

注：周一下午 5、6 节

实验 1.6 运算放大电路及其信号处理电路的分析

实验目的：

通过本实验，了解运算放大器参数及特性，掌握信号处理电路原理及其设计方法。

实验原理：

1、运算放大器的特性及各参数的测量

运算放大器是应用广泛的集成电器，外接适当的反馈网络可组成各种类型的信号处理电路。

运算放大器的主要参数有开环电压增益 A_d ，共模抑制比 $CMRR$ ，输入阻抗 R_i 、输出阻抗 R_o ，上下截止频率 f_H 、 f_L ，以及单位增益带宽 f_c 。

理想运放的开环电压增益 A_d ，共模抑制比 $CMRR$ ，输入阻抗 R_i 以及上截止频率 f_H ，单位增益带宽 f_c 均为 ∞ ，而输出阻抗 R_o ，下截止频率 f_L 均为 0。

实验中运算放大器各参数测量方法如下：

① A_d 、 f_H 、 f_c 的测量

开环电压增益

$$A_d = \frac{V_o}{V_i} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \frac{V_o}{V_1}$$

f_H ：当 A_d 下降为中频增益的 $1/\sqrt{2}$ 时的输入信号的频率

f_c ：当 A_d 下降为 1 是输入信号的频率

② $CMRR$ 的测量

差模信号增益 $A_d \approx R_2/R_1$

共模信号增益 $A_c = V_o/V_i$

共模抑制比

$$CMRR = 20 \lg \left| \frac{A_d}{A_c} \right| = 20 \lg \left| \frac{R_2}{R_1} \frac{V_i}{V_o} \right|$$

③ ΔV_o 、 Δt 的测量

$$\text{转移速率 } SR = \left| \frac{\Delta V_o}{\Delta t} \right|$$

ΔV_o ：输出电压由 10%峰峰值至 90%峰峰值的电压差

Δt ：输出电压由 10%峰峰值至 90%峰峰值的时间差

2、信号处理电路

加法运算电路

$$V_o(t) = -\left(\frac{R_f}{R_1} V_{i1}(t) + \frac{R_f}{R_2} V_{i2}(t)\right)$$

积分运算电路

$$V_o(t) = V_o(0) - \frac{1}{RC} \int_0^t V_i(\tau) d\tau$$

微分运算电路

$$V_o(t) = -RC \frac{d}{dt} V_i(t)$$

3、有源滤波器

滤波器是一种频率选择系统，其频率响应只在特定的某段频率范围内具有较大的值，对于其他频率的信号有衰减作用。滤波器按功能可分为低通、高通、带通、带阻。根据组成元件可分为无源滤波器（含电容、电感等无源元件）和有源滤波器（含晶体管、运算放大器等有源器件）。

有源滤波器的优点是通带内有增益，对信号有放大作用，带负载能力强；缺点是不适合高频，高电压，大电流情况。

4、有源滤波器的设计（设计参数为截止频率 f_c 、阻带衰减斜率（dB/10 f_c ）电路增益）

1) 根据阻带衰减斜率确定电路的阶数 N (N 为奇数，则由一个一阶系统和 $(N-1)/2$ 个二阶系统组成； N 为偶数，则由 $N/2$ 个二阶系统构成；2) 根据截止频率 f_c 选定电容数值 C ；3) 根据增益 A 和截止频率以及选定的电容 C ，确定电路中 R 的值。

实验方法：

1、运算放大器特性分析

(1) 运算放大器开环增益与带宽测量：信号源：VAC (0Vdc, 1Vac)。仿真设置：AC Sweep/Noise: Logarithmic (Decade), Start (0.001Hz), End (100kHz), point/Decade (100)

(2) 运算放大器共模抑制比测量信号源：信号源：正弦电压 VSIN VOFF=0V VAMPL=1V, FREQ=100Hz。仿真设置：Time Domain (Transient): Run to 50ms Starting saving data (0ms), Maximum step (0.05ms)

(3) 运算放大器转移速率测量：信号源：VPULSE (V1=0V, V2=1V, TD=TR=TF=0us, PW=5us, PER=10us)。仿真设置：Time Domain (Transient): Run to (100us), Starting saving data (0us), Maximum step (0.1us)

2、加法运算电路分析：信号源：VDC (Vi1=0.5Vdc, Vi2=0.25Vdc)。仿真设置：DC Sweep: Analysis type (DC Sweep), Option (Primary Sweep), Sweep Variable Voltage source Name (Vi1), Sweep type (Linear) Start (-2V) End (1.5V) Increment 0.5V。

