

7 基于 Multisim 的三极管特性仿真

7.1 Multisim

7.1.1 简介

Multisim 是美国国家仪器 (NI) 有限公司推出的以 Windows 为基础的仿真工具, 适用于板级的模拟/数字电路板的设计工作。它包含了电路原理图的图形输入、电路硬件描述语言输入方式, 具有丰富的仿真分析能力。

工程师们可以使用 Multisim 交互式地搭建电路原理图, 并对电路进行仿真。Multisim 提炼了 SPICE 仿真的复杂内容, 这样工程师无需懂得深入的 SPICE 技术就可以很快地进行捕获、仿真和分析新的设计, 这也使其更适合电子学教育。通过 Multisim 和虚拟仪器技术, PCB 设计工程师和电子学教育工作者可以完成从理论到原理图捕获与仿真再到原型设计和测试这样一个完整的综合设计流程。

7.1.2 基本操作

图 7.1 所示为 Multisim 的主界面。界面包括标题栏、下拉菜单、快捷工具、项目窗口、状态栏等。标题栏用于显示应用程序名和当前的文件名。下拉菜单提供各种选项。快捷工具分为: 文件工具按钮、器件工具按钮和调试工具按钮等。这些按钮在下拉菜单中都有, 放在工具栏里是为了方便使用。项目窗口中的电路窗口是用来搭建电路的, 设计工具箱 (Design Toolbox) 栏是用来显示全部工程文件和当前打开的文件。

可以定制 Multisim 界面的各个方面, 包括工具栏、电路颜色、页尺寸、聚焦倍数、自动存储时间、符号系统 (ANSI 或 DIN) 和打印设置等。定制设置与电路文件一起保存。改变当前电路的设置, 一般右击电路窗口选择弹出式菜单。

Multisim 提供在线帮助文件系统以支持使用。选择“帮助”“Multisim 帮助”可显示详细描述 Multisim 的文件, 所有的帮助文件窗口都是标准窗口, 并提供内容列表与索引。

建立并仿真一个电路的第一步是选择要使用的元件, 放置在电路窗口中希望的位置上, 选择希望的方向连接元件。单击主菜单“放置 (Place)”, 选择“元器件 (Component)”。三极管在“Transistors”栏目下, 如图 7.2 所示; 电阻和电容在工具栏中的“Basic”栏目下; 电源和参考地在“Sources”栏目下, 函数发生器和示波器在右侧工具栏中。双击元器件可以对这个元器件进行设置。单击元器件的一端, 可以进行连线。

