

电子技术实验 I

2023 年 10 月

中国科学技术大学信息与计算机实验教学中心

目 录

实验一	常用电子仪器+RC 电路频率特性·····	(1)
实验二	电路基本定律的研究·····	(4)
实验三	一阶电路的研究·····	(7)
实验四	晶体管共射极单管放大器·····	(12)
实验五	差动放大器·····	(18)
实验六	集成运算放大器的基本应用 —模拟运算电路 ·····	(23)
实验七	负反馈放大器·····	(29)
实验附录	常用电子仪器的使用说明 ·····	(32)

实验一 常用电子仪器+RC 电路频率特性

实验目的

1. 对本实验室的示波器、稳压电源、函数信号发生器、毫伏表、万用表等仪器的使用方法有基本了解，为今后的实验打下基础。
2. 利用示波器观察信号波形，测量振幅和周期（频率）。
3. 测量一阶 RC 低通滤波电路的幅频特性和相频特性。

实验室常用电子仪器。

1. 示波器（OSCILLOSCOPE）

示波器是一种用途很广的电子仪器，它既能直接显示电信号的波形，又能对电信号的各种参数进行测量。

2. 函数信号发生器（FUNCTION GENERATOR）

函数信号发生器可输出正弦波、方波、三角波、锯齿波和脉冲波，电压输出可通过电压输出幅度旋钮调节；频率输出可通过频率调节旋钮和频率选择键配合使用。

3. 直流稳压电源（DC REGULATED POWER SUPPLY）

输出电压从 0 V 起调，能在 0~30 V 范围内连续可调，带有自动过载保护和短路保护功能。

4. 数字万用表（DIGITAL MULTIMETER）

可用来测量直流和交流电压及电流、电阻、电容、二极管正向电压等，具有 LCD 显示器，最大显示值为“19999”，过量程显示“OPEN”。

注意：（1）测量电阻时，被测量电阻不能带电。

（2）测量电容时，要先放电，然后进行测量。

5. 交流毫伏表（AC MILIVOLTMETER）

毫伏表能在其工作频率范围内测量正弦交流电压的有效值。一般使用默认的自动测量状态，自动测量时无需进行量程选择。

一阶 RC 电路频率特性的研究

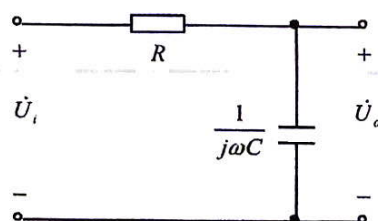


图 1-1 RC 低通电路

图 1-1 为一阶 RC 低通电路。

$$\text{输出电压: } \dot{U}_o = \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C}} \dot{U}_i = \frac{\dot{U}_i}{j\omega RC + 1}$$

其网络的传递函数为:

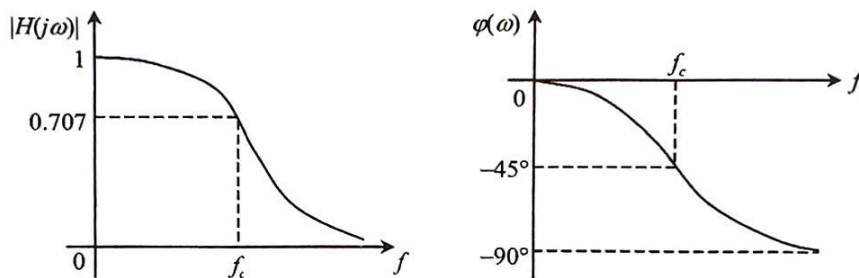
$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1}{j\omega RC + 1} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \angle -\text{tg}^{-1}(\omega RC) = |H(j\omega)| \angle \varphi(\omega)$$

其中, $|H(j\omega)| \triangleq \frac{|\dot{U}_o|}{|\dot{U}_i|} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$, 表示输出与输入的幅值比, 称为幅值函数或增益函数,

幅值函数与频率的关系称为幅频特性, 显然是低通。

$\varphi(\omega) = -\text{tg}^{-1} \omega RC$, $\varphi(\omega)$ 表示输出与输入的相位差, 称为相位函数, 相位函数与频率的关系称为相频特性, 显然是输出滞后输入 $\text{tg}^{-1}(\omega RC)$ 角度。

当 $\omega_c = \frac{1}{RC}$ 时, $|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{2}}$, $\varphi(\omega) = -45^\circ$, 故 $\omega_c(f_c)$ 亦称为截止频率。对于低通电路, 频率 $0 \sim \omega_c(f_c)$ 为通带, $\omega_c(f_c) \sim \infty$ 为阻带。其频率特性如图 1-2 所示。



(a) 幅频特性

(b) 相频特性

图 1-2 低通电路的频率特性

实验内容

1. 方波信号测量

用 CH₁ (或 CH₂) 观测示波器本身的校准信号 (CAL), 测量数据填入表 1-1 中, 并用 DC 和 AC 档, 分别画出波形图, 在图上标出 U_p 和周期 T 。

表 1-1

校准信号	标称值	测量值
幅度 U_p	V	V
频率 f	1000 Hz	Hz

2. 一阶 RC 低通电路

(1) 按图 1-1 接线, 取 $R = 2.2 \text{ k}\Omega$, $C = 0.1 \mu\text{F}$, $U_i = 1 \text{ V}$ (有效值)。测量输出电压, 并读取输出电压 $U_o = 0.707 \text{ V}$ 时的信号频率 f_c , 用李沙育法测量相位差角, 数据记入表 1-2 中。(接线之前, 先用万用表测量所用电阻和电容值, 理论计算时候代入万用表测量的, 不要代入标称值, 标称值误差太大)

(2) 画出频率为 f_c 时的输入、输出电压波形图。并标明其超前、滞后的相位关系。

表 1-2

$f(\text{Hz})$	50	100	f_c	2K	5K
$U_o(\text{V})$				0.707			
$B(\text{V})$							
$A(\text{V})$							
φ							

思考题

1. 两个不同频率的正弦信号能否测量其相位差，为什么？
2. 使用函数信号源时，是接入电路调输入电压大小还是调好电压大小再接入电路？两者有何区别？
3. 总结各种仪器的使用方法及注意事项。

实验仪器

双踪示波器、直流稳压稳流电源、函数信号发生器、毫伏表、万用表

附：测量相位差角的两种方法

1. 时域法

根据两个同频率的正弦信号，可以比较相位差。对于图 1 所示的两信号，其之间的相位差角为

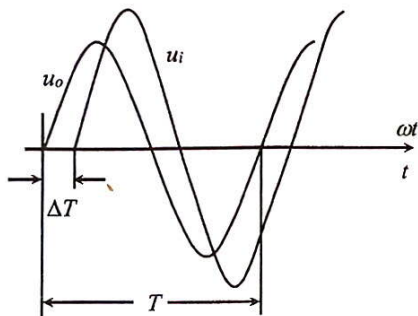


图 1

$$\varphi = \frac{\Delta T}{T} \times 360^\circ$$

式中， ΔT 为两信号之间的时间差， T 为信号的周期。

注意：在图 1 中，两信号哪个超前或哪个滞后，要自己判断。

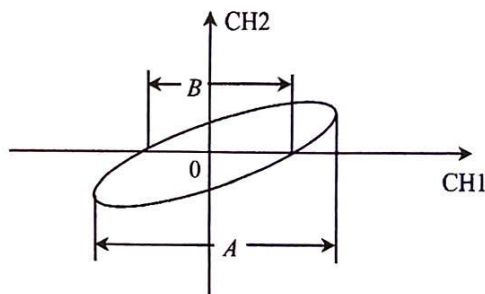


图 2

2. 李沙育图形法

图 2 是两信号的李沙育图形，它们之间的相位差角为 $\varphi = \sin^{-1} \frac{B}{A}$

式中， A 是李沙育图形在水平方向上的投影， B 是李沙育图形在水平方向上两交点之间的距离。

实验二 电路基本定律的研究

实验目的

1. 验证 KCL、KVL，验证特勒根定理之一。
2. 加深对线性电路的特性——迭加性和齐次性的认识。
3. 掌握戴维南等效电路参数的实验测定方法。
4. 加深对电路基本定律认识。

实验原理

基尔霍夫定律和特勒根定理对集总参数电路具有普遍的适应性。在集总参数电路中，对任一个节点，在任一时刻，流出或流进此节点的所有支路电流的代数和等于零，即 $\sum I = 0$ 。在集总参数电路中，对任一回路，在任一时刻，沿该回路的所有支路电压降的代数和为零，即： $\sum U = 0$ 。

KCL、KVL 适用于任何集总参数电路，它与元件的性质无关，只与电路的拓扑结构有关。

特勒根定理之一是指整个电路的功率一定是守恒的，满足 $\sum UI = 0$ 这一约束关系。它们分别基于电流连续性原理、电位的单值性原理和能量守恒原理。

迭加定理：在线性网络中，几个激励电源共同作用于该网络所产生的响应，可以看成是每个激励电源单独作用时所产生的响应的迭加，称此为迭加定理。由于网络是线性的，所以存在响应与激励成比例关系，称此为齐次性。线性电路应同时满足迭加性和齐次性。功率则不满足迭加定理。

戴维南—诺顿定理，任何一个线性有源二端网络，总可以用一个恒压源与内阻串联的支路或一个恒流源与内阻并联的支路来代替。恒压源的电压等于该网络的开路电压，恒流源的电流等于该网络的短路电流，而内阻等于该网络中所有独立源为零（保留内阻及受控源）时的等效电阻。

戴维南—诺顿等效电路的内阻常可用测量方法求得：在开路两端接一已知电阻 R_L ，测量 R_L 两端电压 U_L ，然后代入计算公式：

$$R_o = \left(\frac{U_{oc}}{U_L} - 1 \right) \cdot R_L$$

式中 U_{oc} 为负载开路时的开路电压。

也可采用半电压法求得：在开路两端接一可变电阻 R_L ，调节 R_L ，同时测两端电压 U_L ，当 $U_L = \frac{U_{oc}}{2}$ 时，则有 $R_o = R_L$ 。

实验内容

1. 验证基尔霍夫定律和特勒根定理内容之一

- (1) 用数字万用表电阻档测出图 2-1 电路中的各个电阻值。测量数据记录于表 2-1 中。

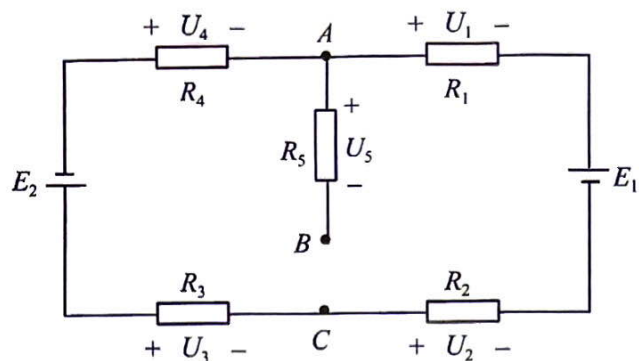


图 2-1 电路基本定律实验线路图

表 2-1

电阻	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
标称值 (Ω)	5100	5100	430	1000	5100
测量值 (Ω)					

(2)在图 2-1 所示实验线路基础上,连接 BC 两点,调节直流稳压电源使输出 $E_1 = 1.5 \text{ V}$, $E_2 = 6.0 \text{ V}$, 注意 E_1, E_2 电压读数有效数字的位数,用数字万用表 DC 档测量各电阻两端电压,参考方向如图 2-1 所示。数据记录于表 2-2 中。

表 2-2

	E_1	E_2	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
电压 (V)							
			I_1	I_2	I_3	I_4	I_5
电流 (mA)							

- (3)利用上述测量数据,计算出各支路电流,验证 KCL、KVL 和特勒根定理内容之一。
- (4)理论值计算,并与实验值做比较,计算相对误差,分析误差原因。

2. 验证迭加性和齐次性原理

- (1)按图 2-1 接线,连接 BC 两点。
- (2)使 $E_1 = 0 \text{ V}$, $E_2 = 6.0 \text{ V}$ 作用,用万用表测量各电阻两端电压。
- (3)使 $E_1 = 1.5 \text{ V}$, $E_2 = 0 \text{ V}$ 作用,用万用表测量各电阻两端电压。
- (4)使 $E_1 = 3.0 \text{ V}$, $E_2 = 0 \text{ V}$ 作用,用万用表测量各电阻两端电压。
- (5)测量数据填入表 2-3 中。计算相对误差,分析误差原因。

表 2-3

	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
$E_1 = 0 \text{ V}, E_2 = 6.0 \text{ V}$					
$E_1 = 1.5 \text{ V}, E_2 = 0 \text{ V}$					
迭加结果					
$E_1 = 3.0 \text{ V}, E_2 = 0 \text{ V}$					

3. 戴维南等效定理

- (1)公式法。

1)实验线路如图 2-1 所示,其中 $E_1 = 1.5 \text{ V}$, $E_2 = 6.0 \text{ V}$ 。断开 BC 点,从 AC 两端看进去,测出 AC 两端的开路电压 U_{oc} 。

2)接上 BC 点,测出 AC 两端的电压 U_L (即 U_5)。

3) 数据记录于表 2-4 中。

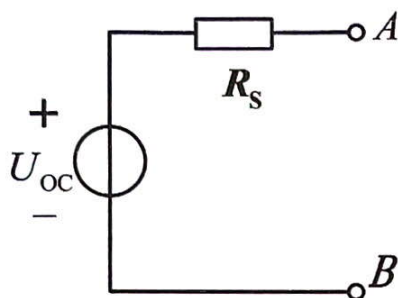
(2) 半电压法。

测等效内阻 R_o ，断开 BC 点，在 AC 两端接上 $10K$ 电位器，调节电位器，使 AC 两端电压为 $U_L = \frac{U_{oc}}{2}$ ，断开电位器，用万用表测量出电位器的阻值即为 R_o （等效内阻）。

表 2-4

	U_o	U_i	R_L	$R_o = \left(\frac{U_{oc}}{U_L} - 1\right) \cdot R_L$
公式法				
半电压法				

4. 函数信号发生器内阻的测量



参照戴维南等效求等效内阻的方法，自行设计测量电路，测出函数信号发生器的等效内阻 R_s ，总结在以后的实验过程中如何避免函数信号发生器内阻对负载电路端口电压的影响。

思考题

1. 简述你所知道的电路定律及适用的条件？
2. 戴维南—诺顿定理的适用条件，电压源或电流源方向如何确定？有几种求等效内阻的方法？分别应该注意什么？
3. 把 R_3 换成二极管，KCL、KVL 是否成立？说明理由
4. 本次实验中能用毫伏表测电压吗？为什么？

实验仪器

1. 直流稳压电源
2. 数字万用表
3. 函数信号发生器

实验三 一阶 RC 电路的研究

实验目的

1. 研究一阶电路的零输入响应和阶跃响应。
2. 利用示波器观察一阶 RC 电路在方波激励条件下的响应和特点, 掌握用示波器测量一阶电路的时间常数的方法。
3. 利用 RC 电路实现微分、积分运算及脉冲分压器等。

