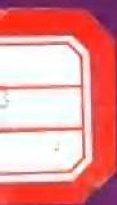
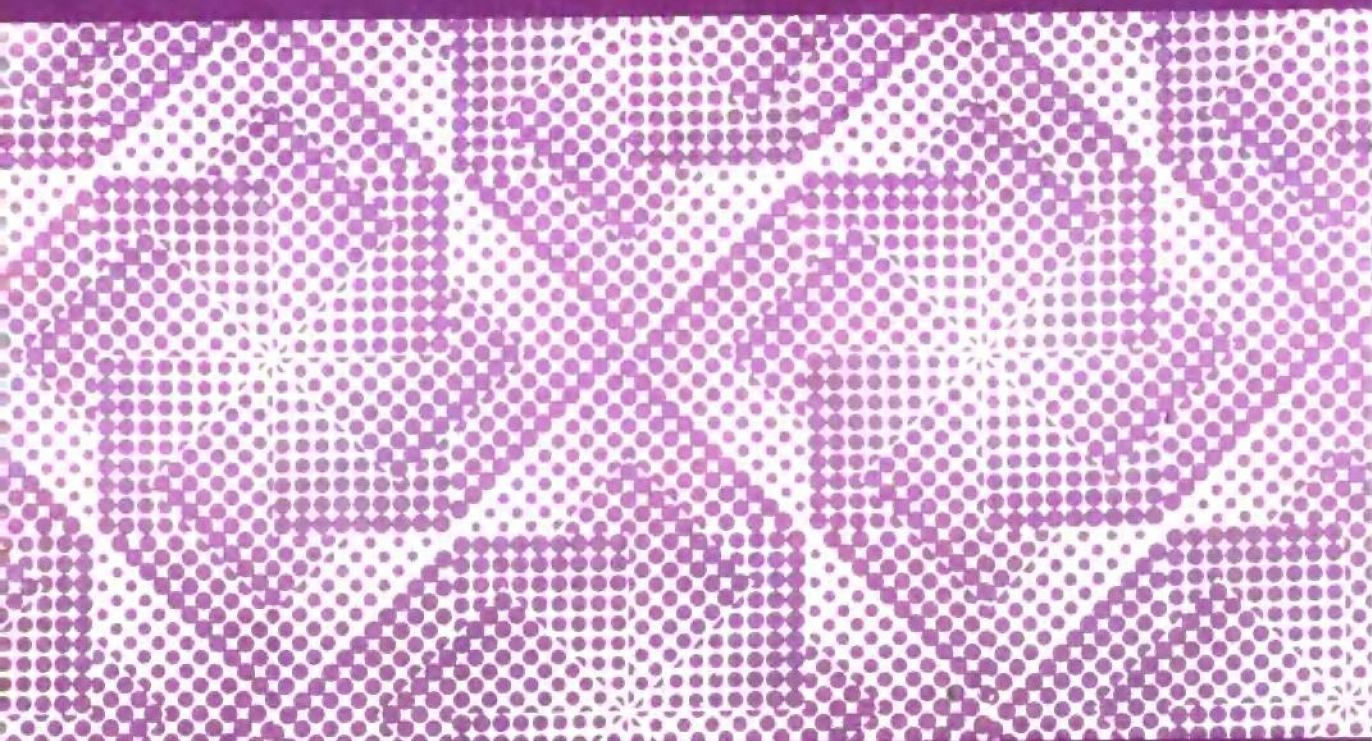


· 下册 ·

电子线路

张康敏 张周禄 敬福全 编著



中国广播电视出版社

图书在版编目(CIP)数据

电子线路/张康敏等编著. —北京:中国广播电视出版社,
1993.12(1998.1 重印)

ISBN 7-5043-0007-1

I. 电… I. 张… II. 电子电路-专业学校-教材 IV.
TN7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 00815 号

中国广播电视出版社出版发行

(北京复外真武庙二条九号 邮政编码:100866)

河北省地矿局地质六队美术胶印厂印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 16 开 36.875 印张 900 千字

1993 年 12 月第 1 版 1998 年 3 月第 2 次印刷

印数:10001—13000 册 定价:47.00 元

出版者的话

为了适应广播电视中专教育事业发展的需要,不断提高教材质量,广播电影电视部教育司和各广播电视中专课程组,在对第一轮中专工科教材修订的基础上,组织力量编写了第二轮广播电视中专工科教材,由中国广播电视出版社出版,并公开发行。这批规划出版的专业基础课教材有:《电子线路》、《电工基础》、《无线电技术基础》、《无线电测量》、《微型计算机原理及应用》、《脉冲与数字电路》、《电视原理》,共计7种。专业课教材有:《电波与天线》、《广播·电视·调频发送技术》、《广播播控技术》(含广播声学、有线广播、录音技术)、《电视播控与制作技术》(含摄像)、《电视接收技术》、《数字通信》、《微波与卫星接收技术》、《录音与录像技术》,共计8种。在教材编写过程中,力求做到立论正确,概念清楚,理论联系实际。

这批教材,适于招收初中毕业生、学制为四年的学校使用。鉴于目前各学校招生对象和学制不尽相同,各校可根据教学大纲的要求选用有关内容。设有相近专业的其它中等专业学校和职业高中也可选用本教材。

这批教材还可以作为干部培训的中级教材和职工自学参考书之用,也可以供具有高中文化程度和一定无线电基础知识的读者阅读。我们殷切希望广大读者对本教材提出意见和建议,帮助我们做好教材出版工作。

前 言

本教材系根据 1991 年全国广播电视中专工科教学大纲审定会通过的《电子线路》教学大纲编写的。可作为广播电视工科专业四年制中专教材,也可供二年制相近专业中等专业学校使用。

全书分上、下两册。上册主要内容包括:绪论、晶体二极管和晶体三极管、基本放大器、场效应管及放大器、负反馈放大器、直流放大器、集成运算放大器、低频功率放大器、直流稳压电源以及电子管及其放大电路;下册主要内容包括:小信号谐振放大器、宽频带放大器、正弦波自激振荡器、谐振功率放大器、调幅与检波、调频与鉴频、变频、反馈控制电路、广播接收机。

