

中等专业学校教材

# 高频电子线路

(第三版)

俞家琦 编

西安电子科技大学出版社

**(陕)新登字 010 号**

### **内 容 提 要**

本书介绍高频电子线路的基本原理、分析方法和调整测试原理。主要内容有宽频带放大器、小信号调谐放大器、高频功率放大器、正弦波自激振荡器、调幅、检波、混频、调频、鉴频、数字信号的调制与解调以及反馈控制电路。另外还专门讨论了晶体管高频等效电路、模拟相乘器和集成锁相环。各章后附有小结、习题及答案。

本书可作为中等专业学校无线电技术专业 and 职业技术学校电子技术类专业的教材,也可供从事电子设备的调整、测试、检验、维修工作的工程技术人员参考,还可作为具有电工基础及低频电子线路基础知识的人员自学的参考书。

中等专业学校教材

**高频电子线路**

**(第三版)**

俞家琦 编

责任编辑 叶德福

---

西安电子科技大学出版社出版

西安长青印刷厂印刷

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本 787×1 092 1/16 印张 19 8/16 字数 450 千字

1985 年 12 月第 1 版 1995 年 11 月第 3 版 1998 年 4 月第 11 次印刷 印数 66 001—76 000

---

ISBN 7-5606-0379-3/TN·0096(课)

定价: 17.50 元

## 出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初，由于各有关院校，特别是参与编审的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材 159 种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》，中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构，并制定了一九八二~一九八五年教材编审出版计划，列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共 217 种选题。在努力提高教材质量，适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿，主要是从通过教学实践，师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者，各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材，分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验，这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议，共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

## 第三版前言

本书是在1989年第一次修订版的基础上修订而成的。调整与修改的内容主要有以下几个方面：

1. 全书的图形符号和文字符号作了全面修订：图形、符号及术语，尽量采用现行国标；未查到的和国标中没有明确规定的，则参照通用教材中使用的常用写法。

2. 在章节结构上作了一些调整，即将自动增益控制、自动频率微调与原第十章“锁相环路”合并成一章，成为第十一章“反馈控制电路”。这样做主要是为了突出反馈控制技术在电子线路方面的重要作用以及这些电路的内在联系。

3. 考虑到数字通信的迅速发展，增加了一章：第十章“数字信号的调制与解调”。在这一章中概括介绍了数字信号调制与解调的特点，以便为今后学习专业课打下一定的基础。

4. 在内容上删除了一些重复的、繁琐的叙述及数学推导。为了适应电子技术的进步及教改的需要，增加了集成电路方面的内容，还增加了通信电路、传输线变压器以及锁相频率合成的内容。

限于作者水平，书中不妥和错误之处，恳请读者不吝指教。

编者  
1995年4月

# 目 录

绪 论	1	§ 2.5 组合电路	15
习 题	5	一、共射—共基组合电路	46
<b>第一章 晶体管高频等效电路</b>		二、共集—共射组合电路	47
§ 1.1 概述	6	三、共集—共基组合电路	47
§ 1.2 晶体管物理参数及等效电路	7	四、共射—共集组合电路	47
一、PN 结二极管的等效电路	7	五、共射—共基—共集组合电路	48
二、晶体管共射混合 $\Pi$ 型等效电路	8	§ 2.6 集成宽频带放大器	48
三、混合 $\Pi$ 参数的确定	12	§ 2.7 宽频带放大器的调整与测试	50
四、晶体管共基 T 型等效电路	14	一、稳态法	50
§ 1.3 晶体管频率参数	14	二、暂态法	50
一、 $\beta$ 截止频率 $f_{\beta}$	14	本章小结	51
二、特征频率 $f_T$	16	习题 2	52
三、 $\alpha$ 截止频率 $f_{\alpha}$	16	<b>第三章 小信号调谐放大器</b>	
四、最高振荡频率 $f_M$	17	§ 3.1 概述	55
五、4 个频率参数的比较	17	§ 3.2 单调谐回路放大器	57
§ 1.4 晶体管网络参数及等效电路	19	一、高频 Y 参数等效电路	57
一、Y 参数的定义式	20	二、电压增益	60
二、晶体管 Y 参数的测量方法	21	三、通频带	60
三、Y 参数和混合 $\Pi$ 参数的换算	22	四、选择性	61
本章小结	23	五、功率增益	62
习题 1	23	六、晶体管能输出的最大功率及增益	63
<b>第二章 宽频带放大器</b>		§ 3.3 多级单调谐放大器	65
§ 2.1 概述	25	一、多级放大器的增益和通频带	65
一、宽频带放大器的特点	25	二、多级放大器的矩形系数	66
二、宽频带放大器的技术指标	25	§ 3.4 双调谐回路放大器	67
三、宽频带放大器的分析方法	27	一、电压增益	68
§ 2.2 共射 RC 放大电路的高频特性	27	二、功率增益	70
一、共射 RC 放大电路的等效电路	27	三、通频带和选择性	71
二、电压增益与上限频率	30	四、多级双调谐回路放大器的级联	72
§ 2.3 用补偿法展宽频带	34	§ 3.5 调谐放大器的稳定性	74
一、基极回路补偿	34	一、单级调谐放大器的稳定条件	74
二、发射极回路补偿	36	二、中和与失配	77
三、集电极回路补偿	36	§ 3.6 调谐放大器电路举例	78
§ 2.4 负反馈宽频带放大器	39	一、分立元件的组合电路	78
一、单级负反馈电路	39	二、集成电路中频放大器	79
二、交替负反馈	41	§ 3.7 调谐放大器的调整 and 测试	83
三、两级负反馈放大器	42	一、谐振频率的调试	83
四、负反馈放大器的增益及上限频率	43	二、增益的测试	84

