

南京大学 模拟电路实验

实验一 双极结型晶体管(BJT) 实验报告

姓	名：	高荧泽
学	号：	231880318
院	系：	集成电路学院
邮	箱：	yz.gao@outlook.com
班	级：	科创大厦 A323
任 课 教 师：		方元

实验一 双极结型晶体管 (BJT)

摘要

本实验围绕单级共射放大电路的静态工作点、电压增益、频率响应、谐波失真以及双级放大与负反馈特性展开,通过搭建典型共射放大电路,测量并分析了静态参数、电压增益与频率特性之间的关系.实验验证了小信号模型及米勒效应对频率响应的解释,观察到负载电阻对增益与带宽的权衡效应.谐波失真测试揭示了大信号输入导致的非线性失真规律,进一步通过引入负反馈显著改善了增益稳定性、扩展了带宽、降低了输出阻抗与失真率.实验结果整体符合理论预期,有效验证了晶体管放大电路的基本工作原理与反馈控制在模拟电路设计中的重要作用.

关键词: 共射放大电路; 电压增益; 频率响应; 谐波失真; 带宽; 静态工作点

目录

摘要	1
目录	2
一、实验原理与目的	3
1.1 实验原理	3
1.1.1 BJT 基本共射放大电路	3
1.1.2 多级放大电路与反馈	4
1.2 实验目的	4
二、实验软件环境说明与数据约定	4
2.1 软件环境	4
2.2 数据约定	4
三、实验内容与数据分析	4
3.1 单级 BJT 共射放大电路	4
3.1.1 静态工作点与交流电压增益	5
3.1.2 负载对电压增益的影响	6
3.1.3 输入电阻与输出电阻	6
3.1.4 频率响应	7
3.1.5 谐波失真	8
3.2 双极 BJT 共射放大电路	9
3.2.1 静态工作点	9
3.2.2 交流电压增益	9
3.2.3 输入输出电阻	10
3.2.4 频率响应	10
3.2.5 谐波失真	11
四、误差分析	11
4.1 交流小信号的测量误差	11
4.2 示波器 FFT 图像不稳	12
五、结论	12
致谢	13
附件	14

一、实验原理与目的

1.1 实验原理

晶体管放大器常使用 NPN 型双极结型晶体管 (BJT)，其放大原理基于载流子注入与集电极 - 基极电流放大作用。

晶体管放大电路的主要参数包括静态工作点、 β 、放大系数、输入电阻、输出电阻。这些参数之间存在一定的相互影响。本实验正基于实际测量得到的数据，对晶体管各个参数之间的理论关系进行验证。

另外，晶体管放大电路对不同频率的信号产生的响应不同，这就是 BJT 放大电路的频率响应特点。谐波失真是晶体管的重要交流特性。本实验也对这两种交流特性进行测量和验证。

1.1.1 BJT 基本共射放大电路

BJT 基本共射极放大电路如下图所示。

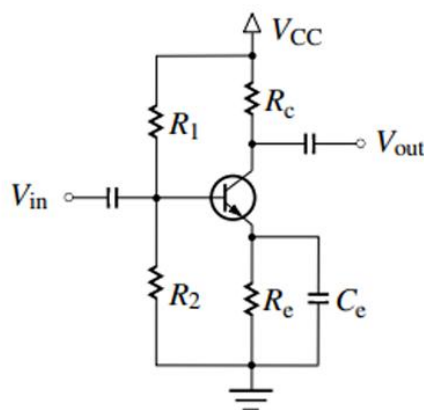


图 1.1.1 BJT 基本共射极放大电路

其中， V_{cc} 和 V_{in} (直流) 用于控制电路的静态工作点，使 BJT 工作在放大区，保证电路放大功能的正常行使。交流信号从 V_{in} (交流) 输入。若三极管工作在放大区，则 V_{out} 端口的交流输出与电路的交流输入呈现出一定的倍数关系。这就是 BJT 对交流小信号的放大原理。

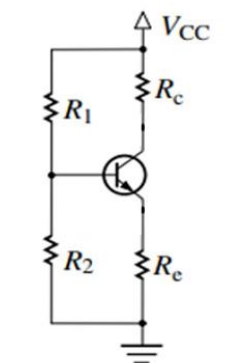


图 1.1.2 直流通路

对于 BJT 直流静态特性的分析, 如静态工作点等, 常参考 BJT 基本共射放大电路的直流通路, 如图 1.1.2 所示. 而对于交流性质, 如输入电阻、输出电阻、电压增益等, 则参考如图 1.1.3 所示的交流通路下的小信号等效模型进行分析.

