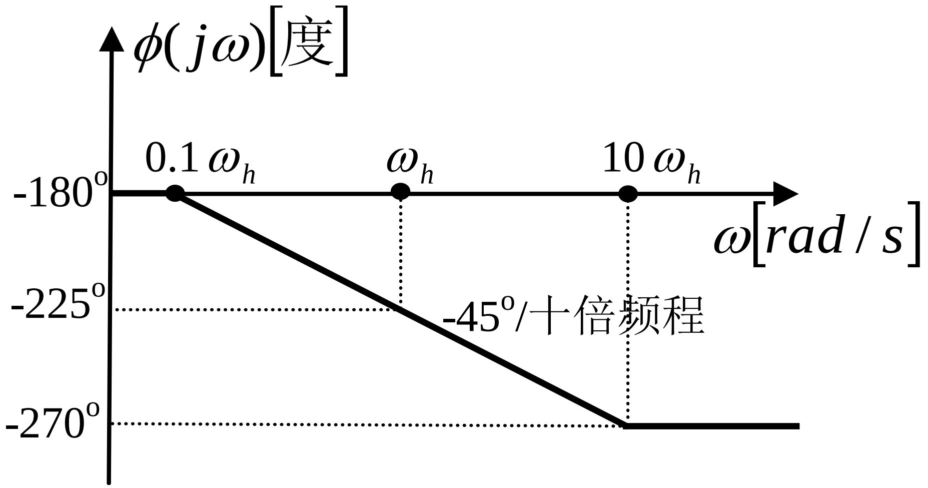
1. 稳定性问题

- **负反馈放大器稳定性的影响因素**
  - 附加相移
  - 中频反馈深度

- **附加相移**
  - 附加相移指的是以中频相移为基准，把偏离基准相移的相移称为附加相移
  - 多级负反馈放大器附加相移较大，可能使原本设计在中频的负反馈变为正反馈，从而导致放大器自激

1. 稳定性问题

- **定性分析**



- **说明**
  - 单极点CE负反馈放大器最大附加相移为90º，负反馈不会变正反馈，两级放大器最大附加相移为180º，也不会变正，只有三级以上的放大器才可能使负变正

1. 稳定性问题

- **定量讨论**

$$A_f(s)=\frac{A(s)}{1+A(s)F(s)}=\frac{A(s)}{D(s)}=\frac{X_o}{X_i}$$

$$\Rightarrow A_f(s)=\infty\Rightarrow 1+AF=0\Rightarrow AF=-1$$

- **自激振荡临界条件**
  - 满足临界幅相条件时，负反馈放大器将产生自激振荡

$$AF=-1\begin{cases}|AF|=1, & \text{幅度条件}\\ \varphi(j\omega)=\varphi_A(j\omega)+\varphi_F(j\omega)=\pm180^o, & \text{相位条件}\end{cases}$$

2. 反馈深度对闭环极点的影响

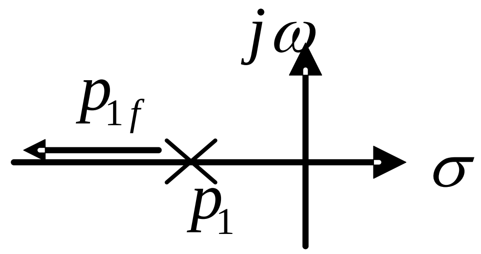
- **系统极点分布决定系统稳定性**
  - 稳定性问题可以从另外的角度出发，利用第一章极点分布的结论：若系统极点全部位于S平面的左半平面则为稳定系统，若有极点落在虚轴或右半平面则该系统不稳定

2. 反馈深度对闭环极点的影响

单极点系统

$$\begin{cases} A(s)=\dfrac{A_0}{1-\dfrac{s}{p_1}} \Rightarrow A_f(s)=\dfrac{A(s)}{D(s)} \\ p_1<0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow D(s)=1+A(s)F_0=1+\frac{A_0}{1-\dfrac{s}{p_1}}F_0=0$$