三、通频带的测试 .....	84	三、三点式电路的组成原则 .....	129
本章小结 .....	84	§ 5.5 改进型电容反馈三点式电路 .....	131
习题 3 .....	85	一、串联改进型电容反馈三点式电路	
<b>第四章 高频功率放大器</b>		——克拉泼电路 .....	131
§ 4.1 概述 .....	88	二、并联改进型电容反馈三点式电路	
一、放大器的输出功率与效率 .....	88	——西勒电路 .....	131
二、放大器的效率与工作状态的关系 .....	89	§ 5.6 集成电路振荡器 .....	133
三、谐振功率放大器 .....	89	§ 5.7 频率稳定与振幅稳定 .....	134
§ 4.2 丙类放大器的分析 .....	91	一、频率稳定度的含义 .....	134
一、丙类放大器各极电压和电流 .....	91	二、振荡器频率变化的原因 .....	135
二、集电极电流脉冲的分析 .....	92	三、稳频措施 .....	135
三、动态特性和负载特性 .....	94	四、振荡器的幅度稳定 .....	137
四、丙类放大器的近似估算 .....	98	§ 5.8 石英晶体振荡器 .....	137
五、调制特性和振幅特性 .....	100	一、概述 .....	137
§ 4.3 高频功率放大器的馈电电路及		二、石英谐振器及其等效电路 .....	138
耦合电路 .....	101	三、石英谐振器的稳频原理 .....	139
一、馈电电路 .....	101	四、石英晶体振荡器电路 .....	142
二、耦合电路 .....	102	五、使用石英谐振器注意事项 .....	144
§ 4.4 高频功率放大器的调谐和调整 .....	106	§ 5.9 RC 振荡器 .....	145
一、调谐 .....	106	一、串并联 RC 选频网络的频率特性 .....	145
二、调整 .....	107	二、文氏桥电路 .....	147
§ 4.5 宽频带高频功率放大器 .....	107	§ 5.10 自激振荡器的调整与测试 .....	149
一、传输线变压器 .....	108	一、LC 自激振荡器的调整与测试 .....	149
二、宽频带高频功率放大器电路举例 .....	111	二、晶体的测量 .....	149
§ 4.6 倍频器 .....	112	本章小结 .....	151
本章小结 .....	113	习题 5 .....	151
习题 4 .....	114	<b>第六章 频率变换与集成模拟相乘器</b>	
<b>第五章 正弦波自激振荡器</b>		§ 6.1 利用非线性器件进行频率变换 .....	159
§ 5.1 概述 .....	116	一、非线性特性的幂级数表示法 .....	159
§ 5.2 反馈式振荡器的工作原理 .....	116	二、单一余弦电压作用下的频率	
一、反馈式振荡器的组成 .....	116	变换作用 .....	161
二、振荡平衡条件 .....	117	三、两个不同频率余弦电压作用下的	
三、起振条件 .....	118	频率变换作用 .....	162
四、稳定条件 .....	121	§ 6.2 集成模拟相乘器 .....	162
§ 5.3 互感反馈振荡电路 .....	124	一、恒流可变差分放大器的相乘特性 .....	163
一、互感反馈振荡器的平衡条件 .....	124	二、双差分模拟相乘器 .....	165
二、实用电路 .....	125	三、实用集成模拟相乘器举例 .....	168
三、互感反馈振荡器的优缺点 .....	126	四、模拟相乘器的误差及使用	
§ 5.4 LC 三点式振荡电路 .....	126	注意事项 .....	171
一、电容反馈三点式电路——考毕兹		本章小结 .....	172
振荡器 .....	126	习题 6 .....	172
二、电感反馈三点式电路——哈特莱		<b>第七章 振幅调制及其解调</b>	
振荡器 .....	128	§ 7.1 调制概述 .....	173