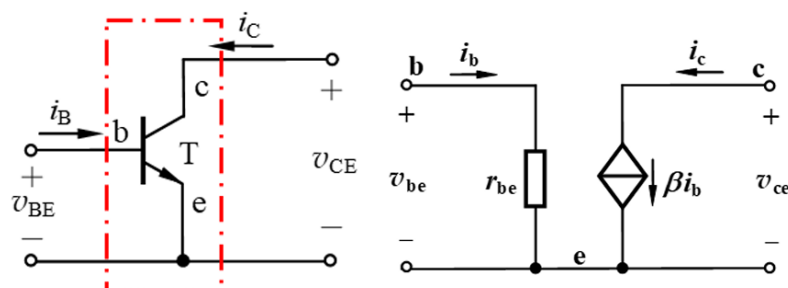


图 1.1.3 交流小信号等效模型

1.1.2 多级放大电路与反馈

在 BJT 共射多级放大电路中, 不带反馈结构各级串联可实现高总体增益, 但由于晶体管间参数叠加, 增益稳定性差、带宽较窄且易产生非线性失真, 同时输入输出阻抗匹配要求严格、噪声累积明显.

引入负反馈后, 通过在中频带内或输出端取样并反馈至前级, 会降低总增益, 但大幅提升增益稳定性与线性度, 拓宽中频带宽、抑制谐波失真, 并提高输入阻抗、降低输出阻抗, 从而改善级间匹配与抗干扰能力, 整体性能更加可靠与可控.

1.2 实验目的

了解 BJT 晶体管的工作原理, 验证 BJT 各个参数之间的关系, 测量探究 BJT 的频响特性, 探索、分析反馈对于 BJT 放大电路的影响.

二、实验软件环境说明与数据约定

2.1 软件环境

仿真软件: NI Multisim 14.3 Education Edition

数据处理: OriginPro 2025 (64-bit) SR1 10.2.0.196 (Education Edition)

2.2 数据约定

在本实验报告中, 若无特殊说明, 交流电压记录均为峰-峰值(V_{pp}).

三、实验内容与数据分析

本实验主要分为两个部分, 分别对单级 BJT 共射放大电路和双级 BJT 共射放大电路的参数进行测量和计算. 并对归纳整合后的实验数据进行分析, 以证明数据的合理性, 也对模拟电路的相关理论进行验证.

3.1 单级 BJT 共射放大电路

本部分实验对单级 BJT 共射放大电路的静态工作点、电压放大系数、输入电阻、输出电阻、频率响应、谐波失真进行测量, 并对其间关系进行验证. 实验电路图如图 3.1.1 所示.

3.1.1 静态工作点与交流电压增益

按图 3.1.1 所示电路图连接电路. 使用单电源供电, 电压 12V, 最大电流 0.05A.

