

绪 论

1.1 无线电信号的传输原理

无线电技术的出现和发展是建立在电磁场与电磁波的理论、实践的坚实基础之上的。在当今的信息社会里,无线电技术仍然是人类改造自然和征服自然的有力工具,与人们的工作和生活分不开,比如数字移动通信、高速无线电通信等。英国物理学家 J. C. 麦克斯韦(J. Clerk Maxwell)于 1864 年发表了著名论文“电磁场的动力理论”,在总结了前人工作的基础上,得出了电磁场方程,并从理论上证明了电磁波的存在。他认为,电磁波在自由空间的传播速度、折射和反射等特性与光波相同。麦克斯韦的这一发现,为人们证实电磁波的存在实践活动提供了理论依据,也为后来无线电的发明和发展奠定了坚实的基础。

1887 年,德国物理学家 H. 赫兹(H. Hertz)在实验中证实了电磁波的客观存在。他在实验中还证明电磁波在自由空间的传播速度与光速相同,并能产生反射、折射、驻波等与光波性质相同的特性。这个著名的赫兹实验证明了麦克斯韦理论的正确性。从此以后,许多国家的科学家都努力研究如何利用电磁波来传输信息,即无线电通信,有著名的英国科学家 O. J. 罗吉(O. J. Lodge)、法国的勃兰利(Branly)、俄国的 A. C. 波波夫(A. C. Попов)和意大利的 G. 马可尼(Guglielmo Marconi)等。其中,马可尼的贡献最大。他在 1895 年首次在几百米的距离,用电磁波进行通信获得成功,1901 年又首次完成了横渡大西洋的无线电通信。马可尼首次无线电通信的成功让无线电通信进入实用阶段,无线电技术也就蓬勃发展起来了。

从无线电发明开始,直到今天的信息社会,传输信号成了无线电技术的首要任务,而且在有些场合,无线电通信比有线通信更适合或者是惟一的选择。通信电子线路所涉及的功能电路都将从传输与处理信号这一基本点出发。因此,有必要先从无线电信号的传输原理开始阐述。

1.1.1 传输信号的基本方法

信息社会中,信息无处不在,信息的传输已经成为人类生活的重要组成部分。最基本的传输手段当然是语言与文字。随着人类社会生产力的发展,迫切要求远距离迅速而且准确地传输信息。我国古代利用烽火传送边疆警报,可以说是最古老的光通信。在肉

眼可见的范围内,利用“旗语”来传输信息也是一个从古代流传至今的方法。信鸽、驿马接力、信件等都是人们采用过的方法,有些直到今天仍然不过时。19 世纪,人们发现电可以以光速沿导线传播。这为远距离快速、大容量通信提供了物质条件,因此,电报和电话被发明。1837 年,F. B. 莫尔斯(F. B. Morse)发明了电报,并创造了莫尔斯电码。在莫尔斯电码中,用点、划、空的适当组合来表示字母和数字,这可以说是数字通信的雏形。1876 年,A. G. 贝尔(Alexander G. Bell)发明了电话,直接将语音信号转换为电信号,电信号沿导线传输到远方的目的地,然后电信号又转换成语音信号,从而实现了语音的直接实时传输。电报和电话的发明,为迅速而准确地传递信息提供了新的方法,是通信技术发展的里程碑。下面简要介绍有线电报和电话的基本工作原理。

有线电报的基本原理如图 1-1 所示。当发报方没有按下电键时,通过收报方电磁铁的电流 i 为零,水平杆在弹簧的拉力作用下靠在上方;当发报方按下电键时,通过收报方电磁铁的电流 i 不为零,水平杆在电磁铁的磁场力作用下靠在下方(磁场力大于弹簧的拉力)。所以,发报方间断地按下电键时,通过收报方电磁铁的电流 i 的波形图为如图 1-1(b)所示的脉冲状。电流不为零的时间由电键按下的时间来决定。收报方因水平杆下击时间的长短,听到“滴”(点)“答”(划)的声音。由事先约定的长短组合和次序,就能明白传输信号所代表的信息。如果用一支笔来代替水平杆,则笔在一张匀速移动的白纸上就会写下如图 1-1(c)所示的长短线条,长划是“答”,短划是“滴”。

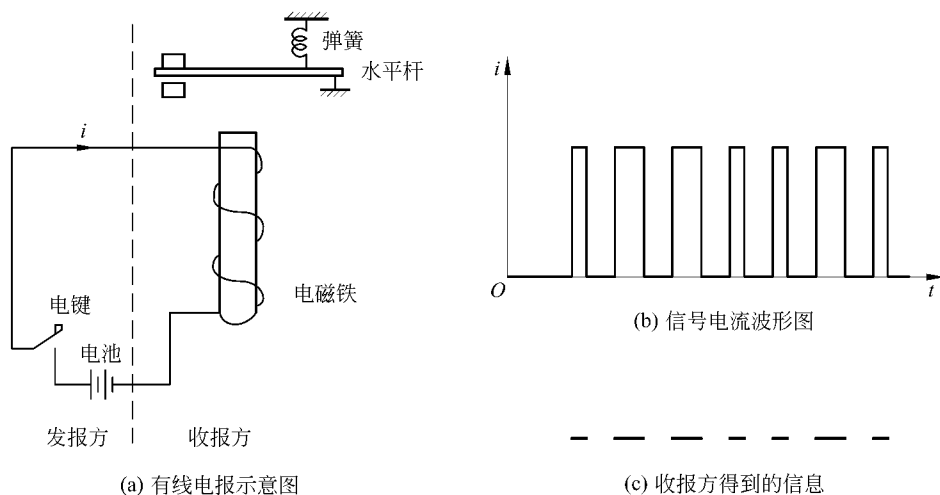


图 1-1 有线电报的基本原理图

人们至今仍然把有线电报作为一种重要的通信方法,并且在很多方面进行了改进。

有线电报不能实时地传输语音信号,而人们强烈需要远距离、实时、准确地传输语音信号,这促进了电话的发明。语音信号的传输首先需要把声音信号转换为电信号,然后通过导线传到目的地,再把电信号恢复成声音信号。将声能转换成电能的换能器叫做“传声器”或“话筒”或“麦克风”。把电能转换成声能的换能器叫做“喇叭”。有线电话的基本工作原理如图 1-2 所示。

