
东南大学电工电子实验中心

实 验 报 告

课程名称: 电 子 线 路 实 践

第 3 次实验

实验名称: 模拟运算电路和积分及电流电压转换电路

院 (系): 电工电子实验中心 专 业: 电工电子

姓 名: _____ 学 号: _____

实 验 室: 电子技术实验 1 室 实验组别: 1

同组人员: _____ 实验时间: 2007 年 4 月 25 日

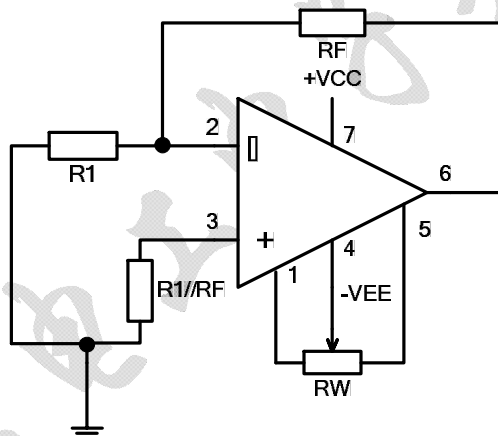
评定成绩: _____ 审阅教师: _____

实验目的和要求:

- ① 了解运算放大器的主要直流参数（输入失调电压、输入偏置电流、输入失调电流、温度漂移、共模抑制比、开环差模电压增益、差模输入电阻、输出电阻等）、交流参数（增益带宽积、转换速率等）和极限参数（最大差模输入电压、最大共模输入电压、最大输出电流、最大电源电压等）的基本概念
- ② 了解运放调零和相位补偿的基本概念。
- ③ 熟练掌握反相比例、同相比例、加法、减法、积分和电压电流转换等电路的设计方法。
- ④ 熟练掌握运算放大电路的故障检查和排除方法，以及输入阻抗、输出阻抗、增益、幅频特性、传输特性曲线的测量方法。

实验原理:

- ① 运放“调零”，是指运放作直流放大器用时，由于输入失调电压和失调电流的影响，当运放的输入为零时，输出不为零，这不仅影响运放的精度，严重时还会造成运放不能正常工作。调零一般是在运放的输入端外加一个补偿电压，抵消运放本身的失调电压，达到调零的目的。有的运放有调零引出端如本实验用到的 741，其调零电路如下图所示，调节电位器 R_W ，可使运放输出电压为零。也有的运放无调零引出端，需要在同相端或反相端接一定的补偿电压来实现。



调零电路图

实验预习思考题:

- ① 器件资料:

查询 741 运放的数据手册

参数名称		参数值	参数意义及设计时应该如何考虑
直流参数	输入失调电压 V_{IO}	1~5 mV ($R_s \leq 10K\Omega$)	理想运放当输入电压为零时，其输出电压也为零，但实际运放当输入电压为零时，其输出端仍有一个偏离零的直流电压，这是由于运放电路参数不对称所引起的。
	输入偏置电流 I_{IB}	10~100 nA	指运放输入级差分对管的基极电流 I_{B1} 、 I_{B2} ，通常由于晶体管参数的分散性， $I_{B1} \neq I_{B2}$ 。输入偏置电流的大小，在电路外接电阻确定之后，主要取决于运放差分输入级的性能，当它的 β 值太小时，将引起偏置电流增加。从使用角度来看，偏置电流愈小，由信号源内阻变化引起的输出电压变化也愈小。

	输入 失调电流 I_{IO}	2~20 nA	输出电压为零时，两输入端静态电流的差值，即 $I_{IO} = I_{B1} - I_{B2}$ 。其典型值为几十至几百纳安。由于信号源内阻的存在， I_{IO} 会引起一输入电压，破坏放大器的平衡，使放大器输出电压不为零。 I_{IO} 愈小愈好，它反映了输入级有效差分对管的不对称程度。
	失调电压温漂 μV_{IO}	$\pm 20 \mu V \cdot ^\circ C^{-1}$	这是指在规定温度范围内 V_{IO} 的温度系数。
	共模抑制比 K_{CMR}	70~90 dB ($R_s \leq 10 k\Omega$)	差模电压增益 A_{VD} 与共模电压增益 A_{VC} 之比。
	开环差模 电压增益 A_{VD}	10^6	集成运放工作在线性区，接入规定的负载，无负反馈情况下的直流差模电压增益。 A_{VD} 与输出电压 V_O 的大小有关。通常是在规定的输出电压幅度（如 $V_O = \pm 10V$ ）测得的值。 A_{VD} 又是频率的函数，频率高于某一数值后， A_{VD} 的数值开始下降。
	输出 电压摆幅 V_{OM}	12~14 V ($R_L = 10 k\Omega$) 10~13 V ($R_L = 2 k\Omega$)	正负输出电压的摆动幅度极限
	差模输入电阻 R_{ID}	0.3~2M Ω	
	输出电阻 R_O	75 Ω	
交流 参 数	增益带宽积 $G.BW$	0.7~1.6 MHz	运放的增益是随信号的频率而变化的，输出电压随信号频率增大而使其下降到最大值的 0.707 倍时的频率范围，称为带宽。增益与带宽的乘积是一个常数。
	转换速率 S_R	0.25~0.5 V/ μs ($R_L \geq 2k\Omega$)	当运放在闭环情况下，其输入端加上大信号（通常为阶跃信号）时，其输出电压波形将呈现一定的时延。其主要原因是运放内部电路中的电容充放电需要一定的时间。 S_R 表示运放在闭环状态下，每 1 μs 时间内输出电压变化的最大值。
极 限 参 数	最大差模 输入电压 V_{IOR}	$\pm 30 V$	反相和同相输入端所能承受的最大电压值。超过这个电压值，运放输入级某一侧的 BJT 将出现发射结的反向击穿，而使运放的性能显著恶化，甚至可能造成永久性损坏。
	最大共模 输入电压 V_{ICR}	$\pm 13 V$	运放所能承受的最大共模输入电压。超过 V_{ICR} 值，它的共模抑制比将显著下降。一般指运放在作电压跟随器时，使输出电压产生 1% 跟随误差的共模输入电压幅值。
	最大输出电流 I_{OS}	10~40 mA	运放最大正向或负向的峰值电流。通常给出输出端短路的电流。
	最大电源电压 V_{SR}	$\pm 22V$	

所有参数来自 SGS_THOMSOM 的 UA741 数据手册（测量条件 $V_{CC} = \pm 15 V$ ）

- ② 对于图 5-1 中所示的反相比例运算电路, 如果电源电压为 $\pm 15\text{V}$, $R_1=10\text{k}\Omega$, $R_F=100\text{k}\Omega$, $R_L=100\text{k}\Omega$, 根据 741 数据手册相关数据估算电压增益、输入阻抗、输出阻抗、最大不失真输出电压范围、下限频率、上限频率。拟定输入阻抗和输出阻抗的测量方案。

答: 反相放大电路为深度电压并联负反馈, 计算可得:

电压增益:

$$\dot{A}_{vf} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = -\frac{R_F}{R_1} = -\frac{100\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega} = -10$$

