

# 现代电子电路基础及实验

## 集成运算放大器的应用 (二)

北京大学物理学院



2019 年 4 月 7 日

### 目录

|                             |           |
|-----------------------------|-----------|
| <b>1 实验目的</b>               | <b>1</b>  |
| <b>2 实验原理</b>               | <b>1</b>  |
| 2.1 积分运算 . . . . .          | 1         |
| 2.2 微分运算 . . . . .          | 2         |
| 2.3 RC 晶体管振荡器 . . . . .     | 2         |
| <b>3 实验器材</b>               | <b>4</b>  |
| <b>4 实验内容与方法</b>            | <b>5</b>  |
| 4.1 利用运算放大器做微积分运算 . . . . . | 5         |
| 4.1.1 积分运算 . . . . .        | 5         |
| 4.1.2 微分运算 . . . . .        | 6         |
| 4.1.3 拓展研究实验 . . . . .      | 6         |
| 4.2 RC 晶体管振荡器 . . . . .     | 6         |
| <b>5 实验数据</b>               | <b>6</b>  |
| 5.1 积分运算 . . . . .          | 6         |
| 5.2 微分运算 . . . . .          | 8         |
| 5.3 RC 晶体管振荡器 . . . . .     | 10        |
| <b>6 思考题</b>                | <b>10</b> |

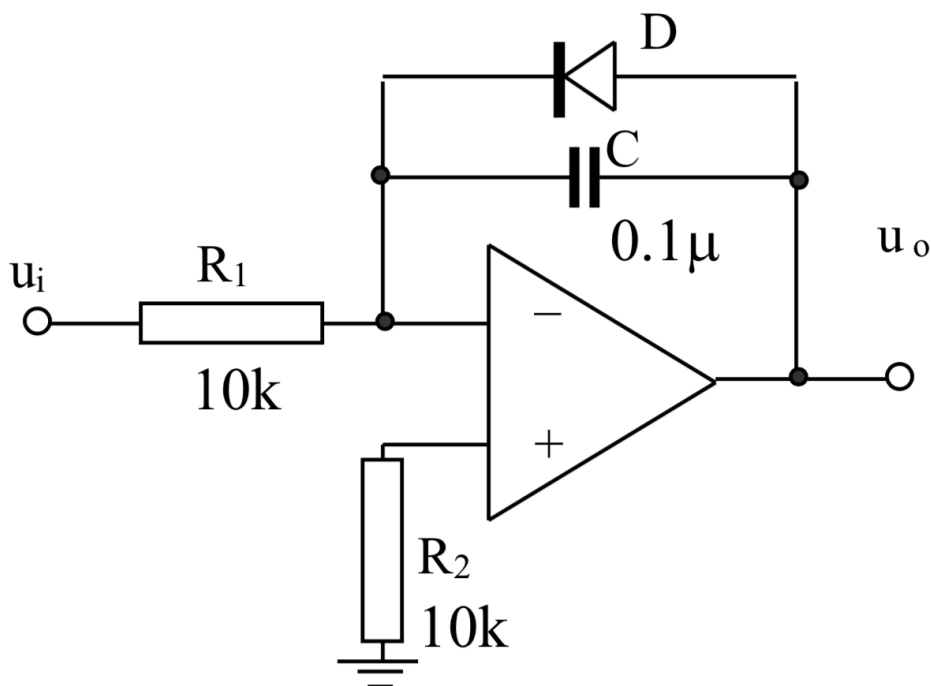
## 1 实验目的

- 通过实验进一步了解运算放大器的基本特性
- 进一步学习并掌握运算放大器的应用
- 研究用运算放大器构成的桥式正弦波振荡器电路的起振条件和振荡频率

## 2 实验原理

利用运算放大器作微积分运算。运算放大器用作微积分运算时，仍是工作在线性区。

### 2.1 积分运算



积分电路如上图所示，具有反相输入结构，由于运放工作在线性区，根据运放基本特性：输入电流  $i = 0$ ；输入电压  $v_+ = v_- = 0$ ；即反相端为虚地，所以