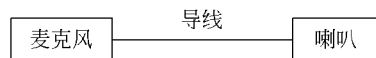


图 1-2 有线电话的基本工作原理图

在赫兹实验之前,人们认为电信号只能够沿着导线传输。赫兹实验证实了电磁波的客观存在,这自然让人们联想到用电磁波在空间传输信息,于是导致了无线电通信的发明。

无线电通信系统包括发送设备、接收设备和它们之间的无线信道。下面简要介绍无线电发送设备和接收设备。电磁波在无线信道中的传输理论在“电磁场与电磁波”这类课程中介绍。

1.1.2 无线电发送设备的基本组成及其工作原理

调幅无线电广播是无线电技术的典型应用之一,是远距离传递信息的有效而快速的手段,是人们获取信息以及欣赏音乐、电影等文艺节目的重要渠道。根据天线理论,只有当天线的尺寸可以与信号的波长相比拟的时候,信号才可能被有效地发射和接收。由于语音信号的频谱处于低频段(波长很长),如果直接通过无线电信号传输,需要很大的发射天线和接收天线。因此它是不便于直接远距离传输的,必须采用一种名叫“调制”的技术进行处理。一般的处理方法就是用语音信号(已经被转换为电信号)去控制一个频率相对较高的正弦波信号——载波信号的振幅或频率或相位,这个过程就叫调制。调制以后的已调波信号分别叫做调幅信号、调频信号和调相信号。调幅无线电广播发射机是一个具有多种功能模块的系统,如图 1-3 所示。由图可见,无线电调幅广播发射机主要由正弦波振荡器、缓冲器、高频电压放大器、振幅调制器、高频功率放大器、声/电变换器、低频电压放大器及发射天线等组成。正弦波振荡器产生高频载波信号;缓冲器能隔离正弦波振荡器与高频电压放大器,提高正弦波振荡器带负载的能力和频率稳定性;高频电压放大器把载波信号的振幅放大到振幅调制器需要的程度;振幅调制器完成调制,得到调幅波;高频功率放大器实现调幅信号的功率放大,以便于调幅信号远距离辐射出去;天线把调幅信号有效地辐射到空间;声/电变换器把语音信号转换为电信号;低频电压放大器把微弱音频信号的幅度进行放大。我国的调幅广播的载波频率为 535~1605kHz。

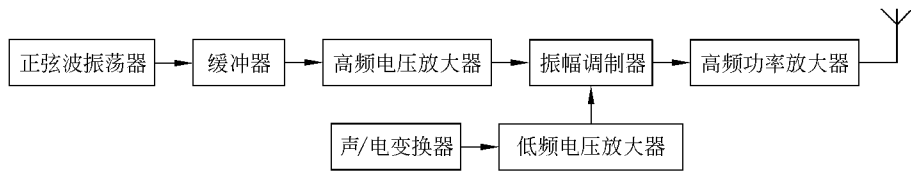


图 1-3 调幅无线电广播发射机的基本组成方框图

1.1.3 无线电接收设备的基本组成及其工作原理

无线电信号的接收过程与其发射过程正好相反。在接收设备中,先用接收天线将接收到的电磁波转变为已调波电流,然后从这个已调波电流中恢复出原始信号。这个过程正好与调制过程相反,被称为解调(接收调幅信号叫检波,接收调频信号叫鉴频,接收调

相信号叫鉴相)。最后,再用耳机或喇叭(扬声器)将检波出的信号转换为声波,人们就可以听到远处的发射机传送过来的语音、音乐等信号了。无线电接收设备的基本任务是从天线感应的调幅波中恢复出语音信号。相对于发射设备,接收设备的结构要复杂些。

随着通信技术的发展,现代通信系统的无线电接收设备常见的有3种:直接放大式接收机、超外差式接收机和超再生接收机。下面逐一介绍它们的基本组成、工作原理及优缺点。

1. 直接放大式接收机

直接放大式接收机出现较早,原理简单,比较容易理解。以调幅广播接收机,即调幅收音机为例,直接放大式接收机的基本组成方框图如图1-4所示,主要包括选频电路、高频小信号放大器、检波器、低频电压放大器、低频功率放大器和喇叭。天线感应的信号通过选频电路后,提取有用信号的同时也抑制了无用噪声和干扰;选频电路输出的有用信号的幅度非常微小,一般的调频信号的幅度为 μV 量级,调幅信号的幅度为 mV 量级,不能直接检波,所以必须由高频小信号放大器把微弱的调幅信号进行电压放大,以有利于检波器有效地工作;检波器实现调制信号的恢复,不同的调制方式,对调制器的要求有所区别;低频放大器把解调出来的音频信号的幅度放大到低频功率放大器需要的程度;低频功率放大器把音频信号的功率放大,以推动喇叭发出声音。由此可见,选频电路和高频小信号放大器的传输函数的中心频率等于某发射台的载波频率时,就是选中了该发射台的节目。

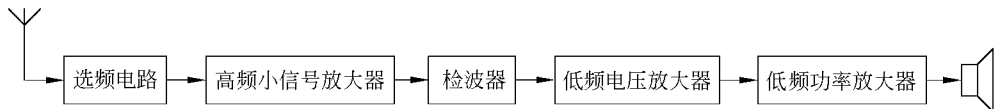


图 1-4 直接放大式接收机的基本组成方框图

直接放大式接收机是将接收到的高频信号直接放大后就检波。直接放大式接收机的优点是结构比较简单,成本较低,特别适合于作固定工作频率的接收机,比如对讲机等。其缺点主要是,由于工作频率一般是固定的或者只能微调,所以不能选择别的电台节目;对于不同的载波频率,接收机的灵敏度(接收微弱信号的能力)和选择性(区分不同电台的能力)变化比较剧烈,而且由于高频小信号放大器不稳定性的影响,灵敏度不可能太高。

2. 超外差式接收机

超外差式接收机的出现相对较晚,原理比较复杂。以调幅广播接收机为例,超外差式接收机基本组成方框图如图1-5所示,主要包括选频电路、混频器、本机振荡器、中频信号放大器、检波器、低频电压放大器、低频功率放大器和喇叭。需要注意的是,有一些超外差式接收机的选频电路与混频器之间还有一级高频小信号放大器。

在图1-5中,本机振荡器产生正弦波信号,输入混频器后,与输入的调幅信号互相作用,产生一个固定频率的信号——中频信号,这是超外差式接收机的关键技术所在。其他部分的功能与直接放大式接收机的一样,这里不再重复了。虽然天线感应的不同已调

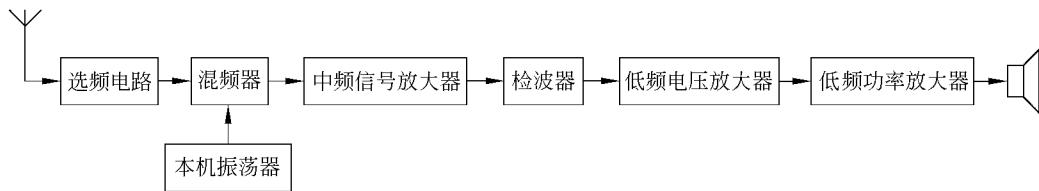


图 1-5 超外差式接收机的基本组成方框图

波信号有不同的载波频率,但是在超外差式接收机中,从中频信号放大器以后的电路的工作频率都是不变的。对于超外差收音机,选择不同的节目,本质上就是选择不同载波频率的已调波信号,这个操作常被称为选台。在超外差收音机中,选台是靠选频电路和本机振荡器共同调整参数完成的。

超外差接收机的应用非常广泛,比如收音机、电视机、卫星差转机。

超外差接收机的主要特点是把接收到的已调波信号的载波角频率或中心角频率 ω_c 先变成频率较高或较低的、固定不变的中间频率 ω_i (常被称为中频),而其振幅的变化规律保持不变。超外差接收机的核心模块是混频器。混频器的功能就是把接收到的载波频率不同的信号变换为载波频率固定不变的中频信号。这种功能就是所谓的外差功能,这也是超外差式接收机名称的由来。由于中频是固定的,接收机的中频放大器及其后面的电路的性能都与接收到信号的载波频率没有关系,这就克服了直接放大式接收机的缺点。在无线电技术里,混频器与本地振荡器往往被合并为一个电路,叫做变频器。