输入阻抗:

$$R_{iF} = \frac{U_i}{I_i' + I_F} = \frac{U_i}{I_F} = R_1 = 10\text{k}\Omega$$

输出阻抗: $R_{OF} \approx 0$

最大不失真输出电压范围 和运放的最大输出电压摆幅 V_{OM} 有关, 查询数据手册可得, 当电源电压为 $\pm 15\text{V}$ 时, $R_L > 10\text{k}\Omega$, $V_{OM}=12\sim 14\text{V}$, $R_L > 2\text{k}\Omega$, $V_{OM}=10\sim 13\text{V}$, 计算可得 $V_{opp}=2V_{OM}=20\sim 28\text{V}$

下限频率: 由于该电路输入输出为直流耦合, 因此 $f_L \approx 0\text{Hz}$

上限频率: 查询数据手册可得 UA741 的单位增益带宽 (增益带宽积) 为 $0.7\sim 1.6\text{MHz}$, 又知电路增益为 10, 计算可得 f_H 在 $70\sim 160\text{kHz}$ 左右

- ③ 对于 5-3(a) 中的同相比例运算电路, 如果电源电压为 $\pm 15\text{V}$, $R_1=10\text{k}\Omega$, $R_F=100\text{k}\Omega$, $R_L=100\text{k}\Omega$, 根据 741 数据手册相关数据估算电压增益和输入阻抗。

答: 同相比例运算放大电路是电压串联负反馈, 根据 741 数据手册相关数据计算可得:

反馈系数:

$$F_v = \frac{\dot{V}_F}{\dot{V}_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_F} = \frac{10}{10 + 100} = \frac{1}{11}$$

电压增益:

$$\dot{A}_{vf} = \frac{A_{od}}{1 + A_{od}F_v} = \frac{10^6}{1 + 10^6 \times \frac{1}{11}} \approx 11$$

输入电阻:

$$R_{if} = |1 + A_v F_v| R_{ID} = \left| 1 + 10^6 \times \frac{1}{11} \right| \times 2 \times 10^6 \approx \infty$$

输出电阻:

$$R_{of} = \frac{r_o}{1 + A_v F_v} = \frac{1}{1 + 10^6 \times \frac{1}{11}} \approx 0$$

- ④ 根据 24 页实验内容 4 的指标要求（指标要求以本节的选做实验部分修改的为准），设计电路并确定元件参数，同时估算该电路的最大不失真输出电压范围，下限频率、上限频率，并和双电源供电的比例运算电路做一个简单的比较。

答：此时选用同相比比例单电源交流放大电路 $V_{CC}=+15V$ $C_1=C_2=C_3=10\mu F$

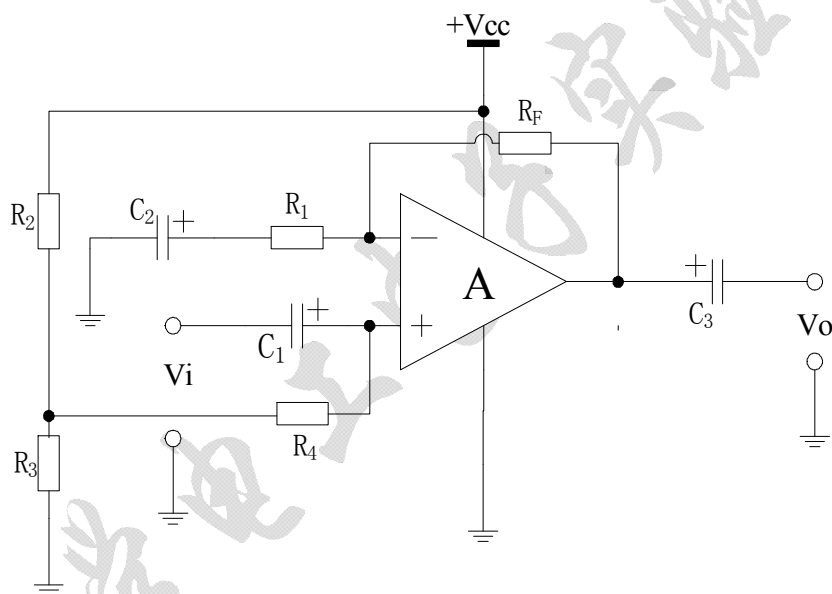
在仅需放大交流信号的应用场合（如音频信号的前置级或激励级），为简化供电电路，常采用单电源供电，以电阻分压方法将同相端偏置在 $1/2V_{CC}$ ，使运放的反相端和输出端的静态电位与同相端相同。交流信号经隔直电容实现传输。其电压放大倍数与双电源的同相比比例运算放大电路一样 $A_{vf}=1+R_F/R_1$

根据要求 $A_{vf}=-4$ ，所以选择 $R_F=40k\Omega$ $R_1=10k\Omega$ $R_2=R_3=10k\Omega$ $R_4=100k\Omega$

$V_{CC}=+15V$ 所以最大不失真电压范围 $V_{OPP}\approx 13V$

- ⑤ 根据 29 页实验内容 1 的指标要求设计电路并确定元件参数。

答：设计过程



- ① 由于输入电阻要求大于 $100k\Omega$ ，因此选择同相比比例放大器，电路如上图所示，其中 $V_{CC}=+15V$
- ② 根据设计要求 $A_{vf} = 5$ 和同相比比例放大器增益计算公式 $A_{vf} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$ ，计算可得： $\frac{R_F}{R_1} = 4$ 取 $R_1=10k\Omega$ ，则 $R_F=40k\Omega$ 。
- ③ 由于是单电源交流放大器，输入电阻要求又大于 $100k\Omega$ ，因此同相端分压偏置电阻的等效电阻要大于 $100k\Omega$ ，分压值要等于 $1/2V_{CC}$ 。取 $R_4=100k\Omega$ ， $R_2=R_3=10k\Omega$ 可满足要求。
- ④ 根据设计要求 $f_L \leq 10Hz$

对于 C_1 构成的高通回路， $f_{LC1} = \frac{1}{2\pi(R_4 + R_2 // R_3)C_1} \leq 10$ ，计算可得： $C_1 \geq 0.15\mu F$

对于 C_2 构成的高通回路， $f_{LC2} = \frac{1}{2\pi R_1 C_2} \leq 10$ ，计算可得： $C_1 \geq 1.59\mu F$

对于 C_3 构成的高通回路， $f_{LC2} = \frac{1}{2\pi R_L C_3} \leq 10$ ， R_L 取 $1k$ 计算可得： $C_1 \geq 15.9\mu F$

⑤ 考虑余量和同相端和反相端的平衡, 取 $C_1=C_2=10\mu\text{F}$, $C_3=47\mu\text{F}$

⑥ 根据设计要求 $f_H \geq 100\text{KHz}$, 上限频率要考虑受增益带宽积和转换速率的影响。在本设计中增益为 5, 因此运放器件的增益带宽积要 $>500\text{KHz}$ 。因为输入信号 $\leq 1\text{V}$, 所以输出信号 $\leq 5\text{V}$, 代入转换速率计算公式, 满足要求的运算放大器转换速率要 $>3.14\text{V}/\mu\text{S}$ 。通过比较, 设计中的运算放大器选择 LF356, 其增益带宽积为 5MHz , 转换速率为 $12\text{V}/\mu\text{S}$ 完全满足设计的需要。

设计中各元件的参数:

运算放大器 LF356, $R_1=10\text{k}\Omega$, $R_F=40\text{k}\Omega$, $R_4=100\text{k}\Omega$, $R_2=R_3=10\text{k}\Omega$, $C_1=C_2=10\mu\text{F}$, $C_3=47\mu\text{F}$

⑥ 在积分器实验中, 若信号源提供不出平均值为零的方波, 能否通过耦合电容隔直流? 若能的话, 电容量怎样取?

