



# 模拟电路基础（下）

## 负反馈放大器

### 6.6 负反馈放大电路的稳定性



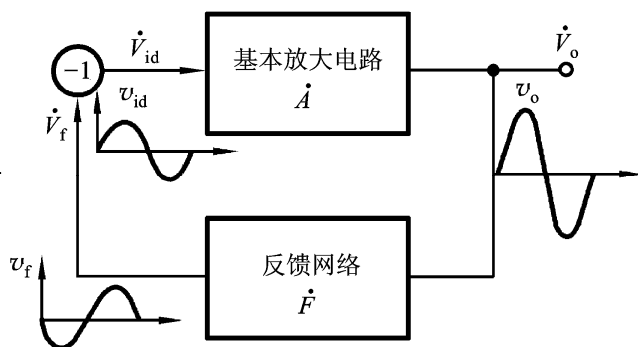
#### ➤ 自激振荡的原因和条件

##### 1. 自激振荡现象

在不加任何输入信号的情况下，放大电路仍会产生一定频率的信号输出。

##### 2. 产生原因

$\dot{A}$  和  $\dot{F}$  在高频区或低频区产生的附加相移达到  $180^\circ$ ，使中频区的负反馈在高频区或低频区变成了正反馈，当满足了一定的幅值条件时，便产生自激振荡。



## 6.6 负反馈放大电路的稳定性

3



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 自激振荡的原因和条件

#### 3. 自激振荡条件

闭环增益  $\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$

反馈深度  $|1 + \dot{A}\dot{F}| = 0$  时，自激振荡

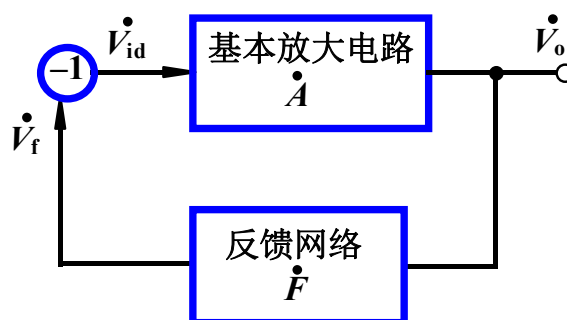
即  $\dot{A}\dot{F} = -1$  ( $\dot{A}\dot{F}$  为环路增益)

又  $\dot{A}\dot{F} = |\dot{A}(\omega) \cdot \dot{F}(\omega)| \angle \varphi_a(\omega) + \varphi_f(\omega)$

得自激振荡条件

$$\begin{cases} |\dot{A}(\omega_k) \cdot \dot{F}(\omega_k)| = 1 & \text{幅值条件} \\ \varphi_a(\omega_k) + \varphi_f(\omega_k) = (2n+1) \times 180^\circ & \text{相位条件 (附加相移)} \end{cases}$$

注：输入端求和的相位  $(-1)$  不包含在内



## 6.6 负反馈放大电路的稳定性

4



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 自激振荡的原因和条件

#### 3. 自激振荡条件

自激振荡条件可以概括为：

$$\begin{cases} |\dot{A}(\omega_k) \cdot \dot{F}(\omega_k)| = 1 \\ \varphi_a(\omega_k) + \varphi_f(\omega_k) = (2n+1) \times 180^\circ \end{cases}$$

说明：

✓ 一级或两级负反馈放大电路是稳定的，三级或三级以上的负反馈电路，在深度负反馈的条件下，有可能产生自激振荡。

✓  $\varphi_a(\omega_k) + \varphi_f(\omega_k) = (2n+1) \times 180^\circ$  时，若  $|\dot{A}(\omega_k) \cdot \dot{F}(\omega_k)| > 1$ ，则增幅振荡，更易自激

✓ 为使负反馈放大器能够稳定地工作，必须设法破坏自激振荡的条件。

在  $|\dot{A}\dot{F}| = 1$  时

使  $|\varphi(\dot{B}(\omega_k) \cdot \dot{A}(\omega_k))| < \pi$

在  $\varphi_a(\omega_k) + \varphi_f(\omega_k) = \pi$  时

使  $|\dot{A}\dot{F}| < 1$

## 6.6 负反馈放大电路的稳定性

5



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 稳定工作条件以及稳定性分析

#### 1. 稳定工作条件

$$\text{破坏自激振荡条件} \begin{cases} |\dot{A}\dot{F}| < 1 \\ \varphi_a + \varphi_f = (2n+1)180^\circ \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} |\dot{A}\dot{F}| = 1 \\ |\varphi_a + \varphi_f| < 180^\circ \end{cases}$$

