

微波中继通信电子电路

第 一 册

北京邮电学院微波专业教学组

1975 年 3 月

目 录

序言.....	(1)
第一篇 宽频带中频放大器(宽中放)	(2)
前言.....	(2)
第一章 晶体管放大器简介.....	(2)
§1.1 典型电路介绍.....	(2)
§1.2 放大器的几个技术指标.....	(5)
1. 放大系数 K	(5)
2. 传输系数 A	(5)
3. 频带宽度 Δf	(5)
4. 非线性失真.....	(6)
§1.3 分贝的应用.....	(7)
本章小结.....	(9)
第二章 共发射极放大器低频频率特性的分析方法.....	(10)
§2.1 共发射极放大器的交流等效电路.....	(10)
§2.2 晶体管低频 h 参数等效电路.....	(11)
§2.3 晶体管放大器的中频放大系数和传输系数.....	(14)
§2.4 耦合电容器对放大器低频频率特性的影响.....	(15)
1. 耦合电容器 c_1 的影响.....	(16)
2. 耦合电容器 c_2 的影响.....	(18)
§2.5 高通型 RC 网络的传输系数.....	(20)
§2.6 发射极旁路电容器 C_e 对放大器低频频率特性的影响.....	(23)
§2.7 共发射极放大器低频频率特性的计算.....	(29)
例题 1	(29)
例题 2	(31)
本章小结.....	(32)
第三章 共发射极放大器高频频率特性的分析方法.....	(33)
§3.1 晶体管高频等效电路.....	(33)
1. 晶体三极管的内部物理现象.....	(33)
2. 共基极 T 型高频等效电路.....	(37)
3. 混合 π 等效电路.....	(40)
§3.2 用混合 π 等效电路分析共发射极放大器的高频频率特性.....	(44)
1. 晶体管放大器的高频等效电路及其简化.....	(44)
2. 纯电阻负载放大器的高频频率特性分析方法.....	(47)

3. 放大器的放大系数 K_h 和传输系数 A_h 之间的联系.....	(50)
§3.3 低通型 RC 网络的传输系数.....	(54)
§3.4 容性负载阻抗放大器的高频频率特性分析方法.....	(56)
1. 共发射极放大器的频宽增益乘积.....	(56)
2. 容性负载阻抗共发射极放大器高频特性的分析方法.....	(59)
§3.5 共发射极放大器高频频率特性的计算.....	(65)
例题.....	(65)
本章小结.....	(67)
第四章 共基极宽频带放大器	(69)
§4.1 共基极宽频带中放电路简介.....	(69)
§4.2 晶体管共基极 T 型高频等效电路的简化.....	(70)
§4.3 传输线变压器.....	(73)
1. 传输线变压器的结构.....	(74)
2. 一般结构自耦变压器的能量传输.....	(74)
3. 传输线变压器的能量传输.....	(76)
§4.4 共基极传输线变压器耦合宽中放的频率特性.....	(81)
1. 高频等效电路的导出.....	(81)
2. 放大器高频放大系数的分析方法.....	(84)
3. 放大器低频放大系数的分析方法.....	(89)
§4.5 共基极传输线变压器耦合宽中放的计算.....	(90)
例题.....	(90)
本章小结.....	(92)
第五章 负反馈放大器	(93)
§5.1 反馈电路的认识和“正”、“负”反馈的判别.....	(93)
§5.2 负反馈电路在输入端的联接方式及其特点.....	(97)
1. 串联负反馈电路.....	(97)
2. 并联负反馈电路.....	(101)
§5.3 负反馈电路在输出端的联接方式及其特点.....	(104)
1. 电压负反馈与电流负反馈的区别.....	(104)
2. 负反馈对输出阻抗的影响.....	(106)
§5.4 负反馈对放大器性能的影响.....	(110)
1. 负反馈对放大器频率特性的改变.....	(110)
2. 负反馈改变放大器性能的基本概念.....	(112)
§5.5 射极输出器.....	(113)
1. 射极输出器的电路介绍.....	(113)
2. 射极输出器的中频特性.....	(113)
3. 射随器的高频特性.....	(115)
§5.6 “负反馈对”放大器.....	(119)
1. “负反馈对”放大器电路介绍.....	(119)

2. “负反馈对”放大器分析方法的一些原则	(119)
3. 放大器 $K_V = K_{V1}K_{V2}$ 的计算	(122)
4. 输入电路传输系数 A_{vi} 的计算	(124)
5. “负反馈对”放大器的总高频电压传输系数 A_f	(130)
6. “负反馈对”放大器的输入导纳	(133)
7. “负反馈对”放大器的输出导纳	(135)
8. “负反馈对”放大器的设计考虑	(138)
§5.7 “负反馈对”放大器的计算	(140)
例题 1	(140)
例题 2	(143)
本章小结	(145)
第六章 前置中放和一中放	(147)
§6.1 前置中放简介	(147)
§6.2 晶体管放大器的噪声系数	(149)
1. 起伏噪声的来源	(149)
2. 晶体管的噪声及其等效电路	(150)
3. 噪声系数	(151)
4. 共发射极放大器的噪声系数	(154)
5. 多级放大器的噪声系数	(158)
§6.3 单级放大器的高频补偿作用	(160)
§6.4 一中放简介	(165)
第七章 主中放	(168)
§7.1 主中放简介	(168)
§7.2 自动增益控制系统的工作原理	(169)
1. AGC 系统工作原理	(169)
2. 倍压检波工作原理	(170)
3. AGC 直流放大器工作原理	(170)
4. 延迟式 AGC	(171)
5. I 型机的 AGC 系统	(172)
6. 可变衰减器	(173)
§7.3 放大器输入端和输出端的阻抗匹配问题	(174)
1. 共基极放大器输入端的匹配	(174)
2. 共基极放大器输出端的匹配	(175)
第八章 三中放与功率中放	(179)
§8.1 方框图及各部分功能	(179)
§8.2 三中放电路介绍	(181)
§8.3 限幅器的基本工作原理	(181)
1. 串联限幅器	(181)
2. 并联限幅器	(184)

