

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)

上册

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

第二版序言

本书是在第一版基础上,按照1980年6月在成都召开的教育部电工教材编审委员会扩大会议所审定的高等工业学校《电子线路(I)(II)教学大纲(草案)》(四年制无线电技术类专业试用)修订而成的。在修订过程中,遵循“打好基础,精选内容,逐步更新,利于教学”的原则,对第一版中的某些内容进行了较大的调整与删改。主要有以下各点:

1. 删除了大纲中没有的“回路与器件的高频性能”和“脉冲与数字调制”两章。

2. 电子管内容全部删除。

3. 将原来分散在各章中的参量放大、参量倍频与混频等内容合并为“参变现象与时变电抗电路”一章,并进行了修改,补充了思考题与习题。

4. 根据打好基础,精选内容的原则,对第二至第十三章分别进行了不同程度的删改与补充。例如,第二章篇幅作了较大的压缩,突出了单调谐回路谐振放大器的主线;第十一章改写了调频原理;第十三章改为以锁相环路为主,并将有关的反馈电路集中在这一章,使内容安排更为合理;等等。

5. 对各章的思考题与习题进行了增删与调整,重新核算了全部答案,改正了第一版中的某些错误。

6. 在压缩篇幅,删除繁冗部分的同时,也增补了某些必需的内容,例如回路的时延特性、表面波滤波器等。

7. 对全书符号进行了统一整理,使之合理化,与《低频电子线路》所用符号保持一致,并尽可能符合国内外的习惯用法。例如,第一版中用 E 、 e 、 u 、 U 、 v 、 V 等符号代表电压,本版则统一用 V 、 v 来

表示,并以下标字母的大小来表示各种不同情况的电压^①。此外,输出功率 P_L 改为 P_o , 以与习惯用法相符,直流功率 P_o 则改为 P_{dc} , 以免混淆。

8. 鉴于谐振回路与耦合回路的内容在先行课程中没有保证,而这部分又是本课必不可少的内容,因而增写了这一章,供各校根据实际情况选用。

由于无线电电子学的飞跃发展,新理论、新电路、新器件、新工艺层出不穷,日新月异,但同时某些基本理论与基本电路则并未过时,例如,谐振回路与耦合回路仍然是组成高频电子线路必不可少的部分;放大、振荡、频率变换(包括调制与解调)的原理依然未变,因而电子线路内容与学时之间的矛盾日益尖锐。如何坚决贯彻“打好基础,精选内容,逐步更新,利于教学”的原则,对于本课来说,就显得更加必要。本版力图遵循这一原则,但限于我们的思想认识与业务能力,做得还是很不够的,有待今后继续努力。

本书的修订工作由张肃文、陆兆熊、王筠三同志担任,张肃文同志为主编。具体执笔分工如下^②:

张肃文:绪论,第五、七、十一、十三章;

陆兆熊:第二、三、八、九、十二章与第一章前半部分;

王筠:第四、六、十章与第一章后半部分。

本书第一版经兄弟院校试用,提出了许多宝贵意见,为修订工作提供了可靠的第一手资料。修订稿承西北电讯工程学院李纪澄、陆心如等同志审阅,定稿前又由编委会电子线路编审小组委托编委谢嘉奎同志复审。他们都认真负责地进行了审阅,提出了许多

^① 例如, V_o 代表集电极电压直流分量, v_o 代表集电极瞬时总电压(包括直流与交流), V_o 代表集电极的交流电压分量的振幅, v_o 则代表集电极交流电压分量的瞬时值。其余可以类推。

^② 原书第一版编者之一姚天任同志在本书修订期间,出国学习,故未参加修订工作。

宝贵意见,使书稿质量得以提高。对以上的单位和同志,我们谨致衷心的感谢。

本书虽几经校订,但错误与不妥处仍可能存在。恳请使用本书的师生和广大读者不吝指正。意见请寄高等教育出版社电工无线电编辑室转交。

编 者

1983年8月于武汉

第一版序言

本书是根据 1977 年 11 月在合肥召开的高等学校工科基础课电工、无线电类教材编写会议所审定的“高频电子线路教材编写大纲”编写的,经 1978 年 12 月在武汉召开的高频电子线路教材审稿会议审查通过。

全书共十四章,即:绪论、回路与器件的高频特性、高频小信号放大器、非线性电路的分析方法、高频功率放大器、正弦波振荡器、振幅调制、振幅解调、变频、干扰与噪声、角度调制、调频信号的解调、脉冲与数字调制、频率合成与锁相技术。

在章节安排上,有如下的考虑:第一章绪论简略介绍无线电信号传输的基本原理,为以后各章之间的有机联系建立初步概念。第二章回路与器件的高频特性,研究高频电子线路中所常用的回路元件与半导体器件的高频特性,作为以后各章的基础。接着第三章,讨论高频小信号放大器。第四章扼要介绍分析非线性电路的各种方法,作为学习高频功率放大器、振荡器、调制、解调、变频等章的预备知识。为了便于学习,将振幅调制与解调、角度调制与解调分成四章(第七、八章与第十一、十二章),并将变频、干扰与噪声两章紧接在振幅解调一章之后,成为第九章与第十章。第十三章脉冲与数字调制介绍各种脉冲与数字调制的基本原理,可作为学习数字通信部分内容的初步。由于频率合成技术的应用日益广泛,因此本书最后一章介绍了各种频率合成的方法,并围绕频率合成所用的锁相环路,进行初步的分析,介绍了锁相环路的若干应用。