3、积分与微分电路瞬态分析：信号源: VPULSE (V1=-0.5V V2=0.5V TD=TR=TF=0us

PW=1ms,PER=2ms)。仿真设置：Time Domain(Transient):Run to(10ms),Starting saving data(0ms),Maximum step(0.01ms)

实验数据记录：

1、 运算放大器特性分析

交流 分析	开环增益			-3dB 带宽			增益带宽乘积	
	V _o /V ₁	A _d (10 ⁵)	A _d (dB)	f _H (Hz)			A _d • f _H (MHz)	
	198.82	12.13	121.68	5.0279			6.1	
瞬态 分析	共模抑制比			转移速率			不失真幅度	
	V _{ipp} (V)	V _{opp} (mV)	CMRR (dB)	△V _o (V)	△t (us)	SR (V/us)	f (kHz)	V _{opp} (V)
	2	62.82	90.05	0.814	1.666	0.489	20	8.597

2、 加运算电路直流扫描分析

$V_{i1}(V)$	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0	1.5
$V_{i2}(V)$	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
理论 $V_o(V)$	-17.5	-12.5	-7.5	-2.5	2.5	7.5	12.5	17.5
测量 $V_o(V)$	-11.82	-11.82	-7.500	-2.500	2.499	7.499	11.816	11.826

3、 积分与微分运算电路瞬态分析

积分 运算 电路	$R_1(k\Omega)$	100	10	10	1000000
	$R(\Omega)$	110	510	510	510
	$V_{opp}(V)$	20.671	4.837	///	///
	输出波形	///	见附图 7	见附图 8	见附图 9
微分 运算 电路	$R_1(\Omega)$	560	560	2000	0.001
	$R(k\Omega)$	5.1	11	11	11
	$V_{opp}(V)$	0.999	2.1538	///	///
	输出波形	///	见附图 11	见附图 12	见附图 13

4、 有源滤波器电路交流扫描分析

滤波器	一阶		二阶	
	低通	高通	低通	高通
增益 A	2	1	2	0.987
截止频率	10	10	10.161	10.161

$f_c(\text{kHz})$				
10 f_c 处衰减 (dB)	-20.17	///	-40.2	///
0.1 f_c 处衰减 (dB)	///	-20	///	-40

实验数据分析

1、放大器特性分析

由数据可以看出，虽然实际的集成运算放大器的开环差模电压增益并不是理想的无穷大，但其值也是非常大的，所以在不精确的计算中可以当做无穷大来计算。实验测得的其他各项数值均与其理论值相符。

2、加运算电路直流扫描分析

由数据可见在运算放大器的线性区，测量值与理论值是很接近的，但超出了运算放大器的线性范围，所得结果就与理论值存在较大偏差。因此要保证运算的准确性，应确保运算放大器工作在线性区。

3、积分与微分运算电路瞬态分析

积分电路：输入为方波，侧理论上输出应为三角波。但是，在实际情况中，由于阻值的不同，呈现出各种不稳定的波形。在开始阶段，波形都呈现出下降的趋势，过了几个周期后才能稳定。这是由于实际积分电路为降低电路的直流增益，在积分电容上并联了电阻 R_1 ，故实际电路输出表达式中含有 $e^{-\frac{t}{R_1C}}$ 因子。因此电路在一段时间内有随时间衰减的趋势，而这个衰减的过渡时间由 $R_1 \cdot C$ 决定。 R_1 越大，则过渡的时间越短，波形能更快的达到稳定。因此，第三个波形是最理想的。