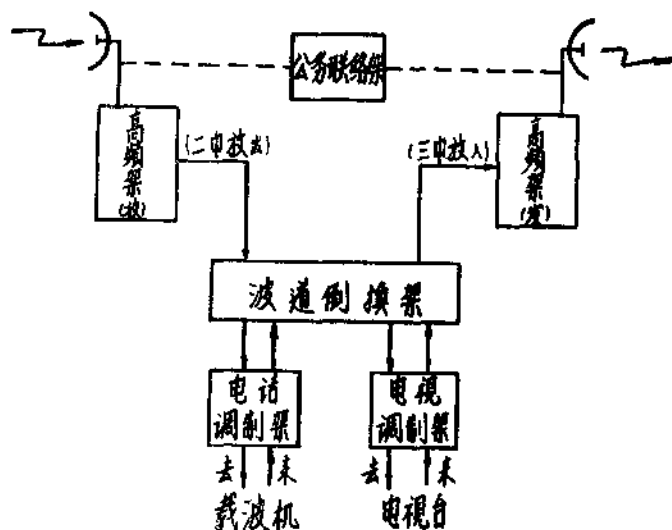
3. 串联限幅器与并联限幅器的比较.....	(185)
4. 二极管的电容对限幅效果的影响.....	(185)
§8.4 三中放中的双向限幅器.....	(186)
1. 限幅器工作情况.....	(186)
2. 限幅二极管的整流效应.....	(190)
3. 频率特性.....	(192)
§8.5 控制电路.....	(193)
1. 方框图以及作用原理.....	(193)
2. 触发电路.....	(193)
§8.6 功率中放.....	(195)
第二篇 晶体管调谐放大器.....	(197)
第一章 已调幅信号的分析.....	(197)
§1.1 已调幅信号的基本性质及其表示式.....	(197)
§1.2 已调幅信号的频谱与频带宽度.....	(199)
第二章 单振荡回路.....	(202)
§2.1 串联振荡回路的谐振现象.....	(202)
§2.2 串联振荡回路的频率特性与通频带.....	(206)
§2.3 并联振荡回路的谐振特性.....	(208)
§2.4 并联振荡回路的部分接入.....	(211)
§2.5 振荡回路与耗电负载的联接.....	(211)
第三章 耦合振荡回路.....	(213)
§3.1 耦合电路的 Y 参数.....	(213)
§3.2 耦合回路的频率特性.....	(217)
1. 次级电压 $\dot{V}_2$ 的幅频特性.....	(218)
2. 次级电压 $\dot{V}_2$ 的相频特性.....	(222)
3. 初级电压 $\dot{V}_1$ 的频率特性.....	(222)
§3.3 电容耦合的耦合回路.....	(225)
第四章 晶体管高频 Y 参数.....	(229)
第五章 调谐放大器的分析.....	(234)
§5.1 调谐放大器可能产生自激振荡的原理.....	(234)
§5.2 减小调谐放大器内反馈不良作用和消除自激的方法.....	(236)
1. 微波通信设备中电视调制机架中 $8MHz$ 解调器的双耦合回路调谐放大器.....	(236)
2. 广播接收机的中频放大器.....	(237)
§5.3 调谐放大器的放大系数与频率特性.....	(238)
1. 内反馈可以忽略的情况.....	(238)
2. 内反馈不可忽略的情况.....	(241)

序 言

在“鼓足干劲，力争上游，多、快、好、省地建设社会主义”总路线的精神和毛主席关于“自力更生”的教导下，我国社会主义建设的各个方面都取得了突飞猛进的成就。微波大容量中继通信干线的建设也取得了很大的成绩。已经建成了电子管 600 路和晶体管 960 路微波中继干线多条，可供多路电话、电报、传真和转播彩色电视使用。

为了适应微波专业教学上的需要，在原有教材的基础上编写了这本主要针对 960 路 WZ 960—01B 型微波收发信设备（简称 I 型机）的微波电子电路教材。

在 960 路微波通信干线上，各中继站都设有高频机架和公务联络机架，各主站除高频机架和公务联络机架之外还有调制架和波道备用控制架。将来还要考虑各中继站达到无人值守，所以各站还要配备自动控制、遥测遥控设备。总的说来可以如下图所示。



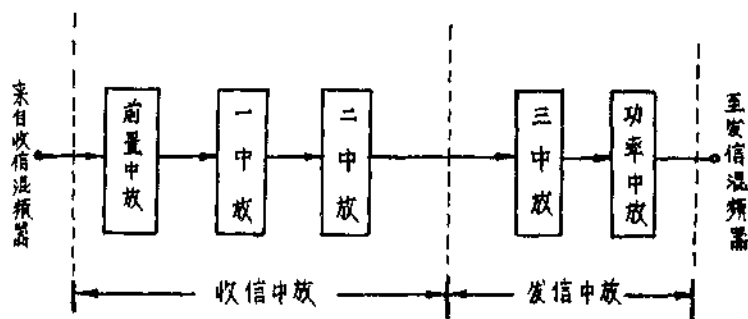
各机架中所用到的稳压电源已经学过了。我们这本微波电子电路主要内容包括有七部分，第一篇介绍收信和发信中放系统，主要是宽中放；第二篇介绍窄带调谐放大器；第三篇介绍微波信号源（固态源）；第四篇介绍调制与解调；第五篇介绍中频和调制、解调系统的调测；第六篇介绍脉冲与数字电路以及自动控制原理；第七篇介绍波道备用控制机架原理。

第一篇 宽频带中频放大器(宽中放)

