

学子专区— 共发射极放大器的 频率响应

Doug Mercer, 顾问研究员
Antoniu Miclaus, 系统应用工程师

目标:

本次活动的目的是研究使用NPN BJT晶体管的共发射极放大器配置的频率响应。

共发射极放大器拓扑

典型共发射极放大器的原理图如图1所示。电容 C_B 和 C_C 用于将放大器直流偏置点和输入输出(交流耦合)隔开。电容 C_E 是交流旁路电容,用于在Q1的发射极建立低频交流接地。米勒电容 C_F 是一个小电容,用于控制放大器的3 dB高频响应。

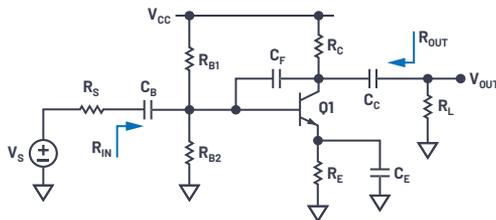


图1. 共发射极BJT放大器。

低频响应

图2显示放大器的低频、小信号等效电路。请注意,假定 C_F 在低频下的阻抗非常高,因此在此等效电路中 C_F 可忽略。 R_B 是 R_{B1} 和 R_{B2} 的并联等效电阻。

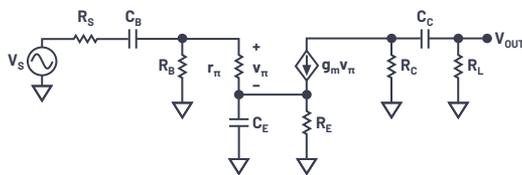


图2. 低频等效电路。

使用短路时间常数分析方法,低频的3 dB频点(ω_L)可通过以下公式计算:

$$\omega_L \approx \frac{1}{R_{1S}C_B} + \frac{1}{R_{2S}C_E} + \frac{1}{R_{3S}C_C} \quad (1)$$

其中

$$R_{1S} = R_S + (R_B \parallel r_\pi) \quad (2)$$

$$R_{2S} = R_E \parallel \left(\frac{r_\pi + (R_B \parallel R_S)}{\beta + 1} \right) \quad (3)$$

$$R_{3S} = R_C \parallel R_L \quad (4)$$

高频响应

图3显示了放大器的高频、小信号等效电路。在高频下, C_B 、 C_C 和 C_E 可使用短路来替代,因为它们与 R_S 、 R_C 和 R_E 相比,它们的阻抗非常小。

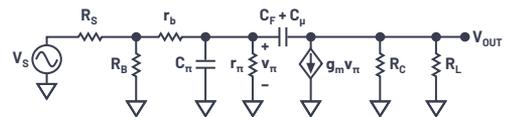


图3. 高频等效电路。

较高的3 dB频率(ω_H)可通过以下公式推导:

$$\omega_H \approx \frac{1}{R_T \left[C_\pi + (C_\mu + C_F) \left(1 + g_m R_{CL} + \frac{R_{CL}}{R_T} \right) \right]} \quad (5)$$

其中

$$R_T = r_\pi \parallel (r_b + (R_S \parallel R_B)) \quad (6)$$

$$R_{CL} = R_C \parallel R_L \quad (7)$$

因此，如果我们假设共发射极放大器可以通过这些主要的低频和高频极点来适当表征，那么该放大器的频率响应的近似值可通过以下公式计算：

$$\frac{v_O}{v_S}(s) = A_v \frac{s}{s + \omega_L} \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_H}} \quad (8)$$

其中：

- s为复角频率
- A_v 为中频增益
- ω_L 为低角频率
- ω_H 为高角频率

实验前设置

假定 $C_B = C_C = C_E = 1$ 法拉， $C_f = C_{\parallel} = C_p = 0$ ，使用2N3904晶体管，设计具有以下规格的共发射极放大器：

- $V_{CC} = 5$ V
- $R_S = 50 \Omega$
- $R_L = 1$ k Ω
- $R_{IN} > 250 \Omega$
- $I_{SUPPLY} < 8$ mA
- $A_v > 50$

