

实验七 集成运算放大器的应用（二）

CastleStar14654

实验日期: 2020 年 11 月 9 日 提交日期: 2020 年 11 月 16 日

1 实验目的

- 进一步了解运算放大器的基本特性;
- 了解并实践运算放大器实现微积分电路方法;
- 用运放插接实现 RC 桥式振荡器。

2 仪器设备

SS1792F 可跟踪直流稳定电源; KEITHLEY 2110 五位半双显示数字万用表; AFG3051C 任意波形发生器; TDS1012C 数字存储示波器; 面包板。

$\mu A741$ 运算放大器 1 只; $10\text{ k}\Omega$ 电阻 3 只; $20\text{ k}\Omega$, $1.5\text{ k}\Omega$ 电阻各 2 只; $100\text{ k}\Omega$, $1\text{ k}\Omega$ 电阻各 1 只; $3.9\text{ k}\Omega$ 电位器 1 只; 180 pF , 340 pF 电容各 1 只; $0.1\text{ }\mu\text{F}$ 电容 2 只。

3 实验原理

3.1 利用运放作微积分运算

运放此时工作在线性区。

3.1.1 积分运算

电路图见图 1, 反相输入。运放虚短路虚断路,

$$i_{R_1} = \frac{u_i}{R_1} = i_C, \quad (1)$$

$$u_o = u_C = -\frac{1}{C} \int i_C dt = -\frac{1}{\tau} \int u_i dt. \quad (2)$$

其中 $\tau = RC$ 是电路的时间常数。输出电压与输入电压的积分成比例且反相。

电路中的 R_2 是补偿电阻, 通常取 $R_2 = R_1$ 。二极管 D 为抗饱和用, 但是实际上效果不显著, 也可以省略不接。

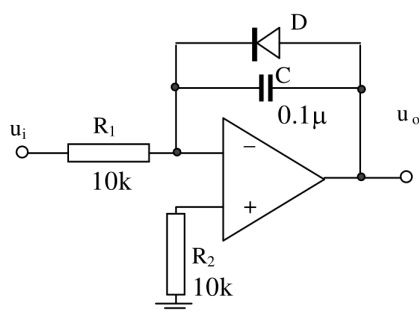


图 1: 积分电路

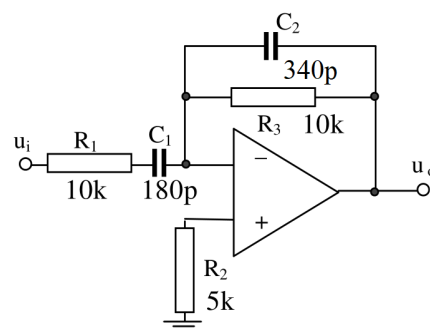


图 2: 微分电路

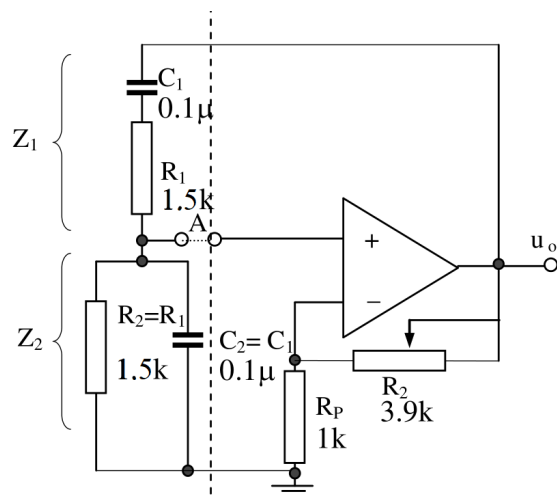


图 3: 运放实现的 RC 桥式振荡器

3.1.2 微分运算

电路图见图 2，反相输入。有

$$u_o = -RC \frac{du_i}{dt}. \quad (3)$$

由于微分电路本质上是一个高通滤波器，同时运放本身在高频时有滞后的附加相移，要在简单的交换图 1 中电容电阻得到的理想微分器的基础上再更改电路。

在微分电容 C_1 上串联一个电阻 R_1 ，消除自激振荡、抑制高频信号的干扰；在反馈回路的电阻 R_3 上并联电容 C_2 ，使 R_1 的取值变小一些，让系统获得相位超前特性。在输入信号频率 ω 远小于 $\omega_H = \frac{1}{RC}$ 时，此电路就近似相当于一个理想微分器。 R_2 是补偿电阻，满足 $R_2 = R_1 \parallel R_3$ 。