$$i_{R_1} = \frac{u_i}{R_1} = i_C$$

因此输出电压，亦即电容两端的电压为：

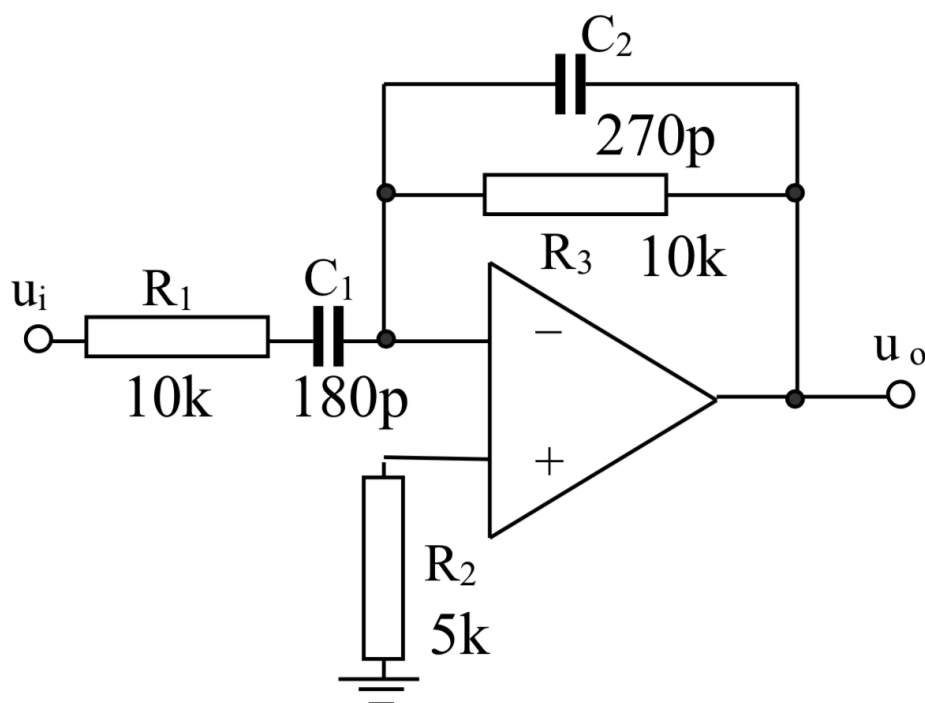
$$u_o = u_C = -\frac{1}{C} \int i_C dt = -\frac{1}{R_1 C} \int u_i dt = -\frac{1}{\tau} \int u_i dt$$

其中  $\tau = RC$  是电路的时间常数，可见输出电压与输入电压的积分成比例，负号表示它们的相位相反。电路中的  $R_2$  是补偿电阻，通常  $R_2 = R_1$ 。

## 2.2 微分运算

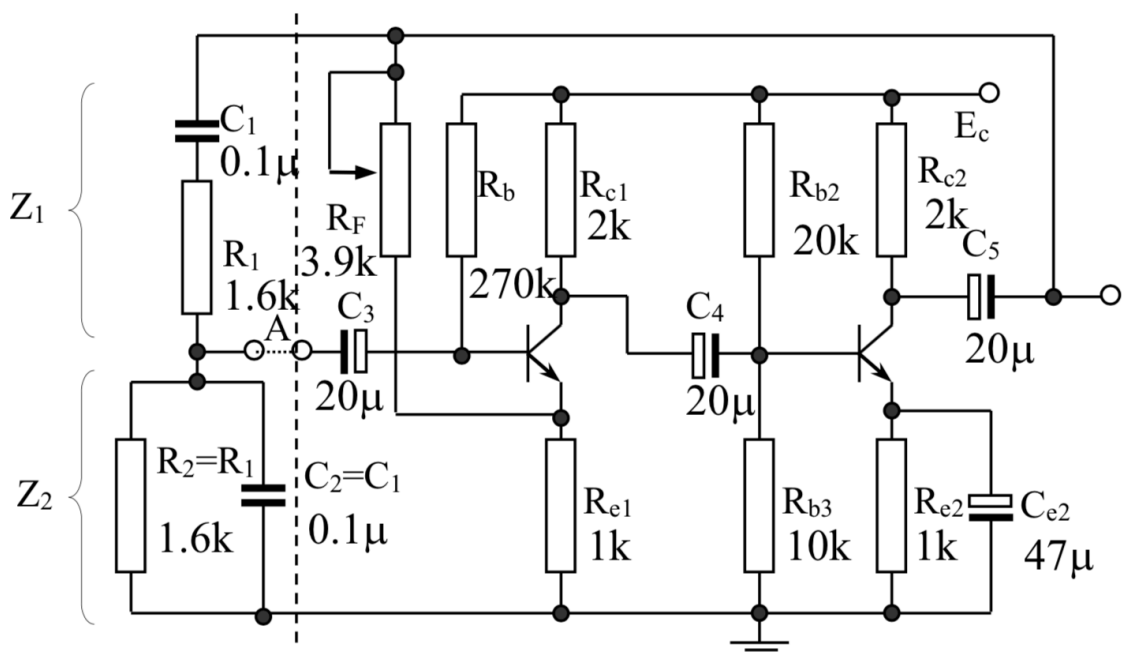
微分是积分的逆运算，所以只要将积分电路的电容和电阻对换位置，就成了微分电路，但是为了电路的稳定性，实用中通常采用如下图所示的微分电路。其中  $R_1$  加强了电路高频负反馈，增大电路的阻尼，从而达到抑制高频干扰避免振荡。电路中的  $R_2$  是补偿电阻，满足：

$$R_2 = R_1 // R_3$$



## 2.3 RC 晶体管振荡器

如下图所示是用晶体管组成的桥式正弦波振荡器电路，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。



如果振荡器的反馈网络传输系数为  $\dot{F}$ ，放大器的传输系数为  $\dot{A}$ ，则维持自激振荡的条件为：

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

即振幅和相位分别为  $|\dot{F}\dot{A}| = 1$  和  $\varphi_A + \varphi_F = 2n\pi, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$