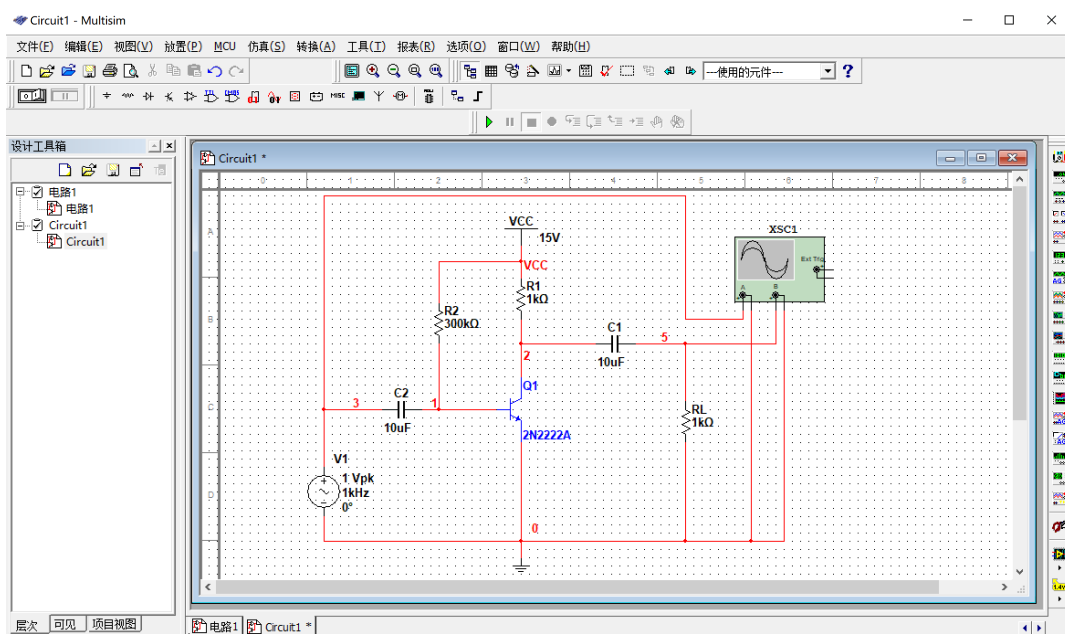


图 7.1 Multisim 主界面

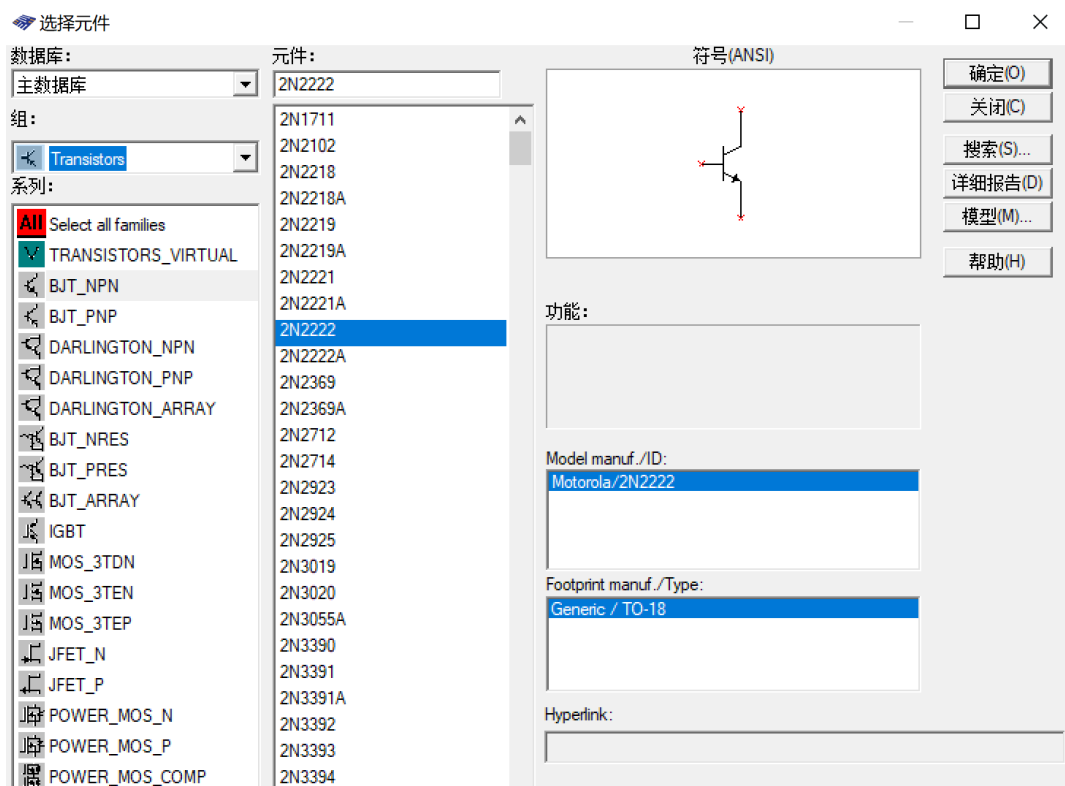


图 7.2 元器件选择

7.2 三极管的输入/输出特性

7.2.1 仿真测试

三极管（BJT）是一种双极结型半导体三端器件，其内部有两个背靠背排列的 PN 结。当这两个 PN 结加上不同极性、不同大小的偏置电压时，三极管将呈现不同的特性和功能。三极管作为电子系统中放大电路最重要的组成器件，其输入、输出伏安特性是分析计算增益、输入电阻、输出电阻、频率响应等整个电路性能的依据和基础。

输出特性反映了以输入基极电流 i_B 为参变量时，输出集电极电流 i_C 与输出电压 V_{CE} 之间的关系，其一般表达式为

$$i_C = f(V_{CE}, i_B) = f(V_{CE})|_{i_B=\text{constant}} \quad (7.1)$$

Multisim 软件提供了虚拟 IV 测试仪（在“Simulate”“Instruments”中选择），可测试三极管的输出伏安特性，如图 7.3 所示。双击 XIV1，可出现如图 7.4 所示的测试曲线。Components 选“BJT_NPN”，单击“Sim_Param”进行 V_{CE} 和 i_B 参数设置。单击“Simulate”“Run”，运行仿真计算，可得三极管的输出特性曲线。曲线横轴是集电极-发射极电压 V_{CE} ，纵轴是集电极电流 i_C ，每一条不同颜色的曲线表示某个基极电流 i_B 时的 $V_{CE} - i_C$ 关系曲线。