前言

本篇主要内容是介绍 960 路微波中继收发信设备里的宽频带中频放大器(简称宽中放)的基本原理,并针对Ⅰ型和Ⅱ型机高频机架里的宽中放电路作了具体的分析。

宽中放是由前置中放、一中放、主中放(二中放)、三中放和功率中放等组成,如图所示。



第一篇内容共分八章,第一章简单地介绍晶体管放大器要研究什么问题;第二章介绍晶体管放大器低频频率特性的分析方法;第三章是研究共发射极放大器的理论基础,即用混合 π 等效电路分析放大器的高频频率特性;第四章分析了宽中放里广泛使用的共基极放大器的高频特性;第五章的负反馈放大器也是放大器的理论基础,在这里还较详细地分析了Ⅱ型机里采用的“负反馈对”放大器;第六、七、八各章分别介绍了前置中放、主中放和三中放的具体内容。

第一章 晶体管放大器简介

§ 1.1 典型电路介绍

960 路微波中继收发信设备中的宽频带中频放大器包括有前置中放、一中放、二中放(主中放)、三中放和功率中放等五套放大器。图 1.1.1 就是前置中放的电路图。

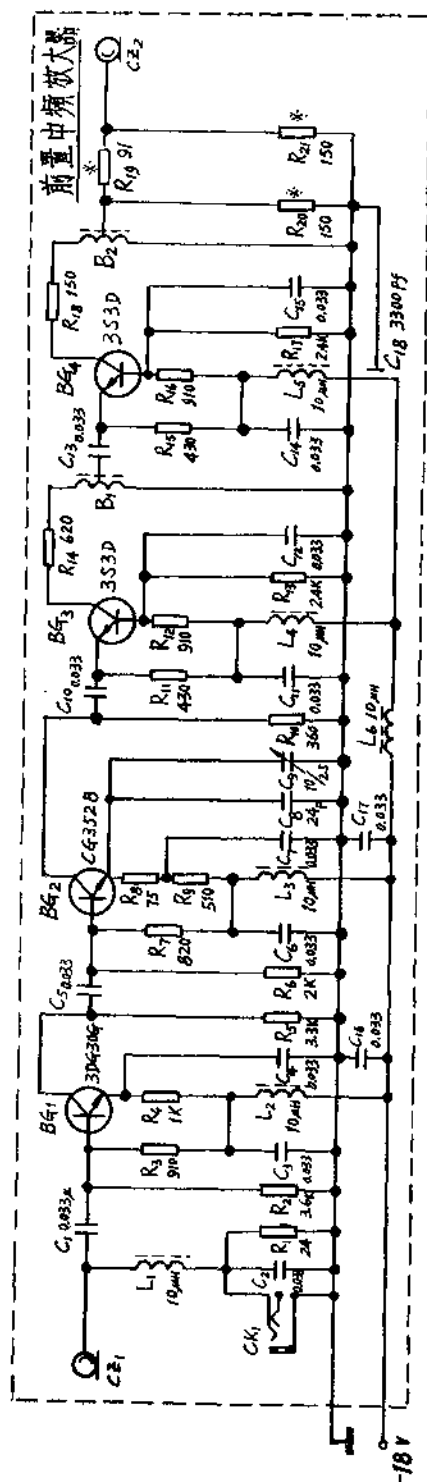


图 1.1.1

我们对图 1.1.1 仔细地研究一下总是可以得到下面这样一些结果。

前置中放由四个晶体三极管 (BG_1 至 BG_4) 组成四级放大器, BG_1 和 BG_2 是一种类型的放大器, 通常称为共发射极放大器; BG_3 和 BG_4 是另一种类型的放大器, 通常称为共基极放大器。

共发射极放大器的特点是放大器的输入交流信号电压加在基极与发射极之间, 而输出交流电压从集电极与发射极之间引出, 输入和输出共用着发射极, 所以称为共发射极放大器, 典型的电路如图 1.1.2 所示。在这里, 对一定频率范围的信号而言, 所有的电容器呈现的容抗都是非常小, 因此, 在只是研究交流信号的放大过程时, 可视电容器为短路。

共基极放大器的特点是放大器的输入交流信号电压加在发射极与基极之间, 而输出交流电压从集电极与基极之间引出, 输入和输出共用着基极, 所以称为共基极放大器, 典型的电路如图 1.1.3 所示。同样地, 如果只是研究在一定频率范围内的交流信号的放大过程时, 可视电容器为短路。

比较一下图 1.1.2 和图 1.1.3, 我们发现两者的直流供电系统是一样的, 所以, 区别某一种放大器究竟是共发射极放大器还是共基极放大器, 是以交流信号的通路为依据来判断的。

还有一种放大器称为共集电极放大器, 它的特点是放大器的输入交流信号电压加在基极与集电极之间, 而输出交流电压从发射极与集电极之间引出, 输入和输出共用着集电极, 所以称为共集电极放大器, 典型的电路如图 1.1.4 所示, 图 (a) 是原理电路图, 图 (b) 是一般画法。同样地, 如果只是研究在一定频率范围内的交流信号的放大过程时, 可视电容器为短路。共集电极放大器的输出

