

现代电子电路基础及实验

放大器的频率特性研究

北京大学物理学院



2019 年 3 月 4 日

目录

1	实验目的	1
2	实验原理	1
2.1	单级放大器的低频特性	2
2.2	单级放大器的高频特性	2
2.3	两级放大器的通频带	3
3	实验器材	4
4	实验内容与方法	4
4.1	测量单级放大器的幅频特性	5
4.2	考察放大器元件参数变化对放大器幅频特性的影响	5
5	实验数据	6
6	数据处理	8
7	思考题	9

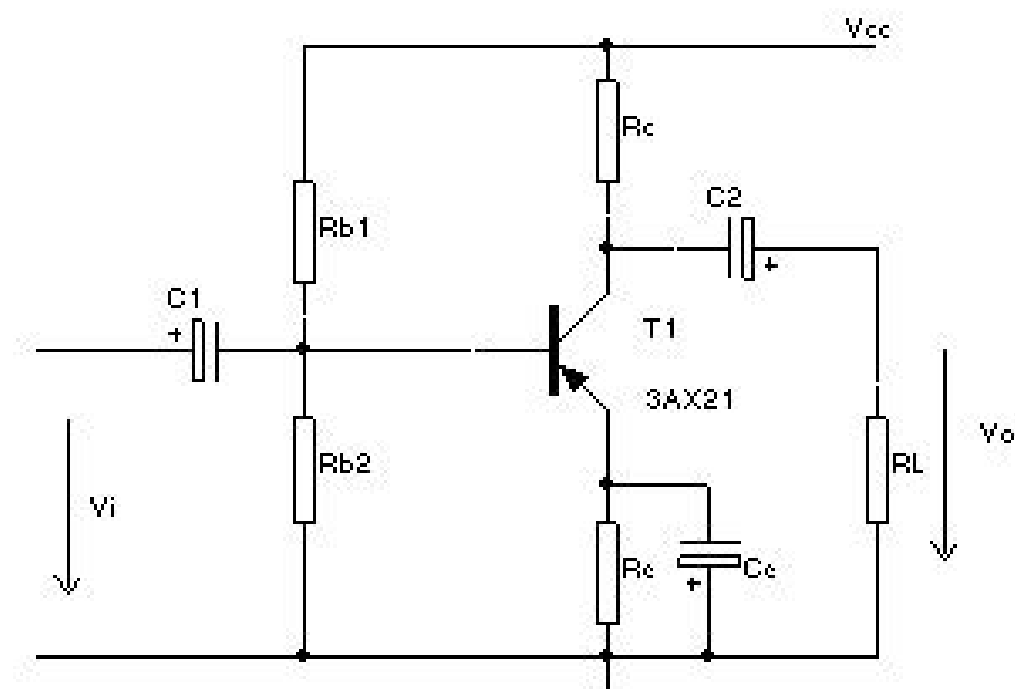
1 实验目的

- 研究放大器的频率特性
- 了解计算机仿真技术

2 实验原理

放大器所放大的信号往往是包含许多频率成分的复杂信号，含有丰富的谐波，要求放大器对不同频率分量具有相同的放大能力，才能使放大信号不产生失真。但是，由于放大器特别是交流放大电路中含有耦合电容、旁路电容、分布电容及晶体管极间电容等，使放大倍数与信号的频率有关，这种关系称为放大器的频率特性，也称放大器的频率响应。放大倍数的幅度与频率的关系称为放大器的幅频特性，放大器对不同频率的信号会产生不同的相移，这种关系称为放大器的相频特性。

单管共射极交流放大器如图所示。



单管共射极交流放大器

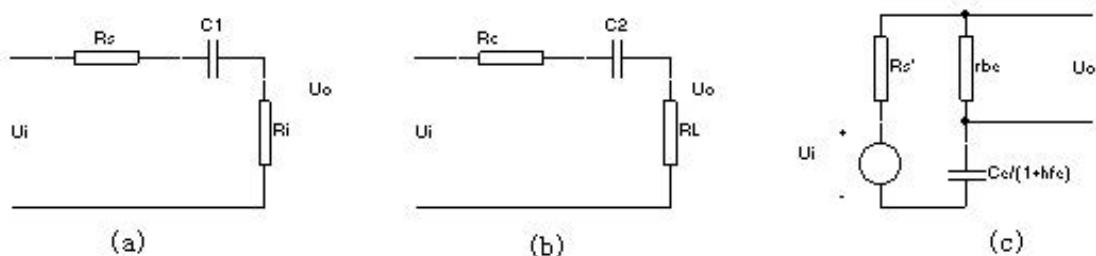
在一个较宽的频率范围内，幅频特性的曲线是平坦的，即放大倍数是相等的，这段频率范围称为放大器的中频段，放大倍数记做 A_{um} 。随着频率的升高和降低，

