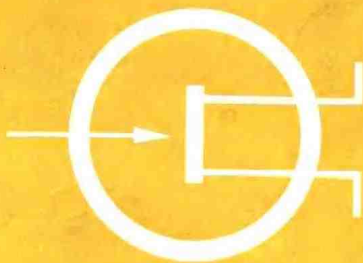


电子电路与系统

—— 高频电路 ——

谢元清 主编

谢元清 赵学泉 编



广播电视大学出版社

电子电路与系统

——高频电路——

谢沅清 主编

谢沅清 赵学泉 编

中央广播电视大学出版社出版
新华书店北京发行所发行
北京印刷三厂印装

开本 787×1092 1/16 印张 22.5 千字 518

1988年10月第1版 1988年10月第1次印刷

印数：1—11,500

ISBN7-304-00265-4/TN·6

定价 4.50 元

前 言

本书为中央广播电视大学“电子电路与系统”课程的教材。这门课程是“模拟电子技术基础”课的后续课。

“放大”和“振荡”是模拟电子技术基础的两个主要内容。本书对这两方面的内容有所加深和拓宽。第一、二、四章是放大方面的内容。第一章讲述扩展放大器通频带的方法，第二章讲述小信号选频放大器，第四章讲述提高放大器输出功率的方法。这三章内容是就频响和输出功率这两个放大器的主要指标进行分析研究。扩展放大器通频带这一章的内容，是应用放大基本理论解决扩展放大器的工作频带的问题。小信号选频放大器一章，重点讨论高频窄带放大器。提高放大器输出功率的方法一章，先是对提高输出功率的基本原理作了概括性的说明，随后提出了丙类谐振功率放大和功率合成两种电路。第五章电振荡的产生对振荡器作了较之模拟技术基础课深入一些，广泛一些的讨论。对正弦波振荡特性作了大信号工作状态的分析，并对振幅和频率的稳定问题作了较深入的讨论。补充介绍了单片集成振荡器和负阻振荡器。

模拟电子技术基础侧重于讲述单元电路，本课程则用相当多的篇幅介绍电子电路的小系统。它们是第六章调幅与检波系统；第八章角度调制与解调系统；第十章电子电路中的反馈控制系统。这些小系统除应用到放大、负反馈、振荡等基本理论外，读者还可从中取得调制解调的知识。在第六章调幅检波系统之后，讲述在基本理论上与之相近的变频与倍频两种信号变换电路。开关电容滤波器是作为一种新知识，在第三章中用不大的篇幅作了简要的介绍。第九章介绍了各种不同类型的非线性波形变换电路。这类电路在电子技术中得到广泛的应用。噪声是电子电路中的一个重要问题。当这个问题被忽略时，往往会成为妨碍电子电路正常工作的主要因素。本书最后一章介绍噪声产生机理、计算以及减小噪声方法的初步知识。

本书的一些主要内容所介绍的电路，用于无线电收发系统的高频部分。在过去，这些电路被称作高频电路。但在实际应用中，这些电路并不只是在高频频率范围内运用。它的工作频率也可能是很低的。故称这些电路为高频电路是不十分科学的。本书包含的内容，除了上述运用于无线电收发信系统高频部分的电路外，还扩充了一些其它电子技术领域中常见的电路。为了照顾到传统的习惯称呼，我们用《高频电路》作为本书的副题。

从事电子电路方面的技术工作，要遇到分析和设计两方面的问题。考虑到目前电子电路方面的书刊资料十分丰富，应用时有许多现成的电路可供借鉴，故本书讲述各类电子电路时以分析为主，而且强调分析方法，读者可以看到，许多章节的标题就鲜明提出“方法”二字。我们认为：对基本电路分析透了，方法掌握好了，遇到实际的设计问题，就不难查找现成的资料，根据所要解决的问题将选定的参考电路作某些必要的更动，恰当地予以解决。这样处理，比起讲一套刻板的设计步骤会更好一些。因为满足同一指标的设计结果，不是单一的，设计步骤往往是因条件不同而异的。根据我们的教学经验，刻板的设计步骤，弄得不好，反而可能束缚人的思维，不利于读者灵活地处理遇到的设计问题。

