



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

§ 7.5 差动运放电路

lugh@ustc.edu.cn

2016年12月7日

提纲

1. 基本型
2. 同相并联型
3. 仪用三运放电路

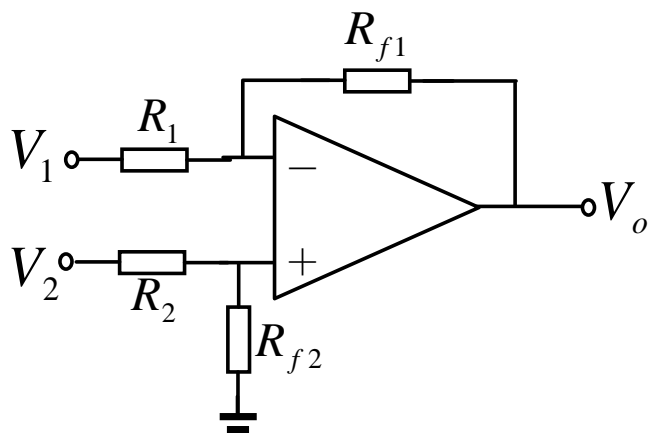
1. 基本型

■ 必要性

- 电路中的干扰多为共模形式存在，故我们可以将信号按差模方式传输，所以差动电路应用十分广泛
- 运放本身就具有差动电压传输特性，但是，运放直接作差动运算时，因接近理想运放，开环应用时线性范围太小，应用时必须加深度负反馈，增益主要取决于外加反馈网络

1. 基本型

■ 电路结构



1. 基本型

■ 工作原理

$$\begin{cases} V_- = V_+ = V_2 \cdot \frac{R_{f2}}{R_2 + R_{f2}} \\ \frac{V_1 - V_-}{R_1} = \frac{V_- - V_o}{R_{f1}} \end{cases}$$
$$\Rightarrow V_o = -\frac{R_{f1}}{R_1} V_1 + \left(1 + \frac{R_{f1}}{R_1}\right) \cdot \frac{R_{f2}}{R_2 + R_{f2}} \cdot V_2$$

- 两种放大的线性叠加，对 V_1 的反相放大和对 V_2 分压后的同相放大

1. 基本型

将 $V_1 = V_c - V_d$, $V_2 = V_c + V_d$ 代入 V_o 表达式, 得到

$$\begin{aligned} V_o &= V_c \cdot \left[\left(1 + \frac{R_{f1}}{R_1}\right) \cdot \frac{R_{f2}}{R_2 + R_{f2}} - \frac{R_{f1}}{R_1} \right] + V_d \cdot \left[\left(1 + \frac{R_{f1}}{R_1}\right) \cdot \frac{R_{f2}}{R_2 + R_{f2}} + \frac{R_{f1}}{R_1} \right] \\ &= V_c A_c + V_d A_d \end{aligned}$$

$$\text{令 } \frac{R_{f1}}{R_1} = \alpha_1, \frac{R_{f2}}{R_2} = \alpha_2, \text{ 则}$$

$$CM_{\text{电路}} = \frac{\alpha_2(1 + \alpha_1) + \alpha_1(1 + \alpha_2)}{\alpha_2(1 + \alpha_1) - \alpha_1(1 + \alpha_2)}$$

1. 基本型

- (1) 两对电阻完全匹配、运放理想 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$

$$V_o = \alpha(V_2 - V_1)$$

$$\begin{cases} A_d = 2\alpha \\ A_c = 0 \\ CM_{\text{电路}} = \infty \end{cases}$$

1. 基本型

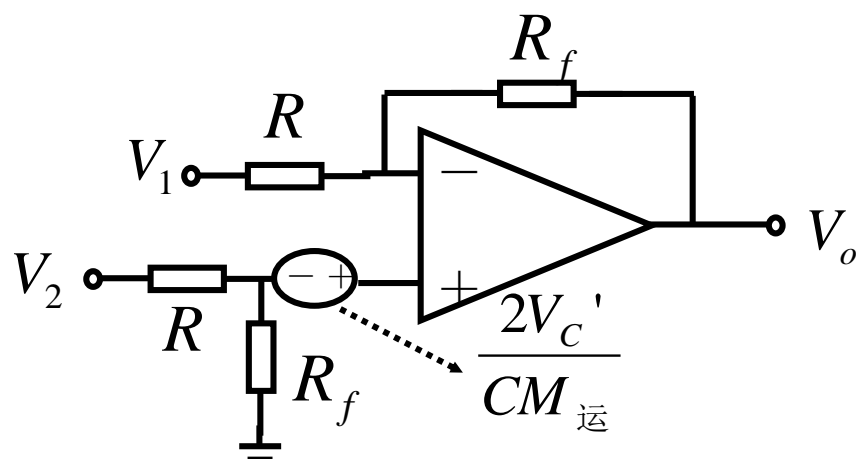
■ (2)两对电阻不完全匹配、运放理想

$$\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}, \quad \Delta\alpha = |\alpha_2 - \alpha_1|$$

$$CM_{\text{电路}} = \frac{2\alpha(1+\alpha)}{\Delta\alpha} \approx \frac{2\alpha^2}{\Delta\alpha}$$