§ 7.2 调幅波的性质 .....	174	五、模拟相乘器混频电路 .....	222
一、调幅波的波形 .....	174	§ 8.5 混频电路的调整 .....	222
二、调幅波的频谱 .....	175	本章小结 .....	224
三、调幅波中的功率关系 .....	176	习题 8 .....	225
§ 7.3 调幅技术 .....	178	<b>第九章 角度调制及解调</b>	
§ 7.4 模拟相乘器调幅电路 .....	179	§ 9.1 概述 .....	227
§ 7.5 平衡调幅器和环形调幅器 .....	181	一、调频波与调相波的数学表达式 .....	227
一、二极管平方律调幅 .....	181	二、调频波与调相波的波形 .....	229
二、平衡调幅器 .....	181	§ 9.2 单音信号调制的调频波 .....	230
三、平衡斩波调幅 .....	182	§ 9.3 窄带调频 .....	232
四、环形调幅器 .....	183	§ 9.4 宽带调频 .....	233
§ 7.6 单边带调幅 .....	184	§ 9.5 调频制与调幅制的比较 .....	235
§ 7.7 高电平调幅 .....	185	§ 9.6 直接调频 .....	236
一、基极调幅 .....	186	一、变容二极管 .....	236
二、集电极调幅 .....	187	二、变容二极管直接调频电路 .....	238
§ 7.8 解调概述 .....	188	§ 9.7 间接调频 .....	240
§ 7.9 小信号平方律检波 .....	189	一、间接调频原理 .....	240
§ 7.10 大信号包络检波 .....	191	二、间接调频电路 .....	241
一、工作原理 .....	191	§ 9.8 调频信号的解调 .....	243
二、性能分析 .....	193	§ 9.9 振幅鉴频器 .....	244
§ 7.11 同步检波 .....	197	一、斜率鉴频器 .....	244
§ 7.12 振幅调制器和检波器的测试 .....	199	二、差分峰值鉴频器 .....	245
一、集电极调幅器特性的测试 .....	199	§ 9.10 相位鉴频器 .....	246
二、大信号检波器特性的测试 .....	199	一、电感耦合相位鉴频器 .....	247
本章小结 .....	199	二、比例鉴频器 .....	248
习题 7 .....	200	三、乘积型相位鉴频器 .....	250
<b>第八章 混频器</b>		§ 9.11 鉴频特性曲线的调整 .....	253
§ 8.1 概述 .....	203	本章小结 .....	254
§ 8.2 晶体三极管混频器 .....	206	习题 9 .....	255
一、电路形式 .....	206	<b>第十章 数字信号的调制与解调</b>	
二、工作原理 .....	207	§ 10.1 概述 .....	257
三、等效电路及混频增益 .....	210	§ 10.2 脉冲编码调制 .....	258
四、电路举例 .....	212	一、脉冲幅度调制(PAM) .....	258
§ 8.3 混频器的干扰 .....	214	二、脉冲编码调制(PCM) .....	259
一、组合频率干扰 .....	214	§ 10.3 幅度键控及其解调 .....	260
二、副波道干扰 .....	216	§ 10.4 频移键控及其解调 .....	261
三、交叉调制(交调)干扰 .....	217	§ 10.5 相移键控及其解调 .....	263
四、互相调制(互调)干扰 .....	217	§ 10.6 多进制数字调制 .....	266
§ 8.4 二极管混频器和其他混频器 .....	218	本章小结 .....	268
一、平衡混频器 .....	218	习题 10 .....	268
二、环形混频器 .....	220	<b>第十一章 反馈控制电路</b>	
三、差分对管混频器 .....	221	§ 11.1 概述 .....	269
四、场效应管混频器 .....	221	§ 11.2 自动增益控制电路 .....	270

一、概述 .....	270	四、锁相环路的基本特性 .....	284
二、放大器增益控制 .....	271	§ 11.6 集成锁相环及其应用 .....	284
三、AGC 控制电压的产生 .....	274	一、CC4046 集成锁相环 .....	284
§ 11.3 自动频率微调 .....	275	二、锁相倍频和分频 .....	287
§ 11.4 锁相环路 .....	276	三、锁相调频和鉴频 .....	288
一、鉴相器 .....	277	四、锁相接收机 .....	289
二、环路滤波器 .....	279	五、彩色电视中彩色副载波的提取 .....	289
三、压控振荡器 .....	279	六、数字通信中同步信息的提取 .....	290
四、锁相环路的相位模型 .....	280	§ 11.7 锁相频率合成 .....	290
§ 11.5 锁相环路的捕捉、锁定与跟踪 .....	281	本章小结 .....	294
一、锁相环路的捕捉与锁定过程 .....	281	习题 11 .....	294
二、锁相环路的跟踪 .....	283	参考文献 .....	296
三、锁相环路的窄带特性 .....	284		



## 绪 论

无线电电子技术的基础是电磁学。英国物理学家 J. C. 麦克斯韦(J. Clerk Maxwell)在 1864 年发表了名为“电磁场的动力理论”的著名论文,在总结前人工作经验的基础上,导出电磁场方程,从理论上证明了电磁波的存在。1887 年德国物理学家 H. 赫兹(H. Hertz)在实验中证明了电磁波的存在。此后,许多科学家都努力研究如何利用电磁波传输信息,即无线电通信。其中以意大利的 G. 马可尼(Guglielmo Marconi)贡献最大,他在 1895 年首次成功地用电磁波进行了通信。此后无线电电子学技术应用领域迅速扩大,但是信息的传输与处理仍是它的主要内容。

无线电电子学的发展,使它有了许多分支。作为无线电技术专业的学生,为了更好地学习专业知识,必须熟练地掌握无线电技术的基础知识。电子线路课是最重要的专业基础课程之一。

各类电子设备和系统都是由一些基本的电子线路所组成。这些电子线路的功能是各式各样的,诸如信号的发生、传输和放大,信号的加工处理,能量的转换,信息的存贮等等。

由于各种基本电子线路的功能不同,它们的组成以及工作状态也是不同的。但它们都是由电子器件和相应的电路元件所组成。如果在一块很小的硅片上集中制成某电路所需的半导体器件和元件,组成一块独立的完整的电路,完成某项功能,这种电路称为集成电路;如果电子器件与电路元件是分开的,依靠导线连接成完整的电路,则称为分立元件电路。不管是哪一种电路,电子器件都是构成电子线路的核心。