分别是自激振荡的振幅平衡条件、相位平衡条件，其中  $\varphi_F$ 、 $\varphi_A$  分别为  $\dot{F}$ 、 $\dot{A}$  的相位。然而这种平衡条件是振荡建立起来之后维持稳幅振荡的条件，如果只满足振幅平衡条件，是不能起振的，通常需要满足起振的幅值条件：

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

这个条件将使得振荡器振幅越来越大，为了达到稳幅振荡状态，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。首先讨论上图的反馈网络部分，由于

$$Z_1 = R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}, Z_2 = R_2 // \frac{1}{j\omega C_2} = \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}$$

令  $R_1 = R_2 = R, \quad C_1 = C_2 = C$  则

$$\dot{F} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{j\omega RC}{1 - \omega^2 R^2 C^2 + j3\omega RC} = \frac{1}{3 + j\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)} \quad (\omega_0 = 1/RC)$$

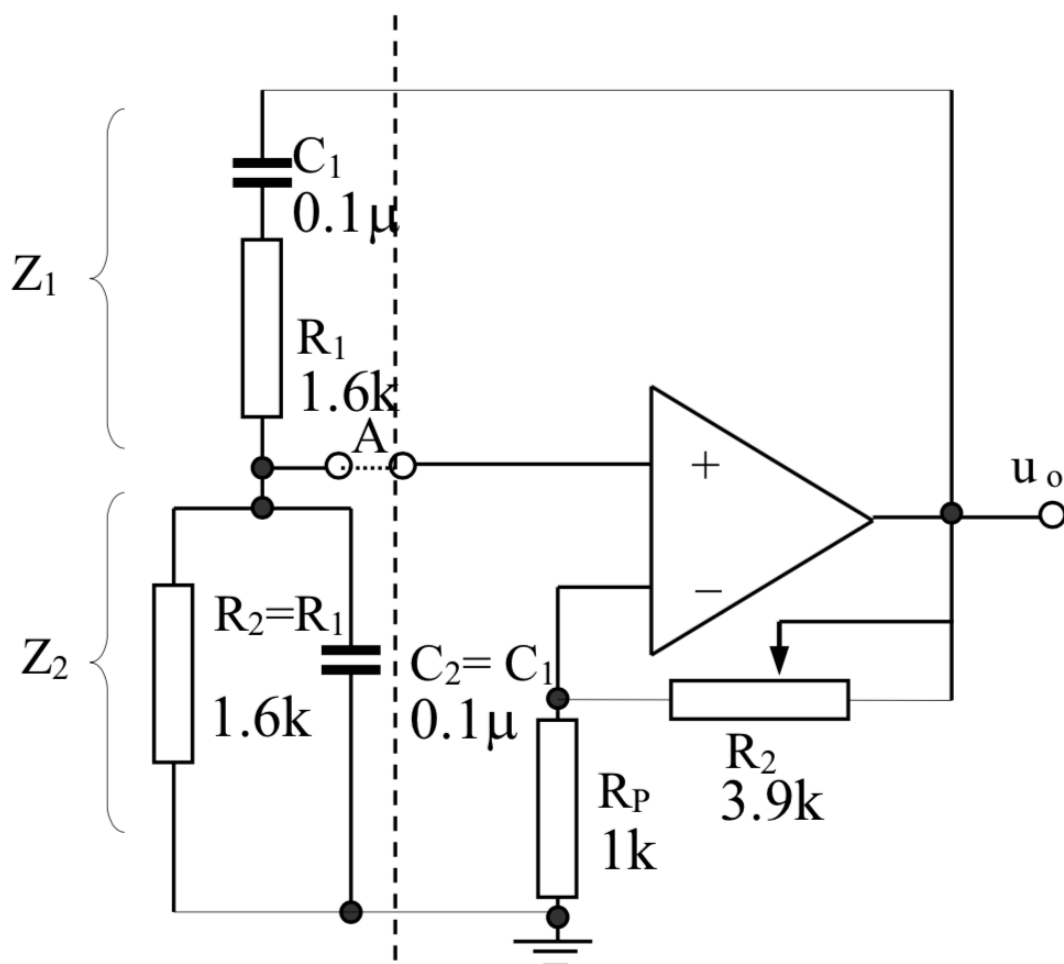
当  $\omega = \omega_0 = 1/RC$  时,  $|\dot{F}| = 1/3$  最大, 此时  $\varphi_F = 0$ 。  
 由于反馈网络特性确定, 所以需要放大器满足

$$\varphi_A = 2n\pi, n = 0, 1, 2, \dots, |\dot{A}| \geq 3$$

并要求有很大的输入阻抗和很小的输出阻抗, 以免影响反馈网络。通常在放大器中引入较深的负反馈来达到要求。 $R_F$  即是引入的负反馈电阻。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:

$$f = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi RC}$$

下图是用运算放大器构成的桥式正弦波振荡器电路。



### 3 实验器材

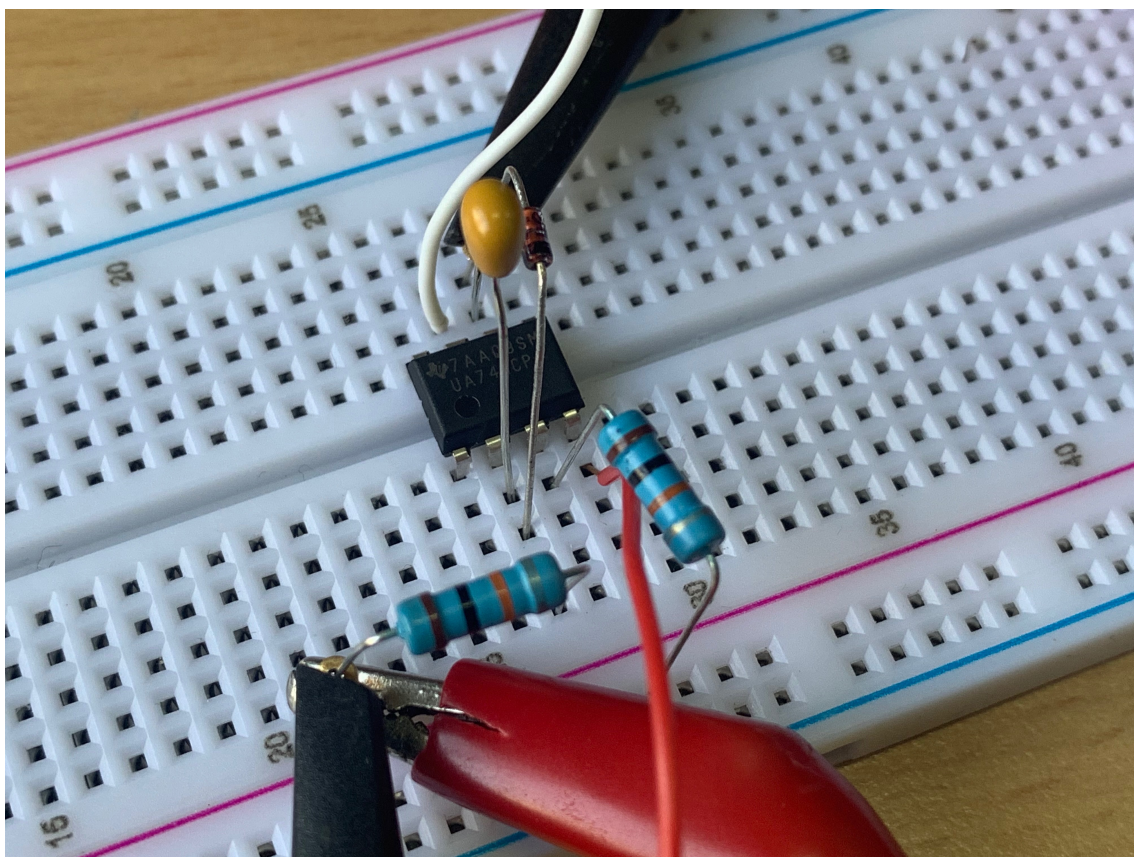
直流稳压电源、示波器、低频信号发生器、万用表、面包板。元器件:

| 器件名   | 型号           | 数量 |
|-------|--------------|----|
| 运算放大器 | $\mu A741$   | 1  |
| 电阻    | $620\Omega$  | 1  |
| 电阻    | $1k\Omega$   | 1  |
| 电阻    | $1.5k\Omega$ | 2  |
| 电阻    | $10k\Omega$  | 2  |
| 电位器   | $3.9k\Omega$ | 1  |
| 二极管   | N/A          | 1  |
| 电容器   | $180pF$      | 1  |
| 电容器   | $270pF$      | 1  |
| 电容器   | $0.1\mu F$   | 2  |

## 4 实验内容与方法

### 4.1 利用运算放大器做微积分运算

#### 4.1.1 积分运算



插接电路板，插接好的电路板有教师或实验室管理人员检查无误后方能接通电源，输入信号由实验内容一中所产生的方波信号提供，观测输出输入信号波形的相位关系，并予以解释。

#### 4.1.2 微分运算

插接电路板，实验内容同上。

#### 4.1.3 拓展研究实验

依次输入幅度和周期适当的方波，三角波，正弦波等，用微分、积分电路观察它们的输出响应，检验是否和数学公式里头这些函数的微积分结果一致，并体会数学函数的微积分抽象曲线在电路实空间的波形变换上的物理图像，然后在报告中简单分析之。

