

# 集成运放电路应用之正弦波振荡电路

正弦波振荡电路是一种信号发生电路，在通信、测量等领域得到广泛应用。正弦波振荡电路是指在不加任何输入信号，自身就能产生具有一定频率、一定幅度的正弦波信号的电路。它一般包括四个基本环节：放大电路、反馈网络、选频网络和稳幅环节。

## 1、正弦波振荡电路的振荡条件

正弦波振荡电路的方框图如图 1 所示。其中  $\dot{A}$  是放大器， $\dot{F}$  是反馈网络。

设放大器维持输出电压  $\dot{U}_o$  所需的输入信号电压为  $\dot{U}_{id}$ ， $\dot{U}_f$  为反馈电压，当  $\dot{U}_f = \dot{U}_{id}$  时电路就能维持稳定的输出电压。由于振荡电路不需外加信号就有稳定的输出信号，故又称自激振荡电路。

放大器  $\dot{A}$  没有非线性失真，则其输出信号为

$$\dot{U}_o = \dot{A} \dot{U}_{id}$$

经  $F$  反馈回来的信号则为

$$\dot{U}_f = \dot{F} \dot{U}_o = \dot{F} \dot{A} \dot{U}_{id}$$

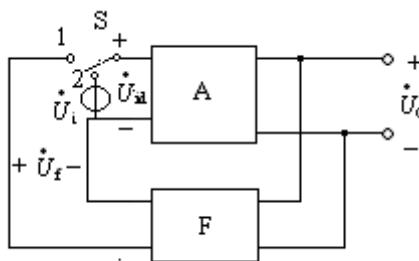


图 10 正弦波振荡电路图

如果要满足  $\dot{U}_f = \dot{U}_{id}$ ，则必须有

$$\dot{A} \dot{F} = 1 \quad (2.4-6)$$

式为振荡电路产生自激振荡的平衡条件

写成幅值与相角的形式，可得振荡电路产生自激振荡的平衡条件：

$$(1) \text{ 振幅平衡条件} \quad |\dot{A} \dot{F}| = 1 \quad (2.4-7)$$

$$(2) \text{ 相位平衡条件} \quad \varphi_a + \varphi_f = 2n\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.4-8)$$

## 2、振荡电路的起振与稳幅

前面两式是维持振荡的平衡条件, 为使电路在通电时能自动起振, 电路必须满足起振条件:

$$\left| \frac{d}{dt} \left| \frac{d}{dt} \right| \right|_{AF} > 1 \quad (2.4-9)$$

$$\varphi_a + \varphi_f = 2n\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.4-10)$$

当振荡电路在刚通电 (合上开关) 时, 电路中就会产生微小的电扰动, 这就是起始信号。它含有丰富的、各种频率的谐波成分, 其中必定有一种频率信号能满足相位平衡条件,

如果电路的幅度条件也能满足  $\left| \frac{d}{dt} \left| \frac{d}{dt} \right| \right|_{AF} > 1$ , 那么微小的电信号通过正反馈不断地放大, 输出信号很快就由小变大, 使振荡电路起振。起振后, 由于振荡幅度迅速增大, 放大器进入非线性区工作, 导致放大倍数下降, 一直到  $\left| \frac{d}{dt} \left| \frac{d}{dt} \right| \right|_{AF} = 1$ , 振荡电路进入稳幅振荡状态。

## 3、RC 正弦波振荡电路

常见的正弦波振荡电路有:  $RC$  正弦波振荡电路、 $LC$  振荡电路和石英晶体振荡电路。在这里, 我们只重点介绍  $RC$  正弦波振荡电路。

### 1. $RC$ 串、并联选频网络的选频特性

$RC$  串、并联网络如图 11(a)所示。在频率很低时,  $\frac{1}{\omega C_1} \gg R_1$ ,  $\frac{1}{\omega C_2} \gg R_2$ , 使

得串联中  $R_1$  的电压、并联中  $C_2$  的分流可以忽略不计, 此时, 选频网络可近似地用图 11(b)

所示的  $RC$  高通电路表示。随着信号频率的减小, 输出电压  $\dot{U}_2$  也减小, 但  $\dot{U}_2$  与  $\dot{U}_1$  的相移  $\varphi_f$  却愈大, 当  $\omega$  趋近于零时,  $|\dot{U}_2|$  趋近于零, 相移  $\varphi_f$  趋近于  $90^\circ$ ; 当信号频率很高时,

