

静态工作点对共射放大电路上限截止频率的影响

李 勇¹, 吕宏璋², 章毛连¹, 张永锋¹, 韩新风¹

(1. 安徽科技学院, 安徽 凤阳 233100; 2. 凤阳县武店中学, 安徽 凤阳 233100)

摘 要: 本文讨论了在高频段静态工作点对共射放大电路上限截止频率的影响, 并通过仿真实验进行了检验, 结果表明静态工作点的合理设置可以改善放大电路的高频特性, 展宽频带, 但对中频电压放大倍数也会产生影响。

关键词: 静态工作点; 共射放大电路; 上限截止频率; 中频电压放大倍数

中图分类号: TN710.2

文献标识码: A

文章编号: 1008-7109(2013)04-0038-05

放大电路放大的对象是动态信号, 为保证放大电路正常工作, 需设置合适的静态工作点(Q 点), 因为 Q 点不仅影响放大电路是否会产生失真, 还影响着放大电路电压放大倍数、输入电阻、输出电阻等动态参数。在低频段, 不用考虑晶体管发射结和集电结电容的影响, 常采用 h 参数等效模型进行动态分析, 有关 Q 点对共射放大电路电压放大倍数等动态参数的影响, 在相关的教材中都有详细的介绍^[1-5], 此处不再赘述。在高频段, 由于要考虑晶体管发射结和集电结电容的影响, 一般采用混合 π 型模型进行动态分析。有关 Q 点对共射放电路上限截止频率的影响很少有资料提及, 本文将结合实例讨论在高频段 Q 点对共射放电路上限截止频率的影响。

1 电路分析

1.1 单级共射放大电路

1.1.1 电路及其主要参数

图 1(a) 是单级共射放大电路, 晶体管采用高频小信号管 ZTX325, 信号源为正弦电压源, 设置参数: $1\text{mV}/10\text{kHz}/0\text{Deg}$ 。耦合电容 C_1 、 C_2 与旁路电容 C_3 的大小相等, 都为 $10\mu\text{F}$ 。其它电路元件参数如图 1(a) 所示。

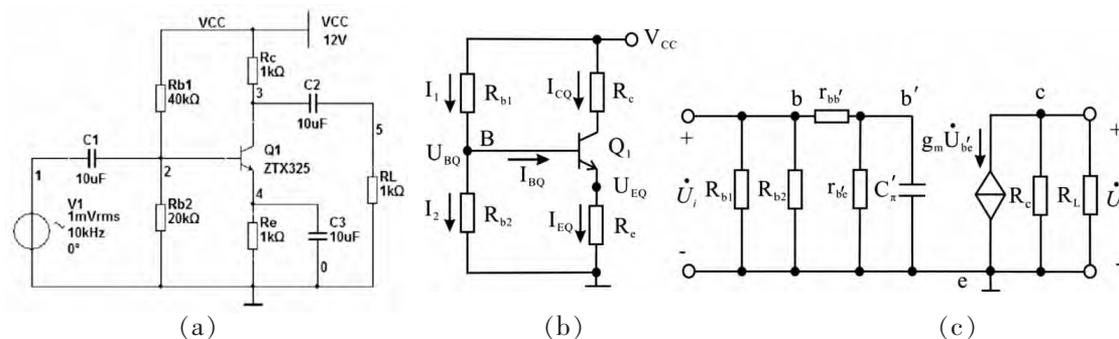


图 1 单级共射放大电路 (a) 电路图、(b) 直流通路、(c) 高频等效电路

收稿日期: 2013-09-23

第一作者简介: 李勇, 男, 安徽科技学院理学院副教授。

基金项目: 安徽科技学院教学研究项目 (项目编号: X2012065); 安徽科技学院校级应用型共享课程 (项目编号: Xj201334) 联合资助。

1.1.2 静态工作点分析

图 1(b)是直流通路,为了稳定 Q 点,电路参数的选取满足 $I_2 \gg I_{BQ}$,则 $U_{BQ} \approx \frac{R_{b2}}{R_{b1}+R_{b2}} V_{CC}$,静态工作点主要参数分别为:

$$I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_e} \approx I_{CQ}, U_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{CQ}(R_c + R_e), I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1+\beta} \quad (1)$$