$$\Rightarrow p_{1f}=(1+A_0F_0)p_1=D_0p_1$$

- 结论：单极点系统无论反馈深度多大，系统仍将稳定

2. 反馈深度对闭环极点的影响

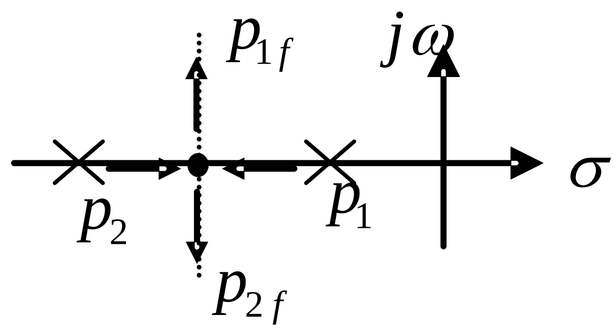
- 双极点系统

$$\begin{cases} A(s) = \dfrac{A_0}{(1-\dfrac{s}{p_1})(1-\dfrac{s}{p_2})} \\ p_1, p_2 < 0 \end{cases} \Rightarrow 1 + \dfrac{A_0}{(1-\dfrac{s}{p_1})(1-\dfrac{s}{p_2})} F_0 = 0$$

$$\Rightarrow p_{1f}, p_{2f} = \frac{p_1 + p_2}{2}\left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4D_0 p_1 p_2}{(p_1 + p_2)^2}}\right)$$

2. 反馈深度对闭环极点的影响

$$\begin{cases} D_0 = 1\text{时}p_{1f} = p_1,\ \ p_{2f} = p_2 \\ \dfrac{4D_0 p_1 p_2}{(p_1+p_2)^2} = 1\text{时两极点相等，}p_{1f}, p_{2f}\text{重合为}\dfrac{p_1+p_2}{2} \\ \dfrac{4D_0 p_1 p_2}{(p_1+p_2)^2} > 1\text{时}p_{1f}, p_{2f}\text{为共轭复极点，实部不变仍为}\dfrac{p_1+p_2}{2}\text{，虚部分开。} \end{cases}$$

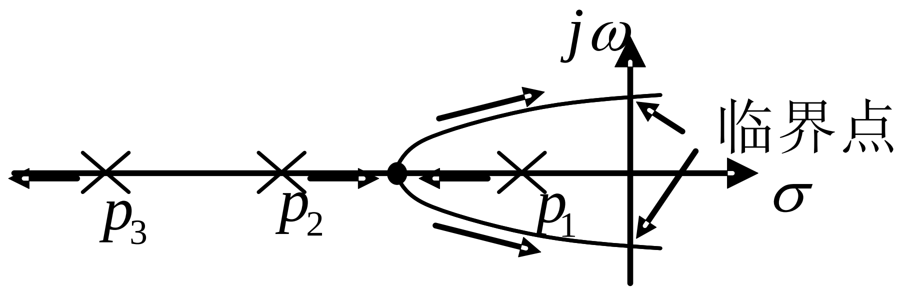


- 结论：双极点系统无论反馈深度多大，系统仍将稳定

2. 反馈深度对闭环极点的影响

■ 三极点系统

$$A(s)=\frac{A_0}{(1-\frac{s}{p_1})(1-\frac{s}{p_2})(1-\frac{s}{p_3})}$$



□ 结论：对三极点及以上系统，当反馈深度大到某一值时，闭环极点就会进入右半平面，造成系统不稳定

3. 稳定性判断

- 稳定性分析思路
  - 利用稳定系统的极点分布特点来进行分析
  - 利用自激振荡的振幅和相位条件来进行分析

- 稳定性判断方法
  - 临界点法
  - 交界频率法
  - 波特图法

（1）临界点法

- **基本思路**
  - 定义闭环极点刚好位于虚轴上的情况为临界点，利用稳定系统的极点应分布在s平面虚轴左侧这个特点来进行分析

- **分析步骤**

第一步

令 $D(S)\big|_{S=j\omega}=0$（为 $D(S)=0$和 $S=j\omega$ 的交点）求出临界点处的 ω_0 和 $D_{0临界}$

第二步

$D_0 < D_{0临界}$ 时，系统稳定；$D_0 > D_{0临界}$ 时，系统不稳定

（1）临界点法

- **例：用临界点法判断系统的稳定性**

已知$A(s)=\dfrac{A_0}{(s+1)(s+2)(s+3)}$，$F=F_0$，试求使系统稳定的中频反馈深度应满足的条件

（1）临界点法

解：

$$D(s)\Big|_{s=j\omega}=1+A(s)F_0\Big|_{s=j\omega}=0$$

$$\Rightarrow(1+j\omega)(2+j\omega)(3+j\omega)+A_0F_0=0$$

$$\Rightarrow 6+j11\omega-6\omega^2-j\omega^3+A_0F_0=0$$

$$\Rightarrow\begin{cases}\omega_0=\pm\sqrt{11}rad/s\\ A_0F_0=60\Rightarrow D_{0临}=61\end{cases}\Rightarrow D_0<61$$