1. 基本型

■ (3)两对电阻完全匹配，运放为有限CMRR



$$V_c' = V_+ = V_- = \frac{R_f}{R + R_f} \cdot V_2$$

$$V_o = \frac{R_f}{R} (V_2 - V_1) + \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) \frac{2V_c'}{CM_{\text{运}}}$$

$$CM_{\text{电路}} = \frac{2 \frac{R_f}{R} + 2 \frac{R_f}{R} \cdot \frac{1}{CM_{\text{运}}}}{2 \frac{R_f}{R} \cdot \frac{1}{CM_{\text{运}}}} \approx CM_{\text{运}}$$

□ 电路的**CMRR**最多可达到运放水平

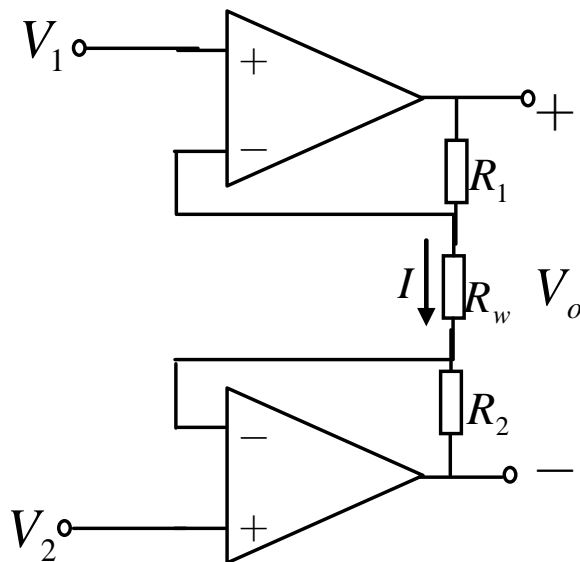
1. 基本型

■ 说明

- 要达到电路的**CMRR**很大，必须采用**CMRR**很高的运放
- 两对电阻必须完全匹配，但实际中，总有些差异
- 电路的输入阻抗不高
- 增益调节很麻烦。两路必须同步调节

2. 同相并联型

■ 电路分析



$$V_+ = V_- \Rightarrow I = \frac{V_1 - V_2}{R_w}$$

$$\Rightarrow V_o = I(R_1 + R_2 + R_w) = \left(1 + \frac{R_1 + R_2}{R_w}\right)(V_1 - V_2)$$

2. 同相并联型

$$CM_{\text{电路}} = \infty$$

- 电路解决了上面提到的所有问题

2. 同相并联型

■ 运放为有限CMRR

加入两个等效源 $\frac{2V_1}{CM_{\text{运放1}}}$ 和 $\frac{2V_2}{CM_{\text{运放2}}}$

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R_w} + \frac{2\frac{V_1}{CM_{\text{运放1}}} - 2\frac{V_2}{CM_{\text{运放2}}}}{R_w}$$

$$V_o = (1 + \frac{R_1 + R_2}{R_w})(V_1 - V_2) + 2(\frac{V_1}{CM_{\text{运放1}}} - \frac{V_2}{CM_{\text{运放2}}})(1 + \frac{R_1 + R_2}{R_w})$$