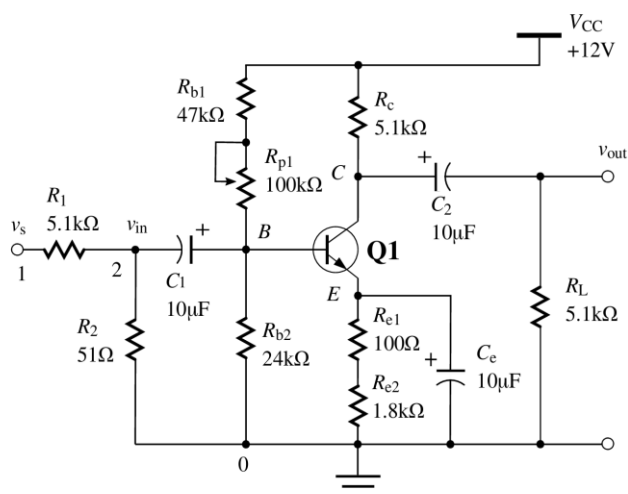


图 3.1.1 单级 BJT 共射放大电路

1. 测量方法

为测量电路静态工作点, 将输入电压 V_s 置零 (接地). 测量电阻 R_{b1} 和 R_{b2} 两端的电压, 计算其电流 I_{b1} 和 I_{b2} , 可得 BJT 基极电流

$$I_B = I_{b1} - I_{b2} \quad (3-1)$$

为得到集电极电流, 测量电容 R_c 两端电压, 即可根据欧姆定律直接计算得到集电极电流 I_c .

共射电流放大系数 β 可由基极电流和集电极电流计算得到

$$\beta = \frac{I_c}{I_B} \quad (3-2)$$

为测量电路交流电压增益, 需施加交流源电压输入 v_s , 则电路的输入电压 $v_i = 0.01v_s$. 测量输出电压 v_o . 根据式(3-3)即可计算出电压增益 A_v . 需要注意的是, 为保证测量结果正确, 需要保证输出电压波形未发生失真.

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \quad (3-3)$$

2. 实验数据

对单级 BJT 共射放大电路静态工作点和电压增益的测量结果如表 3.1.1 所示.

表 3.1.1 单级放大电路的静态工作点与电压增益测量结果 (电压为峰值)

$V_C(V)$	$V_B(V)$	$R_{p1}(k\Omega)$	$I_B(\mu A)$	$I_C(mA)$	β	$v_s(mV)$	$v_o(mV)$	A_v
3.31	3.86	0	11.72	1.70	145.05	100	20	-20
6	2.83	27.34	4.63	1.17	252.70	0.5	0.74	-148
9	1.69	94.01	2.35	0.58	246.81	0.5	0.49	-98

3. 数据分析

根据分压定律, 随着电位器 R_{p1} 阻值的增加, 其分压增加, BJT 基极电压 V_B 的数值应出现相应减小, 正与表 3.1.1 中的对应记录相符合. 也可进行理论计算, 若忽略基极电流, 电位器阻值为 0 时, 基极电压约为 4.06V; 电位器阻值为 27.34k Ω 时, 基极电压约为 2.93V; 电位器阻值为 94.01k Ω 时, 基极电压约为 1.75V. 在此基础上考虑基极电流的影响, 实际的基极

电压应该比上述三个计算值稍小. 由表 3.1.1 中的记录可知, 实验测量结果与理论分析结果符合.

β 值的测量符合一般 BJT 晶体管共射电流放大系数约为 200 左右的经验值, 也可认为测量结果基本正确.

另, 交流电压增益的理论分析在下一小节 3.1.2 中讨论. 为避免重复, 不在此赘述.

3.1.2 负载对电压增益的影响

1. 测量方法

设置信号发生器输出 10kHz(中频带)正弦波, 电路静态工作点设置为 $V_c=6V$, 在单级放大电路输出端接入负载电阻, 再根据 3.1.1 小节所述的方法测量其电压增益, 即可得到所需的测量结果. 理论计算电压增益时, 取 $r_{bb'}=200\Omega$.

2. 实验数据

对单级 BJT 共射放大电路在 $V_c=6V$, 输入信号为 10kHz(中频带)正弦波时, 负载电阻大小对电压增益影响的测量结果如表 3.1.2 所示.

表 3.1.2 负载对电压增益的影响(电压为峰值)

$R_L(k\Omega)$	$v_s(mV)$	$v_{out}(V)$	$A_v(\text{实际})$	$A_v(\text{理论})$
2.2	1040	0.72	-69.2	-66.5
5.1	1040	1.14	-109	-110
∞	1040	2.2	-211	-220

3. 数据分析

考虑交流电压增益的理论计算, 需用到交流小信号等效电路, 取静态 $V_c=6V$, $\beta=252.70$. 其中, 取 $r_{bb'}=200\Omega$. 则根据式(3-4)知, $r_{be}\approx 5821.66\Omega$.

