

射极跟随器输出负载加重导致波形失真问题

作者: zhsj 日期: 2014-7-8

前几天, 在一本模电书上看到如下图所示的一个电路, 该电路是一个典型的射极跟随器电路, 基极电位由 R1 和 R2 分压而得, 理论计算为 7.5V (实测约为 7.37V), 基极和射极之间的导通电压为 0.73V, 因此静态时射极电位为 6.6V, 则射极电流约为 9.7mA, 即:

$$U_{BQ} = 7.37V \quad (\text{式 1})$$

$$U_{EQ} = 6.6V \quad (\text{式 2})$$

$$I_{EQ} = 9.7mA \quad (\text{式 3})$$

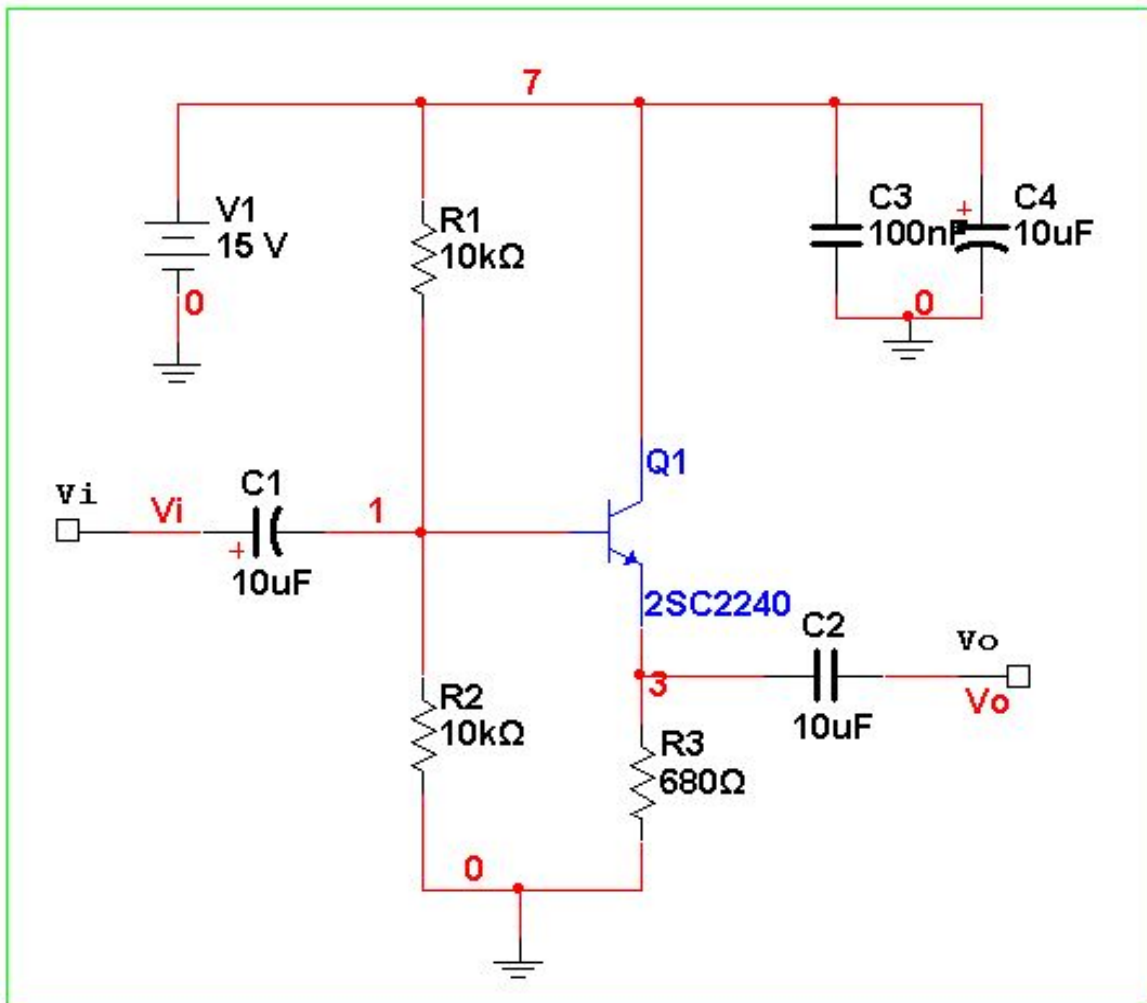


图 1 射极跟随器电路图

当 V_i 中输入 100Hz, V_{p-p} 为 8V 的正弦波信号时, 输入输出波形如下图所示:

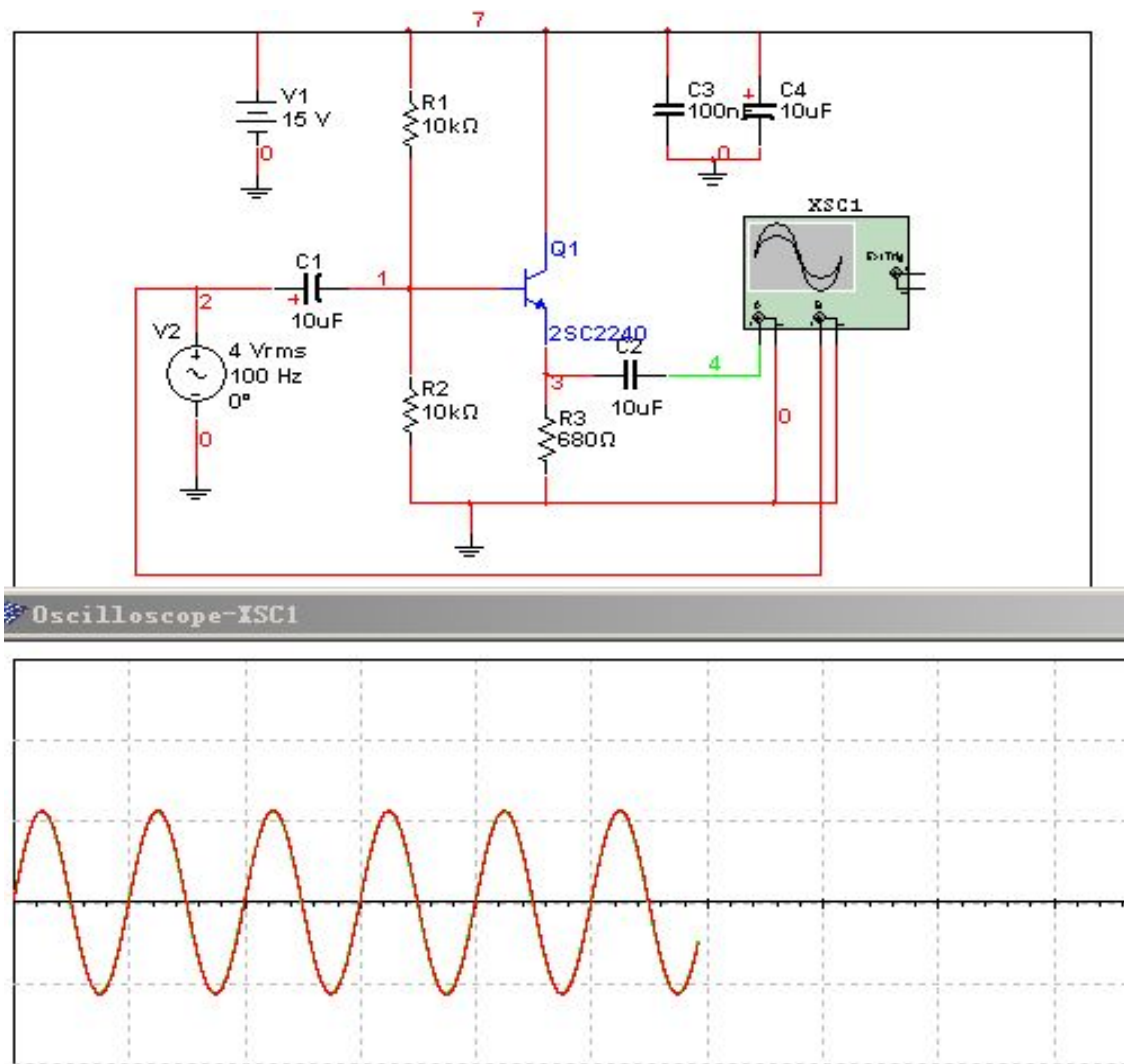


图2 电路仿真波形

由图2可以看出，输入输出波形几乎完全重合，这也正符合设计跟随器的特性，即电压放大倍数约为1，且输入输出同相。

但是，当射极跟随器电路的输出端接上 680Ω 的负载时，输出波形却出现了比较严重的失真，而且是底部失真，如图3中所示，图中红色的波形代表的是射极的输出电压波形，绿色的波形代表的输出端的电压波形。

我所看的那本书中说这是被发射极（空载）电流所制约的缘故。苦思冥想了一下午也没有想清楚发射极（空载）电流时如何制约的。因为我看的这本书是一外国人写的，所以国内翻译的时候总会有一些偏差，书中将其称为“发射极（空载）电流”，其实这个电流是静态射极电流，就是那个 I_{EQ} 。书中没有更为详细的解释，于是我就求救于论坛，或许是我太笨了，论坛上各位“大神”的讲解让我越发的糊涂。好吧，我只能重新去思考这个问题。

从波形图中我们可以看出，射极电压在大约 $3.3V$ 的时候出现了失真（图中纵向一个格为 $5V$ ）。前面提到过我们的输入信号为 $100Hz$ ， V_{P-P} 为 $8V$ 的正弦波信号，而基极电位有 $7.37V$ 的直流偏置，因此基极电位的最小值为 $7.37-4=3.37V$ ，如果此时射极电位为 $3.3V$ ，那么很明显发射结无法导通，因此图中所示的失真是截止失真。