本书力求从物理概念上将问题阐述清楚，避免繁琐的数学推导。根据我们的经验，在实际中临场解决电子电路中出现问题的一些问题，物理概念的清晰和估算能力显得十分重要，详细的手工计算是意义不大。特别是对于高频非线性问题，花费了许多时间作计算，也难以得到满意的结果。在计算机得到广泛应用的今天，应该让计算机去承担繁琐的计算。本书内容取材对大专生来说略多一些，因此，也可供大学本科生学习参考。

北方交通大学卢焱教授审阅了全书，提出了许多宝贵的意见，在此表示深切的感谢。

作者水平有限，编写此书的时间比较仓促，书中一定存在不少缺点和错误。恳切地希望使用本书的师生和广大读者，提出宝贵意见。

作者

1988年1月

目 录

绪论	(1)
1. 无线电广播发送系统	(1)
2. 无线电广播接收系统	(2)
3. 本课程的主要内容	(3)
第一章 扩展放大器通频带的方法	(5)
1-1 器件高频参数	(5)
1-1-1 晶体管的高频参数	(3)
1-1-2 场效应管等效电路	(6)
1-2 影响放大级高频特性的因素	(8)
1-3 扩展放大器通频带的方法	(9)
1-3-1 负反馈法	(10)
1-3-2 不同组态电路混合连接法	(12)
1-3-3 外接电感补偿元件	(15)
本章小结	(19)
习题及思考题	(19)
第二章 小信号选频放大	(22)
2-1 以 LC 振荡回路为选频网络的选频放大器	(23)
2-1-1 单振荡回路的选频特性	(23)
2-1-2 信号源和负载的部分接入	(25)
2-1-3 单振荡回路选频放大器	(28)
2-1-4 双耦合回路选频放大器	(32)
2-2 石英晶体和陶瓷滤波器选频放大器	(31)
2-2-1 石英晶体滤波器选频放大器	(35)
2-2-2 陶瓷滤波器选频放大器	(38)
2-3 声表面波滤波器选频放大器	(11)
2-4 用于高频选频放大的集成宽带放大器	(11)
2-4-1 MC1590 放大器的工作原理	(11)
2-4-2 集成选频放大器的电路	(12)
附录2-1 电感、电阻串联电路转换为电感、电阻并联支路	(13)
本章小结	(14)
习题及思考题	(13)
第三章 开关电容滤波器	(16)
3-1 开关电容电路基础	(16)
3-1-1 基本开关电容电路	(16)

8-1-2	开关电容积分器	(48)
3-2	离散时间效应	(50)
3-3	开关电容滤波器	(52)
3-3-1	一阶低通滤波器	(52)
3-3-2	二阶低通滤波器	(53)
3-3-3	带通滤波器	(58)
3-4	开关电容滤波器的应用及其限制	(61)
本章小结		(62)
习题及思考题		(83)
第四章 提高放大器输出功率的方法 (64)		
4-1	影响放大器输出功率的因素及提高输出功率的途径	(64)
4-1-1	影响放大器输出功率的因素	(64)
4-1-2	提高输出功率的途径	(65)
4-2	提高放大器输出功率的方法	(66)
4-2-1	器件工作状态的选择	(66)
4-2-2	提高运算放大器输出能力的电路	(70)
4-3	丙类高频谐振放大器	(72)
4-3-1	电路简介及电压、电流波形	(72)
4-3-2	丙类谐振放大器的工作特点	(75)
4-3-3	耦合电路	(76)
4-4	宽带功率放大器	(83)
4-4-1	传输线变压器	(83)
4-4-2	功率合成器中耦合网络应满足的条件	(91)
4-4-3	功率合成网络工作原理	(92)
本章小结		(95)
习题及思考题		(96)
第五章 电振荡的产生 (98)		
5-1	正弦波自激振荡原理	(98)
5-2	反馈型 LC 振荡器	(98)
5-2-1	振荡的建立和振幅的稳定	(95)
5-2-2	LC 正弦波振荡器的电路	(101)
5-3	振荡器的振幅和频率的稳定	(106)
5-3-1	振幅稳定	(107)
5-3-2	频率稳定	(111)
5-3-3	振幅与频率不稳定的原因及稳定的方法	(113)
5-4	石英晶体振荡器	(119)
5-4-1	并联型晶体振荡器电路	(116)
5-4-2	泛音晶体振荡器电路	(117)
5-4-3	串联型晶体振荡器电路	(119)
5-5	反馈型 RC 正弦波振荡器	(120)