3.2 RC 桥式振荡器

电路图见图 3。电路由两部分组成，虚线左边是振荡器反馈网络，右边则是放大器部分。维持自激振荡要求反馈网络传输系数 \dot{F} 和放大器的传输系数 \dot{A} 满足 $\dot{F}\dot{A} = 1$ ；但起振要求 $\dot{F}\dot{A} > 1$ ，这在线性网络中会带来正反馈。因此，需要在放大器或反馈网络中引入由非线性元件组成的稳幅环节。

计算可得，反馈网络有

$$\dot{F} = \frac{1}{3 + j\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}, \quad \text{其中 } \omega_0 = \frac{1}{RC}. \quad (4)$$

当 $\omega = \omega_0$ 时， $|\dot{F}| = \frac{1}{3}$ 最大，此时也有 $\phi_F = 0$ 。

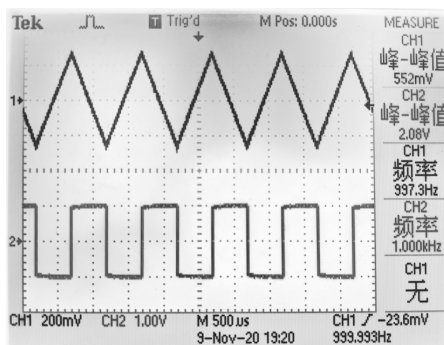
振荡器一旦振荡，放大器的输入阻抗很大时，正弦信号的频率近似为

$$f = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (5)$$

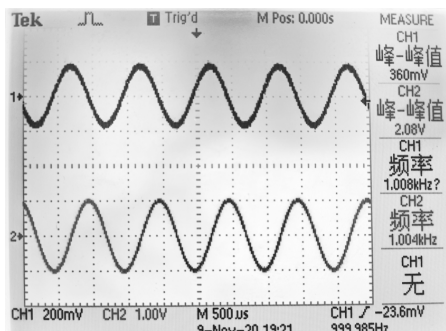
4 方法步骤

4.1 利用运放作微积分运算

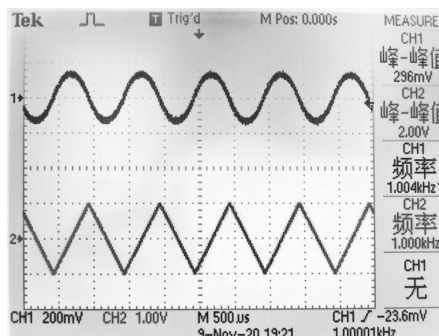
1. 积分运算。按图 1 插接电路板，使用双电源。用信号源的方波做输入信号，频率可取 1 kHz 左右，信号幅度不要太小。观测输出输入信号波形、振幅、相位的相互关系。
2. 微分运算。按图 2 插接电路板，使用双电源。实验内容同积分电路。
3. 使用其他波形和频率研究积分和微分运算电路。



(a) 方波输入



(b) 正弦波输入



(c) 三角波输入

图 4: 积分电路。信号 $f = 1 \text{ kHz}$ ，下方为输入信号 CH2，上方为输出信号 CH1

4.2 RC 桥式振荡器

1. 按图 3 插接电路板。
2. 改变负反馈电阻 R_F 的大小，观察对输出波形的影响，记录波形并进行分析。
3. 用示波器测量桥路电容 $C_1 = C_2 = C = 0.1 \mu\text{F}$ 时的振荡频率。调整 R_F 使输出波形为不失真的正弦波时测量，理论值与实测值相比较。
4. 测量振荡时输出正弦波的电压值。调整 R_F ，使输出正弦波幅度最大时进行测量。
5. 测量深度负反馈放大器的放大倍数。调整 R_F ，使输出正弦波幅度最大。再断开 A 点，从 A 点输入 $f = 1 \text{ kHz}$, $u_i = 300 \text{ mV}_{\text{pp}}$ 的正弦信号。测量 u_o ，获得放大器的放大倍数 A_F ，并与理论值比较。