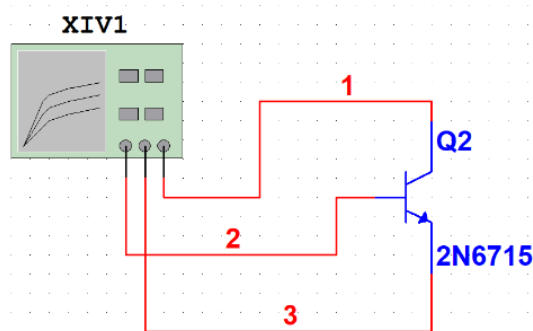


图 7.3 三极管输出特性测试

单击各条曲线可获得其 i_B 值，显示于下方数据框中。拖动采集数据的标尺（图 7.4 中蓝色竖线），下方数据框中显示采集的 V_{CE} 和 i_C 的测量值。

为了保证三极管放大电路放大范围最大化，一般来说，三极管静态工作点应设置在三极管输出特性曲线簇的中间位置。如将三极管静态工作点设置在图 7.4 所示的黄色曲线和蓝色竖线的交叉点。单击交叉点位置，下方数据框显示基极电流 $I_{BQ} = 7 \mu\text{A}$ 、集电极-发射极电压 $V_{CEQ} = 5.963 \text{ V}$ 、集电极电流 $I_{CQ} = 1.542 \text{ mA}$ 。通过计算可得电流放大倍数 $\beta = I_{CQ}/I_{BQ}$ 约为 220.3。