实验原理

含有一个独立贮能元件, 可以用一阶微分方程来描述的电路, 称为一阶电路。根据输入信号的不同和电路的初始状态, 其响应分为: 零输入响应、零状态响应、全响应、阶跃响应(零状态)和冲激响应(零状态)。

对于图 3-1 所示的 RC 一阶串联电路, 输入为一个阶跃电压 $U_s u(t)$ ($u(t)$ 为单位阶跃函数), 电容电压的初始值为 $u_c(0_+) = U_0$, 则电路的全响应为:

$$\begin{cases} RC \frac{du_c}{dt} + u_c = U_s \\ u_c(0_+) = U_0 \end{cases}$$

解得

$$u_c(t) = U_0 e^{-\frac{t}{RC}} + U_s (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad t \geq 0$$

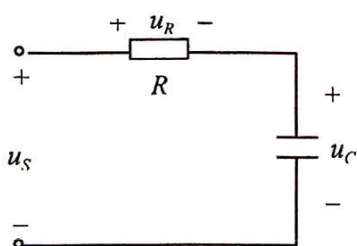


图 3-1

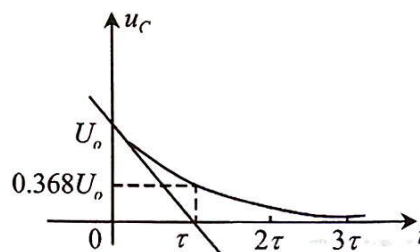


图 3-2

1. 零输入响应

当 $U_s = 0$ 时, 电容的初始电压 $u_c(0_+) = U_0$ 时, 电路的响应称为零输入响应, 为:

$$u_c(t) = U_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad t \geq 0$$

当 $t = \tau = RC$ 时, $u_c(\tau) = \frac{1}{e} U_0 = 0.368 U_0$, τ 为该电路的时间常数, 由电路参数决定。电容电压由 U_0 逐渐下降到零, 输出波形为单调下降的, 如图 3-2 所示。

2. 阶跃响应 (零状态响应)

当 $u_c(0_+) = 0$ 时, 而输入为一个阶跃电压 $u_s = U_s u(t)$ 时, 电路的响应称为阶跃响应 (零状态响应):

$$u_c(t) = U_s (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) u(t)$$

当 $t = \tau$ 时, $u_c(\tau) = (1 - \frac{1}{e})U_s = 0.632U_s$,

电容电压由零逐渐上升到 U_s , 输出波形为单调上升的, 如图 3-3 所示。

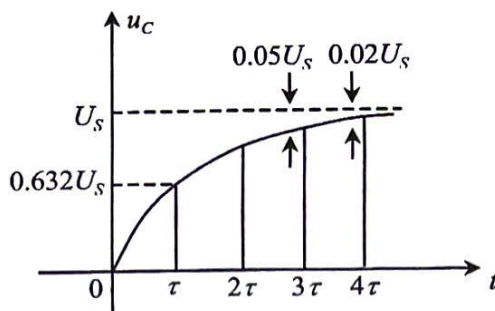
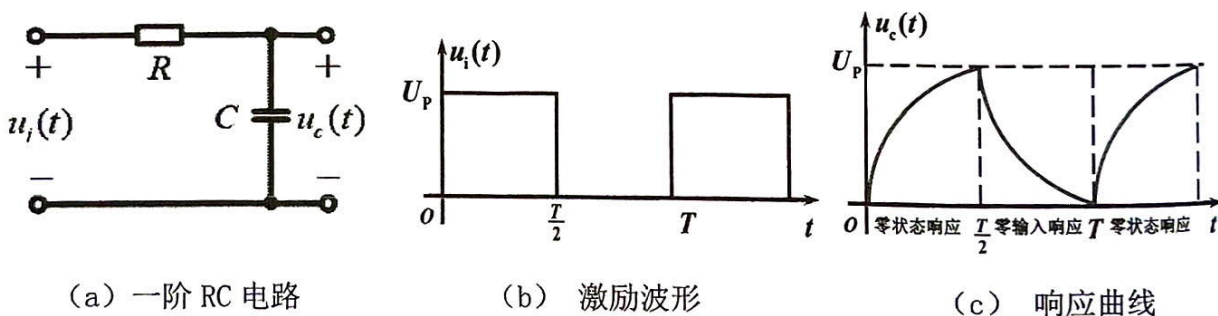


图 3-3

从上面图 3-2 和图 3-3 中看出, 无论是零状态响应还是零输入响应, 其响应曲线都是按指数规律变化的, 变化的快慢由时间常数 τ 决定。即电路的瞬态过程的长短由 τ 决定, τ 越大, 瞬态过程越长, τ 越小, 瞬态过程越短。 τ 可以从电容电压 u_c 的变化曲线上求得, 对放电曲线如图 3-2 所示, 幅值下降到初值的 36.8% 对应的时间即为一个时间常数 τ 。对充电曲线如图 3-3 所示, 幅值上升到终值的 63.2% 对应的时间也是一个时间常数 τ 。

动态网络的过渡过程是十分短暂的单次变化过程, 普通的示波器很难观察和测量有关的参数, 必须使这种单次的过渡过程重复出现, 就可以用普通示波器显示稳定的响应波形, 便于观察和作定量计算。采用周期变化的方波作为激励。只要选择方波的重复周期远大于电路的时间常数 τ , 那么电路在这样的方波序列脉冲信号的激励下, 它的响应就和直流电接通与断开的过渡过程是基本相同的。



(a) 一阶 RC 电路

(b) 激励波形

(c) 响应曲线

图 3-4 方波激励下的响应波形

当输入 $u_i(t)$ 为如图 3-4 (b) 所示方波激励时, 则在 $0 \sim T/2$ 响应时间范围内, 电容电压 $u_c(t)$ 可以达到稳定值, 即 $0 \sim T/2$ 范围内 $u_c(t)$ 为零状态响应; 在 $T/2 \sim T$ 时间范围内, 则电容 C 相当于从起始值电压 U_p 开始向电阻 R 放电, 即为零输入响应。第二周期重复第一周期, 如图 3-4 (c) 所示, 如此周而复始。

3. 微分电路

微分电路是一种常用的波形变换电路。可将矩形脉冲 (方波) 电压变换成尖脉冲波形。

尖脉冲信号的用途十分广泛, 在数字电路中常用作触发器的触发信号。

如下图 3-5 所示电路, 设输入为一脉冲波形 $P(t)$, 脉冲宽度为 $t_p = \frac{T}{2}$ 。从电阻 R_1 两端输出。

当

$$t_p \gg \tau = RC$$

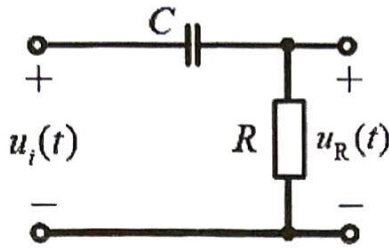
则

$$u_c(t) \approx P(t)$$

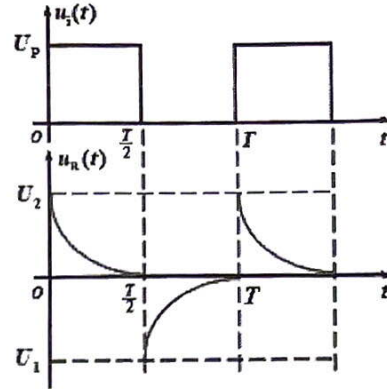
而

$$u_R(t) = R \cdot i_C = RC \frac{du_C}{dt} \approx RC \frac{d}{dt} P(t) = \tau \frac{d}{dt} P(t)$$

即从电阻 R_1 上输出电压 $u_R(t)$ 为输入电压 $P(t)$ 的微分形式乘以 τ 。



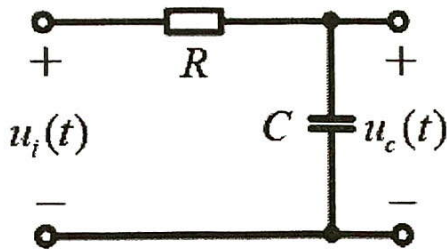
(a) 一阶 RC 微分实验电路



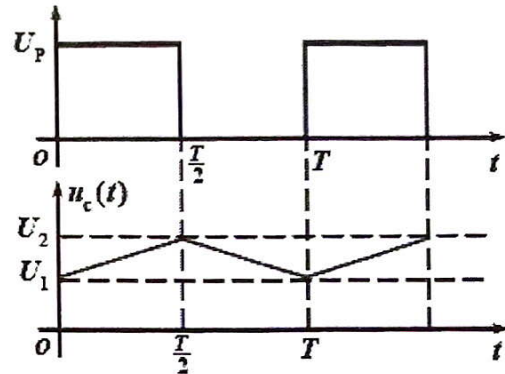
(b) 微分电路激励和输出波形

图 3-5 一阶 RC 微分电路

4. 积分电路



(a) 一阶 RC 微分实验电路



(b) 微分电路激励和输出波形

图 3-6 一阶 RC 积分电路

积分电路是另一种常用的波形变换电路，它是将矩形波变换成三角形波形的一种电路。

如图 3-6 所示电路，设输入为一脉冲波形 $P(t)$ ，脉冲宽度为 $t_p = \frac{T}{2}$ 。从电容 C 两端输出

当

$$t_p \ll \tau = RC$$

则

$$u_R(t) \approx P(t)$$

而

$$u_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt \approx \frac{1}{RC} \int_0^t P(t) dt = \frac{1}{\tau} \int_0^t P(t) dt$$

即从电容 C 上输出电压 $u_c(t)$ 为输入波形 $P(t)$ 的积分除以 τ 。

如果将积分电路的充电和放电的电路的时间常数，设计得不一样，例如充电时间常数小而放电时间常数大（或相反），则积分电路还可以将矩形脉冲电压变换为锯齿波。

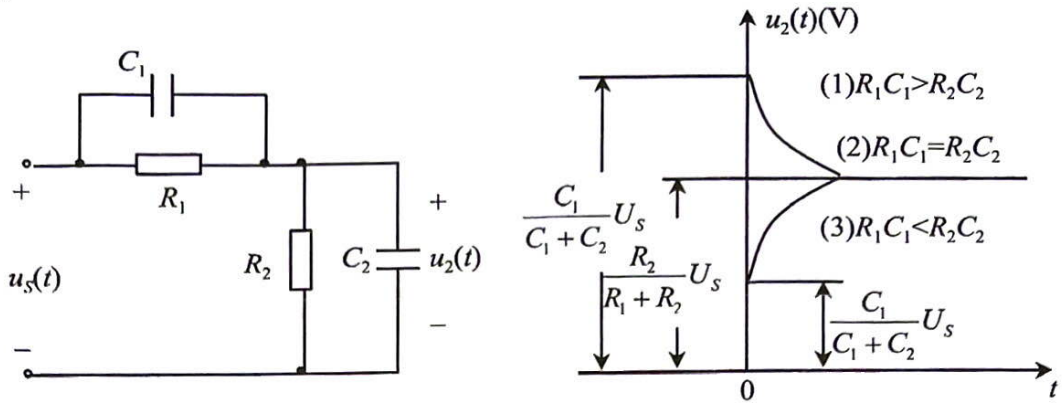
5. 脉冲分压电路

对于一个阶跃信号，如果加到容性负载上，要求输出电压在 $t=0$ 时也为阶跃电压，则

必须采用如图 3-7 (a) 电路, 当 $C_1 = \frac{R_2}{R_1} C_2$ 时, 由于 C_1 的补偿作用, 该电路如同一个纯电阻分压器。

则有:
$$u_2(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_s(t)$$

当 $R_1 C_1 > R_2 C_2$ 为过补偿状态; 当 $R_1 C_1 < R_2 C_2$ 为欠补偿状态。其输出波形如图 3-7 (b) 所示。



(a) 脉冲分压器实验电路

(b) 输出波形

图 3-7 脉冲分压器电路

实验内容

1. 观测 RC 串联电路的零状态响应和零输入响应

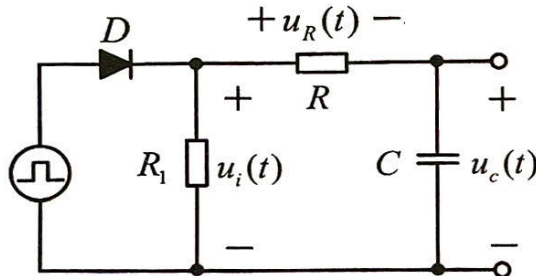


图 3-8 RC 一阶零状态和零输入响应实验电路图

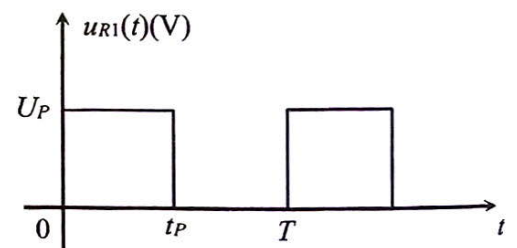


图 3-9 电阻 R_1 两端方波激励波形

按图 3-8 接线。取 $R = 1\text{k}\Omega$, $R_1 = 200\Omega$, $C = 0.1\mu\text{F}$, D 为二极管。

输入端接入信号源, 选定方波输出, 频率为 $f = 500\text{Hz}$, 由于函数信号发生器仅能提供正负交替的矩形波, 故串联一个二极管 D 削去负的矩形波以获得所需的方波, 电阻 R_1 两端的波形如图 3-9 所示, 整流后 $U_p = 5\text{V}$, 只要使 $t_p \gg \tau$, 则在一个周期内就能同时观察到阶跃响应和零输入响应。

观测阶跃响应、零输入响应, 并定量对应画出 $u_c(t)$ 波形图。

2. 观测由 RC 组成的积分电路

按图 3-8 接线。信号源选定方波输出, $f = 1\text{kHz}$, 电阻 R_1 两端的波形如图 3-9, 整流后 $U_p = 5\text{V}$ 。输出由电容两端取得, 取 $R = 5\text{k}\Omega$, $C = 1\mu\text{F}$ 。用示波器画出输出波形图, 测出有关的波形参数。

3. 观测由 RC 组成的微分电路

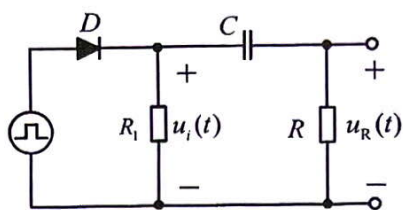


图 3-10

按图 3-10 接线。信号源选定方波输出， $f = 1\text{kHz}$ ，电阻 R_1 两端的波形如图 3-9，整流后 $U_p = 5\text{V}$ 。输出由电阻两端取得，取 $R = 1\text{k}\Omega$ ， $C = 0.05\mu\text{F}$ 。用示波器画出输出波形图，测出有关的波形参数。