1.1.3 动态分析

放大电路高频等效电路如图 1(c),在晶体管混合 π 型模型中,主要参数分别为: $b'-e$ 间总电阻

$$r_{b'e} = (1+\beta) \frac{U_T}{I_{EQ}} \approx \frac{U_T}{I_{BQ}} \quad (2)$$

在常温下, $U_T = 26mV$ 。跨导 g_m

$$g_m = \frac{I_{EQ}}{U_T} \quad (3)$$

$b'-e$ 间总电容

$$C'_\pi = C_\pi + \left(1 + \left| \frac{\dot{U}_{ce}}{\dot{U}_{b'e}} \right| \right) C_\mu = C_\pi + [1 + g_m R'_L] C_\mu \quad (4)$$

式中 $R'_L = (R'_c // R'_L)$, C_π 为发射结电容, C_μ 为集电结电容。单级放大电路的上限截止频率

$$f_H = \frac{1}{2\pi[r_{b'e} // (r_{bb'} + R // (R_{b1} // R_{b2}))] C'_\pi} \quad (5)$$

$r_{bb'}$ 为基极体电阻, R_s 为信号源内阻,当 $R_s \ll (R_{b1} // R_{b2})$, 有

$$f_H = \frac{1}{2\pi[r_{b'e} // (r_{be} // (r_{bb'} + R_s))] C'_\pi} \quad (6)$$

放大电路在中频段的电压放大倍数

$$\dot{A}_{um} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-g_m \dot{U}_{b'e} R'_L}{\frac{r_{be}}{r_{b'e}} \dot{U}_{b'e}} = \frac{r_{b'e}}{r_{be}} [-g_m R'_L] \quad (7)$$

式中 $r_{be} = r_{bb'} + r_{b'e}$

动态参数分析表明,当单级放大电路的静态工作点发生变化时, I_{EQ} 值将发生变化, g_m 和 C'_π 的值也将发生改变,导致放大电路的上限截止频率和中频电压放大倍数都将发生变化。

1.2 多级共射放大电路

在多级共射放大电路中,电路的上限截止频率与各级放大电路的上限截止频率之间满足以下关系^[1]:

$$\frac{1}{f_H} \approx \sqrt{\sum_{k=1}^N \frac{1}{f_{Hk}^2}} \quad (8)$$

若两级放大电路是由两个具有相同频率特性的单级放大电路组成时, 其上限截止频率满足: $f_H \approx 0.643f_{H1}$ 。对各级具有相同频率特性的三级放大电路,其上限截止频率满足: $f_H \approx 0.52f_{H1}$ 。由此可见,放大电路的级数愈多,其上限截止频率愈低。同时(8)式也反映出,在多级放大电路中,由于各级放大电路的上限截止频率都受静态工作点 Q 的影响,因此,整个放大电路的上限截止频率也受静态工作点 Q 的影响。