5-5-1	反馈型 RC 正弦波振荡器的特点	(120)
5-5-2	反馈型 RC 正弦波振荡器的电路	(121)
5-6	张弛振荡器	(125)
5-6-1	张弛振荡器自激振荡原理	(125)
5-6-2	由集成运放构成的张弛振荡器	(126)
5-6-3	单片集成张弛振荡器	(136)
5-7	负阻振荡器	(138)
5-7-1	负阻器件	(138)
5-7-2	负阻型 LC 正弦波振荡器	(139)
5-7-3	负阻型张弛振荡器	(143)
本章小结		(146)
习题及思考题		(147)
第六章 调幅与检波系统——线性频率变换		(151)
6-1	调幅与检波系统的频率变换情况	(151)
6-2	调幅波分析	(154)
6-2-1	调幅波的波形及数学表达式	(154)
6-2-2	调幅波的频谱	(154)
6-2-3	调幅波功率	(157)
6-3	调幅与检波的基本原理	(158)
6-4	调幅电路	(159)
6-4-1	相乘器调幅电路	(159)
6-4-2	三极管调幅电路	(164)
6-5	检波电路	(165)
6-5-1	相乘器检波电路	(166)
6-5-2	二极管包络检波	(168)
6-5-3	平均值包络检波	(175)
本章小结		(176)
习题及思考题		(177)
第七章 变频与倍频		(180)
7-1	变频	(180)
7-1-1	混频器的基本原理	(181)
7-1-2	混频器的主要指标	(184)
7-1-3	晶体管混频器	(185)
7-1-4	晶体管变频器	(187)
7-1-5	混频器的干扰	(188)
7-1-6	二极管环形混频器	(190)
7-1-7	相乘器构成的混频电路	(193)
7-2	倍频	(194)
7-2-1	相乘倍频器	(195)

7-2-2	非线性谐振放大式变频器——丙类变频器	(197)
本章小结		(201)
习题及思考题		(202)
第八章 角度调制与解调系统——非线性频率变换 (204)		
8-1	调角信号的分析	(204)
8-1-1	调频波和调相波的表示式	(204)
8-1-2	调频波和调相波的基本性质	(206)
8-1-3	调频波和调相波的频谱、频带宽度	(206)
8-2	实现调频的基本原理和方法	(210)
8-3	直接调频电路	(211)
8-3-1	变容二极管调频器	(211)
8-3-2	积分式调频振荡器	(216)
8-4	间接调频振荡器	(217)
8-4-1	改变振荡回路参数实现调相	(218)
8-4-2	改变移相网络参数实现调相	(220)
8-5	频率解调的基本原理和方法	(221)
8-6	鉴频电路	(222)
8-6-1	单失谐回路斜率鉴频器	(222)
8-6-2	双失谐回路斜率鉴频器	(229)
8-6-3	相位鉴频器	(233)
8-6-4	比例鉴频器	(235)
8-6-5	符合鉴频器	(240)
8-6-6	脉冲计数式鉴频器	(243)
本章小结		(247)
习题及思考题		(248)
第九章 非线性波形变换 (250)		
9-1	非线性波形变换的基本原理及类型	(250)
9-1-1	非线性波形变换的基本原理	(250)
9-1-2	非线性波形变换的类型	(250)
9-2	限幅器	(250)
9-2-1	二极管接于运放输入电路中的限幅器	(251)
9-2-2	二极管接于反馈电路中的限幅器	(255)
9-3	二极管函数电路	(253)
9-3-1	二极管接于输入电路中的函数电路	(254)
9-3-2	二极管接于反馈电路中的函数电路	(258)
9-3-3	线性检波器构成的二极管函数电路	(272)
9-4	幂级数近似法函数电路	(275)
9-4-1	台劳级数逼近正弦函数的电路	(275)
9-4-2	利用切比雪夫多项式逼近正弦函数的电路	(275)