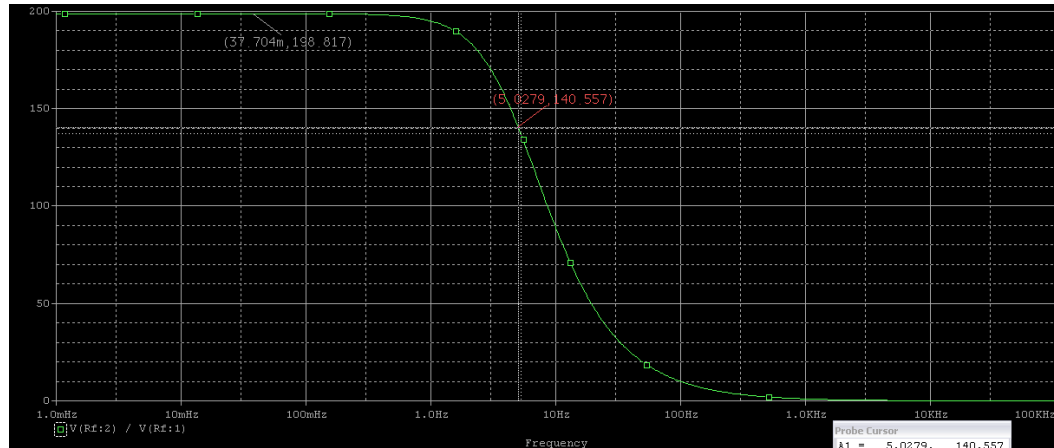
微分电路：由于理想微分电路的阻尼因子 $\zeta \ll 1$ ，电路会出现难以衰减的高频振荡，所以在实际微分电路中，通常在电容 C 上串联小电阻 R_1 ，以增加电路的阻尼系数，降低电路的高频增益，使高频振荡迅速衰减，电路工作特性更理想。通过对不同阻值下波形的观察，发现 R_1 过小会引起输出出现震荡，而 R_1 过大则又会引起输出的失真。所以在实际电路中，为了保证理想的运算，应选取大小适中的 R_1 。

4、有源滤波器电路交流扫描分析

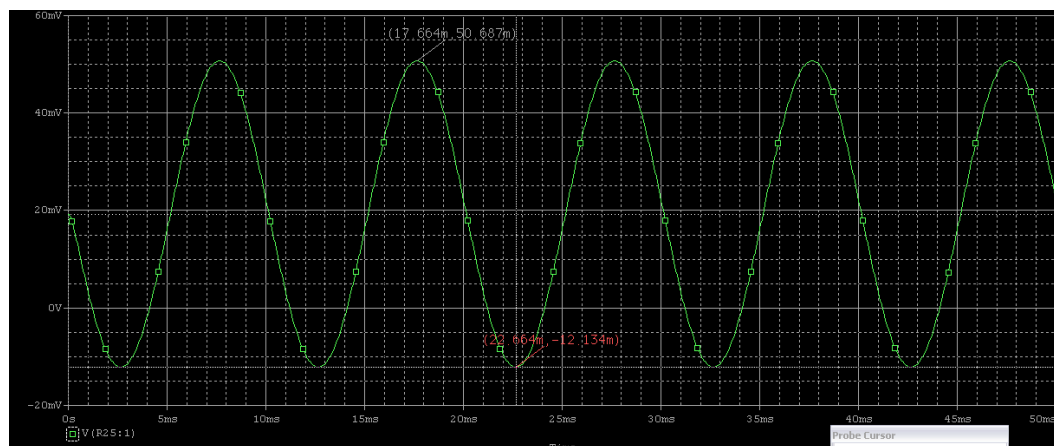
比较一阶高通和二阶高通的频响曲线可以看到，二阶高通的通频带要比一阶宽，通频带更为平缓，而过渡带要比一阶窄，也更为陡峭。可见在实际应用中二阶高通电路的滤波性能要好于一阶电路。可以推测滤波器的阶数越高滤波性能越好。

