

第3章 通信电路基础实验

本章主要介绍射频通信系统的单元电路实验,并在每个实验前面简要介绍与之相关的知识。这些实验涵盖了“通信电路”(或“高频电子线路”)课程的主要知识点,每个实验后面都列出了一定数量的思考题。目的是使学生通过动手和思考,进一步了解射频通信系统各种基本单元电路的构成、功能及性能指标,加深对这些基本电路的工作原理、性能特点及应用背景的理解;并对学生进行基本技能训练,包括对实际电路性能的调测,实验现象的观察与分析,常用射频仪器的使用;掌握关于射频电路的测试方法以及基本射频仪器的操作技能,为下阶段独立设计调频接收机模块打下基础。

为了使实验达到预期效果,要求实验者抓住以下三个环节:预习,动手,写报告。实验前的预习是顺利完成实验的前提,预习包括:认真阅读实验指导书,了解本次实验的内容,明确要做什么,最好琢磨一下每项实验内容的目的;复习有关课程内容,结合指导书,拟定实验步骤并画出记录表格;了解测量仪器的使用方法。

实验时要敢于动手,做到手、脑并用。不仅要认真观察实验现象,如实作好记录,而且要积极思考,分析实验中遇到的问题,尝试改进方法。

撰写实验报告是实验者必须完成的最后一项艰巨而重要的任务,撰写报告过程中要对实验过程进行反思,用学过的理论知识对实验现象和结果进行分析和总结,是一个理论联系实际的过程,同时这也是培养写作能力为今后撰写技术报告和科技论文打基础的一个极为重要的训练环节。下面对这类实验报告的内容、要求和注意事项作简要说明。

一份完整的实验报告应该包括标题页和正文两部分。标题页内容有:实验的标题,实验者的姓名、学号、单位(班级),实验合作者的姓名、学号、单位(班级),以及实验日期和递交报告的日期。

正文部分一般需要包括以下内容:

(1) 实验目的

简洁、明了地说明实验的目的,切忌抄实验指导书。

(2) 实验仪器与设备

(3) 实验电路及其说明

画出实验电路并简述其工作原理。

(4) 实验数据整理与处理

① 对各项实验测得的数据和根据测量结果计算得到的数据进行列表整理。注意每张表格应加名称(或标题),表中所列数据要注明单位,其有效数字的位数应符合精度要求。当计算值和测量值在同一表格列出时,需说明哪些是计算值,哪些是测量值。

② 对实验中所测的波形和频谱进行重新绘制。

③ 根据测试数据绘制曲线。曲线上对测量的数据点要用记号表示,而且曲线应画得连续光滑,切忌将各数据点的值连成折线。当一张图上绘有多条曲线时,图上应有图例,说明每条曲线表示的含义。

注意作图时每张图都应画出相应的坐标轴,并在坐标轴上标注刻度及物理量和单位,图下有序号和名称。

(5) 实验结果分析

对实验现象进行理论分析、解释,并对实验结果进行误差分析。在基础实验阶段,误差分析主要是通过实测数据与理论计算结果的对比分析,讨论实验误差产生的原因,分清哪些是主要因素,以便今后改进。

(6) 实验小结

① 根据实验数据、波形或实验中观察到的现象作出结论。

② 总结实验中遇到的问题及其解决方法。

③ 总结新仪器的使用方法。

④ 回答思考题。

⑤ 总结收获和体会,提出改进实验的意见和建议。

3.1 小信号调谐放大器实验

3.1.1 小信号调谐放大器的相关知识

所谓小信号调谐放大器,就是采用 LC 谐振回路作为选频负载的小信号放大器,如图 3.1.1 所示,输出谐振回路用于形成带通选频特性。此电路中,为了方便调试,输入端没有调谐电路,而是直接将信源接入,从而输入端总阻抗很低,故而晶体管极间电容 $C_{b'e}$ 在输出端的 MILLER 效应较小,对谐振回路的影响也较小。

