

高等学校教材

# 高频电子线路

(第二版)

上册

张肃文 主编

高等教育出版社

高等学校教材

# 高频电子线路

(第二版)

下 册

张肃文 主编

高等教育出版社

本书是在第一版基础上,遵循“打好基础,精选内容,逐步更新,利于教学”的原则,按照教育部审定的高等工业学校《电子线路(I)(II)教学大纲(草案)》修订而成的,作为高等学校无线电技术类专业的教材,也可供从事无线电技术工作的科技人员参考。

本书较详细地介绍了高频电子线路的基本原理和分析方法,引入了一些较新的内容,注意理论联系实际。各章附有思考题、习题及部分习题答案。

全书共十三章,分上、下册。

上册内容有无线电信号传输原理、串并联谐振回路和耦合回路、高频小信号放大器、放大电路的噪声、非线性与时变参量电路分析方法、高频功率放大器、正弦波振荡器。

下册内容有振幅调制、振幅解调、变频、参变现象与时变电抗电路、角度调制、调频信号的解调、频率合成与锁相技术。

**责任编辑 谭骏云**

高等学校教材  
**高频电子线路**  
(第二版)  
上册  
张肃文 主编

\*

高等教育出版社出版  
新华书店北京发行所发行  
北京新华印刷厂印装

\*

开本 850×1168 1/32 印张16.5 字数 399,000

1979年6月第1版 1984年1月第2版 1984年8月第1次印刷

印数 00,001—17,300

书号 15010·0556 定价 2.55 元

## 内 容 提 要

本书是在第一版基础上,遵循“打好基础,精选内容,逐步更新,利于教学”的原则,按照教育部审定的高等工业学校《电子线路(I)(II)教学大纲(草案)》修订而成的,作为高等学校无线电技术类专业的教材,也可供从事无线电技术工作的科技人员参考。

本书较详细地介绍了高频电子线路的基本原理和分析方法,引入了一些较新的内容,注意理论联系实际。各章附有思考题、习题及部分习题答案。

全书共十三章,分上、下册。

上册内容有无线电信号传输原理、串并联谐振回路和耦合回路、高频小信号放大器、放大电路的噪声、非线性与时变参量电路分析方法、高频功率放大器、正弦波振荡器。

下册内容有振幅调制、振幅解调、变频、参变现象与时变电抗电路、角度调制、调频信号的解调、反馈控制电路与频率合成技术。

**责任编辑 谭骏云**

高等学校教材  
**高频电子线路**  
(第二版)  
下 册  
张肃文 主编

\*  
高等教育出版社出版  
新华书店北京发行所发行  
北京新华印刷厂印装

\*  
开本 850×1168 1/32 印张 14 字数 338,000

1980年12月第1版 1984年3月第2版

1984年9月 第1次印刷

印数 00,001—16,800

书号 15010·0574 定价 2.15 元

# 目 录

## 第二版序言

## 第一版序言

绪论	1
§ 1 无线电信号传输原理	1
1-1 传输信号的基本方法	2
1-2 无线电信号的产生与发射	5
1-3 无线电信号的接收	9
§ 2 无线电信号的传播	11
第一章 串并联谐振回路和耦合回路	16
§ 1.1 串并联谐振回路	16
1.1-1 概述	16
1.1-2 串联谐振回路	17
1.1-3 并联谐振回路	29
1.1-4 串并联阻抗的等效互换和回路抽头时阻抗的变比关系	36
*1.1-5 谐振回路的相频特性——群时延特性	41
§ 1.2 耦合振荡回路	46
1.2-1 概述	46
1.2-2 互感耦合回路的等效阻抗	48
1.2-3 耦合回路的调谐特性	52
1.2-4 耦合回路的频率特性	57
1.2-5 耦合回路等效电路的串并联互换	63
参考资料	68
思考题与习题	68
第二章 高频小信号放大器	73
§ 2.1 概述	73
§ 2.2 晶体管高频小信号等效电路与参数	78
2.2-1 高频小信号等效电路	78
2.2-2 晶体管的高频参数	90
§ 2.3 晶体管谐振放大器	94