9-4-3	隐含反馈法逼近正弦函数的电路	(278)
9-4-4	利用正弦函数变换器实现余弦变换	(280)
9-4-5	求反函数的—般方法	(281)
9-5	触发器波形变换电路	(281)
9-5-1	双稳态触发器波形变换电路	(281)
9-5-2	单稳态触发器波形变换电路	(283)
	本章小结	(283)
	习题及思考题	(289)
第十章	电子电路中的反馈控制系统	(294)
10-1	自动幅度控制系统	(294)
10-1-1	接收机中的自动增益控制	(294)
10-1-2	振荡器中的自动稳幅	(297)
10-2	自动频率控制	(299)
10-2-1	自动频率控制的原理	(299)
10-2-2	具有自动频率控制的调频系统	(300)
10-3	自动相位控制系统——锁相	(302)
10-3-1	锁相环的构成及工作原理	(302)
10-3-2	鉴相器	(303)
10-3-3	低通滤波器	(305)
10-3-4	压控振荡器	(306)
10-3-5	锁相环的相位模型和基本方程	(308)
10-3-6	一阶环路的图解分析	(310)
10-3-7	锁相环路的线性化分析	(317)
10-3-8	集成锁相环及应用举例	(320)
10-4	反馈控制系统的一般工作原理	(324)
10-4-1	反馈控制系统的方框图	(324)
10-4-2	反馈控制系统的特性	(328)
	本章小结	(325)
	习题及思考题	(326)
第十一章	电子电路中的噪声	(328)
11-1	元器件内部噪声产生的原因及表示方法	(328)
11-1-1	热噪声	(328)
11-1-2	散弹噪声	(331)
11-1-3	低频噪声	(331)
11-2	噪声电路的计算	(332)
11-2-1	多个噪声源作用于电路时的分析	(332)
11-2-2	噪声系数	(335)
11-2-3	放大器与电子器件的噪声等效电路	(335)
11-3	减小电子电路系统内部噪声影响,提高输出信噪比的方法	(341)

11-3-1	降低器件本身的噪声	(341)
11-3-2	选用合适电路或设计特种电路	(341)
11-4	减小电子电路系统外部干扰、提高输出信噪比的方法	(343)
11-4-1	来自电源的干扰及其抑制方法	(344)
11-4-2	来自空间电磁耦合的干扰及其抑制方法	(346)
	本章小结	(348)
	习题及思考题	(349)

绪 论

在模拟电子技术基础课程中，主要讲述电子器件的特性和用电子器件构成的放大电路和振荡电路。这些放大电路和振荡电路都是最基本的。在电子电路与系统课程中，我们将对放大电路和振荡电路作深入一步的介绍，如放大器的一些重要质量指标的提高问题，某些专门用途的放大器，以及振荡器的其它类型。还将介绍除放大和振荡电路以外的一些其它电子线路。这里所讲述的电子线路，和模拟电子技术基础课程所讲述的电路相比，有些电路在规模上要大一些，它们往往是由两个或两个以上的单元电路构成的小系统。

在早期，电子技术的发展和无线电通信的发展几乎是密不可分的。一个无线电收发系统所包含的电子线路，涉及到了电子线路的主要类型。因此，我们在本课程的开始，将介绍一个无线电广播收发系列，阐明其所包含各部分电子线路的作用，以便对电子线路与系统的内容有一个初步的认识。

1. 无线电广播发送系统

无线电广播与人们日常生活密切相关。让我们以无线电广播发送系统为例，说明该系统中电子电路的各个组成部分的基本作用。

图1-1是无线电广播发送系统的方框图。一个完整的发送系统应包括三个组成部分，即高频部分，声频部分和电源部分。由于电源部分不影响系统的工作原理，为了简单，图中没有将这一部分画出。

图1-1下面一行是低频部分，它类似于电子技术基础一课中所讲述的扩音系统，只不

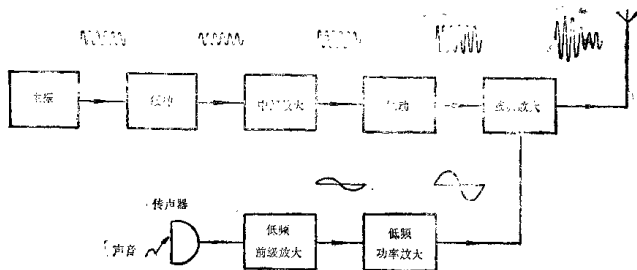


图1-1 无线电广播发送系统方框图

过扩音系统的负载是扬声器，而在这里，低频功率输出级的负载是高频的被调放大级。作为发送系统，必须有高频放大部分，其理由十分明显。可是仅有低频部分而没有高频部分是无法将信号发射以实现广播所需达到的目的的。按照天线理论，要能有效地将电磁波发射到空间去。天线的几何长度必须能与欲发射的电磁波长相比拟。声音能量集中在100赫至1000赫，相应的电磁波长为750公里至300公里，因而为了有效发射电磁波，要求制作长度为750公里至300公里的天线。要制作这么长的天线显然是难以实现的。即使制作出来这么长的天线，并且将电磁发射到了空间。然而接收起来就很困难了。因为各个广播电台发射的电磁波，处于相同的频率范围，人们从接收机的扬声器中，将同时听到各个电台的声音。如果各个电台的声音都差不多大小，则哪一个节目也听不清楚；而如果声音大小不一样，则只能收听到功率最大，距离最近的那个电台的节目。