交流信号电压总是跟随着基极输入交流信号电压而变化, 因此也称为射极跟随器, 简称为射随器。

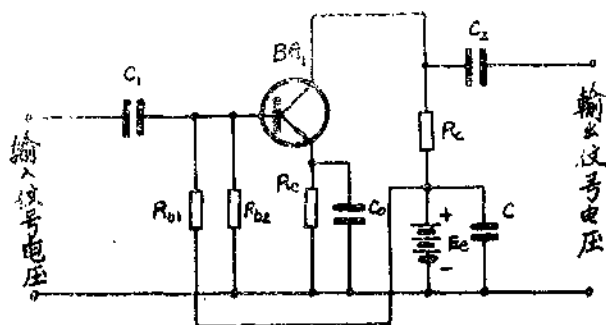


图 1.1.2

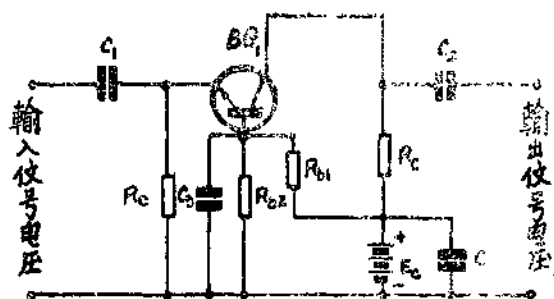


图 1.1.3

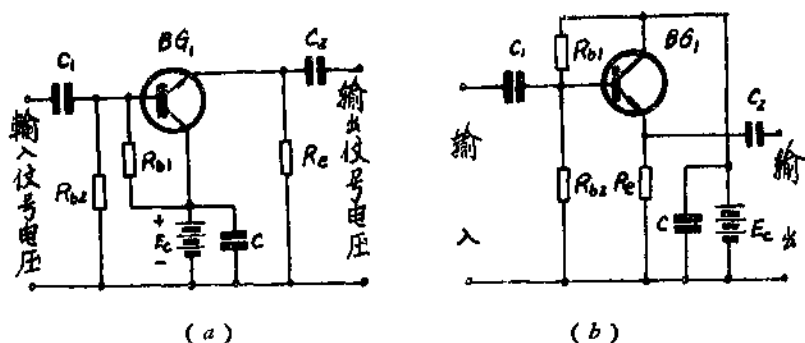


图 1.1.4

我们继续再对图 1.1.1 进行研究，发现除了放大器的类型不一样之外，还存在着耦合方式不同的差别。交流信号电压加到放大器晶体三极管的输入端时，是绝对不允许破坏晶体三极管的直流工作状态。同样，在放大器输出端也不允许外电路来破坏晶体三极管输出回路的直流工作状态。可以利用电容器和变压器这两种元件来解决这个问题。电容器和变压器可以顺利地传输交流电信号而阻挡直流电通过。把交流信号加到放大器的输入端，或者把前一级放大器的输出交流电压再加到下一级放大器去，都会遇到耦合方式的问题。一种叫 RC 耦合方式，图 1.1.1 中的 BG_1 至 BG_3 这三级之间就是采用 RC 耦合，而 BG_3 至 BG_4 这两级之间采用的是变压器（自耦变压器）耦合，这又是一种耦合方式。

我们在晶体管稳压电源中曾经学习过直流差分放大器，这是一种直流耦合的方式。

在第二章、第三章、第四章和第五章中，我们将要详细地分析不同类型放大器的特性和耦合方式对放大器的影响。

§ 1.2 放大器的几个技术指标

根据放大器所担负的不同任务，以及微波中继通信系统总技术指标所分配给宽频带中频放大器的主要技术指标有下列几种。

1. 放大系数 K

放大器输出端电压复数值与放大器输入端电压复数值的比值称为电压放大系数 K ，以后我们理解这是不包括信号源内阻在内的放大系数。 $K = K/\theta$ ，这里 K 是放大器的幅频特性，而 θ 是放大器的相频特性。放大系数也称为放大倍数。与频率无关的中频放大系数是 K_0 。放大系数 K 又称为频率响应或频率特性。

2. 传输系数 A

放大器输出端电压复数值与信号源电压复数值的比值称为放大器的传输系数 A ，这可以理解为包括信号源内阻在内的放大倍数。 $A = A/\phi$ ，这里 A 是放大器的幅频特性，而 ϕ 是放大器的相频特性。

传输系数 A 有时也称为频率响应或频率特性。

通常，放大器的幅频特性可以用扫频仪来进行测量，但是放大器的相频特性就很不容易进行测量。可以把 ϕ 对 ω 进行微分，则获得群时延特性 $\tau = \frac{d\phi}{d\omega}$ ，这个指标可以用群时延测量仪进行测量。

3. 频带宽度 Δf

如果测量一下图 1.1.2 共发射极放大器的幅频特性 A ，就可以得到如图 1.1.5 的特性曲

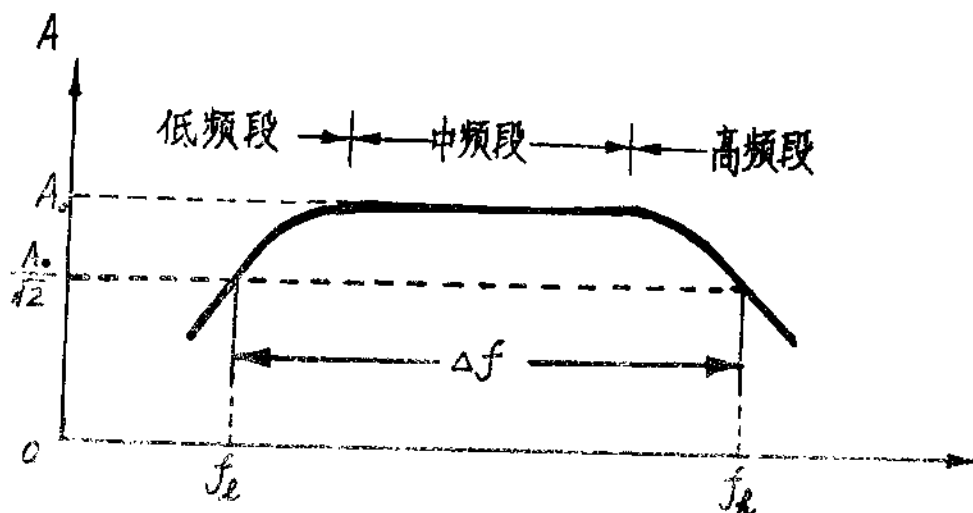


图 1.1.5

线。测试时保持输入信号源电压恒定，逐点改变信号源的频率从低至高，就可以得到如图 1.1.5 所示的幅频特性曲线。放大器在低频段的传输系数下降的原因是因为耦合电容 C_1 、 C_2 和发射极旁路电容 C_e 的影响。放大器在高频段的传输系数下降的原因是因为晶体三极管在较高频率的放大能力逐渐减弱了。在中频段，上面两种因素都没有什么影响，所以传输系数不随频率而变化，这时的传输系数称为中频传输系数 A_0 。