$\frac{1}{\omega C_1} \ll R_1$ ,  $\frac{1}{\omega C_2} \ll R_2$ , 使得串联中电容  $C_1$  的电压、并联中  $R_2$  的分流可以忽略不计, 则

选频网络可近似的用图 3-4-21(c)所示的  $RC$  低通电路来表示。随着信号频率增高, 输出电压  $|\dot{U}_2|$  仍将减小,  $\dot{U}_2$  滞后于  $\dot{U}_1$  的相移  $\varphi_f$  愈大。同样, 当信号频率趋于无穷大时,  $|\dot{U}_2|$  趋近于零, 相移  $\varphi_f$  趋近于  $-90^\circ$ 。

因此, 可以确定, 在信号频率为零和无穷大之间, 必然存在某一频率  $f_0$  相移  $\varphi_f = 0$ , 且其输出电压幅度可能有一最大值。说明网络具有选频特性。

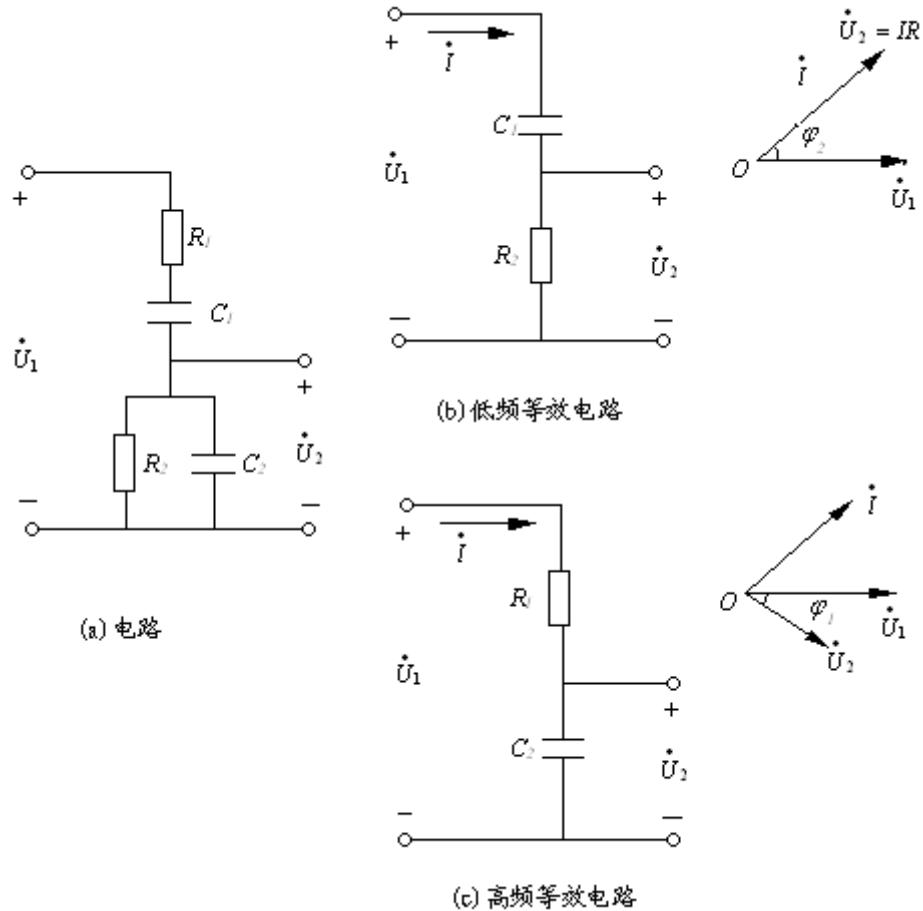


图 11 RC 串、并联选频网络

通常  $R_1 = R_2$ ,  $C_1 = C_2$ , 此时反馈系数

$$F_u^* = \frac{U_2^*}{U_1^*} = \frac{j\omega RC}{(1-\omega^2 R^2 C^2) + 3j\omega RC} = \frac{1}{3 + j(\omega RC - \frac{1}{\omega RC})} \quad (2.4-11)$$

当上式分母中虚部系数为零时, 相角  $\varphi_f$  为零, 满足这个条件的频率可由式 (2.4-11) 得出

$$\omega_0 = \frac{1}{RC}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.4-12)$$

将式(2.4-12)代入式 (2.4-11)得

$$F_u = \frac{1}{3 + j(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})} \quad (2.4-13)$$