2 仿真实验

为了检验静态工作点对单级和多级共射放大电路的上限截止频率及中频电压放大倍数的影响,本文还进行了仿真实验。

2.1 单级共射放大电路

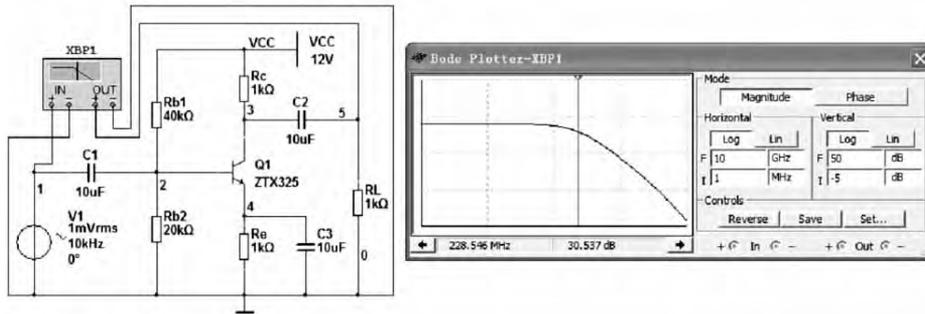


图2 $R_e=1.0k\Omega$ 单级共射放大电路的上限截止频率

对图1(a)所示的电路进行仿真实验。在仿真实验过程中通过改变射极电阻 R_e 的数值来改变放大电路静态工作点,从而来分析静态工作点对放大电路上限截止频率的影响。图2是射极电阻 $R_e=1.0k\Omega$ 单级共射放大电路的仿真图,图3是射极电阻 $R_e=1.5k\Omega$ 单级共射放大电路的仿真图,两种情况下,输出信号都未出现失真。仿真的结果见表1,当射极电阻 $R_e=1.0k\Omega$,单级放大电路的上限截止频率为228.546 MHz,中频电压增益为33.499 dB。当射极电阻 $R_e=1.5k\Omega$,单级放大电路的上限截止频率为261.567 MHz,中频电压增益为30.738 dB。仿真的结果表明随着射极电阻 R_e 的数值增大,Q点在直流负载线上下移,放大电路的中频电压增益下降,上限截止频率升高。

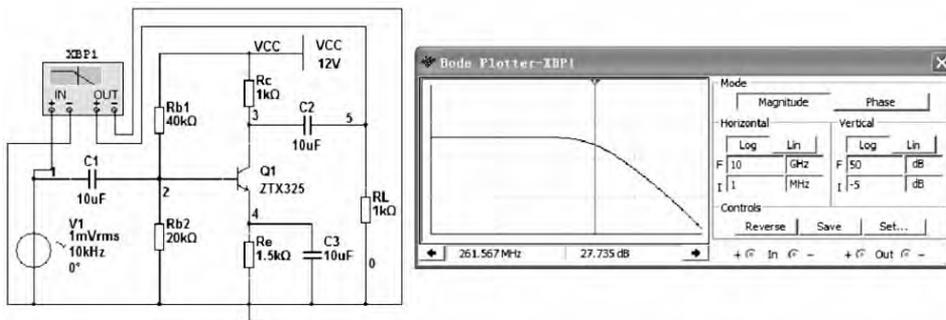


图3 $R_e=1.5k\Omega$ 单级共射放大电路的上限截止频率

表1 单级共射放大电路参数变化对上限截止频率的影响

射极电阻 $R_e/k\Omega$	中频电压增益/dB	上限截止频率 f_H/MHz
1.0	33.499	228.546
1.5	30.738	261.567

由(1)式可知,在电路其它参数都未发生改变时,当射极电阻 R_e 从 $1.0k\Omega$ 增大到 $1.5k\Omega$ 时,放大管的静态发射极电流 I_{EQ} 减小,电路静态工作点发生改变,使跨导减小,从而导致减小,上限截止频率升高。理论分析与仿真实验结果一致。