关于 MILLER 效应,则需考察晶体管的小信号 π 模型。假设纯阻负载情况,其小信号等效电路可简化为如图 3.1.2 所示,其中源为戴维南等效源,即从 $C_{b'e}$ 向源端看入的戴维南等效电压源 v_i ,戴维南等效电阻 R_i 则包括了信源内阻 R_s 、直流偏置电阻 $R_b = R_{b1} // R_{b2}$,以及晶体管 π 模型中 $r_{bb'}$ 、 $r_{b'e}$ 的综合影响, C_o 为 C_{ce} 和负载电容 C_L 的并联, R_o 为 r_{ce} 和负载电阻 R_L 的并联。

求该电路的传输函数,为

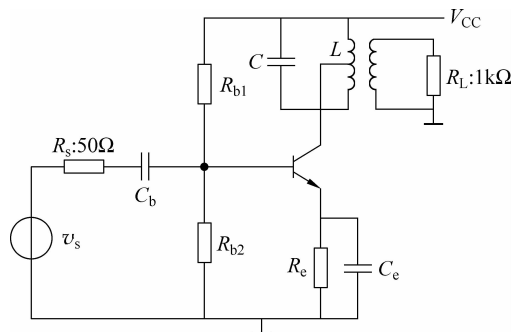


图 3.1.1 小信号调谐放大器

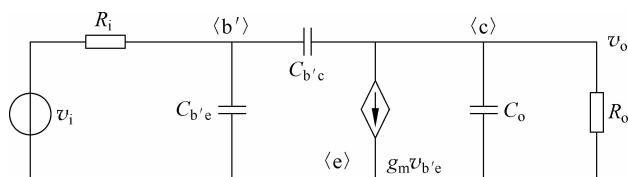


图 3.1.2 晶体管放大器小信号电路模型

$$H(s) = \frac{v_o}{v_i}$$

$$= -g_m R_o \frac{1 - \frac{s}{g_m/C_{b'c}}}{1 + s[C_{b'e}R_i + C_oR_o + C_{b'c}(R_i + R_o + g_mR_iR_o)] + s^2R_iR_o(C_{b'c}C_o + C_oC_{b'e} + C_{b'e}C_{b'c})}$$

(3.1.1)

在频率不是特别高的情况下,该传递函数可简化为单极点系统进行分析,

$$H(s) \approx -g_m R_o \frac{1}{1 + s[C_{b'e}R_i + C_oR_o + C_{b'c}(R_i + R_o + g_mR_iR_o)]}$$

(3.1.2)

可见,该放大器的极点(高频响应)是由三个电容的时间常数共同决定的,

$$f_p = \frac{1}{2\pi\tau}$$

(3.1.3)

$$\tau = C_{b'e}R_i + C_oR_o + C_{b'c}(R_i + R_o + g_mR_iR_o)$$

(3.1.4)

其中, \$R_i\$ 是 \$C_o\$、\$C_{b'c}\$ 开路时 \$C_{b'e}\$ 两端的总电阻, \$R_o\$ 是 \$C_{b'e}\$、\$C_{b'c}\$ 开路时 \$C_o\$ 两端的总电阻, \$(R_i + R_o + g_mR_iR_o)\$ 是 \$C_o\$、\$C_{b'e}\$ 开路时 \$C_{b'c}\$ 两端的总电阻。

一般教材讨论 MILLER 效应时,都是采用 MILLER 定理将跨接电容 \$C_{b'c}\$ 折合到输入端和输出端,折合结果如下:

$$C_{M,in} = (1 + A_v)C_{b'c} = (1 + g_mR_o)C_{b'c}$$

(3.1.5)

$$C_{M,out} = (1 + A_v^{-1})C_{b'c} = (1 + (g_mR_o)^{-1})C_{b'c} \approx C_{b'c}$$

(3.1.6)