电子器件有电子管、晶体管以及场效应管等。它们在各种电子线路中的作用及工作状态是不同的。特别是当频率不同时,它们呈现出很大的差异。以双极性晶体管而言,在低频;即几千赫兹以下时,基本上可以用电阻网络来模拟,例如晶体管的  $H$  参数网络模型。但随着频率的升高,例如到几十千赫或几百千赫以上时,由于晶体管的结电容效应不能再忽视,这时它的工作情况就不同了。这些内部电容,大多和晶体管的体电阻及接触电阻相串联,工作时将发生充电和放电现象,从而使输出电压波形与输入电压波形产生差异,降低增益,发生相移,限制了工作频率的进一步提高。同时,载流子的运动速度也是有限的。在真空电子管中,电子以平均热速度从阴极发出,这个速度取决于阴极的温度。虽然电场能使电子加速,但电子速度通常仍远低于光速。在充气电子管中,电子或离子和气体分子互相碰撞,因此它们的平均速度是有限的,这取决于气体密度。在半导体(晶体管和场效应管)中,载流子的运动同样要受到阻碍,甚至更加严重。在常用的半导体器件中,在室温并正常掺杂的情况下,载流子饱和漂移速度约为  $10^7$  cm/s<sup>[8]</sup>。但半导体器件中的载流子通常是以扩散的形式运动的,扩散运动的速度远低于饱和漂移速度。既然载流子的运动速度有限,因此在各类电子器件中,载流子从一个极渡越到另一个极就需要时间。当渡越时间和振荡周期可以相比拟时,输出波形与输入波形将产生新的差异。此外,在高频时,引线电感、分布电容等等也都将影响电子器件的正常工作。由此可见,一些在低频电子线路中被忽略的现象,在高频电子线路中就必须考虑了。

当频率再升高,例如到分米波段(频率高于 300 MHz 以上)时,各种电路参数(如电感

L、电容 C 等)将不再是集中参数,而成为分布参数。这时的电路又具有新的特色。这已不属于高频电子线路研究的范畴。

本书将讨论一些工作在高频(大体指 300 kHz~30 MHz 之间)时的基本单元电路的工作原理、一般计算与调试方法。这些电路有:宽频带放大器、小信号调谐放大器、正弦波自激振荡器、高频功率放大器、调幅器、检波器、混频器、倍频器、调频器、鉴频器等。这些基本电路广泛应用于各种电子设备及系统中。为了在讨论各种具体单元电路之前,对它们的作用及应用场合有一概括的了解,我们以通信系统为例,作简单介绍。

一个完整的通信系统应包括信号源、发送设备、传输信道、接收设备和终端装置等 5 部分,如图 0-1 所示。传输信道可以是架空明线或电缆,也可以是传输无线电波的自由空间。前者称为有线电通信,后者称为无线电通信。

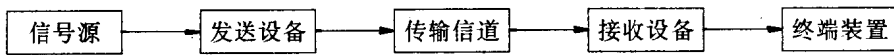


图 0-1 通信系统方框图

现简要说明通信过程。

通信系统所传送的信息可以是声音,也可以是图像。在利用有线电或无线电进行通信之前,应首先把要传送的声音信息或图像信息变为电信号。这个电信号就是信号源。微音器可以把语音变为电压波,其变化的规律应与语音变化的规律相同,如图 0-2 所示。这样一种变化复杂的电压波,利用频谱分析的方法分析比较简明。语音信号的频谱可以用“频

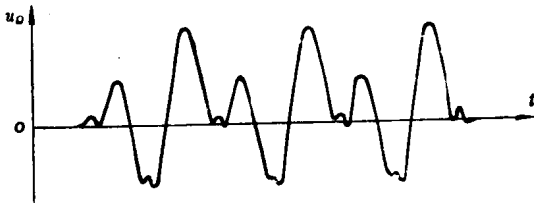


图 0-2 语音信号的波形

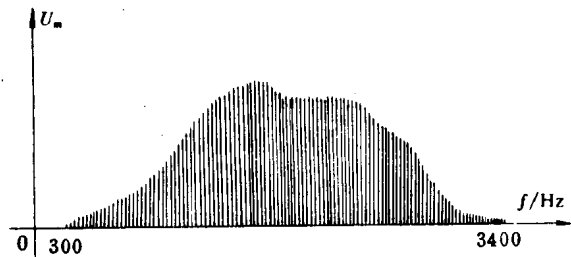


图 0-3 话路信号频谱示意图

谱分析仪”来测量。实验结果表明,语音的频率范围大约在一二百赫到几千赫之间。在电话通信中规定从 300 Hz 到 3 400 Hz(或 2 700 Hz)为一个话路,一般讲话的主要频率成分均落在这个范围里。若以频率为横坐标,振幅为纵坐标,画出各个频率分量的振幅分布图,就称为频谱图。图 0-3 为一个话路信号的频谱示意图。频谱图可以直观地了解信号的频率组成和它们之间的强弱关系。从图可见,语音信号是一个连续的频谱。也就是说,在 300 Hz~3 400 Hz 范围内,各频率分量都有。但是,它们的幅度是不同的。不同的人在不同的情况下,发出的语音是不同的,频谱也是不同的。但不管怎样,总的频带宽度大致在这个范围以内。

雷达、电视、电报以及数字电路中的脉冲信号,也同样可以用频谱法来分析。分析的结果证明,它们的频率范围要比语音信号宽得多。例如电视图像信号的频谱,约在 0~

6 MHz范围之内。

以上频率范围内的电信号，可以方便地利用电子线路进行放大。例如语音信号(称为音频信号)可利用音频放大器放大；电视图像信号(称为视频信号)可利用视频放大器放大。经过放大的信号可以利用导线传送，再经终端设备恢复为原来的声音或图像，这就是通常的有线电通信。

