

ACLK-1000模拟电路实验套件 实验指导书

(单管共射放大电路分册)

Rev 1.0

华清科仪（北京）科技有限公司

 **Huatsing Instruments**

目 录

第 0 章 实验器材熟悉与掌握	- 1 -
0.1 ACLK-1000 模拟电路实验套件介绍	- 1 -
0.2 HPI-1000 口袋仪器安装与使用注意	- 2 -
0.3 实验 0: 熟悉 ACLK-1000 模电套件的使用	- 5 -
上篇: 半定制区实验	- 8 -
第 1 章 单管共射放大电路	- 8 -
1.1 实验 1-1: 实验电路搭建与部分参数测量	- 9 -
1.2 三极管工作原理与放大电路工作原理分析	- 15 -
1.3 实验 1-2: 最佳静态工作点 Q 确定与失真分析	- 18 -
1.4 实验 1-3: h 参数等效模型与动态参数测量	- 22 -
1.5 *实验 1-4: 静态工作点稳定电路	- 26 -
1.6 *放大电路相位失真分析	- 31 -
1.7 输入负载线与输出负载线研究	- 33 -
1.8 实验 1-5: 阻容耦合与直接耦合	- 37 -
1.9 *实验 1-6: 放大电路效率 η	- 44 -
1.10 本章小结	- 47 -
附录 A 部分思考题参考答案	- 50 -

第 0 章 实验器材熟悉与掌握

0.1 ACLK-1000 模拟电路实验套件介绍

感谢使用华清科仪推出的 ACLK-1000 模拟电路实验套件，该套件可与 HPI-1000 口袋仪器无缝连接配合使用，能够完成众多模拟电路实验项目。



ACLK-1000 模拟电路实验套件

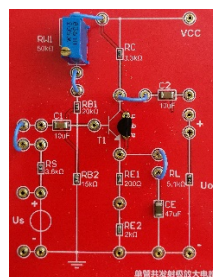
套件内各种器件与工具介绍

1. 配套工具

ACLK-1000 套件中配备的实验工具:



配套工具



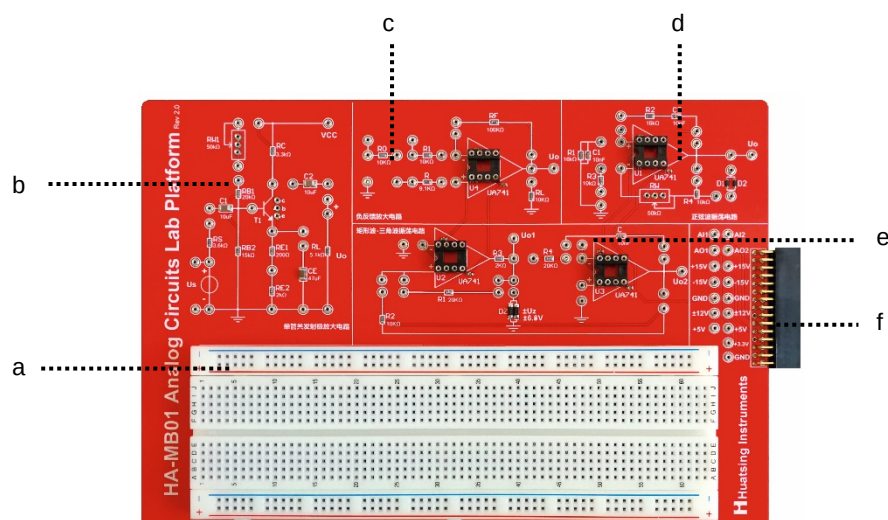
用成形短接线连接电路

- 万用表：UT120C 型 3 3/4 位数字万用表，可以测量交/直流电压、交/直流电流、电阻、电容、频率、占空比、二极管通断，使用前请仔细阅读万用表使用手册；
 - 螺丝刀：一字/十字可换，顶端带磁铁，从面包板上拔除芯片时请使用一字端；
 - 剥线钳：用于切断短接线，并剥除线皮；
 - 平头头镊子：用于成形 3cm 以下的短接线，用这种成形短接线搭建的电路整洁清晰，容易查找故障点。
- 



2. HA-MB01 模电实验板

塑料盒下层为实验用的 HA-MB01 模电实验板



HA-MB01 模电实验板

HA-MB01 模电实验板部件描述

序号	名称	描述
a	用户实验区	可以使用套件中专用短接线连接到半定制实验区的散孔座，自行搭建电路，扩展实验内容
b	半定制实验区 1	可以完成单管共射放大电路实验
c	半定制实验区 2	可以完成负反馈放大电路实验
d	半定制实验区 3	可以完成正弦波振荡电路实验
e	半定制实验区 4	可以完成矩形波-三角波振荡电路实验
f	HPI 专用接口	用于连接 HPI-1000 口袋仪器， 注意方向，插拔时切勿把 HPI-1000 口袋仪器接口内的插针碰弯折断

0.2 HPI-1000 口袋仪器安装与使用注意

HPI-1000 口袋仪器如果已经正确安装并且已掌握使用技巧可以跳过此节，直接阅读后续具体实验章节，否则务必认真阅读这一部分。

HPI-1000 口袋仪器软件安装

1. 上位机程序下载

首先，请从华清科仪网站 http://www.huatsing.com/download/d_pis/ 下载上位机程序。



文件名	版本号	文件大小	发布日期	详细信息	下载
HPI-1000多功能口袋仪器快速指南	Rev 1.1	0.9M	2017.11.12	详细信息	下载
HPI-1000多功能口袋仪器使用指南	Rev 1.0	1M	2018.03.01	详细信息	下载
HPI-1000多功能口袋仪器上位机程序	v3.1.3.19	28M	2019.04.15	详细信息	下载
数字模拟 Lab01——口袋仪器的安装与操作		39M	2018.04.03	详细信息	下载

上位机程序下载

2. 上位机程序安装

安装上位机程序不必连接硬件，直接运行 Pocketlab_Setup.msi 安装程序即可，默认安装路径是在 C 盘根目录下建立一个 PocketLab 文件夹，如果不合适可以自行更改安装路径。

如果安装过程出现如下提示，说明电脑上装有之前版本的上位机程序，可以先删除旧版本程序，再进行安装。



3. 硬件连接

请用 HPI-1000 口袋仪器套件中的 micro-USB 线（黑色）连接口袋仪器后端中间的 USB 口与电脑（边上的辅助供电口可不连接）。正确连接后，口袋仪器顶面的指示灯应呈现绿色常亮状态，**如果呈现不亮或出现黄色、红色或闪烁状态，请立即断开 USB 连线并检查设备与连接是否正确。**



HPI-1000 口袋仪器后端接口



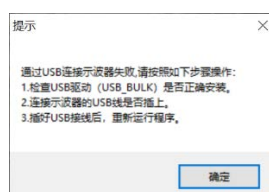
顶面指示灯

4. 硬件驱动安装

硬件连接后电脑右下角会显示 Generic Bulk Device 设备已安装就绪的提示。



但这不意味的硬件驱动已经正确安装，这时点击桌面上的“口袋实验室”运行图标会看到如下提示，这说明硬件驱动还未正确安装。



打开电脑设备管理器，可以看到电脑并没有正确识别 HPI-1000 口袋仪器，因此在 Generic Bulk Device 设备图标上有一个黄色惊叹号。请双击设备图标，选择更新驱动程序。



接下来指定一下驱动程序的位置（选择手动查找而非自动搜索）。



硬件驱动位于上位机程序文件夹的 windows driver 子目录中，如果选择默认安装路径，那就是 C:\PocketLab\windows driver，注意把“包括子文件夹”选项勾选上。



然后电脑将安装驱动，驱动安装好后将显示正确的设备名称 TivaWare Bulk Devices，并且图标上的黄色惊叹号也将消失。至此驱动安装完成。



HPI-1000 口袋仪器使用注意

口袋仪器包含众多模块，结构复杂，又仅依靠 USB 口供电，驱动能力有限，因此使用时务必注意以下电气特性，因为使用不当造成的设备损坏不在保修范围之内。

1. 绝对禁止事项

- 信号源（AO1 与 AO2）绝对禁止对地短路，哪怕瞬间也有可能造成设备损坏；
- 信号源（AO1 与 AO2）负载阻抗不得低于 1K Ω ；
- 各路固定电源与程控电源禁止对地短路；

2. 口袋仪器各个模块承载参数（超出以下参数有可能造成设备损坏）

模块	特性	参数
示波器	输入信号范围	-15 ~ +15V
信号源 1（大信号）	输出电流	10mA
信号源 2（小信号）	输出电流	5mA
逻辑分析仪	输入信号范围	0 ~ 4V
固定电源 （不使用辅助电源）	+5V 驱动能力	100mA
	-5V 驱动能力	20mA
	+15V 驱动能力	50mA
	-15V 驱动能力	50mA
	+3.3V 驱动能力	200mA
程控电源	-12 ~ +12V 驱动能力	20mA

0.3 实验 0：熟悉 ACLK-1000 模电套件的使用

实验目的

熟悉 ACLK-1000 模拟电路实验套件的使用，避免人为损坏。

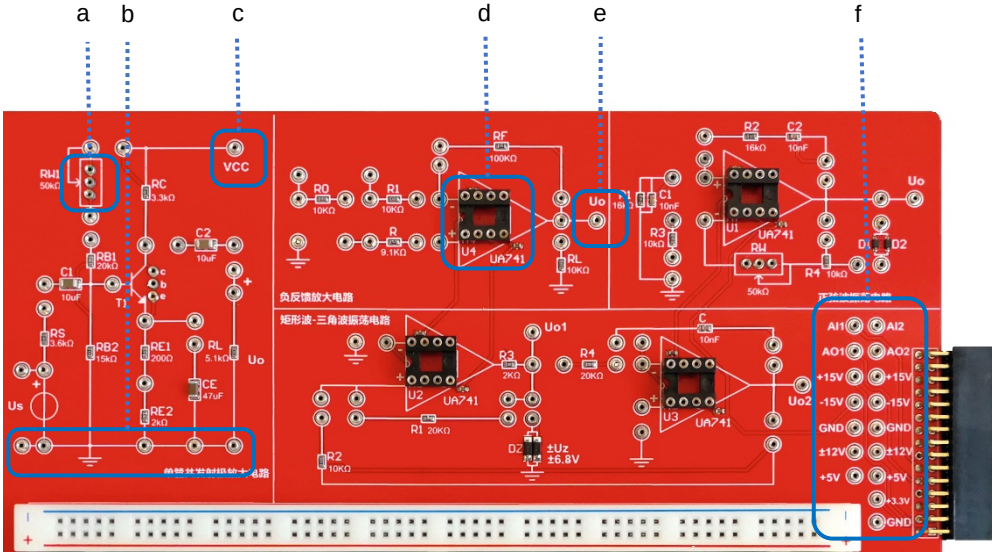
实验器材

1. ACLK-1000 模拟电路实验套件
2. HPI-1000 口袋仪器
3. 短接线、剥线钳、镊子等

HA-MB01 面包板的使用

ACLK-1000 套件中最主要的组成部分就是 HA-MB01 模电实验板，虽然之前已经简要介绍过实验板上各个部件名称与作用，但是熟悉其中一些模块特性与电路连接细节可以提高后续实验的成功率，更重要的是避免人为误操作造成的设备损坏。

1. 熟悉 HA-MB01 实验板的电气连接



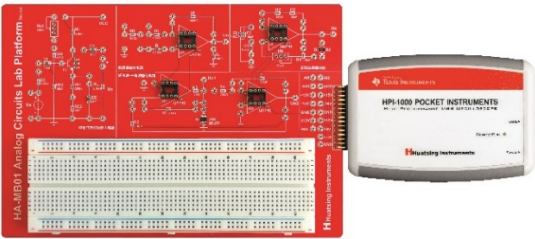
HA-MB01 实验板电气连接

序号	描述
a	Rw 标志区域应该插上 3296 型电位器，阻值是电位器中间脚与下面插孔中引脚的阻值；
b	半定制实验区凡是有 GND 标志的散孔座都已经连接到了 f 区的 GND 端；
c	单管共射放大电路实验区的 Vcc 已经连接到了 f 区的+15V 端；
d	IC 芯片座只可以插入 TI UA741 运放芯片（注意方向），芯片的 7 脚（Vcc+）、4 脚（Vcc-）已经连接到 f 区的+15V、-15V 电源。
e	半定制实验区的 Uo 端都是浮空状态，应该根据实际情况连接到 f 区的 AI1 或 AI2 端；
f	HPI-1000 口袋仪器信号及电源区，其中 GND 连接的是口袋仪器模拟地 AGND

2. 熟悉 HA-MB01 实验板与 HPI-1000 口袋仪器的连接

将 HA-MB01 实验板的 HPI 专用接口小心的插入与 HPI-1000 口袋仪器的前部接口，然后将 HPI-1000 口袋仪器与电脑 USB 接口通过 micro-USB 线连接（不必打开上位机软件）。正确连接后，口袋仪器顶面的指示灯应呈现绿色常亮状态，如果呈现不亮或出现黄色、红色或闪烁状态，请立即断开 USB 连线并检查设备与连接是否正确。

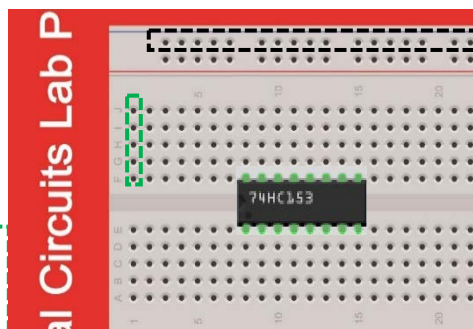
连接好后，用 ACLK-1000 套件中的万用表测量“单管共射放大电路”实验区 Vcc 端电压是否是+15V；UA741 芯片插座的正负电源端是否是±15V；半定制实验区的 GND 是否与 f 区的 GND 端相连。



HA-MB01 实验板与 HPI-1000 口袋仪器连接

3. 熟悉 HA-MB01 实验板的用户实验区

简单的电路可以在半定制实验区搭接，复杂一些的扩展电路、自定义电路就要借助用户扩展实验区（面包板区域）了。面包板区域由 2 个中心块和 3 个边条组成，其中红色、蓝色线条内的边条区域每一行的孔是连通的，（图片中黑色虚线框内的孔都是连通的）；中心块的每一列的 5 个孔是连通的（图片中绿色虚线框内的 5 个孔都是连通的）；芯片应该像图片中那样插接在中心块沟槽的两侧。



需要特别注意的是：1.芯片在插拔过程中要特别小心不要把管脚弄弯折断，在拔除芯片时可以借助实验套件中配备的一字螺丝刀；2.在面包板和端子上连接导线时也要特别小心不要把线头折断在孔洞内，尤其禁止把面包板或端子上连接的多根导线一下子用力同时拔掉，这样极易造成线头折断在孔内或是孔内簧片损坏。