2.2 多级共射放大电路

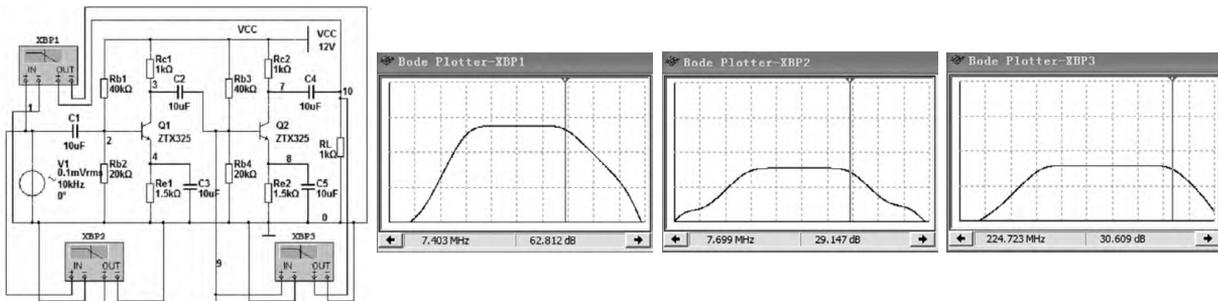


图4 $R_e=1.0k\Omega$ 两级共射放大电路图的上限截止频率

图 4 是两级共射放大电路,前后两级电路通过电容 C2 进行耦合,两级电路中各元件参数完全一致。为了避免输出信号出现失真,将输入信号参数改为:0.1mV/10kHz/0Deg。当两级电路中射极电阻 $R_e=1.0k\Omega$ 时,对电路中第一级、第二级及两级放大电路的上限截止频率进行测量,测量结果见表 2,其中,第一级放大电路的上限截止频率为 7.699 MHz,第二级放大电路的上限截止频率为 224.732 MHz,两级放大电路的上限截止频率为 7.403 MHz,根据(8)式计算出两级放大电路的上限截止频率为 7.444 MHz,说明测量结果与理论值基本相符。当两级电路中射极电阻 $R_e=1.5k\Omega$ 时(图 5),测得第一级放大电路的上限截止频率为 8.558 MHz,第二级放大电路的上限截止频率为 266.016 MHz,两级放大电路的上限截止频率为 8.377MHz,与理论值 8.291MHz 也基本相符。

对多级共射放大电路的仿真结果也反映出当各级放大电路的静态工作点发生改变时,各级放大电路及整个放大电路的上限截止频率都发生改变,且各级放大电路的上限截止频率的关系满足(8)式的结论。

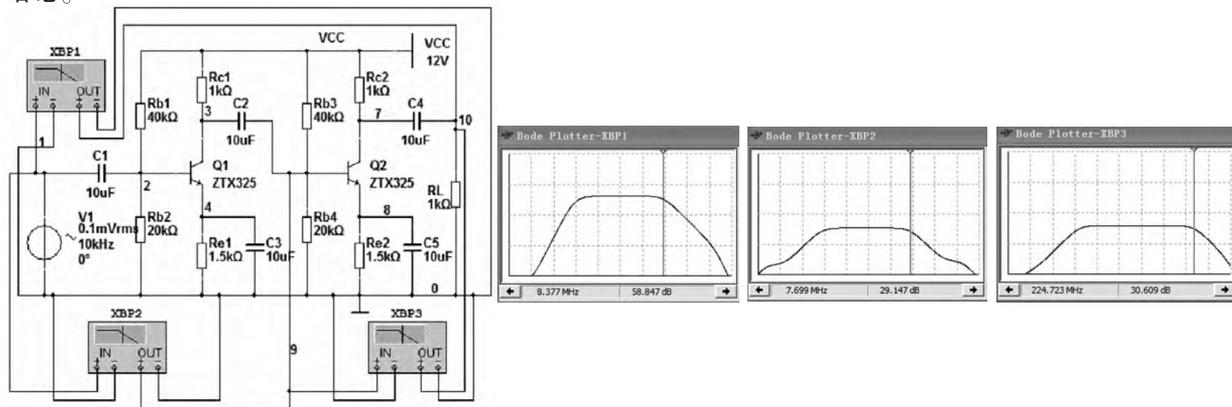


图 5 $R_e=1.5k\Omega$ 两级共射放大电路图的上限截止频率

3 讨论

在单级共射放大电路中,当射极电阻 R_e 从 $1k\Omega$ 增加到 $1.5k\Omega$ 时,由推导式(1)(3)(4)(6)可知放大管的静态工作点发生改变,晶体管静态集电极电流 I_{EQ} 减小,使跨导 g_m 减小,导致 C'_π 减小,上限截止频率 f_H 增大。由通频带的定义 $f_{bw}=f_H-f_L$,在上述电路中 $f_H \gg f_L$,即 $f_{bw} \approx f_H$ 。单级共射放大电路通过改变静态工作点的设置,增大了放大电路的上限截止频率 f_H ,拓宽了频带。