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \cdot \frac{26mV}{I_{EQ}} \quad (3-4)$$

则在 BJT 共射放大电路中, A_v 的理论值可通过式(3-5)计算可得. 在本实验条件下, 计算不同 R_L 对应的 A_v , 计算结果如表 3.1.2 所示. 可见, 理论计算结果与实验测量结果基本符合, 可以认为实验测量结果与理论计算相互证明, 测量无误.

$$A_v = \frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be}} \quad (3-5)$$

3.1.3 输入电阻与输出电阻

1. 测量方法

输入电阻测量: 断开电阻 R_2 , 负载开路, 记信号源输出电压 v_s , 使用双踪示波器测量电阻 R_1 两端电压 v_{R1} . 根据分压定律, 可由式(3-6)计算得到输入电阻 r_i .

$$r_i = \frac{v_s - v_{R1}}{v_{R1}} \cdot R_1 \quad (3-6)$$

输出电阻测量: 信号源设置不变, 测量负载开路时的输出电压 v_{oo} . 再接入负载电阻 $R_L=5.1k\Omega$, 用双踪示波器测量其两端电压 v_{RL} . 则可根据分压定律, 利用式(3-7)计算输出电阻 r_o .

$$r_o = \frac{v_{oo} - v_{RL}}{v_{RL}} \cdot R_L \quad (3-7)$$

2. 实验数据

经实验测量, 得到输入电阻 r_i 约 $2.65k\Omega$, 输出电阻 r_o 约为 $4.46k\Omega$.

3. 数据分析

根据 BJT 共射电路的小信号等效模型, 输入电阻 r_i 为电阻($R_{b1}+R_{b2}+R_{p1}$)与 r_{be} 的并联, 约为 $2.4k\Omega$, 与实验测量数据基本符合. 输出电阻即为 $R_C=5.1k\Omega$, 也与测量结果基本符合. 可以认为实验测量数据与理论计算数相符合, 理论计算与实验测量数据相互证明.

3.1.4 频率响应

1. 测量方法

设置信号源输入电压 $v_s=1V$, 即电路输入电压 $v_i=10mV$, 改变输入信号频率, 分别在负载电阻为 $5.1k\Omega$ 和负载开路时测量输出电压 v_o , 根据式(3-3)计算对应频率下的电压增益, 进而根据式(3-8)即可将电压增益单位转化为 dB. 列表记录数据, 最后根据所得数据绘制波特图.

$$Gain = 20 \log |A_v| \text{ dB} \quad (3-8)$$

2. 实验数据

单级 BJT 共射放大电路的频率响应测量结果如表 3.1.3 所示. 其中, 由于数据太小无法测量的数值用‘-’标示, 由于是否引入负载电阻造成通频带变化导致两次需要测量的频率有变化, 为测量的频率点用‘~’标示. 约-3dB 点用绿色荧光标示, 约-20dB 点用灰色荧光标示.

表 3.1.3 单级放大电路频率响应

f(Hz)	$R_L=5.1k\Omega$			$R_L=\infty$		
	$v_i(mV)$	$v_o(V)$	Gain(dB)	$v_i(mV)$	$v_o(V)$	Gain(dB)
50	10	0.05	14.32	10	0.11	20.51
100	10	0.10	20.00	10	0.21	26.24
200	10	0.20	26.02	10	0.40	32.04
500	10	0.45	33.06	10	0.90	39.08
1k	10	0.73	37.27	-10	1.46	43.29
2k	10	0.94	39.46	10	1.87	45.44
5k	10	1.05	40.42	10	2.05	46.24
10k	10	1.07	40.59	10	2.10	46.44
100k	10	1.07	40.59	10	2.07	46.32
150k	10	1.07	40.59	10	1.95	45.80
200k	10	1.07	40.59	10	1.80	45.10
300k	10	0.98	39.82	10	1.53	43.69
500k	10	0.85	38.59	10	1.14	43.16
700k	10	0.74	37.38	10	~	~
1M	10	0.58	35.27	10	0.65	36.25
2.8M	10	0.24	27.60	10	0.22	26.85
6M	10	0.11	20.67	10	~	~
10M	10	-	-	10	0.05	14.65