由于从中频信号放大器以后的电路的工作频率都是不变的,作为超外差收音机核心电路的检波器就能非常稳定地保持比较好的工作效能,有利于提高整个接收机的性能。

超外差收音机的优点是灵敏度比较高,既适合于作固定工作频率的接收机,也适合于作工作频率变化范围较大的接收机,而且调谐方便,工作性能比较稳定;其缺点主要是结构比较复杂。

3. 超再生接收机

超再生接收机又称为直接转换型接收机,或零差接收机,或零中频接收机,可以认为是一种特殊的超外差式接收机,以调幅广播接收机为例,其基本组成方框图如图 1-6 所示。目前,许多监控系统常常使用超再生接收机。

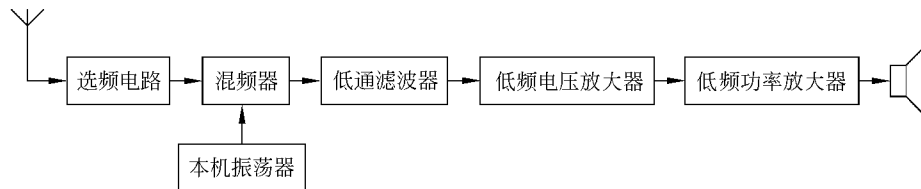


图 1-6 超再生接收机的基本组成方框图

在这种接收机中,本机振荡器输出信号的频率与选频电路输出信号的载波频率或中心频率相同,也就是说,该接收机的中频频率为零,这样放大和滤波就能在低频处实现,在低频段只需较低的功耗就可以获得与在较高中频处相同的增益,同时还可以用表面贴

封装的电阻和电容实现滤波,而无须外加一个既昂贵又庞大的类似 SAW(声表面波滤波器)的滤波器。对于超再生接收机,本质上就是把已调波的频谱线性搬移到调制信号(基带信号)的频带内,而无须检波器。超再生接收机只适用于模拟调制中的标准调幅、双边带调幅、单边带调幅、残留边带调幅和数字调制中的 OOK(On-Off Keying,通断键控)调制。标准调幅信号的超再生接收机的工作原理示意图如图 1-7 所示。标准调幅的频谱中包括载波频率分量和上、下边带信号(相当于调制信号在频率轴上向左和向右分别平移 f_c 得到的信号),如图 1-7(a)所示。超再生接收机把标准调幅信号的频谱向左平移 f_c 得到的信号就是原来的调制信号,从而实现了解调,如图 1-7(b)所示。

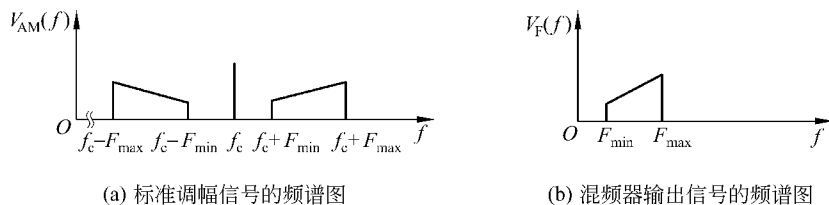


图 1-7 标准调幅信号的超再生接收机的工作原理图

一般超再生接收机在中波段和短波段工作时,灵敏度很高。超再生接收机的优点是灵敏度比较高,既适合于作固定工作频率的接收机,也适合于作工作频率变化范围较大的接收机,而且调谐方便;其缺点主要是选择性、稳定性和信噪比稍差,当本机振荡器输出信号的频率发生漂移时,接收机的非线性失真比较严重。

1.2 通信电子线路的研究对象

信息的传输是人类每时每刻都在进行的活动。信号是信息的载体,人类利用电信号来传输信息已有一百多年的历史,信息正日益成为人们工作和生活的重要组成部分。通信的基本功能就是把信号从一个地方传输到另一个地方。图 1-8 所示是通信系统的基本组成方框图,主要包括输入变换器、发送设备、传输信道、接收设备和输出变换器。输入变换器把非电物理量转换为电信号;发送设备把电信号处理成适合于信道传输、满足人们特别要求(比如加密、频谱搬移等)的信号;传输信道是信号接收点与发送点之间的通道;接收设备是完成与发送设备对等、相反的处理的设备;输出变换器把电信号转换为需要的物理信号,比如声音、图像、文字和符号等。从传输信道来分,通信系统分为有线通信系统和无线通信系统两类。无论是有线通信系统还是无线通信系统,高频电子线路是必不可少的电路,也是生产、设计通信系统的难点之一。

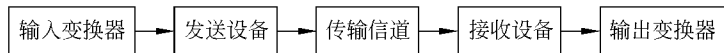


图 1-8 通信系统基本组成方框图

“通信电子线路”是通信类、电子类以及信息类专业的一门重要的专业基础课,是理



论性和实践性很强的课程,也是所有课程中的难点之一。这门课程通常由以下内容组成:高频小信号谐振放大器、高频谐振功率放大器、正弦波振荡器、调制器(包括调幅电路、调频电路或调相电路)、混频器、解调器(检波器、鉴频器和鉴相器)及反馈控制电路(包括自动增益控制电路、自动频率控制电路和自动相位控制电路)。

“通信电子线路”课程的研究对象是通信系统发送设备和接收设备中的各种完成高频信号处理的电路的功能、原理和组成。该课程所研究电路的工作频率从几百千赫到几百兆赫。不同频段有不同的特点,适合完成不同的功能。不同频段的典型用途如表 1-1 所示。

表 1-1 不同频段的典型用途

频率范围/Hz	波长/m	名 称	典 型 用 途
30~300	10000~1000k	特低频	水下通信、电报
0.3k~3k	1000~100k	音频	数据终端设备、固定电话
3k~30k	100k~10k	甚低频	导航、声呐、电报、电话、频率标准
30k~300k	10~1k	低频(长波)	导航、航标信号、电报
0.3M~3M	1k~100	中频(中波)	商用调幅广播、业余通信、海军无线电通信、测向、遇险与呼救
3M~30M	100~10	高频(短波)	国际定点通信、军用通信、商用调幅广播、飞机与船通信、岸与船通信
30M~300M	10~1	甚高频(超短波)	电视广播、调频广播、车辆通信、航空通信、导航设备
0.3G~3G	1~0.1	超高频(分米波)	电视广播、雷达、遥控遥测、导航、卫星通信、无线电测量、移动通信
3G~30G	0.1~0.01	极高频(厘米波)	卫星通信、空间通信、微波接力、机载雷达、气象雷达、陆地机动车通信
30G~300G	0.01~0.001	特高频(毫米波)	雷达着陆系统、射电天文、铁路设施、科学研究

注:频率 30kHz 以下的也称为超长波,30~1000MHz 的也称为超短波,1000MHz 以上的也称为微波。

本课程研究的大部分电路都是非线性电路。非线性电路的分析方法与线性电路的分析方法是不同的,所以,非线性电路的分析方法也是本课程的重要内容之一。

另外,本课程是理论性和实践性很强的课程,同学们可以一边学习,一边动手做一些紧密结合本课程内容的小电路,或者做一些电子设备的维修,比如收音机、电视机等。需要特别注意的是,一定要注意人身安全,尤其是在维修彩色电视机等有高电压、大电流的设备的时候。

本章小结

本章介绍了无线电通信的发展历史、无线电信号的传输特点和传输方法,概述了无线电发射设备和接收设备的基本组成和工作原理,提出了“通信电子线路”课程的主要研究内容和学习方法,为后续章节的展开建立了一个整体的概念。

通过本章的学习,读者可以了解无线电通信的发展历史、无线电发射设备和接收设备的基本组成和工作原理,掌握直接放大式接收机、超外差式接收机和超再生接收机的基本组成、工作原理和它们的优缺点。

思考题与习题

- 1.1 电磁波具有哪些特点?
- 1.2 试画出无线电发射设备的一般组成方框图,并简要说明各部分的功能。
- 1.3 现代通信系统有哪几种接收机?各有什么优缺点?