附图：

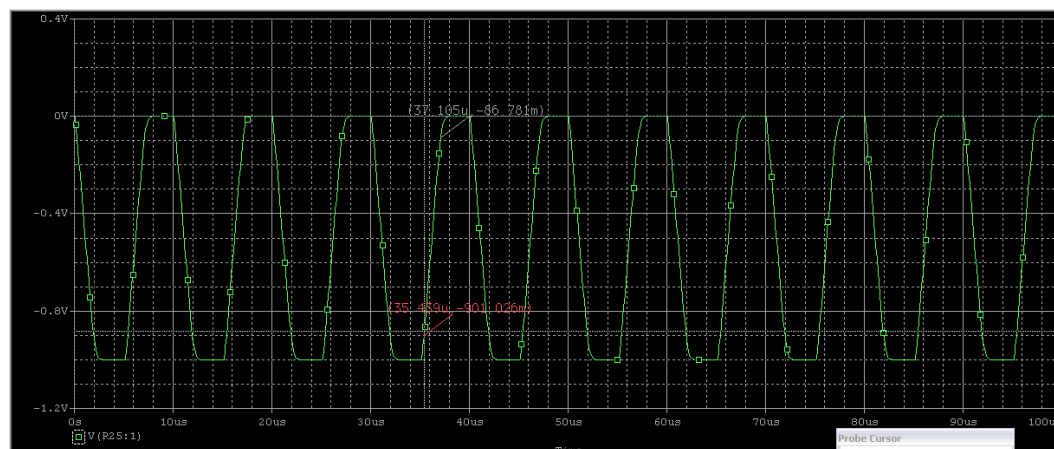
1、运算放大器交流分析，测量开环增益、带宽



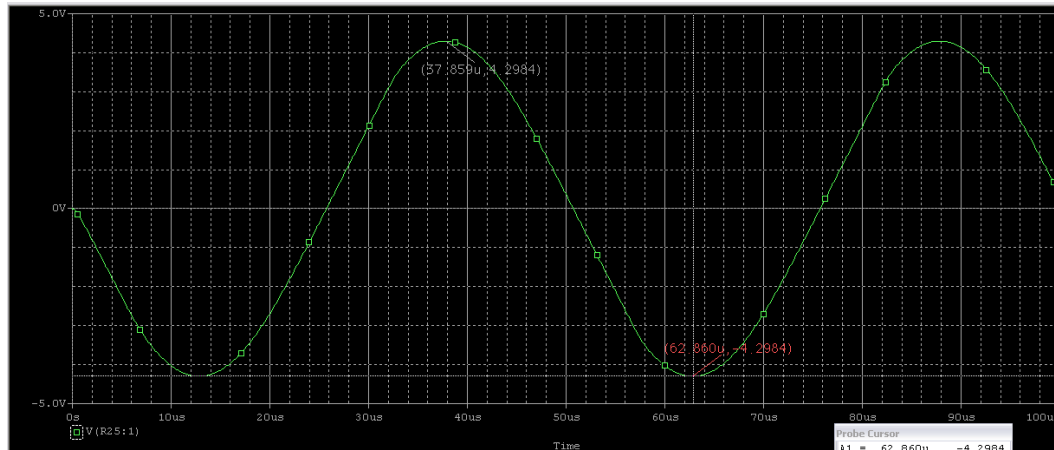
2、运算放大器瞬态分析，测量共模抑制比及 Vopp



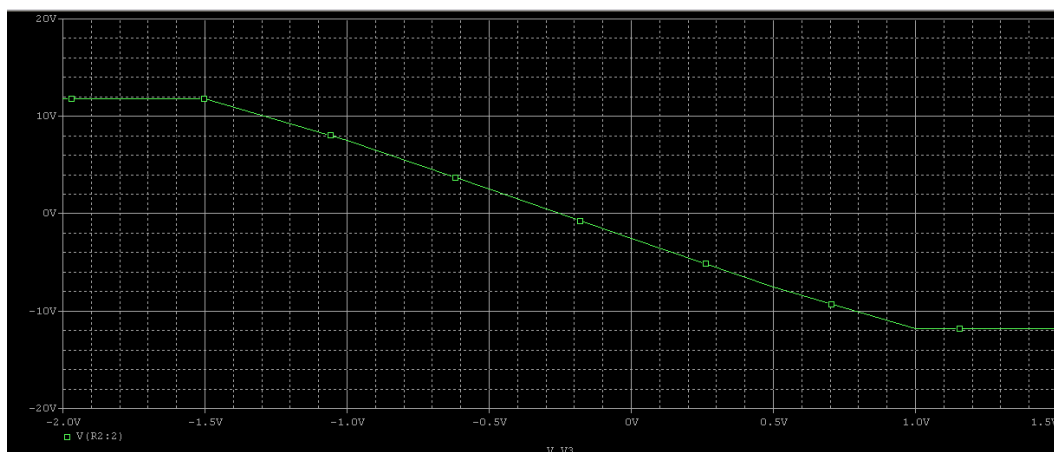
3、运算放大器瞬态分析，测量转移速率