当信号频率偏离中频段时，无论向低变或者向高变，传输系数都会逐渐下降。当传输系数下降到 A_0 的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 处时所对应的频率，在低频段为 f_l ，称为放大器的下截止频率，而在高频段为 f_h ，称为放大器的上截止频率。 f_h 与 f_l 之间的频带宽度称为放大器的频带宽度 Δf ，也称为通频带。

人耳对声音响度的感觉以及人眼对亮度的感觉，只有当反映声音和亮度的能量成倍变化时，人耳和人眼才能有所察觉。我们选取 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 这个数值就恰好把这个实际问题考虑进去了，这就是说，当传输系数降为原值的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 时，这时的功率正好比原值下降了一半，所以下降到 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 称为半功率点。 $\frac{A_0}{\sqrt{2}} = 0.707A_0 \approx 0.7A_0$ ，从 A_0 到 $0.7A_0$ 之间有着 30% 的变化，我们允许放大器的幅频特性存在着 30% 的波动，在这个范围内波动时，人耳和人眼是觉察不出来的。在通频带范围内的这种幅频特性的波动有时也称为频率特性的不均匀度或频率失真。

放大器的频带宽度一定要大于被放大信号所占有的频带宽度，否则将产生频率失真。

4. 非线性失真

我们希望放大器输出电压的波形能够如实地反映输入信号电压的波形，但是由于放大器输出电压与输入电压之间不能保证有严格的直线性关系，输出电压波形总是有些失真，只要这种波形失真在技术指标允许范围内，那末，放大器所引入的非线性失真就可以不去考虑它。通过合理的设计和调整放大器的静止工作点，并保证信号幅度不超出放大器所允许的动态范围，非线性失真这一指标总是可以满足的。

当我们了解到放大器的几个主要技术指标的概念以后，现在介绍 960 路微波中继收发信机的宽频带中频放大器的几个主要技术指标。

由于一条微波中继通信干线上要有几十个微波中继站，所以具体分配到一个站上的宽频带放大器的技术指标就显得非常的高了。

例如：前置中放输入端信号电平为 $65\mu V \sim 8mV$ （指在 75 欧电阻上）；

二中放输出端在 75 欧上获得 $0.2V$ ；

自动增益控制范围为 $40db$ ，（关于什么是 db 在下一节中介绍， $40db$ 相当于 100 倍）；

幅频特性的不均匀度在 $70MHz \pm 12MHz$ 范围内小于 $\pm 0.2db$ （约相当于 $\pm 2\%$ ）；

时延特性的不均匀度在 $70MHz \pm 8MHz$ 范围内小于 $2ns$ （毫微秒）；

噪声系数小于 $3db$ （噪声系数将在第六章中介绍）；

半功率点频带宽度为 $70MHz \pm 35MHz$ 。

我们将在以后的各章节中详细地研究上述各个技术指标怎样才能全面地实现。

§ 1.3 分贝的应用

在图 1.1.6 的放大器中, P_1 是放大器的输入端交流功率, P_2 是输出端交流功率, 则放大器自身的功率放大系数 $K_p = \frac{P_2}{P_1}$ 。

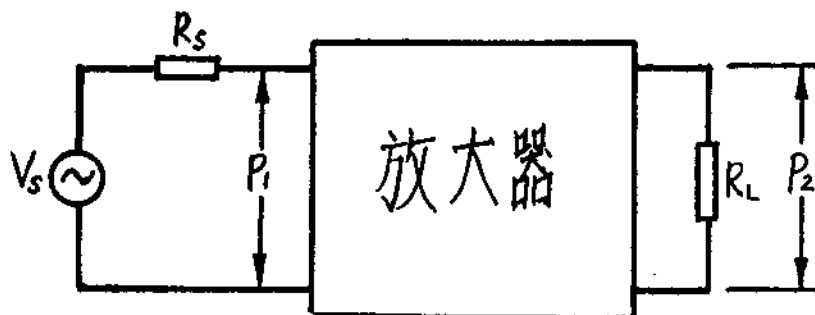


图 1.1.6

定义放大器的功率增益 $G_p = 10 \lg \frac{P_2}{P_1}$, 单位是分贝 (用 db 表示)。显然,

当	$K_p = 1,$	$G_p = 0db,$
当	$K_p = 10,$	$G_p = 10db,$
当	$K_p = 100,$	$G_p = 20db.$

功率放大系数每相差 10 倍, 功率增益相差 $10db$ 。

如果把图 1.1.6 中的 P_1 用 V_1 表示, P_2 用 V_2 表示, 则放大器自身的电压放大系数 $K_v = \frac{V_2}{V_1}$ 。

定义放大器的电压增益 $G_v = 20 \lg \frac{V_2}{V_1}$, 单位也是分贝 (db)。显然,

当	$K_v = 1,$	$G_v = 0db,$
当	$K_v = 10,$	$G_v = 20db,$
当	$K_v = 100,$	$G_v = 40db.$