2.3-1	单调谐回路谐振放大器	94
*2.3-2	多级单调谐回路谐振放大器	106
*2.3-3	双调谐回路谐振放大器	110
*2.3-4	多级双调谐回路谐振放大器	118
*2.3-5	参差调谐放大器	120
2.3-6	集成电路谐振放大器	126
§ 2.4	谐振放大器的稳定性	128
2.4-1	稳定性分析	128
2.4-2	单向化	134
2.4-3	共发-共基级联放大器的分析	137
§ 2.5	非调谐回路式高频小信号放大器	143
2.5-1	概述	143
2.5-2	LC 集中选择性滤波器	144
2.5-3	石英晶体滤波器	146
2.5-4	陶瓷滤波器	154
2.5-5	表面声波滤波器	157
§ 2.6	场效应管高频小信号放大器	165
参考资料		170
思考题与习题		170
<b>第三章</b>	<b>放大电路的噪声</b>	<b>176</b>
§ 3.1	概述	176
3.1-1	工业干扰	177
3.1-2	天电干扰	180
§ 3.2	内部噪声的特点和来源	181
3.2-1	内部噪声的特点	181
3.2-2	电阻热噪声	187
3.2-3	天线热噪声	191
3.2-4	晶体管的噪声	192
3.2-5	场效应管的噪声	197
§ 3.3	噪声的表示和计算	199
3.3-1	等效噪声频带宽度	199
3.3-2	噪声系数	202
3.3-3	噪声温度	206
3.3-4	多级放大器的噪声系数	207

3.3-5 晶体管放大级的噪声系数	209
3.3-6 场效应管放大级的噪声系数	213
3.3-7 减小噪声系数的措施	215
*3.3-8 噪声系数的测量	217
参考资料	222
思考题与习题	222
<b>第四章 非线性与时变参量电路的分析方法</b>	<b>224</b>
§ 4.1 概述	224
§ 4.2 非线性元件的特性	227
4.2-1 非线性元件的工作特性	228
4.2-2 非线性元件的频率变换作用	233
4.2-3 非线性电路不满足叠加原理	235
§ 4.3 非线性电路分析法	236
4.3-1 幂级数分析法	236
4.3-2 指数函数分析法	244
4.3-3 折线分析法	246
§ 4.4 时变参量电路分析法	249
4.4-1 时变跨导电路分析	250
4.4-2 模拟乘法器电路分析	252
4.4-3 开关函数分析法	255
§ 4.5 几种主要非线性过程	258
参考资料	264
思考题与习题	264
<b>第五章 高频功率放大器</b>	<b>269</b>
§ 5.1 概述	269
§ 5.2 谐振功率放大器的工作原理	272
5.2-1 获得高效率所需要的条件	273
5.2-2 功率关系	279
§ 5.3 晶体管谐振功率放大器的折线近似分析法	281
5.3-1 晶体管特性曲线的理想化及其解析式	281
5.3-2 集电极余弦电流脉冲的分解	283
5.3-3 高频功率放大器的动态特性与负载特性	287
5.3-4 各极电压对工作状态的影响	293

5.3-5	工作状态的计算(估算)举例	295
§ 5.4	晶体管功率放大器的高频特性	297
5.4-1	高频等效电路	297
5.4-2	各极电流的波形	299
§ 5.5	高频功率放大器的馈电线路	303
§ 5.6	功率放大器的输出回路与级间耦合回路	307
5.6-1	输出匹配网络	308
5.6-2	输入匹配网络与级间耦合网络	319
§ 5.7	宽带高频功率放大器	322
§ 5.8	功率合成器	334
5.8-1	功率合成与分配网络应满足的条件	334
5.8-2	功率合成(或分配)网络原理	336
5.8-3	反相功率合成电路	343
5.8-4	同相功率合成电路	344
*5.8-5	其它形式的混合网络	346
*5.8-6	用高频变压器的功率合成电路	349
* § 5.9	晶体管高频丁类放大器	350
§ 5.10	半导体管倍频器	359
§ 5.11	高频功率晶体管的损坏原因与保护措施	363
附录 5.1	高频功率晶体管的构造特点	367
附录 5.2	余弦脉冲系数表	372
	参考资料	374
	思考题与习题	375
<b>第六章</b>	<b>正弦波振荡器</b>	<b>378</b>
§ 6.1	概述	378
§ 6.2	振荡器的基本工作原理	379
6.2-1	产生振荡的基本原理与分析方法	379
6.2-2	自激振荡的建立过程	382
6.2-3	振荡器的平衡条件	385
6.2-4	振荡器平衡状态的稳定条件	391
§ 6.3	反馈型 LC 振荡器线路	398
6.3-1	晶体管 LC 振荡器线路	399
6.3-2	LC 三端式振荡器相位平衡条件的判断准则	408