单向化后,输入端和输出端的总时间常数由两个电阻确定,为

$$\tau = R_i(C_{b'e} + C_{M,in}) + R_o(C_o + C_{M,out}) \quad (3.1.7)$$

该时间常数和式(3.1.4)结果一致。正是因为两者一致,人们容易误认为式(3.1.5)和式(3.1.6)的 MILLER 等效就是真实的 MILLER 效应在放大器输入输出端的等效电容大小,而事实并非如此。式(3.1.5)和式(3.1.6)用 MILLER 定理给出的 MILLER 等效是在假设放大器为理想电压放大器(理想压控压源)情况下的分析结论,总时间常数几乎全部被折合到输入端并无疑问;然而晶体管并非理想压控压源,它是一个压控流源,总时间常数被折合到输入端和输出端都是可行的,这一点可以从输入输出阻抗分析看出:假设 C_o 被电感抵消,则从 $C_{b'e}$ 右侧向晶体管看入的输入电容为

$$C_{M,in} = C_{b'e}(1 + g_m R_o) \quad (3.1.8)$$

这和 MILLER 定理给出的结论相符,但是如果进一步计算输出端阻抗,假设 $C_{b'e}$ 被电感抵消,则从 C_o 左侧向晶体管看入的输出电容为

$$C_{M,out} = C_{b'e}(1 + g_m R_i) \quad (3.1.9)$$

会发现输出端 MILLER 效应的影响并非像式(3.1.6)所示的那样可以被忽略不计。式(3.1.8)和式(3.1.9)这两个公式请读者自行分析确认,它们说明了 MILLER 效应对晶体管(压控流源)而言,在双端都是存在的而且都不可被忽视。

事实上,进一步的理论分析表明,在假设 $r_{bb'} = 0$ 的情况下,如果作双共轭匹配,那么输入端需要用电感谐振掉的总输入电容为

$$C_{in} = C_{b'e} + C_{b'e}(1 + 0.5g_m r_{ce}) \quad (3.1.10)$$

而输出端需要用电感谐振掉的总输出电容为

$$C_{out} = C_o + C_{b'e}(1 + 0.5g_m r_{b'e}) \quad (3.1.11)$$

可见晶体管的 MILLER 效应确实是双端同存的。

对图 3.1.1 所示的仅输出端调谐的放大器,由于输出端有谐振电感将输出电容抵偿,因此输入端 MILLER 效应仍然如式(3.1.8)表述的那样,但是因为输入端没有电感谐振抵偿输入端的电容,因而输入端电容会影响输出端的 MILLER 效应大小,输出端 MILLER 效应等效电容为

$$C_{M,out} = \left(1 + \frac{g_m R_i}{1 + \omega_0^2 R_i^2 (C_{b'e} + C_{b'e})^2}\right) C_{b'e} \quad (3.1.12)$$

当频率很低时,它近似退化为式(3.1.9),但当频率很高时,它近似等于 $C_{b'e}$ 。

有关 MILLER 效应的更详尽的数学推导和讨论可参见李国林编著的《射频电路设计》一书。

本实验测试的内容包括:小信号调谐放大器的谐振频率 f_0 ,谐振时的电压放大倍数 A_v ,放大器的通频带 BW 及选择性等。下面给出放大器这些性能指标的含义及测量方法。

1. 谐振频率

电路调试中,定义谐振频率为电压增益最大的频点。将回路谐振频率调整到给定谐振频率 f_0 的方法是:①用扫频仪作为测量仪器,测出电路的幅频特性曲线,调节变压器磁芯

位置,改变电感量大小,将谐振曲线的峰值调整到外频标规定的谐振频率点 f_0 上。②也可以用频率为 f_0 的正弦波信号源作为输入,由示波器观测输出信号,调节变压器磁芯位置,当示波器显示达到最大时,则表明输出回路谐振在 f_0 上。

谐振频率的理论公式为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_\Sigma}} \quad (3.1.13)$$