各章均以晶体管电路为主,适当兼顾场效应管电路与集成

电路。

在内容选择上,除注意基本理论外,各章均尽可能引入一些比较新的内容。例如,第二章介绍了 S 参数和不定导纳矩阵;第五章介绍了晶体管和电子管丁类放大器;第六章介绍了用极零图分析振荡电路的方法;第七章介绍了差分对乘积调制器;第九章介绍了分裂式环混和差分对混频器;第十一章介绍了三角波调频、模拟计算机调频;第十二章介绍了符合门鉴频器;等等。

在各章的内容安排上,与传统的写法比较也作了某些变动。例如,第七章振幅调制,习惯上是先讲高电平调幅,再讲低电平调幅,并以高电平调幅为主;本书则改为先讲低电平调幅,再讲高电平调幅,并以低电平调幅为主。又如干扰与噪声,过去是分散在有关章节中讨论的。我们从过去的教学实践中感到有些问题难以处理,所以现在将它们集中为一章,紧接于变频一章之后。

各章有相对的独立性,例如第十三、十四两章,可根据各校的不同情况予以选用,或完全不用。这并不影响全书的完整性。各章加*号部分为选读或自学内容。每章之末附有思考题与习题,并列举了有关参考资料。

本书遵照国家标准计量局办公室1977年12月15日印发的《国际单位制及使用办法》将过去所通用的微微法改为皮法(pF),千兆赫改为吉赫(GHz),毫微亨改为纳亨(nH),姆欧(跨导单位)改为西门子(S)。书中插图符号基本上遵照第四机械工业部1965年颁发的部标准SJ137-65。

本书由张肃文主编,各章执笔分工如下:

第一、五、七、十四章由张肃文执笔;

第二、三、八、九、十章由陆兆熊执笔;

第四、十一、十二、十三章由姚天任执笔;

第六章由王筠执笔。

高频电子线路是无线电技术类各专业的一门主要技术基础课,它的任务是研究高频电子线路的基本原理与基本分析方法,以单元电路的分析和设计为主。为了加强基础理论,避免重复与脱节,华中工学院无线电技术教研室在1965年就曾对本专业的课程设置进行过改革,将原来的发送设备、接收设备与无线电技术基础的非线性部分合并为一门高频电路课,并编了讲义。1971年以后,又在此基础上全面改写了三次,在我院几届学生及有关工厂技术人员训练班中使用。这次则是根据合肥会议的大纲重新编写的。在编写过程中我们力求做到:努力运用辩证唯物主义观点阐明本学科的规律;内容要精简,删除陈旧繁琐的内容,讲清基本概念、基本原理和基本方法,同时又要尽可能反映本门学科国内外的先进科学技术水平;贯彻理论联系实际的原则,培养学生分析问题和解决问题的能力。但是,限于我们的水平,本书距离上述要求还差得很远。

本书初稿承主审单位浙江大学姚庆栋、梁慧君、刘锐、曹琴华、陈瑶琴等同志审阅,提出了许多宝贵的修改意见。参加武汉审稿会议的北方交通大学、西北电讯工程学院、北京工业学院、成都电讯工程学院、天津大学、南京工学院、大连工学院、北京邮电学院、南京邮电学院、太原工学院、哈尔滨工业大学、北京航空学院、国防科技大学、上海交通大学、大连海运学院、合肥工业大学等十余所兄弟院校的代表提出了许多宝贵的修改意见。华南工学院五系501教研组曾对编写大纲提出了书面意见。在修改定稿过程中,承华南工学院冯秉铨教授以及西北电讯工程学院李纪澄、陆心如、杜武林等同志在百忙中审阅了部分章节,提出了不少宝贵意见。

在历次编写与修订本书的过程中,我们曾参考了许多兄弟院校的有关讲义,并得到了710、712、714、761、769、707等工厂及1017、1919等研究所的热情帮助。

本书是在华中工学院各级领导的大力支持和热情关怀下编写成的。无线电技术教研室葛果行同志曾参加本书编写大纲(初稿)的拟定,并审阅了书稿的部分章节;罗辉映同志及高频电子线路教学小组的全体同志参加了对书稿的审阅工作;郑玉棠和刘章玉两同志绘制了全书插图。

对于上述所有单位和同志,我们谨致以衷心的感谢。

由于我们的思想水平与业务水平不高,加之编写时间紧迫,因此书中谬误与不妥之处在所难免。诚恳希望国内专家与读者提出批评指正,意见请寄武昌华中工学院无线电工程系或人民教育出版社大学室转交。

编 者

1979年5月

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
第三章	放大电路的噪声	176
§ 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
第四章 非线性与时变参量电路的分析方法	224
§ 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
第五章 高频功率放大器	269
§ 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
第六章 正弦波振荡器 ·····	378
§ 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

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。麦克斯韦的这一发现，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

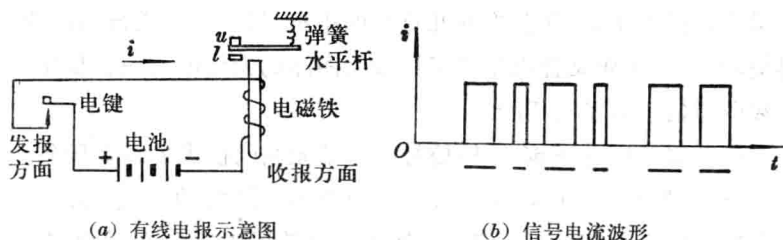


图1 有线电报的基本原理图