7.2.2 输出特性曲线簇

如图 7.5 所示，三极管输出特性曲线包含放大区、饱和区、截止区三个工作区。

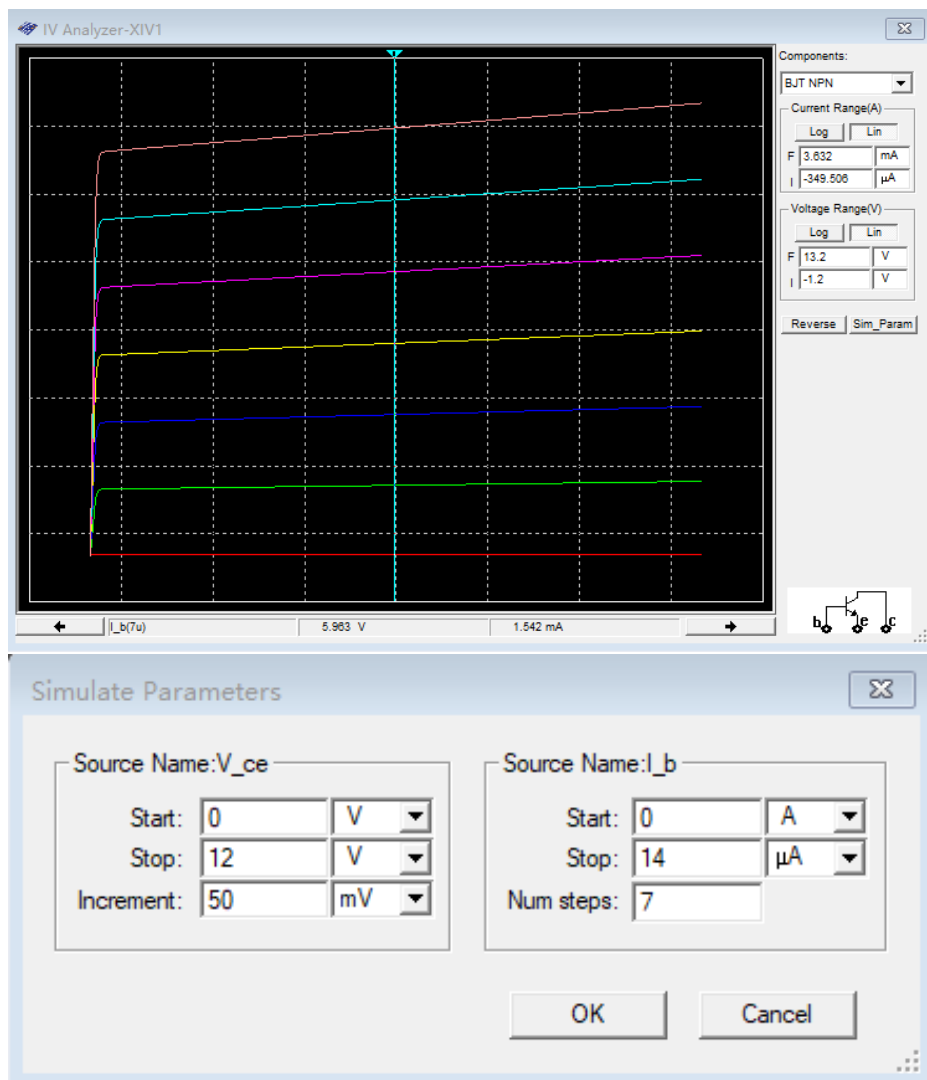


图 7.4 Multisim IV 测试仪测试三极管输出特性

图 7.5 下侧阴影部分（截止区）， $i_B \leq 0$ ，说明发射结处于反向偏置状态，只有很小的反向电流 I_{CBO} 。因为发射结不是正向偏置，发射区的电子无法注入到基区并进而到达集电区，集电极电流也只有很小的反向电流 I_{CEO} 。因此这个区域称为截止区。只有当 $i_B > 0$ ，发射结处于正向偏置时，才会形成集电极电流 $i_C = \beta i_B$ ，式中 β 为放大倍数（教材中第 92 页式 3.29）。即当 i_B 等量增加时，输出特性曲线也几乎等量地向上平移。

图 7.5 中左侧阴影部分（饱和区）， V_{CE} 较小且 $V_{CE} < V_{CEsat}$ 时，集电极电流 i_C 随 V_{CE} 的增加而增加，这个区域称为饱和区。当 $V_{CE} > V_{CEsat}$ 且继续增加时， i_C 基本不随 V_{CE} 变化，输出特性曲线几乎平行于 V_{CE} 轴，仅略微向上倾斜。这个区域称为放大区或有源区。

在饱和区时，因为 V_{CE} 很小，不仅发射结是正向偏置，集电结也是正向偏置。由于集电区掺杂浓度（ n^+ ）比发射区掺杂浓度（ n^{++} ）低，虽然同样是正向偏置，集电结从集电区注入到基区的电子比发射结从发射区注入到基区的电子少。随着 V_{CE} 的增大，集电结由正向偏置逐步过

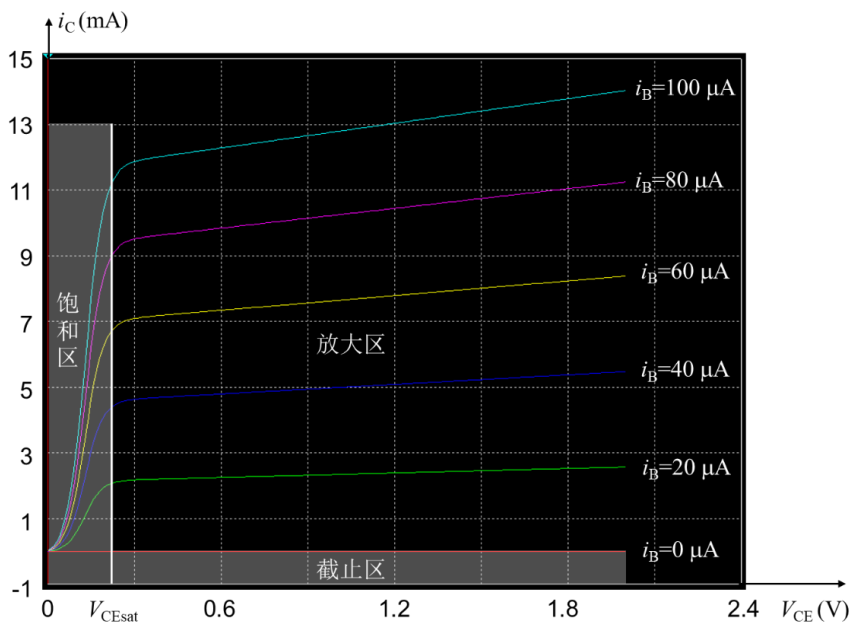


图 7.5 双极型晶体管共发射极接法输出特性曲线

渡到反向偏置，发射结从发射区注入到基区并扩散到集电区最终为集电极接收的电子也越来越多，而从集电区到基区的电流只是很小的反向饱和电流。所以 V_{CE} 较小时，集电极电流随 V_{CE} 的增大而增大。

当 V_{CE} 增大到足够大、晶体管进入放大区时，集电结已经进入反向偏置，发射区注入到基区并扩散到集电区的电子都被集电极接收。即使 V_{CE} 继续增加，这种状况几乎不变，因此集电极电流 i_C 基本不变。

但是如果考虑到基区宽度变化的影响，当 V_{CE} 增大时，集电极反向偏置电压增大，集电结宽度变宽，载流子传输过程中在基区的复合减少，使得 i_B 略有减小， i_C 略有增大。输出特性曲线描述的是当 i_B 不变时 i_C 与 V_{CE} 的关系， i_C 的增大相对会更加明显，因此在放大区随 V_{CE} 的增加略微向上倾斜。