### 4.2 RC 晶体管振荡器

用李萨茹图形法或直读周期法测量振荡频率。

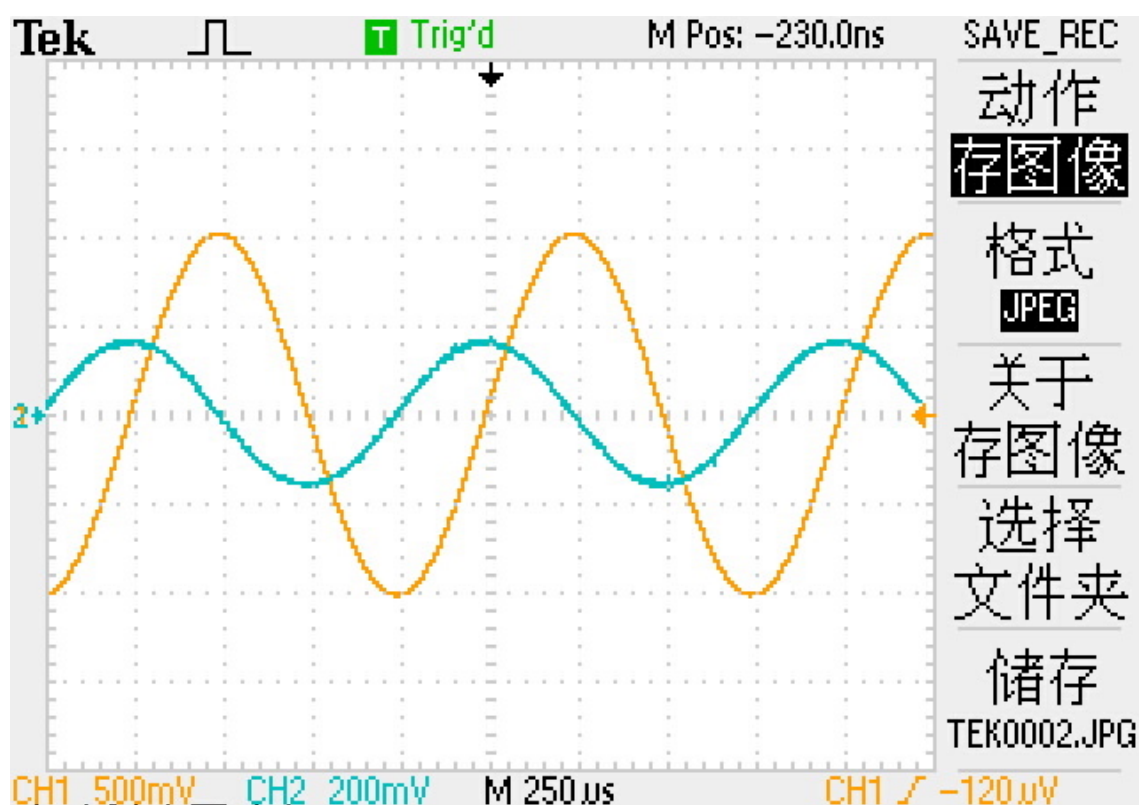
调整  $R_F$ ，使输出正弦波幅度最大，再断开 A 点，从 A 点输入  $f = 1kHz$ ， $u_i = 300mV_{p-p}$  的正弦信号，测量  $u_o$ ，获得放大器的放大倍数  $A_F$ ，并与理论值比较。