高频小信号放大器

2.1 概述

所谓高频信号,是指频率在数百千赫至数百兆赫的信号。小信号放大器是指放大器输入信号小,可以认为放大器的有源器件工作在线性区,并把它看成线性元件,分析电路时将其等效为二端口网络。高频小信号放大器的功能就是对微弱的高频信号进行不失真放大。

高频小信号放大器是通信设备中常用的功能电路,广泛应用于广播、电视、通信和测量仪器仪表等设备中。按照所使用的器件不同,高频小信号放大器可以分为晶体管高频小信号放大器、场效应管高频小信号放大器和集成电路高频小信号放大器;按照所放大信号的频带宽度不同,可以将其分为窄带高频小信号放大器和宽带高频小信号放大器;按照所使用负载的性质不同,可将其分为谐振高频小信号放大器和非谐振高频小信号放大器。

本章主要讨论晶体管单级窄带谐振高频小信号放大器,对其他器件的单级谐振放大器、多级级联放大器、集成宽带放大器也略加讨论。

所谓谐振放大器,是指采用谐振回路(可以是串联回路、并联回路及耦合回路)作为放大器的负载。由于谐振回路具有选频特性,因此,谐振放大器对于靠近谐振回路的谐振频率的信号,有比较大的电压增益;而对于越远离谐振频率的信号,电压增益越小。因此,谐振放大器不仅具有电压放大的作用,还具有滤波或选频的作用。

由各种滤波器(如 LC 集中选频滤波器、石英晶体滤波器、声表面波滤波器、陶瓷滤波器等)和阻容级间耦合多级放大器组成的非调谐窄带及宽带放大器,其结构简单,调试方便,性能良好,又易于集成化,所以目前被广泛应用。

高频小信号放大器的主要性能指标有电压增益、功率增益、通频带、选择性、矩形系数、工作稳定性和噪声系数,下面将逐一介绍。

1. 电压增益和功率增益

电压增益或电压放大倍数 $\dot{A}_u$ 等于放大器输出电压 $\dot{U}_o$ 与输入电压 $\dot{U}_i$ 之比,功率增益或功率放大倍数 $\dot{A}_p$ 等于放大器输出功率 $\dot{P}_o$ 与输入功率 $\dot{P}_i$ 之比,即

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \quad (2-1)$$

$$\dot{A}_p = \frac{\dot{P}_o}{\dot{P}_i} \quad (2-2)$$

电压增益和功率增益常常用分贝数(dB)来表示。我们希望放大器的增益尽量大些,在满足总增益的要求时,放大器的级数就会少些。但是,放大器的增益过大也是引起放大器不稳定的一个因素。因此在设法提高放大器增益的同时,也要考虑其稳定性。放大器的增益大小,取决于所选用的有源器件性能、要求的通频带宽度、阻抗是否匹配和稳定性等因素。

2. 通频带

放大器的输入信号一般都是已调波信号,它有一定的频谱宽度。如果放大器要实现不失真放大,则必须让输入信号的频谱分量都等增益地通过放大器。因此,放大器必须要有适当的通频带。

对于谐振放大器,放大器的选频特性和谐振回路的选频特性是一致的。与谐振回路的通频带定义相同,放大器的通频带是指放大器的电压增益从最大值下降到其 0.7 (即 $\sqrt{2}/2$) 倍处所对应的频率范围,常用 $2\Delta f_{0.7}$ 表示。

放大器的通频带取决于谐振回路的形式和谐振回路的有载品质因数 Q_L 。此外,放大器的总通频带随着放大器级数的增加而变窄,而且,通频带愈宽,放大器的增益愈小。

通频带 $2\Delta f_{0.7}$ 也被称为 3dB 带宽,因为电压增益下降至 3dB 处就是下降至 $\sqrt{2}/2$ 倍处。为了测量的方便,还将通频带定义为放大器的电压增益从最大值下降到其最大值的 0.5 倍处所对应的频率范围,用 $2\Delta f_{0.5}$ 表示,也称之为 6dB 带宽。

不同用途的放大器,其通频带差异比较大。比如,收音机的中频放大器的通频带约为 6~8kHz,而电视机的中频放大器的通频带约为 6MHz。

3. 选择性、矩形系数和抑制比

放大器从含有各种不同频率分量的信号(包括有用信号和干扰信号)中选出有用信号,排除或抑制干扰信号的能力,称为放大器的选择性。一方面,由于无线电电台的数量日益增多,汽车、摩托车、机床的电动机以及供配电设备的合闸与分闸等电脉冲干扰越来越严重,必然对放大器的选择性要求越来越高。另一方面,干扰的情况也很复杂,有中心频率位于有用信号中心频率附近的临近电台或频道的干扰,称为临台干扰或临频道干扰;有特定频率的组合干扰;有电子元器件的非线性产生的交调干扰和互调干扰等。

对于放大器的选择性的定量分析,常用矩形系数和抑制比来说明。

放大器的选择性是指放大器对有用信号的放大和对无用信号的抑制的能力。理想的频带放大器应该对通频带内的频谱分量有同样的放大能力,而把通频带以外的频谱分量衰减为零,此时放大器的频谱特性曲线是矩形。但是,实际上的频谱特性曲线与矩形有比较大的差异。为了评定实际频谱特性曲线的形状接近矩形的程度,引入矩形系数这个参数,用 K_r 表示。如果用 $2\Delta f_{0.1}$ 或 $2\Delta f_{0.01}$ 表示放大器的电压增益从最大值下降到其 0.1 或 0.01 倍处所对应的频率范围,矩形系数 $K_{r0.1}$ 就是 $2\Delta f_{0.1}$ 与 $2\Delta f_{0.7}$ 之比, $K_{r0.01}$ 就是 $2\Delta f_{0.01}$ 与 $2\Delta f_{0.7}$ 之比,即

$$K_{r0.1} = \frac{2\Delta f_{0.1}}{2\Delta f_{0.7}}, \quad K_{r0.01} = \frac{2\Delta f_{0.01}}{2\Delta f_{0.7}} \quad (2-3)$$

矩形系数是表征放大器选择性好坏的一个参数,其值越接近于1,放大器的实际频谱特性曲线越接近矩形,放大器对临近频道的选择性越好。通常,频带放大器的矩形系数 $K_{r0.1}$ 在2~5范围内。

为了测量的方便,有时不用 $2\Delta f_{0.1}$ 或 $2\Delta f_{0.01}$ 与 $2\Delta f_{0.7}$ 之比定义矩形系数,而采用 $2\Delta f_{0.01}$ 与 $2\Delta f_{0.5}$ 之比定义矩形系数。