7.3 基本共发射极放大电路分析

7.3.1 静态工作点

三极管是线路中的核心元件，其基本作用是放大或开关作用。在模拟电路中常利用它的放大作用，构成各种放大器及各种波形产生、变化和信号处理电路；在数字电路中利用它的开关控制作用，构成各种逻辑门电路。

根据双极型晶体管共发射极接法的输出特性（如图 7.5 所示），截止区时，输出集电极电流 i_C 几乎为零，晶体管没有放大能力。而在饱和区时，不同取值的 i_B ，对应的输出特性曲线几乎重合，说明 i_C 几乎不受 i_B 的控制，只随着 V_{CE} 的增大而增大。只有在放大区时， $i_C = \beta i_B$ ，

晶体管具备放大能力，如图 7.6 所示。因此，在最开始选择晶体管直流工作状态时，必须保证晶体管工作于放大区。主要包括选择合适的 I_B 和 V_{CE} 。选定的直流工作状态，称为直流工作点（Operating Point），也称为静态工作点，静态是指放大器没有交流输入信号时放大电路的直流工作状态，通常用 Q 表示，对应的直流参数增加字母 Q 作为下标，如直流工作点对应的基极电流记为 I_{BQ} ，集电极-发射极电压记作 V_{CEQ} 。

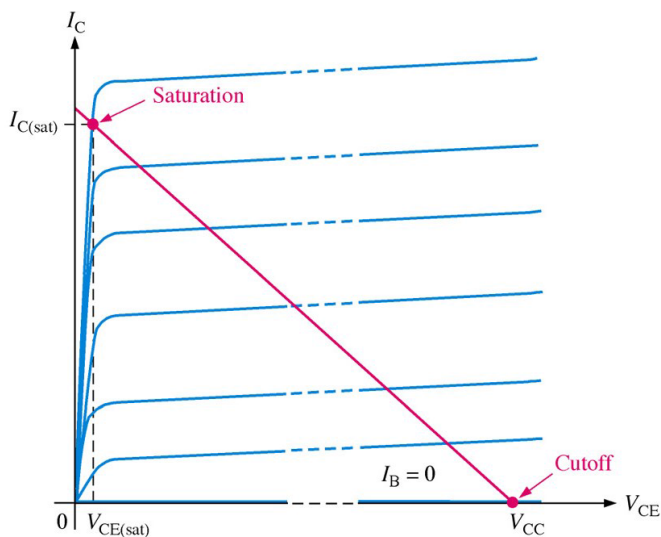


图 7.6 双极型晶体管直流工作点选择

例：双极型晶体管直流工作点计算

计算例题图 7.7 所示电路中晶体管的直流工作点。已知晶体管相关参数： $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ ， $\beta_{DC} = 100$ ，.....。

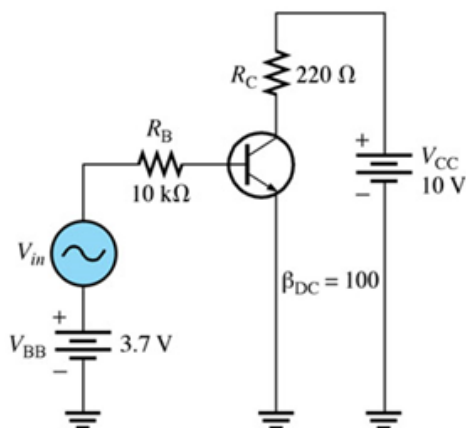


图 7.7 例题图

计算直流, V_{in} 不算在内。因为 $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ (硅管 0.7V),

$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - 0.7\text{V}}{R_B} = 300\mu\text{A} \quad (7.2)$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 30\text{mA} \quad (7.3)$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_C = 3.4\text{V} \quad (7.4)$$

$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$ 就是图 7.6 中的红色直线。

直流工作点 Q 标注于图 7.8 中。由图 7.8 可见, 当输入直流基极电流上叠加幅度为 $100 \mu\text{A}$ 的交流电流分量时, 因为晶体管的(交流)电流放大能力, 集电极电流将会得到幅度为 10 mA 的交流电流分量, 并转化为集电极交流电压输出, 幅度约为 2.2 V 。