## 5 实验数据

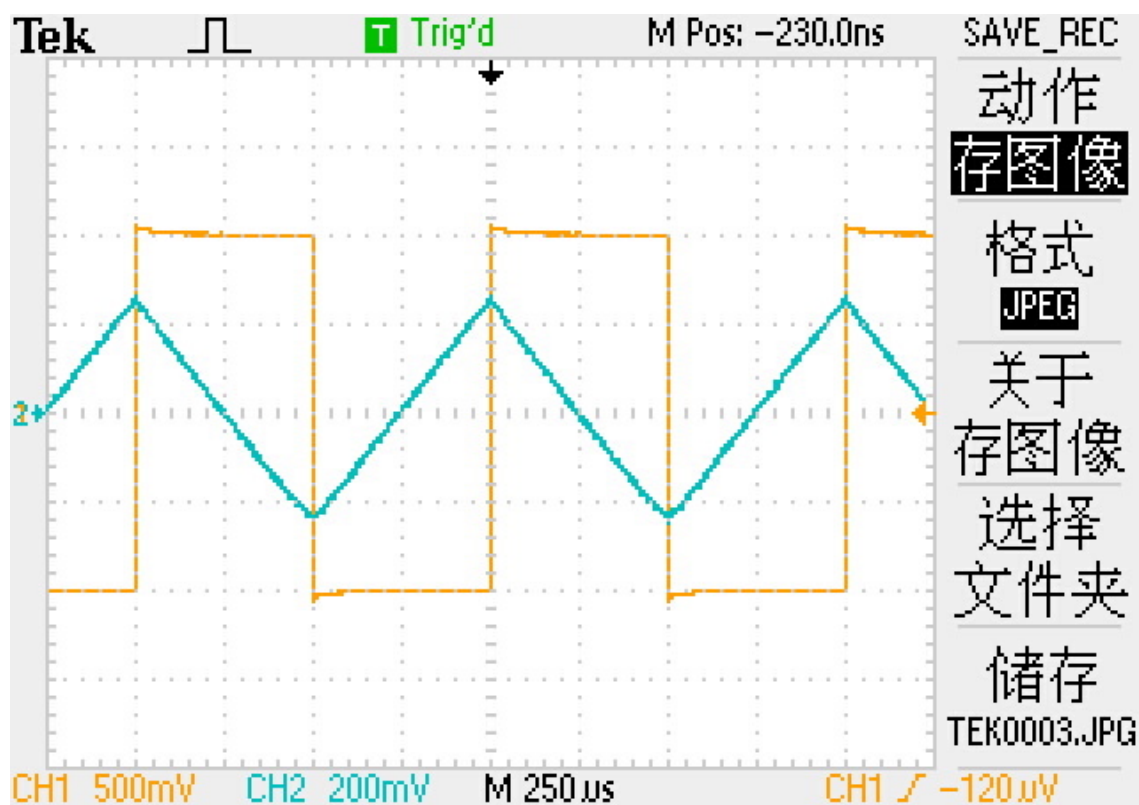
列出各实验数据，绘出波形图，并与理论结果比较。

### 5.1 积分运算

正弦波积分

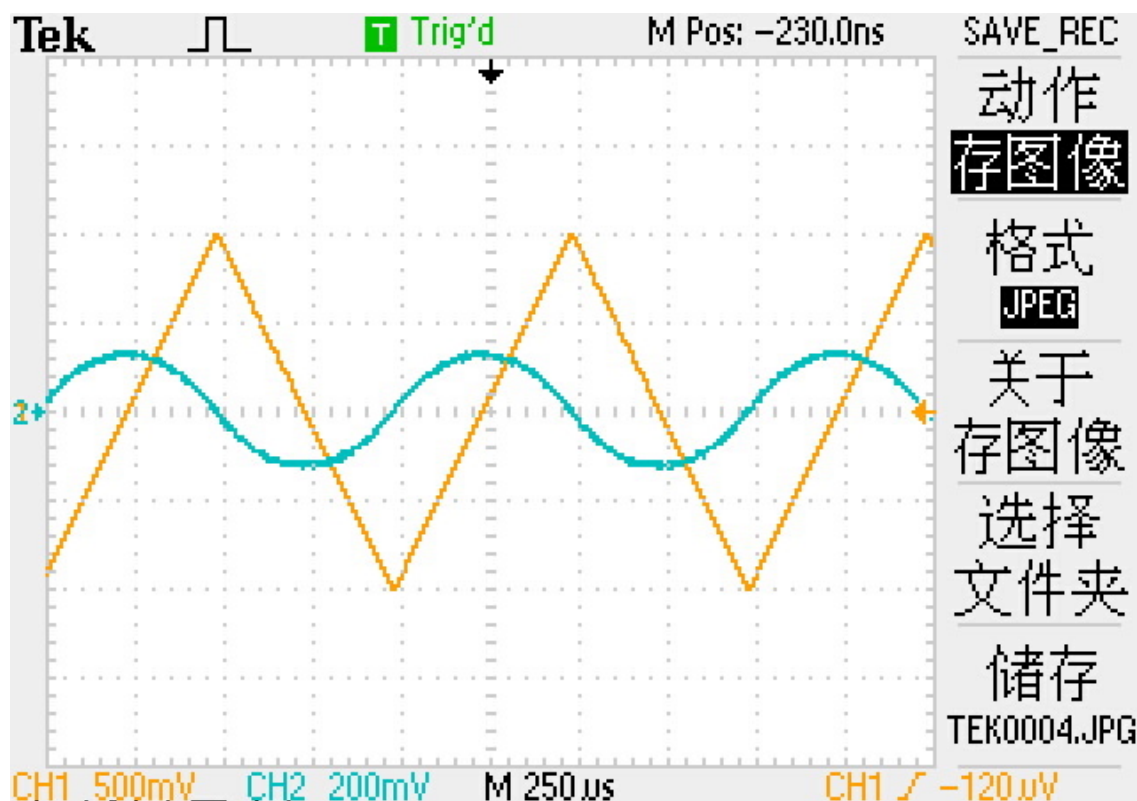


方波积分





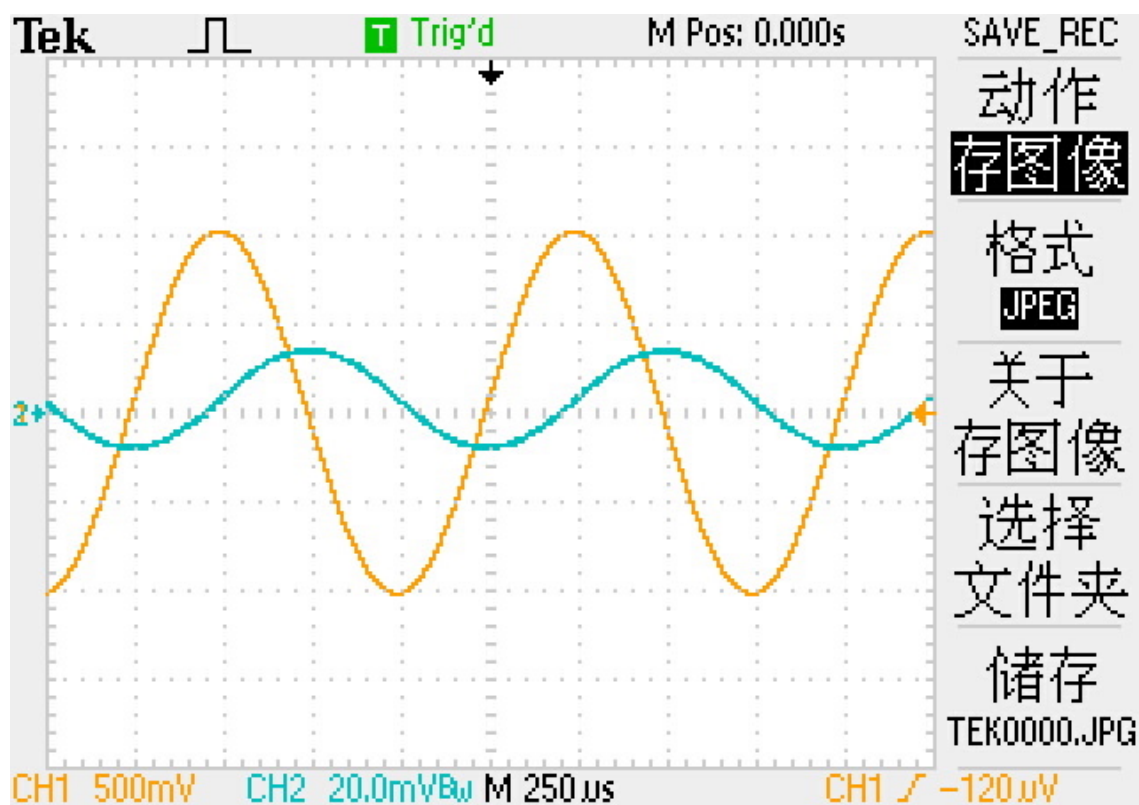
### 三角波积分



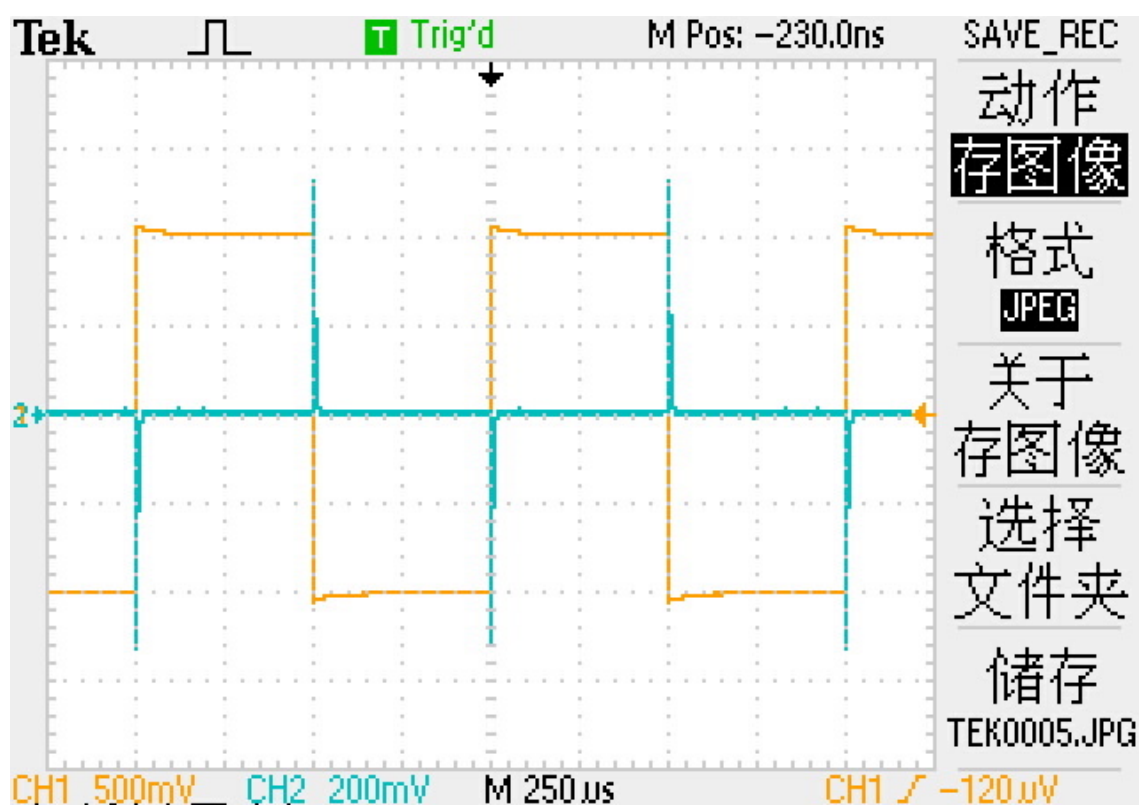
可见输出响应与数学公式里这些函数的积分结果一致，与理论符合较好。