在编写过程中,编者力求运用辩证唯物主义观点阐明电子线路的基本规律,讲清楚基本内容,又有较广的知识面,并注意理论联系实际。本书的选材力求适应当前现实和发展的需要,删繁就简,适当地引进一些新内容。我们期望,通过本书的学习,学生们能掌握电子线路的分析方法,能较深刻地认识各种电路的物理本质,培养他们独立思考和分析、解决问题的能力,以适应电子技术飞速发展的需要。

本书由浙江广播电视学校张康敏担任主编,并执笔编写了上册的全部书稿。下册的第一、二、三、四章由甘肃广播电视学校敬福全编写,第五、六、七、八、九章由安徽广播电视学校张周禄编写。广电部电子线路课程组的同志们为本书提出了许多宝贵的意见,尤其是组长石昭生同志对教材编写工作始终给予了热情关心和大力支持,在此表示衷心感谢。

限于编者水平,本书对分析方法的介绍还不够系统,具体电路工作过程的介绍还嫌太多。此外,还有不少缺点和错误,恳请读者批评指正。

编者

1992 年 8 月 19 日

目 录

(下册)

第一章 小信号谐振放大器	(1)
1-1 晶体管高频等效电路	(2)
1-2 单调谐回路放大器	(10)
1-3 双调谐回路放大器	(20)
1-4 消除晶体管内部反馈的方法	(24)
1-5 集成中频放大器	(28)
本章小结	(33)
习题与思考题	(33)
第二章 宽频带放大器	(35)
2-1 概述	(35)
2-2 展宽频带的电路及其应用	(36)
2-3 集成化宽频带放大器	(50)
本章小结	(53)
习题与思考题	(53)
第三章 正弦波自激振荡器	(55)
3-1 概述	(55)
3-2 反馈型正弦波自激振荡器	(56)
3-3 LC 正弦波振荡器	(68)
3-4 振荡器的稳定	(77)
3-5 晶体振荡器与压控振荡器	(82)
3-6 RC 振荡器	(94)
本章小结	(105)
习题与思考题	(106)
第四章 谐振功率放大器	(110)
4-1 谐振功放的工作原理	(111)
4-2 谐振功放电路的特性分析	(117)
4-3 谐振功放的馈电、输出及耦合电路	(122)
4-4 高频功率晶体管的运用	(127)
本章小结	(134)
习题与思考题	(134)
第五章 调幅与检波	(136)

5-1 调幅原理	(137)
5-2 二极管调幅	(140)
5-3 三极管调幅	(146)
5-4 集成调制器	(150)
5-5 检波电路	(153)
本章小结	(165)
习题与思考题	(166)
第六章 调频与鉴频	(169)
6-1 调频原理	(169)
6-2 调频信号的产生	(175)
6-3 调频信号的解调	(182)
本章小结	(190)
习题与思考题	(191)
第七章 变频	(193)
7-1 概述	(193)
7-2 晶体二极管混频电路	(196)
7-3 晶体三极管混频电路	(200)
7-4 变频的干扰	(205)
7-5 变频电路的实际应用	(208)
7-6 倍频器	(211)
本章小结	(216)
习题与思考题	(217)
第八章 反馈控制电路	(219)
8-1 概述	(219)
8-2 自动电平控制电路	(219)
8-3 自动增益控制电路	(223)
8-4 自动频率控制电路	(231)
8-5 自动相位控制电路	(235)
本章小结	(239)
习题与思考题	(240)
第九章 广播接收机	(241)
9-1 概述	(241)
9-2 调幅收音机	(244)
9-3 调频收音机	(248)
9-4 锁相技术在广播接收机中的应用	(252)
本章小结	(257)
习题与思考题	(257)
附录 常用符号表	(259)
主要参考文献	(263)

第一章 小信号谐振放大器

在上册我们曾研究了对低频信号进行放大、频率变换的物理过程及其单元电路的工作原理、分析调试方法,下册我们将研究高频信号的产生、放大和频率变换的物理过程及其单元电路的工作原理、分析调试方法。在无线电技术基础课中曾经学过,当交变电流通过直导体时,在其周围将会产生交变的电磁场,交变电磁场的强度反比于该点与导体的距离而正比于导体中电流的强度和频率。这就是电磁辐射现象,即以导体为中心,电磁波向四面八方辐射,辐射能力随频率的升高而加强。在频率很低时这种辐射现象可以忽略不计,但当频率很高时这种辐射现象不可不计,甚至变为主要的传输手段。对于频率为 300kHz 以下的信号(在无线电技术中我们称为低频信号),辐射现象在一定条件下可忽略不计,电路的分布参数对信号的传输影响不大,这是在上册我们研究的对象。对于频率在 300kHz 以上的信号,电磁波的辐射能力已达到一定的强度,电路中的分布参数对信号的传输影响很大,有时甚至成为电路的唯一参数,而不再接入集中参数元件。本册我们就将研究这种高频信号。信号特性的差异使高频电路的组成及其分析方法与低频时有很大的不同。受分布参数的影响,高频放大器的负载要用 LC 并联谐振回路或以分布参数为基础的传输线变压器,对多级放大器则采用集中滤波(调谐)、集中放大的形式以提高放大器的性能。由于工作在高频状态下,晶体管内部的高频效应及外电路分布参数作用将突出,在低频线路中所用的低频 H 参数等效电路法已不适用,原来认为是常数的 α 、 β 值及电压、电流、功率的增益都将随工作频率而变。这就要求我们必须找到一种适合新情况的分析方法。

调谐放大器是高频放大器的一种,其负载由电感、电容并联的谐振回路构成。

在接收设备中,天线上感应的是很微弱的各种高频无线电信号,强度从几十 μV 到几个 mV ,而接收机的检波器是个没有选择性能、且输入电压需 1V 左右的电路。因而在天线和检波器之间必须插入一个电路,这个电路对高频信号要能放大 1 千倍至 10 万倍(即电平提高 60~100dB),同时能够从复杂的电信号中选出我们所需要的无线电信号来(即要具有选频或滤波特性),二者缺一不可。可以想象,若这个电路只有放大作用而无选频特性,我们在检波器负载上得到的将是一个杂乱的、什么也听不清的噪音;若这个电路只有选频特性而无放大作用,则在检波器负载上得到的将是一个极其微弱的信号(假设这个信号可以传输到检波器负载上),仍然什么也听不到。这个既有放大作用又有选频特性的电路就是调谐放大器。