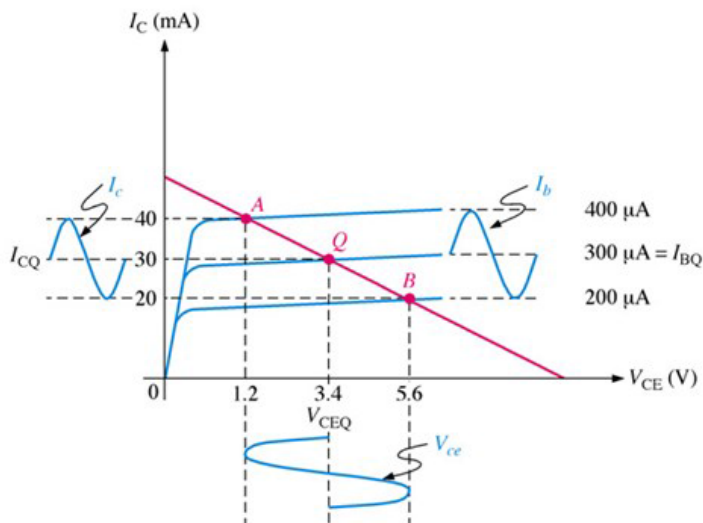


图 7.8 例题直流工作点

如果增大基极的交流电流分量(如幅度取 $200 \mu\text{A}$), 理论上, 输出集电极交流电流幅度为 20 mA , 输出交流电压幅度为 4.4 V 。但是实际上并非如此。当 I_B 过大, 将导致 I_C 过大, 电阻 R_C 上的直流压降过大, 晶体管 V_{CE} 过小, 进入饱和区(对应图中点 A 左侧), 使电流放大系数变小。从输出电压波形角度, 下半周的波形将出现饱和。因此, 为了保证线性放大, 输入信号幅度不能过大。另一方面, 直流工作点 Q 如果选择得不合适(如选择更靠近 A 的点), 也会缩小输入信号的线性放大范围。

7.3.2 静态分析

如图 7.9 所示为基本共射放大电路, 其中基极电阻 $R_4 + R_5$, 集电极电阻 $R_1 + R_2$, 负载电阻 $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$, 电源电压 $V_2 = 12 \text{ V}$ 。基极电阻和集电极电阻分别串接可变电阻 R_5 和 R_1 是为了便于调整静态工作点。输入信号为频率 1 kHz 、峰值 1 mV 的正弦信号。

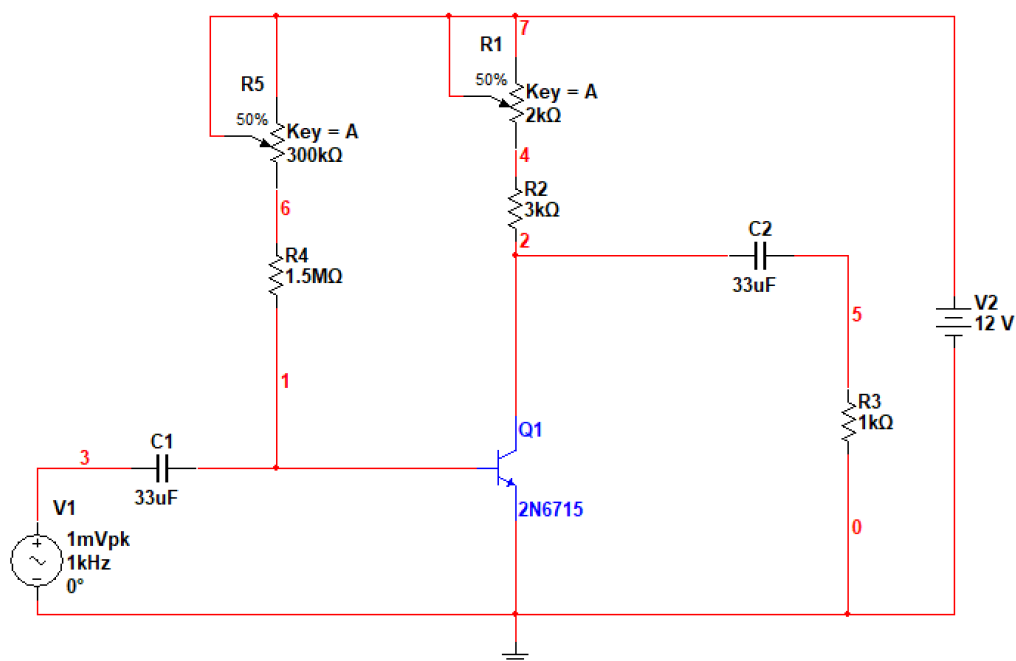


图 7.9 基本共射放大电路

在“Simulate”“Instruments”中选择 Multimeter（万用表）并放置，双击设定为电压（电流）表和直流。在三极管 Q_1 的集电极—发射极间并联电压表 XMM1，基极和集电极分别串接电流表 XMM2 和 XMM3，如图 7.10 所示。

