

# 学子专区—ADALM2000实验： 发射极跟随器(BJT)

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

## 目标

本次实验的目的是研究简单的NPN发射极跟随器, 有时也被称为共集电极配置。

## 材料

- ▶ ADALM2000主动学习模块
- ▶ 无焊面包板
- ▶ 跳线
- ▶ 一个2.2 kΩ电阻( $R_L$ )
- ▶ 一个小信号NPN晶体管 (Q1采用2N3904)

## 说明

面包板连接如图2所示。任意波形发生器W1的输出连接至Q1的基极端子。示波器输入1+ (单端) 也连接至W1输出。集电极端子连接至正极(Vp)电源。发射极端子连接至2.2 kΩ负载电阻和示波器输入2+ (单端)。负载电阻的另一端连接至负极(Vn)电源。要测量输入-输出误差, 可以将2+连接至Q1的基极, 2-连接至发射极, 以显示示波器通道2的差值。

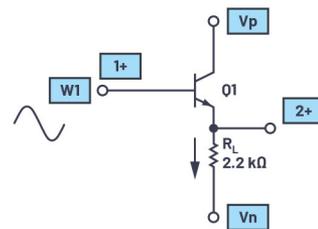


图1. 发射极跟随器。

## 硬件设置

波形发生器配置为1 kHz正弦波, 峰峰值幅度为4 V, 偏移为0。示波器通道2的单端输入(2+)用于测量发射极的电压。示波器配置为连接通道1+以显示AWG发生器输出。在测量输入-输出误差时, 应连接示波器的通道2, 以显示2+和2-之间的差值。

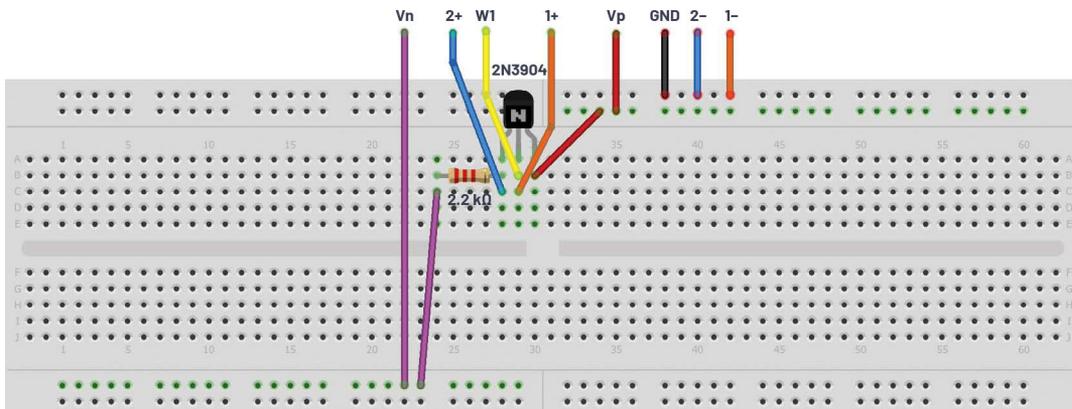


图2. 发射极跟随器面包板电路。

## 程序步骤

配置示波器以捕获所测量的两个信号的多个周期。产生的波形如图3所示。

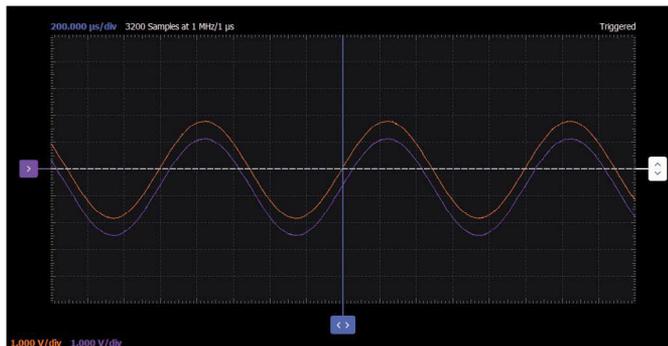


图3. 发射极跟随器波形。

发射极跟随器的增量增益( $V_{OUT}/V_{IN}$ )理想值为1, 但总是略小于1。增益一般通过以下公式计算:

$$A = \frac{R_L}{R_L + r_e} \quad (1)$$

从公式可以看出, 要获得接近1的增益, 我们可以增大 $R_L$ 或减小 $r_e$ 。也可以看出,  $r_e$ 是 $I_E$ 的函数,  $I_E$ 增大,  $r_e$ 会减小。此外, 从电路可以看出,  $I_E$ 与 $R_L$ 相关, 如果 $R_L$ 增大,  $I_E$ 会减小。在简单的电阻负载发射极跟随器中, 这两种效应相互抵消。所以, 要优化跟随器的增益, 我们需要找到能在不影响另一方的情况下降低 $r_e$ 或增大 $R_L$ 的方法。如果从另一个角度来看跟随器, 因为晶体管 $V_{BE}$ 本身的DC偏移, 在预期的摆幅内输入和输出之间的差值应是恒定的。受简单的电阻负载 $R_L$ 影响, 发射集电流 $I_E$ 会随着输出上下摆动而升高和降低。因为 $V_{BE}$ 是 $I_E$ 的指数函数, 当 $I_E$ 的变化系数为2时,  $V_{BE}$ 的变化幅度约为18 mV (室温下)。以+2 V至-2 V的摆幅为例, 最小 $I_E = 2 \text{ V}/2.2 \text{ k}\Omega$ 或0.91 mA, 最大 $I_E = 6 \text{ V}/2.2 \text{ k}\Omega$ 或2.7 mA。  $V_{BE}$ 的变化幅度为28 mV。根据这些实验结果, 我们能从一个方面改善发射极跟随器。为了让放大器晶体管发射极电流固定不变, 现在

使用“ADALM2000实验: BJT电流镜”中的电流镜来替代发射极负载电阻。电流镜能在宽电压范围内获取较为恒定的电流。晶体管中这种较为恒定的电流会导致 $V_{BE}$ 相当恒定。从另一个角度来看, 电流源中极高的输出电阻可以有效提高 $R_L$ , 但 $r_e$ 保持为电流设定的低值。

## 改善的发射极跟随器

### 附加材料

- ▶ 一个3.2 k $\Omega$ 电阻 (将1 k $\Omega$ 和2.2 k $\Omega$ 电阻串联)
- ▶ 一个小信号NPN晶体管 (Q1采用2N3904)
- ▶ 两个小信号NPN晶体管 (Q2和Q3均采用SSM2212), 以实现最佳 $V_{BE}$ 匹配

### 说明

面包板连接如图4和图5所示。

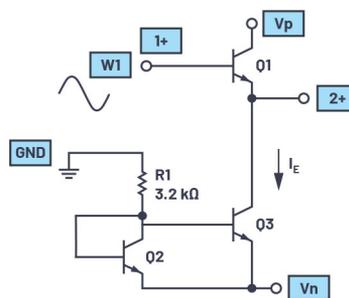


图4. 已改善的发射极跟随器。

### 硬件设置

波形发生器配置为100 Hz三角波, 峰峰值幅度为3 V, 偏移为0。示波器通道2的单端输入(2+)用于测量Q1的发射极的电压。示波器配置为连接通道1+以显示AWG发生器输出。在测量输入-输出误差时, 应连接示波器的通道2, 以显示2+和2-之间的差值。