放大倍数都将下降，当放大倍数下降到中频放大倍数的 $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$ 时，所对应的低频频率和高频频率，分别称为放大器的下界（下限）频率 f_L 和上界（上限）频率 f_H 。在 f_L 和 f_H 之间的频率范围内，放大器几乎有相同的放大能力。这一频率范围称为放大器的通频带，以 BW 表示。即

$$BW = f_H - f_L$$

2.1 单级放大器的低频特性

在低频段，耦合电容 C_1 、 C_2 和旁路电容 C_e 的容抗再不能忽略。它可近似等效为一个高通电路。如下图：



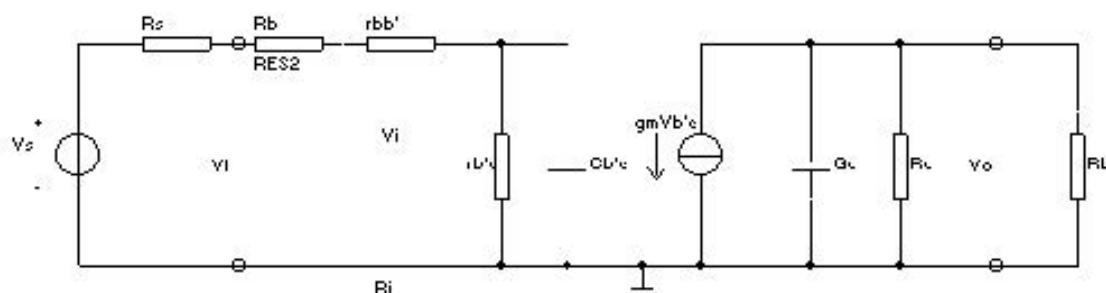
低频特性

由这些电路的传递函数和放大器界频的定义可得到下界频分别为：

$$f_{LC_1} = \frac{1}{2\pi(R_i + R_s)C_1}, \quad f_{LC_2} = \frac{1}{2\pi(R_c + R_L)C_2}, \quad f_{LC_e} = \frac{\beta}{2\pi(R'_s + r_{be})C_e}$$

2.2 单级放大器的高频特性

在高频段，耦合电容的影响可以忽略，但与有关电阻并联的电容、极间电容和分布电容所造成的影响就必须考虑了。一般情况下，输入回路的时间常数往往远大于输出回路的时间常数，因此计算时，可以只考虑输入回路。高频等效电路如下图：



