

高等学校电子信息与电气学科基础教材



高频电子线路

高吉祥 主编



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高等学校电子信息与电气学科基础教材

高频电子线路

高吉祥 主编

黄智伟 陈 和 胡见堂 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是为高等学校电子类和其他相近专业而编著的教材。本书共分为十一章。主要介绍了简单谐振回路及各种滤波器,高频小信号放大器,噪声与干扰,高频功率放大器和功率合成技术,各类正弦振荡器,频谱变换电路,数字调制及解调电路,反馈控制电路,频率合成技术,无线电接收与发射设备,单片射频收发芯片的原理及应用。

根据高等教育部教学大纲要求,多年来教学实践的体会和各类大学生电子制作的需要,本书不仅包括先行者编著的高频电路教科书的基本知识和理论,而且还增加了目前应用比较广泛的功率合成技术、频率合成技术、模拟与数字接收发射设备的原理及应用。

本书可作为本科生和研究生教材,同时也可为从事电子工程的工程师和参加各类电子制作竞赛的人员提供有益的参考资料。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路/高吉祥主编. —北京:电子工业出版社,2003.3

高等学校电子信息与电气学科基础教材

ISBN 7-5053-8565-8

I. 高... II. 高... III. 高频-电子电路-高等学校-教材 IV. TN710.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 013431 号

责任编辑:陈晓莉 特约编辑:李双庆 叶光华

印 刷:北京牛山世兴印刷厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×980 1/16 印张:30.25 字数:726 千字

版 次:2003 年 3 月第 1 版 2003 年 3 月第 1 次印刷

印 数:6000 册 定价:38.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。
联系电话:(010)68279077

前 言

本书是为高等学校电子类和其他相近专业而编著的《高频电子线路》教材。本教材编写过程中参照国家教委 1993 年批准的《高等工业学校电子技术基础课程基本要求》和 1995 年批准的《高等工程专科电子技术基础教学基本要求》及教育部《普通高等教育“十五”国家规划教材》的基本要求,并考虑到面向 21 世纪教育改革的要求而编著。

近几年来,我国的电子技术和电子工业得到飞速发展,新技术、新工艺和新器件日新月异。特别是移动通信、广播、电视、无线电防范报警、无线电遥控遥测、雷达及电子对抗高速发展。为此本教材除了继承先行者所编著的《高频电子线路》的特点外,还新增加了频率合成和功率合成技术,无线电收发设备的总机原理及电路分析,数字调制解调电路的原理和分析,大规模集成收发芯片的原理及应用等内容。

本书分为十一章。第 1 章谐振回路,主要介绍高频电路中的元器件、简单的谐振回路及各种滤波器;第 2 章高频小信号放大器,主要介绍了晶体管等效电路和参数、谐振放大器和宽带放大器;第 3 章噪声与干扰,主要介绍了噪声的来源和特点、噪声系数的计算方法、降噪措施及工业干扰和天电干扰等;第 4 章高频功率放大器与功率合成技术,主要介绍谐振功率放大器的分析方法、电路组成、实用电路举例、高效率的丙类、丁类(D 类)功放、宽带功放及功率合成等;第 5 章正弦波振荡器,主要介绍反馈振荡器、RC 正弦振荡器、互感耦合振荡器、LC 振荡器、石英晶体振荡器及振荡器的频率稳定度分析和稳频措施等;第 6 章频谱变换电路,主要介绍模拟乘法器、频谱线性变换电路[普通调幅波(AM)、抑制载波的双边带调幅波(DSB/SCAM)、抑制载波的单边带调幅波(SSB/SCAM)的产生和解调,混频器、倍频器]的组成及工作原理,频谱非线性变换电路[调频(FM)波的产生和解调、限幅器等]的组成及工作原理;第 7 章数字调制解调电路,主要介绍二进制振幅键控(ASK)、二进制频移键控(FSK)、二进制相位键控(PSK)的调制与解调,多进制数字调制系统,正交振幅调制(QAM)和其他数字调制;第 8 章无线电技术中的反馈控制电路,主要介绍自动增益控制(AGC)电路、自动频率控制(AFC)电路、自动相位控制(APC)电路的基本原理及应用;第 9 章频率合成技术,主要介绍直接频率合成和间接频率合成(侧重于数字锁相环法)的原理及应用;第 10 章无线电接收与发射设备,从市面上目前畅销的几种接收和发射设备入手,介绍它们的电路组成和原理,这一章实际上是电子技术基础课的综合应用;第 11 章单片射频收发芯片的原理及应用,主要介绍目前刚上市的性能价格比高的单片射频发射器芯片、接收器芯片及收发芯片的原理及应用。

本教材由国防科技大学、南华大学联合编著。参加本书编写工作的有高吉祥、黄智伟、陈和、胡见堂、刘安芝、谭博文、余德泉等人。高吉祥主编。第1章~第4章由陈和、刘安芝执笔,第9、10章由高吉祥执笔。第5、6、8章由胡见堂、高吉祥、谭博文执笔。第7、11章由黄智伟执笔。本书在编写过程中得到南华大学凌球校长、邓国扬副校长和国防科技大学电子科学与工程学院唐朝京副院长的大力支持和具体指导。本书由谭志恒教授、卢启忠责任教授主审。闫伟、余德泉、高广珠为本教材的编著做了大量的工作,在此表示感谢。