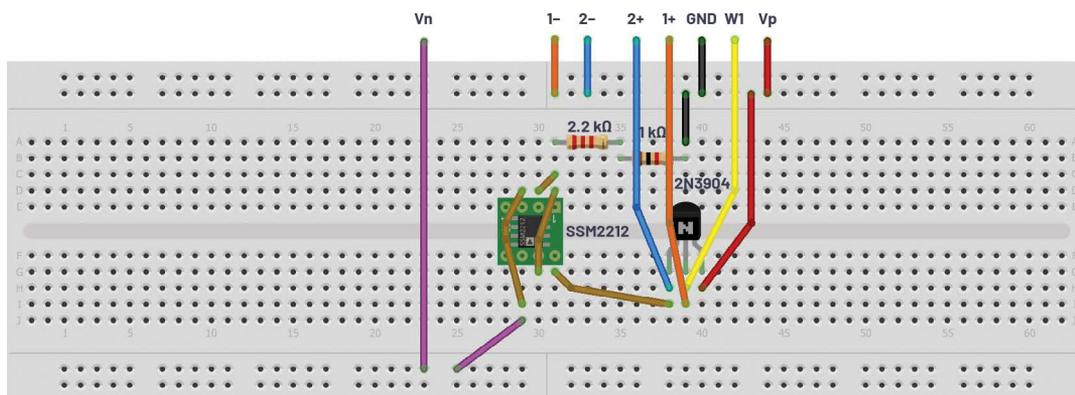


图5. 改善的发射极跟随器面包板电路。

## 程序步骤

配置示波器以捕获所测量的两个信号的多个周期。产生的波形如图6所示。

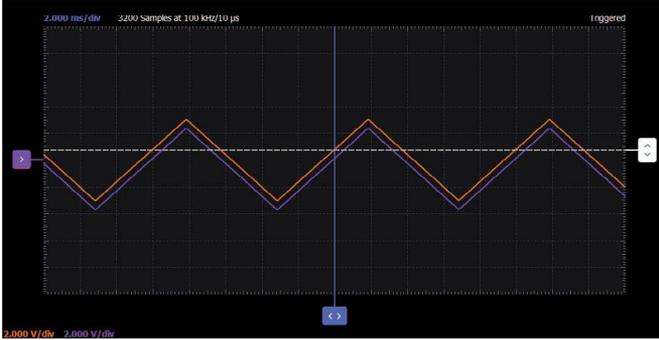


图6. 改善的发射极跟随器波形。

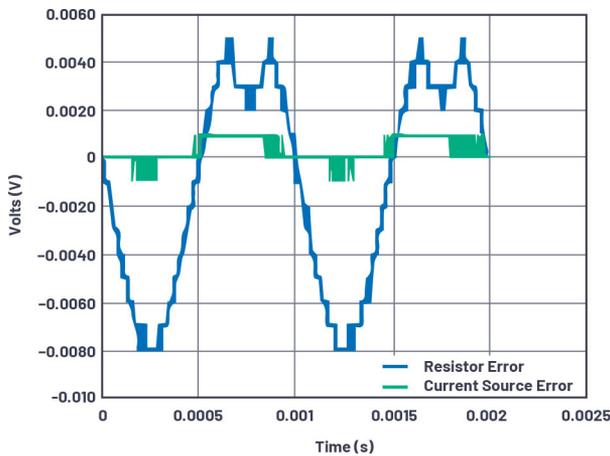


图7. 电阻和电流源负载的输入-输出误差的Excel图示例。

## 低偏移跟随器

我们此前讨论的跟随器电路具有内置偏移 $-V_{BE}$ 。接下来使用的电路利用PNP发射极跟随器的 $V_{BE}$ 向上偏移来抵消NPN发射极跟随器的 $V_{BE}$ 向下偏移。

## 材料

- ▶ 一个6.8 kΩ电阻
- ▶ 一个10 kΩ电阻
- ▶ 一个0.01 μF电容
- ▶ 一个小信号PNP晶体管 (Q1采用2N3906)
- ▶ 三个小信号NPN晶体管 (Q2、Q3和Q4采用2N3904或SSM2212)

## 说明

面包板连接如图8和图9所示。函数发生器的输出连接至PNP晶体管Q1的基极端子。Q1的集电极端子连接至二极管NPN Q3，这是电流镜的输入。发射极端子连接至电阻R1和NPN晶体管Q2的基极端子。示波器输入2+连接至Q2的发射极和Q4的集电极。Q3和Q4的发射集连接至负极(Vn)电源。为了实现最佳晶体管匹配，Q3和Q4使用SSM2212 NPN匹配对。