上篇：半定制区实验

半定制实验区里面有 4 个实验电路，分别是：单管共射放大电路、负反馈放大电路、正弦波振荡电路、方波-三角波振荡电路，这 4 个电路都是模电学习中的重点。每个电路都有很多概念、计算、分析方法、调试技巧需要掌握，每个电路也都可以设计安排多个实验项目。为了结构清晰、方便初学者调试，半定制实验区的电路都给出了基本的拓扑结构，但是关键点可以让实验者用短接线连接或断开、关键器件与可以随时更换。如果在给定的电路上要增加器件或子电路，可以借助下方的用户实验区来完成。

本实验指导书的理论讲述与实验安排主要依据高等教育出版社出版的，华成英、叶朝晖编著的《模拟电子技术基础（第五版）》相关章节，此书下面简称为**教材**。



模拟电子技术基础（第五版）

本实验指导书与上述教材使用一致的符号的规则：

- $I_B(I_{BQ})$ 大写字母、大写下标，表示直流量（或静态电流）
- I_b 大写字母、小写下标，表示交流有效值
- i_B 小写字母、大写下标，表示交直流瞬时总量
- i_b 小写字母、小写下标，表示交流瞬时值



华清科仪微信公众号

另外，有些实验视频与原理动画（注明 GIF 的图片）书中无法展示，我们给出二维码，请读者们扫描进入[华清科仪公众号](#)的教学中心栏目观看。

第 1 章 单管共射放大电路

单管共射放大电路是模电学习中遇到的第一个重要章节，它上承晶体管原理、下启多级放大电路与集成运放电路，是课程的核心章节之一。本身又包含了众多概念、分析方法、调试技巧，因此是学习的重点与难点。有些同学就是因为这个电路实验做的不顺利从而失去对模电学习的兴趣与信心。另一方面，有些同学又觉得这个电路很简单，很快就完成了电路放大倍数 β 、电压放大倍数 A_u 、输入/输出阻抗等基本参数测量……于是就认为实验已经完

成，没什么可继续研究的了。殊不知这个实验电路还有很多可以研究调整的地方，如果能通过实验把电路的一些细节都研究透，再结合理论分析，一定会对单管共射放大电路有更深刻的体会，从而对模拟电路后续章节的学习大有裨益。

基于以上分析，我们把传统上只安排 1~2 课时完成的单管共射放大电路实验拆分成 6 个小的实验；同时打破了一般实验指导书中先进行理论讲解，然后再动手实验的流程，而是结合实验现象有针对性插入 3 小节理论分析，从而让理论分析不再空泛。

实验指导书超出一般要求的理论分析与实验前面加以*标注，大家可以根据自己情况加以取舍。

1.1 实验 1-1：实验电路搭建与部分参数测量

实验目的

- 完成单管共射放大实验电路搭建，看到输出波形；
- 完成三极管电流放大倍数 β 测量；
- 完成电路电压放大倍数 A_u 测量；

实验器材

1. HA-MB01 实验板、9011 型三极管
2. 工具与配件：
 - a) UT120C 万用表
 - b) HPI-1000 口袋仪器
 - c) 短接线、剥线钳、镊子……

实验要求

在 HA-MB01 实验板上单管共射放大电路半定制实验区完成实验电路搭建（完成此实验后不要拆，后续实验还将继续使用），看到输出波形；完成三极管电流放大倍数 β 、电路电压放大倍数 A_u 等基本参数测量。

实验过程：

单管共射放大电路的全称是单管共发射极放大电路，电路原理图如下：

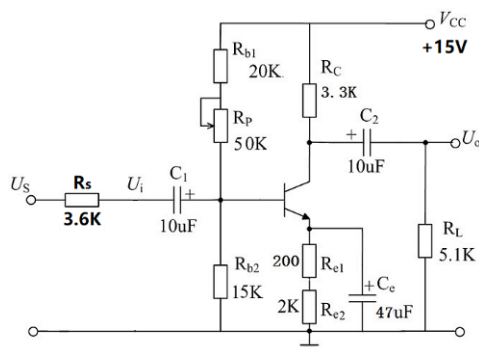


图 1.1.1 单管共射放大电路（原理图）

这个电路在 ACLK-1000 实验套件中的 HA-MB01 实验板上已经有了如上图所示的半定制实验区，电路拓扑结构已经搭好，Vcc 与地也已经通过 HPI 接口接到了 HPI-1000 多功能口袋仪器的+15V 与 AGND 端。做实验的时候只需要根据实验需求选用不同型号的器件，通过短接线连接或断开一些关键点的连接就行。

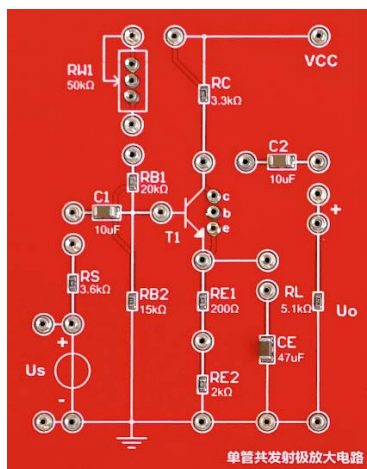


图 1.1.2 HA-MB01 实验板上的单管共射放大电路实验区

我们使用 ACLK-1000 模电套件中提供的器件、工具及短接线，根据电路原理图搭建出单管共射放大电路，其中三极管选用 NPN 型 9011 三极管。

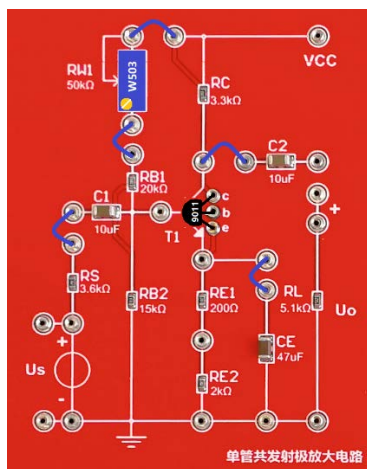


图 1.1.3 单管共射放大电路（实际电路）

电路连接好后，将 HA-MB01 模电实验板的 HPI 接口小心的插入与 HPI-1000 多功能口袋仪器前部接口（千万不要把口袋仪器的插针碰弯碰断）。然后用 micro-USB 线一端插入将 HPI-1000 多功能口袋仪器后面中接口，另一端连接电脑的 USB 接口。如果连接正确，口袋仪器顶面的 Ready/Run 指示灯应呈绿色常亮状态；如果指示灯出现其他状态（黄色、红色或是闪烁）请立即断开与电脑的连接，检查电路连接、仪器连接是否正确，是否存在短路的地方。

▪ 放大电路静态指标测量

首先进行放大电路静态工作点的测量与调试，在这一过程中使用 ACLK-1000 套件中的配套万用表进行测量即可，无需使用 HPI-1000 多功能口袋仪器的信号源与示波器功能，因此口袋仪器上位机软件不需要启动。

首先通过调整电位器 R_{w1} ，使得 9011 三极管集电极电压 U_{cQ} 为 $7.5V(V_{cc}/2)$ 。之所以调整到 $V_{cc}/2$ ，是按照教材讲述：在单电源供电的情况下，如果想尽可能的对信号进行不失真放大，就要把输出端的静态工作电压调整到 $V_{cc}/2$ 左右，这样可以得到峰值最大的正负半周对称的输出信号（通过后续实验我们会发现实际实验中这样设置并不完全正确）。

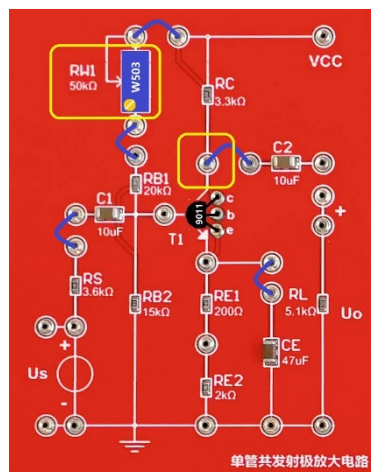


图 1.1.4 调整 R_{w1} ，使得 $U_c = V_{cc}/2$

调整好 U_{cQ} 后，我们用万用表测量 U_{BEQ} 与 U_{CEQ} ，得到 $U_{BEQ} = 0.706V$ （这与教科书中的硅管 $U_{BEQ} \approx 0.7V$ 一致）， $U_{CEQ} = 2.561V$ 。再测量 R_{w1} 电位器中心抽头与下端边脚的阻值是 $3.45k\Omega$ 。

***注：** U_c 指的是三极管集电极 c 对地电压； U_{ce} 指的是三极管集电极 c 与发射极 e 之间的电压； U_b 指的是三极管基极 b 对地电压； U_{be} 指的是三极管基极 b 与发射极 e 之间的电压； Q 是静态工作点 Quiescent 的字头；

接下来我们计算 9011 三极管的电流放大系数 β ，在这里 β 近似取值 I_{cQ}/I_{bQ} ，所以得想办法计算 I_{cQ} 与 I_{bQ} 。教材 2.2.2 节中给出的计算 I_{cQ} 与 I_{bQ} 的公式不适用这里的实验电路，不可生搬硬套。

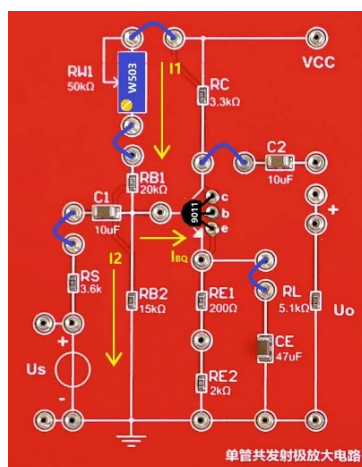


图 1.1.5 I_{bQ} 的测量

按照图 1.1.5, 根据基尔霍夫定律, $I_1=I_2+I_{BQ}$, 我们只要测量测试点 T1 的电压值 (U_{BQ}), 就能计算得到 I_1 与 I_2 , 从而得到 I_{BQ} (具体计算过程请自行推导)。使用万用表测量得到 $U_{BQ}=5.645V$ (这个值也可以通过公式 $U_{CQ}-(U_{CEQ}-U_{BEQ})$ 得到), 从而计算得到 $I_{BQ}=22\mu A$ 。

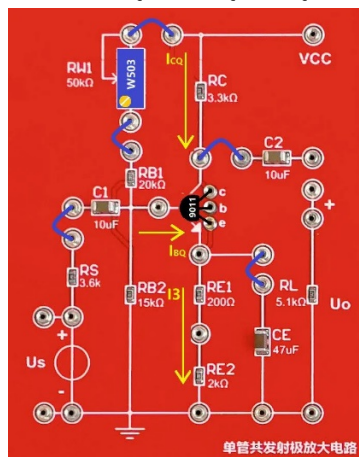


图 1.1.6 I_{cQ} 的计算

根据图 1.1.6, $I_{cQ}=(V_{cc}-U_{cQ})/R_c=2.262mA$, 这个结果同样可以依据基尔霍夫定律 $I_3=I_{BQ}+I_{cQ}$ 加以验证。现在 I_{BQ} 与 I_{cQ} 都已经知道了, 可以得到三极管的直流电流放大系数 $\beta \approx I_{cQ}/I_{BQ}=103$, 这是一个重要的直流参数。

放大电路动态指标测量

共射放大电路的静态指标测试完成后, 我们继续对电路的动态指标进行测试。动态测试要用 HPI-1000 多功能口袋仪器产生一个小信号, 将这个小信号经电路 U_s 端输入, 然后通过口袋仪器示波器 A/B 通道分别观测比较输入信号 U_i 及放大后的输出信号 U_o 。

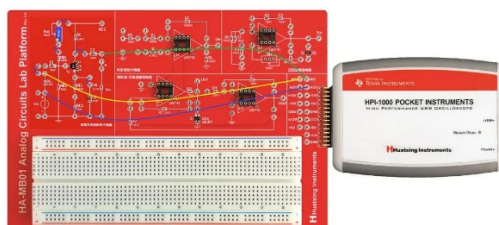


图 1.1.7 动态指标测试电路

从静态测试结果得知实验用的 9011 三极管的电流放大系数 β 在 100 倍左右, 输入信号不能太大, 否则有可能失真。因此在这个实验中我们使用口袋仪器的 AO2 信号源 (小信号源), 首先让其产生一个峰峰值 50mV, 频率 1KHz 的正弦信号。



图 1.1.8 峰峰值 50mV 的正弦波

如果电路搭建正确，我们可以从示波器 A/B 通道分别看到经过电阻 R_s 分压后的输入信号 U_i (黄色)与不带负载情况的输出信号 U_o (绿色)。

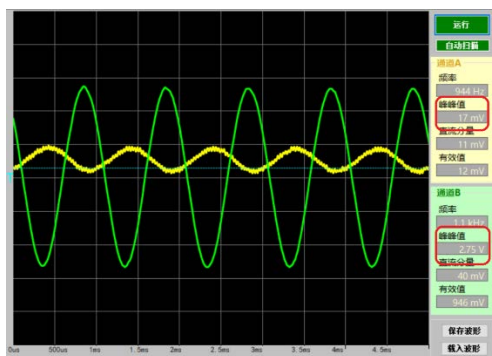


图 1.1.9 不带负载情况下的输入与输出信号

从上图可以看到输入信号 U_i 的峰峰值是 17mV，输出信号 U_o 的峰峰值是 2.75V，电路的电压放大倍数 $A_u = U_o/U_i = 162$ ，这是在不带负载的情况的电压放大倍数。接下来我们将 5.1K Ω 的负载电阻 R_L 接入电路，看一下放大电路的输出信号有什么变化。

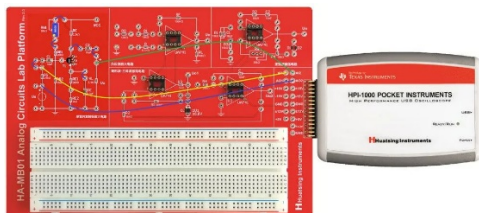


图 1.1.10 带负载情况下动态指标测试电路

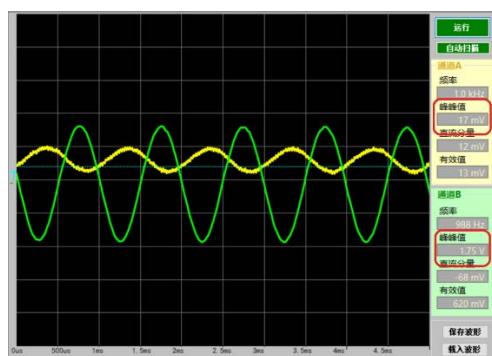


图 1.1.11 带负载情况下的输入与输出信号

由上图可以看到输入信号 U_i 的峰峰值还是 17mV，但是输出信号 U_o 的峰峰值由 2.75V 减小到 1.75V，因此电压放大倍数 A_u 由 162 减小到 103。如果我们在负载电阻 R_L 上并上一只 3K Ω 的电阻，使得负载由 5.1K Ω 减小到 1.9K Ω ，我们再看看输出信号的波形。