放大电路为了改善单级放大电路的高频特性,需减小回路时间常数,即减小 $b'-e$ 间等效电容 C'_π 及其等效电阻,从而增大上限截止频率。(4)式表明,为减小 C'_π 需减小 $g_m R'_L$,由(7)式可知,减小必然使中频电压放大倍数 $|\dot{A}_{um}|$ 减小。在单级共射放大电路和多级共射放大电路的仿真实验中都验证了这一结论,当单级共射放大电路的上限截止频率由 228.546 MHz 增加到 261.567 MHz 时,电路的中频电压增益由 33.499 dB 下降到 30.738 dB(表 1)。当两级共射放大电路的上限截止频率由 7.403MHz 增加到 8.377 MHz 时,电路的中频电压增益由 65.778dB 下降到 61.771dB(表 3)。可见,电路上限截止频率 f_H 的提高,即频带的展宽,与 $|\dot{A}_{um}|$ 的增大是相互矛盾的。

为了综合考察这两个方面的性能,参考文献 [1-5] 都提出了参数“带宽增益积”: $|\dot{A}_{um} f_{bw}| \approx \frac{1}{2\pi(\tau_{bb'}+R_s)C_\mu}$,此式表明,当晶体管选后, $\tau_{bb'}$ 和 C_μ 这两个参数也就确定下来,因而增益带宽积也就大致确定。在设计电路时,若要改善电路的高频特性,展宽频带,首先应选用 $\tau_{bb'}$ 和 C_μ 均小的高频管,同时尽量减小 C'_π 所在回路的总等效电阻,其次通过改变电路的静态工作点也能达到上述目的。

表2 两级共射放大电路的上限截止频率

射极电阻 $R_e/k\Omega$	第一级放大电路的上限截止频率 f_H/MHz	第二级放大电路的上限截止频率 f_H/MHz	两级放大电路的上限截止频率 f_H/MHz
1.0	7.699	224.732	7.403
1.5	8.558	266.016	8.377

表3 两级共射放大电路的电压增益

射极电阻 $R_e/k\Omega$	第一级放大电路的中频电压增益/dB	第二级放大电路的中频电压增益/dB	两级放大电路的中频电压增益/dB
1.0	32.281	33.499	65.778
1.5	31.036	30.738	61.771

4 结论

理论推导和仿真实验都表明,当共射放大电路的静态工作点发生变化时,共射放大电路的上限截止频率和中频电压增益也将随之发生改变,因此,通过改变共射放大电路的静态工作点可以改善电路的高频特性,展宽频带。

参考文献:

- [1]童诗白,华成英. 模拟电子技术基础 4 版[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [2]杨拴科. 模拟电子技术基础 4 版[M]. 北京:高等教育出版社, 2010.
- [3]华成英. 模拟电子技术基础教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [4]夏应清. 模拟电子技术基础[M]. 北京:科学出版社, 2006.
- [5]查丽斌. 电路与模拟电子技术基础 2 版[M]. 北京:电子工业出版社, 2011.

The Influence of Quiescent Operating Point to Upper Cut-off Frequency of Common Emitter Amplifier Circuit

LI Yong¹, LV Hong-zhang², ZHANG Mao-lian¹, ZHANG Yong-feng¹, HAN Xin-feng¹

(1. College of Sciences, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, Anhui, China
2. Middle School Wu Dian, Fengyang 233100, Anhui, China)

Abstracts: This paper discusses the influence of quiescent operating point to upper cut-off frequency of the common emitter amplifier circuit at high frequency, and the result is tested by simulation experiment. The experimental results show that a reasonable quiescent operating point can improve the frequency characteristic of amplifier circuit and wide the band. But it can affect the voltage-gain of centric frequency.

Keywords: Quiescent Operating Point, Common Emitter Amplifier Circuit, Upper Cut-off Frequency, Voltage-gain of Centric Frequency