无线电通信不用导线，利用自由空间传播信息。但语音信号或图像信号是不可能直接送到天空中去的。我们知道，交变的电磁振荡可以通过天线向空中辐射电磁波。但是，只有当天线的尺寸与交变电磁振荡的波长可以相比拟时，才能进行有效的辐射。若语音信号的频率为  $300 \sim 3400$  Hz，则相应的波长为  $1000 \sim 88$  km。天线尺寸如此巨大，当然是不现实的。因此，要进行无线电通信，必须利用高频振荡，其波长应与实际天线尺寸相接近。同时，还要设法使此高频振荡“携带”着要传送的信号，并使它从天线辐射出去。

通信系统中的发送设备就是完成上述任务的。一般发送设备的组成框图如图 0-4 所示。它包含以下几个部分：

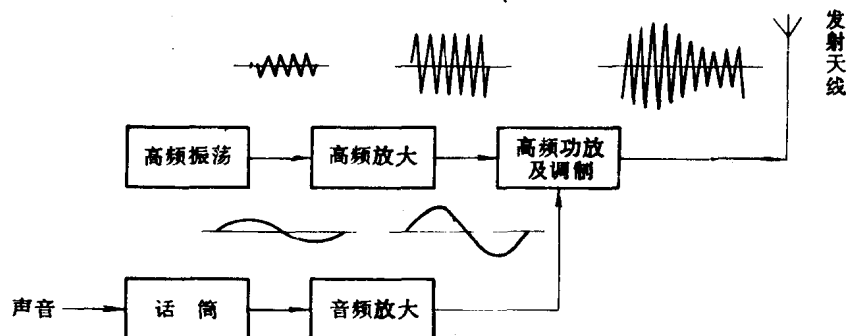


图 0-4 发送设备方框图

**高频振荡器**——用来产生波长足够短的高频电振荡，其振荡频率应在几百千赫以上，振荡波称为载波；

**高频放大器**——将高频振荡放大到足够强；

**音频放大器**——将语音信号放大到足够大；

**高频功放及调制器**——将高频振荡进一步放大，同时把音频信号“装载”到载波之上，这一过程称为调制；

**天线**——把已携带音频信号的足够强大的高频振荡信号(称为已调波)辐射到空中去，以便向四面八方传送。

图 0-5 为已调波形图。(a) 图为载波信号；(b) 图为音频信号，为了简单，假设音频信号为一正弦波；(c) 图为已调波。从图可见，已调波的振幅随音频信号的变化而变化，而其频率仍为高频。由于已调波的幅度随着音频而变，因此称为调幅波。它已反映了音频信号的内容。这种用单一简谐信号调制的调幅波，可以用三角公式简单地进行分解。设载波为

$$u_c = U_{cm} \cos \omega_c t \quad (0-1)$$

式中， $u_{cm}$  是高频振荡的瞬时值； $U_{cm}$  是它的振幅； $\omega_c$  是它的角频率。

假设音频信号也是一个余弦波，它的表示式为

$$u_a = U_{am} \cos \Omega t \quad (0-2)$$

式中  $U_{\Omega m}$  为音频信号振幅； $\Omega$  为音频信号角频率。

调制后，载波信号的振幅随音频信号电压而变化，则已调波的表示式为

$$u = U_{cm}(1 + M_a \cos \Omega t) \cos \omega_c t \quad (0-3)$$

式中  $M_a$  为调幅系数。调幅后的已调波可用三角公式分解为

$$u = U_{cm} \cos \omega_c t + \frac{M_a}{2} U_{cm} \cos(\omega_c + \Omega)t + \frac{M_a}{2} U_{cm} \cos(\omega_c - \Omega)t \quad (0-4)$$

由式(0-4)可见，已调波既不是原来的音频信号，也不是单纯的载波信号，而是包含若干个频率分量(这里只有三个分量)的高频电振荡。式(0-4)的三个分量中角频率最低的是  $(\omega_c - \Omega)$ ，角频率最高的是  $(\omega_c + \Omega)$ 。因此频带宽度  $BW$  为

$$BW = \frac{\omega_c + \Omega - (\omega_c - \Omega)}{2\pi} = 2F \quad (0-5)$$

如果调制的音频信号为具有一定频带的信号，例如从 300 Hz 到 3 400 Hz，则已调波的频带宽度将等于两倍的最高调制频率。即带宽为  $BW = 2 \times 3\ 400 = 6\ 800$  Hz。

通信系统的另一个组成部分是接收设备。接收设备的任务是把收到的电磁波，变换成电动势，进行放大，再还原成原调制信号，传送到终端设备。图 0-6 为简单的接收设备方框图。它包含以下几个部分：接收天线——它可以接收从空中传来的电磁波；高频放大器——它的作用有二，一是从接收到的许许多多电台信