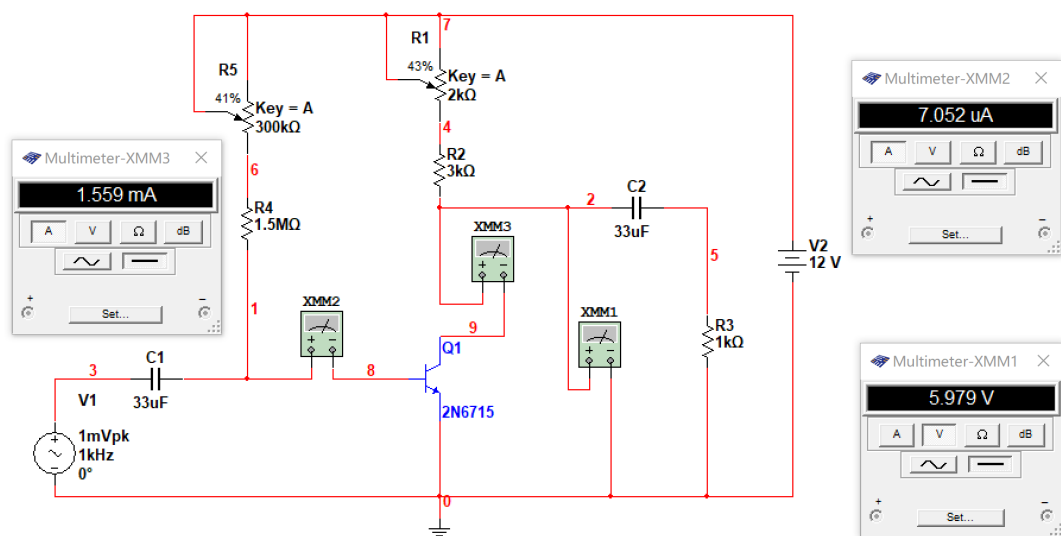


图 7.10 基本共射放大电路直流工作点

调节 R_5 和 R_1 ，设置静态工作点，各表显示值在图 7.5 数据框显示的 $I_{BQ} = 7\mu\text{A}$ 、 $V_{CEQ} =$

5.963V、 $I_{CQ} = 1.542 \text{ mA}$ 附近。图 7.10 显示， $I_{BQ} = 7.052 \mu\text{A}$ 、 $V_{CEQ} = 5.979 \text{ V}$ 、 $I_{CQ} = 1.559 \text{ mA}$ ，计算 $\beta = I_C/I_B = 221.1$ 。

我们再应用估算法计算静态工作点 Q 的基极电流、集电极电流和集电极—发射极电压。

$$I_{BQ} = \frac{V_2 - 0.7}{R_4 + R_5} = \frac{12 - 0.7}{1.5 + 0.3 \times 41\%} = 6.96 \mu\text{A} \quad (7.5)$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 220.3 \times 6.96 \times 10^{-3} = 1.53 \text{ mA} \quad (7.6)$$

$$V_{CEQ} = V_2 - I_{CQ}(R_1 + R_2) = 12 - 1.53 \times (2 \times 43\% + 3) = 6.09 \text{ V} \quad (7.7)$$

可以看到，仿真结果与估算值以及三极管预设参数很接近，说明通过估算法设置静态工作点是比较准确的，三极管处于放大状态。

7.3.3 动态分析

当三极管处于放大区时，在三极管放大电路输入端接入交流信号源，通过三极管电流放大作用，在输出端产生放大的输出电压。图 7.11 中 XSC1 为示波器，端口 A 测输入 V_1 的波形，端口 B 测输出负载电阻 R_3 两端有电压波形，二者均为交流信号。示波器显示曲线线条的颜色由设置与示波器相连接的连线的颜色来设置。选中示波器 A 端口导线，点击鼠标右键，选择颜色绿色；选中示波器 B 端口导线，选择颜色蓝色。