（2）交界频率法

- **基本思想**
  - 根据自激振荡的振幅和相位条件来判断系统的稳定性

- **相位交界频率** ω_p
  - 满足相位临界条件时的工作频率

$$\angle A(j\omega_p)F(j\omega_p) = \pm 180^\circ$$

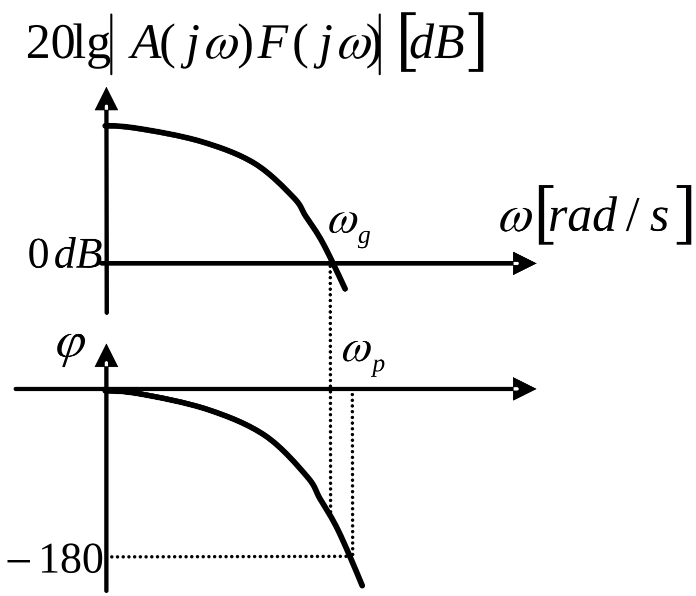
（2）交界频率法

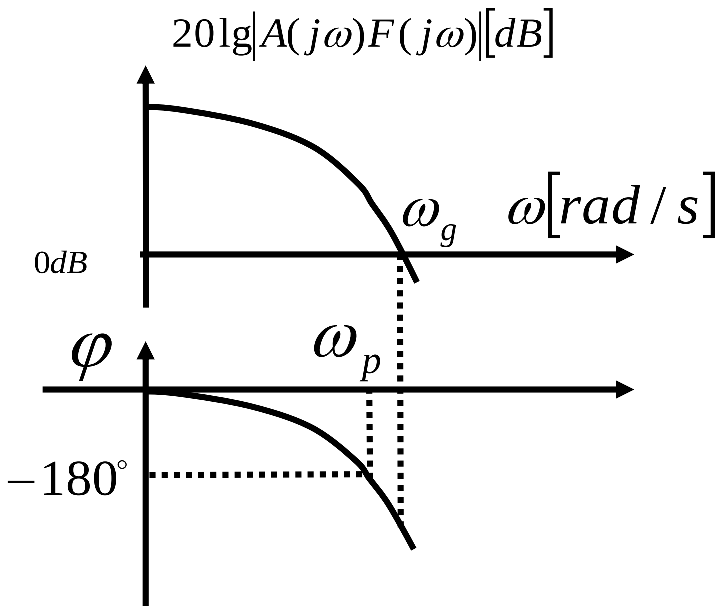
- 增益交界频率 ω_g
  - 满足振幅临界条件时的工作频率

$$\left|A(j\omega_g)F(j\omega_g)\right|=1$$

（2）交界频率法

- **判断依据**





$\omega_g < \omega_p$： 系统稳定

$\omega_g \geq \omega_p$： 系统不稳定

（2）交界频率法

- **例：利用相位交界频率和增益交界频率判断稳定性**

已知$A(s)F(s)=\dfrac{4}{(1+s)^3}$，试分析该系统的稳定性

（2）交界频率法

解：

$$令\left|AF\right|=\frac{4}{\left|(1+j\omega_g)^3\right|}=1\Rightarrow\omega_g=1.23rad/s$$

