# 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 $\dot{U}_{\mathrm{o}}$ 所需的输入信号电压为 $\dot{U}_{id}$，$\dot{U}_{\mathrm{f}}$ 为反馈电压，当 $\dot{U}_{\mathrm{f}} = \dot{U}_{\mathrm{id}}$ 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，故又称为自激振荡电路。

放大器 $\dot{A}$ 没有非线性失真，则其输出信号为

$$\dot{U}_0 = \dot{A}\dot{U}_{\mathrm{id}}$$

经 F 反馈回来的信号则为

$$\dot{U}_f = \dot{F}\dot{U}_0 = \dot{F}\dot{A}\dot{U}_{\mathrm{id}}$$

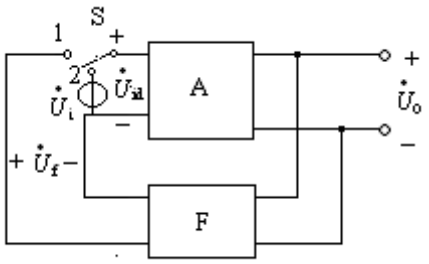


图 1 正弦波振荡电路图

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

$$\dot{A}\dot{F} = 1$$

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）振幅平衡条件 $\left|\dot{A}\dot{F}\right| = 1$

（2）相位平衡条件　　$\varphi_a + \varphi_f = 2n\pi$ ，$n = 0,1,2\ldots\ldots$

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：

$$|\dot{A}\dot{F}| > 1$$

$$\varphi_a + \varphi_f = 2n\pi \quad ， \quad n = 0,1,2\ldots\ldots$$

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 $|\dot{A}\dot{F}| > 1$，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 $|\dot{A}\dot{F}| = 1$，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 2(a)所示。在频率很低时，$\frac{1}{\omega C_1} >> R_1$，$\frac{1}{\omega C_2} >> R_2$，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 2（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 $90^0$；当信号频率很高时，$\frac{1}{\omega C_1} << R_1, \frac{1}{\omega C_2} << R_2$，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 2(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$-90^0$。