抑制比,也称为抗拒比,是用来表征放大器对某些特定频率,如中频、相频等分量的选择性的参数,即对干扰信号的抑制能力。对于谐振放大器来说,设谐振频率 f_0 点的放大倍数为 A_{u0} ,若有一个频率为 f_n 的干扰信号,放大器对这个干扰信号的放大倍数为 A_{un} ,我们就用 A_{u0} 与 A_{un} 的比值定义抑制比,用 d 来表示,即

$$d = \frac{A_{u0}}{A_{un}} \quad (2-4)$$

抑制比 d 也可以用分贝表示为

$$d(\text{dB}) = 20\lg \left(\frac{A_{u0}}{A_{un}} \right) \quad (2-5)$$

4. 工作稳定性

工作稳定性是指放大器的直流偏置、有源器件参数和其他电路元件参数等发生变化时,放大器主要性能的稳定程度。一般的不稳定现象是增益变化、中心频率偏移、通频带变化和谐振曲线变形等。不稳定状态的极端情况是放大器自激,致使放大器完全不能正常工作。为了维持放大器的稳定,必须采取稳定措施,比如限制放大器的增益、选择反向传输导纳小的有源器件、使用中和法或失配法、合理安排必要的工艺措施(如元器件的布局与排列、接地和屏蔽等),让放大器保持稳定或远离自激。

5. 噪声系数

对于放大器来说,输入端的一部分噪声(外部噪声)会通过放大器在负载两端产生噪声电压。同时,放大器内部也有噪声(内部噪声),在负载两端产生噪声电压。不同的放大器,抑制外部噪声的能力是不一样的,内部噪声的大小也会不一样。噪声系数是指放大器输出信噪比与输入信噪比之比,是表征放大器的噪声性能恶化程度的一个参量,用 N_F 表示。

在放大器中,内部噪声与外部噪声愈小愈好。如果没有内部噪声,则噪声系数 $N_F=1$ 。在多级放大器中,总的噪声系数主要取决于最前面的一、二级,因此,最前面的两级电路的噪声系数至关重要,要尽量小些。减小内部噪声的方法主要有:选用低噪声的电子元器件,尤其是晶体管、场效应管等有源器件;合理选择工作点电流;采用降温措施等。

放大器的技术指标之间既有一致联系,又有矛盾。比如增益与稳定性之间,通频带与选择性之间,增益与通频带之间等。在设计一个放大器时,需要通盘考虑技术指标,有时需要折中处理。

2.2 分析高频小信号放大器的预备知识

2.2.1 串、并联谐振回路的特性

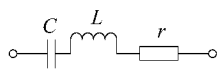
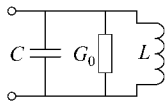
由电感线圈和电容器(包括它们的损耗电阻在内)组成的单个谐振电路,称为单振荡回路。当信号源与电感、电容串联连接时,就构成了串联谐振回路;当信号源与电感、电容并联连接时,就构成了并联谐振回路。

电感的感抗值(ωL)随工作频率的升高而增大,而电容的容抗值($1/(\omega C)$)随工作频率的增大而减小。与单个电感和电容的情况不一样,串联谐振回路的阻抗的幅值在某个特殊频率点上有最小值,并联谐振回路阻抗的幅值在某个特殊频率点上有最大值。单谐振回路的这种特性就叫做谐振特性,那些特殊的频率被称为谐振频率。当正弦波信号源的频率等于谐振频率时,串联谐振回路和并联谐振回路的阻抗等于一个纯电阻(通常被称为谐振电阻)。此时,回路阻抗的虚部为零。

对于串联谐振回路,当外加正弦波信号源的频率等于谐振频率时,通过回路的电流的幅值最大;正弦波信号源的频率偏离谐振频率越多,通过回路的电流的幅值就越小。对于并联谐振回路,当外加正弦波信号源的频率等于谐振频率时,回路两端的电压的幅值最大;正弦波信号源的频率偏离谐振频率越多,回路两端的电压的幅值就越小。因此,无论是串联谐振回路还是并联谐振回路,都具有选频和滤波的作用。这种选频和滤波的作用让串联谐振回路和并联谐振回路在高频电子线路中得到广泛应用。

表 2-1 罗列和对比了串、并联谐振回路的电路图、阻抗或导纳、品质因数、谐振电阻和阻抗性质与工作频率的关系。

表 2-1 串、并联谐振回路特性

特 性		串联谐振回路	并联谐振回路
电路形式			
阻抗 Z 或导纳 Y		$Z=r+j\left(\omega L-\frac{1}{\omega C}\right)$	$Y=G_0+j\left(\omega C-\frac{1}{\omega L}\right)$
谐振频率 f_0		$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$	$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$
品质因数 Q_L		$Q_L=\frac{2\pi f_0 L}{r}=\frac{1}{2\pi f_0 r C}=\frac{1}{r}\sqrt{\frac{L}{C}}$	$Q_L=\frac{1}{2\pi f_0 G_0 L}=\frac{2\pi f_0 C}{G_0}=\frac{1}{G_0}\sqrt{\frac{C}{L}}$
谐振电阻 R_p		r	$\frac{1}{G_0}$
阻抗特性	$f<f_0$	容抗	感抗
	$f>f_0$	感抗	容抗

在高频电子线路中,电路的连接形式往往很复杂,不是简单的单串联谐振回路或并联谐振回路。一般来说,直接分析高频电子线路,特别是定量分析,非常困难。因此,把一个复杂的高频电子线路等效为一个简单的单串联谐振回路或并联谐振回路,是一个有效的办法,这种等效的方法有时候不能一步到位,往往需要几步等效才行。下面介绍几个基本的等效方法,包括串、并联的等效互换,变压器耦合连接的等效,自耦变压器的等效和双电容分压耦合连接的等效。

2.2.2 串、并联阻抗的等效互换

图 2-1 所示是串、并联阻抗的等效互换电路图,其中图 2-1(a)是串联形式,图 2-1(b)是并联形式。所谓的等效,是指外特性等效。对于无源网络来说,等效前、后的阻抗相等,其中, X_1 和 X_2 表示电抗(容抗或感抗)。利用电路分析的知识,不难得到

$$r_1 + jX_1 = \frac{R_2 \times jX_2}{R_2 + jX_2} = \frac{R_2 X_2^2}{R_2^2 + X_2^2} + j \frac{R_2^2 X_2}{R_2^2 + X_2^2}$$

根据等效的概念,可得并联转换为串联的计算式为

$$r_1 = \frac{R_2 X_2^2}{R_2^2 + X_2^2}, \quad X_1 = \frac{R_2^2 X_2}{R_2^2 + X_2^2} \quad (2-6)$$

由于等效前、后的品质因数 Q 不变(在信号源参数不变的情况下,品质因数表征了电路的损耗大小),也就是说,等效前、后,电路的损耗是不变的,所以 $Q = X_1/r_1 = R_2/X_2$ 。由式(2-6)可得

$$r_1 = \frac{R_2}{\frac{R_2^2}{X_2^2} + 1} = \frac{R_2}{1 + Q^2}, \quad X_1 = \frac{X_2}{1 + \frac{X_2^2}{R_2^2}} = \frac{X_2}{1 + \frac{1}{Q^2}}$$

则串联转换为并联的计算式为

$$R_2 = (1 + Q^2)r_1, \quad X_2 = \left(1 + \frac{1}{Q^2}\right)X_1 \quad (2-7)$$