对于发送设备,它的最终目的是向发射天线送去具有相当强度的高频已调制电流,使之能够产生很强的电磁波向空间辐射,从而达到传递信号(即实现无线电广播)的目的。例如一部 10kW 的中波板极调幅发射机,其馈线阻抗为 230Ω (不平衡输入),馈线上的高频电压高达 1500V 左右;如果发射机的输出功率为 200kW,则馈线上的高频电压可高达 7000V 左右。而一个高频振荡器的输出也只有 1V 左右,因而在振荡器与馈线之间要对高频信号进行成千上万倍的放大,而且在放大过程中要求信号不失真。所以理想的放大器也应该是调谐放大器电路。

不仅如此,在微波通信、自动控制、自动检测等设备中,凡要对正弦信号进行放大的均需采用调谐放大器电路。

调谐放大器按其工作时信号幅度的大小可分为大信号调谐放大器和小信号调谐放大器两种。对大信号调谐放大器,为了提高其输出功率和效率,晶体管要工作在非线性的丙类状态。对它的分析要用折线法,这将在本书第四章讨论。对小信号调谐放大器,为了保证在放大过程中信号不失真,晶体管将完全工作在线性的放大区(甲乙类状态)。对它将采用 Y 参数等效电路的分析方法,这是本章要讨论的内容。

小信号调谐放大器的负载若为一个 LC 谐振回路,则叫小信号单调谐放大器;若为两个互相耦合的 LC 谐振回路,则叫小信号双调谐放大器。按照晶体管三个电极与输入、输出信号的关系不同,调谐放大器也有共射、共基、共集组态之分。按照所用放大器件的不同它又可分为晶体管调谐放大器、场效应管调谐放大器、集成电路调谐放大器和电子管调谐放大器。电子管调谐放大器将在发送设备课中予以研究。若按 LC 回路谐振频率的不同又可分为高频放大器(回路谐振频率始终等于变化的输入信号的频率)和中频放大器即频带放大器(回路谐振于某一固定的频率)。还有一种各级回路谐振频率不相同的多级单调谐放大器,叫参差调谐放大器。

小信号谐振放大器的主要技术指标有:增益(电压、电流、功率)、通频带、选择性和稳定性。下面我们将分别予以讨论。

1-1 晶体管高频等效电路

如果某电路对外部电路的作用与晶体管在特定条件下对外部电路的作用(所提供的电压、电流、功率,所呈现的输入、输出阻抗)相同,则该电路就叫做晶体管的等效电路。高频等效电路与低频等效电路的主要区别是高频等效电路充分考虑了结电容对晶体管物理过程的影响。这里应该注意:

一、晶体管的等效电路是指对外部电路的作用等效,因而它只能用来分析晶体管对外部电路的作用与影响,而不能用来分析晶体管内部的工作情况。例如不能用来计算等效电流源、电压源的损耗及工作效率。

二、等效电路是个电路模型,它能使电压、电流等物理量之间的关系形象化,且便于用电工基础中的电路理论去分析它,至于它是否能用实际的元件去组成这样的电路则不一定。

三、晶体管只有在特定条件下才与该电路等效,这个特定条件是指晶体管要有既定的静态工作点,对高频等效电路一定还要工作在小信号状态下(输入信号小于 200mV)。离开了这两条,该电路就不与晶体管等效。这就是高频等效电路的使用条件。

晶体管的等效电路可分为两类:一类为物理模拟等效电路,它是根据晶体管内部发生的物理过程并用电阻、电容、信号源去模仿它而组成的电路,有时也叫物理参数等效电路。另一类为功能模拟电路,它是根据晶体管各极间电压电流的关系,即晶体管三个电极对外电路所呈现的功能来模拟的等效电路,也叫网络参数等效电路。

这两类等效电路还可以进一步分类。物理参数等效电路又可分为: T 型等效电路,主要用于高频共基放大器的分析;混合参数 π 型等效电路,主要用于宽频带放大器的分析。网络参数等效电路又可分为: H 参数等效电路,主要用来分析低频放大器; Y 参数等效电路,主要用于调谐放大器的分析。对于同一晶体管,各种等效电路都是互为等效的,它们的等效参数是可以

互相转换的。我们将重点讨论分析高频电子线路所常用的混合参数 π 型等效电路、 T 型等效电路及 Y 参数等效电路。

一、物理模拟等效电路

(一)混合 π 型等效电路

如果晶体管在放大电路中接成共射组态,参照低频线路中晶体三极管的模拟结构图就可画出它的物理模拟等效电路,如图 1-1 所示。这个电路叫做晶体管共射电路的混合参数 π 型等效电路。所谓混合参数是指在等效电路中既有阻抗参数 r 、 C ,又有导纳参数 g_m 等。

图中各符号的意义是:

1. $r_{bb'}$ 是由外基极 b 到内基极 b' 的基区体电阻。不同类型的晶体管, $r_{bb'}$ 的数值也不一样。低频小功率管一般为 300Ω 左右,高频小功率管为十几到几十 Ω 之间。

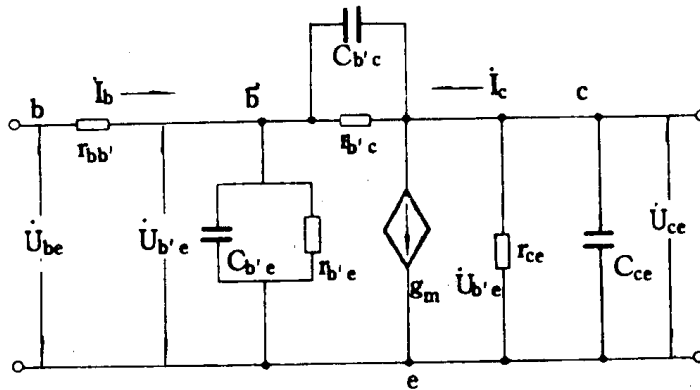


图 1-1 晶体管共射电路的混合参数 π 型等效电路

2. $r_{b'e}$ 是发射结电阻。它代表 b' 与 e 之间的等效电阻,反映了电压 $U_{b'e}$ 与基极电流 I_b 之间的关系,它与 $r_{bb'}$ 一起决定共射组态晶体管的输入电阻。 $r_{b'e}$ 的数值等于将发射结的正向结电阻 r_{je} 折合到基极电路时的阻值

$$r_{b'e} = (1 + \beta_0) r_{je} \approx \beta_0 r_{je} = \beta_0 \frac{26}{I_e(\text{mA})} \quad (1-1)$$