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。

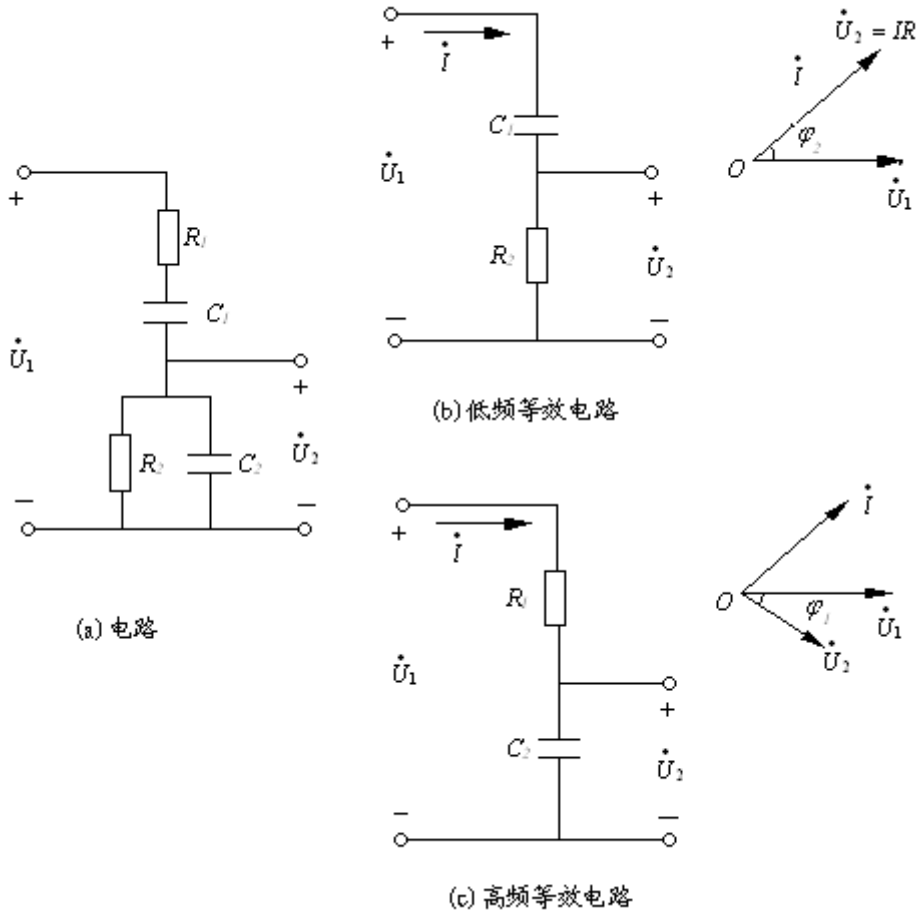


图 2　RC 串、并联选频网络

通常 $R_1 = R_2$，　$C_1 = C_2$,此时反馈系数

$$\dot{F}_u = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{j\omega RC}{(1-\omega^2 R^2 C^2)+3j\omega RC} = \frac{1}{3+j(\omega RC - \frac{1}{\omega RC})}$$

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上式得出

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

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

由上式得

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

因此有

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

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

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

由上式可画出串、并联选频网络的幅频特性和相频特性曲线，如图 3 所示。

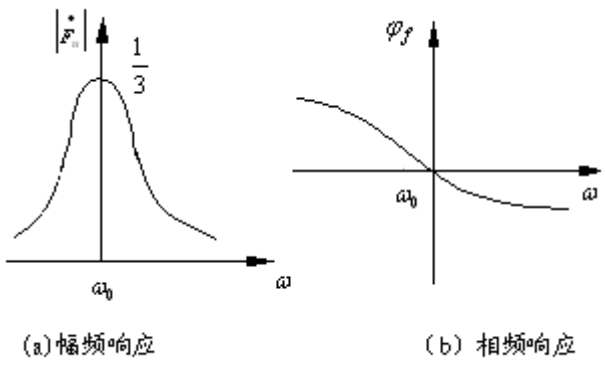


图 3 RC 串、并联网络的频率响应

RC 桥式正弦波振荡电路如图 4 所示，它是采用 RC 串并联网络和同相比例运算电路组成。

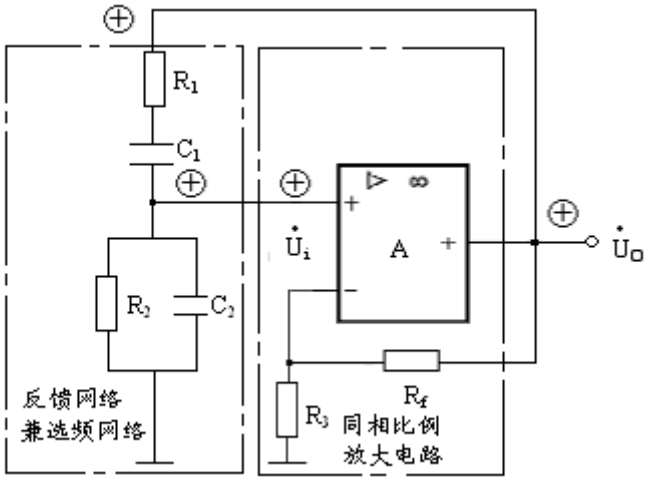


图 4　RC 桥式正弦波振荡电路

图 4 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 $\omega = \omega_0 = \dfrac{1}{RC}$ 时，输入与输出同相，$\varphi_a + \varphi_f = 0$，相位条件满足。

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

要满足 $\left|\dot{A}\dot{F}\right| > 1$，须 $\left|A_{uf}\right| = 1 + \dfrac{R_f}{R_1} > 3$，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 $\left|\dot{A}\dot{F}\right| = 1$，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 $f_o$

$$f_o = \frac{1}{2\pi RC}$$

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 1MHz 以下。对于 1MHz 以上的信号，应考虑采用 *LC* 振荡电路。