式中, L 为调谐回路电感线圈的电感量; C_Σ 为调谐回路的总电容,

$$C_\Sigma = C + p_1^2(C_{ce} + C_{M,out}) + p_2^2 C_L \quad (3.1.14)$$

其中, p_1 为变压器初级电感的部分接入系数,即初级线圈抽头上半部分匝数与总匝数之比, p_2 为变压器部分接入系数,为次级线圈和初级线圈匝数之比, C_L 为负载电阻两端的并联电容; C_{ce} 为晶体管输出电容,未知情况下一般假设其电容量为零; $C_{M,out}$ 为晶体管的输出端 MILLER 等效电容,大小如式(3.1.12)所示,其中戴维南等效电阻在大多数偏置情况下,可以近似为

$$R_i \approx R_s + r_{bb'} \quad (3.1.15)$$

为了提高谐振回路的稳定性,实际电路中往往令式(3.1.14)中的回路电容 C 远大于另外两项电容,使得 C_Σ 主要由稳定性高的 C 来决定,从而谐振频率也主要由 C 来决定。

2. 电压放大倍数

电压放大倍数为

$$\begin{aligned} A_v &= \left| \frac{v_L}{v_S} \right| = \frac{p_2}{p_1} \left| \frac{v'_L}{v_S} \right| = \frac{p_2}{p_1} \left| \frac{v'_L}{v_{b'e}} \right| \left| \frac{v_{b'e}}{v_S} \right| \\ &\approx \frac{p_2}{p_1} \cdot g_m (R'_L // r_{ce} // R'_p) \cdot \eta \end{aligned} \quad (3.1.16)$$

式中, v_L 为负载 R_L 两端电压, v'_L 为晶体管集电极电压。 $R'_L = \frac{p_1^2}{p_2^2} R_L$ 为负载电阻等效到晶体管集电极的等效电阻, R'_p 为谐振电路自身损耗等效谐振电阻 R_p 在晶体管输出端的等效电阻, $R'_p = p_1^2 R_p$ 。

由于输入端包含了 MILLER 等效电容 $C_{M,in}$ 和晶体管输入电容 $C_{b'e}$ 共同的影响,故而

$$\eta = \left| \frac{v_{b'e}}{v_S} \right|$$

虽在较低频率下可近似认为 $\eta=1$,但在频率较高时,它却近似等于

$$\eta = \frac{1}{2\pi f_0 R_i [C_{b'e} + (1 + g_m R_o) C_{b'c}]} \quad (3.1.17)$$

可见,输入端 MILLER 效应电容对高频增益起到严重的压制作用,使得高频电压增益近似和频率成反比关系。除了幅频特性上的压制作用外,输出电压和输入电压之间还有超出 180° 之外的额外的相移,这个相移是由输入阻容提供的,为

$$\Delta\varphi = \arctan \omega_0 R_i (C_{b'e} + C_{b'c}) \quad (3.1.18)$$

A_v 的测量方法是：首先设置信号源，用示波器确认该设置，并记录 v_s ；将信号源接入放大器，用示波器测量负载两端电压 v_L ，则电压放大倍数 A_v 为

$$A_v = \left| \frac{v_L}{v_s} \right| \quad (3.1.19)$$

或

$$A_v = 20 \lg \left| \frac{v_L}{v_s} \right| \text{ (dB)} \quad (3.1.20)$$

如果需要换算为功率增益，则为

$$A_p = A_v + 10 \lg \left(4 \frac{R_s}{R_L} \right) \text{ (dB)} \quad (3.1.21)$$

在 $R_s = 50 \Omega$, $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ 情况下，功率增益分贝数比电压增益分贝数小 7 dB。

3. 通频带

由于谐振回路的带通选频作用，当工作频率偏离谐振频率时，放大器的电压放大倍数下降，一般将电压放大倍数下降到比谐振频点 f_0 最大放大倍数小 3 dB 位置所对应的频带宽度称为放大器的 3 dB 带宽，也称通频带 BW，

$$\text{BW}_{3\text{dB}} = f_{-3\text{dB,H}} - f_{-3\text{dB,L}} = \frac{f_0}{Q_L} \quad (3.1.22)$$

式中， $f_{-3\text{dB,H}}$, $f_{-3\text{dB,L}}$ 分别为电压增益下降 3 dB 对应的高端频率和低端频率， Q_L 为输出谐振回路的有载品质因数。这里假设输入端对幅频特性的影响可以忽略。