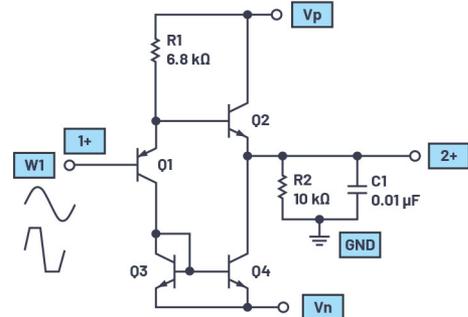


图8. 低偏移跟随器。

## 硬件设置

波形发生器配置为1 kHz正弦波，峰峰值幅度为4 V，偏移为0。示波器输入通道2设置为500 mV/div。

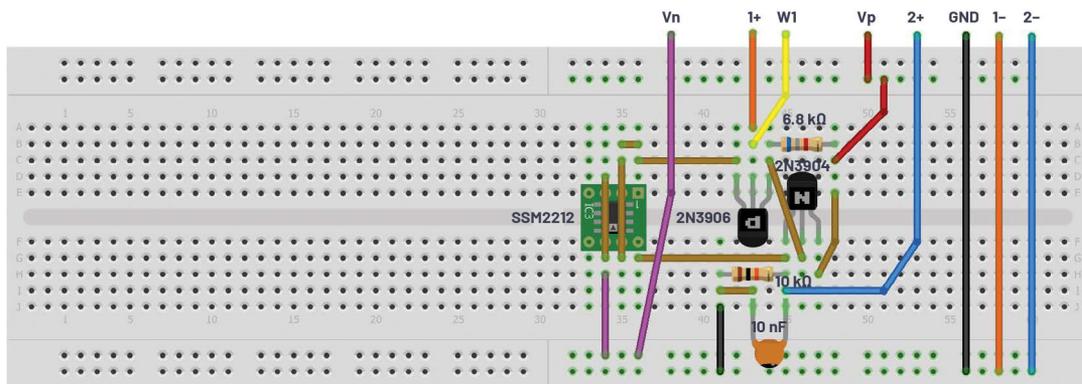


图9. 低偏移跟随器面包板电路。

## 程序步骤

配置示波器以捕获所测量的两个信号的多个周期。产生的波形如图10所示。

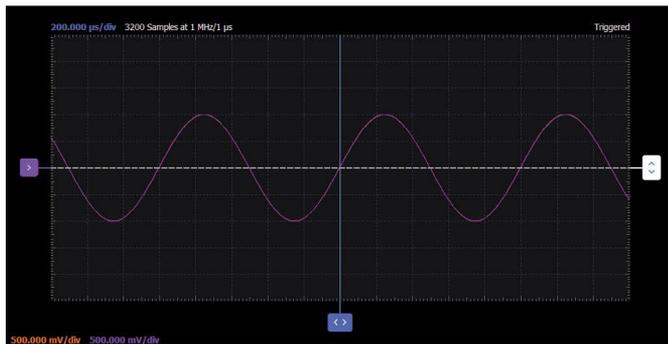


图10. 低偏移跟随器波形。

在简单的发射极跟随器驱动容性负载时，会产生一个问题。由于发射极电流仅受 $\beta$ 乘以基极电流的限制，该倍数由驱动基极的信号源提供，因此输出的上升时间相对较快。下降时间可能慢的多，会受发射集电阻或电流源限制。

## 平衡压摆率跟随器

### 材料

- ▶ 两个2.2 k $\Omega$ 电阻
- ▶ 一个10 k $\Omega$ 电阻
- ▶ 一个0.01  $\mu$ F电容
- ▶ 三个小信号PNP晶体管 (Q2、Q3和Q4采用2N3906或SSM2220)
- ▶ 三个小信号NPN晶体管 (Q1、Q5和Q6采用2N3904或SSM2212)