4. 脉冲分压电路

按图 3-7 (a) 接线，输入方波信号幅度 $U_{p,p} = 6\text{V}$ ，频率 $f = 1\text{kHz}$ 。

- (1) 正好补偿： $R_1 = 20\text{k}\Omega$ ， $C_1 = 0.005\mu\text{F}$ ， $R_2 = 10\text{k}\Omega$ ， $C_2 = 0.01\mu\text{F}$ ；
- (2) 欠补偿： $R_1 = 20\text{k}\Omega$ ， $C_1 = 0.002\mu\text{F}$ ， $R_2 = 10\text{k}\Omega$ ， $C_2 = 0.01\mu\text{F}$ ；（选做）
- (3) 过补偿： $R_1 = 20\text{k}\Omega$ ， $C_1 = 0.02\mu\text{F}$ ， $R_2 = 10\text{k}\Omega$ ， $C_2 = 0.01\mu\text{F}$ 。（选做）

以上三种情况时，用示波器分别对应画出输入和输出波形，并测出有关的波形参数。

注意事项

1. 在做零状态和零输入、积分、微分电路实验时，输入信号选定为方波输出，输出幅度是电阻 R_1 两端的电压为规定的值，即为所要求的输入电压。
2. 从示波器上记录被测信号的波形时，时域时一定要先确定 X 轴的位置，即零电平的位置，垂直方向耦合方式选定为 DC。
3. 做脉冲分压器实验时，记得去掉二极管 D ，信号源输出的方波信号直接加到被测电路输入端。

思考题

1. 在实验电路图 3-8 中，电阻 R_1 在电路中起何作用？
2. 脉冲分压器电路图 3-7(a)中，有两个储能元件 C_1 和 C_2 ，为何是一阶电路？
3. 本次实验中，能用毫伏表测量电阻 R_1 两端的矩形波电压么，为什么？
4. 根据本次实验说明 RC 电路分别作积分电路和微分电路，必须具备的条件？

实验设备

1. 函数信号发生器
2. 双踪示波器
3. 万用表
4. 二极管、电容箱、电阻箱

实验四 晶体管共射极单管放大器

实验目的

1. 掌握放大器静态工作点的调试方法，学会分析静态工作点对放大器性能的影响。
2. 掌握放大器电压放大倍数、输入电阻、输出电阻及最大不失真输出电压的测试方法。
3. 熟悉常用电子仪器及模拟电路实验设备的使用。

实验原理

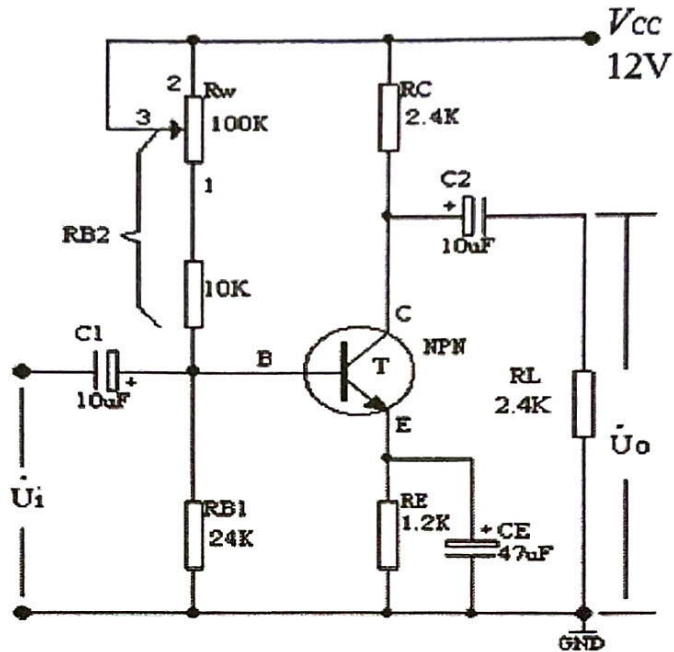


图 4-1 共射极单管放大电路

图 4-1 为电阻分压式工作点稳定单管放大器实验电路图。它的偏置电路采用 R_{B2} 和 R_{B1} 组成的分压电路，并在发射极中接有电阻 R_E ，以稳定放大器的静态工作点。当在放大器的输入端加入输入信号 u_i 后，在放大器的输出端便可得到一个与 u_i 相位相反，幅值被放大的输出信号 u_o ，从而实现了电压放大。

在图 4-1 电路中，当流过偏置电阻 R_{B1} 和 R_{B2} 的电流远大于晶体管 T 的基极电流 I_B 时（一般 5~10 倍），则它的静态工作点可用下式估算， U_{CC} 为供电电源，此为 +12V。

$$U_B \approx \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC} \quad (4-1)$$

$$I_E = \frac{U_B - U_{BE}}{R_E} \approx I_C \quad (4-2)$$

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E) \quad (4-3)$$

$$\text{电压放大倍数} \quad A_u = -\beta \frac{R_C \parallel R_L}{r_{be}} \quad (4-4)$$

$$\text{输入电阻} \quad R_i = R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel r_{be} \quad (4-5)$$

$$\text{输出电阻} \quad R_o \approx R_C \quad (4-6)$$

$$\text{晶体管输入电阻} \quad r_{be} = 300\Omega + (1 + \beta) \frac{26mV}{I_E(mA)} \quad (4-7)$$

1. 放大器静态工作点的测量与调试

(1) 静态工作点的测量

测量放大器的静态工作点，应在输入信号 $U_i=0$ 的情况下进行，即将放大器输入端与地端短接，然后选用量程合适的数字万用表，分别测量晶体管的集电极电流 I_C 以及各电极对地的电位 U_B 、 U_C 和 U_E 。一般实验中，为了避免断开集电极，所以采用测量电压，然后算出 I_C 的方法，例如，只要测出 U_E ，即可求出 I_C

$$I_C \approx I_E = \frac{U_E}{R_E}$$

也可根据下式

$$I_C = \frac{V_{CC} - U_C}{R_C}$$

由 U_C 确定 I_C ，同时也能算出： $U_{BE} = U_B - U_E$

$$U_{CE} = U_C - U_E$$

(2) 静态工作点的调试

放大器静态工作点的调试是指对三极管集电极电流 I_C （或 U_{CE} ）调整与测试。

静态工作点是否合适，对放大器的性能和输出波形都有很大的影响。如工作点偏高，放大器在加入交流信号以后易产生饱和失真，此时 u_o 的负半周将被削底，如图 4-2 (a) 所示，如工作点偏低则易产生截止失真，即 u_o 的正半周被缩顶(一般截止失真不如饱和失真明显)，如图 4-2 (b) 所示。这些情况都不符合不失真放大的要求。所以在选定工作点以后还必须进行动态调试，即在放大器的输入端加入一定的 u_i ，检查输出电压 u_o 的大小和波形是否满足要求。如不满足，则应调节静态工作点的位置。

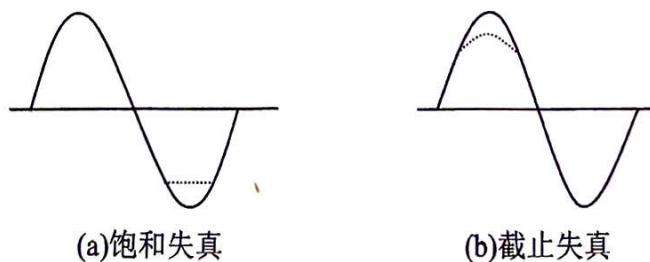


图 4-2 静态工作点对 U_o 波形失真的影响

改变电路参数 V_{CC} , R_C , R_B (R_{B1} , R_{B2}) 都会引起静态工作点的变化, 如图 4-3 所示, 但通常多采用调节偏置电阻 R_{B2} 的方法来改变静态工作点, 如减小 R_{B2} , 则可使静态工作点提高等。

最后还要说明的是, 上面所说的工作点“偏高”或“偏低”不是绝对的, 应该是相对信号的幅度而言, 如信号幅度很小, 即使工作点较高或较低也不一定会出现失真。所以确切的说, 产生波形失真是信号幅度与静态工作点设置配合不当所致。如须满足较大信号的要求, 静态工作点最好尽量靠近交流负载线的中点。

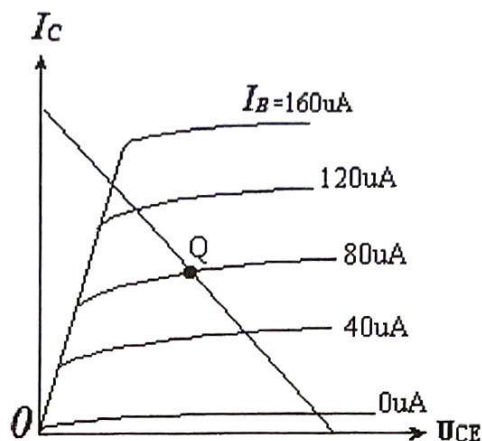


图 4-3 电路参数对静态工作点的影响

2. 放大器动态指标测试

放大器动态指标测试包括电压放大倍数、输入电阻、输出电阻、最大不失真输出电压(动态范围)和通频带等。

(1) 电压放大倍数 A_u 的测量

调整放大器到合适的静态工作点, 然后加入输入电压 u_i , 在输出电压 u_o 不失真的情况下, 用交流毫伏表或者示波器测出 u_i 和 u_o 的有效值 U_i 和 U_o , 则

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} \quad (4-8)$$

(2) 输入电阻 R_i 的测量

为了测量放大器的输入电阻, 按图 4-4 电路在被测放大器的输入端与信号源之间串入一已知电阻 R , 在放大器正常工作的情况下, 用交流毫伏表或者示波器测出 u_i 和 u_o 的有效值 U_S 和 U_i , 则根据输入电阻的定义可得

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{\frac{U_R}{R}} = \frac{U_i}{U_S - U_i} R \quad (4-9)$$

测量时应注意:

- ① 测量 R 两端电压 U_R 时必须分别对地测出 U_S 和 U_i , 然后按 $U_R = U_S - U_i$ 求出 U_R 值。
- ② 电阻 R 的值不宜取得过大或过小, 以免产生较大的测量误差, 通常取 R 与 R_i 为同

一数量级为好，本实验可取 $R=1\sim 2K\Omega$ 。

(3) 输出电阻 R_o 的测量

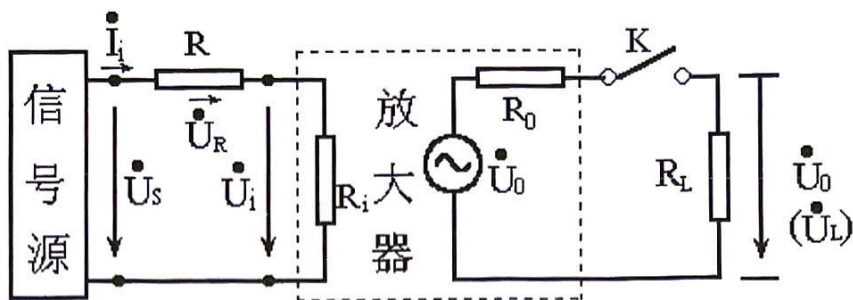


图 4-4 输入和输出电阻测量电路

按图 4-4 电路，在放大器正常工作条件下，测出输出端不接负载 R_L 的输出电压 U_o 和接入负载后输出电压 U_L ，根据

$$U_L = \frac{R_L}{R_o + R_L} U_o \quad (4-10)$$

即可求出 R_o 。

$$R_o = \left(\frac{U_o}{U_L} - 1 \right) R_L \quad (4-11)$$

在测试中应注意，必须保持 R_L 接入前后输入信号的大小不变。

(4) 最大不失真输出电压 U_{oP-P} 的测量（最大动态范围）

如上所述，为了得到最大动态范围，应将静态工作点调在交流负载线的中点。为此在放大器正常工作情况下，逐步增大输入信号的幅度，并同时调节 R_w （改变静态工作点），用示波器观察 u_o ，当输出波形同时出现削底和缩顶现象（如图 4-5）时，说明静态工作点已调在交流负载线的中点。然后反复调整输入信号，使波形输出幅度最大，且无明显失真时，用交流毫伏表或者示波器测出 U_o （有效值），并用示波器直接读出动态范围 U_{oP-P} 。

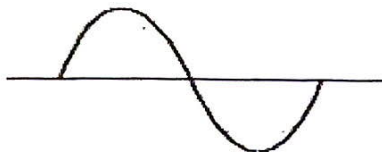


图 4-5 静态工作点正常，输入信号太大引起的失真

(5) 放大器频率特性的测量

放大器的频率特性是指放大器的电压放大倍数 A_u 与输入信号频率 f 之间的关系曲线。单管阻容耦合放大电路的幅频特性曲线如图 4-6 所示：

图 4-6 中 A_{um} 为中频电压放大倍数，通常规定电压放大倍数随频率变化下降到中频放大倍数 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 倍，即 $0.707A_{um}$ 所对应的频率分别称为下限频率 f_L 和上限频率 f_H ，则通频带

$$f_{BW} = f_H - f_L \quad (4-12)$$

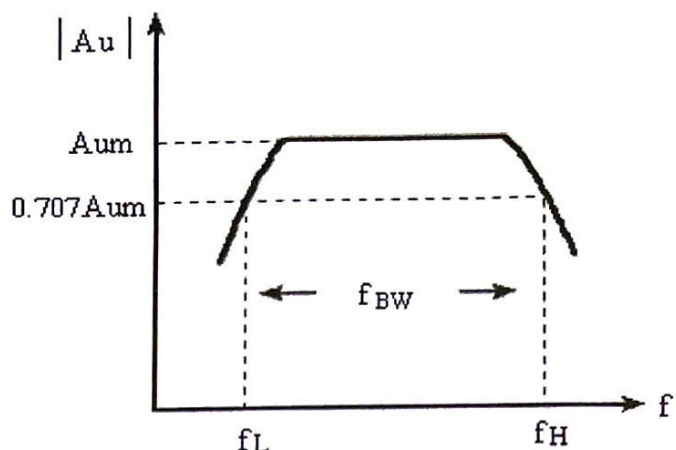


图 4-6 幅频特性曲线

放大器的幅频特性就是测量不同频率信号时的电压放大倍数 A_u 。为此可采用前述测 A_u 的方法，每改变一个信号频率，测量其相应的电压放大倍数，测量时要注意取点要恰当，在低频段与高频段要多测几点，在中频可以少测几点。此外，在改变频率时，要保持输入信号的幅度不变，且输出波形不能失真。

实验内容

1. 测量静态工作点

按图 4-1 接线，打开交流开关，调节 R_w ，使 $I_C=2.0\text{mA}$ （即 $U_E=2.4\text{V}$ ），用万用表测量 U_B 、 U_E 、 U_C 、 R_{B2} 值。记入表 4-1。静态工作点测量条件：输入接地（即 $U_i=0$ ）。

表 4-1 $I_C=2.0\text{mA}$

测量值				计算值		
U_B (V)	U_E (V)	U_C (V)	R_{B2} (k Ω)	U_{BE} (V)	U_{CE} (V)	I_C (mA)