6.3-3	高稳定度的 $LC$ 振荡器电路	409
6.3-4	场效应管振荡器	417
§ 6.4	振荡器的频率稳定原理	418
6.4-1	频率稳定度的意义及定义	418
6.4-2	对引起频率不稳定因素的分析	422
*6.4-3	稳定频率的方法	427
* § 6.5	负阻振荡器	436
6.5-1	负阻的基本概念与器件的负阻特性	436
6.5-2	负阻振荡原理	440
6.5-3	负阻振荡器线路	444
§ 6.6	石英晶体振荡器	447
6.6-1	概述	447
6.6-2	石英谐振器的阻抗频率特性	448
6.6-3	石英晶体振荡器线路	454
§ 6.7	几种振荡现象的分析	468
6.7-1	寄生振荡现象的产生与消除	468
6.7-2	自偏压建立过程与间歇振荡现象	472
*6.7-3	频率占据现象	475
*6.7-4	频率拖曳现象	478
§ 6.8	$RC$ 振荡器	481
6.8-1	$RC$ 相移振荡器	482
6.8-2	文氏电桥振荡器	486
附录 6.1	几种 $LC$ 振荡器的振荡频率与起振条件公式的证明	492
附录 6.2	$RC$ 相移振荡器的振荡频率与起振条件公式的证明	498
	参考资料	498
	思考题与习题	499
	习题答案(上册部分)	510

# 目 录

<b>第七章 振幅调制</b> .....	515
§ 7.1 概述.....	515
§ 7.2 调幅波的性质.....	520
7.2-1 调幅波的波形.....	520
7.2-2 调幅波的数学表示式.....	522
7.2-3 调幅波的频谱.....	524
7.2-4 调幅波中的功率关系.....	529
§ 7.3 平方律调幅.....	530
7.3-1 工作原理.....	530
7.3-2 平衡调幅器.....	533
§ 7.4 差分对振幅调制器.....	536
§ 7.5 斩波调幅.....	539
7.5-1 工作原理.....	539
7.5-2 实现斩波调幅的两种电路.....	542
§ 7.6 单边带信号的产生.....	544
7.6-1 单边带通信的优缺点.....	544
7.6-2 产生单边带信号的方法.....	545
§ 7.7 已调波放大.....	553
§ 7.8 集电极调幅.....	557
7.8-1 工作原理.....	557
7.8-2 调制特性.....	561
7.8-3 功率与效率.....	563
§ 7.9 基极调幅.....	569
7.9-1 工作原理.....	569
7.9-2 工作状态的选择.....	571
7.9-3 功率与效率.....	572
§ 7.10 多重调制原理.....	576
7.10-1 两级集电极调制电路.....	578
7.10-2 集电极-发射极双重调制.....	579

参考资料	580
思考题与习题	581
<b>第八章 调幅信号的解调(检波)</b>	<b>583</b>
§ 8.1 概述	583
8.1-1 检波器的作用和分类	583
8.1-2 对检波器的要求——质量指标	585
§ 8.2 小信号检波(平方律检波)	588
8.2-1 工作原理	588
8.2-2 小信号检波器的主要质量指标和优缺点	590
§ 8.3 大信号检波(峰值包络检波)	591
8.3-1 大信号检波器的工作原理	592
8.3-2 大信号检波器的定量分析	594
8.3-3 大信号检波器的质量指标	598
*8.3-4 元件选择与设计原则	608
8.3-5 二极管并联检波器	612
*8.3-6 视频检波和脉冲检波的特点	613
§ 8.4 乘积检波器	618
8.4-1 乘积检波器的工作原理和应用	619
8.4-2 平衡型乘积检波器及其电路	622
8.4-3 本地载波的产生方法以及频率和相位关系	623
*§ 8.5 单边带信号的接收	624
参考资料	627
思考题与习题	627
<b>第九章 变频</b>	<b>630</b>
§ 9.1 变频器的作用、工作原理和质量指标	630
9.1-1 概述	630
9.1-2 变频器的作用	631
9.1-3 变频器的工作原理	633
9.1-4 变频器的质量指标	638
§ 9.2 晶体管混频器	640
9.2-1 工作原理和电路组态	640
9.2-2 晶体管混频器的分析	642
9.2-3 晶体管混频器和变频器的具体电路以及工作状态的选择	656