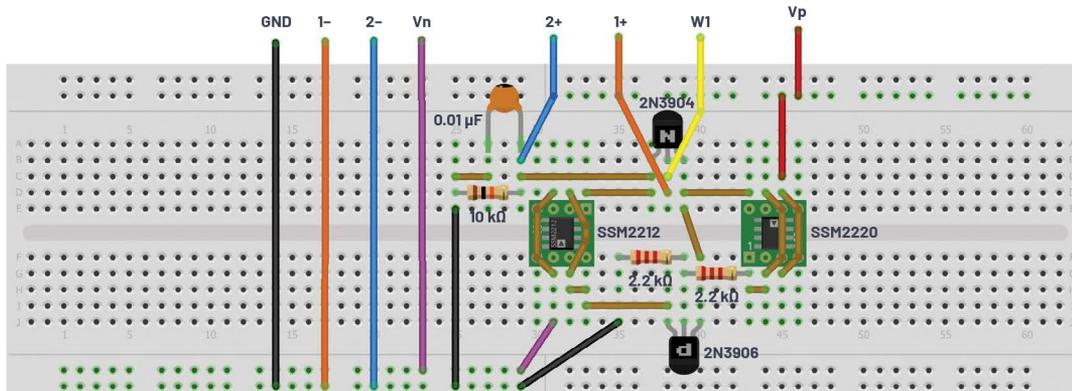


图12. 平衡压摆率跟随器面包板电路。

## 说明

图11所示的电路在负载电流变化时，使用反馈来调节发射极跟随器中的电流。拉动负极输出的电流可以达到N（NPN镜的增益）乘以PNP Q3的电流。为了实现最佳晶体管匹配，Q3和Q4使用SSM2220 PNP匹配对，Q5和Q6使用SSM2212 NPN匹配对（NPN电流镜增益为1）。添加第二个SSM2212，与Q5并联（以提高电流镜的增益）。

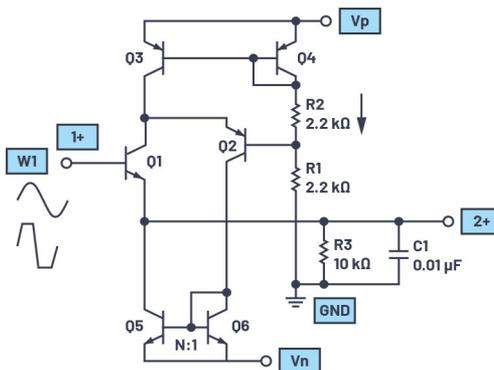


图11. 平衡压摆率跟随器。

### 硬件设置

波形发生器配置为1 kHz正弦波，峰峰值幅度为4 V，偏移为0。示波器输入通道2设置为1 V/div。

## 程序步骤

配置示波器以捕获所测量的两个信号的多个周期。产生的波形如图13所示。

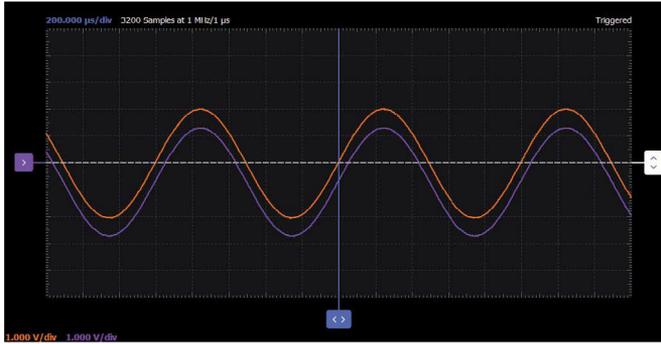


图13. 平衡压摆率跟随器波形。

改善发射极跟随器的另一种方法是通过负反馈来降低有效 $r_e$ 。可以通过增加第二个晶体管，通过增大开环增益来增大负反馈因子，以此降低 $r_e$ 。单个晶体管被一个反馈对取代，后者向第一个晶体管的发射集提供100%电压反馈。这个反馈对通常被称为互补反馈对。R2的值决定着能否实现出色的线性度，这是因为它决定了晶体管Q1的 $I_C$ ，也决定了其集电极的负载。