另, 为更直观地呈现出单级 BJT 共射放大电路的频响特点, 根据表 3.1.3 中的记录, 绘制波特图. 纵坐标为 Gain, 单位为 dB; 横坐标为频率, 采用十倍频率分布, 单位为 Hz. 所绘波特图如图 3.1.2 所示. 其中, 蓝色线表示 $R_L=5.1k\Omega$ 的频率响应, 绿色线表示负载开路时的频率响应.

3. 数据分析

接入负载电阻后, 负载电阻与集电极电阻并联, 导致交流负载等效电阻 R_L 减小, 从而导致通频带电压增益 A_v 下降. 根据增益带宽积不变的性质即可推知, 通频带带宽应增加.

首先对低频截止频率 f_L 进行讨论. 低频响应主要由旁路电容决定, 且在 BJT 共射放大电路中, 低频截止频率 f_L 主要由输入侧决定. 而是否接入负载电阻对输入侧没有影响, 因此, f_L 应基本保持不变. 其次对高频截止频率 f_H 进行讨论. f_H 主要取决于晶体管极间电容. 接入极间电容后, 输出回路的等效电阻减小, 输出回路的时间常数降低, 导致高频截止频率升高.

观察图 3.1.2 可知, 接入负载电阻前后的频响变化情况与理论分析基本一致, 可以认为理论计算与实验测量结果相互证明.

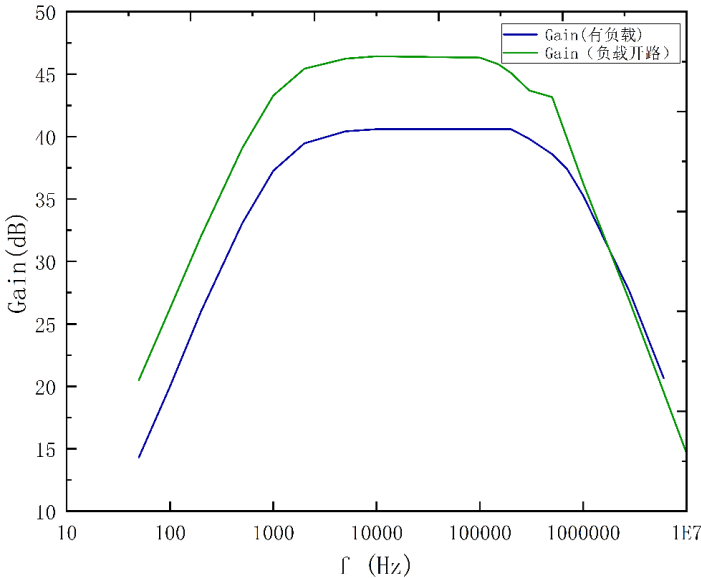


图 3.1.2 单级 BJT 共射放大电路频率响应

3.1.5 谐波失真

1. 测量方法

设置电压源输出 10kHz 正弦波, 输出电压分别为 3mV, 6mV, 9mV, 12mV. 示波器探头接电路输出端口, 使用示波器 MATH 功能中 FFT 选项, 观察输出波形各次谐波强度 L_n (单位为 dB). 利用式(3-9)即可计算谐波失真度.

$$d_n = 10 \exp\left(\frac{L_n - L_1}{20}\right) \cdot 100\% \quad (3-9)$$

2. 实验数据

实验测量所得数据如表 3.1.4 所示. 其中, ‘-’表示数据极小, 难以计算, 无法展示. ‘~’表示观察不到该分量谐波的强度.