## 5.2 微分运算

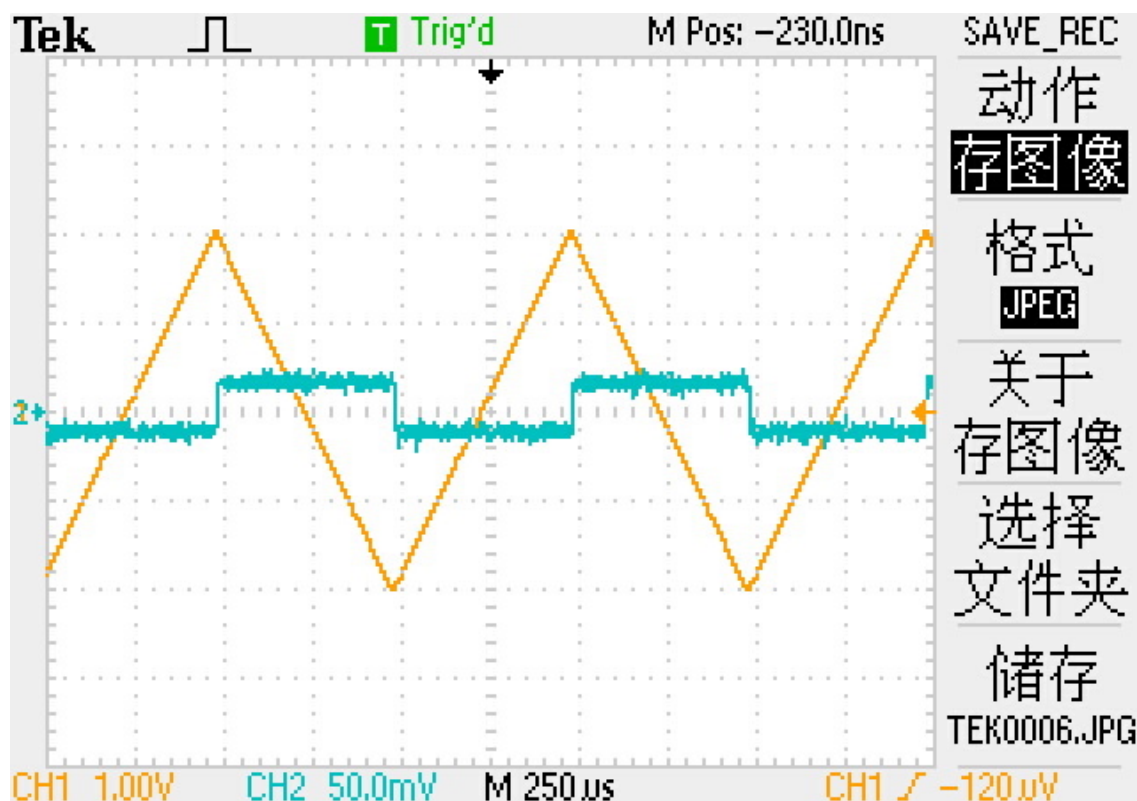
### 正弦波微分



方波微分



### 三角波微分



可见输出响应与数学公式里这些函数的微分结果一致，与理论符合较好。方波由于出现了跃变，理论上的一阶导数出现发散。在实际实验环境下，观察到了较大的峰值。

### 5.3 RC 晶体管振荡器

调整输出正弦波幅度最大时,仍存在一定的削波现象。经测量, $u_o = 936mV_{p-p}$ ,  $A_F = 3.12$ 。

由示波器测得振荡频率为  $f = 1.04kHz$ 。实验中使用的元件与原理图略有不同，为

$$R = 1.5k\Omega, C = 0.1\mu F$$

理论值为  $f = \frac{1}{2\pi RC} = 1061Hz$ 。

## 6 思考题

- 运放哪些应用是分别利用了运放的线性特性、非线性特性？

运算放大器用作加减运算、反相比例运算、同相比例运算、微积分运算、有源滤波时，均是工作在线性区。非线性特性的应用包括方波、三角波发生电路；以及单限比较器、滞回比较器。

- 在本电路中采用什么措施可以使电路自动起振并能使振幅稳定？

通过适当的调整电位器的阻值，可以控制增益，进而使电路满足起振的幅值条件，自动起振，并能使振幅稳定。