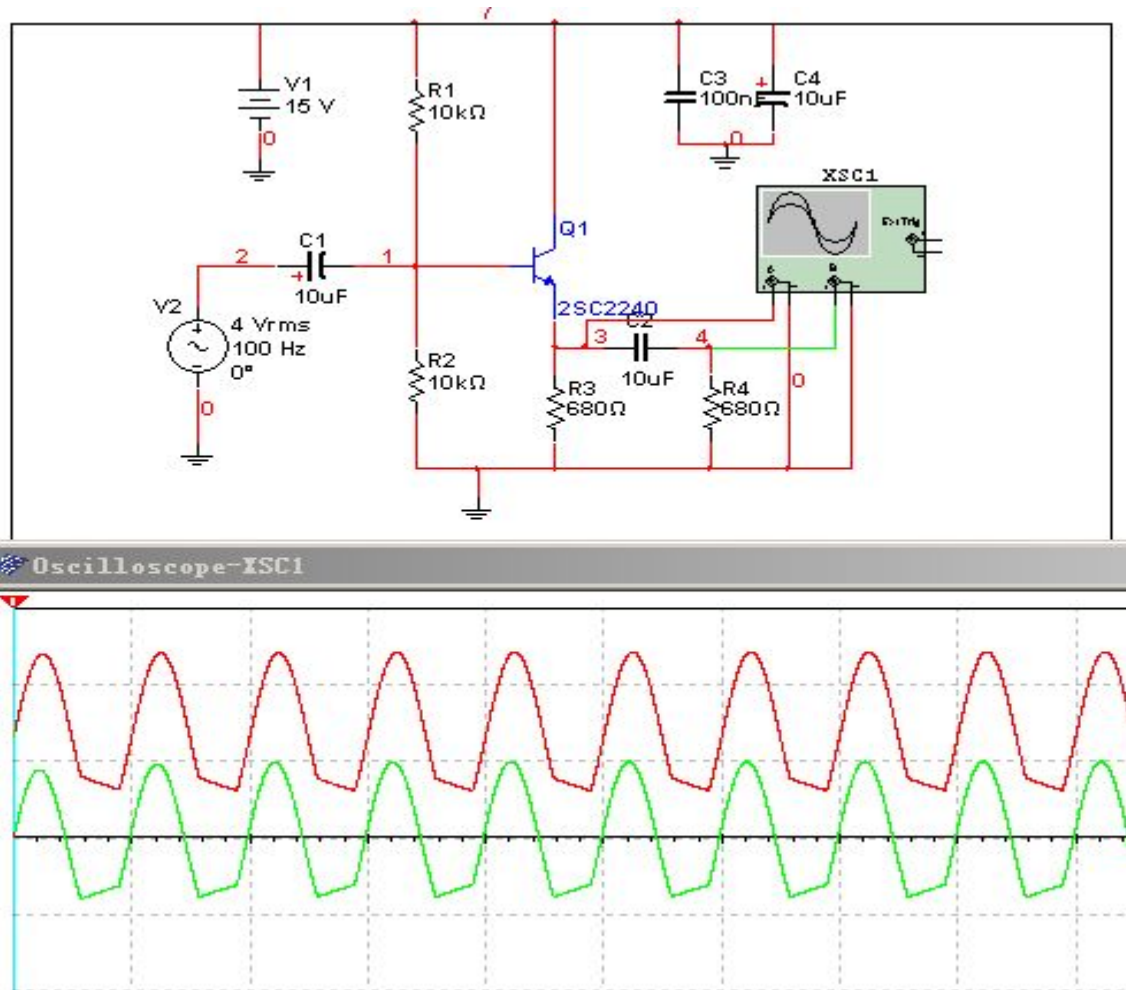


图3 加入负载后输出波形底部失真

下面我们就来分析之所以出现失真的原因，首先，我们分析当电路不失真时射极的电流组成，射极电流有直流和交流组成，直流即为 9.7mA，然后交流成分驮伏在直流成分上，这一点可以通过观察电路不失真时射极的电压波形即可得出，因为射极电压等于电阻 R3 与射极电流的乘积。

然后在看射极的电路组成，从射极输出的电流有两条通路，一条是经过 R3 到达地，第二条是经过电容 C2 和电阻 R4 后进入地。而电容具有“隔直通交”的特性，因此射极电流中的直流不会经过 R4，除此之外，电容还有一条特性，那就是电容两端的电压不能突变。