编 者
2002年8月

常用文字符号说明

一、基本符号

1. 电流和电压

I_B, U_{BE}	大写字母、大写下标表示直流量
I_b, U_{be}	大写字母、小写下标表示交流有效值
\dot{I}_b, \dot{U}_{be}	大写字母上面加点、小写下标表示正弦相量
i_B, u_B	小写字母、大写下标表示总瞬时值
i_{be}, u_{be}	小写字母、小写下标表示交流分量瞬时值
V_{CC}, V_{BB}, V_{EE}	双极型三极管集电极、基极、发射极直流电源电压
V_{DD}, V_{GG}, V_{SS}	场效应管漏极、栅极、源极直流电源电压
I_i, U_i	输入电流、输入电压
I'_i, U'_i	净输入电流、净输入电压
I_o, U_o	输出电流、输出电压
$U_{o(AV)}$	输出电压平均值
U_{om}	最大输出电压
I_f, U_f	反馈电流、反馈电压
I_Q, U_Q	静态电流、静态电压
U_{REF}	参考电压
U_S	信号源电压
U_T	温度的电压当量
I_+, U_+	集成运放同相输入端的电流、电压
I_-, U_-	集成运放反相输入端的电流、电压

2. 功率

P	功率的通用符号
-----	---------

P_o	输出交变功率
P_{om}	输出交变功率最大值
P_v	电源提供的直流功率

3. 频率

B	通频带
f_H	放大电路的上限(-3dB)频率
f_L	放大电路的下限(-3dB)频率
f_0	振荡频率、谐振频率
ω	角频率的通用符号

4. 电阻、电容、电感、阻抗

R	大写字母表示电路中外接的电阻或电路的等效电阻
r	小写字母表示器件的等效电阻
R_i, R_o	电路的输入电阻、输出电阻
R_{if}, R_{of}	有反馈时电路的输入电阻、输出电阻
R_L	负载电阻
R_S	信号源内阻
G	电导的通用符号
C	电容的通用符号
L	电感的通用符号
X	电抗的通用符号
Z	阻抗的通用符号

5. 增益或放大倍数、反馈系数

A	增益或放大倍数的通用符号
A_c	共模电压放大倍数
A_d	差模电压放大倍数
A_i	电流放大倍数
A_u	电压放大倍数
A_p	功率放大倍数
A_{uf}	有反馈时的电压放大倍数

A_{us}	考虑信号源内阻时的电压放大倍数
F	反馈系数的通用符号

二、器件符号

1. 器件及引脚名称

B	晶体谐振器(晶体换能管)
b, c, e	双极型三极管的基极、集电极、发射极
D, G, S	场效应晶体管的漏极、栅极、源极
T	变压器
VD	二极管
VD _Z	稳压管
VT	双极型三极管(晶体管)、场效应管

2. 器件参数

A_{od}	集成运放的开环差模电压增益
$C_{b'e}, C_{b'c}$	发射结、集电结等效电容
I_{CBO}	集电极 - 基极之间的反向饱和电流
I_{CEO}	集电极 - 发射之间的穿透电流
I_{CM}	集电极最大允许电流
$I_{D(AV)}$	整流二极管平均电流
I_S	二极管反向饱和电流
I_Z	稳压管稳定电流
I_{IB}	集成运放输入偏置电流
I_{IO}	集成运放输入失调电流
P_{CM}	集电极最大允许耗散功率
P_{DM}	漏极最大允许耗散功率
S_R	集成运放转换速率
U_Z	稳压管稳定电压
$U_{(BR)(CBO)}$	发射极开路时集电极 - 基极之间的反向击穿电压
$U_{(BR)(CEO)}$	基极开路时集电极 - 发射极之间的反向击穿电压
$U_{(BR)(EBO)}$	集电极开路时发射极 - 基极之间的反向击穿电压

U_{CES}	集电极 - 发射极之间的饱和管压降
U_{Icm}	集成运放最大共模输入电压
U_{Idm}	集成运放最大差模输入电压
U_{IQ}	集成运放输入失调电压
U_P	场效应管的夹断电压
U_T	场效应管的开启电压
B_G	集成运放的单位增益带宽
f_T	双极型三极管的特征频率
f_α, f_β	共基极截止频率、共射极截止频率
g_m	跨导
$r_{bb'}$	基区体电阻
$r_{b'e}$	发射结微变等效电阻
r_{be}	共射接法下基极 - 发射极之间的微变等效电阻
r_{ce}	共射接法下集电极 - 发射极之间的微变等效电阻
r_{DS}	场效应管漏极 - 源极之间的微变等效电阻
r_{GS}	场效应管栅极 - 源极之间的微变等效电阻
r_{id}	集成运放差模输入电阻
α, β	共基极, 共射极电流放大系数
$\bar{\alpha}, \bar{\beta}$	共基极, 共射极直流电流放大系数