表 3.1.4 谐波失真

v_i (mV)	L_1 (dB)	L_2 (dB)	L_3 (dB)	d_2	d_3
3	-14.0	-50.0	~	0.27%	-
6	-7.4	-39.4	-59.4	2.51%	0.25%
9	-5.0	-32.6	-52.0	4.17%	0.45%
12	-1.8	-27.8	-52.4	5.01%	0.30%

3. 数据分析

理论分析可知, BJT 共射放大电路的谐波失真度随输入电压的增大而显著增加, 主要由于晶体管进入非线性区 (截止或饱和) 导致波形畸变; 在小信号输入时失真较低, 而大信号

下非线性效应加剧,使谐波失真(如二次、三次谐波)迅速上升.从数据整体变化趋势分析,除 12mV 输入的 d_3 可能由于 FFT 分析波形不稳定导致测量误差较大以外,失真率 d_n 总体随 v_i 增大而增大,基本符合理论分析结果.

3.2 双极 BJT 共射放大电路

与单级 BJT 共射放大电路不同的是,双极放大电路引入了有无负反馈(分别对应闭环\开环)的变量,由开关 S 的开闭控制.双极 BJT 共射放大电路电路图如图 3.2.1 所示.

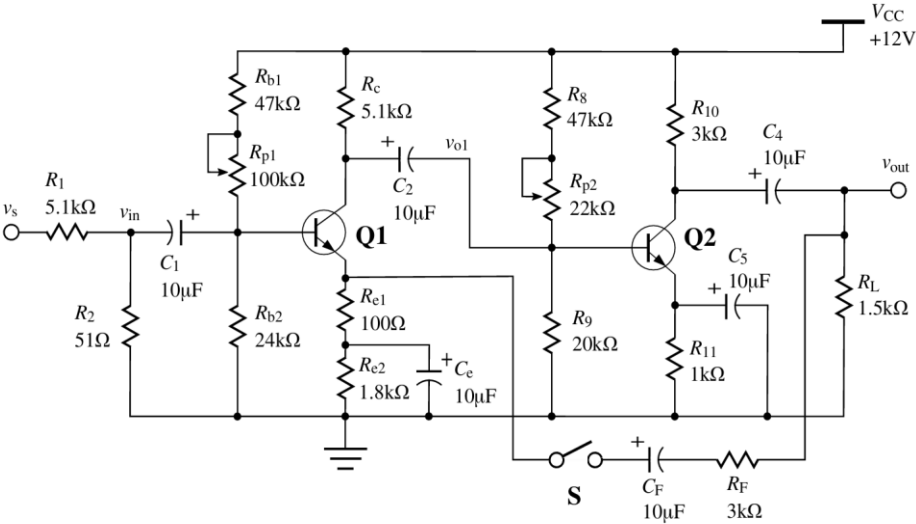


图 3.2.1 双极 BJT 共射放大电路

3.2.1 静态工作点

1. 测量方法

按图 3.2.1 所示电路图连接电路,使用 $\pm 12V$ 直流电压源供电,设置最大允许电流为 0.05A. 电路输入端接地,调节电位器 R_{p1} 和 R_{p2} ,使电路在开环/闭环条件下的 V_{c1} 与 V_{c2} 都稳定保持在 6V. 使用万用表直接测量需要记录的电压. 测量电位器阻值时,需将电位器从电路中断开. 测量共射电流方法系数 β 的方法同 3.1.1 小节中的测量方法相同,在此不做赘述.

2. 实验数据

实验数据记录如表 3.2.1 所示.

表 3.2.1 静态工作点

	$V_{C1}(V)$	$V_{B1}(V)$	$R_{p1}(k\Omega)$	β_1	$V_{C2}(V)$	$V_{B2}(V)$	$R_{p2}(k\Omega)$	β_2
开环	6	2.84	26.65	175	6	2.61	20.30	237
闭环	6	2.84	26.65	175	6	2.62	20.30	237

3. 数据分析

根据电阻分压定律可进行理论计算. 忽略基极电流, 计算得到 V_{B1} 和 V_{B2} 分别为 2.95V 和 2.75V, 而实际分压由于基极电流的影响, 会比该计算结果稍小, 观察表 3.2.1 中的记录可知, 测量结果与理论分析结果基本符合. 且计算得到的 β 值符合一般 BJT 共射放大系数的经验值. 可以认为实验结果正确.