## 互补反馈对发射极跟随器

### 材料

- ▶ 一个2.2 kΩ电阻
- ▶ 一个10 kΩ电阻
- ▶ 一个小信号NPN晶体管 (Q1采用2N3904)
- ▶ 一个小信号PNP晶体管 (Q2采用2N3906)

## 说明

面包板连接如图14和图15所示。

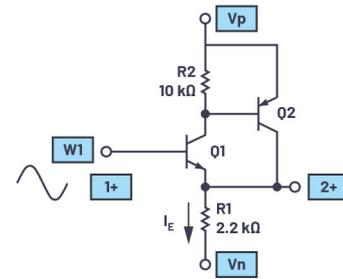


图14. 互补反馈对发射极跟随器。

## 硬件设置

波形发生器配置为1 kHz正弦波，峰峰值幅度为2 V，偏移为0。示波器输入通道2设置为1 V/div。

## 程序步骤

配置示波器以捕获所测量的两个信号的多个周期。产生的波形如图16所示。

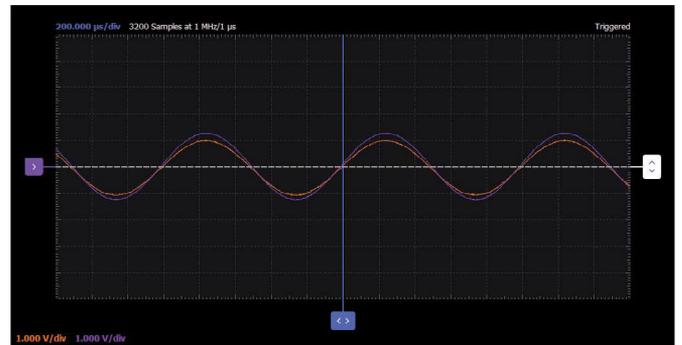


图16. 互补反馈对发射极跟随器波形。

## 问题：

您可以给出发射极跟随器电路的三个特性吗？

您可以在[学子专区论坛](#)上找到问题答案。

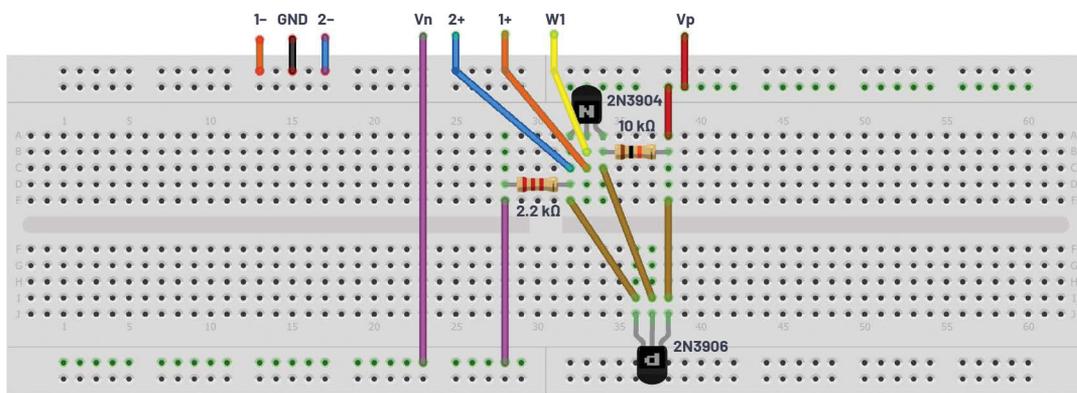


图15. 互补反馈对发射极跟随器面包板电路。



## 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](mailto:doug.mercer@analog.com)。



## 作者简介

Antoni 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：[antoni.miclaus@analog.com](mailto:antoni.miclaus@analog.com)。