2. 测量电压放大倍数

调节频率为 1KHz 的正弦波作为输入信号 u_i 。同时用双踪示波器观察放大器输入电压 u_i 和输出电压 u_o 的波形，在 u_o 波形不失真的条件下，用毫伏表或者示波器测量开路和带载两种情况下 u_o 的有效值，并用双踪示波器观察 u_o 和 u_i 的相位关系，记入表 4-2。

表 4-2 $I_C=2.0\text{mA}$ $U_i=$ mV (有效值)

R_C (k Ω)	R_L (k Ω)	U_o (V)	A_u	观察记录一组 u_o 和 u_i 波形
2.4	2.4			
2.4	∞			

4. 测量输入电阻和输出电阻

按图 4-4 所示，取 $R=2\text{K}$ ，置 $R_C=2.4\text{k}\Omega$ ， $R_L=2.4\text{k}\Omega$ ， $I_C=2.0\text{mA}$ 。输入 $f=1\text{kHz}$ 的正弦信号 u_s ，在输出电压 u_o 为不失真的情况下，用毫伏表或者示波器测出 U_s ， U_i ，用公式 (4-9) 算出 R_i 。

输出电阻 R_o 可根据表 4-2 所测的数据用公式 4-11 算出。

4. 测量幅频特性曲线

取 $I_C=2.0\text{mA}$, $R_C=2.4\text{k}\Omega$, $R_L=2.4\text{k}\Omega$ 。保持输入信号 u_i 不变, 改变信号源频率 f , 逐点测出相应的输出电压 U_o , 自作表格并记录之。为了使频率 f 取值合适, 可先粗测一下, 找出中频范围, 然后再仔细读数。

5. 测量最大不失真输出电压

在 $R_C=2.4\text{k}\Omega$ $R_L=2.4\text{k}\Omega$ 连线条件下, 同时调节输入信号的幅度和电位器 R_w , 用示波器测量 U_{op-p} 及有效值 U_o 值, 记入表 4-3。

表 4-3 $R_C=2.4\text{k}\Omega$ $R_L=2.4\text{k}\Omega$

U_E (V)	U_B (V)	U_C (V)	R_{B2} (k Ω)	I_C (mA)	U_i (mV)	U_o (V)	U_{op+} (V)	U_{op-} (V)

6. 观察静态工作点对电压放大倍数的影响

在 $R_C=2.4\text{k}\Omega$, $R_L=\infty$ 连线条件下, 使 $u_i=0$, 调节 R_w , 使 $I_C=2.0\text{mA}$, (参见本实验步骤 1)。输入频率为 1KHz 正弦波信号 u_i , 逐步加大输入信号幅度, 使输出电压 u_o 足够大但不失真。然后, 保持输入信号不变, 分别增大和减小 R_w , 用示波器监视输出电压波形, 在 u_o 不失真的条件下, 测量数据 I_C 和 U_o 的值, 记入表 4-4。测量 I_C 时, 要使 $u_i=0$ (断开输入信号 U_i , 并短接到地)。

表 4-4 $R_C=2.4\text{k}\Omega$ $R_L=\infty$ $U_i=$ mV (有效值)

I_C (mA)			2.0		
U_o (V)					
A_u					

7. 观察静态工作点对输出波形失真的影响

在 $R_C=2.4\text{k}\Omega$ $R_L=\infty$ 连线条件下, 使 $u_i=0$, 调节 R_w 使 $I_C=2.0\text{mA}$ (参见本实验步骤 1), 测出 U_{CE} 值。输入频率为 1KHz 的正弦波信号 u_i , 再逐步加大输入信号幅度, 使输出电压 u_o 足够大但不失真。然后保持输入信号不变, 分别增大和减小 R_w , 使波形出现失真, 绘出 u_o 的波形, 并测出失真情况下的 I_C 和 U_{CE} 值, 记入表 4-5 中。每次测 I_C 和 U_{CE} 值时要使输入信号为零 (即使 $u_i=0$)。

表 4-5 $R_C=2.4\text{k}\Omega$ $R_L=\infty$ $U_i=$ mV

I_C (mA)	U_{CE} (V)	u_o 波形	失真情况	管子工作状态
2.0				

思考题

1. 加入输入信号 u_i 时，输出波形会出现哪几种失真？分别什么原因引起的？
2. 调整静态工作点时， R_{B2} 是 $10k$ 电阻与 R_w 相串联，而不能直接用电位器，为什么？
3. 对于本次的单管放大电路，实现放大的条件是什么？

实验仪器

1. 双踪示波器
2. 万用表
3. 交流毫伏表
4. 信号发生器

实验五 差动放大器

实验目的

1. 熟悉差分放大器的工作原理，加深理解其性能和特点
2. 学习差动放大器静态工作点的设置方法、掌握差模电压增益 A_{ud} 、共模电压增益 A_{uc} 、共模抑制比 K_{CMR} 、输入阻抗、输出阻抗等主要性能指标的测试方法。
3. 熟悉基本差分放大电路与具有镜像恒流源的差分放大电路的性能差别。

实验原理

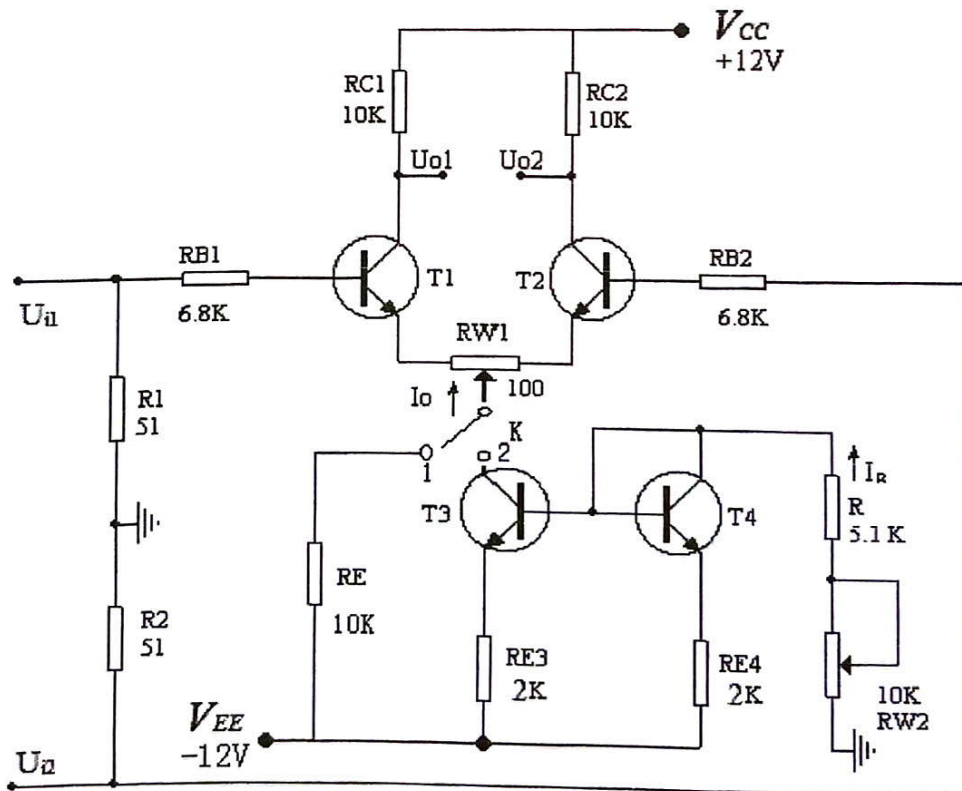


图 5-1 差动放大器

图 5-1 所示电路为具有恒流源的差动放大器，其中晶体管 T_1 、 T_2 称为差分对管，它与电阻 R_{B1} 、 R_{B2} 、 R_{C1} 、 R_{C2} 及电位器 R_{W1} 共同组成差动放大的基本电路。其中 $R_{B1}=R_{B2}$ ， $R_{C1}=R_{C2}$ ， R_{W1} 为调零电位器，若电路完全对称，静态时， R_{W1} 应处为中点位置，若电路不对称，应调节 R_{W1} ，使 U_{O1} 、 U_{O2} 两端静态时的电位相等。

晶体管 T_3 、 T_4 与电阻 R_{E3} 、 R_{E4} 、 R 和 R_{W2} 共同组成镜像恒流源电路，为差动放大器提供恒定电流 I_0 。要求 T_3 、 T_4 为差分对管。 R_1 和 R_2 为均衡电阻，且 $R_1=R_2$ ，给差动放大器提供对称的差模输入信号。由于电路参数完全对称，当外界温度变化，或电源电压波动时，对电路的影响是一样的，因此差动放大器能有效的抑制零点漂移。

1. 差动放大电路的输入输出方式

如图 5-1 所示电路，根据输入信号和输出信号的不同方式可以有四种连接方式。即：

- (1) 双端输入—双端输出 将差模信号加在 U_{i1} 、 U_{i2} 两端，输出取自 U_{O1} 、 U_{O2} 两端。
- (2) 双端输入—单端输出 将差模信号加在 U_{i1} 、 U_{i2} 两端，输出取自 U_{O1} 或 U_{O2} 到地的信号。
- (3) 单端输入—双端输出 将差模信号加在 U_{i1} 上， U_{i2} 接地（或 U_{i1} 接地而信号加在 U_{i2} 上），输出取自 U_{O1} 、 U_{O2} 两端。
- (4) 单端输入—单端输出 将差模信号加在 U_{i1} 上， U_{i2} 接地（或 U_{i1} 接地而信号加在 U_{i2} 上），输出取自 U_{O1} 或 U_{O2} 到地的信号。连接方式不同，电路的性能参数不同。

2. 静态工作点的计算

(1) 典型电路

如图 5-1 所示，将开关 K 打到点 1 处，构成典型的差动放大电路。静态时差分放大器的输入端不加信号，由典型电路得

$$I_B = \frac{-V_{EE} - U_{BE}}{R_{B1} + 2(1 + \beta)R_E + (1 + \beta)\frac{R_{W1}}{2}} \quad (5-1)$$

$$I_C = \beta I_B \quad (5-2)$$

$$U_{CE} = V_{CC} + V_{EE} - I_C R_C - 2I_C R_E - I_C \frac{R_{W1}}{2} \quad (5-3)$$

$$U_C = V_{CC} - I_C R_C \quad (5-4)$$

(2) 恒流源电路

如图 5-1 所示，将开关 K 打到点 2 处，构成恒流源的差动放大电路。静态时差分放大器的输入端不加信号，由恒流源电路得

$$I_R = 2I_{B4} + I_{C4} = \frac{2I_{C4}}{\beta} + I_{C4} \approx I_{C4} = -I_0 \quad (5-5)$$

I_0 为 I_R 的镜像电流。由电路可得

$$I_0 = -I_R = \frac{V_{EE} + 0.7V}{R + R_{W2} + R_{E4}} \quad (5-6)$$

由上式可见 I_0 主要由 V_{EE} (-12V) 及电阻 R 、 R_{W2} 、 R_{E4} 决定，与晶体管的特性参数无关。差动放大器中的 T_1 、 T_2 参数对称，则

$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{-I_0}{2} \quad (5-7)$$

$$U_{o1} = U_{o2} = V_{CC} - I_{C1}R_{C1} = V_{CC} - \frac{I_0R_{C1}}{2} \quad (5-8)$$

$$r_{be} = 300\Omega + (1 + \beta) \frac{26mV}{I_E(mA)} = 300\Omega + (1 + \beta) \frac{26mV}{(I_0/2)mA} \quad (5-9)$$

由此可见，差动放大器的工作点，主要由镜像恒流源 I_0 决定。

3. 差动放大器的重要指标计算

(1) 差模放大倍数 A_{ud}

由分析可知，差动放大器在单端输入或双端输入，它们的差模电压增益相同。但是，要根据双端输出和单端输出分别计算。在此分析双端输入，单端输出自己分析。

设差动放大器的两个输入端输入两个大小相等，极性相反的信号 $U_{id}=U_{id1}-U_{id2}$ 。

双端输出时，差动放大器的差模电压增益为

$$A_{ud} = \frac{U_{od}}{U_{id}} = \frac{U_{od1} - U_{od2}}{U_{id1} - U_{id2}} = A_{ui} = \frac{-\beta R'_L}{R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2}} \quad (5-10)$$

式中 $R'_L = R_C \parallel \frac{R_L}{2}$ ， A_{ui} 为单管电压增益。

单端输出时，电压增益为

$$A_{ud1} = \frac{U_{od1}}{U_{id}} = \frac{U_{od1}}{2U_{id1}} = \frac{1}{2} A_{ui} = \frac{-\beta R'_L}{2(R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2})} \quad (5-11)$$

式中 $R'_L = R_C \parallel R_L$ 。

(2) 共模放大倍数 A_{uc}

设差动放大器的两个输入端同时加上两个大小相等，极性相同的信号即 $U_{ic}=U_{i1}=U_{i2}$ 。

单端输出的共模电压增益

$$A_{u_{C1}} = \frac{U_{OC1}}{U_{iC}} = A_{u_{C2}}$$

$$= \frac{-\beta R'_L}{R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2} + 2(1 + \beta) R'_e} \approx -\frac{R'_L}{2R'_e} \quad (5-12)$$

式中 R'_e 为恒流源的交流等效电阻，若是典型差动电路则为 R_e 。即

$$R'_e = r_{ce3} \left(1 + \frac{\beta R_{E3}}{r_{be3} + R_{E3} + R_B} \right) \quad (5-13)$$

$$r_{be3} = 300\Omega + (1 + \beta) \frac{26mV}{I_{E3}mA} \quad (5-14)$$

$$R_B \approx (R + R_{W2}) // R_{E4} \quad (5-15)$$

由于 r_{ce3} 一般为几百千欧，所以 $R'_e \gg R'_L$

则共模电压增益 $A_{u_{C}} < 1$ ，在单端输出时，共模信号得到了抑制。

双端输出时，在电路完全对称情况下，则输出电压 $U_{OC1} = U_{OC2}$ ，共模增益为

$$A_{u_{C}} = \frac{U_{OC1} - U_{OC2}}{U_{iC}} = 0 \quad (5-16)$$

上式说明，双单端输出时，对零点漂移，电源波动等干扰信号有很强的抑制能力。

(3) 共模抑制比 K_{CMR}

差动放大电器性能的优劣常用共模抑制比 K_{CMR} 来衡量，即：

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{u_{C}}} \right| \quad (5-17)$$

或

$$K_{CMR} = 20 \lg \left| \frac{A_d}{A_C} \right| \quad (\text{dB}) \quad (5-18)$$

单端输出时，共模抑制比为：

$$K_{CMR} = \frac{A_{ud1}}{A_{u_{C1}}} = \frac{\beta R'_e}{R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2}} \quad (5-19)$$