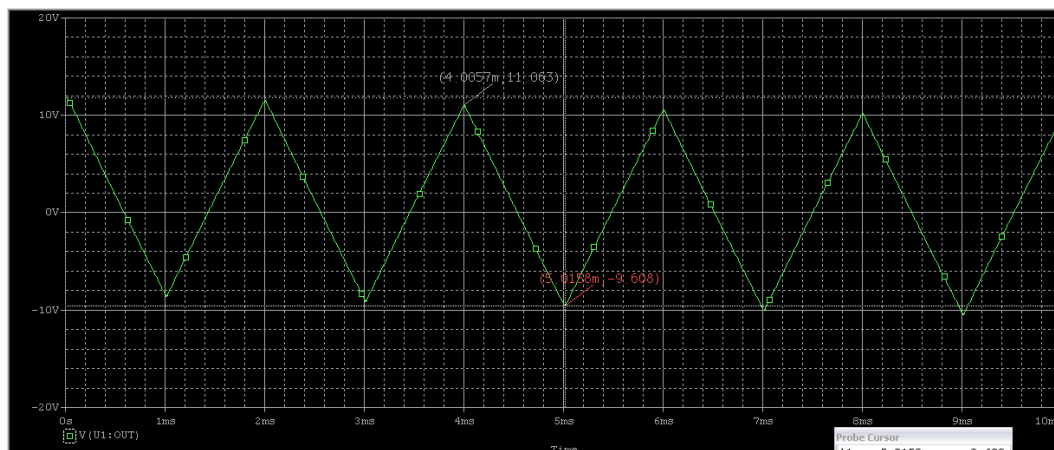
4、不失真幅度



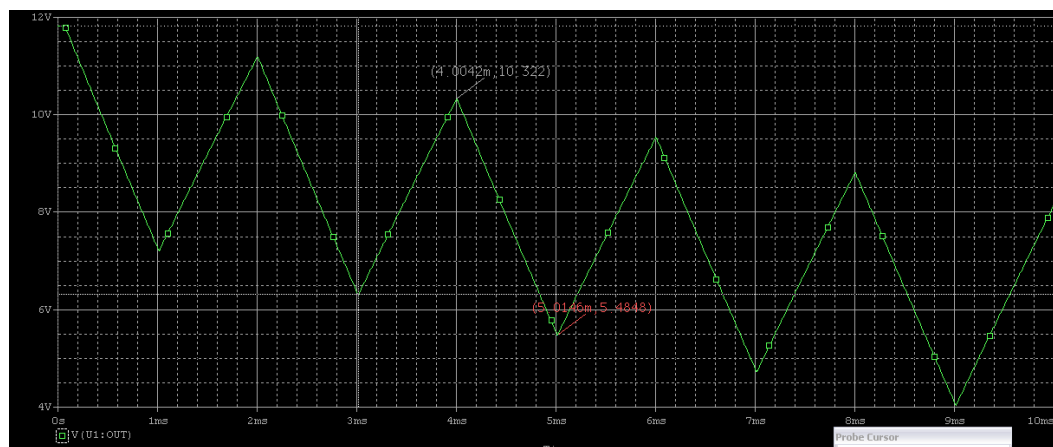
5、加运算电路直流扫描分析



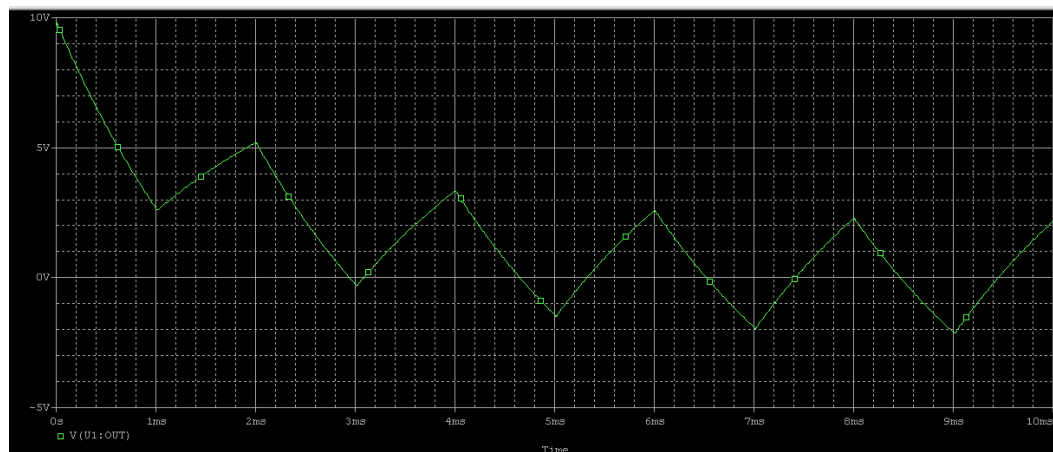
6、积分运算电路 $R_1=100k$ $R=110$



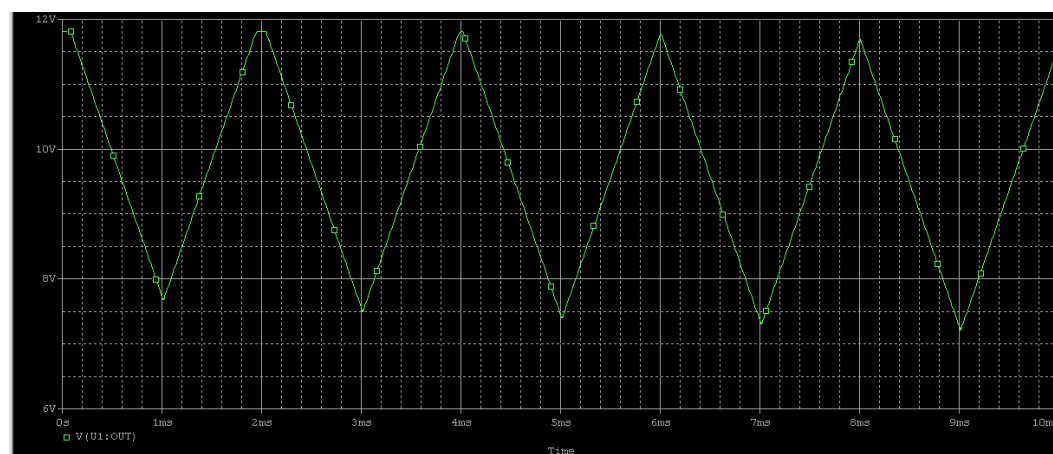