写成等式，且幅值用分贝数表示时

$$\begin{cases} G_m = 20 \lg |\dot{A}\dot{F}| \leq 0 \text{ dB} \leq -10 \text{ dB} \\ \varphi_a + \varphi_f = (2n+1)180^\circ \end{cases} \quad \begin{cases} 20 \lg |\dot{A}\dot{F}| = 0 \\ |\varphi_a + \varphi_f| + \varphi_m = 180^\circ \end{cases}$$

其中  $G_m$ ——幅值裕度，一般要求  $G_m \leq -10 \text{ dB}$

$\varphi_m$ ——相位裕度，一般要求  $\varphi_m \geq 45^\circ$  (保证可靠稳定，留有余地)

当反馈网络为纯电阻网络时， $\varphi_f = 0^\circ$ 。

## 6.6 负反馈放大电路的稳定性

6



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 稳定工作条件以及稳定性分析

#### 1. 稳定工作条件

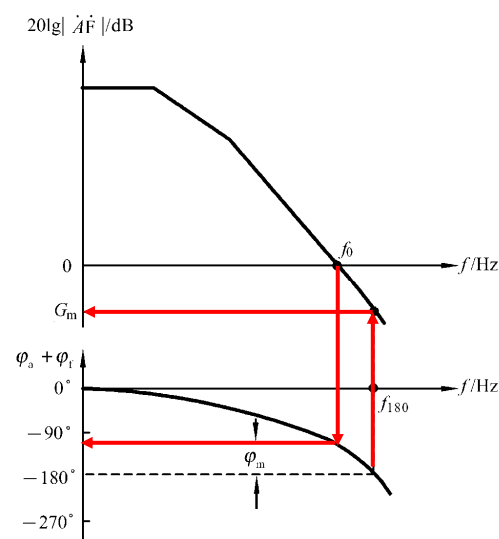
用波特图表示

$$\begin{cases} G_m = 20 \lg |\dot{A}\dot{F}| \leq -10 \text{ dB} \\ \varphi_a + \varphi_f = (2n+1)180^\circ \end{cases}$$

或

$$\begin{cases} 20 \lg |\dot{A}\dot{F}| = 0 \\ |\varphi_a + \varphi_f| + \varphi_m = 180^\circ \end{cases}$$

$$G_m \leq -10 \text{ dB} \quad \text{或} \quad \varphi_m \geq 45^\circ$$



## 6.6 负反馈放大电路的稳定性

7



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 稳定工作条件以及稳定性分析

#### 2. 稳定性分析

通常先知道放大器的增益，然后设计反馈通路，如何判断稳定性？

环路增益的幅频响应写为  $20\lg|\dot{A}\dot{F}| = 20\lg|\dot{A}| - 20\lg\left|\frac{1}{\dot{F}}\right|$

一般  $\dot{F}$  与频率无关，则  $20\lg\left|\frac{1}{\dot{F}}\right|$  的幅频响应是一条水平线

水平线  $20\lg\left|\frac{1}{\dot{F}}\right|$  与  $20\lg|\dot{A}|$  的交点为  $20\lg\left|\frac{1}{\dot{F}}\right| = 20\lg|\dot{A}|$  即该点满足  $|\dot{A}\dot{F}| = 1$

基于该点对应的相移分析电路稳定性

关键作出  $\dot{A}$  的幅频响应和相频响应波特图

## 6.6 负反馈放大电路的稳定性

8



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 稳定工作条件以及稳定性分析

#### 2. 稳定性分析

利用波特图分析稳定性的步骤

(1) 作出  $\dot{A}$  的幅频响应和相频响应波特图

(2) 作  $20\lg\left|\frac{1}{\dot{F}}\right|$  水平线

(3) 判断两线交点对应的相位是否满足相位裕度 ( $\varphi_m \geq 45^\circ$ )

或 在相频响应的  $\varphi_a = -135^\circ$  点处作垂线交  $20\lg|\dot{A}|$  于P点

若P点在  $20\lg\left|\frac{1}{\dot{F}}\right|$  水平线之下 ( $|\dot{A}_p\dot{F}| < 1$ )，稳定；否则不稳定。