双端输出时，共模抑制比为：

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| = \infty \quad (5-20)$$

实验内容

1. 典型差动放大电路的性能测试

(1) 调整静态工作点

如图 5-1 所示，将开关打到 1 点，构成典型电路，不加输入信号，将输入端 U_{i1} 、 U_{i2} 两点对地短路，调节 R_{W1} 电位器，使 $U_{O1}=U_{O2}$ 。用万用表直流电压档分别测量差分对管 T1、T2 的各极电位，记录数据，表格自拟。

(2) 测量差模放大倍数 A_{ud}

采用单端输入方式，两个 51Ω 不接，将 U_{i2} 端接地，从 U_{i1} 端输入 $U_{id}=20\text{mV}$ （有效值）、 $f=1\text{KHz}$ 的差模信号，用毫伏表或者示波器分别测出单端输出电压 $U_{od1}(U_{o1})$ ， $U_{od2}(U_{o2})$ ，计算出双端输出的差模电压 U_{od} ，并计算出差模双端输出的放大倍数 A_{ud} 及单端输出的差模放大倍数 A_{ud1} 和 A_{ud2} ，与理论值进行比较，分析和讨论。用示波器（AC 耦合）观察并画出 u_{od1} 和 u_{od2} 的波形以及双端输出的波形 u_{od} （ u_{od} 波形观察方法：CH1、CH2 分别测 u_{od1} 和 u_{od2} 的波形，按下 math 按钮，算子选择“-”，此时可以测出 $u_{od}=u_{od1}-u_{od2}$ 波形参数，测量 U_{od} 时，测量源选择“数学函数”）。

(3) 测量差模输入电阻

差模信号单端输入方式，在信号源 U_s 与差分 U_{i1} 输入端之间串接一个 $R_s=10\text{K}\Omega$ 的电阻， $U_s=80\text{mv}$ （有效值）， $f=1\text{KHz}$ ，用毫伏表测量 $R_s=10\text{K}\Omega$ 前后对地电压 U_s 和 U_{i1} ，计算差模单端输入时的输入电阻 R_{id} 。

(4) 测量差模输出电阻

$U_s=50\text{mv}$ （有效值）， $f=1\text{KHz}$ ，用毫伏表测量空载时的 U_{od1} ，再测量有载（将 $R_L=10\text{K}\Omega$ 并接在 T1 的集电极和地之间）时的 U_{odL} ，计算差模单端输入单端输出时的输出电阻 R_{od1} 。（ $R_s=10\text{K}\Omega$ 不接）

(5) 测量共模放大倍数 A_{uc}

将输入端 U_{i1} 、 U_{i2} 两点连接在一起，两个 51Ω 不接，从 U_{s1} 端输入 90mV （有效值）， $f=1\text{KHz}$ 的共模信号，用毫伏表或者示波器分别测量 T1、T2 两管集电极对地的共模输出电压 U_{oc1} ， U_{oc2} 。用示波器观察并画出 u_{oc1} 和 u_{oc2} 的波形以及双端输出的波形 U_{oc} （方法同 U_{od} 测量），双端输出的共模电压为 $U_{oc}=U_{oc1}-U_{oc2}$ ，计算出单端输出的共模放大倍数 A_{uc1} 和 A_{uc2} 及双端输出的共模放大倍数 A_{uc} ，并与理论值进行比较。

(6) 根据以上测量结果，分别计算双端输出，和单端输出共模抑制比。即 K_{CMR} （单）和 K_{CMR} （双）。

2. 具有恒流源的差动放大电路性能测试

(1) 静态工作点调节

如图 5-1 所示，将开关打到 2 点，构成具有恒流源差动放大电路，不加输入信号，将输入端 U_{i1} 、 U_{i2} 两点对地短路，调节恒流源电路 R_{W2} 电位器，使 $I_0=1\text{mA}$ （即 $I_0=2U_{RC1}/R_{C1}$ ）。用万用表直流电压档分别测量差分对管 T1、T2 的各极电位，记录数据，表格自拟。

(2) 重复实验内容 1 中 (2)、(5)、(6) 的内容。（恒流源差动输入阻抗、输出阻抗免做）

思考题

1. 为什么要对差分放大器进行调零，在实验中是否非常重要？
2. 差分放大器中的 R_E 和恒流源起什么作用？提高 R_E 阻值会受到什么限制？
3. 典型差动放大电路与恒流源差动放大电路在观测共模输出 u_{OC1} 与 u_{OC2} 的波形时，其大小、极性及共模抑制比 K_{CMR} 有何区别？为什么？

实验仪器

1. 双踪示波器
2. 万用表
3. 交流毫伏表
4. 信号发生器

实验六 集成运算放大器的基本应用

—模拟运算电路

实验目的

1. 掌握集成运算放大器的基本特性及正确使用方法。
2. 掌握集成运算放大器的三种输入方式，研究由集成运算放大器组成的比例、加法、减法、积分和微分等基本运算电路的功能。
3. 了解运算放大器在实际应用时应考虑的一些问题。

实验原理

集成运算放大器是具有两个输入端、一个输出端的高增益、高输入阻抗的多级直接耦合放大器。本实验采用 $\mu\text{A}741$ 型集成运算放大器。

运算放大器具有高增益、低漂移、高输入阻抗、低输出阻抗、可靠性高的特点，因此可以视其为理想器件。在集成运算放大器的输出端和输入端之间加上反馈网络，则可以实现不同的电路功能。可以构成加、减、乘、除、乘方、开方、积分、微分等各种模拟运算。

电路。在实时控制和物理量的检测中，有着非常广泛的应用前景。本实验着重讨论最基本的比例、加、减、积分与微分运算电路。

1. 反相比例运算电路

将加在反向输入端的信号按比例放大,称为反向比例运算电路,电路如图 6-1 所示。对于理想运放,该电路的输出电压与输入电压之间的关系为:

$$U_o = -\frac{R_F}{R_1} U_i \quad (6-1)$$

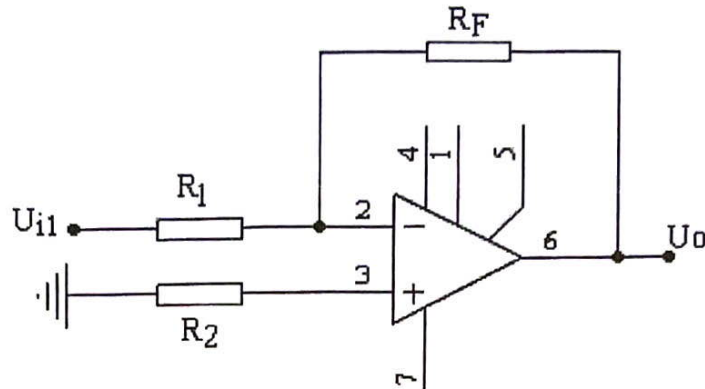


图 6-1 反相比例运算电路

从上式可以看出: U_o 与 U_i 是比例关系, 改变比例系数 R_F/R_1 , 即可改变 U_o 的数值, 负号表示输出电压与输入电压极性相反, 输入电压的大小受运算放大器输出电压的限制, 因此输入与输出只在一定范围内保持线性关系。

为确保运放的两个输入端处于平衡对称工作状态, 以便减小输入级偏置电流引起的运算误差, 在同相输入端应接入平衡电阻 $R_2=R_1//R_F$ 。

2. 反相加法电路

电路如图 6-2 所示, 输入端的数量可以根据实际需要进行调整, 图中 $R_3=R_1//R_2//R_F$ 。输出电压与输入电压之间的关系为:

$$U_o = -\left(\frac{R_F}{R_1} U_{i1} + \frac{R_F}{R_2} U_{i2}\right) \quad (6-$$

2)

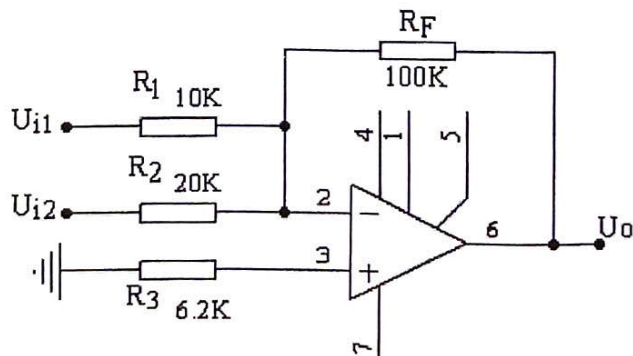


图 6-2 反相加法运算电路

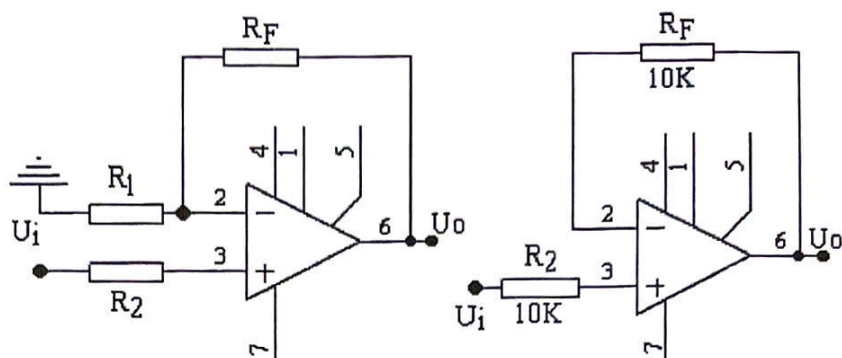
此电路的特点与反向比例电路相同, 同时可方便地改变某一支路的输入电阻, 来改

变电路的比例关系，而不影响其它电路的比例关系。

3. 同相比例运算电路

输入信号加在同相端，电路如图 6-3 (a) 所示，图中 $R_2=R_1//R_F$ 。它的输出电压与输入电压之间的关系为：

$$U_o = (1 + \frac{R_F}{R_1})U_i \quad (6-3)$$



(a)同相比例运算

(b)电压跟随器

图 6-3 同相比例运算电路

同相放大器具有输入阻抗高，输出阻抗低的特点，广泛用于前置放大器。当 $R_1 \rightarrow \infty$ 时， $U_o=U_i$ ，即得到如图 6-3 (b) 所示的电压跟随器。图中 $R_2=R_F$ ，用以减小漂移和起保护作用。

4. 差动放大电路（减法器）

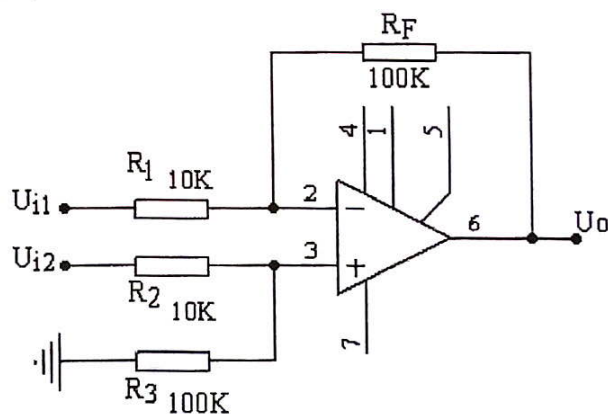


图 6-4 减法运算电路

差动放大电路又称减法器，它能够放大差模信号，抑制共模信号。输入信号分别加在反相输入端和同相输入端，电路如图所示，对于图 6-4 所示的减法运算电路，当 $R_1=R_2$ ， $R_3=R_F$ 时，有如下关系式：

$$U_o = \frac{R_F}{R_1}(U_{i2} - U_{i1}) \quad (6-4)$$

由此我们可以看出它实际完成的是对两个信号的差运算。由于差动放大器具有双端输入-单端输出，共模抑制比很高的特点，常被用作传感放大器或者测量放大器的前端放大器。

5. 积分运算电路

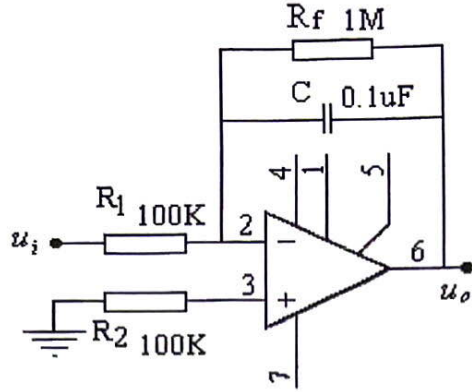


图 6-5 积分运算电路

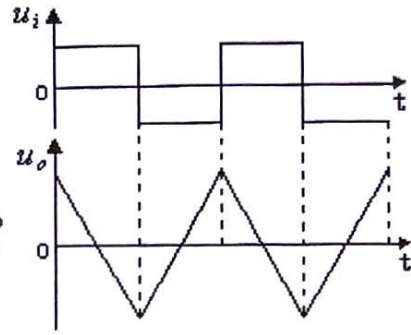


图 6-6 输入方波对应的输出波形

输出电压与输入电压呈积分关系，电路如图 6-5 所示。它是利用电容的充放电来实现积分运算的。在理想化条件下，输出电压 $u_o(t)$ 为：

$$u_o(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_i dt + u_c(0) \quad (6-5)$$

式中 $u_c(0)$ 是 $t=0$ 时刻电容 C 两端的电压值，即初始值。

R_f 称分流电阻，用于稳定电流增益，以避免直流失调电压在积分周期内积累导致运放饱和，一般取 $R_f \approx 10R_1$ 。

如果 $u_i(t)$ 是幅值为 E 的阶跃电压，并设 $u_c(0)=0$ ，则

$$u_o(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t E dt = -\frac{E}{RC} t \quad (6-6)$$

此时显然 RC 的数值越大，达到给定的 U_o 值所需的时间就越长，积分输出电压所能达到的最大值受集成运放最大输出范围限制。

一般方波变换为三角波，正弦波移相。例如当输入为方波电压时，其积分输出波形如图 6-6 所示。

6. 微分运算电路

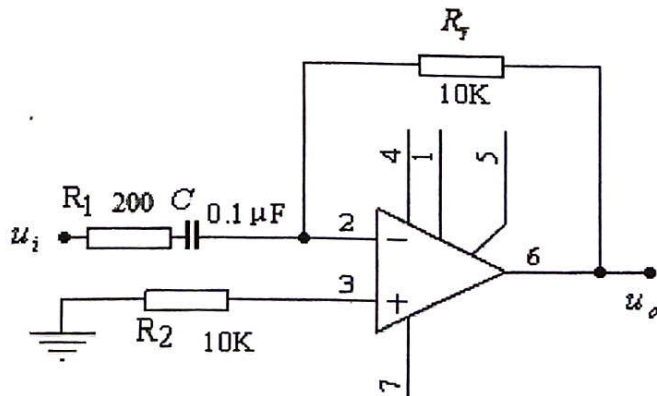


图 6-7 微分运算电路

微分电路是积分的逆运算，它的输出电压与输入电压呈微分关系，电路如图 6-7 所示，一般表达式为：

$$u_o(t) = -R_f C \frac{du_i}{dt} \quad (6-7)$$

微分电路的输出电压正比于输入电压对时间的微分，由此可看出，输出电压对输入电压的变化十分敏感，因此该电路的抗干扰能力差。

在脉冲数字电路中，利用微分电路可实现对波形的变换，例如将矩形波变换为尖脉冲波。

实验内容

实验时切忌将输出端短路，否则将会损坏集成块。为防止正负电源接反损坏运算放大器，运放系列实验中， $\mu A741$ 运放的电源已经接好。理论上讲，做实验之前应该对运放进行调零，但是，现在的运放性能都很好，失调电压对输出影响不大，可以不用调零，以后不再说明调零情况。输入信号时，先按实验给定的参考值，在电源端调好大约的输入，再加入运放输入端，避免加入信号太大，烧坏运放芯片。