如果 $Q \gg 1$, 则式(2-7)可近似为

$$R_2 \approx Q^2 r_1, \quad X_2 \approx X_1 \quad (2-8)$$

由式(2-6)和式(2-8)可知,在 $Q \gg 1$ 的情况下,等效前、后,电抗性质不变,电阻可变大(串联转换为并联)或变小(并联转换为串联),而且等效前、后,电抗大小几乎不变。

串联形式电路中的电阻越大,表示损耗越大;并联电路的电阻越小,表示损耗越大。因此,由式(2-6)和式(2-7)实现的串、并联阻抗的互换是完全等效的。

2.2.3 并联谐振回路的耦合连接与接入系数

当并联谐振回路作为放大器的负载时,输入端与信号源之间、负载与放大器之间的耦合连接方式将直接影响放大器的性能。放大器输入端与信号源之间、放大器与负载之

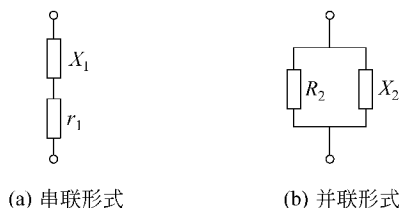


图 2-1 串、并联阻抗的等效互换电路图

间的阻抗匹配往往也借助合适的耦合连接形式来实现。因此,在高频电子线路中,输入端与信号源之间、负载与放大器之间的耦合连接方式是一个非常重要的问题。常用的耦合连接方式有变压器耦合连接、自耦变压器耦合连接和双电容分压耦合连接 3 种。

1. 变压器耦合连接

变压器耦合连接的原理电路图如图 2-2 所示,其中 N_1 、 N_2 分别表示变压器初级线圈和次级线圈的匝数, L_1 、 L_2 分别表示变压器初级线圈和次级线圈的电感值, $\dot{U}_1$ 是电压信号源,负载电阻 R_L 并联在变压器的副边,电阻 R'_L 是负载电阻 R_L 等效后的电阻。图 2-2(a)所示是等效前的电路图,图 2-2(b)所示是等效后的电路图,显然,它是一个单并联谐振回路。对于图 2-2(b)所示的电路的分析非常简单,所以,这种等效是很有价值的。下面,我们来推导 R'_L 与 R_L 之间的关系。

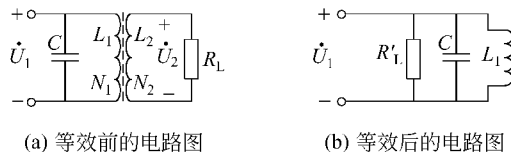


图 2-2 变压器耦合连接原理电路图

由于电感 L_1 、 L_2 绕在同一磁心上,是紧耦合,可以认为是理想变压器。设次级负载电阻 R_L 得到的功率为 P_2 ,等效后的负载电阻 R'_L 得到的功率为 P_1 。由于

$$P_2 = \frac{U_2^2}{R_L}, \quad P_1 = \frac{U_1^2}{R'_L}$$

并且,等效前、后,电路(实际上是电阻 R'_L 与 R_L)消耗的功率是相等的,即 $P_2 = P_1$ 。所以, R'_L 与 R_L 之间的关系为

$$R'_L = \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 R_L \quad (2-9)$$

理想变压器的初级与次级电压之比与其匝数成正比,即 $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$ 。因此,根据式(2-9)可得等效后的电阻 R'_L 为

$$R'_L = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_L \quad (2-10)$$

变压器耦合连接是一种使用比较普遍的形式,它具有以下特点:

(1) 负载电阻 R_L 与放大器之间实现了电隔离。当负载电阻 R_L 发生故障(如开路、短路)时,减小了引起放大器损坏的可能。

(2) 等效后的电阻 R'_L 可能增大,也有可能减小,只要改变变压器初级和次级线圈的匝数 N_1 和 N_2 ,就能方便地实现阻抗匹配。当 $N_1 > N_2$ 时, $R'_L > R_L$; 当 $N_1 < N_2$ 时, $R'_L < R_L$ 。

(3) 等效后的电路中的电感值只与变压器原边的电感有关,而与副边的电感值无关。

2. 自耦变压器耦合连接

自耦变压器耦合连接的原理电路图如图 2-3 所示。其中 N_1 、 N_2 分别表示自耦变压

器上、下两部分对应的线圈匝数,总匝数为 $N_1 + N_2$, L 表示自耦变压器上、下两部分的总电感值, $\dot{U}_1$ 是电压信号源,负载电阻 R_L 并联在自耦变压器的下边,电阻 R'_L 是负载电阻 R_L 等效后的电阻。图 2-3(a)所示是等效前的电路图,图 2-3(b)所示是等效后的电路图,显然,它是一个单并联谐振回路。下面,我们来推导 R'_L 与 R_L 之间的关系。

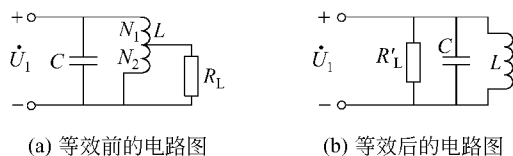


图 2-3 自耦变压器耦合连接原理电路图

采用与上面相似的方法,不难得到等效后的电阻 R'_L 为

$$R'_L = \left(\frac{N_1 + N_2}{N_2} \right)^2 R_L \quad (2-11)$$

自耦变压器耦合连接也是一种使用比较普遍的形式,它具有以下特点:

(1) 与变压器耦合连接形式相比,自耦变压器耦合连接有一个优点,即无论是用手工制作还是机器制作,都更快捷,因为上、下两部分线圈绕向相同,中间的抽头能顺势拉出,铜芯线都不用剪断。

(2) 等效后的电阻 R'_L 只可能增大,不可能减小。增大的倍数与 $\left(\frac{N_1 + N_2}{N_2} \right)^2$ 成正比。

(3) 等效后的电路中的电感值就是自耦变压器上、下两部分的总电感。

3. 双电容分压耦合连接

双电容分压耦合连接的原理电路图如图 2-4 所示,负载电阻 R_L 并联在电容 C_2 的两端。等效分两步完成。第一步,把负载电阻 R_L 与电容 C_2 的并联形式等效为串联形式,如图 2-4(b)所示。由前面的分析可知,第一步等效后的电抗仍然是容抗,而且电容值几乎不变,即电容仍为 C_2 ,而负载电阻

$$R_{LS} \approx \frac{R_L}{Q_{C_2}^2} = \frac{R_L}{(\omega_0 C_2 R_L)^2} = \frac{1}{(\omega_0 C_2)^2 R_L}$$

第二步,先将 C_1 和 C_2 的串联等效为一个电容 C ,即

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

然后把电容 C 与电阻 R_{LS} 的串联形式转换为并联形式,如图 2-4(c)所示。在第二步中,等效后的电容值几乎不变,电容仍然是 C ;等效后的负载电阻 R'_L 就是

$$R'_L \approx Q_C^2 R_{LS} = \frac{R_{LS}}{(\omega_0 C R_{LS})^2} = \frac{1}{(\omega_0 C)^2 R_{LS}} = \left(\frac{C_2}{C} \right)^2 R_L$$

最后得到等效前、后的负载电阻 R'_L 与 R_L 之间的计算式为

$$R'_L = \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1} \right)^2 R_L \quad (2-12)$$

双电容分压耦合连接也是一种使用比较普遍的形式,具有以下特点:

(1) 与变压器耦合连接形式和自耦变压器耦合连接形式相比,双电容分压耦合连接

形式具有体积小的优点,因为在高频电子线路中电容的体积往往小于变压器和自耦变压器的体积。显然,还具有受外界磁场影响小的优点。

(2) 等效后的电阻 R'_L 只可能增大,不可能减小。增大的倍数与 $\left(\frac{C_1+C_2}{C_1}\right)^2$ 成正比。

(3) 等效后的电路中的电容就是电容 C_1 和 C_2 的串联等效电容 C 。

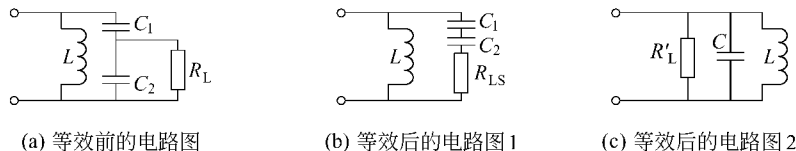


图 2-4 双电容分压耦合连接原理电路图

由此可见,变压器耦合连接、自耦变压器耦合连接和双电容分压耦合连接这 3 种形式之中,只有变压器耦合连接形式等效后的负载电阻可以变大或变小,其余两种只能变大。

为了在后续的高频电子线路分析中方便地进行计算,引入接入系数这个参数,用 p 来表示。

4. 接入系数

上面以电阻的等效变换推导了 3 种连接形式的变比关系。为了在分析电路时运用方便,可以将其推广到电导、电抗、电流源和电压源的等效变比关系。首先,定义与变比关系有关的接入系数 p ,即

$$p = \frac{\text{转换前的圈数(或容抗)}}{\text{转换后的圈数(或容抗)}} \quad (2-13)$$

对于上面讨论的 3 种情况,可以得到电阻转换的通式为

$$R'_L = \frac{1}{p^2} R_L \quad (2-14)$$

推广到电导、电抗、电流源和电压源的等效变比关系为

$$g'_L = p^2 g_L, \quad X'_L = \frac{1}{p^2} X_L, \quad I'_g = p I_g, \quad U'_g = \frac{1}{p} U_g \quad (2-15)$$

有了式(2-13)、式(2-14)和式(2-15),对于高频电子线路的等效电路的定量分析就简洁了许多,也便于记忆了。

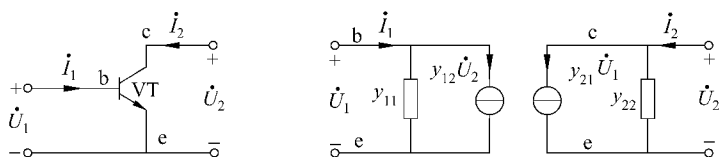
2.3 晶体管高频小信号等效电路

在高频线性电子线路的应用中,晶体管可以利用等效电路和高频参数来阐述其特性,并进行分析。

晶体管在处理高频小信号时,其等效电路主要有两种表示方法。第一种表示方法是形式等效电路,又被称为网络参数等效电路;第二种表示方法是物理模拟等效电路,即混合 π 型等效电路。

2.3.1 y 参数等效电路

网络参数等效电路是把晶体管 VT 看成一个有源二端口网络,采用一些网络参数来组成等效电路,如图 2-5(a)所示,基极 b 与发射极 e、集电极 c 与发射极 e 分别组成了输入和输出两个端口。这种等效电路具有通用性,导出的表达式具有普遍性,分析电路具有方便性等;其缺点主要是参数与工作频率有关,对于动态计算显得很麻烦,还有就是物理意义不明确。



(a) 晶体管的二端口电路图

(b) y 参数等效电路图图 2-5 晶体管及其 y 参数等效电路图

在图 2-5(a)中,输入端的输入电压和电流分别是 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{I}_1$,输出端的输出电压和电流分别是 $\dot{U}_2$ 和 $\dot{I}_2$ 。根据二端口网络的理论,需要 4 个参数来表示晶体管 VT 的功能,这种表征晶体管功能的参数叫做晶体管的参数(参量)。我们可以任意选择两个参数作为自变量,剩下两个就是参变量。对于二端口网络的 4 个参数,可以得到 6 种不同的参数系,其中,最常用的是 h 、 y 、 z 3 种参数系。如果选择输出电压 $\dot{U}_2$ 和输入电流 $\dot{I}_1$ 为自变量,输入电压 $\dot{U}_1$ 和输出电流 $\dot{I}_2$ 为参变量,则得到 h 参数系。如果选择输出电流 $\dot{I}_2$ 和输入电流 $\dot{I}_1$ 为自变量,输入电压 $\dot{U}_1$ 和输出电压 $\dot{U}_2$ 为参变量,则得到 z 参数(阻抗)系。如果选择输出电压 $\dot{U}_2$ 和输入电压 $\dot{U}_1$ 为自变量,输入电流 $\dot{I}_1$ 和输出电流 $\dot{I}_2$ 为参变量,则得到 y 参数(导纳参数)系。本书主要采用 y 参数系分析线性高频电子线路。

设输出电压 $\dot{U}_2$ 和输入电压 $\dot{U}_1$ 为自变量,输入电流 $\dot{I}_1$ 和输出电流 $\dot{I}_2$ 为参变量,由图 2-5(a)可得

$$\dot{I}_1 = y_{11} \dot{U}_1 + y_{12} \dot{U}_2 \quad (2-16)$$

$$\dot{I}_2 = y_{21} \dot{U}_1 + y_{22} \dot{U}_2 \quad (2-17)$$

式中, y_{11} ——输出短路时的输入导纳;

y_{12} ——输入短路时的反向传输导纳;

y_{21} ——输出短路时的正向传输导纳;

y_{22} ——输入短路的输出导纳。

这 4 个参数的定义为

$$y_{11} = y_i = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1} \right|_{\dot{U}_2=0}, \quad y_{12} = y_r = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{U}_1=0}$$

$$y_{21} = y_f = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1} \right|_{\dot{U}_2=0}, \quad y_{22} = y_o = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{U}_1=0} \quad (2-18)$$

短路导纳参数表示输出端或输入端短路时晶体管的参数,它们是晶体管本身的参数,只与晶体管的本身特性有关,而与外电路无关,所以又被称为内参数。对于放大器中的晶体管,由于其输入端和输出端都接有外部电路,晶体管和外部电路构成一个整体电路,于是得到相应的放大器的 y 参数,它们不仅与晶体管的特性有关,还与外部电路有关,所以又被称为外参数。

y 参数因不同的晶体管型号、不同的工作电压和不同的工作频率而各异。 y 参数可能是实数,也可能是负数。根据具体电路和工作参数,有些参数可以近似为一个实数,有些参数可以近似为一个虚数。

根据 y 参数,就可以得到晶体管的 y 参数等效电路,如图 2-5(b)所示。在输入端,有两条支路并联,其中一条是复导纳,另一个是受控电流源;在输出端,也有两条支路并联,其中一条是复导纳,另一个是受控电流源。

对于共发射极组态,

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_b, \quad \dot{U}_1 = \dot{U}_{be}, \quad \dot{I}_2 = \dot{I}_c, \quad \dot{U}_2 = \dot{U}_{ce}$$