高频特性

图中 g_m 定义为 u_{C_e} 恒定时，基极电压 $u_{b'e}$ 的变化所引起的集电极电流 i_c 的变化量与 $u_{b'e}$ 的变化量之比，即

$$g_m = \left. \frac{\partial i_c}{\partial u_{b'e}} \right|_{u_{C_e}}$$

g_m 的量纲为导纳，通常称为跨导，单位一般用 mS 。把上图再等效成诺顿形式，可计算出其上界频的表达式：

$$f_H = \frac{1}{2\pi R C'_{b'e}}$$

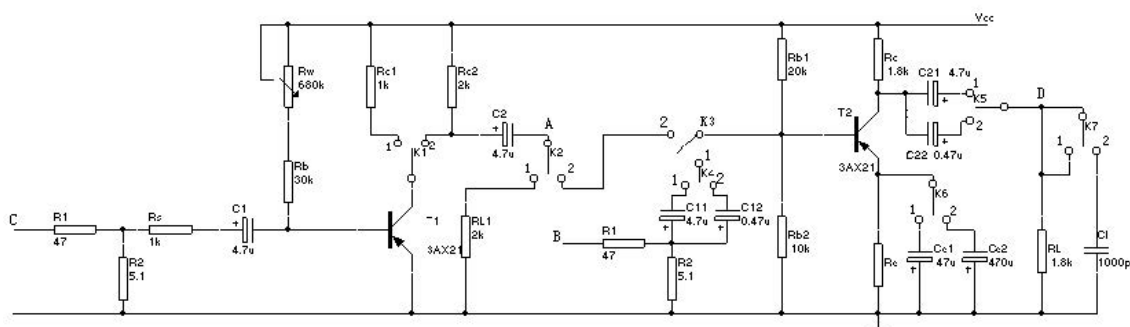
式中

$$R = (R_S + r_{bb'}) | r_{be}, C'_{be} = C_{be} + (1 + g_m R'_L) C_{be}$$

由上式可知， $C_{b'e}$ 是三极管的极间电容，要提高 f_H 的主要途径是减小 $C_{b'e}$ ，也就是说，主要是选择高频管。

2.3 两级放大器的通频带

由 T_1 和 T_2 组成两级阻容放大器见下图。



两级放大器

设 T_1 管放大器的上、下界频率为 f_{H1} 和 f_{L1} ， T_2 管放大器的上、下界频率为 f_{H2} 和 f_{L2} ， T_1 、 T_2 级联后，两级放大器的增益可表为

- 信号频率高时： $A = A_0 \prod_{i=1}^2 \frac{1}{1+j\frac{f}{f_{Hi}}}$
- 信号频率低时： $A = A_0 \prod_{i=1}^2 \frac{1}{1+j\frac{f_{Li}}{f}}$

若 $f_{H1} \neq f_{H2}$ ， $f_{L1} \neq f_{L2}$ ， f_H 和 f_L 的计算分别由上二式及上、下界频的定义求得。若 $f_{H1} = f_{H2}$ ， $f_{L1} = f_{L2}$ ，则可得到两级放大器的上、下截止频率为：

$$f_H = \sqrt{\sqrt{2} - 1} \cdot f_{H1}, \quad f_L = \frac{f_{L1}}{\sqrt{\sqrt{2} - 1}}$$