1. 反相比例运算电路

设计一个反相比例放大器并画出电路，标出各元器件参数，要求：

- (1) 电压放大倍数 $A_u = -10$ ，(2) 输入阻抗 $1k\Omega \leq R_i \leq 10k\Omega$ 。

建议输入 $f=500\text{Hz}$ ， $U_i=0.5\text{V}$ (有效值) 的正弦交流信号，测量 U_i 、 U_o 有效值及波形，并观察 u_o 和 u_i 的相位关系，注意输出波形不失真，记入表 6-1。

表 6-1 $U_i=0.5\text{V}$ (有效值)， $f=500\text{Hz}$

$U_i(\text{V})$	$U_o(\text{V})$	u_i 与 u_o 波形	A_u	
			实测值	计算值

2. 反相加法运算电路

- (1) 按图 6-2 正确连线， U_{i1} 和 U_{i2} 采用直流稳压电源输入
 (2) 用万用表测量输入电压 U_{i1} 、 U_{i2} 及输出电压 U_o ，记入表 6-2 中。

表 6-2

$U_{i1}(\text{V})$				
$U_{i2}(\text{V})$				
$U_o(\text{V})$				

3. 同相比例运算电路

设计一个同相比例放大器并画出电路，标出各元器件参数，要求：电压放大倍数 $A_u = 11$ 。

建议输入 $f=500\text{Hz}$ ， $U_i=0.5\text{V}$ (有效值) 的正弦交流信号，测量 U_i 、 U_o 有效值及波形，并观察 u_o 和 u_i 的相位关系，注意输出波形不失真，将结果记入表 6-3。

表 6-3 $U_i=0.5V, f=500Hz$

$U_i(V)$	$U_o(V)$	u_i 与 u_o 波形	Au	
			实测值	计算值

4. 减法运算电路

- (1) 按图 6-4 正确连接实验电路。
- (2) 采用直流稳压电源输入，实验步骤同内容 3，记入表 6-4。

表 6-4

$U_{i1}(V)$				
$U_{i2}(V)$				
$U_o(V)$				

5. 积分运算电路

- (1) 按积分电路如图 6-5 所示正确连接。
- (2) 取频率约为 100Hz，峰峰值为 2V 的方波作为输入信号 u_i ，打开交流开关，输出端接示波器，可观察到三角波波形输出并记录之。

6. 微分运算电路

- (1) 按微分电路如图 6-7 所示正确连接。
- (2) 取频率约为 1kHz，峰峰值为 2V 的三角波作为输入信号 u_i ，打开交流开关，输出端接示波器，可观察到方波。

思考题

1. 如何判断集成运算放大器的好坏？为了不损坏集成运算放大器，实验中应注意什么问题？
2. 当反相或者同相放大器的输入 u_i 固定时，如果负反馈电阻 R_F 选择过大， U_o 可能不再随 R_F 的增加而增大，且输出的交流波形限幅，试说明原因？
3. 在积分运算电路图 6-5 中，分析电阻 R_f 的作用，说明 R_f 的大小对积分电路的精度有什么影响？
4. 设计一个能实现下列运算关系的运算电路。(运放数 ≤ 2)，已知条件如下：

$$(1) U_o = 2U_{i1} - 3U_{i2}$$

$$(2) U_o = U_{i1} - 2U_{i2} + 3U_{i3}$$

实验仪器

1. 双踪示波器
2. 函数信号发生器
3. 数字万用表

实验七 负反馈放大器

实验目的

1. 通过实验了解串联电压负反馈对放大器性能的改善。
2. 掌握负反馈放大器各项技术指标的测试方法。
2. 掌握负反馈放大电路频率特性的测量方法。

实验原理

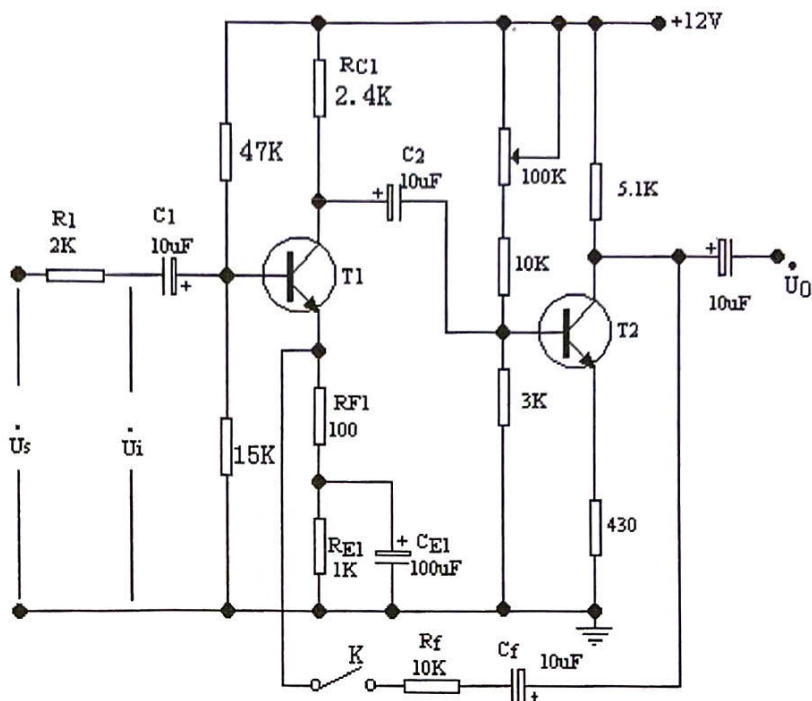


图 7-1 带有电压串联负反馈的两级阻容耦合放大器

电压串联负反馈对放大器性能的影响主要有以下几点：

1. 负反馈使放大器的放大倍数降低， A_{uf} 的表达式为：

$$A_{uf} = \frac{A_u}{1 + A_u F_u} \quad (7-1)$$

从式中可见，加上负反馈后， A_{uf} 比 A_u 降低了 $(1 + A_u F_u)$ 倍，并且 $|1 + A_u F_u|$ 愈大，放大倍数降低愈多。深度反馈时，

$$A_{uf} \approx \frac{1}{F_u} \quad (7-1)$$

2. 反馈系数

$$F_u = \frac{R_{F1}}{R_f + R_{F1}} \quad (7-3)$$

3. 负反馈改变放大器的输入电阻与输出电阻

负反馈对放大器输入阻抗和输出阻抗的影响比较复杂。不同的反馈形式，对阻抗的影响不一样。一般并联负反馈能降低输入阻抗；而串联负反馈则提高输入阻抗，电压负反馈使输出阻抗降低；电流负反馈使输出阻抗升高。

输入电阻

$$R_{if} = (1 + A_u F_u) R_i \quad (7-4)$$

输出电阻

$$R_{of} = \frac{R_o}{1 + A_u F_u} \quad (7-5)$$

4. 负反馈扩展了放大器的通频带

引入负反馈后，放大器的上限频率与下限频率的表达式分别为：

$$f_{Hf} = (1 + A_u F_u) f_H \quad (7-6)$$

$$f_{Lf} = \frac{1}{1 + A_u F_u} f_L \quad (7-7)$$

$$BW = f_{Hf} - f_{Lf} \approx f_{Hf} \quad (f_{Hf} \gg f_{Lf}) \quad (7-8)$$

可见，引入负反馈后， f_{Hf} 向高端扩展了 $(1+A_u F_u)$ 倍， f_{Lf} 向低端扩展了 $(1+A_u F_u)$ 倍，使通频带加宽。

5. 负反馈提高了放大倍数的稳定性。

当反馈深度一定时，有

$$\frac{dA_{uf}}{A_{uf}} = \frac{1}{1 + A_u F_u} \cdot \frac{dA_u}{A_u} \quad (7-9)$$

可见引入负反馈后，放大器闭环放大倍数 A_{vf} 的相对变化量 $\frac{dA_{uf}}{A_{uf}}$ 比开环放大倍数的相对

变化量 $\frac{dA_u}{A_u}$ 减少了 $(1+A_u F_u)$ 倍，即闭环增益的稳定性提高了 $(1+A_u F_u)$ 倍。

实验内容

1. 测量静态工作点

按图 7-1 连接线路，K 先断开即反馈网络 ($R_f + C_f$) 先不接入。第一级静态工作点已固定，可以直接测量。调节 100 k Ω 电位器使第二级的 $I_{C2} = 1.0\text{mA}$ (即 $U_{E2} = 0.43\text{V}$)，用万用表分别测量第一级、第二级的静态工作点，记入表 7-1。

表 7-1

	$U_B(\text{V})$	$U_E(\text{V})$	$U_C(\text{V})$	$I_C(\text{mA})$
第一级				
第二级				

2. 测试基本放大器的各项性能指标

输入信号频率为 1kHz，负载 $R_L=10k\Omega$ ，调节输入信号的幅度，使输出电压不失真，测量基本放大电路的 A_u 、 R_i 、 R_o 及 f_H 和 f_L 值并将实验数据填入表 7-2 中，

表 7-2

	$U_s(mV)$	$U_i(mV)$	$U_L(V)$	$U_o(V)$	A_u	$R_i(k\Omega)$	$R_o(k\Omega)$	$f_H(kHz)$	$f_L(Hz)$
基本放大器									

注意：测量值都应统一为有效值的方式计算，绝不可将峰峰值和有效值混算，万用表交流档和毫伏表所测量的都是有效值。测 f_H 和 f_L 时，（在整个幅频测量中，保持输入信号不变），测得中频（ $f=1kHz$ ）时的 U_o 值，然后改变信号源的频率，先使 f 增加，获得 U_o 值降到中频时的 0.707 倍，此时输入信号的频率即为 f_H ，降低频率，使 U_o 值降到中频时的 0.707 倍，此时输入信号的频率即为 f_L 。测量 f_H 和 f_L 时，原来接入电路测输入阻抗时候的取样电阻 R_i 要从电路中去掉，否则影响测量结果。

3. 测试负反馈放大器的各项性能指标

输入信号频率为 1kHz，负载 $R_L=10k\Omega$ ，调节输入信号的幅度，使输出电压最大不失真。测量负反馈放大电路的 A_{uf} 、 R_{if} 、 R_{of} 及 f_{HF} 和 f_{LF} 值并将实验数据填入表 7-3 中

表 7-3

	$U_s(mV)$	$U_i(mV)$	$U_L(V)$	$U_o(V)$	A_u	$R_i(k\Omega)$	$R_o(k\Omega)$	$f_H(kHz)$	$f_L(Hz)$
负反馈放大器									

4. 观察负反馈对非线性失真的影响

先在开环状态下（K 断开），输入 $f=1kHz$ 的交流信号，用示波器观察输出波形刚刚出现失真时的情况，画出波形并记录 U_o 的幅值，然后加入负反馈形成闭环，再观察输出波形的变化情况，对比以上两种情况，得出结论。

思考题

1. 分析实验结果，总结电压串联负反馈对放大器性能的影响。
2. 测量通频带时，影响放大器频率特性的主要因素是什么？影响 f_L 的因素有哪些？采取什么措施使 f_L 降低？

实验仪器

1. 双踪示波器
2. 万用表
3. 交流毫伏表
4. 信号发生器

常用电子仪器使用说明

一、Agilent 34450A 型台式数字万用表

Agilent 34450A 数字万用表是一台具有五位半数字显示的多功能测量仪器。可以测量直流电压 (DCV)、电流 (DCI)，交流电压 (ACV)、电流 (ACV)，可以测量电阻，电容，温度，频率，可以用蜂鸣器档判断导线通断，可以测量二极管正向压降和反向电阻。

万用表可以使用 AUTO 自动确定量程，也可以通过 Range 上下按钮，手动选择相应的量程。手动确定量程时，如果输入信号大于选定的量程，则万用表显示过载符号 OL。可以通过 resolution 确定测量速度，选择“S”测量速度时，最慢，显示的有效数字最多，达到 5 位半，选择“F”测量速度时，测量速度最快，显示的有效数字是 4 位半。

电阻的测量：用万用表测量电阻时，需要把电阻从电路中断开，确保被测量电阻没有跟外围电路形成串并联回路，确保电阻没有带电。

交流电压的测量：交流电压档的内阻为 $1M\Omega$ ，频率响应范围是 20Hz-200kHz，测量电压范围为 0-750V 有效值。

直流电压的测量：直流电压档的内阻 $\geq 10M\Omega$ ，测量范围为 0-1000V。

电流的测量：电流档分 10A 档和 100mA 档，交流电流档的频率响应范围是 20Hz-10kHz，本实验室通常是采用间接测量电流方法，即在需要测量电流的支路串联取样电阻，测取样电阻上的电压，根据欧姆定律计算出电流。

温度的测量：温度的测量范围是 -80°C - 150°C ，测量电容时，要先把电容进行放电，然后进行测量。

二、GPD3303 型稳压稳流电源

GPD-3303 系列直流电源，有三组独立输出：CH1 与 CH2 两组可调电源和一组 CH3 固定电源。两组可调电源，输出额定都是 0~30V/0~3A。CH3 额定电压值为 2.5V/3.3V/5V，最大输出电流为 3A。直流电压源的内阻极小，近似为零，所以尽量避免短路操作。

GPD-3303 系列直流电源有三种输出模式：独立 (INDEP)、串联 (SER) 和并联 (PAR)。在独立模式下，输出电压和电流各自单独控制。在串联/并联模式下，CH1 与 CH2 的输出自动接成串联或并联，不需要再连接导线。在串联模式下，输出电压是 2 倍，在并联模式下，输出电流是 2 倍。CH3，它独立于 CH1 和 CH2，不管它们的模式。CH3 没有串联和并联模式。CH3 也不受 CH1 和 CH2 模式的影响。

当输出电流超过 3A 时，过载指示灯显示红灯，电源工作模式从恒压源变为恒流源。

按下 CH1 开关（按键 CH1 灯点亮），旋转电压旋钮或电流旋钮，调节输出

电压或电流至合适的数值。通常，电压和电流旋钮工作在粗调模式。按下旋钮 FINE 灯亮启动细调模式。使用时，调节好各通道输出电压或者电流之后，要点亮“OUTPUT”灯，才能正常输出电压或者电流。

三、TFG6010 函数信号发生器

TFG6010 型函数信号发生器可以输出包括正弦波、三角波、方波在内的 32 种波形，输出波形频率最大值：10MHz，输出波形幅度最大值：20V 峰峰值，函数信号发生器有 $50\ \Omega$ 的输出阻抗，这就决定了它的带载输出跟开路输出不尽相同，建议使用时带负载调输入电压大小。