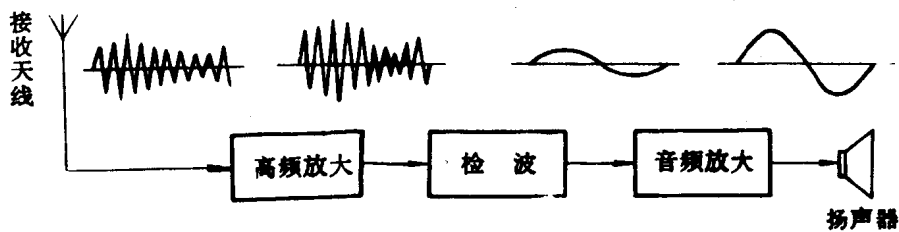


图 0-6 接收设备方框图

号中选择出一个我们所需要的电台信号，二是把所选中的信号进行放大；检波器——它的作用是解除调制，即进行信号的还原，从已调波中取出调制音频信号；音频放大器——把检出的音频信号进行放大，以便推动终端设备，此处是扬声器。

通过以上对通信系统的简单介绍知道，发送设备和接收设备中都包含有工作在高频的基本电子线路。这些基本电路都是本书的研究对象。

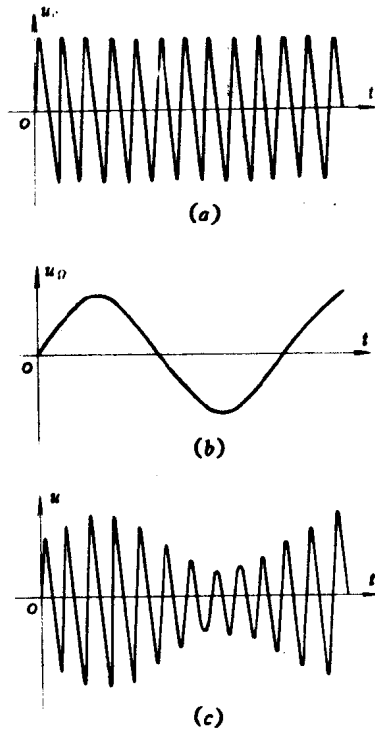


图 0-5 已调波形图  
(a) 载波信号；(b) 音频信号；  
(c) 已调波

## 习 题

- 0-1 为什么频率提高以后，晶体管的特性与低频时不同？
- 0-2 试简要说明无线电通信的过程。
- 0-3 为什么在无线电通信中要进行调制？什么叫调幅？画出用方波进行调幅时已调波的波形。
- 0-4 发送设备由哪几部分组成？试大略画出各部分的波形。
- 0-5 接收设备中，检波器的作用是什么？试画出检波前后的信号波形。

# 第一章 晶体管高频等效电路

## § 1.1 概 述

电子线路是由一些电阻器、电容器、二极管、晶体管、场效应管、集成电路等组成的。从广义上讲，这些都属于组成电路的元件。我们设计各种电路元件，其目的是想利用它们的主要物理特性。但实际制造出来的元件，通常不可能做到只具有一种物理特性。例如，作为一种二端元件的电阻器，它的主要特性应该是变电能为热能的耗能元件，它的端电压  $u$  应该只取决于流过电阻器的电流  $i$ 。但是，这个特性只是近似的，因为任何电流都要建立磁场，这就使得任何一个电阻器只要其中有电流通过，都要在磁场中存贮一些能量。也就是说，电阻并不单纯是一种耗能元件，同时还具有贮能元件的特性。通常这种贮存的能量与消耗的能量相比是很小的，在分析和设计时可以略而不计。这样，从近似的意义上来说，我们认为电阻器可以用服从于欧姆定律的理想电阻模型表示。我们在电路图中看到的电阻的符号，就是实际电阻器的模型。线性电阻器的特性曲线是一条在  $i \sim u$  平面上的不随时间而变化的经过原点的直线，即

$$u = R \cdot i \quad (1-1)$$

显然，式(1-1)为线性方程式，即欧姆定律。图1-1为线性电阻的特性曲线，图中注明的斜率  $R$  称为电阻。

线性电感器是一种贮能元件。当有电流  $i_L$  通过时，它的磁通量为

$$\Phi = L \cdot i_L \quad (1-2)$$

当磁通量  $\Phi$  变化时，感生的支路电压  $u_L$  为

$$u_L = \frac{d\Phi}{dt} = L \frac{di_L}{dt} \quad (1-3)$$

实际电感器还存在着损耗电阻以及分布电容。在频率不太高时，往往可以用理想电感来作为实际电感器的模型。其特性方程即式(1-3)表示的线性电感

方程。直流工作时，可以视电感为短路，或用  $0.1 \Omega$  的电阻代替电感。

线性电容器是另一种贮能元件。它存贮的是电场能。电容器极板上存贮的电荷量与其两端的电压成正比

$$q = C \cdot u_C \quad (1-4)$$

当存贮的电荷  $q$  发生变化时，产生的电容电流  $i_C$  为

$$i_C = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_C}{dt} \quad (1-5)$$

这就是线性电容支路的特性方程。当忽略引线电感及损耗电阻时，即可用式(1-5)表示电容器的特性。直流工作时，可以视电容为开路，或用  $10^7 \Omega$  的电阻代替电容。