答: 可以, 电容应该取得尽量大一些, 使 $1/2\pi R_i C \ll$ 方波信号频率。

⑦ 对于 29 页实验内容 2 试根据数据手册中的相关参数计算

(I) 当 $R_1=1\text{k}\Omega$, R_L 分别为 $1\text{k}\Omega$ 和 $10\text{k}\Omega$ 时最大允许输出电流值为多少

(II) 当 $R_1=100\Omega$, R_L 分别为 100Ω 和 $1\text{k}\Omega$ 时最大允许输出电流值为多少

(III) 当 $R_1=1\text{k}\Omega$, R_L 为 $1\text{k}\Omega$, 输入电压 V_i 为 0.5V 、 1V 和 3V 时, 计算负载电阻 R_L 的取值范围。

答: 根据电路计算可得

$$I_L = \frac{V_i}{R_1} \quad V_O = I_L (R_L + R_1) \leq V_{OM}$$

根据运放使用要求: $I_L \leq I_{OM}$

$$\text{推导可得 } I_L \leq \frac{V_{OM}}{(R_L + R_1)}$$

$$(I) \quad R_L = 1\text{k}\Omega \quad I_L \leq \frac{14\text{V}}{1\text{k}\Omega + 1\text{k}\Omega} = 7\text{mA} \quad R_L = 10\text{k}\Omega \quad I_L \leq \frac{14\text{V}}{10\text{k}\Omega + 1\text{k}\Omega} = 1.27\text{mA}$$

$$(II) \quad R_L = 100\Omega \quad I_L \leq \frac{14\text{V}}{100\Omega + 100\Omega} = 70\text{mA} \quad R_L = 1\text{k}\Omega \quad I_L \leq \frac{14\text{V}}{1\text{k}\Omega + 100\Omega} = 12.7\text{mA}$$

$$(III) \text{ 根据运放使用要求: } \frac{V_i}{R_1} (R_L + R_1) \leq V_{OM}$$

$$\text{推导可得 } R_L \leq \frac{R_1 \cdot V_{OM} - V_i \cdot R_1}{V_i}$$

$$\text{计算可得: } V_i = 0.5\text{V} \text{ 时 } R_L \leq 27\text{k}\Omega$$

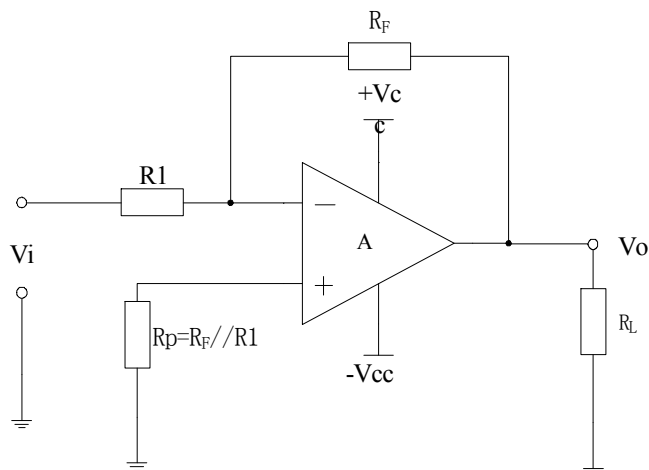
$$V_i = 1\text{V} \text{ 时 } R_L \leq 13\text{k}\Omega$$

$$V_i = 3\text{V} \text{ 时 } R_L \leq 3.7\text{k}\Omega$$

实验内容:

① 反相输入比例运算电路

(I) 按图连接电路, 其中电源电压为 $\pm 15\text{V}$, $R_1=10\text{ k}\Omega$, $R_F=100\text{ k}\Omega$, $R_L=100\text{ k}\Omega$, $R_p=10\text{ k}\Omega//100\text{ k}\Omega$



(II) 输入端接地, 用万用表测量并记录输出端电压值, 此时测出失调电压 0.016 V

分析: 失调电压是直流电压, 将会直接影响直流放大器的放大精度。

(III) 直流信号测量

V_i/V	V_o/V	A_{vf}	
		测量值	理论值
-2	14.25	-7.125	-10
-0.5	4.98	-9.96	-10
0.5	-5.02	-10.04	-10
2	-12.87	-6.435	-10

实验结果分析:

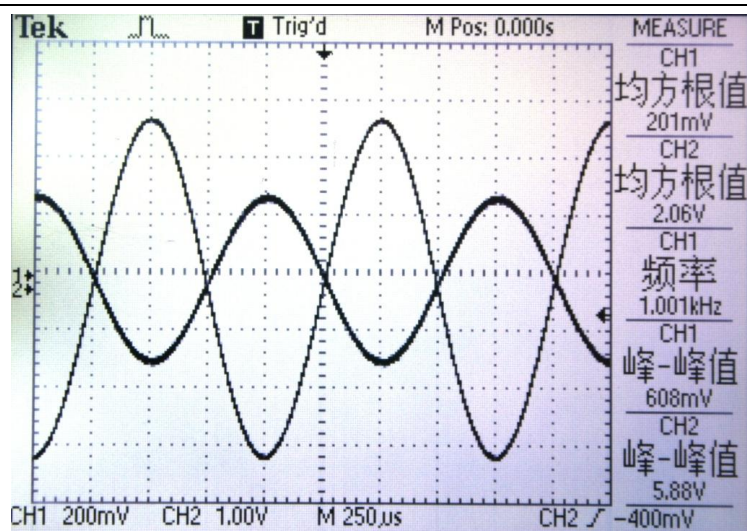
运算放大器的输出电压摆幅受器件特性的限制, 当输入直流信号较大时, 经过运放放大后的输出电压如果超过 V_{OM} , 则只能输出 V_{OM} 的值。根据数据手册可知, $V_{CC}=\pm 15\text{V}$ 时, 输出电压摆幅 $V_{OM}\approx\pm 13\text{V}\sim\pm 14\text{V}$, 因此在本电路中最大的输出电压也在 $\pm 13\text{V}\sim\pm 14\text{V}$ 。实验中测得数据和理论值基本相符。

(IV) V_i 输入 0.2V 、 1kHz 的正弦交流信号, 在双踪示波器上观察并记录输入输出波形, 在输出不失真的情况下测量交流电压增益, 并和理论值相比较。

交流反相放大电路实验测量数据

输入信号有效值 (V)	输出信号有效值 (V)	信号频率	电压增益
0.2	2.06	1000	-10.03

实验中测得的波形如上图所示, 其中, CH1 为输入信号, CH2 为输出信号。从图中可看出输入输出信号的相位相差 180° , 这符合反相放大器的理论特性。



(V) 自拟实验方案测量电路的输入输出电阻值。

输入电阻：根据理论分析，反比例放大器的输入电阻 $R_i \approx 10K\Omega$ ，因此可在输入电路之前接入一个同数量级的电阻 R_s ，通过测量 R_s 前后的电压换算测得输入电阻，此处取 $10k\Omega$ ，测量数据如下：