两级放大器的频率响应特性测量没有在本次实验中进行。

3 实验器材

万用表，示波器，信号发生器，直流稳压电源。

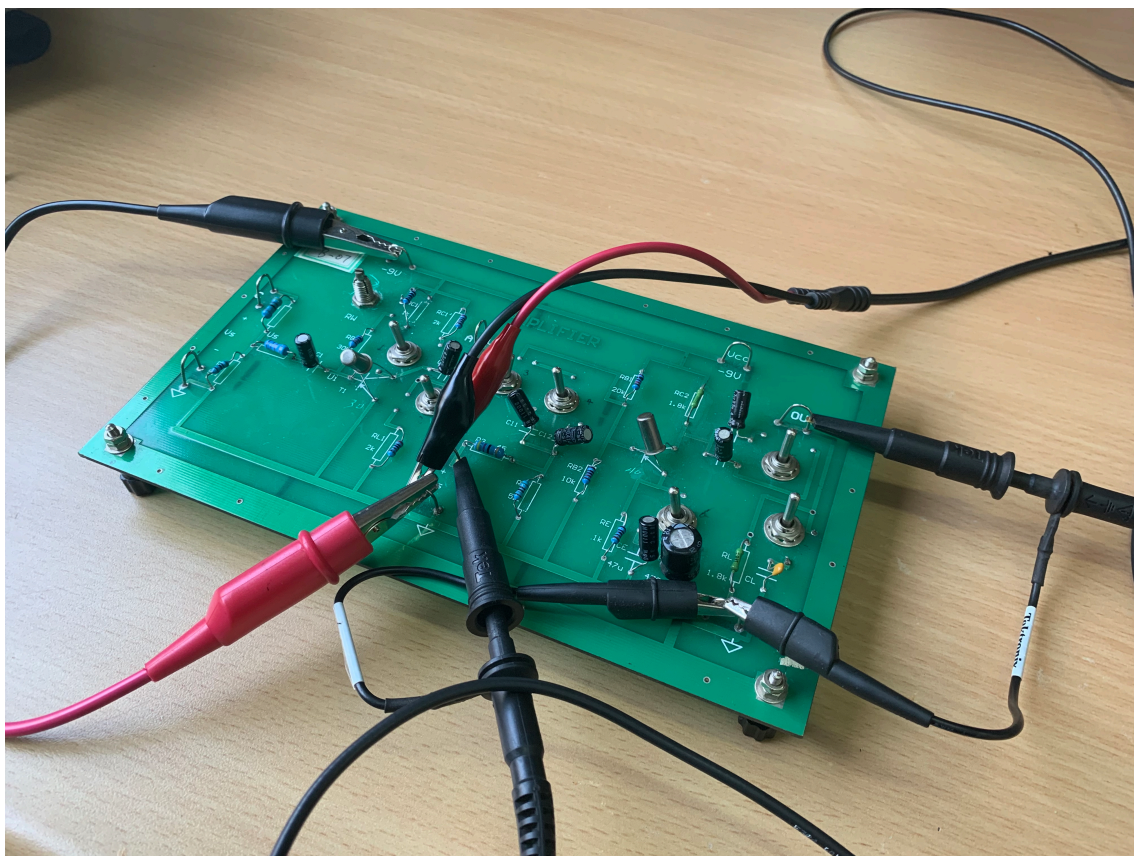
4 实验内容与方法

实验用到的电路板比理论电路增加 R_1 , R_2 的分压电路，这是为了适应仪器的输出信号幅度较大所增加的衰减电路，衰减比例为 10 : 1。

在实验中仅涉及 T_2 放大器的测量，即上方实验电路图的右半部分。有关参数为：

- 放大器型号 3AX21
- 输入 $f_T = 1MHz, I_c = 2mA, E_c = -9V$;
- $R_e = 1k\Omega, R_{b1} = 20k\Omega, R_{b2} = 10k\Omega, R_c = 1.8k\Omega, R_L = 1.8k\Omega$;
- $C_{11} = 4.7\mu F, C_{12} = 0.47\mu F, C_{21} = 4.7\mu F, C_{22} = 0.47\mu F, C_{e1} = 47\mu F, C_{e2} = 470\mu F, C_L = 1200pF$ 。

将稳压源、信号发生器和示波器接入后，实际的电路如图所示



实验电路

4.1 测量单级放大器的幅频特性

- 先将 $T1$ 放大器脱开，只测量实验板右边放大器。将开关 K_3 、 K_4 、 K_5 、 K_6 、 K_7 均合向“1”位置。
- 这时，元件参数为 $C_1 = C_{11} = 4.7\mu F$ ， $C_2 = C_{21} = 4.7\mu F$ ， $C_e = C_{e1} = 47\mu F$ ， C_L 不接入电路。
- 连接信号源。B 点对地输入频率为 5kHz 的正弦信号， $U_s = 200 - 300mV_{p-p}$ 。用示波器监视放大器输入信号 U_i (R4 两端)，调节信号发生器使放大器输入信号有效值 $U_i = 10mV_{rms}$ (约为 $30mV_{p-p}$)。
- 用示波器 (或用毫伏表) 监测放大器的 D 点输出电压。用逐点法测量放大器的幅频特性，使输出电压波形在荧光屏上占有一定幅度 (一般应尽可能大些)，然后保持放大器输入电压不变 (10 毫伏有效值，约等于 $30mV_{p-p}$)，从 5kHz 分别向低端和高端改变放大器输入信号的频率，用示波器自动或手动测量并记录该频率及放大器输出电压的相对幅度。

注意：在测量过程中，始终保持输入 U_i 不变；在输出电压变化明显部分多测，变化缓慢部分少测 (即 f_H 、 f_L 附近点测的密些，在中频部分点测的少些。)

由此，即可作出放大器的电压放大倍数随频率变化的曲线，即放大器的频率响应曲线，求出放大器通频带的高、低频截止频率 f_L 、 f_H 。并计算出此时放大器中频段的放大倍数 A_2 。

4.2 考察放大器元件参数变化对放大器幅频特性的影响

1. 取 $C_1 = C_{12} = 0.47\mu F$ ， $C_2 = C_{21} = 4.7\mu F$ ， $C_e = 47\mu F$ ，测出放大器通频带的低频截止率 f_L 。
2. 取 $C_1 = C_{11} = 4.7\mu F$ ， $C_2 = C_{22} = 0.47\mu F$ ， $C_e = 47\mu F$ ，测出放大器通频带的低频截止率 f_L 。
3. 取 $C_1 = C_{11} = 4.7\mu F$ ， $C_2 = C_{21} = 5\mu F$ ， $C_e = C_{e2} = 470\mu F$ ，测出放大器通频带的低频截止率 f_L 。
4. 在 (3) 参数基础上，合上 K_7 (开关组子向下)，即接入 C_L ，测出放大器通频带的高频截止频率 f_H 。