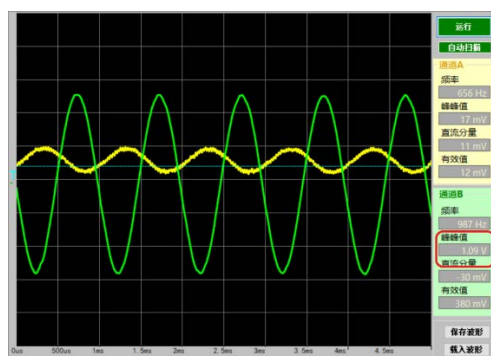


图 1.1.12 负载电阻减小到 1.9K Ω 时的输入与输出信号

我们可以看到输出信号峰峰值由 1.75V 进一步减小到 1.09V，电压放大倍数 A_u 也由 103 进一步减小到 64。由此可见，电路的电压放大倍数 A_u 不是一个固定值，它随着负载的变化而变化。

最后我们调节 AO2 信号源的幅值，看看电路在当前静态工作点 Q 设置下最大不失真输出信号的峰峰值 (U_{opp}) 是多少。

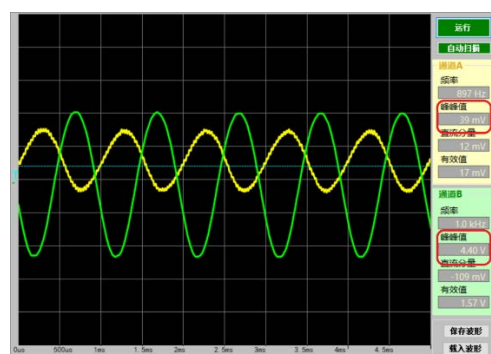


图 1.1.13 最大不失真输出信号

从上图可以看到电路在当前静态工作点 Q 设置下最大不失真输出信号的峰峰值是 4.4V（不带载），能不能调整静态工作点 Q，使得最大不失真输出信号的幅值进一步增大呢？后续实验将给出答案。

实验指导书中插图比较小，有些数字可能看不清，可以扫描右边二维码，在公众号中将插图放大查看。



单管共射放大电路 (1)

1.2 三极管工作原理与放大电路工作原理分析

实验 1-1 我们虽然成功搭建了单管共射放大电路，看到了输出波形，还测量了基本参数，反过头来我们结合实验对于三极管的工作原理以及放大电路的工作过程进行理论分析，为后续的实验以及电路参数调整打下理论基础。这一节在展示三极管的工作原理及电路工作过程时使用了大量动画（GIF 图片），效果非常好，若在实验指导书中看不到动画效果，请扫码移步到华清科仪微信公众号中观看。



单管共射放大电路（2）

三极管的工作原理（下述讲解都以 NPN 型三极管为例）

单管共射放大电路的核心器件是三极管——一个小的正弦信号加载到三极管的基极 b ，在适当的外部电路配合下，集电极 c 上就能得到一个大的正弦信号，这就是三极管的放大作用。三极管的内部结构与工作原理教材 1.3 节中有详细的讲解，这里采用一种更形象化的模型——水龙头来讲解，虽然不够严谨，但是更易于理解。

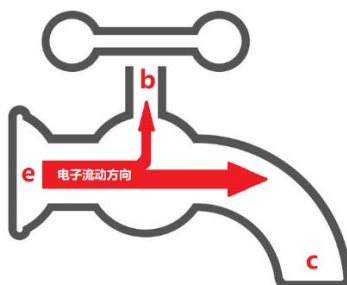
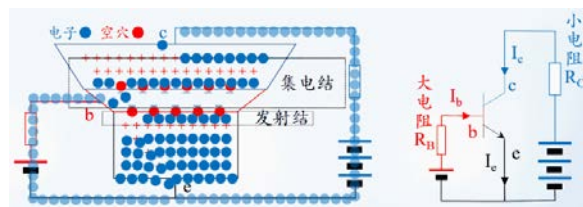


图 1.2.1 形象化的三极管模型

我们可以把三极管理解成一个水龙头，电子就是里面流动的“水流”（注意：电子流动方向与电流方向是相反的），“水流”来自发射极 e ，从集电极 c 流出，基极 b 就是水龙头的阀门，它控制着流出水流的大小，自身也要消耗一点水流。阀门开大一点，流出的水流就大一些，阀门本身消耗的水流的也多一点。从水龙头出水口（集电极 c ）流出的水流与流过阀门（基极 b ）的水流成固定的 β 倍比例关系。

下面我们以动画的形式演示一下三极管的工作流程。阀门（基极 b ）打开后控制着发射极 e 的电子涌入到基极区域，这时如果集电极 c 与发射极 e 之间有合适的外部电场，会把大部分电子进一步拉到集电极，形成集电极的电子流，形成集电极电流 I_c ；同时也有少部分电子从阀门（基极 b ）流出，在基极与发射极之间形成电子回路，产生基极电流 I_b 。



图（GIF）1.2.2 三极管工作原理（基极电流小）

阀门开的越大（ I_b 电流越大），越多的电子由发射极涌入，在合适的条件下能够得到更大的集电极电流 I_c 。阀门开启程度（ I_b 电流大小）与集电极得到电子多少（ I_c 电流大小）就是三极管的电流放大系数 β ， $\beta = I_c / I_b$ ，它由三极管的特性决定，与外电路无关。图 1.2.2 与图 1.2.3 以动画形式分别演示了“阀门”开启小与大的时候三极管内部的工作状况。

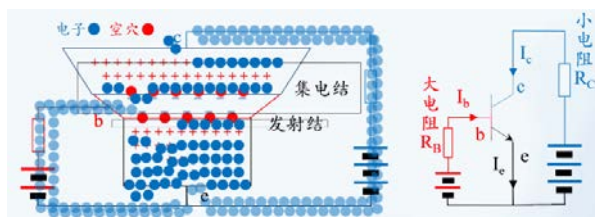


图 (GIF) 1.2.3 三极管工作原理 (基极电流大)

由三极管构成的放大电路还有一个电压放大系数 A_u ，它是输入信号与输出信号的电压之比 ($A_u = U_o/U_i$)，放大电路的电压放大系数 A_u 由三极管的电流放大系数 β 以及外部电路参数共同决定。

三极管的 3 个工作区

三极管有 3 个工作区，分别是放大区、截止区、饱和区。

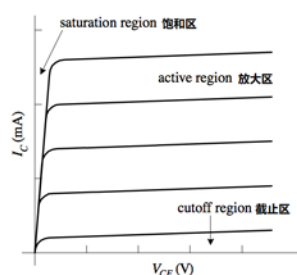


图 1.2.4 三极管 3 个工作区

图 1.2.2 与 1.2.3 演示的都是三极管工作在放大区的状况，这种状况可以对输入信号进行放大，因此叫放大区。如果阀门关闭（基极电流 I_b 很小或为 0），这时发射极 e 的电子就不可能进去基区，此时集电极 c 与发射极 e 间的外部电场再合适，也不可能把电子拉入集电极区域，集电极电流 I_c 也就很小，三极管处于截止状态，因此这一区域称为截止区。

比较难理解的是饱和区的命名，这一工作区指的是阀门打开，电子从发射区 e 涌入基区，形成了基极电流 I_b ，但是集电极与发射极间的外部电压 U_{ce} 太小，不足以将滞留基区的大量电子拉入集电区，从而使得基区的电子很快处于饱和状态（可以想象为水龙头的出水口堵住了）。这时就算进一步开大阀门（增加 I_b ），也不能让集电极电流 I_c 以 β 倍 I_b 成比例增大。饱和指的是基区的电子已经饱和的意思。

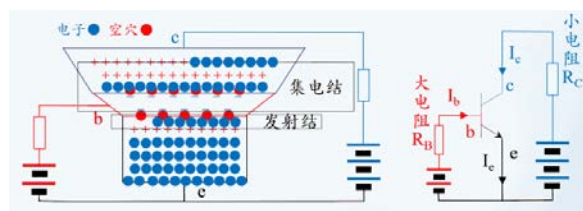


图 (GIF) 1.2.5 三极管饱和区工作示意图

图解法分析放大电路工作点

教材中图解法分析放大电路工作点使用的都是静态图片，这里以更直观的动画加以演示。

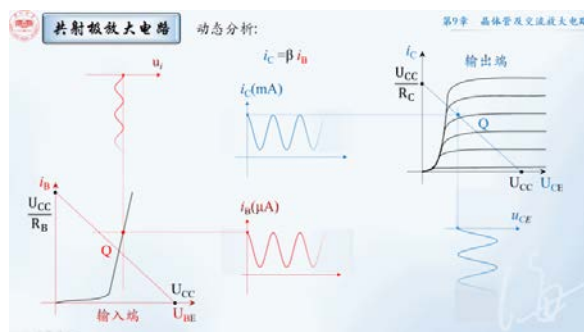
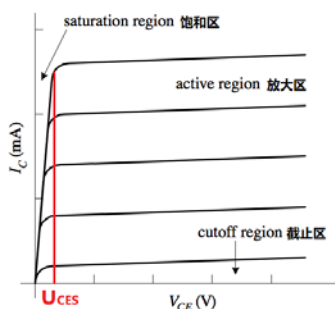
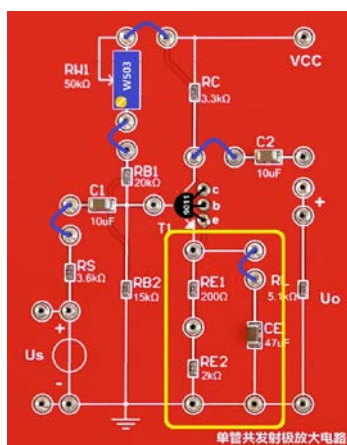


图 (GIF) 1.2.6 共射放大电路动画演示

从上面的动画可以看出输入信号比较小, 因此输入回路负载线移动范围也小; 输出信号比较大, 输出回路负载线移动范围也就大。为了能够让输出信号尽量不失真, 我们应该先确定输出回路的静态工作点 Q , 这也是实验 1-1 中我们一上来就先确定输出端静态工作点 U_{CQ} 的原因。当时我们设定 $U_{CQ} = V_{CC}/2$, 这是不准确的。从上面的分析可以看出三极管存在饱和区和截止区, 三极管如果工作在饱和区会出现失真, 因此输出信号只能在 V_{CC} 和 U_{CES} 之间变化, 而不能到 0, U_{CES} (Collector-emitter saturation voltage) 的中文名称是饱和管压降。从器件手册上可以查到, 9011 型三极管的饱和管压降 U_{CES} 不大于 0.3V。


 图 1.2.7 饱和管压降 (U_{CES})

饱和管压降的存在对于输出回路静态工作点有影响, 同时实验中使用的单管共射放大电路是带有静态工作点稳定电路 (稳 Q 电路) 的 (下图中黄色区域), 稳 Q 电路的存在, 对于放大电路的静态工作点与动态参数也都有影响, 这些我们会在后续的实验中加以分析。


 图 1.2.8 静态工作点稳定电路 (稳 Q 电路)

1.3 实验 1-2：最佳静态工作点 Q 确定与失真分析

实验目的

- 寻找电路的最佳静态工作点 Q；
- 观察电路的饱和失真与截止失真；
- 测量最大不失真输出信号幅值 U_{om} (U_{opp})；

实验器材

1. HA-MB01 实验板、9011 型三极管
2. 工具与配件：
 - a) UT120C 万用表
 - b) HPI-1000 口袋仪器
 - c) 短接线、剥线钳、镊子.....

实验要求

在实验 1-1 的基础上调整电路参数，寻找更为合适的静态工作点 Q（使无失真输出信号幅值尽可能大），然后通过理论计算看看与实验测量结果是否一致，同时观察电路的饱和失真与截止失真现象，并了解其产生原因。

实验过程：

在实验 1-1 中我们首先设定输出回路的静态工作点 $U_{CQ}=7.5V$ ($V_{CC}/2$)，在 $U_{CQ}=7.5V$ 时，输出信号最大不失真幅值 $U_{opp}=4.4V$ （峰-峰值，空载），这相对于 $V_{CC}=15V$ 显然过低，说明输出回路静态工作点 U_{CQ} 选取不太合适。

***注：** U_{opp} 指的是最大不失真输出信号的峰-峰值， U_{om} 指的是最大不失真输出信号有效值，二者关系：

$$U_{opp}=2\sqrt{2}U_{om};$$

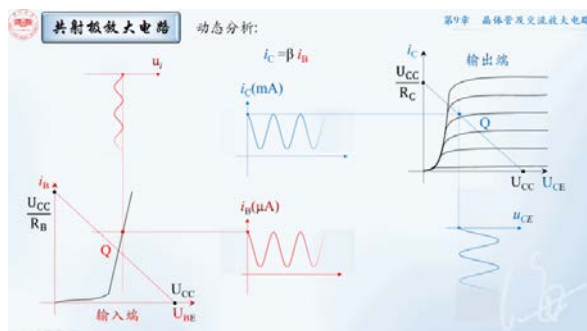


图 (GIF) 1.3.1 电路工作过程

图 1.3.1 就是图 1.2.6，从动画中可以看到，如果输出回路的 Q 点选择不合适，输出信号的波形会过早的出现失真，也就是输出信号的顶部或是底部出现畸变。

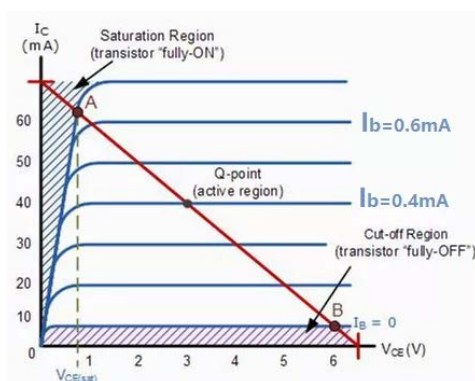


图 1.3.2 输出回路特性曲线（蓝色）与负载线（红色）

上图中一条条蓝色的线是在不同基极电流 (I_B) 下的输出回路特性曲线 ($I_C \sim U_{CE}$)，红色的线是输出负载线，输出回路的静态工作点 Q 就是蓝线与红线的交点。如果 Q 点过高 (U_{CQ} 偏小)，将使得输出信号的底部跑出放大区，进入饱和区，造成**饱和失真**；如果 Q 点过低 (U_{CQ} 偏大)，将使得输出信号的顶部跑出放大区，进入截止区，造成**截止失真**。