当电路上电时，由于直流电流不会经过 C2 和 R4，只会通过 R3，使得射极电位比输出端电位高约 6.6V，当射极电流随着输入信号的增加而逐步增加是，通过 R3 的电流也逐渐增加，使得射极电位逐渐升高，而电容两端的电压不能突变，所以输出端的电位也逐渐提高，即通过 R4 的电流逐渐提高，此时电流方向如图 4 所示，且有：

$$I_E = I_R + I_C \quad (\text{式 4})$$

且 I_E 、 I_R 、 I_C 均大于 0，所以此时（即在输入信号的正半轴部分）， I_E 始终大于 0，即三极管没有出现失真。

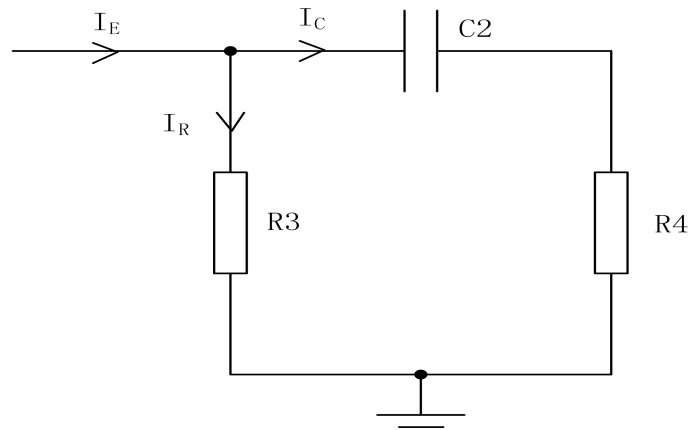


图 4 输入信号在正半轴时的电流关系

而当输入信号小于 0 时，此时射极电流也有 9.7mA 开始逐渐降低，由于电容两端的电压不能突变，所以输出端的电位也逐渐降低，此时的电流方向如图 5 所示，且有：