7、积分运算电路 $R_1=100k$ $R=510$



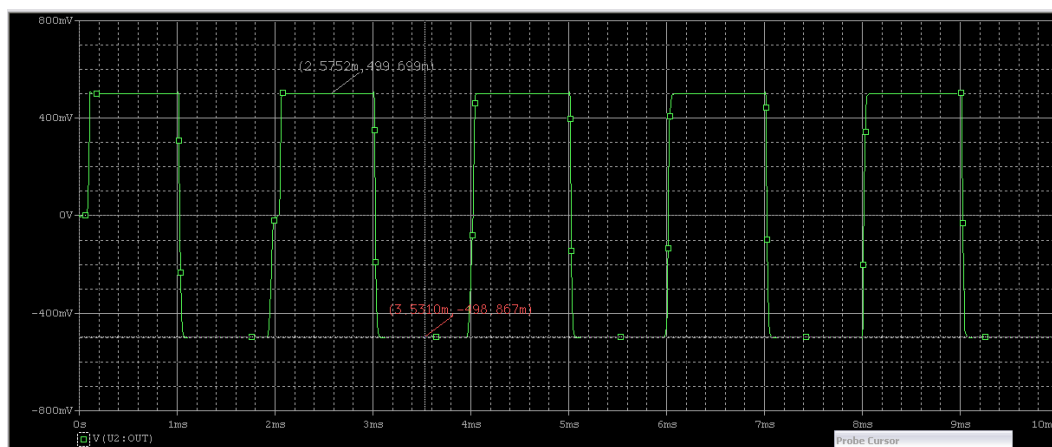
8、积分运算电路 $R_1=10k$ $R=510$



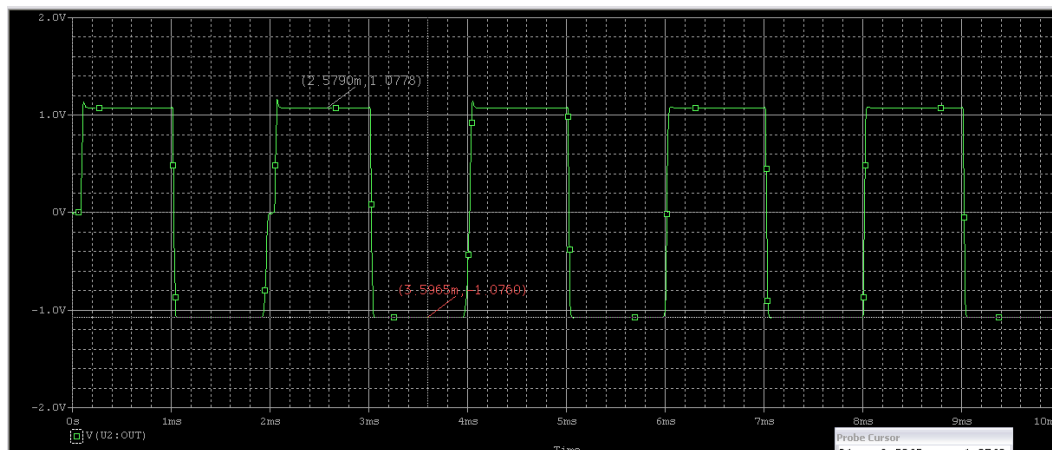
9、积分运算电路 $R_1=1000000k$ $R=510$