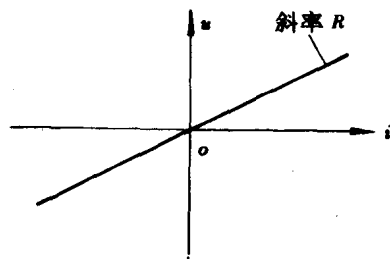


图 1-1 线性电阻的特性曲线

以上是三种无源元件的模型，它们大都是线性元件，因而模型及数学表达式都是简单的。

有源元件(如晶体管、MOS管等)工作机理比较复杂，而且大都是非线性的，模型也比较复杂。特别是当工作情况及外部条件不同时，它们的特性也往往不相同。因此在用模型来模拟有源元件时，必须认真对待。首先是模型的精度问题，也就是说一个有源元件的模型应该具有怎样的结构和多高的精度才能满足要求。我们知道，电路分析的精度最多只能跟元件模型的精度在同一个水平上。从这一点看，模型的精度当然是高一些好。但实际上，在很多情况下使用简单的近似的模型也就足够了。这是因为工厂通常不可能生产出既廉价又精确地实现所需特性的各种有源元件，而且制造出来的有源元件的参数又有一定的分散性。工厂只能标明同一类型元件参数的最大值、最小值和一些典型值。例如，在同型号的一批晶体管中可能找不到两只特性完全相同的晶体管。在这样的情况下，一味追求建立一个精确的模型代替某一类有源元件，显然是毫无意义的。

但是，我们在拟定有源元件的模型时，对其在特定工作状态下的主要特性，必须尽可能准确表达。

晶体管、MOS管等电子器件工作在大信号时，是非线性元件。但在小信号运用的情况下，仅仅工作在特性曲线的一小段(如图1-2所示的 $ab$ 段)，则电子器件可近似视为线性元件。这样，在小信号运用的条件下，可以用线性元件组成的电路模型来模拟晶体管。有了这种模型，分析电路就很方便了。晶体管的这种模型称为微变参量等效电路，简称等效电路。

晶体管模型的建立有两种方法：一是根据晶体管内部发生的物理过程拟定模型；再一是把晶体管视作具有多个端子的“黑箱”，先从外部端子列出电流和电压的方程式，然后拟定满足方程的网络模型。由此便可得到两类模型，前者称为物理参数模型，后者称为网络参数模型。

晶体管在低频运用时，其电容效应往往可以忽略，因此等效电路中可以不考虑电容。在高频运用时，电容效应不容忽视。显然，晶体管高频等效电路与低频等效电路是不同的。

放大器的等效电路是以电子器件的等效电路为核心，加上有影响的外部电路元件所组成。必须指出，电子器件的微变参量等效电路只是对外部电路的交流分量而言，只能解决交流分量的计算问题，不能用来确定电子器件的静态工作点。应用微变参量等效电路分析法，可以把我们熟知的电路理论与电子器件的特性结合起来，能够有效地解决许多实际问题，是分析电子线路的一个十分有用的方法。

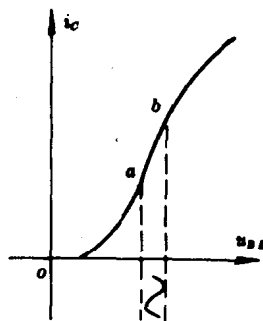


图1-2 在小信号运用下的晶体管转移特性

## § 1.2 晶体管物理参数及等效电路

### 一、PN结二极管的等效电路

晶体三极管包含两个PN结，所以我们先从PN结的等效电路讲起。

PN 结二极管对交流小信号而言，其等效电路如图 1-3 所示。等效电路中的每一个元件都对应一种物理过程，因此这样的等效电路就是物理参数模型。其中  $r_j$  为模拟 PN 结对交流小信号呈现的电阻，相当于工作点  $Q$  处的特性曲线的斜率的倒数（如图(c)）； $C_T$  为模

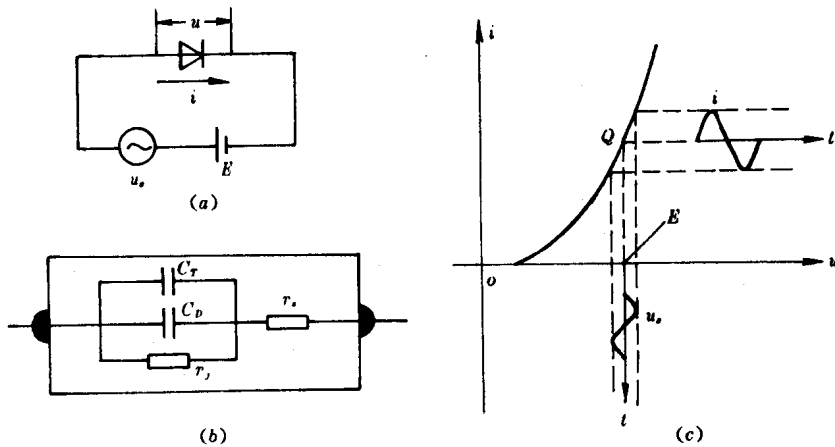


图 1-3 PN 结二极管及其等效电路

(a) 二极管电路；(b) 等效电路；(c) 特性曲线

拟 PN 结的势垒电容； $C_D$  为模拟扩散电容。在等效电路中这三者是并联的。 $r_j$  为模拟二极管的串联电阻，它包括 P 区、N 区的体电阻以及电极引线的接触电阻。当直流工作点确定后，等效电路中各元件的数值都是确定值。若二极管正向偏置，则结电阻  $r_j$  可用下式计算：

$$r_j = \frac{kT}{qI_Q} \quad (1-6)$$

式中  $k$ ——波尔兹曼常数，其值为  $1.380 \times 10^{-23}$  J/K；

$T$ ——热力学温度；

$q$ ——电子的电荷量，其值为  $1.602 \times 10^{-19}$  C；

$I_Q$ ——偏置在  $Q$  点的静态电流。

在  $T=300$  K (即室温) 时， $kT/q \approx 26$  mV，因此

$$r_j \approx \frac{26(\text{mV})}{I_Q(\text{mA})} \quad (\Omega) \quad (1-7)$$

由上式可见， $r_j$  的大小取决于工作点的电流。若二极管反向偏置，则结电阻可视为无穷大（即电路开路）。在 PN 结正偏时，扩散电容  $C_D$  比较大，起主要作用；反偏时， $C_D$  比较小，因而势垒电容  $C_T$  起主要作用。