§ 9.3 二极管平衡混频器和环形混频器	660
9.3-1 二极管平衡混频器的工作原理	661
9.3-2 二极管(单管)开关混频原理	662
9.3-3 二极管平衡混频器开关状态的应用	667
9.3-4 环形混频器(或称双平衡混频器)	668
9.3-5 分裂式平衡混频器	673
§ 9.4 差分对混频器	676
§ 9.5 混频器的干扰	677
9.5-1 组合频率干扰(干扰哨声)和副波道干扰	677
9.5-2 交叉调制(交调)	681
9.5-3 互相调制(互调)	683
9.5-4 阻塞干扰	685
9.5-5 相互混频(或称“倒易混频”、“噪声调制”)	686
9.5-6 克服干扰的措施	687
参考资料	696
思考题与习题	696
<b>第十章 参量现象与时变电抗电路</b>	<b>700</b>
§ 10.1 概述	700
§ 10.2 参量放大原理	701
10.2-1 变容二极管的非线性特性	701
10.2-2 时变参量器件能量转换的物理过程	702
10.2-3 非简并式参量放大器电路	706
10.2-4 非线性电容中的能量转换关系	709
§ 10.3 参量混频器	712
10.3-1 参量混频原理	712
10.3-2 参量混频器电路	714
§ 10.4 参量倍频器	715
10.4-1 变容二极管倍频器	716
10.4-2 晶体三极管参量倍频器	721
§ 10.5 参量自激效应及其消除	722
10.5-1 参量自激现象及其危害	723
10.5-2 参量自激原理和消除参量自激的方法	724
参考资料	726

思考题与习题	727
<b>第十一章 角度调制</b>	<b>729</b>
§ 11.1 概述	729
§ 11.2 调角波的性质	730
11.2-1 瞬时频率与瞬时相位	730
11.2-2 调频波和调相波的数学表示式, 频移和相移	732
11.2-3 调频波和调相波的频谱和频带宽度	737
§ 11.3 调频方法概述	746
11.3-1 直接调频原理	746
11.3-2 间接调频原理	747
§ 11.4 变容二极管调频	748
11.4-1 基本原理	748
11.4-2 电路分析	750
§ 11.5 电抗管调频	759
* § 11.6 三角波调频	768
* § 11.7 方波调频	773
§ 11.8 晶体振荡器直接调频	776
§ 11.9 间接调频: 由调相实现调频	781
11.9-1 调相的方法	782
11.9-2 间接调频的实现	787
附录 11.1 将 $(1+m\cos\Omega t)^{\gamma}$ 展开成泰勒级数	790
附录 11.2 频偏较大时变容二极管调频电路的分析	790
参考资料	791
思考题与习题	792
<b>第十二章 调角信号的解调</b>	<b>797</b>
§ 12.1 概述	797
§ 12.2 相位鉴频器	799
12.2-1 相位鉴频器的工作原理	799
12.2-2 相位鉴频器回路参数的选择	804
12.2-3 电容耦合相位鉴频器	806
§ 12.3 比例鉴频器	811
12.3-1 引言	811
12.3-2 比例鉴频器的工作原理	812

12.3-3	比例鉴频器的实际电路	816
* § 12.4	晶体鉴频器	817
* § 12.5	其他形式的鉴频器	821
12.5-1	脉冲计数式鉴频器	821
12.5-2	符合门鉴频器	824
§ 12.6	限幅器	830
12.6-1	引言	830
12.6-2	二极管限幅器	832
12.6-3	晶体三极管限幅器	833
12.6-4	差分对限幅器	837
* § 12.7	调频制的抗干扰性	838
12.7-1	引言	838
12.7-2	调频制抗干扰性能获得改善的原因	838
12.7-3	预加重-去加重技术	843
附录 12.1	式(12.2-18)的推导	845
	参考资料	846
	思考题与习题	847
<b>第十三章</b>	<b>反馈控制电路与频率合成技术</b>	<b>849</b>
§ 13.1	自动增益控制(AGC)	849
§ 13.2	自动频率微调(AFC)	853
13.3	锁相环路的基本工作原理	858
13.4	锁相环路各部件及其数学模型	861
13.4-1	鉴相器	862
13.4-2	低通滤波器	871
13.4-3	压控振荡器(VCO)	874
13.4-4	锁相环路的数学模型	876
* § 13.5	锁相环路的分析	878
13.5-1	一阶锁相环路	878
13.5-2	二阶锁相环路	889
* § 13.6	锁相环路的应用简介	896
13.6-1	窄带跟踪接收机(锁相接收机)	897
13.6-2	锁相环路的调频与解调	898
13.6-3	调幅信号的解调	900