式中, β_0 为晶体管共射电路低频电流放大系数; I_e 为发射极静态电流。 $r_{b'e}$ 通常为几百 Ω 。

3. $C_{b'e}$ 是发射结电容,是晶体管输入阻抗中的电抗部分, $C_{b'e} = C_{De} + C_{Te}$ 。由于发射结正向偏置, C_{De} 、 C_{Te} 同时存在,而 $C_{De} \gg C_{Te}$,所以 $C_{b'e} \approx C_{De}$,约为 $10 \sim 50\text{pF}$ 。

4. $g_m U_{b'e}$ 为等效电流源。它反映了晶体管的放大作用,即当晶体管 $b'-e$ 间加上交流电压 $U_{b'e}$ 时,对集电极回路就相当于有一恒流源 $g_m U_{b'e}$ 在起作用。 g_m 为晶体管的跨导,它反映了电压 $U_{b'e}$ 对集电极电流 I_c 的控制能力,即晶体管的放大能力,其大小约为发射结正向电阻的倒数

$$g_m \approx \frac{1}{r_{je}} = \frac{I_e(\text{mA})}{26} \quad (1-2)$$

单位为毫西,用 mS 表示。

5. $r_{b'c}$ 是集电结电阻。它代表共射组态时晶体管内部的反馈作用,即输出电压对输入电压的反作用。由于集电结处于反向偏置状态,使 $r_{b'c}$ 数值很大,约为几十到几百 $\text{k}\Omega$ 之间。

6. $C_{b'c}$ 是集电结电容。它代表共射组态时晶体管内部电容的反馈作用。同样,由于集电结处于反向偏置状态,扩散电容 $C_D = 0$,所以结电容 $C_{jc} \approx C_{Te}$,通常只有几个 pF。

7. r_{ce} 是集电极与发射极之间的电阻。它反映了集电极电压 U_{ce} 对集电极电流 I_c 的影响,也

就是晶体管的输出电阻。

8. C_{ce} 是集电极与发射极之间的电容。即晶体管的输出电容,约为 $2 \sim 10 \text{pF}$ 。

在这里,由于工作频率较高,等效电路中各电容的作用是不可忽略的。但在工程上,对电路进行估算时,为了简化计算常将电路中相对说来影响较小的元件忽略掉。如在图 1-1 中由于 $C_{b'e}$ 的容抗与它并联的电阻 $r_{b'e}$ 的阻值相比小得多,故 $r_{b'e}$ 可以忽略不计。又由于晶体管的外接负载电阻一般只有几 $\text{k}\Omega$,而与它相并联的 r_{ce} 阻值很大, C_{ce} 的容抗也很大,故 r_{ce} 、 C_{ce} 也可忽略不计。于是,图 1-1 可简化为图 1-2。

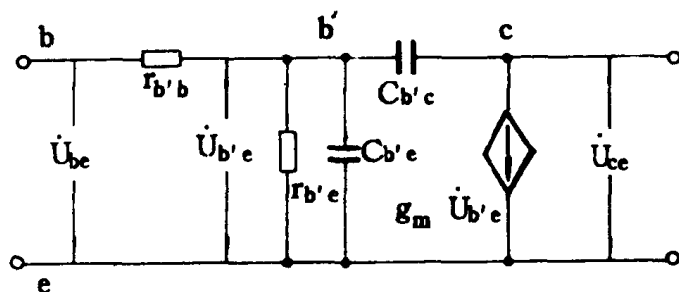


图 1-2 简化后的混合参数 π 型等效电路

(二) T 型等效电路

若将晶体管接成共基组态,参照上册中的晶体管物理模拟结构图可画出其等效电路如图 1-3 所示,图中 r_{je} 为发射结电阻。在实用中,由于 $r_{b'e} \gg \frac{1}{\omega C_{b'e}}$,常将 $r_{b'e}$ 忽略。为了应用方便,我们常将恒流源 $\alpha_0 I_c'$ 用 αI_c 表代替,它们之间的关系我们将在讨论 α 与频率的关系时说明。

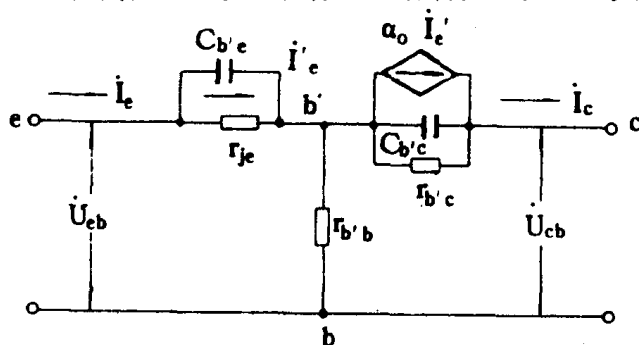


图 1-3 晶体管共基电路 T 型等效电路

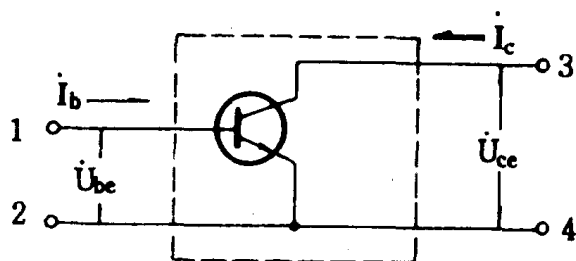


图 1-4 晶体管共射电路与四端网络

二、网络参数等效电路

上面我们介绍了用电阻、电容和电流源组成的物理模拟等效电路。这种等效电路中各元件参数的物理意义比较清楚,它们在很宽的频率范围内与频率无关,很适合用来分析宽频带放大器。但是对于调谐放大器,若用它来分析就太复杂了,特别是计算很麻烦,我们必须另外找出一种等效电路来帮助分析。

考虑到我们所研究的是放大器输入、输出电路的电压、电流、功率关系,而不是研究晶体管内部在放大过程中的运动规律,并且我们研究的是小信号放大器,晶体管在放大过程中只工作在特性曲线的线性范围内,所以可以用一个有源的线性四端网络来等效这个晶体管,这就是前面说过的网络参数等效电路。