电阻 R_s	输入信号 V_s (V)	输入信号 V_i (V)	输入电阻
$10k\Omega$	0.1	0.049	$9.607K$

测量结果和理论分析符合

输出电阻：输出电阻的常规测量方法是通过测量在输出端接入和不接入同数量级的电阻时的输出电压换算测得。但在本电路中，根据理论分析，反比例放大器的输出电阻约为 0，且运算放大器的最大输出电流为 25mA，因此很难采用上述测量方法进行测量。

(VI) 设定输入信号频率为 1kHz，增加输入信号的幅度，测量最大不失真输出电压值，并和电源电压值进行比较。实验结果参看表 2

(VII) 将 (VI) 的电路中的 R_L 改为 200Ω ，再测量最大不失真输出电压，并和前面的数据进行比较，分析数据不同的原因。实验结果参看表 2

(VIII) 将 (VII) 的电路改成下图所示，这样可以通过三极管实现扩流，将输出电流由运放的 25mA 增加到 500mA，重复 (VI) 的实验，并对实验数据进行比较和分析。实验结果参看表 2

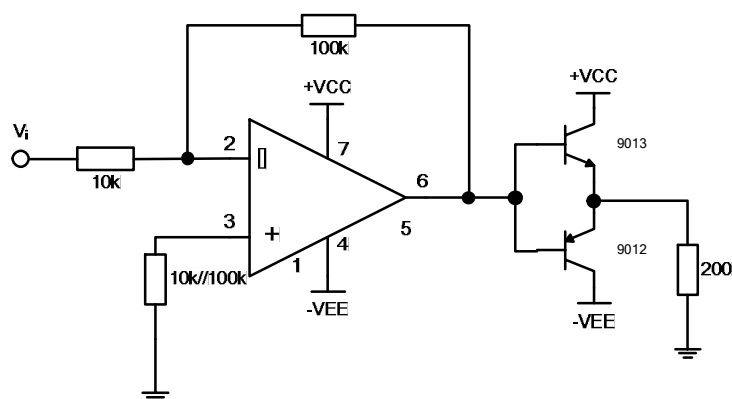


表 2 不同负载条件下最大不失真电压

负载	$R_L=100K\Omega$	$R_L=200\Omega$	
		无扩流	有扩流
正电源电压 (V)	15	15	15
正最大不失真输出电压 (V)	14	3.96	13.4
负电源电压 (V)	15	15	15
负最大不失真输出电压 (V)	14	3.96	13.4

实验结果分析:

- ✧ 电源电压 $\pm 15V$ 时, 741 的最大输出摆幅范围为 $\pm 13V \sim \pm 14V$ 。
- ✧ $R_L=100K\Omega$ 时, 最大失真输出电压在运算放大器的最大输出摆幅范围内。
- ✧ $R_L=200\Omega$ 时, 最大不失真输出电压远小于运算放大器理论的最大输出摆幅, 这是因为当负载比较小的时候, 输出电压受运算放大器的最大输出电流影响。查询手册可知 741 运算放大器的最大输出电流为 $\pm 25mA$, 因此当负载为 200Ω 时, 负载上最大可能电压为 $\pm 0.025 \times 200 = \pm 5V$, 实测结果和这个分析基本相符。
- ✧ 在三极管扩流电路中, 三极管起到了一个开关的作用, 当运算放大器输出为正电压时, 9013 饱和导通, 9012 反相截止, 因此输出电压为 $(V_{CC} - \text{三极管的饱和压降})$, 当运算放大器输出为负电压时, 9012 饱和导通, 9013 反相截止, 输出电压为 $(-V_{CC} - \text{三极管的饱和压降})$ 。
- ✧ 三极管扩流后的输出波形在 0 电压上下有明显的失真, 这是因为三极管的没有基极偏置电路, 输入信号在 $-0.6 \sim 0.6V$ 之间两个三极管都不导通, 引起了失真, 这种失真叫做交越失真。可以通过基极偏置电路, 为 V_{BE} 提供一个偏置电压来解决这个问题。

(IX) 保持 $V_i=0.1V$ 不变, 改变输入信号的频率, 在输出不失真的情况下, 测出上限频率 f_H 并记录此时的输入输出波形, 测量两者的相位差, 并做简单分析。

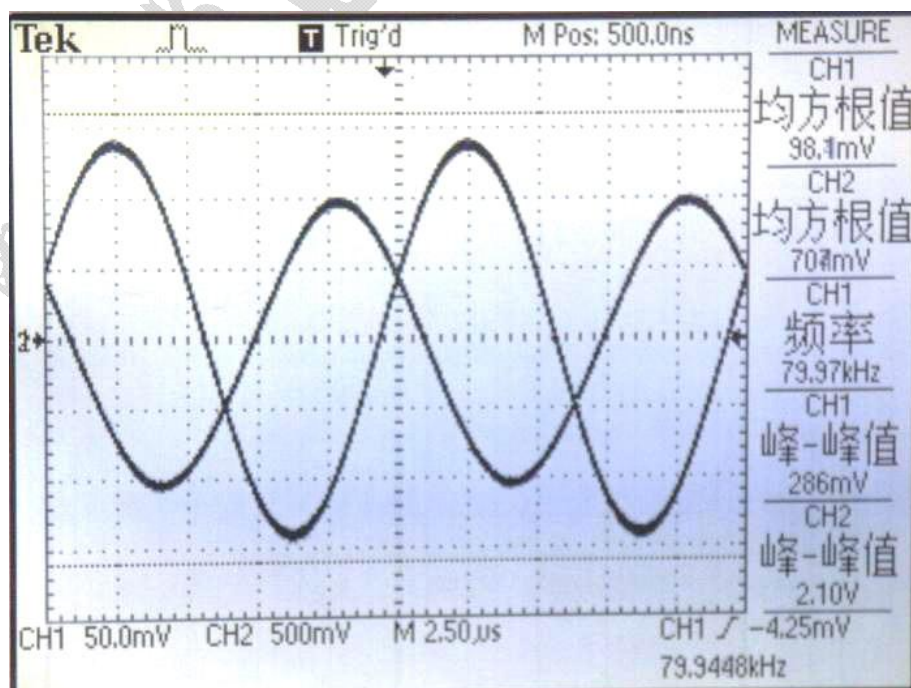


表 4 上限频率测量

上限频率 f_H (KHz)	相位差		
	$t(\mu s)$	$T(\mu s)$	$\Phi=t/T \times 360^\circ$
80	8	12.5	230.4° 滞后