因此有

$$F_u = \frac{1}{\sqrt{3^2 + j(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})^2}} \quad (2.4-14)$$

$$\varphi_f = -\arctan \frac{(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})}{3} \quad (2.4-15)$$

由上式可知, 当  $\omega = \omega_0$  时,  $F_{u,\max} = \frac{1}{3}$ , 且  $\varphi_f = 0$ 。

由式(2.4-14)和式(2.4-15)可画出串、并联选频网络的幅频特性和相频特性曲线, 如图 12(a)、(b)所示。

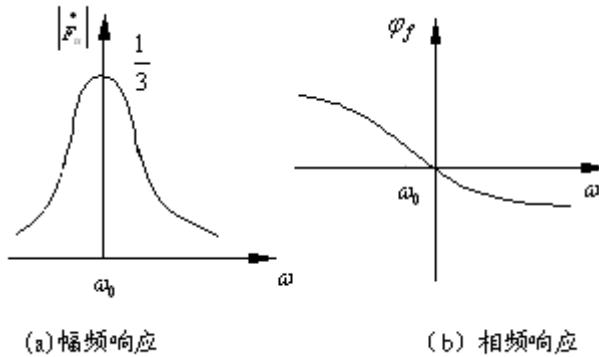


图 12 RC 串、并联网络的频率响应

RC 桥式正弦波振荡电路如图 13 所示, 它是采用 RC 串并联网络和同相比例运算电路组成。

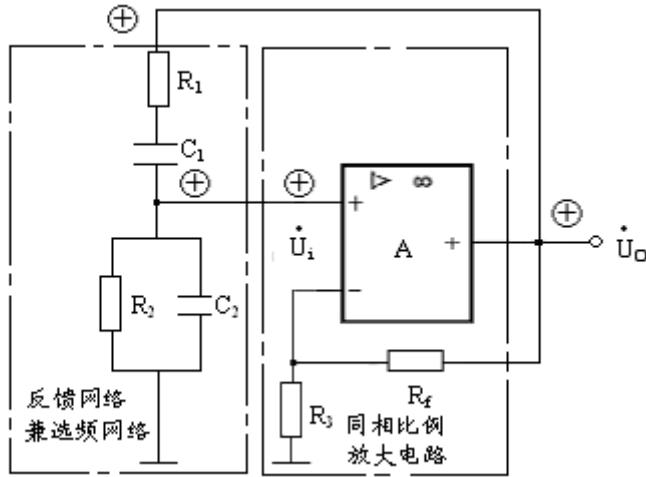


图 13 RC 桥式正弦波振荡电路

图中  $RC$  串并联网络包含选频和反馈网络，该电路为  $RC$  带通滤波电路，

(1) 当  $\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$  时，输入与输出同相， $\varphi_a + \varphi_f = 0$ ，相位条件满足。

(2) 当  $\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$ ，反馈系数  $F = \frac{1}{3}$ ，同相比例运算电路的反大倍数  $|A_{uf}| = 1 + \frac{R_f}{R_1}$

要满足  $|\dot{A}F| > 1$ ，须  $|A_{uf}| = 1 + \frac{R_f}{R_1} > 3$ ，即  $R_f > 2R_1$  时，，电路很容易满足起振条件，

能顺利起振。

起振后，由于反馈元件或晶体管的非线性，放大倍数下降，最后到  $|\dot{A}F| = 1$ ，振荡电路进入稳幅振荡状态，电路振荡平衡条件得到满足。

在实际中，为了更好地稳定输出电压的幅值，可采用负温度系数的热敏电阻来代替  $R_f$ 。起振时，由于输出电压幅值较小，流过  $R_f$  的电流也较小，发热小，阻值较大，因而放大电路的电压放大倍数  $A_u$  较大，有利于起振；然后，输出电压幅值逐渐增大，流过  $R_f$  的电流也增大，电阻因温度升高而导致阻值下降，放大电路的电压放大倍数  $A_u$  也随之下降，从而实现了增益的自动调节，使电路输出幅值稳定。

$RC$  桥式正弦波振荡电路的振荡频率就是  $RC$  串并联电路的谐振频率  $f_o$

$$f_o = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.4-16)$$

由上式可知，调节  $R$ 、 $C$  的值可改变振荡频率。

*RC* 振荡电路的振荡频率较低，一般在  $1\text{MHz}$  以下。对于  $1\text{MHz}$  以上的信号，应考虑采用 *LC* 振荡电路。