设某晶体管的共射电路如图 1-4 所示。它有一对输入端 1、2 和一对输出端 3、4,故可以用一个四端网络等效它,如图中虚线所示。四端网络的输入电压为 $\dot{U}_{be}$,输入电流为 I_b ,它的输出电压为 $\dot{U}_{ce}$,输出电流为 I_c ,用这四个量就可描述方框内晶体管的特性。如任选上述四个量中的两个量作自变量,另两个作参变量就可得出 Z 、 Y 、 H 、 A 、 B 、 G 六种不同的参数系,可分别从不同的角度去描述这个四端网络的特性。它们之间存在着一定关系,参数可以互相换算,它们分别适用于不同条件下的对放大器的分析运算。例如对晶体管低频放大器,我们用 Z 参数系和 H 参数系;对小信号单调谐放大器则用 Y 参数系;对链形网络、传输线、滤波器又用 A 参数系等等。若选 $\dot{U}_{be}$ 、 $\dot{U}_{ce}$ 为自变量,选 I_b 、 I_c 为参变量就可得出 Y 参数系的基本方程组:

$$I_b = Y_{ie}\dot{U}_{be} + Y_{re}\dot{U}_{ce} \quad (1-3)$$

$$I_c = Y_{fe}\dot{U}_{be} + Y_{oe}\dot{U}_{ce} \quad (1-4)$$

式中四个系数 Y_{ie} 、 Y_{re} 、 Y_{fe} 、 Y_{oe} 是与变量无关的四个常数(因晶体管此时为线性元件),称为 Y 参数。它的第一个下标代表该参数的意义,第二个下标 e 表示晶体管为共射电路。

根据式(1-3)、(1-4)可画出晶体管共射 Y 参数的等效电路如图 1-5 所示。图中左半部分与式(1-3)对应,是晶体管的输入等效电路;图中右半部分与式(1-4)对应,是晶体管的输出等效电路。

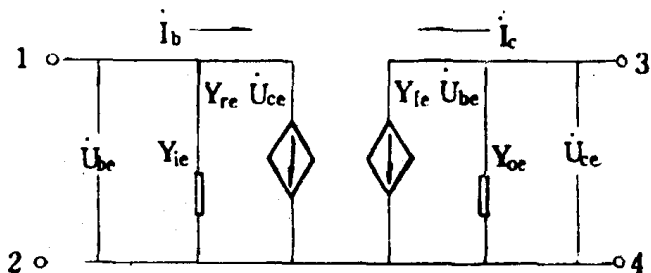


图 1-5 晶体管共射 Y 参数等效电路

图中各参数的意义是

$$Y_{ie} = \left. \frac{I_b}{\dot{U}_{be}} \right|_{\dot{U}_{ce}=0} \quad (1-5)$$

称为共射晶体管的输入导纳,它反映了输入电压 $\dot{U}_{be}$ 对输入电流 I_b 的控制能力;

$$Y_{re} = \left. \frac{I_b}{\dot{U}_{ce}} \right|_{\dot{U}_{be}=0} \quad (1-6)$$

称为共射晶体管的反向传输导纳,它反映了输出电压 U_{ce} 对输入电流 I_b 的控制程度;

$$Y_{fe} = \left. \frac{I_c}{U_{be}} \right|_{U_{ce}=0} \quad (1-7)$$

称为共射晶体管的正向传输导纳,它反映了晶体管输入电压 U_{be} 对输出电流 I_c 的控制能力;

$$Y_{re} = \left. \frac{I_c}{U_{ce}} \right|_{U_{be}=0} \quad (1-8)$$

称为共射晶体管的输出导纳,它反映了输出电压 U_{ce} 对输出电流 I_c 的控制能力。

根据定义,上述四个参量都是在晶体管输入端或输出端短路时得到的(即 $U_{be}=0, U_{ce}=0$),因而它们只代表晶体管本身的特性而与外电路无关。

借助于晶体管的混合参数 π 型简化电路(如图 1-2 所示),再根据 Y 参数的定义条件〔式 (1-5)、(1-6)、(1-7)、(1-8)〕,就可求出 Y 参数与物理参数之间的关系

$$Y_{ie} = \frac{g_{b'e} + j\omega(C_{b'e} + C_{b'c})}{1 + r_{bb'}[g_{b'e} + j\omega(C_{b'e} + C_{b'c})]} \quad (1-9)$$

$$Y_{re} = \frac{-j\omega C_{b'c}}{1 + r_{bb'}[g_{b'e} + j\omega(C_{b'e} + C_{b'c})]} \quad (1-10)$$

$$Y_{oe} = \frac{j\omega C_{b'c}[1 + r_{bb'}(g_m + g_{b'e} + j\omega C_{b'e})]}{1 + r_{bb'}[g_{b'e} + j\omega(C_{b'e} + C_{b'c})]} \quad (1-11)$$

$$Y_{fe} = \frac{g_m - j\omega C_{b'c}}{1 + r_{bb'}[g_{b'e} + j\omega(C_{b'e} + C_{b'c})]} \quad (1-12)$$

若考虑到通常 $C_{b'c} \ll C_{b'e}$,上面式子可进一步简化为

$$Y_{ie} = \frac{g_{b'e} + j\omega C_{b'e}}{1 + r_{bb'}(g_{b'e} + j\omega C_{b'e})} \quad (1-13)$$

$$Y_{re} = \frac{-j\omega C_{b'c}}{1 + r_{bb'}(g_{b'e} + j\omega C_{b'e})} \quad (1-14)$$

$$Y_{oe} = \frac{j\omega C_{b'c}r_{bb'}g_m}{1 + r_{bb'}(g_{b'e} + j\omega C_{b'e})} + j\omega C_{b'c} \quad (1-15)$$

$$Y_{fe} = \frac{g_m}{1 + r_{bb'}(g_{b'e} + j\omega C_{b'e})} \quad (1-16)$$

式(1-13)、(1-14)、(1-15)、(1-16)都有一个共同的分母,这个分母中含有基区的体电阻 $r_{bb'}$ 、发射结电导 $g_{b'e}$ 和发射结电容 $C_{b'e}$ 。它们的变化将同时影响晶体管的输入阻抗、输出阻抗、正向传输导纳和反向传输导纳。在上述式子中,若分母 $r_{bb'}=0$ (这是不可能的,仅是为了分析除 $r_{bb'}$ 之外 Y 参数还与那些物理参数有关)则上式又可变为:

$$Y_{ie} = g_{b'e} + j\omega C_{b'e} \quad (1-17)$$

$$Y_{re} = -j\omega C_{b'c} \quad (1-18)$$

$$Y_{fe} = g_m \quad (1-19)$$

$$Y_{oe} = j\omega C_{b'c}r_{bb'}g_m + j\omega C_{b'c} \quad (1-20)$$

由式(1-17)可见,晶体管的输入导纳 Y_{ie} 主要由 $g_{b'e}$ 、 $C_{b'e}$ 来决定;由式(1-18)可见,晶体管的反向传输导纳 Y_{re} 主要由 $C_{b'c}$ 来决定;由式(1-19)可见,晶体管的正向传输导纳 Y_{fe} 主要由晶体管的跨导 g_m 来决定;由式(1-20)可见,晶体管的输出导纳 Y_{oe} 分两部分:一部分由晶体管集电结电容 $C_{b'c}$ 来决定,当 $U_{be}=0$ 时就是 $C_{b'c}$ 与 $C_{b'e}$ 相串联,由于 $C_{b'e} \gg C_{b'c}$,故主要由 $C_{b'c}$ 来决定;而另

一部分就是输出等效电路中电流源 $g_m U_{be}$ 所呈现的导纳。

最后还要说明两点:首先,式(1-17)、(1-18)、(1-19)、(1-20)是为了便于理解、突出矛盾、根据假设而导出的公式,仅仅用来帮助大家理解概念,千万不可用于计算。其次,由式(1-13)、(1-14)、(1-15)、(1-16)可见,全部 Y 参数都是频率的函数,即在不同频率下各个 Y 参数都具有不同的值。这就告诉我们, Y 参数等效电路只能用于窄频带放大器的分析,而不适合用来分析宽频带放大器。

三、两种等效电路的比较

(一)相同点

1. 物理模拟参数等效电路与网络参数等效电路都是近似等效电路,而不是完全等效电路。这是由于:(1)所有的等效都有先决的假设条件,而这些假设条件往往是不完全成立的。例如我们假设晶体管工作在小信号情况下可看成线性元件,然而信号再小晶体管的特性仍然是非线性的。(2)晶体管的内部物理过程(包括扩散、复合、基极宽度调制效应)是相当复杂且互相联系的,而我们用互相独立的分立元件结合在一起组成等效电路是有别于实际情况的。(3)晶体管内部的物理过程都具有分布参数的性质,如晶体管的基区与两个 PN 结的接触是两个面,而我们用一个根本不存在的内基极 b' 去代表它,所以,虽然用这些等效电路去分析放大器的工作原理是个很好的方法,但用它们对放大器进行计算,误差是很难避免的,只能用于估算。

2. 两种等效电路都有局限性。如前所述,它们都是工作在小信号情况下才等效。这就是使用它们的先决条件,离开了这个条件就不能等效。到底多大的信号才叫小信号,这是由对放大器技术指标的具体要求来决定的。一般说来,晶体管的输入电压在几十 mV 以下为小信号,大于几百 mV 为大信号。

3. 等效电路都是对具有一定偏置条件下的晶体管的等效。偏置发生变化,等效电路各参数也将发生变化,就谈不到等效了。

(二)不同点

1. 两种等效电路的参数对频率的依赖程度不同。物理模拟等效电路的参数与频率基本上没有直接关系,因而可用来分析宽频带放大器,而网络参数都是频率的函数,因而它只能用来分析窄频带放大器。以 Y 参数为例,随着频率的升高,放大器的输入、输出阻抗和放大系数都要减小,而反向传输作用加强。

2. 物理模拟参数的物理概念明确易于理解,用它来解释晶体管的某些物理现象和概念比较方便。在计算窄带放大器时用网络参数(我们用的是 Y 参数)等效电路较方便,因为在窄频带时各种 Y 参数可认为与频率无关。

四、晶体管的频率参数

(一)晶体管的共射电流放大系数 β

1. 定义:共射接法的晶体管在输出端($c-e$ 间)对交流短路时,集电极电流 I_c 与基极电流 I_b 的比值,即

$$\beta = \left. \frac{I_c}{I_b} \right|_{U_{ce}=0} \quad (1-21)$$

2. β 与物理模拟参数的关系

在图 1-2 所示的晶体管共射简化混合 π 电路中,若将 $c-e$ 短接可得如图 1-6(a) 所示的等效电路。由于 $C_{b'e}$ 的容抗很大可忽略不计,又可将(a)图简化为(b)图。由图 1-6(b)可知,当 $c-e$ 短接后,

$$I_c = g_m U_{b'e}$$

$$I_b = \frac{U_{b'e}}{Z_{b'e}}$$

式中 $Z_{b'e}$ 为由 $b'-e$ 向右看去的阻抗,即

$$Z_{b'e} = \frac{r_{b'e} \frac{1}{j\omega C_{b'e}}}{r_{b'e} + \frac{1}{j\omega C_{b'e}}} = \frac{r_{b'e}}{1 + j\omega C_{b'e} r_{b'e}}$$

所以
$$\beta = \frac{I_c}{I_b} = \frac{g_m r_{b'e}}{1 + j\omega C_{b'e} r_{b'e}} \quad (1-22)$$