函数信号发生器的幅度显示是在额定负载为 $1\text{M}\ \Omega$ 时候的读数，当外接负载不是 $1\text{M}\ \Omega$ 的时候，幅度显示是有误差的，所以，建议用相关测量工具测定具体输出电压大小，如果输出是正弦波，则可以用万用表交流档，毫伏表或者示波器测量，如果输出是非正弦波，则只能用示波器测量输出电压大小。开机默认 A 单频状态，屏幕上也只能显示 A 单频时候的 CH1 通道的波形。

菜单选择：屏幕右边为操作菜单，如果菜单右边有一个三角形，表示该菜单具有多项，按同一个选择键可以循环选择该菜单的各项。如果菜单右边没有三角形，表示该菜单只有一项。右边最上一行为功能菜单，仪器具有十种功能，分别用【单频】【扫描】【调制】【猝发】【键控】五个键选择，随着功能的选择，屏幕左上边会显示出该功能的 A 路波形示意图和该功能相关参数的含意。右边下面五行为选项菜单，分别使用屏幕右边相对应的五个空白软键选择，被选中的项目变为绿色。选项软键的功能随着选项菜单的不同而变。

参数显示：屏幕左边波形图下面为参数显示区，参数显示区的内容分两部分，参数名称使用白色英文字体显示。参数值使用黄色显示，被选中参数使用绿色显示，参数显示分如下六个区：

“B路波形”区：显示B路波形的序号，用两位数字表示，序号右边为B路波形的名称。

“频率”区：显示信号的频率或周期，在脉冲波形时可显示脉冲宽度。

“幅度”区：显示信号的输出幅度。

“A路衰减”区：显示A路信号的输出衰减比例。

“偏移等参数”区：显示偏移等其他参数。

“输出状态”区：显示A路和B路信号的输出开关状态。

输入方式选择：对于已知的数据，使用数字键输入最为方便，而且不管数据变化多大都能一次到位，没有中间过渡性数据产生，这在一些应用中是非常必要的。对于已经输入的数据进行局部修改，或者需要输入连续变化的数据进行观测时，使用调节旋钮最为方便，对于一系列等间隔数据的输入则使用步进键【 \wedge 】、【 \vee 】键，来步进增减A路信号的频率或幅度最为方便。

数据输入键：【0】~【9】键用来输入数字；【.】键用来输入小数点；【-】用来输入负号。如果一项参数被选中，则参数值会变为绿色，表示该项参数值可以被修改。十个数字键用于输入数据，输入方式为自左至右移位写入。数据中可以带

有小数点，如果一次数据输入中有多个小数点，则只有第一个小数点为有效。在“偏移”功能时，可以输入负号。使用数字键只是把数字写入显示区，这时数据并没有生效，如果数据输入错误，在按单位键之前，可以按【<】键退格删除，也可以重新选择该项目，然后输入正确的数据。数据输入完成以后，必须按单位键作为结束，输入数据才开始生效。数据的输入可以使用小数点和单位键任意搭配，仪器都会按照固定的单位格式将数据显示出来。例如输入1.5kHz，或1500Hz，数据生效之后都会显示为1500.00Hz。

单位软键：屏幕下边有五个空白键【 \square 】，其定义随着数据的性质不同而变化，数据输入之后必须按单位软键，表示数据输入结束并开始生效。

旋钮调节：在实际应用中，有时需要对信号进行连续调节，这时可以使用数字调节旋钮。当一项参数被选中，除了参数值会变为绿色外，还有一个数字会变为白色，这是光标指示位，按移位键【<】或【>】，可以使光标指示位左移或右移，面板上的旋钮为数字调节旋钮，向右转动旋钮，可使光标指示位的数字连续加一，并能向高位进位。向左转动旋钮，可使光标指示位的数字连续减一，并能向高位借位。使用旋钮输入数据时，数字改变后即刻生效，不用再按单位键。

四、SM2030A 数字交流毫伏表

SM2030A是双输入全自动数字交流毫伏表，输入阻抗 $10M\Omega$ ， $30pF$ ，适用于测量频率 $5Hz\sim 3MHz$ ，电压 $50\mu V\sim 350V$ 的正弦波有效值电压。具有量程自动/手动转换功能，3位半或4位半数字显示，小数点自动定位，能以有效值、峰峰值、电压电平、功率电平等多种测量单位显示测量结果。有两个独立的输入通道，有两个显示行，能同时显示两个通道的测量结果，也能以两种不同的单位显示同一个通道的测量结果。能同时显示量程转换方式、量程、单位等多种操作信息。显示清晰、直观，操作简单、方便。测量地和大地可以悬浮也可以连接，使用安全。可广泛应用于学校、工厂、部队、实验室、科研单位。考虑到毫伏表内部元器件的工作特性，精确测量一般建议先开机预热30分钟以上，关机后再开机，间隔时间应大于10秒。

【Auto】键和【Manual】键：选择改变量程的方法，两键互锁。按下【Auto】键，切换到自动选择量程。在自动功能，当输入信号大于当前量程的约13%，自动加大量程；当输入信号小于当前量程的约10%，自动减小量程。按下【Manual】键切换到手动选择量程。使用手动(Manual)量程，当输入信号大于当前量程的13%，显示OVL D应加大量程；当输入信号小于当前量程的8%，显示LOWER，必须减小量程。手动量程的测量速度比自动量程快。使用手动“Manual”量程时，用【3mV】~【300V】键手动选择量程，并指示出选择的结果，六键互锁。。

【CH1】键、【CH2】键：选择输入通道，两键互锁。按下【CH1】键选择CH1通道；按下【CH2】键选择CH2通道。

【dBV】、【dBm】、【Vpp】键：选择显示单位，把测得的电压值用电压电平、功率电平和峰峰值表示，三键互锁，按下任何一个量程键退出，默认的单位是有效值。【dBV】键：电压电平键， $0dBV=1V$ 。【dBm】键：功率电平键， $0dBm=1mW$ ，

600Ω。【Vpp】键：显示峰-峰值。

【Rel】键：归零键。记录“当前值”然后显示值变为：测得值-“当前值”。显示有效值、峰峰值时按归零键有效，再按一次退出。

【L1】键、【L2】键：显示屏分为上、下两行，用L1、L2键选择其中的一行，可对被选中的行进行输入通道、量程、显示单位的设置，两键互锁。

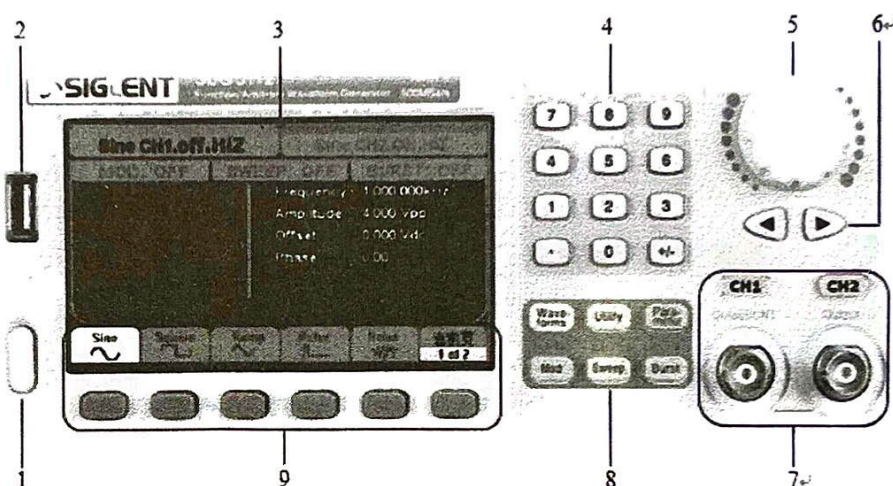
【Rem】键：进入程控，再按一次退出程控。

【Filter】键：开启滤波器功能，显示5位读数。

【GND!】键：接大地功能。连续按键2次，仪器处于接地状态，（在接地状态，输入信号切莫超过安全低电压！谨防电击！！）再按一次，仪器处于浮地状态。

五、SDG5112函数信号发生器

SDG5112 函数信号发生器向用户提供了明晰、简洁的前面板，前面板包括：4.3 英寸 TFT LCD 显示屏、参数操作键、波形选择键、数字键盘、模式/功能键、方向键、旋钮和通道选择键，前面板示意图如下图。

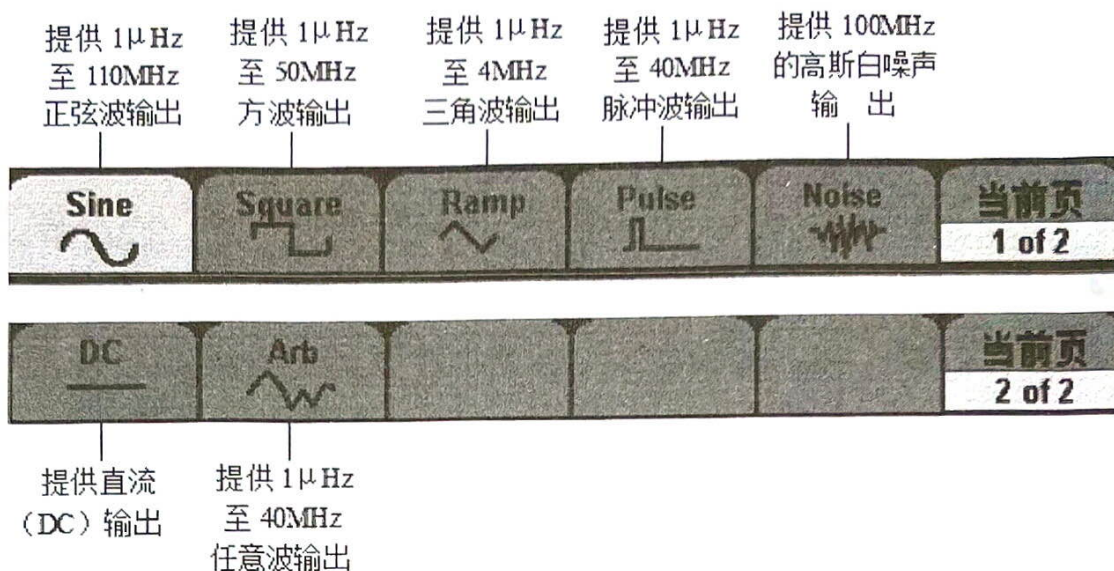


快速使用指南

1. **电源键**：开启、关闭信号发生器电源。
2. **USB Host接口**：支持 FAT 格式U盘，读取U盘中的波形或状态文件或当前的仪器状态存储到U盘中。
3. **LCD 显示屏**：4.3英寸TFT 彩色液晶显示屏。显示当前功能的彩色设置、系统状态和提示信息等内容。在同一时刻只能显示一个通道的参数设置，选中CH1通道时界面为蓝色，选中CH2通道时界面为黄色，面板示意图为选中CH1通道时的界面状态。
4. **数字键区**：用于输入数字0至9、小数点“.”、符号键+/-。
5. **旋钮**：在参数设置时，微调（增大或减小）当前显示的数值；在输入文件名时，切换软键中的字符。
6. **方向键**：在用旋钮设置参数时，用于切换数值位；在输入文件名时，用于改变移动光标的位置；在存储或读取文件时，用于选择文件保存的位置或选择需要读取的文件。

7. **CH1/CH2输出控制及输出接口**：用于开启或关闭CH1/CH2输出；设置输出阻抗（标称值50Ω）；当CH1/CH2打开时背光灯变亮。
8. **波形/工作模式/辅助功能键**：

(1) **Waveforms** ----**波形选择功能键**：选中该功能键背光灯变亮，显示屏下方出现多种输出波形选择菜单，如下图所示。从左到右分别为正弦波、方波、锯齿波/三角波、脉冲串、高斯白噪声、DC和任意波Arb。



按任意菜单软键激活对应菜单，同时用数字键及相应的单位或用旋钮及方向键改变参数值。如：“频率/周期”、“幅值/高电平”、“偏移量/低电平”、“相位”、“脉宽/占空比”、“上升沿/下降沿”、“延时”等，上图为激活正弦波菜单后参数设置示意图。

设置6MHz、1Vpp正弦波举例：

Waveforms→选择正弦波→选择频率，键入6MHz→选择幅值 (Amplitude)，键入1Vpp→偏移量 (Offset)、相位 (Phase) 选择默认→选择CH1 (或CH2) →选择打开→选择50Ω。

(2) **Parameter** ----**参数设置键**：在任意界面下直接返回基本参数设置界面。

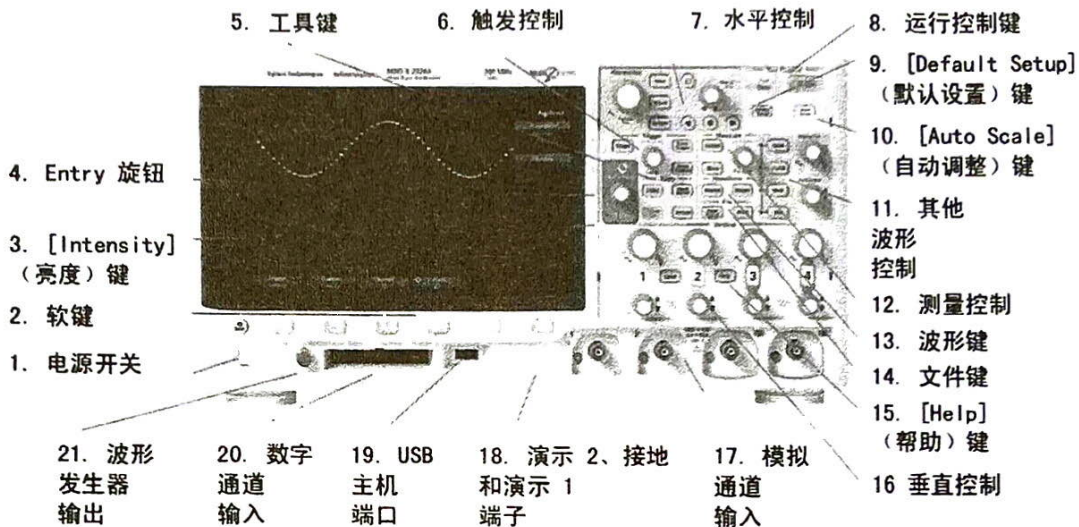
(3) Mod ----调制：可输出多种调制波形（如：AM、DSB-AM、FM、PM、ASK、FSK 和 PWM 调制信号）；支持“内部”和“外部”调制源。