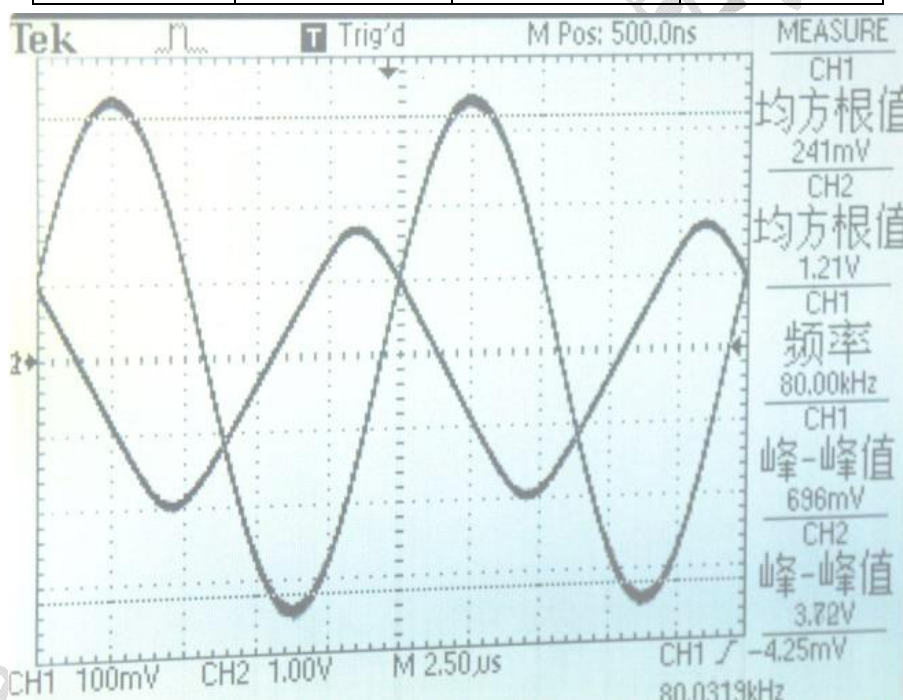
实验结果分析:

✧ 放大电路上限频率和增益的乘积为固定值, UA741 理论值为 $0.7 \sim 1.6 \text{ MHz}$, 测量结果与之相符合

✧ 当信号频率为上限频率时, 除了增益下降外, 输入输出信号的相位也会有所变化。

(X) 将输入正弦交流信号频率调到前面测得的 f_H , 逐步增加输入信号幅度, 观察输出波形, 直到输出波形变形 (看起来象三角波), 记录该点的输入、输出电压值, 根据转换速率的定义对此进行计算和分析, 并和手册上的转换速率值进行比较。

频率	输入信号 V_{iPP}	输出信号 V_{OPP}	dV_O/dt
80KHz	0.696 V	3.72 V	$0.595 \text{ V}/\mu s$



实验结果分析:

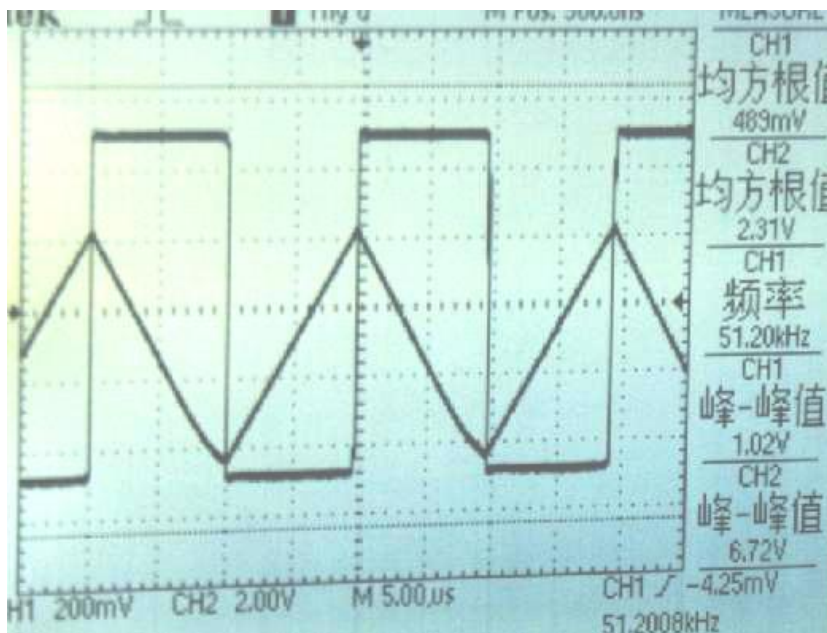
✧ 输出信号电压对时间求导, 可得电压变换率, 也就是转换速率, 在本实验中由于输出信号为三角波, 因此只要计算输出波形斜率即可。741 数据手册提供的转换速率为 $0.5 \text{ V}/\mu s$, 实验中测量结果为 $0.595 \text{ V}/\mu s$, 两者基本相符。

✧ 运算放大器应用中, 当信号频率较高, 输出信号幅度较大时必须考虑转换速率的影响。

(XI) 输入信号改为占空比为 50% 的双极性方波信号, 调整信号频率和幅度, 直至输出波形正好变成三角波, 记录该点输出电压和频率值, 根据转换速率的定义对此进行计算和分析。

输入方波信号, 当输出波形正好变为三角波时

频率	输入信号 V_{iPP}	输出信号 V_{OPP}	dV_O/dt
51.2KHz	1.02V	6.72V	0.656 V/ μ s



实验结果分析:

- ◇ 输出信号电压对时间求导, 可得电压变换率, 也就是转换速率, 在本实验中由于输出信号为三角波, 因此只要计算输出波形斜率即可。741 数据手册提供的转换速率为 0.5 V/ μ s, 实验中测量结果为 0.656 V/ μ s。
- ◇ 运算放大器应用中, 当信号频率较高, 输出信号幅度较大时必须考虑转换速率的影响。

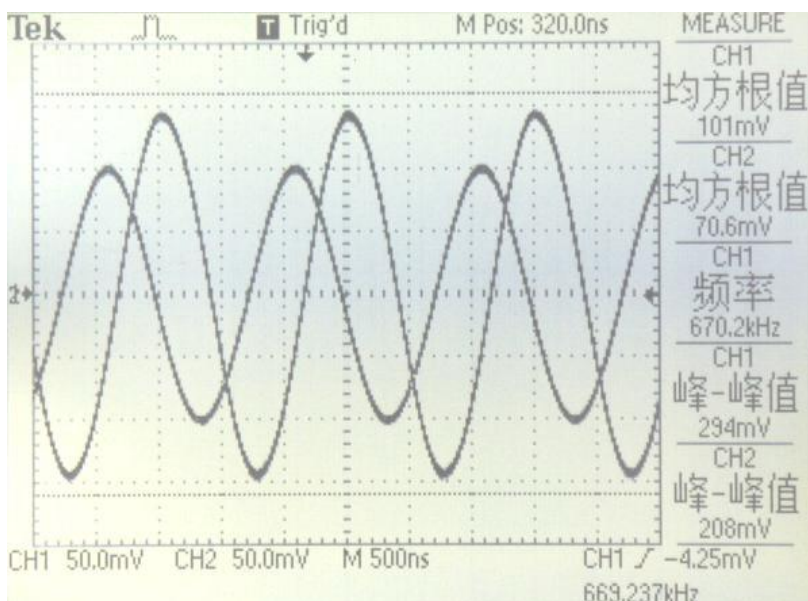
(XII) R_F 改为 10 k Ω , 自己计算 R_P 的阻值, 重复 (I) (III) (VIII)。列表比较前后两组数据的差别, 从反相比例放大器增益计算、增益带宽积等角度对之进行分析。并总结在高频应用中该如何综合考虑增益带宽积和转换速率对电路性能的影响。