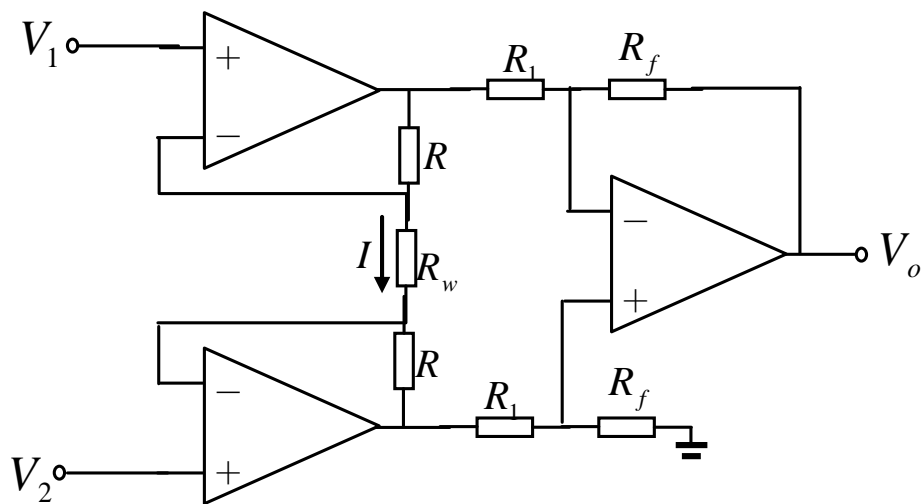
2. 同相并联型

$$CM_{\text{电路}} = \frac{1 + \frac{1}{CM_{\text{运放1}}} + \frac{1}{CM_{\text{运放2}}}}{\left| \frac{1}{CM_{\text{运放1}}} - \frac{1}{CM_{\text{运放2}}} \right|} \approx \frac{1}{\left| \frac{1}{CM_{\text{运放1}}} - \frac{1}{CM_{\text{运放2}}} \right|}$$
$$= \frac{CM_{\text{运放2}} \cdot CM_{\text{运放1}}}{|CM_{\text{运放2}} - CM_{\text{运放1}}|}$$

- 两只基本一致的运放得到很高的电路**CMRR**，对运放要求较低
- 此运放基本满足设计要求，只是为悬浮输出，改进为仪用三运放电路

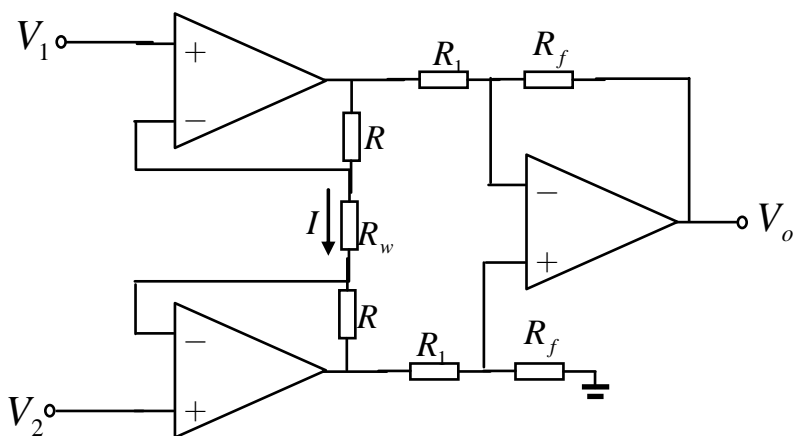
3. 仪用三运放电路

■ 电路结构



3. 仪用三运放电路

■ 工作原理



$$V_{o1} = \left(1 + \frac{2R}{R_w}\right)(V_1 - V_2)$$
$$\Rightarrow V_o = \frac{R_f}{R_1}(-V_{o1}) = \frac{R_f}{R_1} \left(1 + \frac{2R}{R_w}\right)(V_2 - V_1)$$

3. 仪用三运放电路

$$CM_{\text{运放3}} \neq \infty$$

$$\text{加入 } \frac{2V_c'}{CM_{\text{运放3}}}, \quad V_c' = \left(V_2 - \frac{V_1 - V_2}{R_w} \cdot R \right) \cdot \frac{R_f}{R_1 + R_f}$$