5 数据分析

5.1 利用运放作微积分运算

5.1.1 积分运算

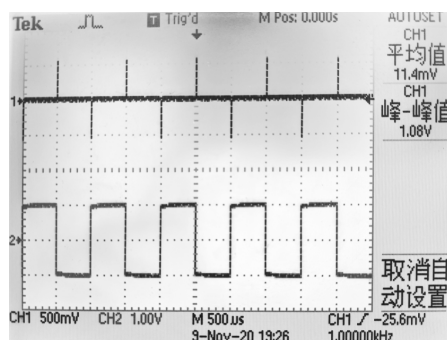
方波、正弦波和三角波三种输入信号 ($f = 1 \text{ kHz}$) 下的输入、输出信号见图 4。可以发现，输出信号是输入信号的反相积分结果。电路的时间常数应为 $\tau = 1 \text{ ms}$ 。

验证式 (2)。对方波，半个周期的信号积分对应输出的峰峰值，有

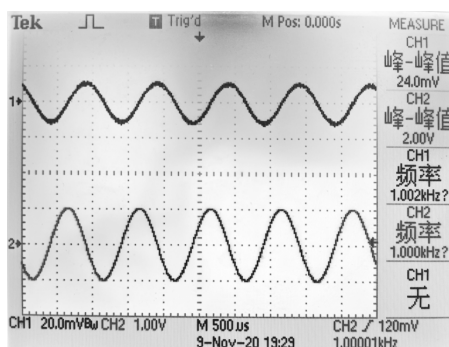
$$-\frac{1}{\tau} \int_0^{\frac{T}{2}} u_i dt = -\frac{0.5}{1.0} \times \frac{2.08 \text{ V}}{2} = -520 \text{ mV}, \quad (6)$$

与实测峰峰值 552 mV 接近。

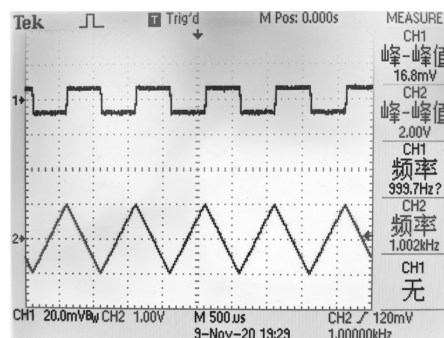
正弦波和三角波的理论输出信号峰峰值分别为 331 mV 和 250 mV，与实测值 360 mV 和 296 mV 接近。



(a) 方波输入



(b) 正弦波输入



(c) 三角波输入

图 5: 微分电路。信号 $f = 1 \text{ kHz}$ ，下方为输入信号 CH2，上方为输出信号 CH1

5.1.2 微分运算

方波、正弦波和三角波三种输入信号 ($f = 1 \text{ kHz}$) 下的输入、输出信号见图 4。可以发现，输出信号是输入信号的反相微分结果。电路的时间常数应为 $\tau = 1.8 \mu\text{s}$ 。

验证式 (3)。对三角波，输入信号的斜率的两倍对应输出的峰峰值，有

$$-2\tau \frac{du_i}{dt} = -2 \times 1.8 \mu\text{s} \times \frac{2.0 \text{ V}}{0.5 \text{ ms}} = -14.4 \text{ mV}, \quad (7)$$

与实测峰峰值 16.8 mV 接近。

正弦波的理论输出信号与实测峰峰值分别为 22.6 mV 和 24.0 mV，接近。

5.2 RC 桥式振荡器

在负反馈电阻 R_F 很小时，电路中没有震荡；电阻加大后，电路中输出信号变为震荡正弦波，随着电阻变大振幅加大、频率减小；很快，信号就由于电阻增大而失真，形成类似方波的结构。

取 $C = 0.1 \mu\text{F}$ 时，得到正弦波恰不失真时的振荡频率为 $f_0 = 1.099 \text{ kHz}$ ，振幅为 $16.0 \text{ V}_{\text{pp}}$ 。理论振荡频率为 $f'_0 = \frac{1}{2\pi RC} = 1061 \text{ Hz}$ ，和实测值接近。

测量负反馈放大系数，得到 $u_i = 296 \text{ mV}$, $u_o = 900 \text{ mV}$, $A_F = 3.04$ 。与理论值 3 接近。

6 思考题

线性应用有加减运算、有源滤波、微积分电路等；非线性应用有方波发生、限幅等。