3.2.2 交流电压增益

1. 测量方法

与 3.1.1 小节的测量方法基本相同, 在此不做赘述. 只需注意在保证输出波形不发生失真, 且输出信号足够大, 能够准确测量其峰峰值的条件下灵活改变输入电压即可.

2. 实验记录

双极 BJT 共射放大电路在开环/闭环条件下的交流增益测量结果如表 3.2.2 所示. 其中, ‘-’表示对应数值太小, 难以测量或计算.

表 3.2.2 交流电压增益(为简化, 数据取绝对值, 暂不考虑相位的影响)

	$v_i(\text{mV})$	$v_{oi}(\text{V})$	$v_{out}(\text{V})$	A_{v1}	A_{v2}	A_v
开环	1	15.2	1.00	15.2	65.8	1000
	2	28	1.98	14	70.7	990
闭环	2	-	0.06	-	-	31
	10	11.4	0.29	1.14	25.6	29.2
	20	20.5	0.60	1.03	29.1	29.8

3. 数据分析

开环条件下, 根据 3.1.2 节所述的计算方法进行理论计算, 在负载开路条件下取第二级放大电路的输入电阻为 3.1.3 节所测得的 $2.65\text{k}\Omega$, A_{v1} 的计算值为 14.06, 与测量值基本相符. 而 A_{v2} 的理论计算值也与 3.1.2 节所述相同, 约为 66.5, 与测量值相符. 可以认为测量与理论相互验证, 测量正确.

闭环条件下, 受限于笔者模拟电路理论分析水平有限, 不会分析带反馈的 BJT 多级放大电路, 无法进行理论测量. 但注意到测量值 A_v 与指导教师给出的约 30 的参考值相符, 也可认为测量准确无误.

3.2.3 输入输出电阻

1. 测量方法

多级放大电路的输入/输出电阻测量方法与 3.1.3 节所述测量方法相同, 在此不做赘述.

2. 实验数据

实验测量数据如表 3.2.3 所示. 表 3.2.3 中的电压值为有效值.

表 3.2.3 输入/输出电阻

	$R_s=5.1\text{k}\Omega$			$R_L=1.5\text{k}\Omega$		
	$v_s(\text{mV})$	$v_i(\text{mV})$	$r_i(\text{k}\Omega)$	$v_{out}(\text{mV})$	$v_o(\text{mV})$	$r_o(\text{k}\Omega)$
开环	0.87	0.62	12.65	0.6	1.76	2.9
闭环	17.62	13.61	15.08	0.407	0.416	0.026

3. 数据分析

开环条件下, 在 3.1.3 节所述的计算方法的基础上考虑射极电阻的影响, 计算得到输入电阻的理论值约为 $10\text{k}\Omega$; 输出电阻约等于第二级放大电路的集电极电阻, 即 $3\text{k}\Omega$. 与实验测量结果相符合.

闭环条件下, 根据模拟电路理论, 增加电压串联负反馈会使电路特性变为电压控制电压源(VCVS)输入电阻增大, 输出电阻显著减小, 从而符合 VCVS 特性. 与实验测量结果定性符合.

3.2.4 频率响应

1. 测量方法

开环条件下, 设置双极放大电路输入电压为 1mV ; 闭环条件下, 设置为 100mV . 除此设置外, 其余方法见 3.1.4 节.

2. 实验数据

双极 BJT 共射放大电路频响特性测量数据如表 3.2.4 所示, 约-3dB 点用绿色荧光标示.