$$令\varphi_{AF}(j\omega_p)=-180^\circ\Rightarrow\omega_p=1.73rad/s$$

$$由于\omega_g<\omega_p\Rightarrow系统稳定$$

（2）交界频率法

- **稳定裕量**
  - 实际工作中，设计时要求放大器不但可以稳定工作，同时还需留有一定的裕量
  - 所谓裕量，指的是系统离临界稳定有一定富裕度

- **增益裕量**
  - 在相位交界频率处，环路增益和临界点（**0dB**）之差

$$G_p = -20\lg\left|A(j\omega_p)F(j\omega_p)\right|$$

（2）交界频率法

- **相位裕量**
  - 在增益交界频率处，$\varphi_{AF}(j\omega_g)$与临界点处相位之差

$$\gamma = \varphi_{AF}(j\omega_g) - (-180^\circ)$$

- **判断依据**
  - 增益裕量>0dB或者相位裕量>0度，系统均稳定

（2）交界频率法

解：

方法二：

$$令\left|AF\right| = \frac{4}{\left|(1+j\omega_g)^3\right|} = 1 \Rightarrow \omega_g = 1.23rad/s$$

$$\varphi_{AF}(j\omega_g) = -3\arctan\omega_g = -152.67^\circ$$

$$\Rightarrow \gamma = 27.33^\circ \Rightarrow 系统稳定$$

方法三：

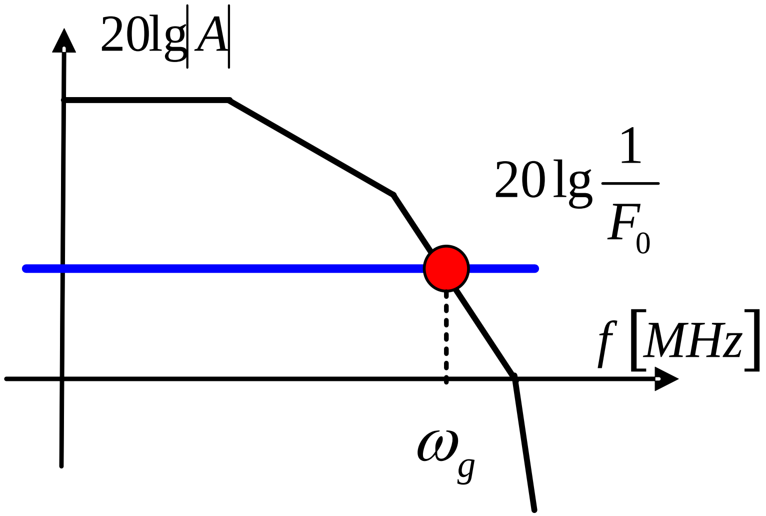
$$令\varphi_{AF}(j\omega_p) = -180^\circ \Rightarrow \omega_p = 1.73rad/s$$

$$G_p = 0-(-6\text{dB}) = 6\text{dB} > 0\text{dB} \Rightarrow 系统稳定$$

（3）波特图法

- **前提条件**
  - 反馈网络为纯阻网络的负反馈放大器
- **基本思路**
  - 纯阻网络的反馈函数不受工作频率的影响，不会影响环路增益的相位交界频率
  - 利用幅频波特图，可以非常直观地求出增益交界频率

（3）波特图法



- **说明**
  - 波特图方法其实是交界频率方法的一种简化实现方法

（3）波特图法

- **例：反馈系数未知时的稳定性分析**

$$已知A(s)=\frac{8\times10^2}{(s+1)(s+2)(s+4)}，\ F=F_0,试求使该系统稳定的F_{0\max}$$

（3）波特图法

解：

第一步：先归一化处理A(s)，求ω_p：

$$\varphi_A(j\omega_p) = -45\lg\frac{\omega_p}{0.1} - 45\lg\frac{\omega_p}{0.2} - 45\lg\frac{\omega_p}{0.4} = -180^\circ$$