$$I_E = I_R - I_C \quad (\text{式 } 5)$$

由 (式 5) 我们可以看出，如果某个时刻 $I_R = I_C$ ，即 $I_E = 0$ ，那么此时三极管将截止，输出波形将出现底部失真。

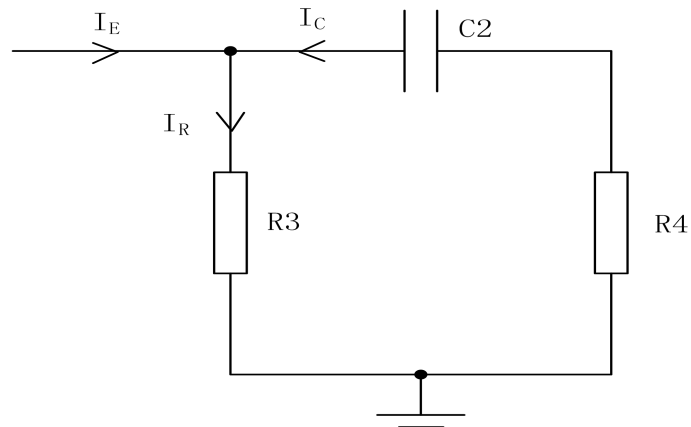


图 5 输入信号在负半轴时的电流关系

那么什么时候会出现上述情况呢？我们可以倒着来分析，倘若此时刚好出现上述情况，即 $I_R = I_C$ 的一瞬间，此时 $I_E = 0$ ，那么我们可以将电路分离出来，因为输出部分的电路此时已经和前面的电路没有关系，分离出来的电路如图 6 所示。此时电容两端的电压仍为 6.6V，设电路中的电流为 I ，则可以得出如下式：

$$U_A = I \cdot R_3 \quad (\text{式 } 6)$$

$$U_B = -I \cdot R_4 \quad (\text{式 } 7)$$

$$U_A - U_B = 6.6V \quad (\text{式 } 8)$$

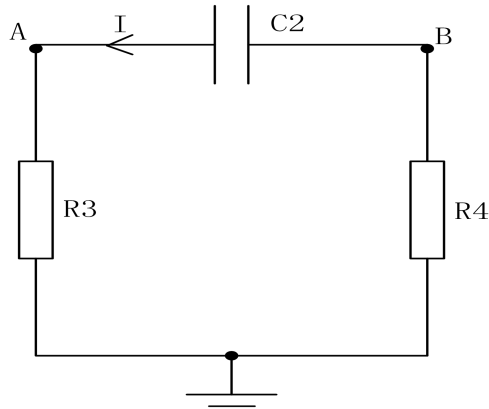


图6 $I_E=0$ 时分离出来的电路

由此可以解得：

$$U_B = \frac{6.6V}{R_3 + R_4} \cdot R_4 \quad (\text{式 9})$$

(式 9) 中的 6.6V 即为射极直流电流与电阻 R3 的乘积，因此 (式 9) 可以改写成下式：

$$U_B = \frac{9.7mA \cdot R_3}{R_3 + R_4} \cdot R_4 = 9.7mA \cdot (R_3 // R_4) \quad (\text{式 10})$$

也就是说，当输出端电位下降到 $-9.7mA \cdot (R_3 // R_4)$ 的时候，三极管开始截止，输出波形开始出现失真。对于本题中的例子，我们可以计算一下， $9.7mA \cdot (R_3 // R_4) = 9.7mA \cdot 340\Omega = 3.3V$ ，与仿真波形基本一致。

声明：

本人是一位大二学生，对于上面的分析，是我经过查阅资料并加上自己的理解而总结的，也许会有一些疏漏和不足之处，甚至会有分析错误，希望大家多多交流，谢谢！我的邮箱：zhsjsuccess@foxmail.com

参考文献

- [1] 童诗白 华成英 主编 模拟电子技术基础 第四版 高等教育出版社
- [2] 陈永真 编著 电容器及其应用 科学出版社 北京
- [3] 铃木雅臣 著 晶体管电路设计(上) 科学出版社 北京