重复 (III): 此时 $R_P=R_1//R_F=10\text{ k}\Omega//10\text{ k}\Omega$,

V_i/V	V_o/V	A_{vf}	
		测量值	理论值
-2	2.01	-1.005	-1
-0.5	0.49	-0.99	-1
0.5	-0.50	-1	-1
2	-2.02	-1.01	-1

重复 (IX): 保持 $V_i=0.1V$ 不变, 改变输入信号的频率, 在输出不失真的情况下, 测出上限频率 f_H 并记录此时的输入输出波形, 测量两者的相位差, 并做简单分析。

上限频率 f_H (KHz)	相位差		
	t(μ s)	T(μ s)	$\Phi=t/T \times 360^\circ$
670.2	1.1	1.5	264° (滞后)



实验结果分析:

- ◇ 交流电压增益: $R_F=100K$ 时增益为 10, $R_F=10K$ 时增益为 1 这和理论计算结果相符
- ◇ 增益和带宽成反比, 增益越大, 带宽越小
- ◇ 在高频应用中, 首先要根据设计中的增益和上限频率的要求计算出增益带宽积要求, 然后根据输出电压的幅度和上限频率的要求计算转换速率。

(XIII) 单电源

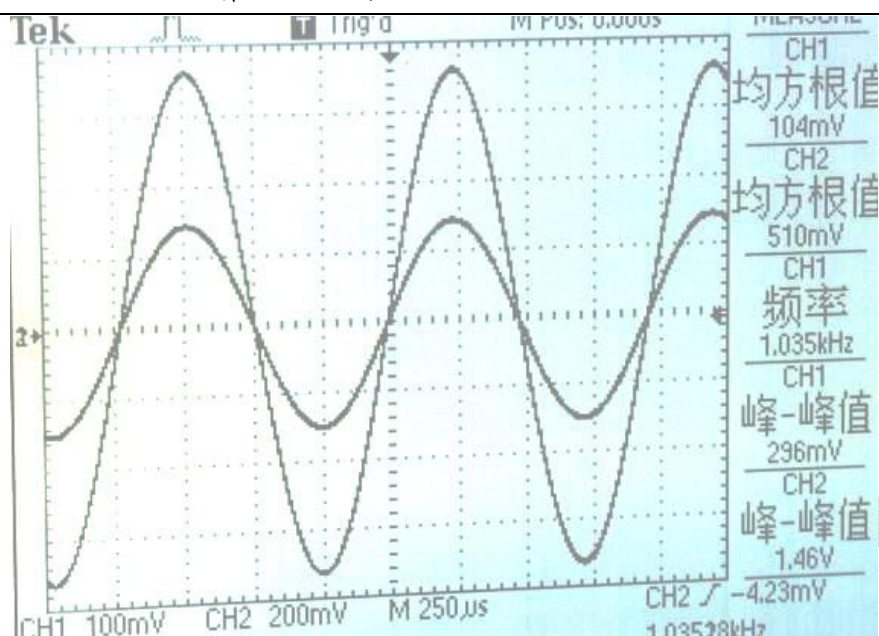
设计一个单电源交流放大器, 输入电压 $\leq 1V$, $A_{vf}=5$, $f_L \leq 10Hz$, $f_H \geq 100kHz$, 输入电阻大于 $100k\Omega$, 输出电阻小于 100Ω 。

① 测量并记录 V_+ 、 V_- 、 V_o 的值。

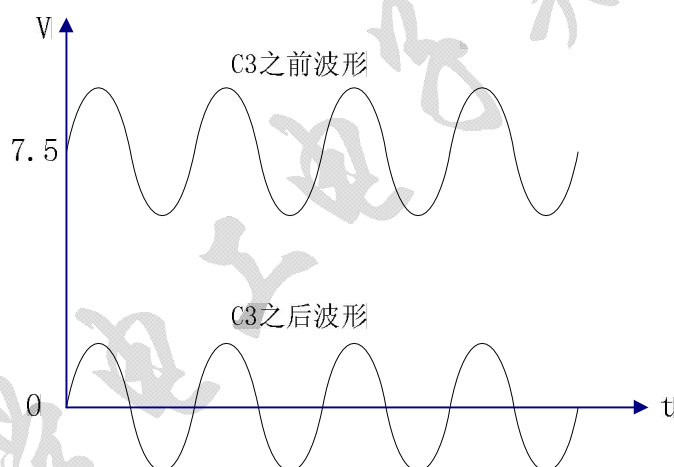
V_+	V_-	V_o
7.47V	7.5V	7.51V

② 在输入端加入 0.1V、1kHz 的正弦交流信号, 观察并记录输入输出波形, 测量 V_o 值, 计算 A_{vf} 。

V_i	V_o	A_{vf}
0.104V	0.51V	5.1



③ 用示波器观察 C3 两端波形（示波器输入耦合方式置于“DC”档），分析直流分量。



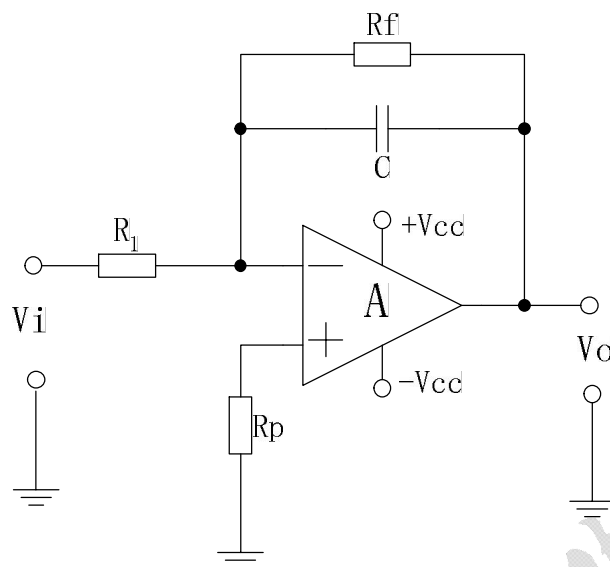
由上图可以看出，在经过 C3 电容隔直之前，波形中含有一个 7.5V 的直流分量，经过电容之后就只有交流分量了。

④ 测量输入输出电阻、上限频率、下限频率。

下限频率	上限频率	带宽
2Hz	147KHz	147KHz

(XIV) 积分电路

试用 $\mu A741$ 设计一个满足下列要求的基本积分电路: 输入为 $V_{ipp}=1V$ 、 $f=10kHz$ 的方波(占空比为 50%)。设计 R、C 值，测量积分输出电压波形；改变 f 值观察 V_o 波形变化，并找出当 f 接近什么值的时候，电路近似一个反比例运算电路。



积分电路图

设计基础:

$$\text{输出电压} \quad V_o = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_i dt$$