其 y 参数用 y_{ie} 、 y_{re} 、 y_{fe} 和 y_{oe} 来表示。

对于共基极组态,

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_e, \quad \dot{U}_1 = \dot{U}_{eb}, \quad \dot{I}_2 = \dot{I}_c, \quad \dot{U}_2 = \dot{U}_{cb}$$

其 y 参数用 y_{ib} 、 y_{rb} 、 y_{fb} 和 y_{ob} 来表示。

对于共集电极组态,

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_b, \quad \dot{U}_1 = \dot{U}_{bc}, \quad \dot{I}_2 = \dot{I}_e, \quad \dot{U}_2 = \dot{U}_{ec}$$

其 y 参数用 y_{ic} 、 y_{rc} 、 y_{fc} 和 y_{oc} 来表示。

2.3.2 混合 π 型等效电路

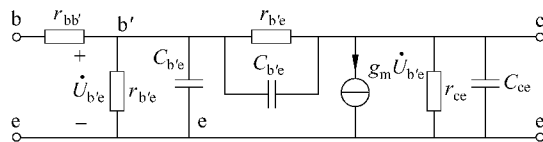
形式等效电路不仅适用于晶体管,而且适用于任何二端口网络或三端元器件。但是,对于晶体管的形式等效电路,主要缺点是没有考虑到晶体管内部的物理过程,要动态分析电路就非常不方便了,这是因为晶体管的特性或参数随着工作电压、工作频率和环境因素的变化而变化。如果把晶体管内部的复杂关系用集中元件电阻、电容和电感来表示,则每一个元件都与晶体管内部发生的某种物理过程有明显的关系。采用这种物理模拟的方法所得到的物理等效电路,就是所谓的晶体管混合 π 型等效电路。

晶体管混合 π 型等效电路图的优点主要是其中的各个元件在很宽的工作频率范围内都保持常数;其缺点主要是元件比较多,电路技术指标的计算比较复杂。

图 2-6 所示是晶体管混合 π 型等效电路,下面分别介绍各个元件。

1. 发射结的结电阻 r_{be}

当晶体管工作在放大区时,其发射结正向偏置,因此 r_{be} 很小,一般在几百欧姆以下,

图 2-6 晶体管混合 π 型等效电路

并可以表示为

$$r_{b'e} = \frac{26(\text{mV})\beta_0}{I_E}$$

其中, β_0 是共发射极组态晶体管的低频电流放大系数; I_E 是晶体管发射极的静态工作电流, 单位是 mA。

2. 基区扩展电阻 $r_{bb'}$

基区扩展电阻 $r_{bb'}$ 的大小与晶体管的杂质浓度等制造工艺有关, 而且是一个固定值, 与晶体管的工作状态无关。对于高频小功率硅管, 基区扩展电阻 $r_{bb'}$ 在几十欧姆至几百欧姆之间。

3. 集电结电阻 $r_{b'c}$

由于晶体管的集电结总是处于反向偏置, 所以集电结电阻 $r_{b'c}$ 非常大, 通常是兆欧姆数量级。因此, 在分析具体电路时, 集电结电阻 $r_{b'c}$ 往往可以忽略不计(看成开路)。

4. 集电极电阻 r_{ce}

集电极电阻 r_{ce} 表示集电极与发射极之间的电压 u_{ce} (管压降) 对集电极电流 i_c 的影响。集电极电阻 r_{ce} 一般比较大, 但是小于集电结电阻 $r_{b'c}$ 。

5. 发射结的结电容 $C_{b'e}$

发射结的结电容 $C_{b'e}$ 是由势垒电容 C_{je} 和扩散电容 C_{De} 两部分组成。当晶体管工作在放大区时, 其发射结正向偏置, 因此扩散电容 C_{De} 相对比较大, 可以忽略势垒电容 C_{je} , 即 $C_{b'e} \approx C_{De}$ 。

6. 受控电流源

在集电极与发射极之间的受控电流源的大小是 $g_m \dot{U}_{b'e}$, 方向取决于晶体管是 NPN 型还是 PNP 型。如果晶体管是 NPN 型的, 受控电流源的方向是由集电极流向发射极; 如果晶体管是 PNP 型的, 受控电流源的方向是由发射极流向集电极。其中, $g_m = I_E/26$, 是晶体管的跨导, 表征晶体管的放大能力, 单位是 S。

在分析小信号谐振放大器时, 一般采用 y 参数等效电路等效晶体管, 但是, y 参数是随工作频率的变化而变化的。混合 π 型等效电路用集中参数元件表示, 其物理意义明显, 在分析电路原理时用得多。 y 参数与混合 π 型等效电路的参数的变换关系可以根据 y 参数的定义求出, 其计算公式可参考有关资料(参考文献[1]的 83~90 页)。

2.3.3 晶体管的高频参数

为了分析和设计各种高频电子线路,有必要了解晶体管的高频特性。下面介绍几种表征晶体管高频特性的主要参数,包括截止频率 f_β 、特征频率 f_T 和最高振荡频率 $f_{\max}$ 等参数。

1. 截止频率 f_β

β 是晶体管共发射极电流放大系数,其大小与工作频率有关。当工作频率高到一定程度时, β 值会随工作频率的增高而下降。截止频率 f_β 是指当 $|\beta|$ 下降到低频电流放大系数 β_0 的 $1/\sqrt{2}$ 倍时所对应的频率。 β 与工作频率 f 、截止频率 f_β 和低频电流放大系数 β_0 的关系式为

$$\beta = \frac{\beta_0}{1 + j \frac{f}{f_\beta}} \quad (2-19)$$

根据上式, β 的模值 $|\beta|$ 为

$$|\beta| = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\beta}\right)^2}} \quad (2-20)$$

根据晶体管的混合 π 型等效电路,可以得到(参考文献[2]的 13、14 页)晶体管的共发射极电流放大系数 β 和截止频率 f_β 的表达式:

$$\beta = \frac{\beta_0}{1 + j\omega r_{b'e}(C_{b'e} + C_{b'c})} \quad (2-21)$$

$$f_\beta = \frac{1}{2\pi r_{b'e}(C_{b'e} + C_{b'c})} \quad (2-22)$$

由于共发射极电流放大系数 β 远远大于 1,因此,当工作频率等于截止频率 f_β 时, $|\beta|$ 的值虽然下降到 β_0 的 $1/\sqrt{2}$ 倍,但是仍然比 1 大得多,晶体管还能起放大作用。

2. 特征频率 f_T

特征频率 f_T 是指当 $|\beta|$ 下降到 1 时所对应的频率。由式(2-20)可得 $\frac{\beta_0}{\sqrt{1 + (f_T/f_\beta)^2}} = 1$,即

$$f_T = f_\beta \sqrt{\beta_0^2 - 1} \approx \beta_0 f_\beta \quad (2-23)$$

特征频率 f_T 是晶体管在共发射极电路中能得到的电流增益的最高频率极限。根据上面的定义,当 $f > f_T$ 时, $|\beta| < 1$ 。此时,虽然放大器没有电压放大作用了,但并不意味着晶体管已经没有放大能力了,因为放大的功率增益 A_p 还有可能大于 1。

3. 最高振荡频率 $f_{\max}$

最高振荡频率 $f_{\max}$ 是指晶体管的功率增益 $A_p = 1$ 时所对应的频率,表示晶体管所能工作的最高极限频率。根据晶体管的混合 π 型等效电路,可以计算出(参考文献[3])最