$$\Rightarrow \omega_p = 4.3 rad/s$$

第二步：验证解的有效性：

$0.4 < \omega_p < 10 \Rightarrow$ 各项表达式无需修正

第三步：求$F_{0\max}$

令$\omega_g = \omega_p$，则根据$20\lg\left|A(j\omega_g)\right| = 20\lg\left|\frac{1}{F_{0\max}}\right|$

$$有:20\lg\frac{8\times10^2}{2\times4} - 20\lg\frac{4.3}{1} - 20\lg\frac{4.3}{2} - 20\lg\frac{4.3}{4} \approx 20dB$$

$$\Rightarrow F_{0\max} = 0.1即 - 20dB$$

（3）波特图法

例：已知多级放大器的中频增益$A_0=10^3$，三个极点的转角频率分别为$f_1=1MHz$，$f_2=10MHz$，$f_3=100MHz$。

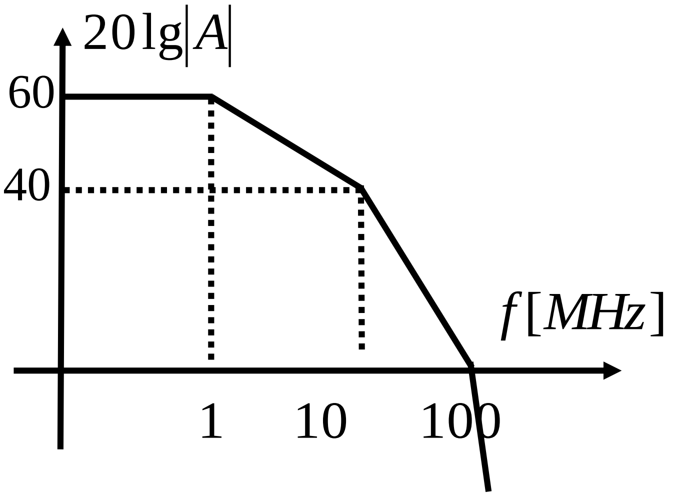
（1）写出该放大器的增益传递函数$A(jf)$的表达式。

（2）若加纯阻反馈网络，$F_0=0.01$，判断电路能否稳定工作。

（3）若要求电路有60°的相位裕量，问F_0为多少。

（3）波特图法

解： （1） $A(jf)=\dfrac{10^3}{(1+\dfrac{jf}{10^6})(1+\dfrac{jf}{10^7})(1+\dfrac{jf}{10^8})}$



（2） 由$F_0=0.01$，得到$20\lg\dfrac{1}{F_0}=40\text{dB}$，

令$\left|A(jf_g)\right|=\dfrac{1}{\left|F_0\right|}$，则由BODE图，$f_g=10MHz$，

此时$\varphi_A(f_g)=-135°$，$\gamma=45°$，系统可以稳定工作。

（3） 若$\gamma=60°$，则$\varphi_A(f_g)=-45\lg\dfrac{f_g}{0.1}-45\lg\dfrac{f_g}{1}=-120°$，得到$f_g=6.84MHz$，

此时$20\lg\left|A(jf_g)\right|=60-20\lg\dfrac{6.84}{1}=43.3dB$，即$A(jf_g)=146.2$，$F_0=0.0068$。

本章小结

- **反馈的概念**
  - 熟悉反馈的基本定义、反馈极性和四种反馈类型
  - 熟悉单环负反馈放大器的理想模型
  - 熟悉负反馈放大器的交流性能指标的定义
  - 牢记基本反馈方程式，熟练掌握各种反馈类型中满足该式的增益函数类型
  - 熟悉负反馈对放大电路各种性能的影响

本章小结

- **负反馈放大器的交流分析**
  - **牢记各种反馈类型所对应的求解F网络反馈函数的等效电路模型**

本章小结

- **深度负反馈放大器的交流分析**
  - 理解深度负反馈的作用
  - 牢记深度负反馈条件及其推论
  - 熟悉深度负反馈放大器的分析方法和分析步骤

本章小结

- **负反馈放大器的稳定性分析**
  - 掌握产生自激振荡的临界条件
  - 熟悉相位交界频率与增益交界频率的定义
  - 熟悉相位裕量和增益裕量的定义
  - 掌握临界值法、交界频率、稳定裕量及波特图方法分析负反馈放大器的稳定性