## 6.6 负反馈放大电路的稳定性

9



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 稳定工作条件以及稳定性分析

#### 2. 稳定性分析

反馈系数为  $F_1$  时  $\varphi_m = 90^\circ \geq 45^\circ$

负反馈放大电路稳定

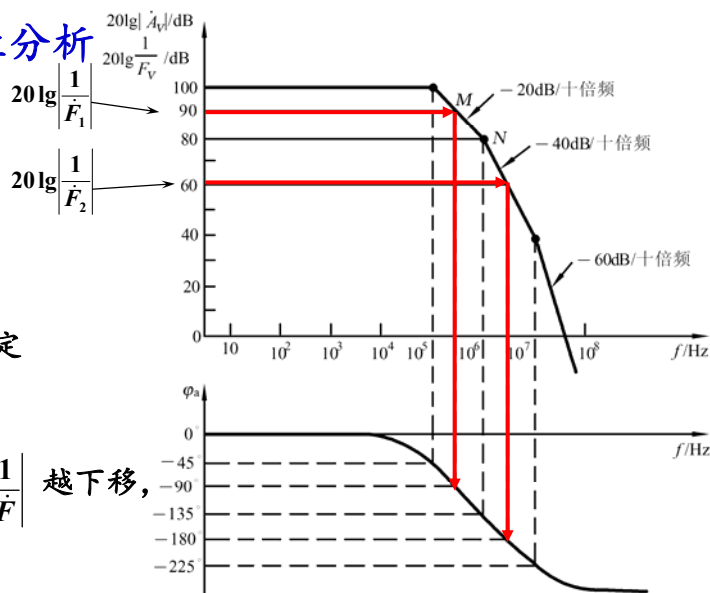
反馈系数为  $F_2$  时 ( $F_2 > F_1$ )

$|\varphi_a + \varphi_f| = 180^\circ$   $\varphi_m = 0^\circ < 45^\circ$  不稳定

总结:

$|\dot{F}|$  越大, 反馈深度越深, 水平线  $20\lg\left|\frac{1}{\dot{F}}\right|$  越下移,

越容易产生自激



## 6.6 负反馈放大电路的稳定性

10

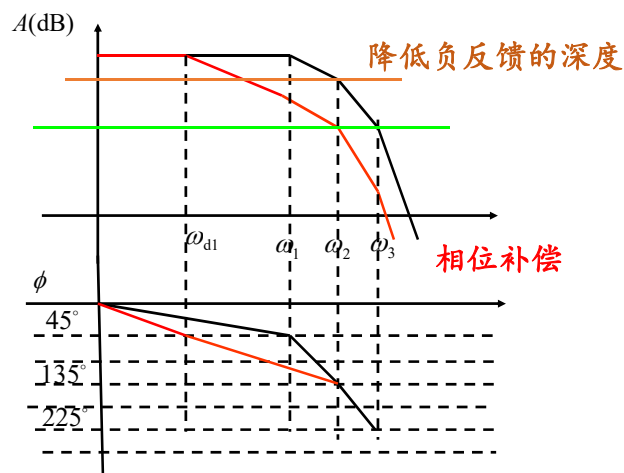


武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 自激振荡的消除方法

解决思路:

- 降低负反馈的深度, 使得附加相移为  $\pi$  时,  $|AF| < 1$
- 采用相位补偿的办法, 将放大电路的各个转折频率的间距拉开, 使之满足稳定条件



## 6.6 负反馈放大电路的稳定性

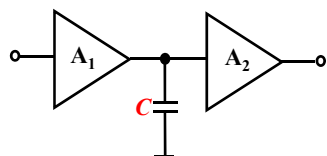
11



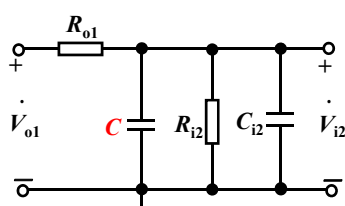
武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 自激振荡的消除方法