容 C_f 是一个

峰峰值非削波输出摆幅 > 3 V

- ▶ 显示您的所有计算、设计步骤和最元件值。
- ▶ 使用LTspice®电路仿真器验证结果。提交表明符合规格的所有必要仿真图。同时提供具有直流偏置点注释的电路原理图。
- ▶ 使用LTspice，计算 $C_f = 0$ 时高频的3 dB频点(f_{hi})。
- ▶ 使用仿真的工作点数据确定晶体管的 C_{π} 、 C_p 和 r_o 。使用“高频响应”部分的公式计算 f_{hi} ，并与第3步中获得的仿真结果进行比较。记住，该公式计算的是角频率，需要将其转换为Hz。
- ▶ 计算 C_f 的值，使 $f_{hi} = 5$ kHz。仿真电路以验证结果并根据需要调整 C_f 的值。
- ▶ 计算 C_B 、 C_C 、 C_E ，使 $f_L = 500$ Hz。执行电路仿真以验证结果，并根据需要调整电容的值。

实验室步骤

目标：

本实验活动的目标是通过构建实际电路并测量其频率响应性能来验证实验前设计的相关元件的值。

材料：

- ▶ ADALM2000主动学习模块
- ▶ 无焊面包板
- ▶ ADALP2000模拟套件中的6个不同电阻值的电阻
- ▶ ADALP2000模拟套件中4个不同电容值的电容
- ▶ 一个小信号NPN晶体管(2N3904)

请注意，在源电阻 R_S 和ADALM2000的AWG输出上，AWG输出具有50 Ω 串联输出电阻，您需要将该电阻以及外部电阻与输出串联。此外，由于设计具有相对较高的增益，您还需要具有约100 mV峰峰值小振幅的输入信号。从噪声角度看，在AWG输出和电路输入之间插入电阻分压器来衰减信号比在软件中调低AWG更好。使用图4中所示的类似设置，将提供1/16衰减系数和60 Ω 等效源电阻。根据您的可用电阻值，也可组合其他电阻值——在我们的示例中，将使用标准电阻值68 Ω 。