将所得测量结果与上一部分的测量结果作比较。

5 实验数据

测量过程中控制输入信号峰峰值 $U_i = 32mV_{p-p}$ 。

频率 f/Hz	幅度 U/mV_{p-p}	频率 f/Hz	幅度 U/mV_{p-p}
50	208	2000	1540
60	280	2500	1560
70	384	3000	1560
80	424	3500	1560
90	496	4000	1580
100	536	4500	1580
110	584	5000	1580
120	632	10000	1580
130	664	20000	1580
140	704	30000	1560
150	736	40000	1520
160	784	45000	1500
170	816	50000	1460
180	848	55000	1440
190	880	60000	1440
200	904	62000	1400
210	936	64000	1400
220	968	66000	1400
230	992	68000	1380
240	1020	70000	1360
250	1040	72000	1360
260	1060	74000	1340
270	1070	76000	1340
280	1100	78000	1320
290	1110	80000	1300
300	1130	82000	1300
310	1150	84000	1300
320	1170	86000	1260
330	1180	88000	1260
340	1200	90000	1260
350	1210	92000	1240
360	1220	94000	1220

频率 f/Hz	幅度 U/mV_{p-p}	频率 f/Hz	幅度 U/mV_{p-p}
370	1230	96000	1220
380	1240	98000	1220
390	1260	100000	1200
400	1270	102000	1180
420	1300	104000	1180
440	1310	106000	1160
460	1330	108000	1160
480	1340	110000	1140
500	1350	111000	1140
520	1370	112000	1130
540	1380	113000	1130
560	1390	114000	1120
580	1410	115000	1110
600	1410	116000	1110
620	1420	117000	1100
640	1420	118000	1100
660	1440	119000	1090
680	1440	120000	1080
700	1440	125000	1060
750	1450	130000	1050
800	1450	135000	1020
850	1450	140000	1000
900	1460	145000	976
950	1460	150000	952
1000	1460	155000	936
1100	1480	160000	904
1200	1500	170000	856
1300	1520	180000	816
1400	1520	190000	784
1500	1520	200000	752