若令 $\beta_0 = g_m r_{b'e}$, 即 f 很低时的 β 值, 则

$$\beta = \frac{\beta_0}{1 + j\omega C_{b'e} r_{b'e}} \quad (1-23)$$

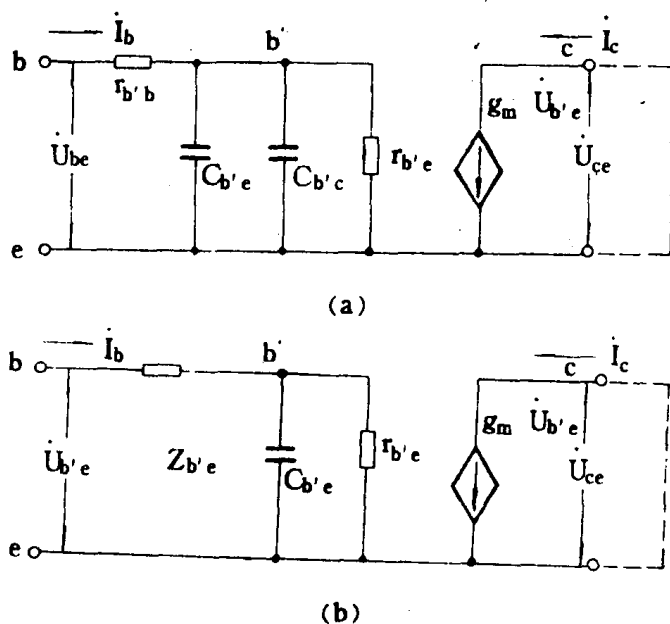


图 1-6 求 β 时的混合 π 型等效电路

3. β 与频率的关系

根据式 (1-23), 当工作频率很低时, $\omega C_{b'e} r_{b'e} \ll 1$, 所以 $\beta = \beta_0$, 即 β 随频率的变化不大。当工作频率升高, 且 $\omega C_{b'e} r_{b'e} = 1$ 时,

$$\beta = \frac{\beta_0}{1 + j}$$

所以

$$|\beta| = \frac{\beta_0}{\sqrt{2}}$$

此时的频率为

$$f_{\beta} = \frac{1}{2\pi C_{b'e} r_{be}} \quad (1-24)$$

f_{β} 称为截止频率。

当工作频率继续升高,使 $|\beta|=1$ 时,频率为

$$f_T = f_{\beta} \sqrt{\beta_0^2 - 1} > f_{\beta}$$

f_T 称为晶体管的特征频率,如图 1-7 所示。

(二) 晶体管的共基电流放大系数 α

1. 定义: 共基接法晶体管在输出端(c-b 间)交流短路时集电极电流 I_c 与射极电流 I_e 之比,即

$$\alpha = \frac{I_c}{I_e} \Big|_{v_{cb}=0} \quad (1-25)$$

2. α 与物理模拟参数的关系

在图 1-3 所示的晶体管共基 T 型等效

电路中,等效电流源用 $\alpha_0 I'_e$ 表示。为了分析方便,我们用 αI_e 来代替电流源,则等效电路可变为图 1-8。若要图 1-3 与图 1-8 对外电路完全等效必须满足

$$\alpha I_e = \alpha_0 I'_e \quad (1-26)$$

即

$$\alpha = \alpha_0 \frac{I'_e}{I_e}$$

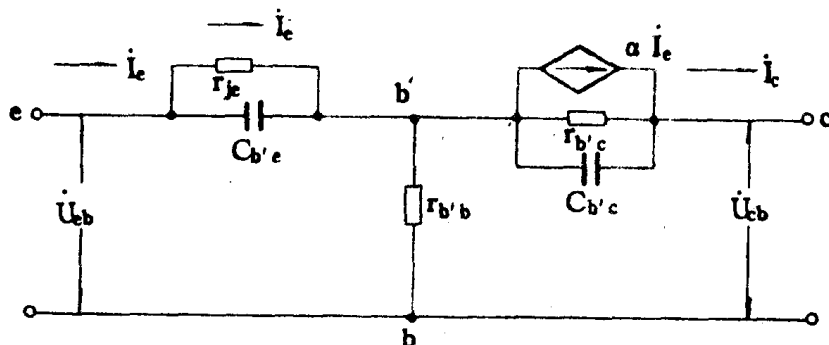


图 1-8 常用的 T 型等效电路

$$\text{由图 1-8 可知, } I'_e = I_e \frac{\frac{1}{j\omega C_{b'e}}}{r_{be} + \frac{1}{j\omega C_{b'e}}} = I_e \frac{1}{1 + j\omega C_{b'e} r_{be}}$$

所以 $\frac{I'_e}{I_e} = \frac{1}{1 + j\omega C_{b'e} r_{be}}$, 代入式(1-26), 得

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + j\omega C_{b'e} r_{be}} \quad (1-27)$$

其模为

$$|\alpha| = \frac{\alpha_0}{\sqrt{1 + (\omega C_{b'e} r_{be})^2}} \quad (1-28)$$

当 $\omega C_{be}r_{be}=1$, 即 $|\dot{\alpha}|=\frac{\alpha_0}{\sqrt{2}}$ 时

$$f_a = \frac{1}{2\pi C_{be}r_{be}} \quad (1-29)$$

f_a 称为晶体管共基短路电流放大系数的截止频率。根据式(1-1), $r_{be}=(1+\beta_0)r_{be}$, 上式可写为

$$\begin{aligned} f_a &= \frac{1}{2\pi C_{be}r_{be}} = \frac{1+\beta_0}{2\pi C_{be}r_{be}} \\ &= (1+\beta_0)f_\beta \end{aligned} \quad (1-30)$$

再根据 $f_T = \beta_0 f_\beta$ 可导出

$$\begin{aligned} f_a &= (1+\beta_0)f_\beta = (1+\beta_0)\frac{f_T}{\beta_0} \\ &= \left(1+\frac{1}{\beta_0}\right)f_T \end{aligned} \quad (1-31)$$

这表明 f_a 略大于 f_T 。前面已经求出 $f_T > f_\beta$, 故可归纳为

$$f_a > f_T > f_\beta \quad (1-32)$$

f_a 、 f_T 、 f_β 是晶体管三个重要的频率参数, 它们从不同的角度反映了晶体管的频率特性, 但它们的含义不同。现将它们与 β 、 α 的关系在同一坐标上表示, 如图 1-9 所示。

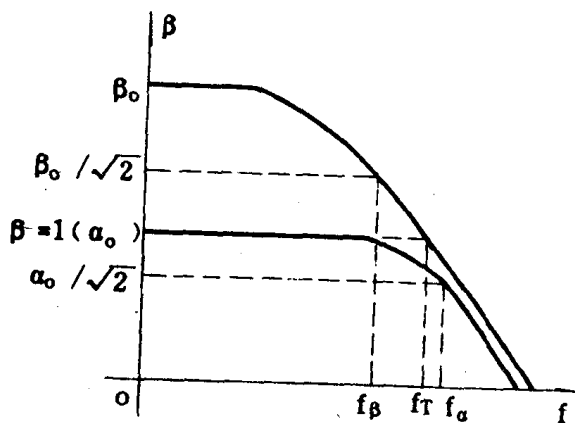


图 1-9 α 、 β 与频率的关系曲线

1-2 单调谐回路放大器

如前所述, 当放大器输入信号小于几十 mV, 且负载为电感电容并联谐振回路时的放大器为小信号调谐放大器。根据所用谐振回路的不同又可分为单调谐回路放大器、双调谐回路放大器和陶瓷滤波放大器等。本节的任务是讨论单调谐回路放大器的工作原理, 其余内容将在以后各节中讨论。由于是小信号放大且为窄频带, 所以可将晶体管等效为有源的线性四端网络来进行分析, 因而这一节采用 Y 参数等效电路对单调谐放大器进行分析。