有载品质因数可以如此估算，

$$Q_L = \frac{1}{G_\Sigma} \sqrt{\frac{C_\Sigma}{L}} \quad (3.1.23)$$

$$G_\Sigma = G_p + p_1^2 (g_{ce} + g_{M,\text{out}}) + p_2^2 G_L \quad (3.1.24)$$

其中， G_Σ 是并联谐振回路总的等效并联电导； G_p 是并联谐振回路未加任何负载时其自身损耗所等效的并联电导，主要是电感金属损耗和趋肤效应引起的损耗的等效电导； $G_L = \frac{1}{R_L}$ 是

负载电导； $g_{ce} = \frac{1}{r_{ce}}$ 是晶体管 π 模型输出电阻 r_{ce} 的倒数； $g_{M,\text{out}}$ 是晶体管跨导、跨接电容和输入电容在输出端的类似于 MILLER 效应的等效电导，在低频端可忽略不计，在高频时起决定性影响，其影响如 4.7 节分析。

通过测量放大器的谐振曲线确认通频带，测量方法可以是扫频法，也可以是逐点法。

(1) 扫频法：用扫频仪作为测量仪器，信号源作为外接频标确认精确的频点位置，显示带通选频特性，找到最大点格数，比如 7 格，那么 5 格 ($= 7 \text{ 格} \times 0.707$) 位置对应的两个频点之差为通频带宽。

(2) 逐点法：用信号源和示波器测量，步骤是：记录谐振频率 f_0 及其对应的示波器输出幅度 A_0 ，改变高频信号发生器的频率（保持其输出电压 v_s 不变，由信号源保证，可用示波

器确认),记录频率 f 及其对应的示波器幅度 $A(f)$ 。逐点描绘该曲线,找到 $A=0.707A_0$ 对应的两个频点,其差为 3dB 带宽。

4. 选择性

频率选择性可用带通选频特性的矩形系数来表示,一般定义为

$$K_{\alpha} = \frac{BW_{\alpha}}{BW_{3dB}} \tag{3.1.25}$$

常见的取 $\alpha=60\text{dB}$ 。实验室测试时,60dB 对应的电压变化为 1000 倍,难以测量,因而往往取易于测量的 $\alpha=20\text{dB}$,即找到 $A=0.1A_0$ 对应的两个频点,两个频点之差即为 $BW_{20\text{dB}}$,然后和前面获得的通频带 $BW_{3\text{dB}}$ 相比,即可得到 $K_{20\text{dB}}$ 这个矩形系数。

矩形系数越接近于 1,谐振曲线的形状就越接近于矩形,选择性就越好。

3.1.2 小信号调谐放大器实验

一、实验目的

- 1. 理解小信号线性放大的基本原理,掌握小信号调谐放大电路的偏置方法、电路构成及电路中各元件的作用。
- 2. 观察并调整小信号调谐放大器的带通选频特性,理解带通选频特性指标,包括中心频率、带宽和矩形系数。
- 3. 研究晶体管电流对放大器增益的影响,考察 MILLER 效应对谐振回路频率和带宽的影响。
- 4. 掌握使用信号源、示波器、扫频仪测量高频小信号放大器性能的基本方法。