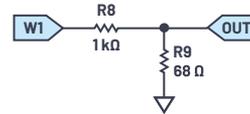


图4. 使用68 Ω 源电阻的信号衰减器。

硬件设置

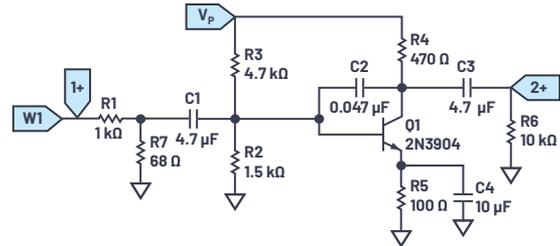


图5. 共发射极放大器面包板原理图。

在面包板上构建电路。

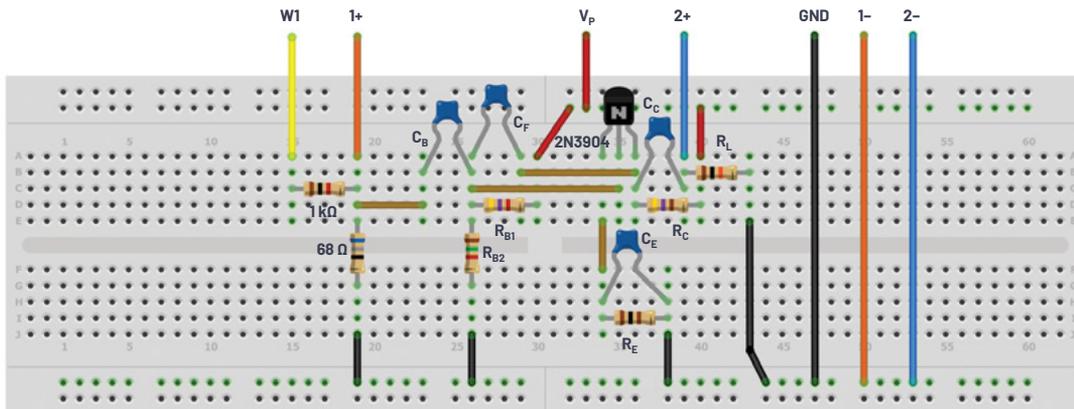


图6. 共发射极BJT放大器面包板连接。

说明

- ▶ 根据图1中的原理图构建您在实验前设计的放大器。基于实验前的设计值，使用套件中最接近的标准值。记住，您可以串联或并联组合标准值，以得到更接近设计数值的组合值。
- ▶ 通过测量 I_C 、 V_E 、 V_C 和 V_B ，检查直流工作点。如果任何直流偏置值与通过仿真获取的值有显著差异，则修改电路以获得所需的直流偏置，再继续执行下一步。
- ▶ 测量 I_{SUPPLY} 。
- ▶ 使用Scopy软件中的网络分析仪工具获取50 Hz至20 kHz的放大器频率响应幅度，并确定3 dB低频 f_L 和高频 f_H 。
- ▶ 在中频频率下，测量 A_V 、 R_{IN} 和 R_{OUT} 。

使用图5中的LTspice电路仿真提供波形图示例。

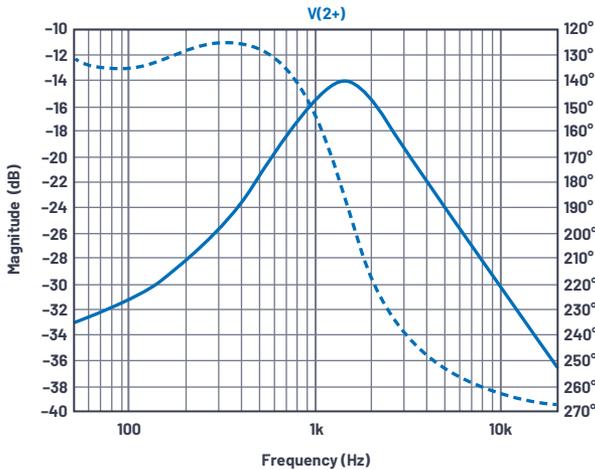


图7. $C_f = 0.047 \mu\text{F}$ 时的LTspice交流扫描图。



作者简介

Doug Mercer于1977年毕业于伦斯勒理工学院(RPI)，获电子工程学士学位。自1977年加入ADI公司以来，他直接或间接贡献了30多款数据转换器产品，并拥有13项专利。他于1995年被任命为ADI研究员。2009年，他从全职工作转型，并继续以名誉研究员身份担任ADI顾问，为“主动学习计划”撰稿。2016年，他被任命为RPI ECSE系的驻校工程师。联系方式：doug.mercer@analog.com。



作者简介

Antoniu Miclaus现为ADI公司的系统应用工程师，从事ADI教学项目工作，同时为Circuits from the Lab®、QA自动化和流程管理开发嵌入式软件。他于2017年2月在罗马尼亚克卢日-纳波卡加盟ADI公司。他目前是贝碧思鲍耶大学软件工程硕士项目的理学硕士生，拥有克卢日-纳波卡科技大学电子与电信工程学士学位。联系方式：antoniu.miclaus@analog.com。

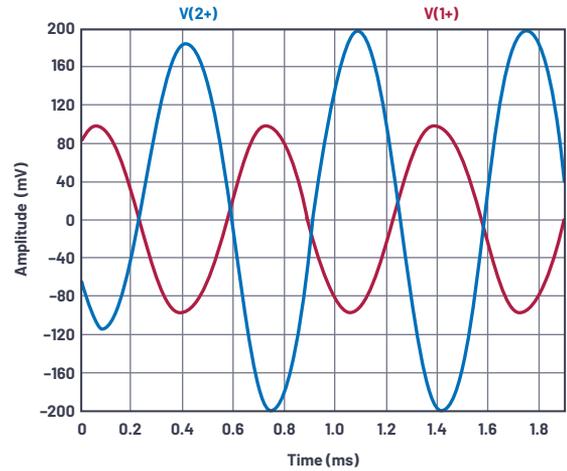


图8. $C_f = 0.047 \mu\text{F}$ 且频率 = 1.5 kHz时的LTspice图。

问题:

- ▶ 改用一个容值更小(0.01 μF)的电容 C_f ，并使用网络分析仪工具或交流扫描仿真重新测量响应曲线。观察新电容值对响应的影响，并解释说明。

您可以在[学子专区博客](#)上找到问题答案。