电压放大系数每相差 10 倍, 电压增益相差 $20db$ 。

多级放大器的总放大系数是各个单独放大器放大系数的相乘积。当用分贝表示时, 多级放大器的总增益是各个单独放大器增益之和。这是采用分贝计算的优点之一。

增益这个概念是有正的增益和负的增益的区别, 正增益表示信号被放大了, 而负增益表示信号被衰减了。例如, 电压放大系数 $K_v = 2$, 则电压增益 $G_v = 20 \lg 2 = 20 \times 0.3 = +6db$, 这表示是正增益。又例如, 电压放大系数 $K_v = 0.5$, 则电压增益 $G_v = 20 \lg 0.5 = 20 \times \overline{1.7} = 20 \times (-0.3) = -6db$, 这表示是负增益。信号是被放大了还是被衰减了, 增益就有正和负的区别, 概念非常明确, 这是采用分贝计算优点之二。

在图 1.1.7 中，譬如说就是我们上面所说的宽频带中频放大器的传输系数 A 中的幅频特性 A ，在 $70\text{MHz} \pm 12\text{MHz}$ 范围内小于 $\pm 0.2\text{db}$ 。

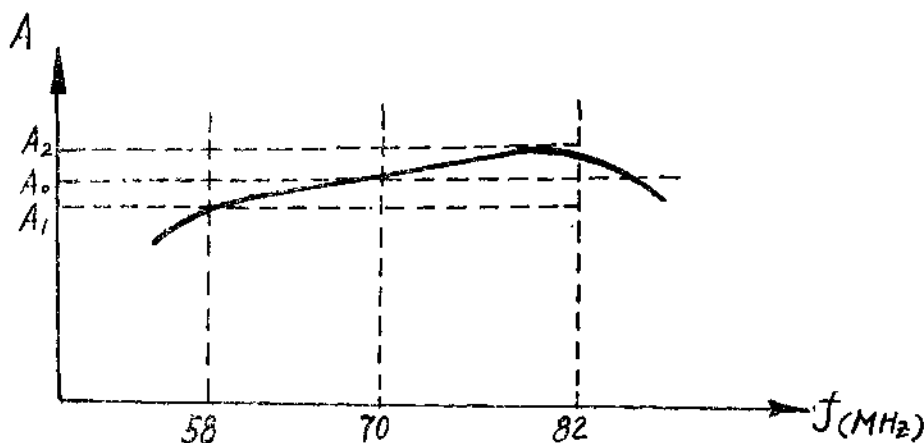


图 1.1.7

如果 $A_1 = 98$, $A_0 = 100$, $A_2 = 102$, 换算成分贝后 $A_1(\text{db}) = 39.8\text{db}$, $A_0(\text{db}) = 40\text{db}$, $A_2(\text{db}) = 40.2\text{db}$ 。可以看得出来，如果以 A_0 为参考点，在 $58 \sim 82\text{MHz}$ 范围内幅频特性的波动为 $\pm 0.2\text{db}$ ，这是经过减法计算后才得出的。这也可说是以 A_0 为参考点，则 A_1 比 A_0 低 2%， A_2 比 A_0 高 2%。如果我们仅仅是注意幅频特性的波动百分比而不去研究 A 的绝对数值，则向高波动为 $20 \lg \frac{A_2}{A_0} = +0.2\text{db}$ ，向低波动为 $20 \lg \frac{A_1}{A_0} = -0.2\text{db}$ ，而对 A_0 而言为 $20 \lg \frac{A_0}{A_0} = 0\text{db}$ 。这样，图 1.1.7 就可以画成如图 1.1.8 的样子而不去管 A 的绝对值了。这

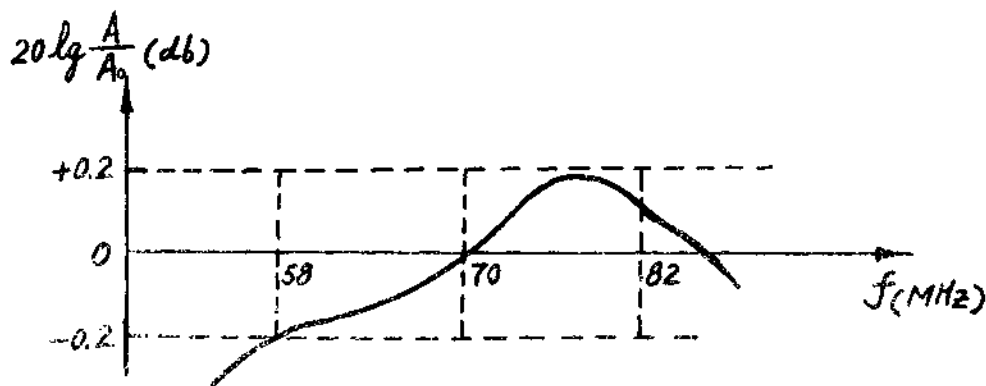


图 1.1.8

样，可以把在图 1.1.7 中纵坐标方向变化不显著的幅频特性波动，在图 1.1.8 中非常明显地表示出来，这就是采用分贝计算优点之三。

上面介绍的分贝计算是相对值， 0db 参考点可以任意选取。现在我们介绍一种固定 0db 参考点功率大小的表示方法。在 75欧 电阻上获得 1mW 交流功率时的情况称为 0dbm ，这是