六、Agilent DSO-X 2014 数字存储示波器

(一) 前面板控制和连接器




“按键”是指可以按的任何按钮。

“软键”特指显示屏下方的六个键。这些键的图例显示在显示屏上，正好位于在键的上方，一一对应，其功能随着您导航示波器的菜单而更改。前面板如下图所示。



各按钮及功能说明如下：

1.	电源开关	按一次打开电源，再按一次关闭电源。
2.	软键	这些键的功能会根据显示屏上键上方显示的菜单有所改变。【BACK】返回/向上键可在软件菜单层次结构中向上移动。在层次结构顶部，【BACK】返回/向上键将关闭菜单，改为显示示波器信息。
3.	[Intensity] 亮度键	按下该键使其亮起，该键亮起时，旋转 Entry 旋钮可调整波形亮度。
4.	Entry 旋钮	Entry 旋钮用于从菜单中选择菜单项或更改值。
5.	[Utility] 工具键	工具键包括 ·[Utility]（实用程序）键—按下该键可访问“实用程序菜单”，以便配置示波器的 I/O 设置、使用文件资源管理器、设置首选项、访问服务菜单并选择其他选项。 ·[Quick Action]（快速操作）键—按下该键可执行选定的快速操作，如测量所有快照、打印、保存、调用、冻结显示等。

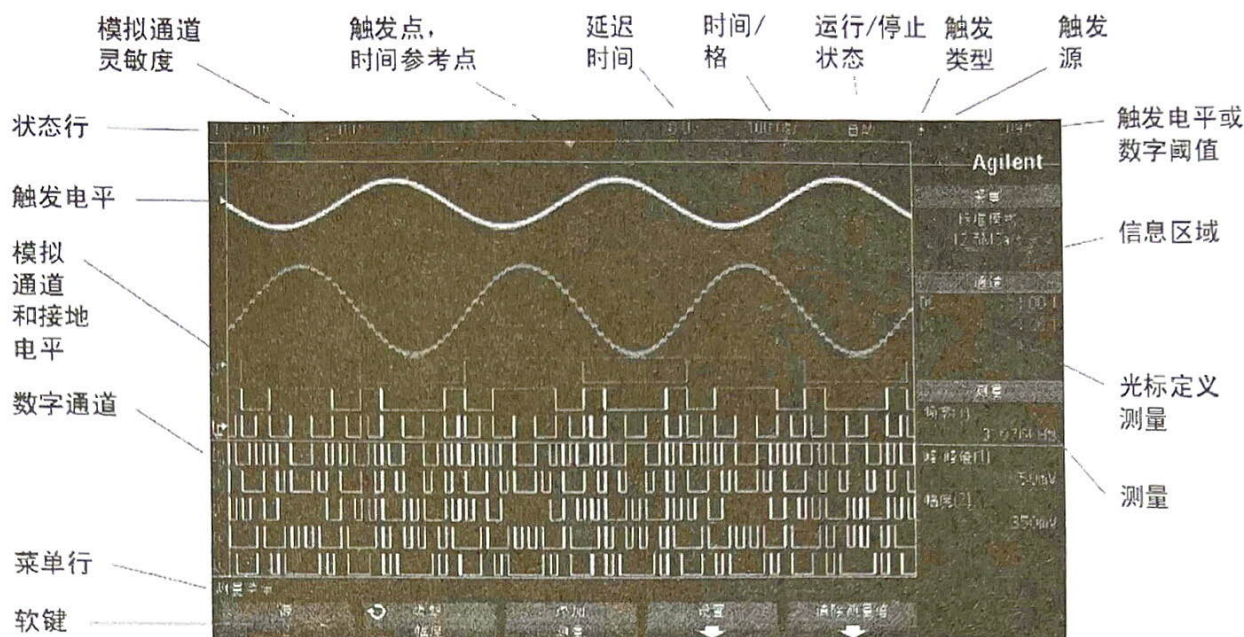
		<ul style="list-style-type: none"> ·[Analyze]（分析）键—按下该键可访问分析功能（如模板测试）或设置触发电平或测量阈值。 ·[Wave Gen]（波形发生器）键—按下该键可访问波形发生器功能。
6.	触发控制	[Trigger]等触发控制确定示波器如何触发以捕获数据。
7.	水平控制	<p>水平控制包括：</p> <ul style="list-style-type: none"> ·水平定标旋钮—旋转水平区中标记为  的旋钮，可调整时间/格（扫描速率）设置。该旋钮下方的符号表示此控制具有使用水平定标在波形上展开或放大的效果。 ·水平位置旋钮—旋转水平区中标记为  的旋钮，可水平平移波形数据。可以在触发之前（顺时针旋转旋钮）或触发之后（逆时针旋转旋钮）看见所捕获的波形。如果在示波器停止（不在运行模式中）时平移波形，则看到的是上次采集中获取的波形数据。 ·[Horiz]（水平）键—按下该键可打开“水平设置菜单”，可在其中选择 XY 和滚动模式，启用或禁用缩放，启用或禁用水平时间/格微调，以及选择触发时间参考点。 ·缩放  键—按下该键可将示波器显示拆分为正常区和缩放区，而无需打开“水平设置菜单”。 ·[Search]（搜索）键—允许在采集的数据中搜索事件。 ·[Navigate]（导航）键—按下该键可导航捕获的数据（时间）、搜索事件或分段存储器采集。
8.	运行控制键	<p>当[Run/Stop]（运行/停止）键是绿色时，表示示波器正在运行，即符合触发条件，正在采集数据。要停止采集数据，请按下[Run/Stop]（运行/停止），使其呈红色。</p> <p>当[Run/Stop]（运行/停止）键是红色时，表示数据采集已停止。要开始采集数据，请按下[Run/Stop]（运行/停止），使其呈绿色。</p> <p>要捕获并显示单次采集（无论示波器是运行还是停止），请按下[Single]（单次）键。[Single]（单次）键是黄色，直到示波器触发为止。</p>


9.	[Default Setup] (默认设置) 键	按下该键可恢复示波器的默认设置。
10.	[Auto Scale] (自动调整) 键	当按下该键时, 示波器将快速确定哪个通道有活动, 并且示波器将打开这些通道并对其进行定标以显示输入信号。
11.	其他波形控制	其他波形控制包括 ·[Math] (数学) 键—可用于访问数学 (加、减) 等波形函数。 ·[Ref] (参考) 键—可用于访问参考波形函数。参考波形是保存的波形, 可显示并与其他模拟通道或数学波形进行比较。 ·[Digital] (数字) 键—按下该键可打开或关闭数字通道 (左侧的箭头将亮起)。 ·[Serial] (串行) 键—此键目前不适用与 2000 X 系列示波器。 ·多路复用定标旋钮—此定标旋钮可用于数学波形、参考波形或数字波形, 不论选择哪个, 左侧的箭头都将亮起。 ·多路复用位置旋钮—此位置旋钮可用于数学波形、参考波形或数字波形, 不论选择哪个, 左侧的箭头都将亮起。
12	测量控制	测量控制包括: ·光标旋钮—按下该旋钮可从弹出菜单中选择光标。然后, 在弹出菜单关闭 (通过超时或再次按下该旋钮) 后, 旋转该旋钮可调整选定的光标位置。 ·[Cursors] (光标) 键—按下该键可打开菜单, 以便选择光标模式和源。 ·[Meas] (测量) 键—按下该键可显示“测量菜单”, 选择“测量源”, 设置“测量类型”。
13.	波形键	使用[Acquire] (采集) 键可选择“正常”、“峰值检测”、“平均”或“高分辨率”采集模式。 使用[Display] (显示) 键可访问菜单, 以便启用余晖、清除显示以及调整显示网格 (格线) 亮度。
14.	文件键	按下[Save/Recall] (保存/调用) 键可保存或调用波形或设置。[打印]键将打开“打印配置菜单”, 以便打印显示的波形。

15.	[Help] (帮助) 键	打开“帮助菜单”，可在其中显示帮助主题概述并选择“语言”。
16.	垂直控制	<p>垂直控制包括：</p> <ul style="list-style-type: none"> ·模拟通道开/关键—使用这些键可打开或关闭通道，或访问软键中的通道菜单。每个模拟通道都有一个通道开/关键。 ·垂直定标旋钮—每个通道都有标记为 \sim 的旋钮，使用这些旋钮可更改显示屏上通道的垂直位置。每个模拟通道都有一个垂直位置控制。 ·[Label] (标签) 键—按下该键可访问“标签菜单”，以便输入标签以标识示波器显示屏上的每条轨迹。
17.	模拟通道输入	将示波器探头或 BNC 电缆连接到这些 BNC 连接器。在 InfiniiVision 2000 X 系列示波器中，模拟通道输入的阻抗为 $1M\Omega$ 。此外，没有自动探头检测，因此必须正确设置探头衰减才能获得准确的测量结果。
18.	演示 2、接地和演示 1 端子	<ul style="list-style-type: none"> ·演示 2 端子—此端子输出探头补偿信号，可帮助您使探头的输入电容与所连接的示波器通道匹配。 ·接地端子—对连接到演示 1 或演示 2 端子的示波器探头使用接地端子。 ·演示 1 端子—利用获得许可的特定功能，示波器可在此端子中输出演示或培训信号。
19.	USB 主机端口	<p>这是用于将 USB 海量存储设备或打印机连接到示波器的端口。连接 USB 兼容的海量存储设备（闪存驱动器、磁盘驱动器等）</p> <p>以保存或调用示波器设置文件和参考波形，或保存数据和屏幕图像。或连接 USB 兼容打印机。还可以使用 USB 端口更新示波器的系统软件。将 USB 海量存储设备从示波器移除之前，无需采取特殊的预防措施（无需“弹出”它），只需在文件操作完成时从示波器中拔出 USB 海量存储设备即可。</p> <p>注意：请勿将主计算机连接到示波器的 USB 主机端口。请使用设备端口。主计算机将示波器视为一台设备，因此，请将主计算机连接到示波器的设备端口（在后面板上）。</p>
20.	数字通道输入	将数字探头电缆连接到此连接器（仅限 MSO 型号）。
21.	波形发生器	在 Gen Out BNC 上输出正弦波、方波、锯齿波、脉冲、DC 或噪声。按下 [Wave Gen] 键可以设置波形。

(二) 示波器显示

示波器显示包含采集的波形、设置信息、测量结果和软键定义，如下图。



状态行	显示屏的顶行包括垂直、水平和触发设置信息。
显示区域	显示区域包括波形采集、通道标识符、模拟触发和接地电平指示器。每个模拟通道的信息以不同的颜色显示。
信息区域	信息区域通常包含采集、模拟通道、自动测量和光标结果。
菜单行	该行通常包含采集、模拟通道、自动测量和光标结果。
软键标签	这些标签描述软键功能。通常，使用这些软键可以设置选定模式或菜单的其他参数。 按下菜单层次结构顶部的  返回/向上键可关闭软键标签，并显示描述通道偏移和其他配置参数的其他状态信息。

(三) 操作指南

1. 访问内置联机帮助和选择用户语言

按住要查看其帮助的键或软键。联机帮助将保留在屏幕上，直到按下其他键或旋转旋钮为止。

2. 选择用户界面和语言

(1) 按下[Help] (帮助)，然后按下[语言] 软键。

(2) 反复按下和释放[语言] 软键或旋转[Entry]旋钮，直到选择所需语言。

可使用以下语言：简体中文、繁体中文、英语、法语、德语、意大利语、日语、韩语、葡萄牙语、俄语、西班牙语。

3. 调用示波器默认设置

按下 [Default Setup] 可恢复示波器的默认设置。由此可知晓示波器的操作条件。主要默认设置有：

水平	正常模式，100 ns/div 定标，0 s 延迟，中心时间参考点。
垂直（模拟）	通道 1 打开，5V/div 定标，DC 耦合，0 V 位置。
触发	边沿触发、自动触发模式、0 V 电平、通道 1 源、DC 耦合、上升沿斜率、40ns 释抑时间。
显示	余辉关闭，20% 网格亮度。
其他	采集模式为正常、对 [Run/Stop]（运行/停止）的选择为 Run（运行）、光标和测量关闭。
标签	在标签库中创建的所有自定义标签都将保存（不擦除），但所有通道标签将被设置为它们的原始名称。

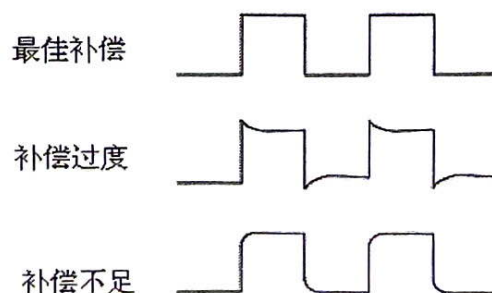
4. 使用自动定标

按下 [Auto Scale]（自动调整）可将示波器自动配置为对输入信号显示最佳效果。

5. 补偿无源探头

必须补偿每个示波器的无源探头，以便与它所连接的示波器通道的输入特征匹配。一个补偿有欠缺的探头可能导致显著的测量误差。

- （1）输入探头补偿信号（探头接演示 2 端子）。
- （2）按下 [Default Setup]（默认设置）调用默认示波器设置。
- （3）按下 [Auto Scale]（自动调整）以自动配置示波器，以便捕获探头补偿信号。
- （4）按下探头所连接的通道键（[1]、[2] 等）。
- （5）在"通道菜单"中，按下探头。
- （6）在"通道探头菜单"中，按下探头检查，然后按照屏幕上的说明操作。如果需要，使用非金属工具（探头附带）调整探头上的微调电容器，以获得尽可能平的脉冲。



- (7) 将探头连接到所有其他示波器通道（4 通道示波器的通道 2、3 和 4）。
- (8) 对每个通道重复执行此程序。

6. 更改水平时间模式（正常、XY 或滚动）

(1) 按下 [Horiz]（水平）键。

(2) 在"水平设置菜单"中，按下时间模式，然后选择：

- 正常 — 示波器的正常查看模式。在"正常时间"模式中，触发前出现的信号事件被绘制在触发点的左侧 (▼)，而触发后的事件被绘制在触发点的右侧。

- XY — XY 模式可将电压-时间显示更改为电压-电压显示。时基被关闭了。通道 1 幅度在 X 轴上绘制，通道 2 幅度在 Y 轴上绘制。您可以使用 XY 模式比较两个信号的频率和相位关系。XY 模式也可用于传感器，显示应力-位移、流量-压力、电压-电流或电压-频率。可使用光标对 XY 模式的波形进行测量。

- 滚动 — 使波形在屏幕上从右至左缓慢移动。只在 50ms/div 或更低的时基设置起作用。如果当前时基设置快于 50ms/div 限制，则在选择"滚动"模式时，它将设置为 50ms/div。在"滚动"模式中无触发。屏幕上的固定参考点是屏幕的右边沿，指的是当前时间。已经出现的事件滚动至参考点的左边。因为没有触发，也就没有可用的前触发信息。如果希望暂停以"滚动"模式显示，请按下 [Single]（单次）键。要清除显示屏并以"滚动"模式重新开始采集，请再次按下 [Single]（单次）键。在低频波形上使用"滚动"模式，将产生如带状图记录仪的显示。它可以滚动显示波形。

(3) XY 时间模式：XY 时间模式使用两个输入通道将示波器从电压-时间显示转化为电压-电压显示。通道 1 是 X 轴输入，通道 2 是 Y 轴输入。可以使用各种传感器，以便显示屏可显示应力-位移、流量-压力、电压-电流或电压-频率。