解决上述问题的方法是增添高频部分。用一个振荡器，即图中的主振，产生一个高频振荡。振荡频率的确定原则之一是使长度和电磁波长可以相比拟的天线能实现。然后用声频信号对高频振荡的振幅进行调制，使高频振荡的振幅按声频信号的变化规律而改变*。这样，高频振荡恰似运载工具，载着声频信号进入空间。人们称此高频信号为载波。如果我们进一步将各个电台的载波频率选为不同值，就为接收时有效地区分各个不同电台的信号创造了条件。

图2-1中高频部分进一步可区分为五个部分。主振级是产生高频振荡。缓冲级吸收很小一部分主振级的功率，以提高主振级的频率稳定度。中间放大和推动级联合将高频振荡放大到被调放大所需大小的推动信号。被调放大受低频功率输出级送来的信号的控制，将等幅波变成调幅波。

2. 无线电广播接收系统

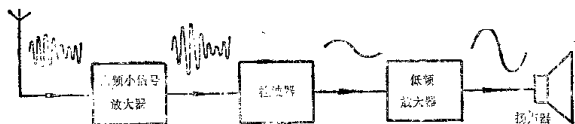


图2-1 直接放大式接收机方框图

图2-1所示为简单的广播接收机方框图。这种接收机通常称为直接放大式接收机。图中高频小信号放大器是将接收到的十分微弱的高频信号加以放大，以使得检波器有较高效率的工作状态。检波器的作用是将被声频信号调制了的高频调幅波还原为声频信号。检波器的输出信号被输入高频调幅波振幅变化规律而改变。低频放大器的作用很明显。无庸赘述。

上述直接放大式接收机的重要缺点是，在接收频段频率高端和频率低端放大不一样，整个波段灵敏度不均匀。同时由于接收的高频信号频率比较高，放大器增益也不易做得高，因

* 在实际应用中还可以有其它调制方法，例如使高频振荡的频率或相位按声频信号的变化规律而变化。

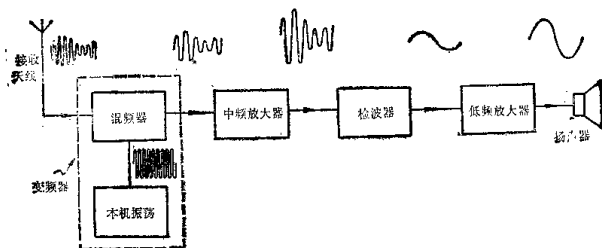


图2-2 超外差式接收机方框图

此灵敏度也就不高，为了得到高的增益就需要级数多。可是要使高频小信号放大器能区分不同电台，必须有所谓选频电路而且这个电路的选择频率应该可变。但是放大器级数多了调节接收频率的电路会变得十分复杂，为了克服这一缺点，人们研究出了所谓超外差式接收机。

图2-2是超外差式接收机的方框图。从天线收到的高频信号 V_s 先送至混频器与本机振荡 V_L 所产生的振荡电压相混合，所得到的输出电压 V_o 的包络线形状不变，即振幅的变化规律不变，但载波频率则换为 f_s 和 f_L 两个高频频率之差。这个新的载波频率 f_c 叫做中频。中频电压经中频放大器后再送至检波器。

超外差式接收机之所以能提高灵敏度，关键在于通过混频器将接收到的不同载波频率转变为频率较低的固定值，人们称为中频。这种作用称作外差作用，为了获得较好的选择性和灵敏度，增加中频放大器，也就是超外差式接收机名称的由来。没有中频放大的则称“外差式接收机”。由于中频频率是固定的，中频放大器无需随接收电台的改变而改变，故电路简单，容易做成高增益的多级放大器，使接收机的灵敏度得以提高和均匀。此外，还可以用不太复杂的电路，使放大器具有较高的选频，即区分不同电台的能力。