一种又有电压又有功率概念的表示法。可以计算出 0dbm 的电压为 0.274V 。既然 dbm 这个概念又有电压又有功率，所以统称为电平。

960 路微波中继通信设备高频机架中放的电平图如图 1.1.9 所示。

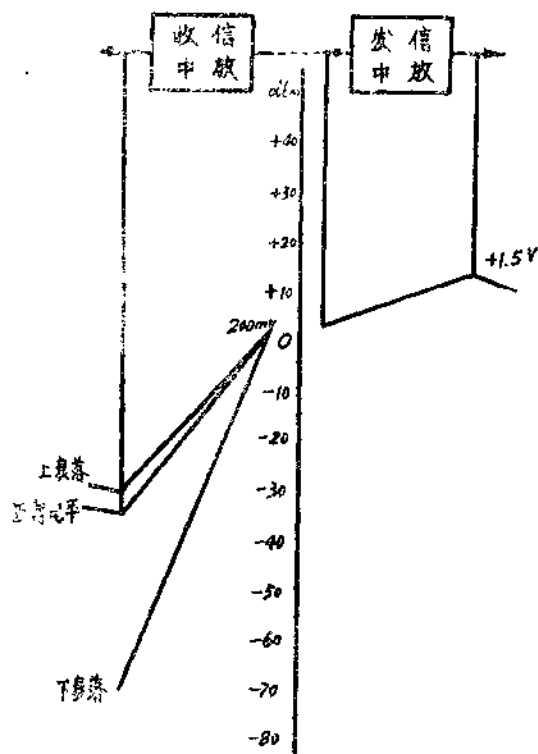


图 1.1.9

本章小结

晶体管放大器共有三种类型接法，即共发射极放大器、共基极放大器以及共集电极放大器（射随器）。交流输入信号通路和输出信号通路共用着晶体管的某一个电极，就称为“共×极放大器”，与晶体管的直流供电情况无关。我们要对这三种典型电路能够较熟练的画出来。

信号源与放大器之间，放大器与放大器之间都存在着一一种叫信号耦合的问题。有三种耦合方式，即直接耦合（直流耦合）、 RC 耦合以及变压器耦合方式。

放大器的主要技术指标有中频放大系数、幅频特性、时延特性、频带宽度和噪声系数等。

对放大系数和传输系数的幅频特性都可以取对数进行计算，这样可以把复数模的乘法运算简化为加减法运算。由于复数乘除时，相位本来就是加减运算，所以对相位就没有必要取对数了。对电压分贝计算，功率分贝计算和电平分贝计算都要求能较熟练地掌握。

第二章 共发射极放大器低频频率特性的分析方法

§2.1 共发射极放大器的交流等效电路

图 1.2.1 是典型的 RC 耦合共发射极放大器电路图。

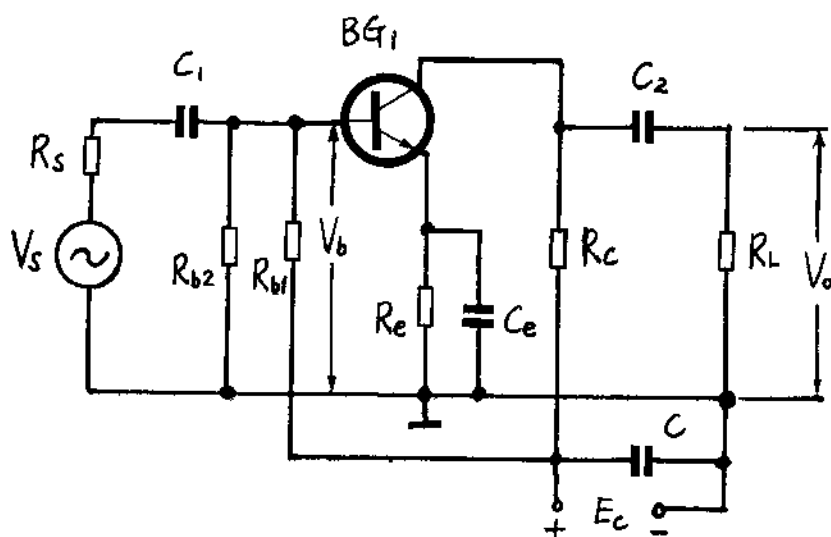


图 1.2.1

在图 1.2.1 中, V_s 是信号源电压, R_s 是信号源内阻, R_{b1} 和 R_{b2} 是基极偏流电阻, R_e 是发射极直流稳流电阻, R_c 是集电极直流负载电阻, R_L 是负载电阻, C_1 是输入耦合电容器, C_2 是输出耦合电容器, C_e 是发射极旁路电容器, E_c 是直流供电电源, C 是电源旁路电容器, BG_1 是 NPN 晶体三极管, V_b 是晶体管放大器输入端电压, V_o 是放大器输出端电压。

我们现在只是研究交流信号的放大过程, 晶体管的直流偏置电路已经设计妥当, 因此, 在研究放大器的频率特性时, 可以认为电源电压 E_c 由于大电容器 C 的存在, 对交流信号而言可视为短路。于是, 图 1.2.1 的交流等效电路可画成如图 1.2.2 的样子, 在这里 $R_b = R_{b1} // R_{b2}$ 。

把电源电压 E_c 视为短路, 并把 R_{b1} 与 R_{b2} 的并联值用 R_b 表示, 这是研究交流放大器的第一个步骤。从图 1.2.2 中可见, 不论电源 E_c 的正端接地或负端接地, 对放大器的交流工作情况是没有任何影响的。在 960 路微波中继收发信机中给宽频带中频放大器供电的稳压电源是 -18 伏, 虽然用的都是 NPN 三极管 (见图 1.1.1), 但只是影响直流偏置电路的接地位置, 而对交流信号通路没有任何影响。