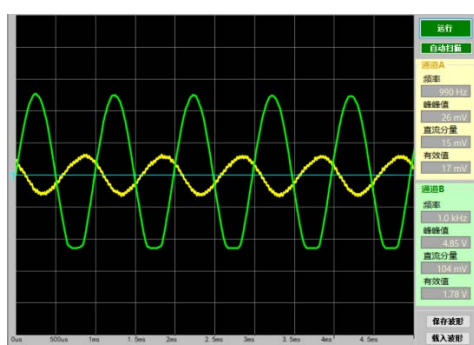


图 1.3.3 饱和失真

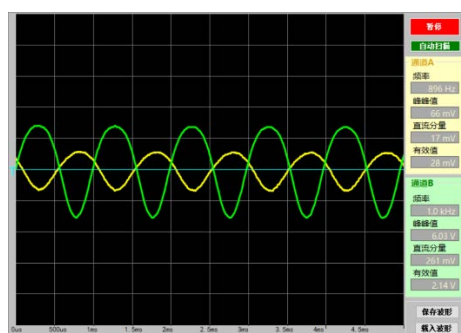


图 1.3.4 截止失真

饱和失真是因为输出回路的信号进入了饱和区，因此是输出回路失真，现象是波形底部出现畸变。截止失真是输出信号顶端太高， I_C 过小，但是 I_C 过小的根源是对应的基极电流 I_B 过小。从图 1.3.1 左下角输入回路曲线可以看出： I_B 过小意味着基极与发射极之间的发射结处于截止状态（对于硅管而言 $U_{BE} < 0.7V$ ），因此截止失真表现为输出信号的顶部畸变，但根源是输入回路产生失真。

我们增大输入信号幅值，发现输出信号的底部出现畸变（图 1.3.3），说明是出现了饱和

失真，意味着 $U_{CQ}=7.5V$ 的设定偏低，造成输出回路 Q 点过高（图 1.3.2）。这意味着实验 1-1 中设定 $U_{CQ}=7.5V$ ，试图想让输出信号在 $0\sim V_{CC}$ 间变化的设想有问题。究其原因，除了饱和管压降 U_{CES} 的存在（图 1.2.7）外，更主要的原因在于我们的实验电路是带有静态工作点稳定电路的单管共射放大电路（什么是静态工作点稳定电路将在实验 1-4 中讲述）。

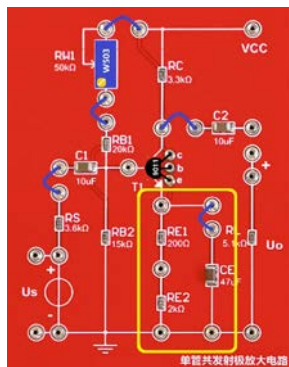


图 1.3.5 静态工作点稳定电路（稳 Q 子电路）

因此输出回路的最佳静态工作点（使得输出信号 U_{om} 最大）的 U_{CQ} 不在 $V_{CC}/2$ 附近。我们首先通过实验的方法找到最大 U_{om} 以及这时静态工作点 U_{BQ} 与 U_{CQ} 。具体做法就是增大一点输入信号的幅值，使得输出信号出现失真，然后调节电路的电位器 R_{w1} ，使得失真消失；然后再调大一点输入信号，再调节 R_{w1}直到无论怎么调整 R_{w1} 都不可能得到更大的无失真输出信号为止。

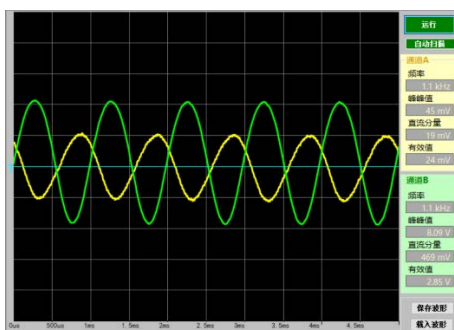


图 1.3.6 最大无失真输出信号波形

通过几次调节，就能找到当输入信号（ U_i ）峰-峰值在 $45mV$ 时，出现最大的无失真输出信号 $U_{opp}=8.1V$ ，相对于 $U_{CQ}=0.75V$ 时的 $U_{opp}=4.4V$ ，有了不少提高。这说明现在的静态工作点选取是更为合适的。我们用万用表测量一下电路的 U_{BQ} 与 U_{CQ} 分别为 $4.9V$ 与 $8.7V$ 。

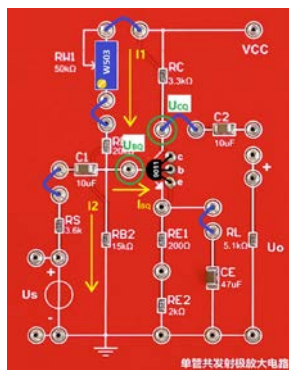


图 1.3.7 输入回路与输出回路工作点

与我们一开始设定的 $U_{CQ}=7.5V$ 相比，现在的 U_{CQ} 有所增大，这样输出回路的 Q 点就能下降，输出信号也就不容易出现饱和失真（参考图 1.3.1）。我们把电位器 R_{w1} 拿下来用万用表测一下，得到阻值 $R_{w1}=9.4K\Omega$ ，把 $R_{w1}=9.4K\Omega$ 代入公式 $U_{BQ}=V_{CC}*(R_{b1}+R_{w1})/(R_{b1}+R_{w1}+R_{b2})=5.0V$ ，与实测值 $4.9V$ 相差不大。计算 U_{CQ} 时首先要计算 I_{CQ} ，理论上可以通过 $I_{BQ}=I_1-I_2$ ， $I_{CQ}=\beta*I_{BQ}$ 的方法计算，但是因为 I_{BQ} 非常小，通过这种方法计算得出的误差很大。因此应该通过计算 I_{EQ} ，利用 $I_{EQ}\approx I_{CQ}$ 的方法得到 U_{CQ} （具体计算方法请大家自己推导），计算结果是 $U_{CQ}=8.4V$ ，再加上饱和管压降 $U_{CES}(0.3V)$ ，与实测值 $8.7V$ 基本一致。

1.4 实验 1-3: h 参数等效模型与动态参数测量

实验目的

- 结合实验电路熟悉 h 参数等效模型;
- 实际测量放大倍数 A_u 、输入阻抗 R_i 、输出阻抗 R_o 等动态参数, 并与理论值比较;
- *估算基极-发射极间动态电阻阻值 r_{be} ;

实验器材

1. HA-MB01 实验板、9011 型三极管
2. 工具与配件:
 - a) UT120C 万用表
 - b) HPI-1000 口袋仪器
 - c) 短接线、剥线钳、镊子.....

实验要求

画出实验电路的 h 参数等效模型电路图, 根据等效模型计算放大倍数 A_u 、输入阻抗 R_i 、输出阻抗 R_o 等动态参数, 与实际测量值比较, 估算基极-发射极间动态电阻阻值 r_{be} 。

实验过程:

在之前的实验中我们已经测量或计算了单管共射放大电路的基本参数, 包括: 输入回路静态工作点 U_{BQ} , 静态电流 I_{BQ} , 输出回路静态工作点 U_{CQ} , 静态工作电流 I_{CQ} ; 计算出了 9011 三极管的电流放大倍数 β 。然后我们给放大电路输入一个动态信号, 测量输出波形幅值, 然后除以输入信号幅值, 得出了放大电路的电压放大倍数 A_u 。今天我们使用一个全新的方法——h 参数等效模型, 理论分析计算放大倍数 A_u , 并与测量结果进行比较; 同时还利用此方法分析计算单管共射电路输入阻抗 R_i 、输出阻抗 R_o 等其他动态参数。

输入阻抗 R_i

有输入输出信号才谈得上输入阻抗与输出阻抗, 因此输入阻抗与输出阻抗属于放大电路的动态参数, 要画出信号交流通路进行分析。如果输入信号是低频小信号, 可以用 h 参数等效模型进行分析。

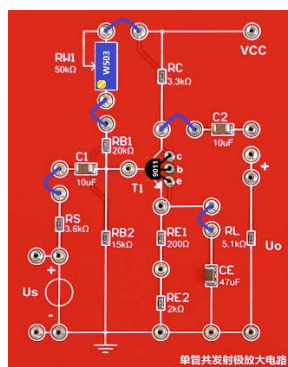


图 1.4.1 实际电路

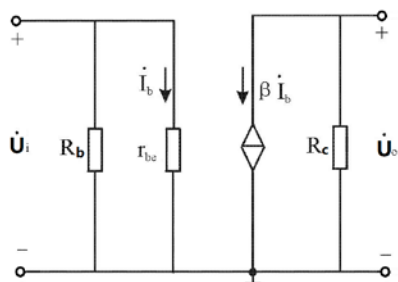


图 1.4.2 h 参数等效模型

其中 $R_b = (R_{w1} + R_{B1}) // R_{B2}$ ，我们继续画出输入回路等效电路。

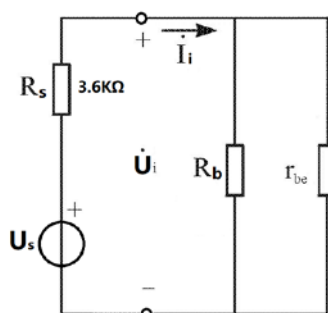


图 1.4.3 输入回路等效电路

其中 U_s 是信号源，根据输入阻抗定义 $R_i = U_i / I_i$ ， $I_i = (U_s - U_i) / R_s$ ，得到

输入阻抗计算公式：

$$R_i = R_s * U_i / (U_s - U_i)$$

公式 1



图 1.4.4 信号源幅值 $U_s = 140\text{mV}$ (峰-峰值)

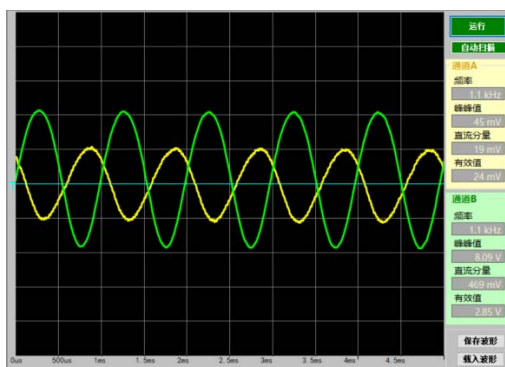


图 1.4.5 输入信号幅值 $U_i = 45\text{mV}$ (峰-峰值)

实验 1-2 中寻找最大不失真输出波形时，把 HPI-1000 口袋仪器的小信号源（AO2）调

节到 140mV, 对应的输入信号幅值是 45mV, 代入公式 1, 计算得电路输入阻抗 $R_i=1.7K\Omega$ 。

输出阻抗 R_o

接下来计算输出阻抗 R_o , 我们首先把图 1.4.2 h 参数等效模型中输出回路的电流源等效为一个电压源。

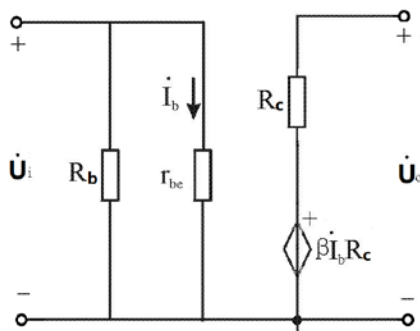


图 1.4.6 电压源形式的 h 参数等效模型

从上图中我们可以看到电阻 R_c 就是输出回路的内阻, 即 $R_o=R_c=3.3K\Omega$, 下面我们通过实验验证一下是否是这样。把输出信号也等效成一个电压源, 可以画出输出回路等效电路。

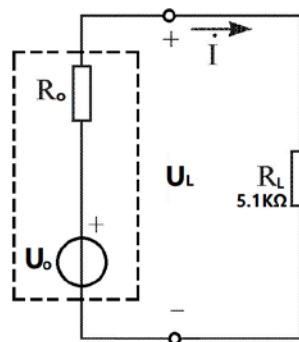


图 1.4.7 输出等效回路

这里我们可以把放大电路输出看成是一个有内阻的电压源 U_o , 对比输入阻抗的计算, 可以推导出 $U_L=(U_o-U_L)/R_o*R_L$, 于是得到

输出阻抗计算公式:

$$R_o=R_L*(U_o-U_L)/U_L \quad \text{公式 2}$$

我们把 5.1KΩ 负载电阻 R_L 接入电路, 其他条件都不变, 再测一下最大不失真输出幅值。

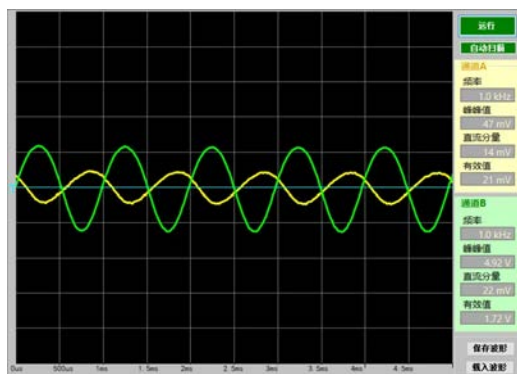


图 1.4.8 带负载 R_L 时最大不失真输出

由图 1.4.5 和图 1.4.8 可知 $U_o=8.09V$, $U_L=4.92V$, 代入公式 2 计算得电路输出阻抗 $R_o=3.3K\Omega$, 这与上面理论推导结论 $R_o=R_c=3.3K\Omega$ 一致。

*基极-发射极间动态电阻 r_{be}

根据图 1.4.2 与图 1.4.6 h 等效参数模型, 我们还可以推导出两个公式, 分别是:
输入阻抗的另一种表达形式: $R_i=R_b//r_{be}$, 其中 $R_b=(R_{w1}+R_{B1})//R_{B2}$ 公式 3

以及电压放大倍数计算公式: $A_u=U_o/U_i=-\beta R_c/r_{be}$ 公式 4

在公式 3 与公式 4 中都出现了基极-发射极间动态电阻 r_{be} 这个参数, 这是一个动态参数, 不能直接测量, 我们现在通过将已知参数代入两个公式 3 与公式 4 反推一下 r_{be} , 看看结果是否一致: 将 $R_i=1.7K\Omega$, $R_b=9.93K\Omega$ 代入公式 3, 计算得 $r_{be}=2.1K\Omega$; 将 $A_u=-180$, $\beta=103$, $R_c=3.3K\Omega$ 代入公式 4, 计算得 $r_{be}=1.9K\Omega$; 二者有 10%左右的差距, 主要是测量误差以及计算过程中的累积误差造成的。 r_{be} 是一个动态参数, 不是固定不变, 它与输入回路的静态工作点高低有关, Q 点越高, r_{be} 越小。

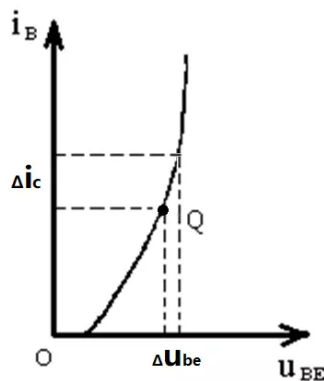


图 1.4.9 基极-发射极间动态电阻 r_{be}

1.5 *实验 1-4：静态工作点稳定电路

实验目的

- 通过实验验证 Q 点稳定电路工作原理；
- 利用 h 参数等效模型计算反馈电阻 R_e 对电路特性的影响，并通过实验验证；
- 利用 h 参数等效模型计算旁路电容 C_e 对电路特性的影响，并通过实验验证；
- 锻炼开展综合性与研究性实验的能力；

实验器材

1. HA-MB01 实验板、9011 型三极管
2. 工具与配件：
 - a) UT120C 万用表
 - b) HPI-1000 口袋仪器
 - c) 短接线、剥线钳、镊子.....
3. 测试工具：MSP430F5529 口袋板套件、热风枪.....