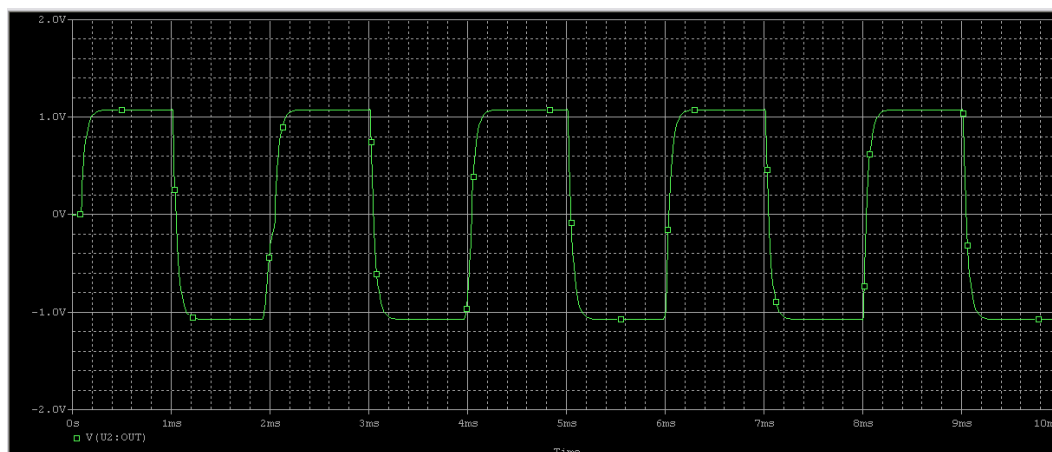
10、微分运算电路 $R_1=560$ $R=5.1k$



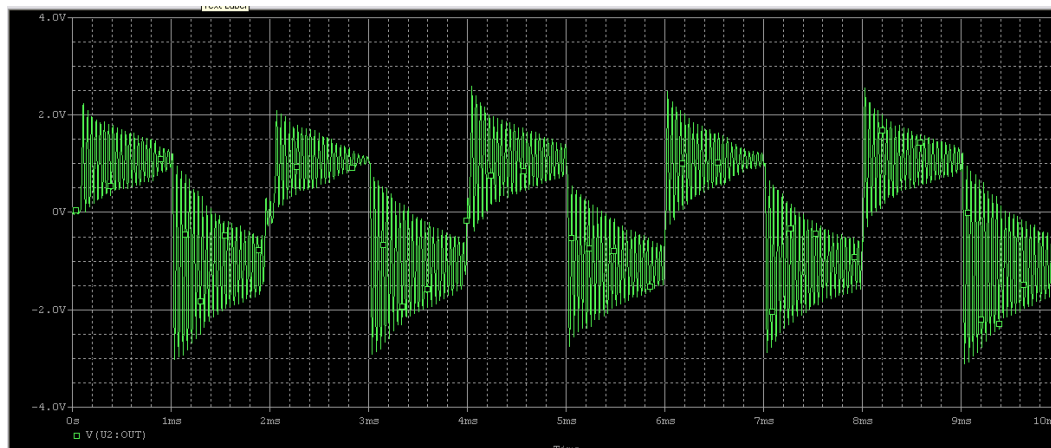
11、微分运算电路 $R_1=560$ $R=11k$



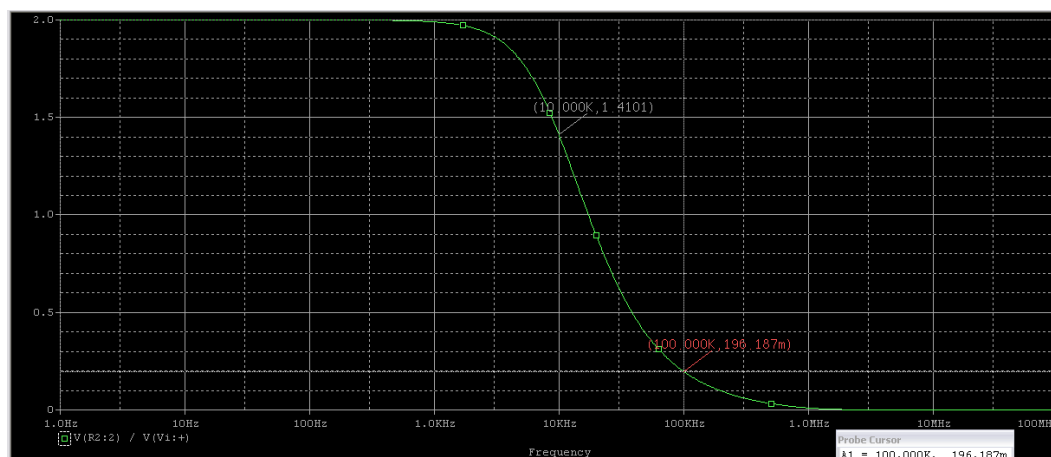
12、微分运算电路 $R_1=2000$ $R=11k$