二、实验电路图

三、预习要求

- 1. 阅读 3.1.1 节,理解小信号线性放大的基本原理。列表说明实验电路图 3.1.3 中各个元件的作用并填入表 3.1.1 中。

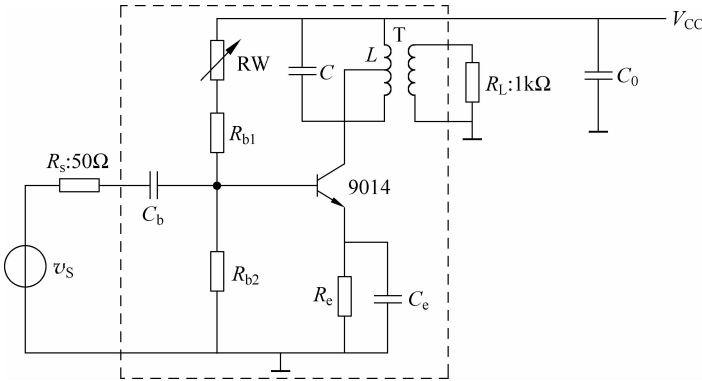


图 3.1.3 小信号调谐放大器实验电路

表 3.1.1 各元件的作用

元 件	元件作用(实验电路图 3.1.3)
9014	
L (可调电感)	
C	
T	
C_b	
C_e	
C_0	
R_{b1}	
R_{b2}	
R_e	
RW (可调电阻)	
R_L	

2. 要求 $I_{EQ} = 2\text{mA}$, 请设计偏置电路, 给出偏置电路电阻值, 包括: R_{b1} 、 R_{b2} 、 R_e , 假设 $RW = 0$ 。
3. 已知工作频率为 6.5MHz , C_b 、 C_e 、 C_0 取多大值时, 才能起到它们应起的作用? 为什么?
4. 如果希望获得 20dB 的电压增益, 晶体管静态电流 I_{EQ} 应取多大? 是依据什么设定的?
5. 已知工作频率为 6.5MHz , 输出谐振回路电感和电容应取多大? 是依据什么取值的?
6. 如果希望保持电压增益不变的前提下输出带宽可调, 可采用什么办法? 这个办法会导致什么样的损失或问题?
7. 自行拟定用扫频仪测量放大器放大倍数的方案, 并用实验指导书方案和自行拟定方案分别测量放大倍数。

四、实验仪器及设备

- | | |
|-----------|--------|
| 1. 示波器 | 1 台 |
| 2. 毫伏表 | 1 台(选) |
| 3. 信号源 | 1 台 |
| 4. 高频 Q 表 | 1 台(选) |
| 5. 扫频仪 | 1 台(选) |
| 6. 直流稳压电源 | 1 台 |
| 7. 数字万用表 | 1 台 |
| 8. 实验电路板 | 1 块 |

五、实验电路说明

实验电路如图 3.1.3 所示,原理请查看 3.1.1 节关于简单调谐电路的讨论。对于实验电路图 3.1.3,其中的电路元件取值为:

$$V_{CC} = +12V, R_e = 1k\Omega, R_{b1} = 5k\Omega, R_{b2} = 10k\Omega, RW = 100k\Omega, R_L = 1k\Omega$$

$$L \approx 7\mu H \text{ 可调}, C = 100pF$$

变压器 T 的两个接入系数为 $p_1 = 0.5, p_2 = 0.5$ (定义见 3.1.1 节)

C_0, C_b, C_e 均为 $0.01\mu F$ 。

六、实验内容

1. 静态工作点检查:

(1) 将实验板接 +12V 直流电源,注意电源极性不要接反;

(2) 调节 RW,用数字万用表测得发射极电压,换算为 I_{EQ} ,测量 I_{EQ} 变化范围。

2. 调谐放大器的谐振回路,使之谐振在 6.5MHz 上。

测试条件: $I_{EQ} = 2mA$ 。

有两种实现方法,分别介绍如下。

实现方法 1: 将扫频仪的扫频电压输出端和检波探头分别置于放大器输入端和输出端,通过对扫频仪各调节旋钮的调节,使荧光屏上显示出放大器的幅频谐振特性曲线,设置信号源频率为 6.5MHz,幅度为 200mV EMF,接入扫频仪外接频标输入端,根据频标指示,调节变压器磁芯,使谐振曲线中心位置位于频标指示位置(扫频仪使用方法详见附录 A5)。

实现方法 2: 将信号源频率设置为 6.5MHz,幅度为 200mV EMF,接入放大器输出端,将示波器探头接入负载上端,观测输出信号。调节变压器磁芯,使示波器输出波形具有最大值,此时,无论磁芯向上或者向下,示波器显示波形都是变小的。