实验要求

在教材 2.4 节中系统分析了静态工作点稳定电路（Q 点稳定电路）的工作原理以及它对于放大电路参数的影响。但因为实验过程比较复杂费时，所以一般不安排实验。我们这里设计了 3 个实验对不同参数的 Q 点稳定电路效果进行比较，一是让大家加深对于理论知识的理解；二是教会大家如何利用手边的器材自主开展综合性与研究性实验。

实验过程

测试环境搭建

Q 点稳定电路的核心是在放大电路中加入负反馈环节以抵消温度对于三极管工作参数的影响，保持放大电路在温度变化时工作参数的稳定。为此我们要搭建一个测试环境，观察当三极管工作温度由室温（25℃）提升到 90℃左右时放大电路的工作点 Q 漂移情况——通过集电极电压 U_{cQ} 的变化与输出信号失真度的变化来显示。

加热源可以使用热风枪（没有热风枪也可以使用电吹风机），实验的时候用热风枪对准三极管吹热风直到温度到达 90℃左右。为了保证温度不会过高而损坏 HA-MB01 模电实验板以及 9011 三极管，我们要在三极管旁边安放一个测温装置以监控温度实时变化。



图 1.5.1 温度监测装置

如上图所示，测温装置使用 MSP430F5529 口袋板套件，将套件上的远程温度探头（实际就是一个 PNP 型三极管，比如 9012，利用 PN 结的温度特性进行测温）用双面胶粘在放大电路 9011 三极管旁边，然后用杜邦线连接到套件上 TMP421 数字温度芯片的远程温度传感器端口。放大电路 9011 三极管局部温度显示在 MSP430F5529 口袋板套件屏幕第 2 行“Remote Temp”，大约每三秒钟测量一次。集电极电压 U_{CQ} 用万用表来监测，输出信号失真度通过 HPI-1000 口袋仪器观测（事先使输出信号达到最大不失真状态）。

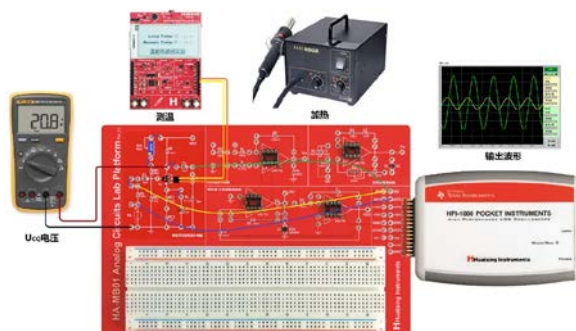


图 1.5.2 实验环境搭建

直流负反馈电阻 $R_e=200\Omega$

我们首先想把直流负反馈电阻 R_e 去掉，研究一下不带稳 Q 电路的标准单管共射电路的特性。试一试就会发现如果 9011 三极管的发射极 e 直接接到 GND 端，那么基极 b 就会钳位在 $0.7\sim 1V$ 之间（请大家想一想为什么），这样就很难找到合适的输入回路的静态工作点，所以我们将直流反馈电阻 R_e 由 $2.2K\Omega$ 减小到 200Ω ，近似去掉。但这样一来， $R_e=200\Omega$ ， $R_c=3.3K\Omega$ ，二者相差又太大，输出回路合适的放大工作区域太窄，因此需要在 R_c 上并联一个 470Ω 的电阻（可以通过 HA-MB01 模电板上的面包板转接并联），最终电路如下图所示。

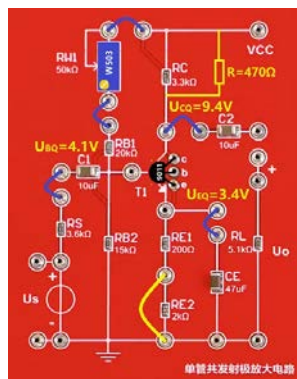


图 1.5.3 反馈电阻 $R_e=200\Omega$ 时电路连接及参数

考虑到 R_{e1} 与饱和管压降 U_{CES} 的存在，输出回路的静态工作点应该比 $V_{cc}/2$ 大一些，我们先暂定为 $8V$ ——也就是调节电位器 R_{w1} ，使得 $U_c=8V$ 。然后参考实验 1-2 方法寻找最合适的静态工作点（使得最大无失真输出信号幅值 U_{opp} 尽可能大），最后找到最佳输出回路静态工作点 $U_{CQ}=9.4V$ ，此时最大不失真信号输出 $U_{opp}=10V$ 。



图 1.5.4 $R_e=200\Omega$ 时最大不失真输出 $U_{opp}=10V$ (空载)

此时输出信号将在 $U_{CQ} \pm U_{opp}/2$ ，即 4.4V~14.4V 范围内变化，根据反馈电阻 R_e 上的电压 $U_{EQ}=3.4V$ ，饱和管压降 $U_{CES}=0.3V$ ，理论上最大不失真输出 $U_{opp}=V_{CC}-(U_{EQ}+U_{CES})=11.3V$ ，工作点 $U_{CQ}=(U_{EQ}+U_{CES})+U_{opp}/2=9.4V$ ，由此可见理论值与实际值很接近，无稳 Q 子电路（或者反馈电阻 R_e 很小）的情况下，放大电路电源电压的利用率很高，但这并不意味着电路的电压放大倍数 A_u 很大。

实验过程请扫码移步到华清科仪公众号观看实验视频,从视频中可以看到,随着环境温度由室温升高到 90℃左右, U_{CQ} 快速由 9.48V 下降到 9.16V, 变化率 3.4%, 输出波形出现了饱和失真。



稳 Q 电路视频 (1)

直流负反馈电阻 $R_e=2.2K\Omega$

我们将直流电阻 R_e 恢复为 $2.2K\Omega$ ，将电路调整到最大不失真输出状态，此时输出回路静态工作点 $U_{co}=8.7V$ ，重复视频 1 中的测试。

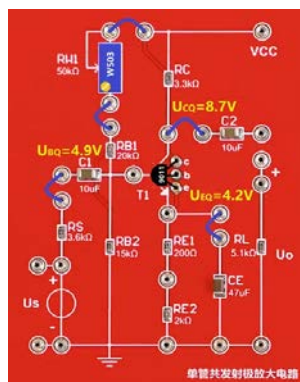


图 1.5.5 反馈电阻 $R_e=2.2\text{K}\Omega$ 时电路连接及参数

在视频 2 中可以看到随着环境温度由室温升高到 90℃ 左右, 这次 U_{co} 变化的速度比 $R_e=200\Omega$ 时慢了许多, 最终由 8.7V 下降到 8.53V, 下降率 2%, 但是动态信号输出波形还是出现了饱和和失真。对比视频 1 和视频 2 发现, 稳 Q 电路确实能够起到稳定静态工作点的作用, 使之随温度漂移的现象得到改善。



稳 0 电路视频 (2)

直流负反馈电阻 $R_e=2.2K\Omega$ ，去掉旁路电容 C_e

我们再将稳 Q 电路中的旁路电容 C_e 去掉，这时电路的直流通路没有变化，因此静态工作点没有变化。

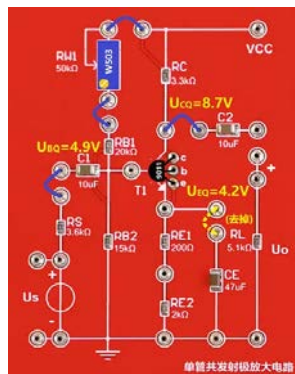


图 1.5.6 反馈电阻 $R_e=2.2K\Omega$ ，去掉旁路电容 C_e 时电路连接及参数

去掉稳 Q 电路中的旁路电容 C_e 不影响电路的静态工作点，但是影响电路的动态参数，因为电路的交流回路发生了变化。

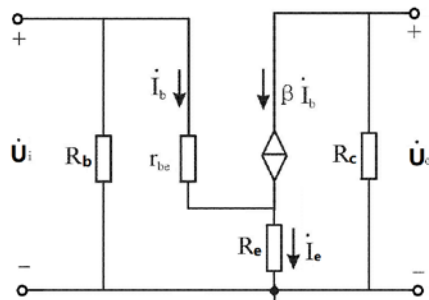


图 1.5.7 无旁路电容 C_e 时电路 h 参数等效模型

从上图可以看到，电路的动态参数发生了变化，其中电路电压放大倍数由 $A_u=-\beta R_c/r_{be}$ ，变为了 $A_u=R_c/R_e=-3.3K\Omega/2.2K\Omega=1.5$ （过程可以参考教材 2.4 节或自行推导），变小了许多，电压放大性能变得很差。

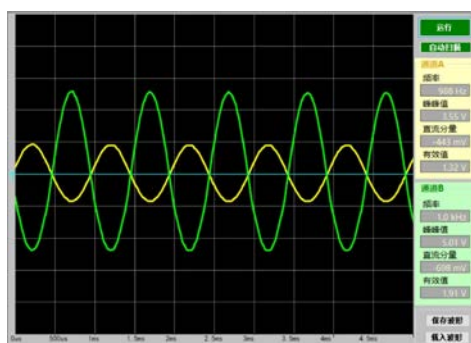


图 1.5.8 无旁路电容 C_e 时最大不失真输出波形

从上图实际测量波形也可以看出 $A_u=U_o/U_i=1.4$ ，与上面的理论计算相差不多。更神奇的是从公式 $A_u=R_c/R_e$ 可以看出，去掉旁路电容 C_e 后，电路的电压放大倍数只与电路参数有关，不再和三极管的电流放大倍数 β 以及基极-发射极间动态电阻 r_{be} 有关了。三极管的

参数是随温度变化的，这样去掉旁路电容 C_e 后，电路的电压放大性能变差，但是稳定性进一步提高。

从视频 3 可以看出，环境温度发生变化后，电路的静态工作点 U_{CQ} 下降率和有旁路电路 C_e 时差不多，但是动态信号波形失真度要比有旁路电容时小得多。

去掉旁路电容，电路的静态特性与动态特性都很稳定，可是电压放大特性变得很差；加上旁路电容电压放大特性得以改善，可是电路的动态特性又不够稳定，为此在实际电路中往往采取一个平衡的手段处理这个矛盾——也就是只在一部分直流负反馈电阻加上旁路电容。



稳 Q 电路视频 (3)

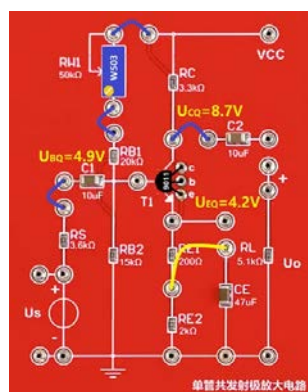


图 1.5.9 在部分直流负反馈电阻上加旁路电容

1.6 *放大电路相位失真分析

按照教材中讲述，单管共射放大电路的输入波形与输出波形相位差应该是 -180° ，即完全反相关系，但细心的读者可能发现在实验 1-4 中输入与输出信号有时基本呈现完全反相关系，但有时不是。比如实验 1-4 中的图 1.5.8，无旁路电容 C_e 时，输出信号与输入信号相位差 -180° ，无相位失真。为了更加清晰，我们在图片上加上红色的辅助线。

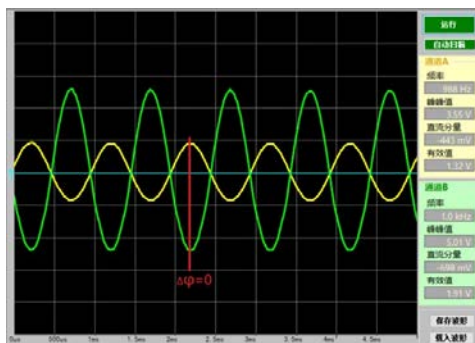


图 1.6.1 无旁路电容 C_e 时，输出信号无相位失真

放大电路无旁路电容 C_e 时，输入信号与输出信号的波形基本呈反相关系，没有相位失真。这是因为无旁路电容 C_e 时低频截止频率 f_L 计算公式：

$$f_L = \frac{1}{2\pi C_1 (R_i + R_s)} \quad \text{公式 1}$$

将 $C_1=10\mu\text{F}$ ， $R_i=1.7\text{K}\Omega$ （参考实验 1-3）， $R_s=3.6\text{K}\Omega$ 代入，计算得 $f_L \approx 3\text{Hz}$ 。

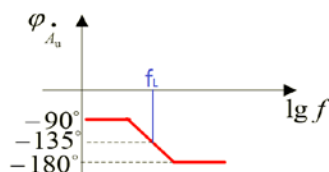


图 1.6.2 波特图

实验过程中输入信号的频率是 1KHz ，远远大于 f_L ，电路工作在中频段，所以没有相位失真。如果电路中存在旁路电容 C_e ，就容易出现相位失真，比如实验 1-4 中图 1.5.4，加上辅助线后就可以更清晰的看到输出信号与输入信号不是 -180° 关系，而是相位超前了 $\Delta\psi$ 。

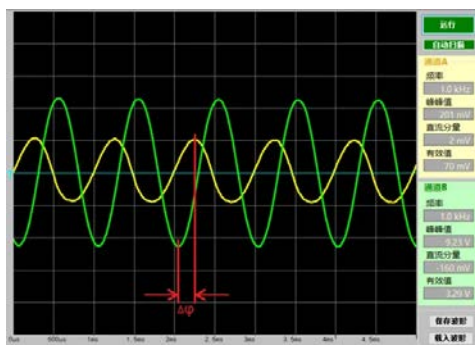


图 1.6.3 有旁路电容 C_e 时，输出信号出现相位失真

这是因为有旁路电容 C_e 时低频截止频率 f_L 计算公式：

$$f_L = \frac{1}{2\pi C_1'(R_S + r_{be})} \quad \text{其中 } C_1' = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + (1+\beta)\frac{1}{C_e}} \quad \text{公式 2}$$

将 $C_1=10\mu\text{F}$, $\beta=103$, $C_e=47\mu\text{F}$, $r_{be}=1.9\text{K}\Omega$ (参考实验 1-3), $R_S=3.6\text{K}\Omega$ 代入, 计算得 $f_L \approx 71\text{Hz}$ 。因为 f_L 提高了很多, 所以在输入信号频率还是 1KHz 情况下, 输出波形出现了相位失真。对电路不作任何改动, 仅仅将输入信号 U_S 的频率由 1KHz 提高到 6KHz (中频段), 相位失真就会减小很多。