当 $f \ll f_c$ 时, 电路近似为一反比例运算电路, 其电压增益为 $-R_f/R$

当 $f \gg f_c$ 时, 电路起积分器作用。

为使由输入偏置电流引起的输出失调减至最小, 应取 $R_p = R_1 // R_f$ 。

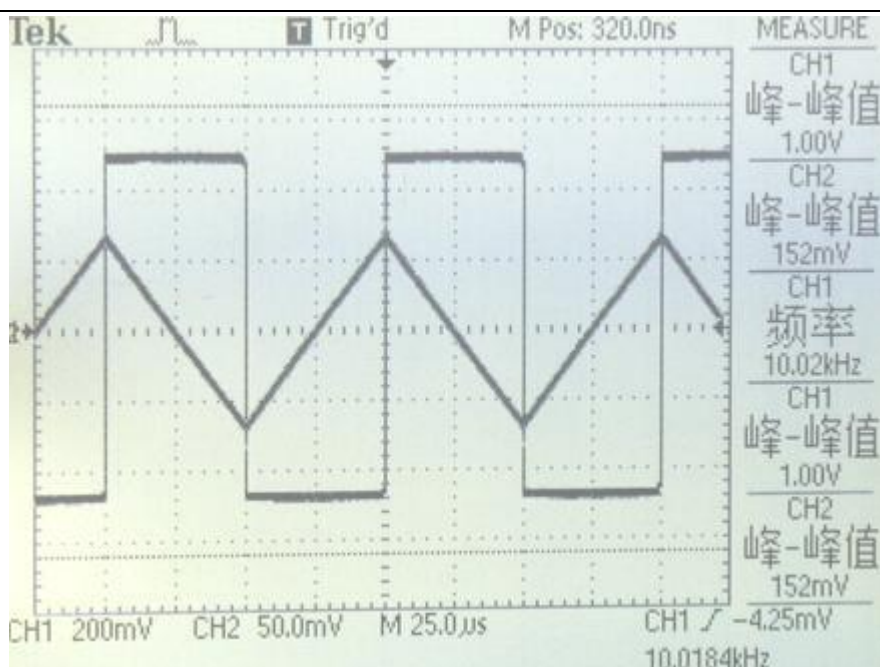
元件参数计算:

- ① 当 $f \gg f_c$ 时, 电路起积分器作用, 工程估算中取 $f > 10f_c$, $f = 10\text{kHz}$, 则 $f_c < 1\text{kHz}$
- ② $f_c = \frac{1}{2\pi R_1 C}$, RC 取值时, R_1 值取大有利于提高输入电阻, 但 R_1 值加大必使 C 值减小, 会加剧积分漂移。 R_1 值取的太小, C 值必须加大, 会有漏电和体积方面的问题, 因此在工程中一般取 $C \leq 1\mu\text{F}$, 在本设计中 C 取 $0.01\mu\text{F}$
- ③ 将 $f_c < 1\text{kHz}$, $C = 0.01\mu\text{F}$ 代入 $f_c = \frac{1}{2\pi R_1 C}$ 中计算可得 $R_1 > 15.92\text{k}\Omega$, 取 $R_1 = 20\text{k}\Omega$ 。
- ④ 设计中各元件参数: $C = 0.01\mu\text{F}$, $R_1 = 20\text{k}\Omega$, $R_f = 100\text{k}\Omega$, $R_p = R_1 // R_f$,
- ⑤ 根据元件参数计算可得 $f_c = 796\text{Hz}$ 。

设计验证:

- ① 输入为 $V_{ipp} = 1\text{V}$ 、 $f = 10\text{kHz}$ 的方波 (占空比为 50%), 用示波器观察输入输出波形, 记录如下:

输入信号		输出信号	
峰峰值	频率	峰峰值	频率
1V	10kHz	152mV	10kHz



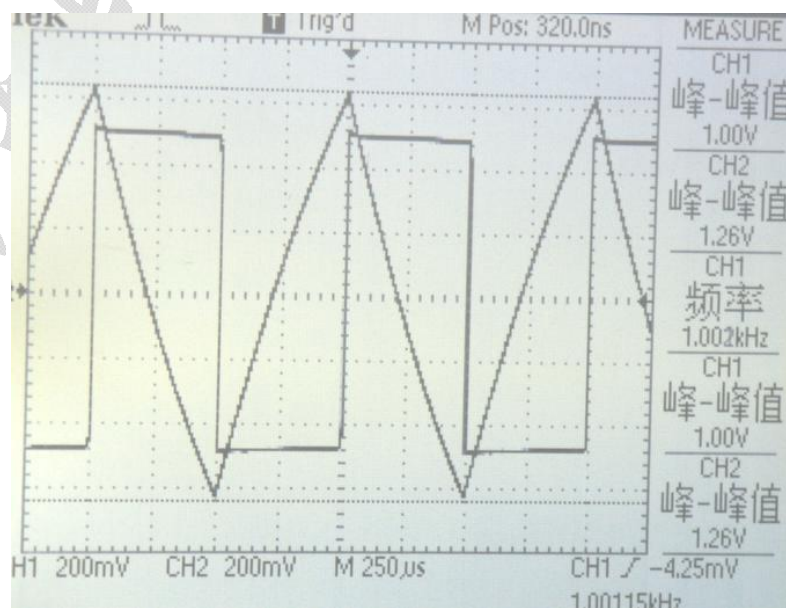
实验结果分析：

✧ 根据积分电路电压计算公式： $V_o = -\frac{1}{RC} \int V_i dt$

$$\diamond V_{o1} = -\frac{2}{RC} \int_0^{\frac{1}{2}} V_i dt = -\frac{2}{20 \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6}} \times 0.5 \times 0.05 \times 10^{-3} = 0.25V$$

② 输入为 $V_{ipp}=1V$ 、 $f=1kHz$ 的方波（占空比为 50%），用示波器观察输入输出波形，记录如下：

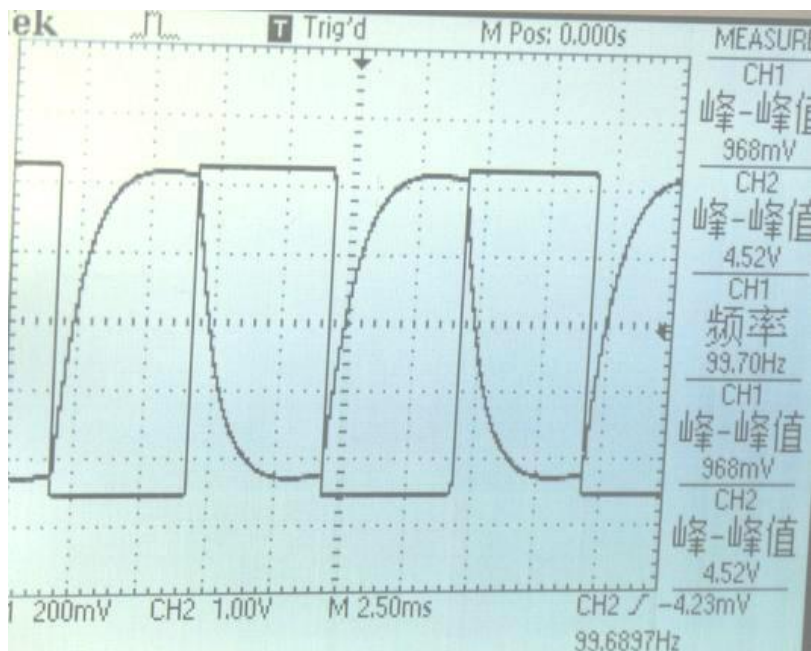
输入信号		输出信号	
峰峰值	频率	峰峰值	频率
1V	10kHz	1.26V	10kHz