## 二、晶体管共射混合 II 型等效电路

晶体三极管由两个 PN 结构成，具有放大作用，因此它并不是两个 PN 结的简单相连。那么，怎样来模拟三极管中所发生的主要物理过程呢？下面讨论共发射极（以下简称共射极）的晶体管物理参数模型。

三极管的两个 PN 结可以各用一个 PN 结二极管的等效电路表示，即图 1-4 中的  $r_{e-c} - C_{b'e} - r_{b'e}$  和  $r_{e-c} - C_{b'e} - r_{b'e}$ 。基极引线接触电阻及基区体电阻用  $r_{bb'}$  来模拟。 $b'$  称为有效基极。



受控电流源  $g_m U_{b'e}$  模拟晶体管的放大作用。 $r_{ce}$  模拟输出电阻,  $C_{ce}$  模拟输出电容。

把图 1-4 所示的共射晶体管的物理模型画成的电路(如图 1-5 所示), 称为混合  $\Pi$  型等效电路。电路中如果去掉  $r_{bb'}$ , 就是一个  $\Pi$  型网络。这个等效电路考虑了结电容效应, 因此它适用的频率范围可以到高频段。但当频率很高, 以至引线电感和载流子渡越时间不能忽略时, 这个等效电路就不适用了。一般来说, 它适用的最高频率约为  $f_T/5$ 。 $f_T$  称为晶体管的特征频率, 其数值可从晶体管手册中查出, 物理意义将在 § 1.3 中介绍。

下面对混合  $\Pi$  型等效电路的各个参数进行分析。

(1) 基区电阻  $r_{bb'}$ 。 $r_{bb'}$  是指从基区引线到有效基区间的电阻。从图 1-6 可见, 基极电流  $i_b$  主要由进入基区的多数载流子构成。这些多数载流

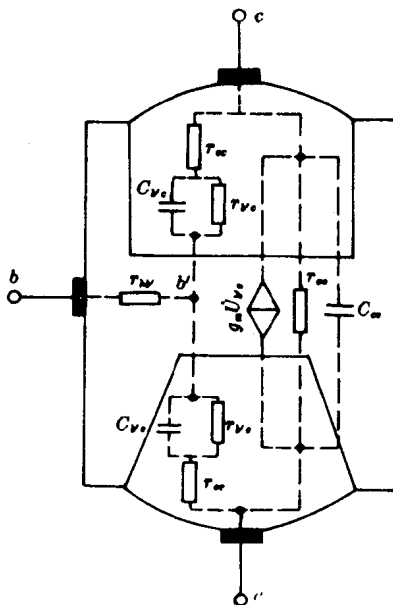


图 1-4 共发射极晶体管的物理模拟

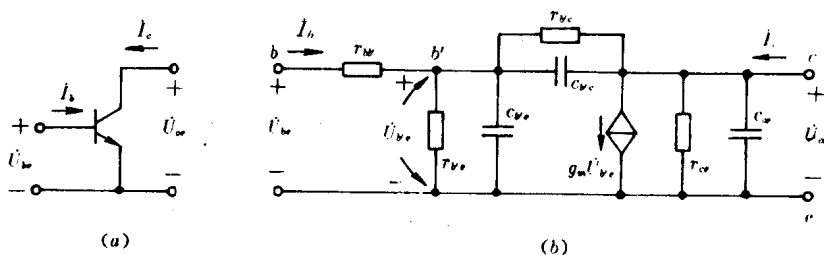


图 1-5 共射混合  $\Pi$  型等效电路

(a) 共射电路; (b) 等效电路

子是用来补充那些由于与少数载流子复合而损失掉的多数载流子。多数载流子以垂直于晶体管主电流的方向漂移。由于基区掺杂轻而具有较大的电阻, 故沿着多数载流子流动的路程将产生电压降。因此, 实际的发射结电压  $U_{b'e}$  比输入电压  $U_{be}$  要低。产生压降的原因用附加电阻  $r_{bb'}$  来模拟。图 1-6 中的有效基区是指发射极与集电极间的那个薄层。

一般手册中给出了某些高频管的  $r_{bb'}$ , 其值在几十欧到一百欧, 甚至更

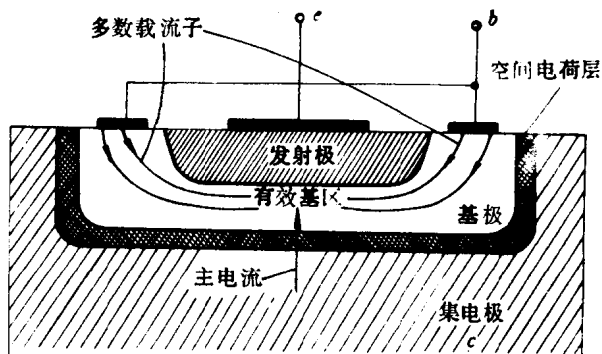


图 1-6 多数载流子在基区中的流动