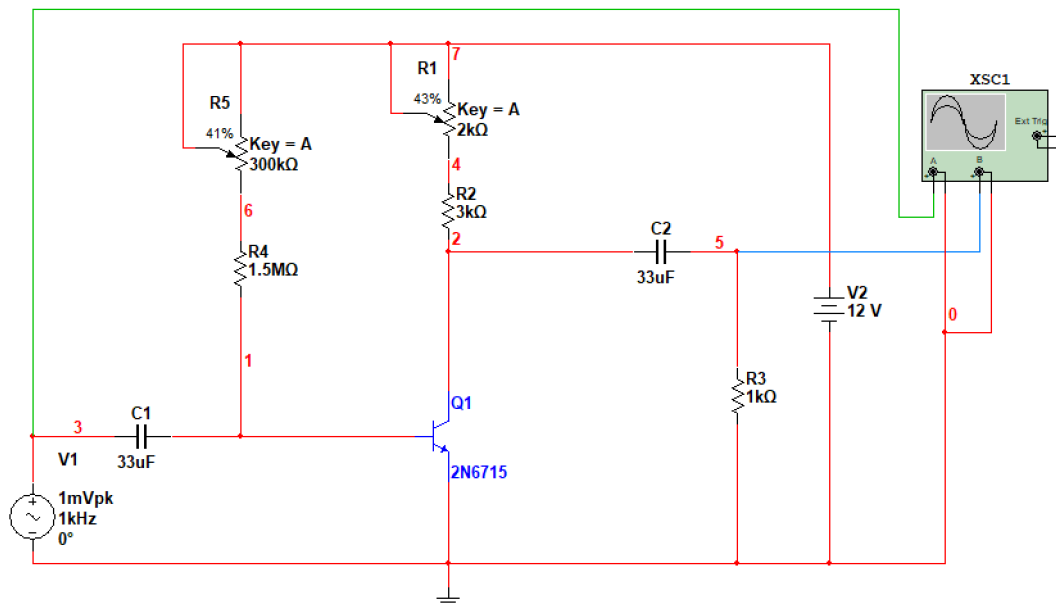


图 7.11 基本共射放大电路动态分析

图 7.12 所示为通过示波器观察到的放大电路的输入波形（绿色）和输出波形（蓝色），从仿真结果能直观地看出基本共射放大电路对输入电压的放大作用。拖动采集数据的标尺，置于

峰值处。经测量：输入信号的峰值为 1 mV，输出波形峰值为 46.2 mV，由于输入输出波形相位差 180° ，所以电压放大倍数 $A_{v_{mu}} = -46.2$ 。

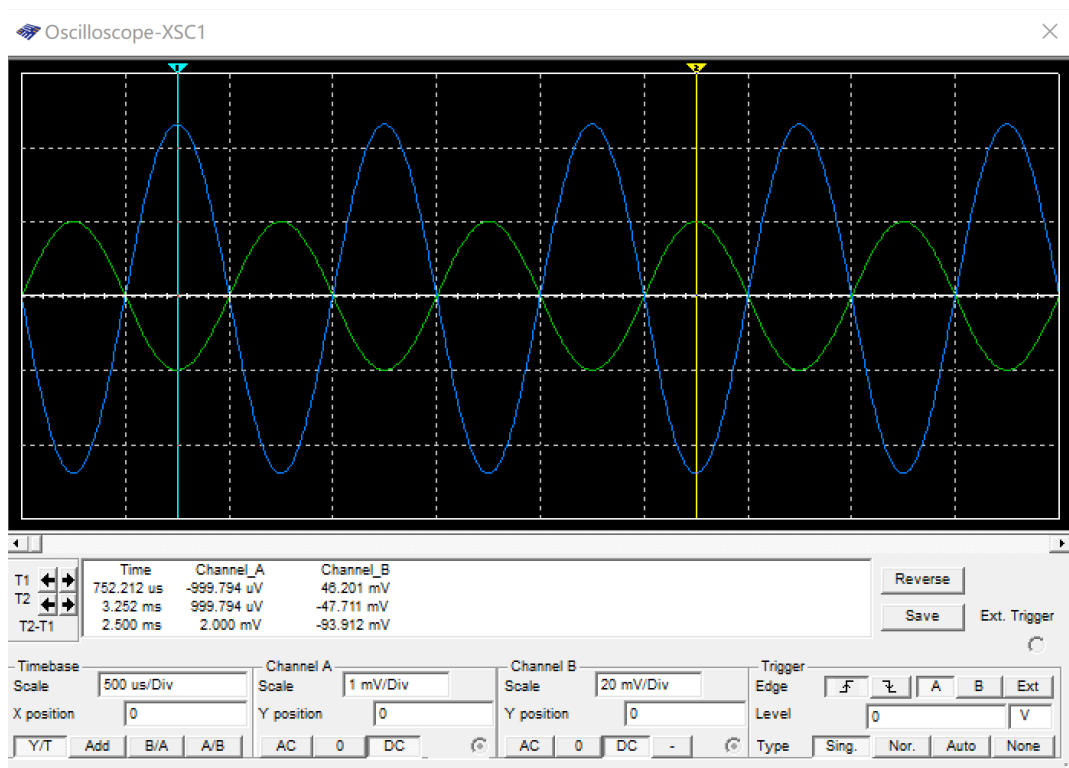


图 7.12 基本共射放大电路动态分析