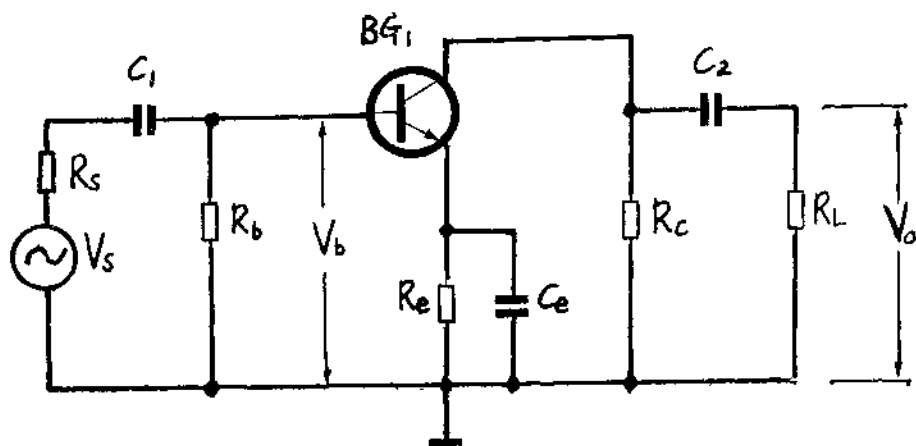


图 1.2.2

研究交流放大器的第二个步骤是把晶体三极管也用某种“等效电路”来替换，这样，整个放大器的频率特性就可以用交流电路中的复数运算来进行计算了。

§2.2 晶体管低频 h 参数等效电路

晶体三极管的特性本来是属于非线性器件，但是在交流小信号的工作条件下，即在直流工作点附近小范围内运用的条件下，就可以把晶体管当作线性元件来处理。晶体管的低频等效电路就是利用电阻、电压源和电流源等常见元件去构成一种线性电路，用以模拟出晶体管的输入回路和输出回路特性。“等效”这个概念是两种在表现形式上看来互不相同的东西，却在实质上具有相同的效果。

晶体管等效电路体现了把晶体管的非线性物理性能在特定条件下转化成为线性电路运算范畴内的事情，使得我们能够把晶体管与外电路合在一起，利用已经学习过的线性电路知识进行分析和计算。这是一件很有生命力的事物，具有辩证的观点，要很好地去掌握它。

共发射极接法的晶体三极管存在有输入和输出两个回路，如图 1.2.3 所示。输入回路的端电压为 ΔV_{be} ，电流为 ΔI_b ；输出回路的端电压为 ΔV_{ce} ，电流为 ΔI_c 。电压和电流的方向如图上所标示。

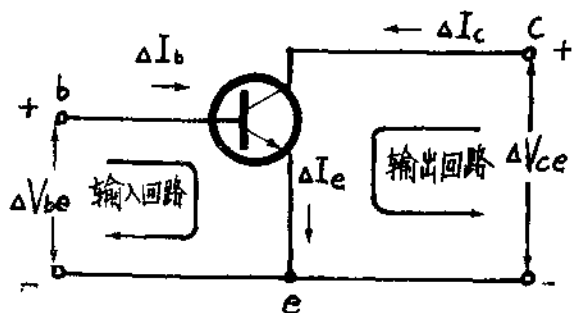


图 1.2.3

我们知道，晶体管的 I_c 如果有变化， I_e 也跟着变化，两者的关系是 $I_c = \beta_0 I_b$ （条件是维持 V_{ce} 为某一个定值）。在这里， I_b 是自变量， I_c 是因变量，而 V_{ce} 为参变量。我们还知道，由于晶体三极管内部的物理原因，当 V_{ce} 有变化时，除了 I_c 有稍许变化之外，还会影响到输入回路也产生相应的变化。从数学上来说，如果以 ΔI_b 和 ΔV_{ce} 为自变量，则可列出输入回路和输出回路的方程式如下：

$$\left. \begin{aligned} \Delta V_{be} &= h_{11e} \Delta I_b + h_{12e} \Delta V_{ce} \\ \Delta I_c &= h_{21e} \Delta I_b + h_{22e} \Delta V_{ce} \end{aligned} \right\} \quad (1.2.1)$$

根据式 (1.2.1) 可以画出共发射极晶体管 h 参数等效电路如图 1.2.4。

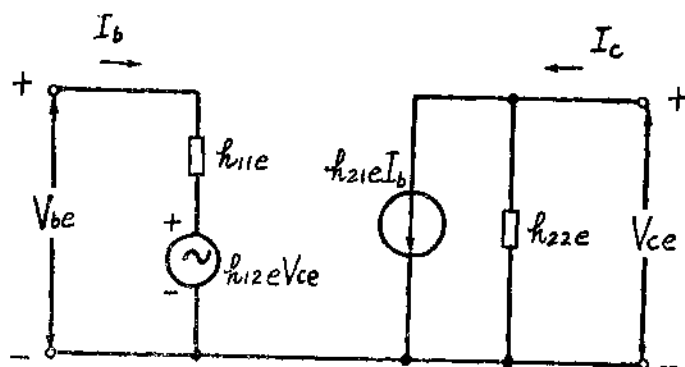


图 1.2.4

h 参数的定义就是

$$\left. \begin{aligned} h_{11e} &= \left. \frac{\Delta V_{be}}{\Delta I_b} \right|_{\Delta V_{ce}=0} \\ &\text{（这是输出交流短路时的输入阻抗，}\Omega\text{），} \\ h_{12e} &= \left. \frac{\Delta V_{be}}{\Delta V_{ce}} \right|_{\Delta I_b=0} \\ &\text{（这是输入交流开路时的电压反馈系数，无量纲），} \\ h_{21e} &= \left. \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} \right|_{\Delta V_{ce}=0} \\ &\text{（这是输出交流短路时的电流放大系数，无量纲），} \\ h_{22e} &= \left. \frac{\Delta I_c}{\Delta V_{ce}} \right|_{\Delta I_b=0} \\ &\text{（这是输入交流开路时的输出导纳，}\mathcal{O}\text{）。} \end{aligned} \right\} \quad (1.2.2)$$

h 参数是把晶体管当作一个四端网络，按照四端网络的定义而推导出来的网络参数。因此， h 参数又叫做晶体管的网络参数。当我们学习过四端网络之后，就会对 h 参数有更进一步的理解。在数学上，当我们学习过两个自变量求导数的概念以后，可以用全微分方程来和式 (1.2.1) 进行对照，这时，我们将会把 h 参数上升到理性阶段。

晶体管的网络参数等效电路，除了 h 参数之外，我们以后还要使用 y 参数等效电路。网络参数的概念比较抽象，但它的应用却已普及，晶体管手册上所给出的指标也用到它，例如我们经常提到的晶体三极管的 β ，就是 h_{21e} 。