$$CM_{\text{电路}} = \left(1 + \frac{2R}{R_w} \right) \cdot CM_{\text{运放3}}$$

仪用三运放电路得到了广泛的应用



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

§ 7.7 实际运放的频率特性及补偿

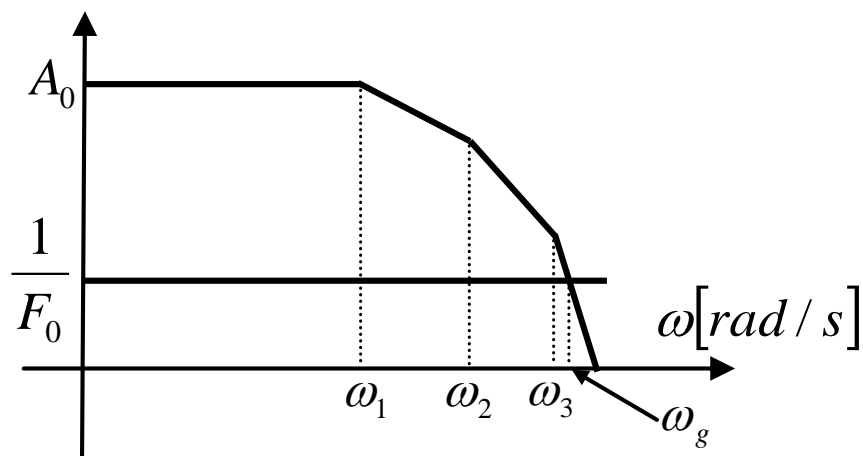
lugh@ustc.edu.cn

2016年12月7日

1. 稳定性分析

■ 运放的开环频率特性

$$A(j\omega) = \frac{A_0}{(1 + j\frac{\omega}{\omega_1})(1 + j\frac{\omega}{\omega_2})(1 + j\frac{\omega}{\omega_3})}$$



$$|A(j\omega_g)| = \frac{1}{|F_0|}$$

$$\varphi_A(j\omega_g) \leq -180^\circ$$

$$\varphi_A(j\omega_g) > -180^\circ$$

1. 稳定性分析

■ 稳定性问题

- 集成运放一般为三级以上，导致运放电路附加相移严重，而且运放本身增益很高，应用时为深度负反馈，故很容易自激

■ 分析方法

- 运放的开环增益至少有三个极点，而反馈网络一般为纯阻，常用**Bode**图方法来进行稳定性分析

2. 频率补偿技术

■ 必要性

- 当运放电路不稳定时，而运放的反馈网络又不能改变，则必须对运放的频率特性进行修正，使增益交界频率减小，最终使附加相移小于**180度**，破坏产生自激的幅相条件