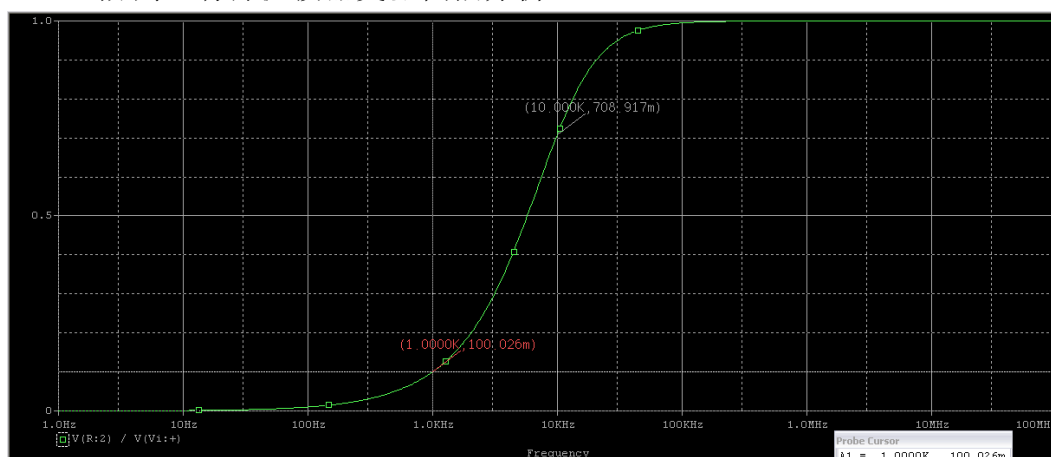
13、微分运算电路 $R_1=0.001$ $R=11k$



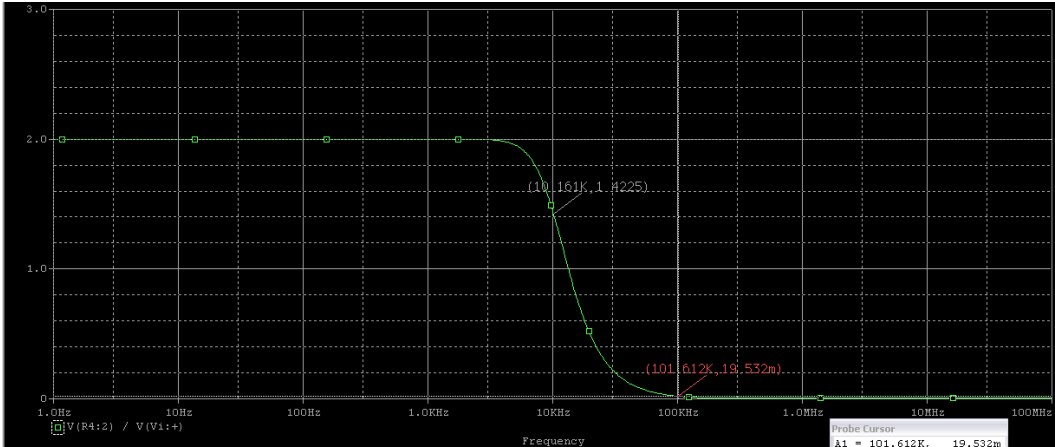
14、一阶低通有源滤波器交流扫描分析



15、一阶高通有源滤波器交流扫描分析



16、二阶低通有源滤波器交流扫描分析



17、二阶高通有源滤波器交流扫描分析