注: 信源输出幅度设置用 mV EMF,这里的 EMF 是电动势(electromotive force)的缩写。对信号源而言,EMF 代表信源输出未接负载或者开路时的输出电压的有效值。例如,当信源幅度设置为 200mV EMF 时,用示波器测量信源输出时,示波器显示的正弦波的峰-峰值为 $566mV_{pp}$ 。如果信源设置用 dBm,200mV EMF 则对应 -7dBm,表示该信源的额定输出功率为 -7dBm,这里信源内阻为 50Ω 。

3. 测量电压增益 A_v 。

测试条件: $I_{EQ} = 2mA$ 。

实现方法: 将信号源频率设置为 6.5MHz,幅度为 10mV EMF,接至已调谐的放大器输入端,用示波器测量负载上电压,记录波形幅度 $v_{L,pp}$; 计算电压增益, $A_v = v_{L,pp} / v_{S,pp}$ 。其中, $v_{S,pp}$ 取 $28mV_{pp}$ 或者用示波器校准取值。

4. 测量通频带 BW。

测试条件: $I_{EQ} = 2mA$ 。

有两种实现方法,分别介绍如下。

实现方法 1: 用扫频仪首先完成调谐,调节 Y 增益使得谐振特性曲线占用一定高度,如

7 格,用外接频标确认 5 格位置的两个频率值,两个频率之差即为 3dB 通频带。

实现方法 2: 用信号源和示波器(或毫伏表)首先完成调谐,在 6.5MHz 左右各 2MHz,每隔 100kHz 测试一个点,读出每个频点的输出信号电平,连成谐振特性曲线,找到 3dB 带宽。

5. 测量带通选频特性的选择性。

同测量 3dB 通频带一样,找到 20dB 带宽,两个带宽之比即为矩形系数。

6. 研究晶体管直流工作点电流对放大器性能的影响。

(1) 输入信号同实验内容 3。调节 RW,令 I_{EQ} 从 0.5mA 到 7mA,每隔 0.5mA 一个点,测量发射极电压,记录,调谐,确认谐振点为 6.5MHz,测量相应工作点上的放大倍数,并绘出电压增益随工作点电流的变化曲线。

(2) 输入信号同上。调节 RW,令 $I_{EQ}=2\text{mA}$,放大器调谐在 6.5MHz 上。调节 RW,令 I_{EQ} 从 0.5mA 到 7mA,每隔 0.5mA 一个点,测量对应点的电压 V_{CB} ,谐振频率,3dB 带宽。分析 MILLER 效应对谐振频率和 3dB 带宽的影响,分析为什么有这样的变化趋势。

*7. 选做: 非线性研究,测出放大器的 1dB 压缩点,1dB 压缩点的定义见 3.7.1 节。

七、实验报告要求

按照本章一开始介绍的实验报告格式撰写实验报告。主要包括:

1. 整理各项实验数据,并对各项实验现象、结果进行分析。对某些实验结果,如果可进行理论推导,比较两者是否相符,如果不相符,分析其原因。

2. 实验心得。

3. 回答思考题。

八、思考题

1. 对预习内容回答不确定的,请拟定实验方法验证你的想法或答案是否正确。

2. 用指导书方案和自行拟定方案分别测量放大倍数,比较两个放大倍数是否一致。如果不一致,请解释可能的原因。你觉得哪个更准确? 如何对不准确方案进行校正?

3. 电压增益是否和直流工作点电流成正比关系? 测量结果如何? 如何理解测量结果?

4. 分析 MILLER 效应对谐振频率和 3dB 带宽的影响,分析为什么有这样的变化趋势。

5. 用 9014 实现 2MHz 的调谐放大器,如果在输入端也有一个调谐电路,则极易自激振荡,或者和前级混频器级联时,前级混频器的 2MHz 调谐电路与该放大器输出的 2MHz 调谐电路同时存在,则也会极易出现自激振荡。如何理解该自激振荡的出现? 如何消除该自激振荡?