3. 本课程的主要内容

上面所介绍的无线电广播的发送和接收系统，其主要特点是：为了传递我们所需要的信息，在发送端将代表信息的电量，去改变一个高频振荡的振幅，通过高频振荡振幅的变化来传递信息。这一过程在电子技术中称作调制。图1-1中被调放大器实现调制功能。在接收端，将高频振荡的振幅变化，还原为原信息，这一过程在电子技术称作解调。图2-1中检波级完成解调功能。由此可见，无线电广播系统也就是一个信号的调制与解调系统。由图1-1和2-1，2-2所示的这个系统可以看出，为了实现调制与解调以及提高调制解调系统的性能，除了直接实现调制的电路——被调放大和直接实现解调的电路——检波器外，还需要其它一系列电路。例如图1-1中的主振就是产生高频振荡所必需的。缓冲级则是用以提高振荡的频率稳定性。在图2-2中，变频器是为了获得较高质量的接收信号而采取超外差接收方式所必需的电路。在现代的各式各样的广播、通信和电视接收机中，为了使距离不同，

发射功率大小不一的电台，在接收机的输出端给收听（或收看）者以强弱几乎相等的声音和图象。还在接收机中采用了自动增益控制措施。它的作用是使得天线接收到的信号较弱时，接收机的增益较高，而天线接收到的信号较强时，接收机的增益较低，以保持接收机输出的声音或图象信号的强弱几乎不变。

图 1-1， 2-1 和 2-2 所介绍的无线电广播收发系统中，采用的调制方式是调幅。人们也可以用代表要传送信息的电量，去改变高频振荡的初相角或频率，这种调制方式叫做调相或调频，统称为调角。在这种调制和解调系统中，除了要有直接完成调制和解调功能的调相，调频器、相位或频率解调器外，还需要一系列为实现调制、解调所必不可少的，以及为提高系统性能的其他辅助电路。

上述用于无线电广播和通信系统中传输和处理信号的方法和电路，也广泛地用于其它领域，如电子测量、自动化以及许多应用电子技术的非电领域。

因此，以实现信号的调制和解调为目的，围绕调制和解调、或是为达到该目的必不可少的附加电路、或是为提高性能指标的辅助电路，诸如振荡、选频、变频、自动增益控制等等。就是本课程的主要内容。

我们一开始就提到，本课程是模拟电子技术基础课的一门后续课程，故本课程将对模拟电子技术基础课的某些问题，作深入一步的分析研究。放大器的通频带和输出功率，是模拟电子技术中的两个基本问题，十分值得作较深入的分析研究。故本课程专辟两章，分别就扩展放大器的通频带和提高放大器的输出功率两个问题，给予分析和研究。

第一章 扩展放大器通频带的方法

扩展放大器的通频带,包括降低其下截止频率和提高其上截止频率。在早期,放大器的级间耦合大量采用电容耦合方式,人们研究降低截止频率的方法,有它一定的意义。在直接耦合的集成放大器得到广泛应用的情况下,放大器的下截止频率很容易延伸至零频,而且能使零漂很小。因此,研究如何降低电容耦合或变压器耦合放大器的下截止频率,就没有多大意义了。所以,本章所要讨论的扩展放大器通频带的方法,限于研究如何提高上截止频率。

在模拟电子技术基础课中,曾经讨论过双极型晶体管放大器的高频特性,我们将在此基础上研究如何提高上截止频率。

1-1 器件高频参数

在影响放大电路高频特性的诸因素中,器件参数是最重要和最基本的。因此,我们首先讨论器件的高频参数。

1-1-1 晶体管的高频参数

一、混合 π 等效电路

晶体管的小信号混合 π 等效电路图1-1-1所示。这种等效电路用于分析共发射极组态电路。

在电子技术基础课程中,已经指出过这些参数与器件的工作点有关

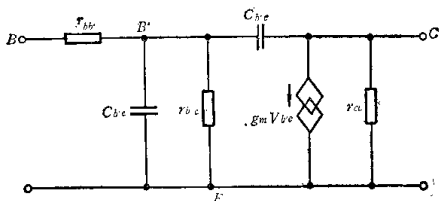


图1-1-1 晶体管小信号混合 π 等效电路

$$g_m = \frac{I_c}{26} \quad (1-1-1)$$

$$r_{e'} = (1 + \beta) \frac{26 \beta}{I_b} = \frac{26 \beta}{I_c} \quad (1-1-2)$$