13.6-4	振荡器的稳定与提纯	901
13.6-5	倍频器与分频器	901
13.6-6	相关应答器	903
§ 13.7	频率合成器的主要技术指标	905
§ 13.8	频率直接合成法	912
13.8-1	非相干式直接合成器	912
13.8-2	相干式直接合成器	914
13.8-3	频率漂移抵消法(外差补偿法)	916
§ 13.9	频率间接合成法(锁相环路法)	917
13.9-1	脉冲控制锁相法	918
13.9-2	间接合成制减法降频(模拟锁相环路法)	919
13.9-3	间接合成制除法降频(数字锁相环路法)	923
附录 13.1	一阶环路方程的解(只求锁定状态)	930
附录 13.2	一阶环路在小扰动下的捕捉时间	931
	参考资料	932
	思考题与习题	933
	<b>习题答案(下册部分)</b>	<b>934</b>
	<b>符号表</b>	<b>937</b>

# 绪 论

## § 1 无线电信号传输原理

无线电技术的出现与发展，是建立在电磁学的理论与实践的坚实基础之上的。英国物理学家 J. C. 麦克斯韦(J. Clerk Maxwell)于 1864 年发表了“电磁场的动力理论”著名论文，总结了前人的工作，得出了电磁场方程，从理论上证明了电磁波的存在。他指出，电磁波在自由空间的传播速度，以及折射、反射等特性与光波相同。麦克斯韦的这一发见，为人们在实践中证实电磁波的存在提供了依据，为后来的无线电发明和发展奠定了理论基础。

1887 年，德国物理学家 H·赫兹(H. Hertz)以卓越的实验成就，证实了电磁波是客观存在的。他在实验中证明：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现象。麦克斯韦理论得到了证实。从此之后，许多国家的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。其中著名的有英国的 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)与意大利的 G. 马可尼(Guglielmo Marconi)等。在以上这些人中，以马可尼的贡献最大。他于 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。从此，无线电通信进入了实用阶段。

从发明无线电开始，传输信号就成了无线电技术的首要任务。直到今天，虽然无线电电子学技术领域在迅速扩大，但信息的传输与处理仍然是它的主要内容。高频电子线路所涉及的单元电路，

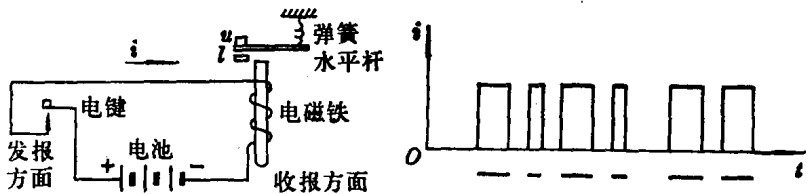


都将从传输与处理信息这一基本点出发,来进行研究。因此,我们有必要先在本书的开头概述无线电信号的传输原理。

### 1-1 传输信号的基本方法

信息传输对人类生活的重要性是不言而喻的。最基本的信息传输手段当然是语言与文字。语言与文字的产生和发展,对人类社会的发展起了很大的作用。没有语言,人类就无法进行思维。文字不但能够传输信息,而且能够储存信息。随着人类社会生产力的发展,迫切地要求在远距离迅速而准确地传送信息。我国古代利用烽火传送边疆警报,这可以说是最古老的光通信。以后又出现了“旗语”,就是用编码的方法来传输信息。此外,诸如信鸽、驿站快马接力等,也都是人们曾采用过的传输信息的方法,进入十九世纪以后,人们发现电能以光速沿导线传播。这为远距离快速通信提供了物质条件。1837年F. B. 莫尔斯(F. B. Morse)发明了电报,创造了莫尔斯电码。在这种代码系统中,用点、划、空的适当组合来代表字母和数字。这可以说是“数字通信”的雏型。1876年A. G. 贝尔(Alexander G. Bell)发明了电话,能够直接将语言信号转变为电能,沿导线传送。电报电话的发明,为迅速准确地传递信息提供了新手段,是通信技术的重大突破。

有线电报的基本原理见图 1-1(a)。平时,水平杆被弹簧拉到



(a) 有线电报示意图

(b) 信号电流波形

图 1 有线电报的基本原理图