3.2 正弦波振荡器实验

3.2.1 正弦波振荡器的相关知识

1. 正弦波振荡器的基本组成和振荡条件

按构成原理而言,正弦波振荡器可分为负阻振荡器和反馈振荡器两类。负阻振荡器

是采用负阻器件(例如隧道二极管)和谐振回路组成的振荡器,它利用负阻器件的负阻效应去抵消谐振回路中的正电阻损耗,从而维持谐振回路的恒定等幅振荡,这类振荡器主要工作在微波频段。反馈振荡器是基于放大和反馈的机理构成的,通过正反馈放大器给振荡回路适时补充能量而维持等幅振荡,如图 3.2.1 所示。它是目前应用最广的一类正弦波振荡器。其实,反馈振荡器和负阻振荡器在作用原理上是一致的。因为对于一个实际的 LC 谐振回路,其电感和电容不是理想无损耗的,为了维持回路中振幅恒定的持续振荡,必须向谐振回路补充能量,以补偿谐振回路中的固有损耗。这个补充能量的机构在负阻振荡器中是负阻器件,而在反馈振荡器中则是带有正反馈的放大器。这两种器件都能将直流电源供给的直流能量变换为谐振回路所需补充的交流能量。因此,从供给能量的观点来看,带有正反馈的放大器可以等效地看成负阻器件。关于这方面内容可参见陈雅琴、李国林编,高等教育出版社出版的《通信电路原理学习指导书》第 5.2.2 节。

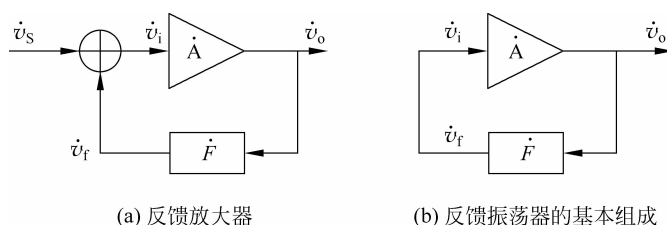


图 3.2.1 反馈振荡器原理框图

对于反馈型振荡器来说,振荡器要正常工作必须满足三大条件:平衡条件、起振条件和稳定条件。

由图 3.2.1 可知,这里 $\dot{A} = \frac{\dot{v}_o}{\dot{v}_i}$ 是不带反馈的放大器增益, $\dot{F} = \frac{\dot{v}_f}{\dot{v}_o}$ 为反馈系数,令 $T(j\omega) = \frac{\dot{v}_f}{\dot{v}_i} = A(j\omega)F(j\omega)$ 为开环环路增益,下面分别介绍其平衡条件、起振条件和稳定条件。

(1) 平衡条件: $T(j\omega_{osc}) = 1$ 。这是保证振荡进入平衡状态并输出等幅持续振荡的条件。由于 $T(j\omega_{osc}) = T(\omega_{osc})e^{j\varphi_T(\omega_{osc})}$,平衡条件也可写成振幅平衡条件 $T(\omega_{osc}) = A(\omega_{osc})F(\omega_{osc}) = 1$,和相位平衡条件 $\varphi_T(\omega_{osc}) = 2n\pi (n=0,1,2,\dots)$ 。振幅平衡条件要求在振荡频率上环路增益的模为 1,可用来估算反馈振荡器的输出幅度。相位平衡条件要求在振荡频率上环路增益的相移为 0,即满足正反馈,相位平衡条件可用来求出振荡器的振荡频率。

(2) 起振条件: $T(j\omega_{osc}) > 1$,也可分别写成振幅起振条件 $A(\omega_{osc})F(\omega_{osc}) > 1$,和相位起振条件 $\varphi_T(\omega_{osc}) = 2n\pi (n=0,1,2,\dots)$ 。这说明在振荡起振过程中不仅要满足正反馈,而且要求环路增益恒大于 1,这样经放大和反馈的反复循环,放大器的输入就会不断增大,振荡幅度不断增长,使放大器从线性放大过渡到非线性工作状态,导致振荡达到平衡。因而起振条件是保证接通电源后振荡从无到有建立起振荡的条件。