电阻 $r_{e'}$ 的数值较大，在高频运用时，与之并联的电阻阻值及电容容抗值都较小，可以将 $r_{e'}$ 忽略。

电容 $C_{d,e'}$ 要是扩散电容，而电容 $C_{b,c'}$ 主要是势垒电容。扩散电容与工作点电流成正比，势垒电容则随所加到结上的反向电压的增大而减小，并且与制作结的工艺有关。

在电子技术基础课中，还给出晶体管的特征频率

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi C_{b,c'}} \quad (1-1-3)$$

f_T 是一个与工作点有关的参数，示如图1-1-2。当工作点电流为某一适中值时， f_T 有极大值，工作点电流增大或减小， f_T 都减小。其物理原因可参看有关参考文献，例如文献[2]上册 p. 100。

对于集成电路，所有晶体管的集电极和基片（也称衬底）间构成一个反向 PN 结，其间存在有一个结电容，衬底是交流接地的，因此，所有晶体管的集电极对地，都有一个衬底电容，其值约为 2 皮法。

值得指出的是，图 1-1-1 所示混合 π 等效电路的应用频率范围是有限制的，只有在 $f < 0.25f_T$ 时才比较精确，高于此频率时，分析所得到的结果时误差就会增大。

二、共基极 T 型等效电路

图 1-1-1 所示混合 π 等效电路，用来分析共基极晶体管电路，显得不大方便。采用图

1-1-3 所示共基极 T 型等效电路较方便。图 1-1-3 可以直接从晶体管工作的物理过程导出，参看参考文献（1）上册 p. 102。图中

$$r_e = \frac{26}{I_E} \quad (1-1-4)$$

I_E 是发射极电流直流值。

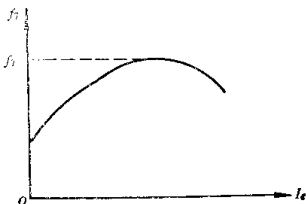


图1-1-2 f_T 与工作点电流的关系

1-1-2 场效应管等效电路

场效应管的等效电路示如图1-1-4，低频等效电路中接于 DS 间的等效电阻 r_{DS} ，因为其在高频运用时比与之并联的电容容抗，以及电路外接电阻阻值大，故在图中略去了。

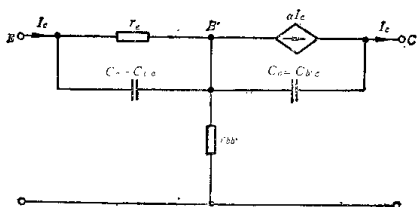


图1-1-3 晶体管共基极T型等效电路

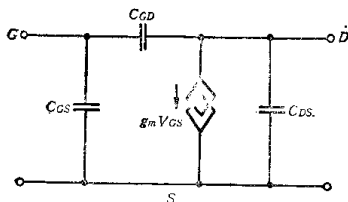


图1-1-4 场效应管小信号交流等效电路

由于场效应管的转移伏安特性是平方律，故跨导 g_m 与漏极电流的平方根成正比。

结型场效应管的 C_{cd} 和 C_{cs} 是 PN 结的势垒电容，它随栅偏压的增大而减小。 C_{cd} 则还与漏极电压有关。MOS 管的极间电容，由于电容极板之一为金属，故对电压的依从性较小。

以上介绍的器件参数与工作点电流电压的关系，对分析放大器高频特性与工作点电流电压的关系是十分有用的。

场效应管有一个类似于晶体管 f_T 的特征频率，用来说明场效应管的极限工作频率。我们考察图1-1-5所示的两级场效应管放大器。 T_1 的小信号交流等效电路如图1-1-6。图中 $C_{cd}(1+g_m R_{D2})$ 是考虑到第二级 C_{cd} 密勒效应反映在 T_1 输入端的等效电容。

在 $R_{D2} \rightarrow 0$ 时，第二级密勒效应消失， T_1 的负载电容最小，如果 $R_{D1} \rightarrow \infty$ ，则 T_1 总的负载阻抗达最大可能值，也就是共放大倍数达到最大可能值，其值为

$$A = \frac{g_m}{2\pi f(C_{cs} + C_{cd})} \quad (1-1-5)$$

随着频率 f 的升高，放大倍数 A 不断下降，当频率升高至极限工作频率 f_c 时，放大倍数