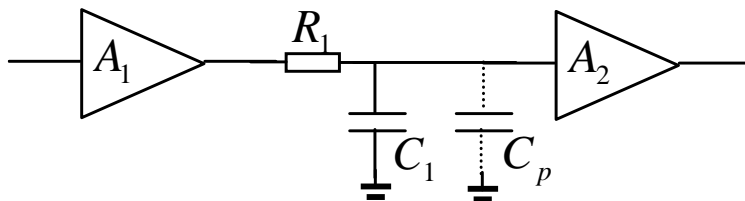
■ 简单电容补偿

- 设计目标

并接 C_p ，调整主极点，使得 $\omega_g' < \omega_g$ ，最终使附加相移小于 180°

2. 频率补偿技术

■ 电路结构



■ 两种具体补偿方式

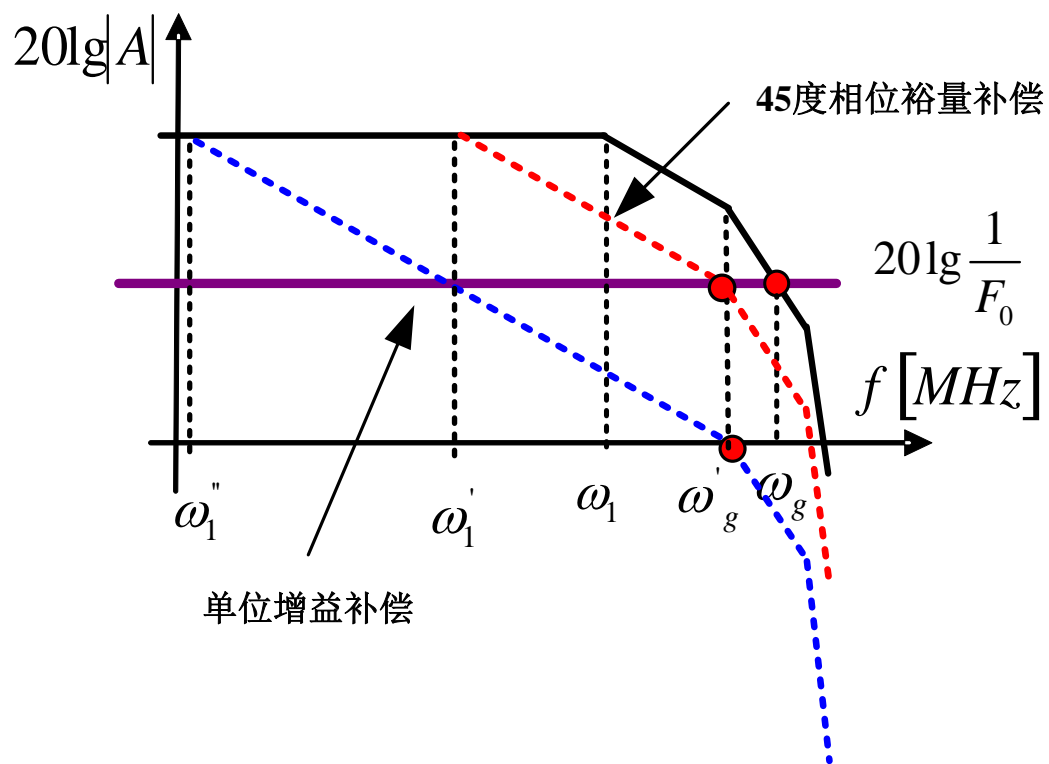
□ 45度相位裕量补偿

$$\varphi_A(j\omega_g') = -135^\circ \Rightarrow \gamma = 45^\circ$$

□ 单位增益补偿

$$\begin{cases} |A(j\omega_g')| = 1 \\ \varphi_A(j\omega_g') = -135^\circ \end{cases}$$

2. 频率补偿技术



2. 频率补偿技术

■ 例：简单电容补偿

一个三极点运放， $A_0=2000$ ， $f_1=0.8\text{MHz}$ ， $f_2=4\text{MHz}$ ， $f_3=40\text{MHz}$ ，该运放有频率补偿端，等效的 $C_1=5\text{pF}$ (R_1 ， C_1 形成极点 f_1)

(1) 加纯阻负反馈，求使得系统稳定的 $F_{0\max}$

(2) 若要求 $F_0=0.0125$ ，相位裕量 $\gamma=45^\circ$ ，求修正电容 C_p 及修正后的 f_1'

2. 频率补偿技术

解：（1）

依 $\varphi_A(jf_p) = -180^\circ$ ，先求 f_p ，即

$$-45^\circ \left(\lg \frac{f_p}{0.08} + \lg \frac{f_p}{0.4} + \lg \frac{f_p}{4} \right) = -180^\circ \Rightarrow f_p = 10.86 \text{MHz}$$

分析可知，上式需要修正为

$$-90^\circ - 45^\circ \left(\lg \frac{f_p}{0.4} + \lg \frac{f_p}{4} \right) = -180^\circ \Rightarrow f_p = 12.65 \text{MHz}$$

令 $f_p = f_g$ ，由 $F_{0\max} = \frac{1}{|A(jf_g)|}$ 可知，

$$20 \lg |A(jf_g)| = 66 - 20 \lg \frac{12.65}{0.8} - 20 \lg \frac{12.65}{4} = 32(\text{dB})$$

$$\Rightarrow F_{0\max} = 0.025$$

2. 频率补偿技术

(2)

假定 $f_1' \ll f_2$, 由 $\varphi_A(jf_g') = -135^\circ$ 可得

$$-90^\circ - 45^\circ (\lg \frac{f_g'}{0.4} + \lg \frac{f_g'}{4}) = -135^\circ \Rightarrow f_g' = 4MHz$$

则由

$$20\lg|A(jf_g')| = 66 - 20\lg \frac{4}{f_1'} - 3 = -20\lg 0.0125(dB)$$

求出 $f_1' = 0.226MHz$, 假设成立

$$\text{于是根据} \begin{cases} 2\pi f_1 = \frac{1}{R_1 C_1} \\ 2\pi f_1' = \frac{1}{R_1 (C_1 + C_p)} \end{cases} \Rightarrow C_p = 12.7 pF$$

本章小结

■ 集成运算放大器的电压传输特性

- 熟悉集成运放的内部基本结构和主要特性参数
- 熟悉集成运放的两种工作区及其判别方法
- 熟悉集成运放的电路符号
- 牢记集成运放的理想模型（理想运放）及其工作特点

本章小结

■ 理想运放的非线性应用

- 掌握理想运放的非线性应用条件和分析方法
- 掌握理想运放反馈极性的判断方法
- 熟悉单门限比较器、迟滞比较器的电路结构及工作原理

本章小结

■ 理想运放的线性应用

- 掌握理想运放的线性应用条件和分析方法
- 熟悉由理想运放构成的反相运放电路的基本型结构和功能
- 熟悉由理想运放构成的同相运放电路基本型结构和功能
- 掌握基本差动运放电路的基本结构和分析方法
- 掌握仪用三运放电路的基本结构、功能和分析方法

本章小结

■ 实际运放的频率特性及补偿

- 理解集成运放电路的稳定性问题的由来
- 掌握运放电路的稳定性分析方法
- 熟悉对运放电路进行基于简单电容补偿的 45° 相位裕量补偿及单位增益补偿