实验结果分析：

✧ 由于输入信号频率接近 f_c ，此输出波形和电容充放电特性相符合。

③ 输入为 $V_{ipp}=1V$ 、 $f=100Hz$ 的方波（占空比为 50%），用示波器观察输入输出波形，记录如下：



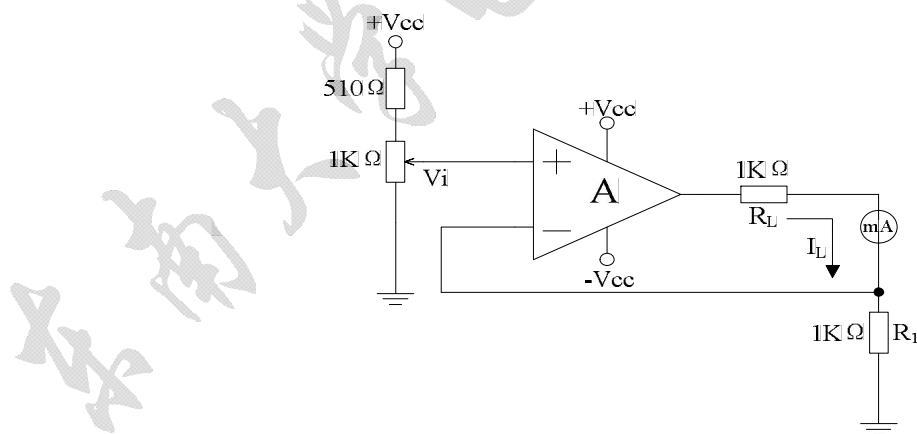
输入信号		输出信号	
峰峰值	频率	峰峰值	频率
0.968V	10kHz	4.52V	10kHz

实验结果分析：

✧ 由于输入信号频率接近 f_c ，此时电路近似反比例放大器。

(XV) 电压电流转换电路

(1) 用 $\mu A741$ 组成一个同相型电压/电流转换电路，完成表中所列数据的测量



电压/电流转换电路

其中 $V_{cc}=\pm 15V$ ，表中要求测量 I_L 的值，考虑接电流表的不便，改为测 R_1 的电压，用 R_1 上测得的电压值除以 R_1 就是 I_L 的值

V_i	R_L	I_L (测量值)	I_L (计算值)
0.53	1KΩ	0.56	0.53
	10 KΩ	0.55	

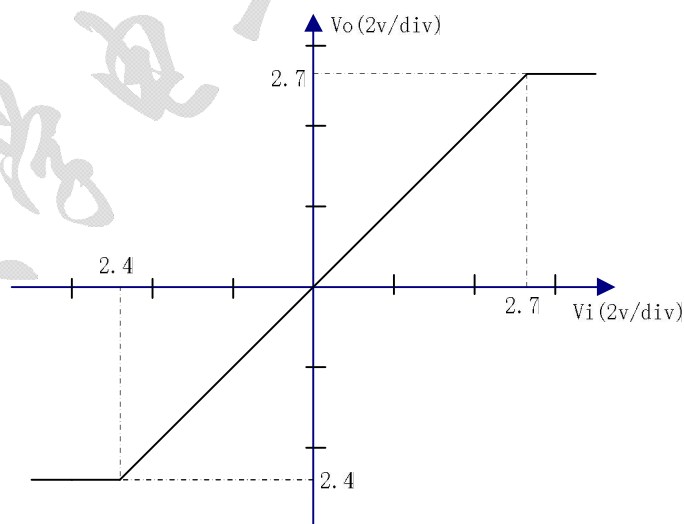
	20 K Ω	0.53	
	27 K Ω	0.40	
	33 K Ω	0.33	
1.03	470 Ω	1.05	1.03
	1K Ω	1.05	
	3 K Ω	1.05	
	4.7 K Ω	1.05	
	10 K Ω	1.05	
	12 K Ω	0.85	
3.00	470 Ω	3.02	3.00
	1 K Ω	3.02	
	3 K Ω	2.75	
	4 K Ω	2.20	

实验结果分析：

根据预习思考题 7 中的第三个小问题可知， $V_i = 0.5V$ 时 $R_L \leq 27k\Omega$ $V_i = 1V$ 时 $R_L \leq 13k\Omega$ $V_i = 3V$ 时 $R_L \leq 3.7k\Omega$ ，表中实测数据与理论值相符。

(2) 用示波器 X-Y 方式，测量电路的传输特性曲线，计算传输特性曲线的斜率和转折点的值。

此时 V_i 从接入直流电压改为用函数发生器输入正弦交流信号， $f=500Hz$ ，电压值以看到转折点为界，此处选取 $V_{ipp} > 15V$ 。



由图可算出，传输特性曲线的斜率=1。

注：此时 $V_{cc} = \pm 12V$

实验思考题：

a) 理想运放有哪些特点？

答：(1) 开环电压放大倍数 A_O 接近无穷大；(2) 开环输入电阻 R_i 接近无穷大；

- (3) 开环输出电阻 R_o 趋近于 0;
- (4) 共模抑制比 K_{CMR} 接近无穷大
- (5) 虚短、虚断输出电压不受负载大小的影响;
- (6) 通频带趋近无穷大;
- (7) 失调及温漂趋近于 0;
- (8) 转换速率 S 趋近无穷大;

b) 单电源运放用来放大交流信号时, 电路结构上应满足哪些要求? 若改用单一负电源供电, 电路应做何改动?

答: 单电源运放用来放大交流信号时, 应在运放的同相输入端加直流偏置电路, 在输入、输出端添加隔直电容, 这时运放的输入、输出端直流电位相等。

改为单一负电源供电时, 电解电容应反接, 4 脚接负电源, 7 脚接地, 须添加的直流偏置电路相同。

c) 运放用作模拟运算电路时, “虚短”“虚断”能永远满足吗? 试问, 在什么条件下“虚短”“虚断”将不再存在?

答: 当运放工作在线性区时, 存在“虚短”“虚断”;

当运放工作在非线性区时, “虚断”存在, “虚短”不存在。

电流、电压转换电路思考题

1、在图 6-1 所示基本积分电路中, 为了减小积分误差, 对运放的开环增益、输入电阻、输入偏置电流及输入失调电流有什么要求?

答: 应选用开环增益大、输入电阻大、输入偏置电流小 (这样信号源内阻变化小) 及输入失调电流小的运放 (反映输入级差差分对管的不对称程度)。

2、根据什么来判断图 6-1 电路属于积分电路还是反相比例运算电路?

答: 根据输入信号频率 f 与固有频率 f_c 的比较

$f_c = 1/2\pi R_f C$ $f \gg 10f_c$ 时为积分电路; $f \leq 0.1f_c$ 时为反相比例运算电路。

3、在图 6-9 所示电压/电流转换电路中, 设 $V_{om}=6V$, 且 $V_i=1V$, $R_1=1k\Omega$, 试求满足线性转换所允许的 R_{Lmax} 小于等于多少?

答: 设 $V_{om} \approx V_{cc}=6V$, 且 $V_i=1V$, $R_1=1K\Omega$, 则 $I_L (R_L=R_1) \leq V_{om}$, 将数据代入公式得 $R_{Lmax} \leq 5k\Omega$ 。