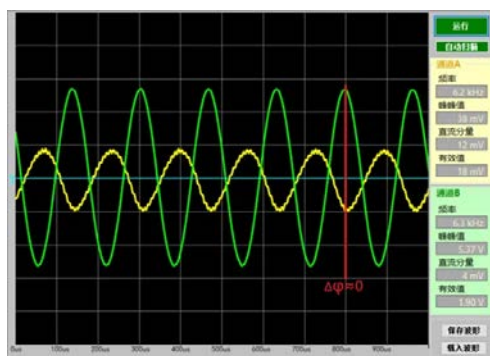


图 1.6.4 输入信号频率为 6KHz 时输出信号相位失真 ≈ 0

通过上述分析可知, 在电路中增加旁路电容 C_e 具有增大电压放大倍数的好处, 但也会产生相位失真。有关相位失真的问题我们这里只做简单分析, 更多细节请阅读教材第 4 章“放大电路的频率响应”。

1.7 输入负载线与输出负载线研究

通过实验 1-2 到实验 1-4 我们对于单管共射放大电路有了更深刻的认识。其实电路的工作过程、我们对于电路参数的测量与调整都是遵循之前多次展示过的放大电路工作过程动画。

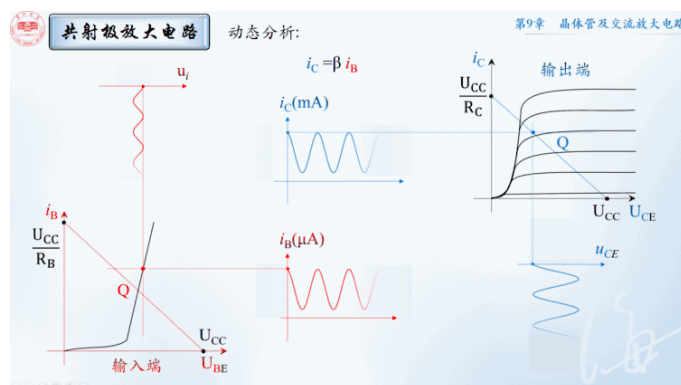


图 1.7.1 (GIF) 放大电路工作过程动画

在上图中电路输入端 $i_B \sim U_{BE}$ 曲线与输出端 $i_C \sim U_{CE}$ 曲线中除了有晶体管的输入特性与输出特性曲线（黑色）外，还分别有一条红色与蓝色的直线段，那便是输入回路负载线（红色）与输出回路负载线（蓝色），负载线与晶体管特性曲线的交点 Q 就是电路的静态工作点。因此负载线对于电路的工作点有着重要作用，进而影响电路的工作状态。这一节我们就对电路负载线进行深入研究，负载线分为输入回路负载线与输出回路负载线，对输出回路而言还分为直流负载线与交流负载线，接下来我们先研究输出回路负载线。

输出回路负载线

图 1.7.1 动画右上角小图是把输出回路负载线（直线）画在三极管输出特性曲线上，其中蓝色的 Q 是输出回路的静态工作点，它是输出特性曲线与负载线的交点。我们按照教材 2.3.2 节的概念将负载线分为直流负载线与交流负载线来分析。

直流负载线

直流负载线要根据电路的直流通路列出方程，然后绘制。

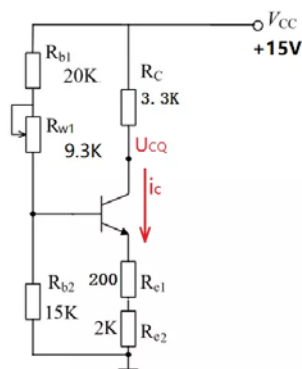


图 1.7.2 直流通路

根据图 1.7.2，可以列出方程： $V_{CC}=i_c \cdot R_C + U_{CE} + i_c \cdot R_E$ ，令 $R_E=R_{E1}+R_{E2}$ ， $i_c \approx i_e$ ，整理后得到

输出回路直流负载方程： $i_c = V_{CC}/(R_C + R_E) - U_{CE}/(R_C + R_E)$ 公式 1

交流负载线

教材 2.3.2 节指出当输出空载时，直流负载线与交流负载线重合，这对没有旁路电容 C_e 的电路是正确的，实验电路因为带有旁路电路 C_e ，所以动态信号不会经过反馈电阻 R_E ，而是经过旁路电路 C_e 直接到地（ C_e 容值比较大，近似认为容抗为 0），因此实验电路即使空载状态，直流负载线与交流负载线也不会重合。

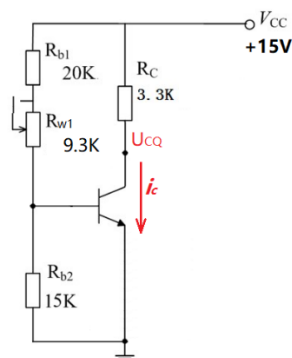


图 1.7.3 交流信号等效通路（输出空载）

从公式 1 可以看出，直流负载线（浅蓝色）的斜率是 $-1/(R_C + R_E)$ ，动态信号负载线（深蓝色）的斜率是 $-1/R_C$ ，当有了动态输入信号后，工作点 Q 沿着动态信号负载线（交流负载线）移动。

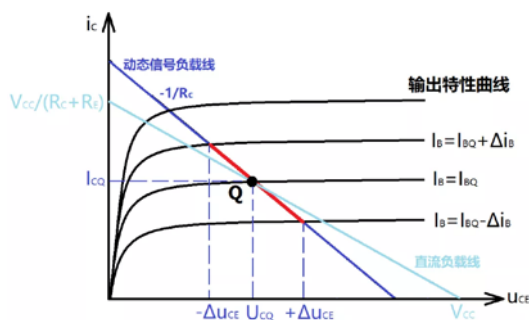


图 1.7.4 输出特性曲线（黑色）与负载线（浅蓝色、深蓝色）

从上图可以更清晰的看到输出回路工作过程是加载了动态信号后，集电极电流 i_c 随着基极电流 i_B 的变化而变化，输出特性曲线（黑色）上下移动，与输出回路动态信号负载线（深蓝色）的交点 Q 沿着负载线移动，移动的轨迹就是红色线段。

上图中浅蓝色的直流负载线也可以理解为去掉旁路电路 C_e 的动态信号负载线，此时负载线斜率的绝对值变小，由 $1/R_C$ 变为 $1/(R_C + R_E)$ 空载时输出信号范围应该变大才对。可是在实验 1-4 中我们发现输出信号的幅值比有旁路电容 C_e 时小很多，这是为什么？（思考题，参考答案见附录 A）。

输入回路负载线

图 1.7.1 动画左下角小图是把输入负载线（直线）画在三极管输入特性曲线上，其中红色的 Q 是输入回路的静态工作点，它是输入特性曲线与负载线的交点。当有了动态输入信号后，工作点 Q 沿着特性曲线移动。

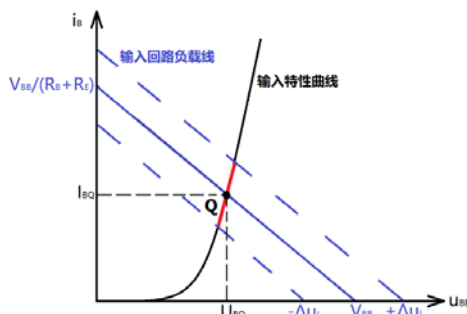


图 1.7.5 输入特性曲线（黑色）与负载线（蓝色）

因为基极电流 i_B 很小，我们认为输入回路总是处于“空载”状态，因此输入回路负载线不再区分直流负载线与交流负载线，统称输入回路负载线。

与输出回路不同的是加载了动态信号 Δu_i 后，输入特性曲线（黑色）没有变化，而是输入回路负载线（蓝色）平行的移动，造成负载线与输入特性曲线的交点 Q 沿着特性曲线上、下移动，移动的轨迹就是红色线段。蓝色的负载线体现输入回路外部电路特性，实验电路的输入回路比教材中的电路复杂，要经过等效变换才能列出输入回路负载方程。

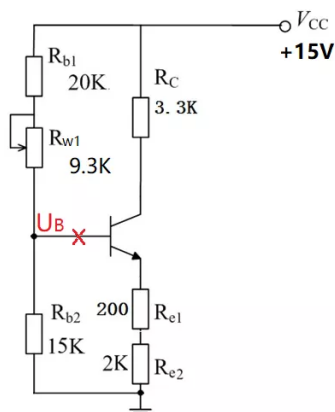


图 1.7.6 实验电路直流通路

如上图所示，把调整好静态工作点的实验电路直流通路基极支路断开（基极 b 处断开），那么 $U_B = V_{CC} / (R_{B1} + R_{W1} + R_{B2}) * R_{B2} = 5.1V$ ，我们把这个电压 U_B 等效为输入回路电源 V_{BB} ，那么电路就能等效为如下形式。

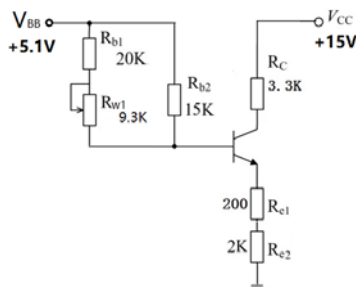


图 1.7.7 实验电路等效直流通路

然后令 $R_B = (R_{b1} + R_{w1}) // R_{b2} = 9.9K\Omega$, $R_E = R_{e1} + R_{e2} = 2.2K\Omega$, 得到

输入回路负载方程:
$$i_b = \frac{V_{BB}}{R_B + R_E} - \frac{U_{BE}}{R_B + R_E} \quad \text{公式 2}$$

结合公式 2 与图 1.7.5 可以看出, 输入负载线的斜率是 $-1/(R_B + R_E)$, 在 V_{BB} 与 R_E 不变的条件下, R_B 越小则负载线的斜率越大, 意味着同样的输入信号动态范围能引起较大的基极电流变化 (Δi_b), 但这时输入回路的静态工作点 Q 很高, 静态功耗会很大; R_B 过大则负载线斜率很小, Q 点过低会引起截止失真。所以分压电阻 R_{b1} 与 R_{b2} 的比值不但要满足要求, 阻值也要在合理区间。

1.8 实验 1-5：阻容耦合与直接耦合

实验目的

- 理论分析直接耦合与阻容耦合时电路参数的不同，并通过实验验证；
- 通过实验加深理解 1.7 节中负载线的理论知识；

实验器材

1. HA-MB01 实验板、9011 型三极管
2. 工具与配件：
 - a) UT120C 万用表
 - b) HPI-1000 口袋仪器
 - c) 短接线、剥线钳、镊子.....

实验要求

之前的实验电路输入部分与输出部分使用的都是阻容耦合，现在改为直接耦合，看看电路参数发生哪些变化。完成这个实验需要用到 1.7 节中大量概念与公式，建议预先学习。

实验过程

输入直接耦合

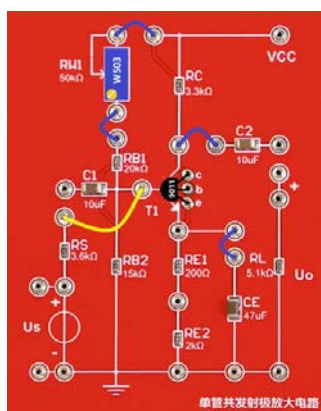


图 1.8.1 输入直接耦合电路

上图的连接方式就是输入直流耦合，电阻 R_s 必须保留，否则电路的直流通路中信号源 U_s 相当于短路，基极电压 $U_B=0$ ，电路无法工作。实验板上的 R_s 只有 $3.6K\Omega$ ， R_s 与 R_{B2} 并联，并联后的 $R_{B2}'=R_s//R_{B2}=2.9K\Omega$ ，与 $R_{B1}+R_{W1}$ 相比太小，会造成基极电压太低，管子处于截止状态。因此需要在面包板上外置一个 $100K\Omega$ 的电阻代替 R_s ，改造后电路如下图所示。

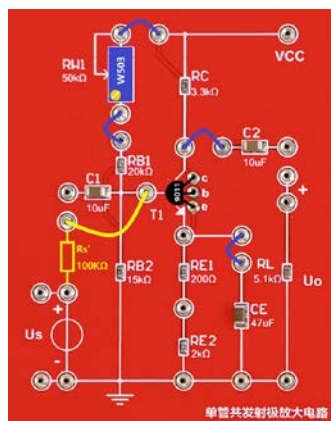


图 1.8.2 改造后的输入直接耦合电路

此时 $R_{b2}' = R_s // R_{b2} = 13K\Omega$ ，按照 1.7 节中的方法重新计算 U_B 处电压， $U_{B'} = 4.6V$ （图 1.8.3），输入部分直流通路等效电路（图 1.8.4）。

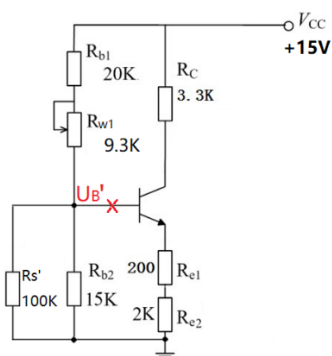


图 1.8.3 输入直接耦合时的直流通路

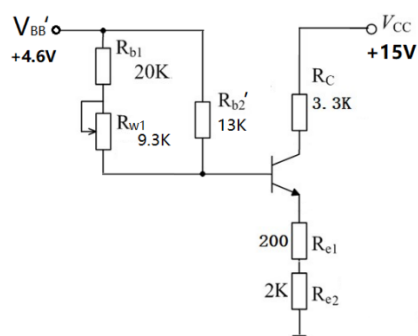


图 1.8.4 输入直接耦合时等效直流通路

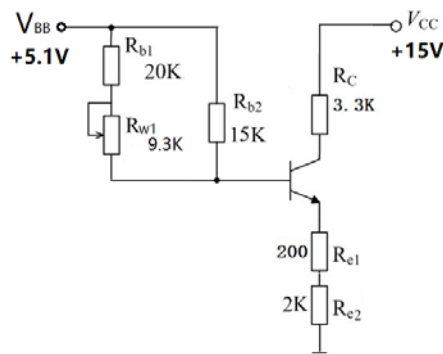


图 1.8.5 输入阻容耦合时等效直流通路

对比图 1.8.4 与图 1.8.5（参考 1.7 节），我们发现两个电路结构一样，参数相似，因此输入回路直流耦合时的负载线以及静态工作点 Q 与阻容耦合时相差不多（下图）。

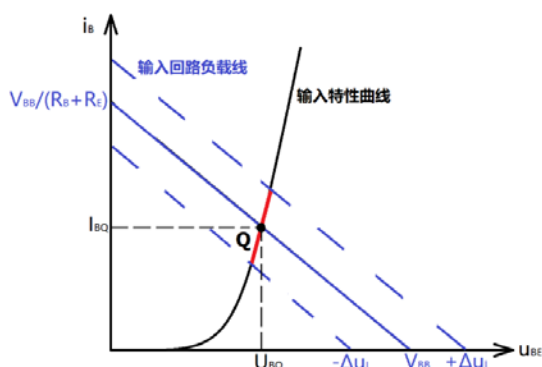


图 1.8.6 输入特性曲线（黑色）与负载线（蓝色）

从以上分析可以看出输入改为直接耦合时输入回路静态参数变化不大，动态参数有没有变化呢？我们首先画出输入直接耦合，输出空载时的 h 参数等效电路图（参考实验 1-3）。