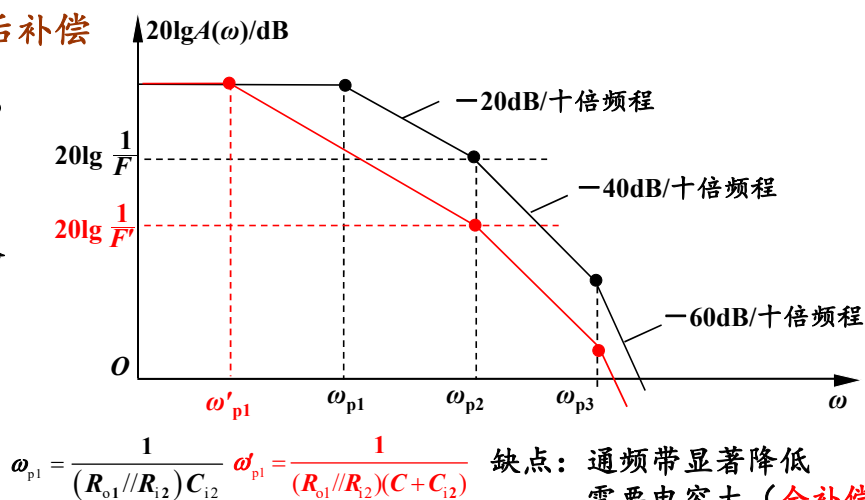
#### 1. 简单电容补偿-滞后补偿



(a) 简单滞后补偿电路



(b) 高频等效电路



## 6.6 负反馈放大电路的稳定性

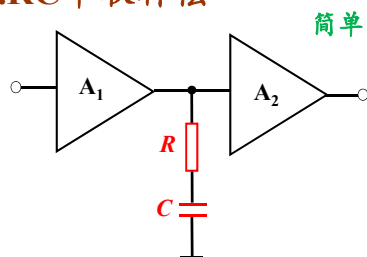
12



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

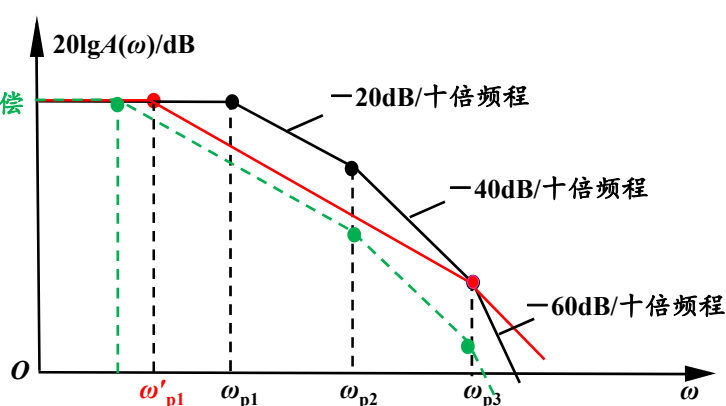
### ➤ 自激振荡的消除方法

#### 2. RC串联补偿



(a) RC滞后补偿电路

阻容补偿增加一个零点，用于消除第二个极点，使-20dB/10倍频程的线拉长。使第三个极点变成第二个极点，实现补偿。



(b) RC滞后补偿前、后放大电路的幅频特性

RC滞后补偿比简单电容补偿的带宽有所改善。

## 6.6 负反馈放大电路的稳定性

13



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

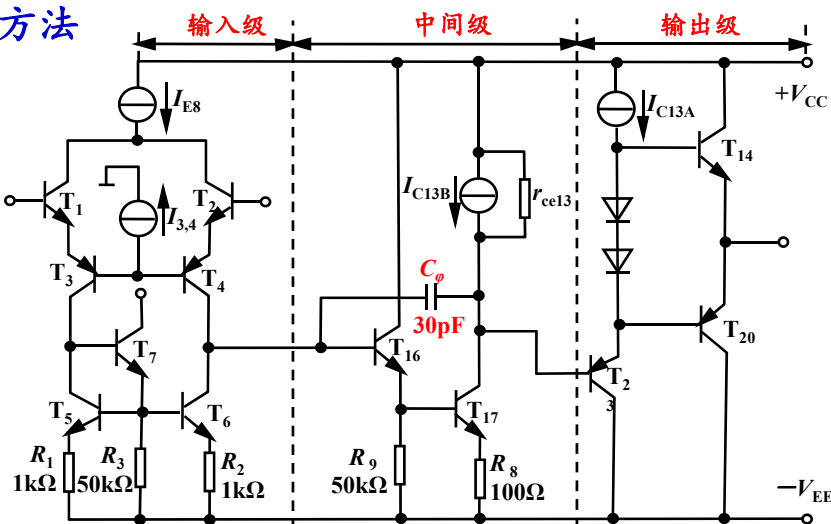
### ➤ 自激振荡的消除方法

#### 3.密勒电容补偿

原理:

利用密勒倍增效应获得一个等效大电容, 实现全补偿。拓宽了极点距离, 延长-20dB线的长度, 又称极点分离技术。

$$C_M = C_\phi(1 + g_m R'_L)$$



集成运放μA741的内部简化电路

## 6.6 负反馈放大电路的稳定性

14



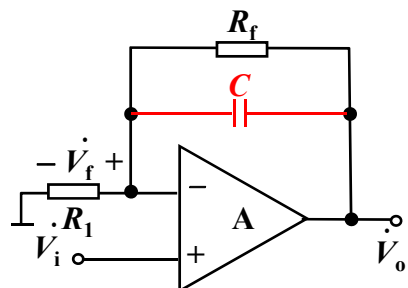
武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 自激振荡的消除方法

#### 4.超前补偿

➤ 滞后补偿——减小第一个极点对应的频率, 会牺牲通频带。

➤ 超前补偿——不改变第一个极点位置, 引入一个零点, 消除第二个极点



超前相位补偿电路

$$\dot{F}_v = \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_f // \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R_1}{R_1 + R_f} \cdot \frac{1 + j\frac{\omega}{\omega_z}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_p}}$$

$$\omega_z = \frac{1}{R_f C} \quad \omega_p = \frac{1}{(R_1 // R_f)C}$$

## 6.6 负反馈放大电路的稳定性

15



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

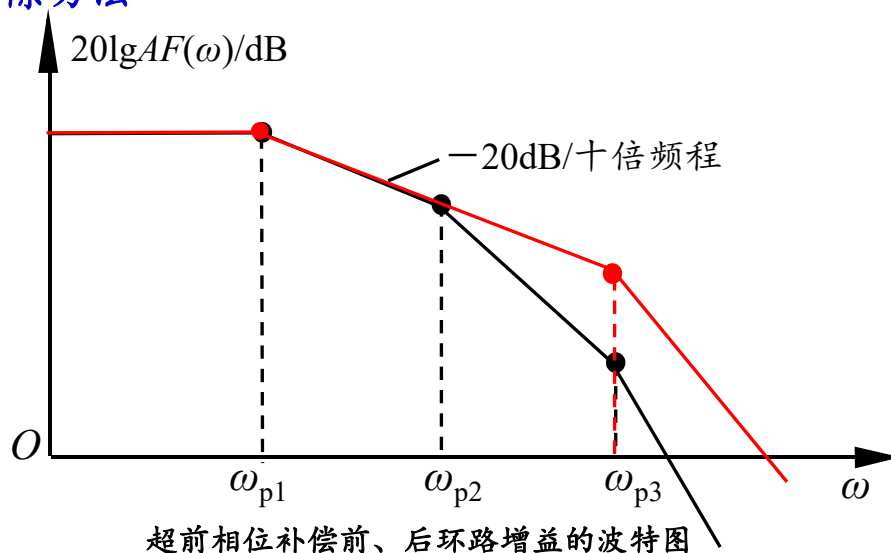
### ➤ 自激振荡的消除方法

#### 4.超前补偿

取 $R_f$ 和 $C$ ，使得：

$$\omega_z = \omega_{p2}$$

$$\omega_p \gg \omega_{p3}$$



## 第6章 负反馈放大器

16



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### 知识点掌握要求

- 了解反馈的基本概念
- 熟练掌握反馈放大电路中反馈极性和反馈组态的判断，以及反馈系数的计算
- 熟练掌握各组态的负反馈对放大电路输入与输出电阻、增益和其它性能的影响
- 熟练掌握深度负反馈条件下“虚短”和“虚断”的概念，并利用这两个概念近似计算负反馈放大电路的闭环增益和电压增益
- 了解负反馈放大电路拆环的分析方法，掌握拆环的规则
- 掌握自激振荡产生的条件以及判断反馈放大电路稳定性的方法，了解消除方法



## 课后作业

17

武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

6. 1

6. 23

6. 5

6. 25(第二问不做)

6. 9

6. 26

6. 11

6. 27

6. 14-6. 15

6. 16

6. 17

6. 20