表 3.2.4 双极 BJT 共射放大电路频响特性

开环				闭环			
F(Hz)	vi(mV)	vo(mV)	Av	F(Hz)	vi(mV)	vo(V)	Av
50	1	29.4	29.4	50	100	0.62	6.2
100	1	71.2	71.2	100	100	1.16	11.6
200	1	195	195	200	100	1.96	19.6
500	1	526	526	280	100	2.28	22.8
800	1	720	720	500	100	2.7	27.0
1k	1	808	808	1k	100	2.92	29.2
2k	1	928	928	2k	100	2.93	29.3
5k	1	92	92	5k	100	2.93	29.3
10k	1	1012	1012	10k	100	2.94	29.4
100k	1	816	816	100k	100	2.99	29.9
140k	1	716	716	150k	100	2.99	29.9
150k	1	696	696	8M	100	2.3	23.0
1M	1	149	149	10M	100	1.88	18.8

3. 数据分析

据表 3.2.4 中的记录, 观察可知, 接入负反馈后的通频带宽度从约 140kHz 提升至约 8MHz, 得到极大提升. 理论分析可知, 相同 BJT 晶体管增益带宽积近似常数. 因此, 接入负反馈后, 增益有极大降低, 对应带宽应有极大提高, 与实验测量结果相符合.

3.2.5 谐波失真

1. 测量方法

除输入电压不同外, 其余测量方法见 3.1.5 小节. 输入电压的设置见表 3.2.5.

2. 实验数据

双极 BJT 共射放大电路谐波失真度的测量数据记录如表 3.2.5 所示. ‘-’表示数据太小, 难以测量或计算.

表 3.2.5 双极 BJT 共射放大电路谐波失真

	vi(mV)	L ₁ (dB)	L ₂ (dB)	L ₃ (dB)	d ₂	d ₃
开环	1	-8.6	-39.4	-60.6	2.88%	0.25%
闭环	34	-10.6	-	-	-	-

3. 数据分析

可见, 由于反馈放大电路增益较低, 能显著减小非线性失真, 抑制干扰和噪声.

四、误差分析

4.1 交流小信号的测量误差

实验测量所用双踪示波器在测量幅值较小(几十毫伏量级)的交流小信号时, 波形散布严

重,难以从示波器显示波形中找出准确的交流信号峰峰值.在实验中,为了避免这一误差,尽量在保证不失真的前提下,设置较大的输入信号,确保待测信号够大,能够准确测量.

4.2 示波器 FFT 图像不稳

实验中注意到,使用双踪示波器 MATH-FFT 功能时,其计算结果会显示为折线图,但该图像并不稳定,很难准确测量.导致谐波失真部分的测量结果可能出现较为严重的误差.在实验测量中,取抖动的中间值,以求尽量避免此误差.

五、结论

单级共射放大电路的静态工作点与电压增益实验结果与理论分析高度一致,证明了分压偏置和小信号模型的正确性.测得的基极电压、集电极电流及放大系数 β 均与忽略基极电流时的理论值相近,电压增益的实测值在不同电位器设定下亦与小信号等效电路计算结果吻合,表明实验有效验证了晶体管参数之间的理论关系.

接入不同负载电阻后,中频增益下降但通频带宽显著扩展,低频截止基本不变,高频截止上移的现象符合增益-带宽积不变和米勒效应的理论预期.实验中, R_L 从开路到 $2.2\text{ k}\Omega$ 时,带宽从约几十千赫兹提升至数百千赫兹以上,波特图形状与理论分析完全一致,验证了负载对频率响应的影响规律.

谐波失真测量显示,随着输入电压幅度增大,二次、三次谐波成分及失真率明显上升,反映了晶体管在大信号下进入非线性区后的波形畸变特性.在小信号范围内,失真率低于 1%,与理论中小信号线性放大的假设相符,证明了实验对谐波失真规律的有效验证.

双级放大及负反馈实验表明,引入反馈后总增益大幅下降,但带宽从约 140 kHz 扩展至约 8 MHz ,输入阻抗增大、输出阻抗显著减小,谐波失真得到有效抑制,系统稳定性与线性度均大幅提升.这些结果与反馈改善放大器性能的基本原理完全一致,充分证明了实验目的.

致谢

真诚感谢指导教师方元老师对实验过程中笔者种种问题的耐心解答.

附件

实验记录原件：

<https://box.nju.edu.cn/d/96dcbb3e65c64dd9b9e9/>