一、单调谐回路放大器的 Y 参数等效电路

单调谐回路放大器的等效电路如图 1-10 所示。它的输入信号为 $\dot{U}_i$, 输出信号为 $\dot{U}_o$, 我们

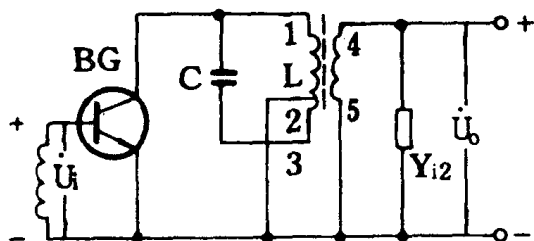


图 1-10 单调谐放大器的交流等效电路图

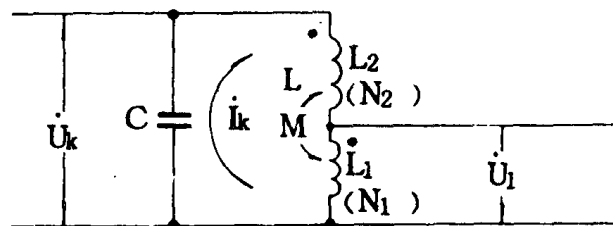


图 1-11 简化的双电感输入部分电路

用 Y_{12} 代表检波器的输入导纳。由图中可以看出这是个输入、输出均为部分接入的调谐回路, 其输入部分可画成如图 1-11 所示。图中 L_1 、 L_2 之间存在互感 M , 且 L_1 、 L_2 绕向相同, 所以 $L = L_1 + L_2 + 2M$ 。若回路电流为 I_k , 则

$$U_K = \omega(L_1 + L_2 + 2M)I_K = \omega LI_K$$

$$U_1 = \omega(L_1 + M)I_K$$

根据回路接入系数(也叫变换系数)的定义,其值为输入(或输出)电压与回路两端总电压之比,所以接入系数为

$$n_1 = \frac{L_1 + M}{L} \quad (1-33)$$

若 L_1 、 L_2 间无互感,则 $n_1 = \frac{L_1}{L}$ 。

接入系数还可由线圈的匝数比的形式来表示。若 L_1 匝数为 N_1 、 L_2 匝数为 N_2 ,则 L_1 正比于 $N_1^2 L_0$ 、 L_2 正比于 $N_2^2 L_0$ 、 M 正比于 $N_1 N_2 L_0$,其中 L_0 是由线圈结构尺寸、线圈中的导磁材料决定的一个常数,可由电工手册中查到。将上述关系代入式(1-33)可得

$$\begin{aligned} n_1 &= \frac{L_1 + M}{L} = \frac{N_1^2 L_0 + N_1 N_2 L_0}{N_1^2 L_0 + N_2^2 L_0 + 2N_1 N_2 L_0} = \frac{N_1(N_1 + N_2)}{(N_1 + N_2)^2} \\ &= \frac{N_1}{N_1 + N_2} = \frac{W_{12}}{W_{13}} \end{aligned} \quad (1-34)$$

式中, W_{12} 为 N_1 ; W_{13} 为 $N_1 + N_2$ 。这就是晶体管输出电路对回路的接入系数。同样可求出检波器输入端对谐振回路的接入系数为:

$$n_2 = \frac{W_{45}}{W_{13}} \quad (1-35)$$

式中 W_{45} 为次级线圈的匝数。

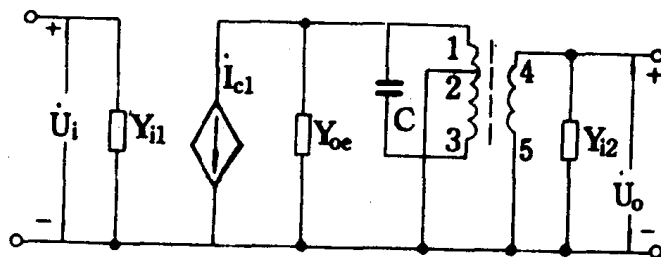


图 1-12 用 Y 参数代替晶体管后的单调谐回路放大器

用 Y 参数代替晶体管后所得的 Y 参数等效电路如图 1-12 所示,此图是在忽略晶体管的反向传输导纳 Y_{re} 后得到的单回路谐振放大器的等效电路,这是为了简化分析过程。实际上反向传输导纳 Y_{re} 在放大过程中是无法忽略的,我们将在 1-4 节中专门讨论它。

在图 1-12 中, $Y_{i1} = Y_{ie1} + j\omega C_{i1}$ 是本级晶体管的输入导纳; $Y_{o1} = Y_{oe1} + j\omega C_{o1}$ 是本级晶体管的输出导纳; $Y_{i2} = Y_{ie2} = g_{i2} + j\omega C_{i2}$ 是检波器的输入导纳; $I_{c1} = Y_{fe} U_i$ 是本级晶体管的等效输出电流源。

若应用接入系数的概念,将 Y_{o1} 、 I_{c1} 、 Y_{i2} 折合至谐振回路,则谐振回路的等效电路如图 1-13 所示,图中

$$\begin{aligned} I_{c1}' &= n_1 I_{c1} = n_1 Y_{fe} U_i \\ g_{o1}' &= n_1^2 g_{o1} & C_{o1}' &= n_1^2 C_{o1} \\ g_{i2}' &= n_2^2 g_{i2} & C_{i2}' &= n_2^2 C_{i2} \end{aligned} \quad (1-36)$$

$g_0 = \frac{1}{R_0} = \frac{1}{\rho Q_0}$ 是谐振回路的空载电导; $\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$ 是谐振回路的特性阻抗; Q_0 是回路的空载