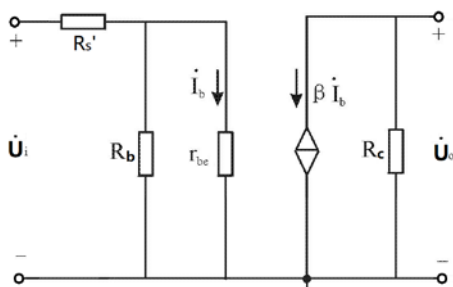


图 1.8.7 输入直接耦合时 h 参数等效模型

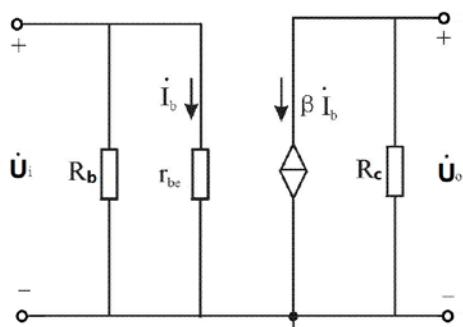


图 1.8.8 输入阻容耦合时 h 参数等效模型

对比图 1.8.7 与图 1.8.8，我们发现输入采用直接耦合时的 h 参数等效模型多了 R_s' 支路。 $U_i = I_b \cdot r_{be} + (I_b + I_{Rb}) \cdot R_s'$ ， $I_{Rb} = I_b \cdot r_{be} / R_b$ ，所以 $U_i = I_b \cdot [r_{be} + (1 + r_{be} / R_b) \cdot R_s']$ ； U_o 没有变化，还是 $U_o = -\beta I_b \cdot R_c$ ，所以

输入直接耦合时电路电压放大倍数： $A_u' = U_o / U_i = -\beta R_c / [r_{be} + (1 + r_{be} / R_b) \cdot R_s']$ 公式 1

输入阻容耦合时电路电压放大倍数（实验 1-3）： $A_u = U_o / U_i = -\beta R_c / r_{be}$ 公式 2

对比公式 1 与公式 2，可以发现公式 1 分母中多了 $(1 + r_{be} / R_b) \cdot R_s'$ 项，放大倍数变小了。将 $R_b = (R_{w1} + R_{b1}) // R_{b2} = 9.9K\Omega$ ， $r_{be} = 1.9K\Omega$ （实验 1-3）代入公式 1，计算得 $A_u' = -2.8$ ，这比阻容耦合时的 $A_u = -180$ 小很多，我们通过实际测量看看能否得到同样的结果。

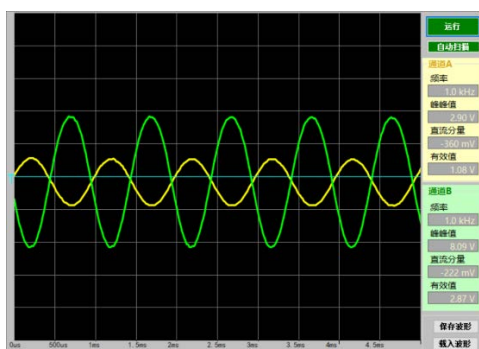


图 1.8.9 输入直接耦合时输出波形

从上图可以看出，在直接耦合方式下输入 $U_i = 2.9V_{p-p}$ 的正弦波时，输出波形 $U_o = -8.1V_{p-p}$ ， $A_u' = U_o / U_i = -2.8$ ，与上面的理论计算一致。

分析图 1.8.7 所示的 h 参数等效模型，还可以得出：输入直接耦合时放大电路输入阻抗 $R_i = R_s' + R_b // r_{be} = 100K\Omega + 9.9K\Omega // 1.9K\Omega = 101.6K\Omega$ ，这比阻容耦合时输入阻抗 $R_i = 1.7K\Omega$ 大不少（实验 1-3）。

输出直接耦合

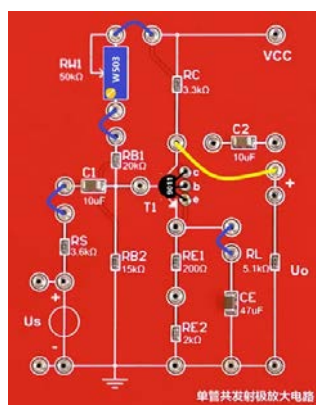


图 1.8.10 输出直接耦合电路

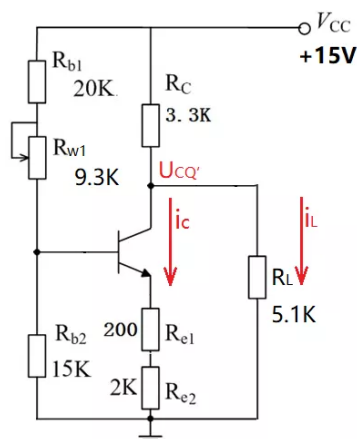
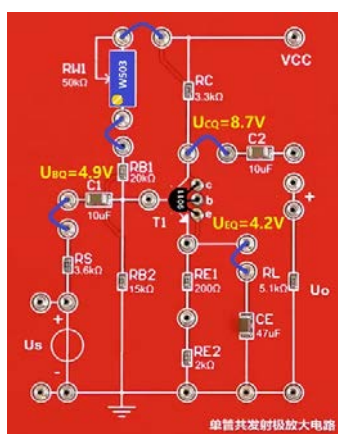


图 1.8.11 输出直接耦合电路直流通路

根据图 1.8.11，列出输出直接耦合时的
输出回路直流负载方程：

$$V_{CC} = (I_C + I_L) * R_C + I_L * R_L \quad \text{公式 3}$$

从图 1.8.11 可以看出，直接耦合时，流经电阻 R_C 的电流除了有 I_C 外，还多了负载电流 I_L ，因此在不调整电路参数的情况下，输出回路静态工作点电压 $U_{CQ'}$ 应该变小。具体变小多少呢？我们结合之前的测量结果进行计算。


 图 1.8.12 $R_{w1}=9.3K\Omega$ 输出空载时静态工作点电压

上图是我们之前实验调整好的电路静态工作点，现在加上负载电阻 R_L 后，流经电阻 R_C 的电流变大，但不会影响输入回路的静态工作点，因此基极静态电流 I_B 不会变化，于是集电极静态电流 I_C 也就不会变化，这样 U_{EQ} 就还是 4.2V，于是 $I_E = U_{EQ} / R_E = 1.9mA$ 。我们近似认为 $I_C \approx I_E = 1.9mA$ ，代入公式 3；同时将 $V_{CC}=15V$ ， $R_C=3.3K\Omega$ ， $R_E=2.2K\Omega$ 也一同代入，可以计算得 $I_L=1.03mA$ ，所以 $U_{CQ'} = I_L * R_L = 5.3V$ ，这与我们用万用表的实际测量值一致。
 $I_{CQ'} = I_{CQ} = 1.9mA$ ，没有变化。

接下来研究交流负载线，按照教材中的概念：直接耦合时直流负载线与交流负载线重合，但这并不适用于实验电路，因为实验电路上存在旁路电容 C_E ，所以对于动态信号而言，反馈电阻 R_E 是不存在的（参考 1-7 节）。我们画出直接耦合时交流信号 h 参数等效电路。

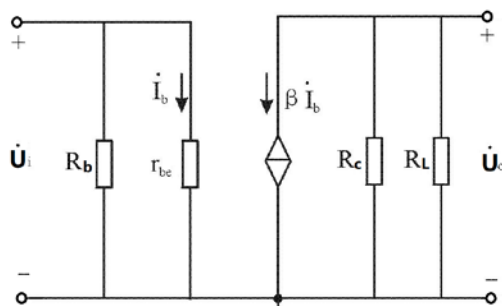


图 1.8.13 直接耦合（阻容耦合）时 h 参数等效电路

由上图可以看出交流信号 $u_o = i_c \cdot R_c // R_L$ ，所以交流负载线（动态信号负载线）应该是一条过直接耦合时输出回路静态工作点 $Q'(U_{CQ'}, I_{CQ'})$ ，斜率为 $-1/R_c // R_L$ 的直线。因为带同样负载情况下阻容耦合与直接耦合的 h 参数等效电路一样，说明二者的交流负载线斜率是一样的，只不过经过的静态工作点不同，因此应该是两条平行线。

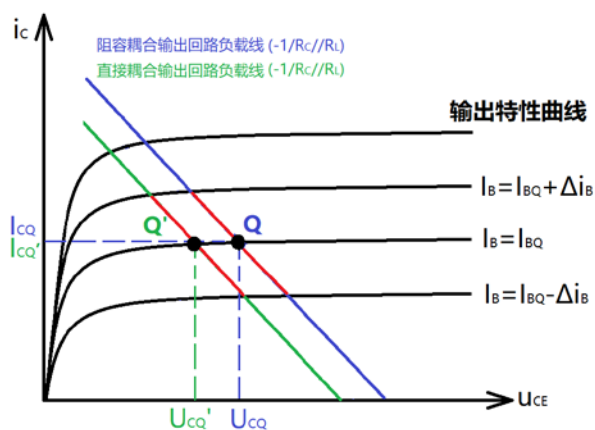


图 1.8.14 直接耦合与阻容耦合时交流负载线

从图 1.8.13 还可以看出，直接耦合与阻容耦合时 h 参数等效电路一致，因此二者放大倍数 A_u 与输出阻抗 R_o 一样，都是 $A_u = -\beta R_c / r_{be}$ ， $R_o = R_c // R_L$ （参考实验 1-3）。

输出改为直接耦合后一个显著变化就是输出信号 U_o 除了有交流分量外，还带有直流分量，直流分量大小就是 $U_{CQ'}$ 。

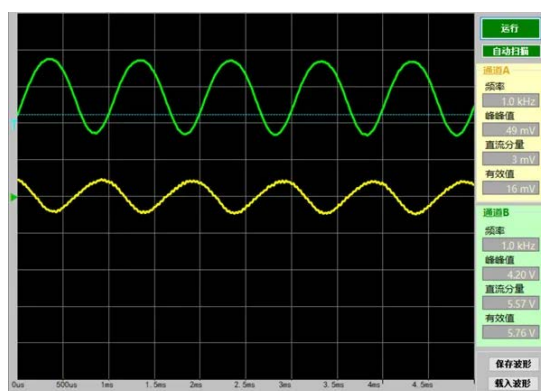


图 1.8.15 输出直接耦合时输出波形

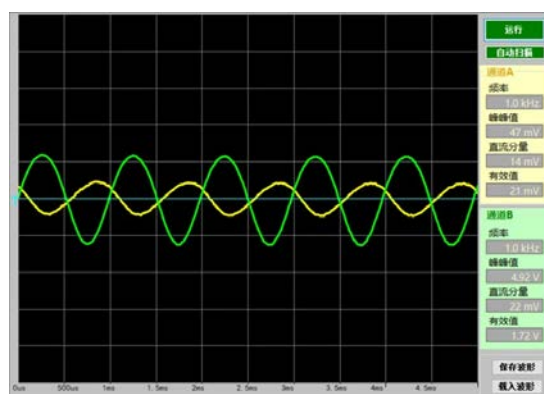


图 1.8.16 输出**阻容耦合**时输出波形

图 1.8.15 是输出采用直接耦合方式时的最大不失真输出信号波形，图 1.8.16 是阻容耦合方式时的最大不失真输出信号波形，对比一下可以发现直接耦合输出信号多了直流分量 $U_{cQ'}$ ，且最大不失真输出的幅值 U_{om} (U_{opp}) 变小了。

思考题

图 1.8.14 所示直接耦合时的输出负载线是一条平行于阻容耦合时的负载线，二者并不重合，我们如何调整电路参数（不能改变负载电阻 R_L 的阻值）能够让两条负载线重合，并且直接耦合与阻容耦合时的输出回路静态工作点也重合？（[参考答案见附录 A](#)）

1.9 *实验 1-6：放大电路效率 η

实验目的

- 理论计算放大电路的效率 η ，并通过实验验证；
- 对于教材中没有讲述的知识点，学会自己研究分析并通过实验验证的方法；

实验器材

1. HA-MB01 实验板、9011 型三极管
2. 工具与配件：
 - a) UT120C 万用表
 - b) HPI-1000 口袋仪器
 - c) 短接线、剥线钳、镊子.....

实验要求

直流电源的利用率称为放大电路的效率 η ，教材 2.1.2 节仅给出了定义，没有进一步展开，结合实验电路是可以测量计算分析放大电路的效率 η ，同时还能加深对一些基础知识与概念的理解。

实验过程

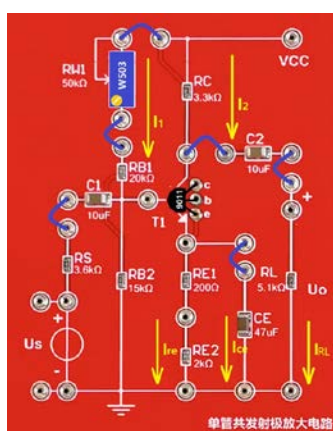


图 1.9.1 带载放大电路

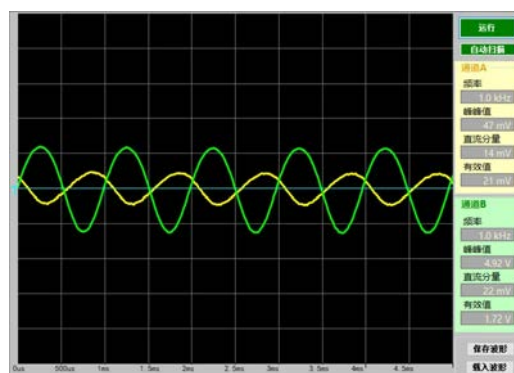


图 1.9.2 带载放大电路输出波形

直流电源的利用率称为放大电路的效率 η , $\eta = P_{om}/P_v$, P_{om} 是输出信号不失真情况下负载 R_L 获得的最大功率; P_v 是直流电源输入功率。我们先根据图 1.9.1 电路及图 1.9.2 电路输出波形参数 (参考实验 1-4), 连接计算 P_{om} , $P_{om} = U_{om}^2 / R_L$, U_{om} 是最大不失真输出信号有效值, 它与最大不失真输出信号峰-峰值 U_{opp} 的关系是 $U_{om} = U_{opp} / (2\sqrt{2})$, 所以 $P_{om} = U_{om}^2 / R_L = U_{opp}^2 / (8 * R_L) = 4.92^2 / (8 * 5.1K) = 0.59mW$ 。

接下来计算直流电源输入功率 P_v , $P_v = V_{cc} * I_v$, $V_{cc} = 15V$ DC, I_v 里面既有直流分量也有交流分量, 计算起来比较麻烦。

根据图 1.9.1, $I_v = I_1 + I_2$; I_b 很小忽略不计, 所以 $I_1 = V_{cc} / (R_{w1} + R_{b1} + R_{b2}) = 0.34mA$, I_1 只有直流成分。 I_2 为流经电阻 R_c 的电流, 里面既有直流也有交流。电流 I_2 由三部分组成:

(1) 流经反馈电阻 R_{e1} 和 R_{e2} 的直流电流 I_{Re} , $I_{Re} \approx I_{cQ} = U_{cQ} / R_c = 8.7V / 3.3K\Omega = 1.9mA$;

(2) 流经旁路电容 C_e 的交流电流, 这个电流要在有输入信号的情况下, 也就是放大电路处于工作状态下用万用表交流毫安档测量, $I_{Ce} = 0.8mA$ (有效值);

(3) 流经负载电阻 R_L 的交流电流 I_{RL} , $I_{RL} = U_{om} / R_L = 0.34mA$ (有效值);

流经负载电阻 R_L 的电流与流经旁路电容 C_e 的相位相差 180° , 对于总的支路电流 I_2 而言是相互抵消的关系, 我们以直流电流 I_{Re} 为正, 所以 I_{Ce} 也取正号, I_{RL} 取负号; 因此 $I_2 = I_{Re} + I_{Ce} - I_{RL} = 1.9mA + 0.8mA - 0.34mA = 2.36mA$; $I_v = I_1 + I_2 = 2.7mA$, $P_v = V_{cc} * I_v = 41mW$ 。

下面我们通过实验验证一下以上的计算是否正确。方法是 HA-MB01 模电实验板不通过 HPI 接口与 HPI-1000 口袋仪器直接连接, 而是在 HPI-1000 口袋仪器+15V 输出与单管放大电路 V_{cc} 端串入一只电流表, 然后给放大电路加载和之前同样的信号, 再分别用直流电流档与交流电流档测量电流值。



图 1.9.3 放大电路总直流电流

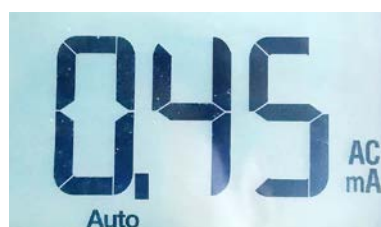


图 1.9.4 放大电路总交流电流 (有效值)

从图 1.9.3 与图 1.9.4 万用表表头显示可以看出实际测量的 $I_v = 2.25mA + 0.45mA = 2.7mA$, $P_v = V_{cc} * I_v = 41mW$, 这与上面的理论计算一致。因此放大电路的效率 $\eta = P_{om} / P_v = 0.59mW / 41mW = 1.4\%$, 由此可见这种形式的放大电路效率是很低的, 究其原因单管放大电路的输入与输出信号都是驮载在直流上的动态信号, 其中用来维持静态工作点的直流回路白白消耗了大量的功率 (请对比上面的计算中 I_{Re} 、 I_{Ce} 与真正作用在负载上的电流 I_{RL} 大小)。这种形式的电路在实际中称之为甲类放大电路, 效率低, 发热量大。以上分析计算都是基于放大电路输出采用阻容耦合方式, 如果采用直接耦合, 那电路的效率还会进一步降低 (输出信号中的直流分量功率不记为有功功率), 具体数值大家可以结合实验 1-5 自行计算测量一下。

如果还有读者对于上面的分析中流经负载电阻 R_L 的交流电流有效值记为负号表示疑惑, 这里再解释一下: 因为流经负载电阻 R_L 与流经旁路电容 C_e 的电流都是交流电流, 但这两

个电流的相位相差 180° ，是互相抵消的关系，因此计算电路中总的交流电流有效值的时候二者就是相减的关系。这从实际测量也可以得到证明：我们用万用表测得流经旁路电容 C_e 的电流有效值是 0.8mA ，又计算出流经负载电阻 R_L 的电流有效值是 0.34mA ，二者相减是 0.46mA ——这也就是电路总的交流电流有效值；图 1.9.4 所示用万用表测量电路电源端的交流电流有效值也是近似的 0.45mA ，这证明我们的上述分析是正确的。

1.10 本章小结

我们循序渐进的通过 3 次理论分析与 6 次实验研究了单管共射放大电路的方方面面，现将之前的原理概念、计算方法以及实验技巧做一个小结。

三极管的特性（1.2 节）

三极管是放大电路的核心元件，搞清楚三极管的工作原理、特性才能看懂放大电路。对于三极管严谨的分析研究可以阅读教材 1.2 节与 1.3 节以及实验指导书的 1.2 节。

对于三极管，我们可以将其想象为一个“水龙头”的样子，基极电流 I_b 控制着集电极电流 I_c 的大小，二者成固定比例关系。应该掌握的三极管的基本特性有下列几条：

- 三极管是一个电流放大型器件， $\beta=I_c/I_b$ ， β 称为电流放大系数，是三极管固有特性，与外电路结构无关；
- 三极管的工作条件是发射结（b-e）正偏，集电结（b-c）反偏；
- 对于 NPN 型硅管， $U_{on}\approx 0.7V$ ； $U_{be}<0.7V$ 时三极管处于截止区； $U_{ces}\approx 0.3V$ ， $U_{ce}<0.3V$ 时三极管处于饱和区；

我们实际拿到一只三极管，应该先仔细看看管子上面的丝印标记和器件的规格书（虽然大多数人没有这个习惯）。同样是 9011 型三极管，根据 β 值的大小分成不同档，若不注意这些细节，有可能搭出来的电路怎么调也调不到理想状态。

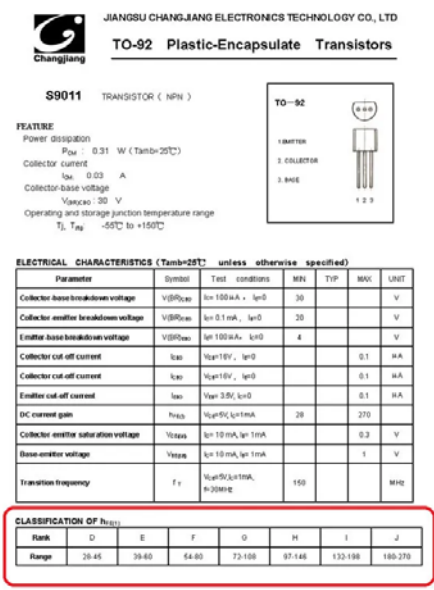


图 1.10.1 9011 三极管规格书



图 1.10.2 不同放大档的 9011 三极管

放大电路的调试（[1.2 节](#)、[实验 1-1](#)、[1-2](#)、[1-3](#)、[1-5](#)）

放大电路的工作过程，实验指导书 1.2 节图 1.2.6（GIF）动画展示得非常直观清晰，如果能够深刻理解对于这个动画所展示的各种信息，对于单管共射放大电路也就基本掌握了。

单管共射放大电路最重要的一个特性就是“对驮载在直流信号上的交流信号进行放大”，于是可以把电路分解为直流通路和交流通路。

直流通路：用来确定放大电路的静态参数，最重要的静态参数就是输入回路的静态工作点 U_{BQ} 和输出回路的静态工作点 U_{CQ} ，直流通路是单管共射放大电路的基础，静态工作点选取或调整不正确，电路就无法正常工作。直流信号在图 1.2.6 中体现为直流负载线。

交流通路：用来确定放大电路的动态参数，主要的动态参数有电路的电压放大倍数 A_u 、输入阻抗 R_i 、输出阻抗 R_o 、最大不失真输出 U_{om} （ U_{opp} ）。交流信号在图 1.2.6 中体现为交流负载线。

电路调试：电路调试要秉持先静态（直流）、后动态（交流）的顺序，以看到输出信号为最低要求（实验 1-1）。在看到输出信号后再调整最佳工作点，至于何为最佳工作点，那要看设计这个放大电路的目的是什么，比如我们在实验 1-2 中就是希望得到尽可能大的不失真输出信号（ U_{om} 尽可能大）。

静态参数与动态参数测量计算（[实验 1-2](#)、[1-3](#)、[1-5](#)）

静态参数：主要静态参数有 U_{BQ} 、 U_{CQ} 以及三极管的电流放大倍数 β ，可以通过仪器测量与公式计算相互验证结果是否正确（实验 1-2）。

动态参数：主要动态参数有电路的电压放大系数 A_u 、输入阻抗 R_i 、输出阻抗 R_o 等，要利用 h 参数等效模型进行分析（实验 1-3、1-5）。

电路失真（[实验 1-2](#)、[1-4](#)、[*1.6 节](#)）

截止失真：出现的输出波形顶端，是输入回路失真；

饱和失真：出现在输出波形底端，是输出回路失真；

***相位失真：**主要是旁路电容 C_e 造成的，由放大电路频率特性决定。

阻容耦合与直接耦合（[实验 1-5](#)）

阻容耦合：输出端采用阻容耦合则输出信号中不带有直流分量；输入端采用阻容耦合则放大电路的低频特性变差，无法放大直流信号；

直接耦合：输出端采用直接耦合则输出信号中带有直流分量；输入端与输出端都采用阻容耦合则放大电路可以用于放大直流信号。

*电路效率 η （[实验 1-6](#)）

静态工作点稳定电路（[实验 1-4](#)）

至此，单管共射放大电路的方方面面通过理论分析与实验验证相结合方法进行了全面剖析研究。最后总结三点：

- 分析研究模拟电路要有整体的观点——有时候调整电路中的一个参数，其他参数也就随之变化了；

- 调整电路参数、增加器件（比如增加反馈电阻 R_e 、旁路电容 C_e ），能够改善电路的某一方面的性能，但同时往往又会降低另一方面的指标或带来新的问题；
- 学习模拟电路除了理论计算外，动手搭建电路，进行实际测量必不可少——只看书、推导公式是不可能学懂学好模拟电路的。

附录 A 部分思考题参考答案

第 1 章 单管共射放大电路

1.7 输入负载线与输出负载线

这是因为电路去掉旁路电容 C_e 后, 放大系数由 $A_u = -\beta R_c / r_{be}$, 变为了 $A_u' = -R_c / R_e$, 变小了许多 (参考实验 1-4), 输入信号 U_i 幅值过大会造成截止失真, 所以最大不失真输出信号 U_{om} 变小了许多。

1.8 实验 1-5: 阻容耦合与直接耦合

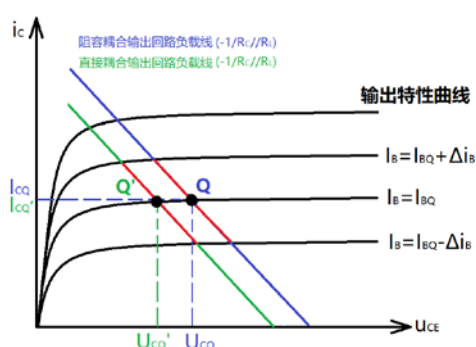


图 A.1.1 直接耦合与阻容耦合时交流负载线

首先应该明确的是既然要求调整输出负载线与输出回路的静态工作点, 那么输入回路的电路参数基本就不要调整。在不改变负载电阻 R_L 的前提下, 能调整的只有集电极电阻 R_c 、反馈电阻 R_e (包括 R_{e1} 与 R_{e2})、旁路电容 C_e 这三个参数。根据图 A.1.1 所示, 既然要求两条负载线重合, 那么两条负载线的斜率就得保持一致, 由于 R_L 不能改变, R_c 也就不能调整。旁路电容 C_e 选取了比较大的容值 ($47\mu F$), 为的就是减小容抗, 对于交流信号近似短路, 再加大没有意义了; 减小 C_e 的话会增加容抗, 近似等同于加大反馈电阻 R_e 。这样唯一能够调整的就只有 R_e 了, 但是在电路其他参数都不变的情况下增大 R_e , 会让 I_B 变小, 从而 I_c 变小, 这样 U_{CQ}' 与 U_{CQ} 虽然能重合, 但是之前取值一样的 I_{CQ}' 与 I_{CQ} 又会变得不一样, 最终会导致输出回路的静态工作点 Q' 由 Q 的左边移动到 Q 的下方, 还是不能重合。

这样看来, R_c 与 R_e 都不能调整, 在 I_{CQ}' 不变的情况下使 U_{CQ}' 增加的办法只有一个就是: 在保持输入回路还是 $+15V$ 供电的情况下, 增加输出回路的供电电压——也就是把单电源供电改为输入回路与输出回路使用不同的电源供电。根据直接耦合时的

输出回路直流负载方程 (实验 1-5):

$$V_{CC} = (I_C + I_L) \cdot R_c + I_L \cdot R_L \quad \text{公式 1}$$

我们需要 U_{CQ}' 由 $5.3V$ 增大到 $8.7V$, 即 $I_L \cdot R_L = 8.7V = U_{CQ}$, 所以 $I_L = U_{CQ} / R_L = 8.7V / 5.1K\Omega = 1.7mA$, 将 $I_L = 1.7mA$, $I_C = 1.9mA$, $R_c = 3.3K\Omega$ 代入公式 1, 计算得 $V_{CC}' = 20.6V$, 于是按照下图改造电路。

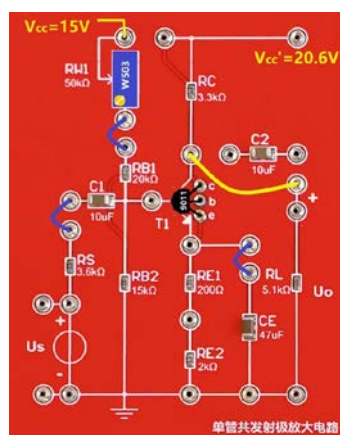


图 A.1.2 将电路改为双电源供电

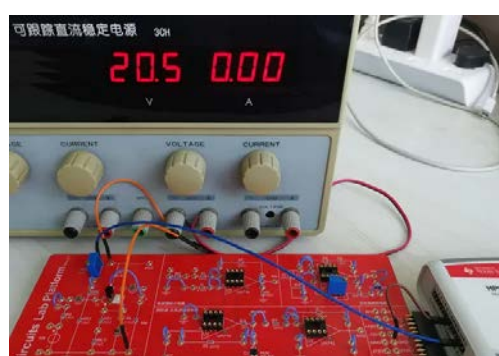


图 A.1.3 实际电路

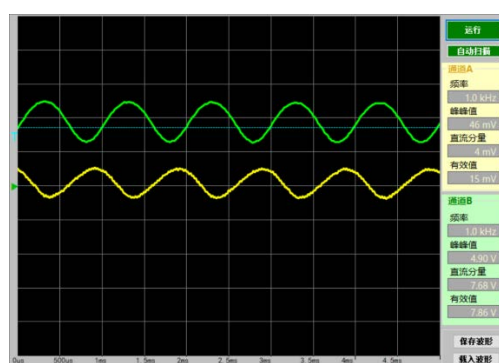


图 A.1.4 双电源供电时输入输出波形

图 A.1.4 是双电源供电下输出直接耦合时最大不失真输出信号波形，对比单电源供电下输出阻容耦合时最大不失真输出信号波形（实验 1-5 图 1.8.16），除了前者输出中带有直流分量外，波形基本一致（最大不失真输出信号幅值 U_{opp} 一致）。通过这样的调整，实现了让直接耦合与阻容耦合时的输出负载线以及输出静态工作点都重合在了一起的目标。