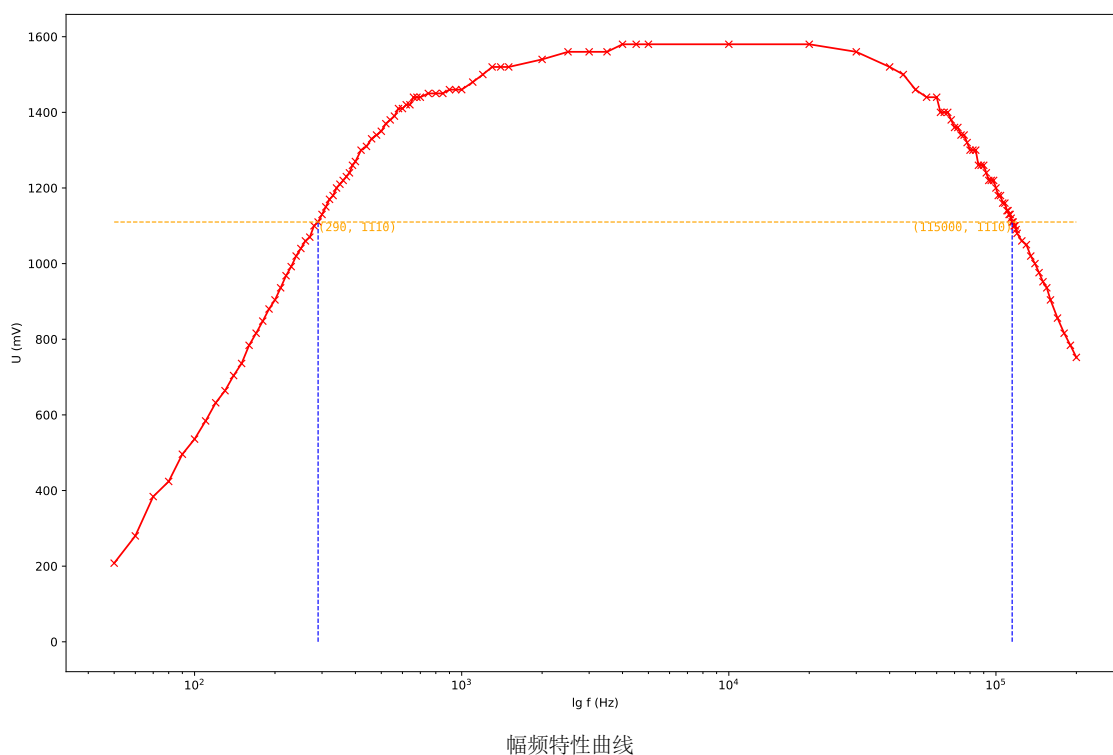
除了这一组完整的数据外，还测量了放大器元件参数对放大器频率特性的影响：

1. 将 C_1 由 $4.7\mu F$ 减小为 $0.47\mu F$ 后， $f_L = 770Hz$

2. 将 C_2 由 $4.7\mu F$ 减小为 $0.47\mu F$ 后, $f_L = 390Hz$
3. 将 C_2 由 $47\mu F$ 增加为 $470\mu F$ 后, $f_L = 70Hz$
4. 将 C_L 接入电路后, $f_H = 87kHz$

6 数据处理

- 作出放大器的幅频特性曲线。频率轴取常用对数 $\lg f$, 在图上标出上下界频位置及数值。



如图所示, 有 $f_L = 290Hz$, $f_H = 115kHz$ 。

- 对照实验值讨论放大器元件参数对放大器频率特性的影响。
 1. 将 C_1 由 $4.7\mu F$ 减小为 $0.47\mu F$ 后, f_L 由 $290Hz$ 增加为 $770Hz$, 有显著增加
 2. 将 C_2 由 $4.7\mu F$ 减小为 $0.47\mu F$ 后, f_L 由 $290Hz$ 增加为 $390Hz$, 略微增加
 3. 将 C_2 由 $47\mu F$ 增加为 $470\mu F$ 后, f_L 由 $290Hz$ 减小为 $70Hz$, 有显著减小
 4. 将 C_L 接入电路后, f_H 由 $115kHz$ 减小为 $87kHz$, 有显著减小

7 思考题

1. 为什么测量放大器频率响应所用的示波器或毫伏表都须有足够的频宽? 如果被测放大器的频带比所用毫伏表或示波器的频带宽, 将出现什么问题?

足够的频宽将保证在较广的频率范围内获得更可靠的数据。如果示波器或毫伏表的频宽不够, 将会导致测量到截止频率 f_L , f_H 附近时, 测量值出现较大的误差, 无法真实的反应放大器的频率响应。

2. 用描点法测量放大器的频率响应曲线, 有哪些步骤与注意点? 为什么要保持放大器的输入信号幅度不变? 能不能保持输出电压不变? 如果能, 怎样测量?

用描点法测量时, 需要注意在曲线斜率较大处多取点, 并且在每次调整信号频率进行测量时, 都要保持放大器的输入信号幅度不变。由于我们测量的是放大器的幅频特性, 保持输入信号幅度不变, 测量输出电压, 即可给出放大倍数的相对变化关系。保持输出电压不变也是可行的, 这时需要测量输入电压的幅度。但是由于在实验原理部分已经估算出了在低频和高频时放大倍数会下降, 这必然要求对输入信号的幅度在较大范围内可调, 可行性不高。

3. 什么叫通频带, 它是如何定义的? 怎样求出频带的高低频截止频率 f_H 、 f_L ? 如果不测频率响应曲线, 能不能直接测出通频带的高低截止频率?

在一定的频率范围内, 放大器几乎有相同的放大能力, 这一频率范围称为放大器的通频带。当放大倍数下降到中频放大倍数的 $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$ 时, 所对应的低频频率和高频频率, 分别称为放大器的下界 (下限) 频率 f_L 和上界 (上限) 频率 f_H 。从理论上通过高频和低频近似可以求出 f_H 、 f_L 。在不测频率响应曲线的情况下, 通过测量中频放大倍数, 并在保证输入电压不变的情况下, 调整频率测量输出电压, 亦可直接测出通频带的高低截止频率。

4. 级联后各级放大器静态工作点有无变化? 为什么?

这一部分实验没有进行, 但从理论上讲, 级联后各级放大器存在耦合, 各级静态工作点会互相制约、互相影响。