三、其他符号

D	非线性失真系数
K_{CMR}	共模抑制比
M	互感系数
Q	品质因数
S	整流电路的脉动系数
S_r	稳压系数
T	周期, 温度
η	效率
τ	时间常数
φ	相位角

目 录

绪论	1
0.1 无线电通信发展简史	1
0.2 通信系统的组成	3
0.3 本课程的特点	6
第 1 章 谐振回路	8
1.1 高频电路中的元器件	8
1.1.1 高频电路中的元件	8
1.1.2 高频电路中的有源器件	11
1.2 简单谐振回路	13
1.2.1 串联谐振回路	13
1.2.2 并联谐振回路	15
1.3 滤波器	29
1.3.1 石英晶体谐振器	29
1.3.2 集中滤波器	34
1.3.3 衰减器与匹配器	37
本章小结	39
习题一	39
第 2 章 高频小信号放大器	42
2.1 概述	42
2.2 晶体管高频小信号等效电路与参数	44
2.2.1 共发射极混合 π 型等效电路	44
2.2.2 形式等效电路(网络参数等效电路)	48
2.3 谐振放大器	51
2.3.1 单级单调谐放大电路	51
2.3.2 多级单调谐回路谐振放大器	59
2.3.3 双调谐回路谐振放大器	60
2.3.4 谐振放大器的稳定性	63
2.4 宽带放大器	65
2.4.1 单级差分宽带放大器	65
2.4.2 展宽放大器频带的方法	68
2.4.3 集成电路谐振放大器及其典型应用	72

本章小结	74
习题二	75
第3章 噪声与干扰	77
3.1 概述	77
3.2 噪声的来源和特点	78
3.2.1 电阻的热噪声	78
3.2.2 二极管的噪声	80
3.2.3 晶体三极管的噪声	81
3.2.4 场效应管噪声	82
3.2.5 接收天线噪声	82
3.3 噪声系数计算方法	83
3.3.1 噪声系数的定义	83
3.3.2 信噪比与负载的关系	84
3.3.3 用额定功率和额定功率增益表示的噪声系数	85
3.3.4 多级放大器噪声系数的计算	86
3.3.5 等效噪声温度	87
3.3.6 晶体管放大器的噪声系数	87
3.3.7 噪声系数与灵敏度	88
3.3.8 噪声系数的测量	89
3.4 降低噪声系数的措施	90
3.5 工业干扰与天电干扰	92
本章小结	94
习题三	95
第4章 高频功率放大器与功率合成技术	97
4.1 概述	97
4.2 谐振功率放大器分析	99
4.2.1 谐振功率放大器的工作原理	99
4.2.2 谐振功率放大器的工作状态分析	104
4.3 谐振功率放大器电路组成	110
4.3.1 直流馈电线路	110
4.3.2 输出匹配网络	113
4.3.3 谐振功率放大器的实用电路实例	117
4.4 丁类(D类)功率放大器	118
4.4.1 电流开关型D类放大器	118
4.4.2 电压开关型D类放大器	120
4.5 宽带高频功率放大电路	122
4.5.1 传输线变压器	122

4.6	功率合成器	124
4.6.1	功率合成与分配网络应满足的条件	124
4.6.2	功率合成(或分配)网络原理	125
4.6.3	功率合成电路举例	129
4.7	射频模块放大器和集成功率放大器简介	130
4.7.1	射频模块放大器	130
4.7.2	集成高频功率放大电路及应用简介	133
	本章小结	135
	习题四	136
第5章	正弦波振荡器	138
5.1	概述	138
5.2	反馈振荡器	139
5.2.1	反馈振荡器原理	139
5.2.2	振荡器平衡状态的稳定条件	140
5.3	振荡器的分析方法	142
5.4	RC正弦波振荡电路	144
5.4.1	RC串并联网络振荡电路	144
5.4.2	移相式振荡电路	148
5.4.3	双T选频网络振荡电路	149
5.5	互感耦合振荡器	151
5.5.1	单管互感耦合振荡器	151
5.5.2	差分对管互感耦合振荡器	153
5.6	LC正弦振荡器	154
5.6.1	构成三点式振荡器的原则(相位判据)	154
5.6.2	电容三点式振荡器—考毕兹振荡器	155
5.6.3	电感三点式振荡器—哈特莱振荡器	158
5.6.4	电容三点式与电感三点式振荡器比较	160
5.6.5	改进型电容三点式振荡器	161
5.7	振荡器的频率稳定度	164
5.7.1	频率准确度和频率稳定度	164
5.7.2	频率稳定度分析	166
5.7.3	提高频率稳定度的措施	168
5.8	石英晶体振荡器	172
5.8.1	石英谐振器的性能和等效电路	172
5.8.2	石英晶体振荡器	175
	本章小结	181
	习题五	182

第 6 章 频谱变换电路	191
6.1 概述	191
6.2 模拟乘法器	192
6.3 普通调幅波的产生和解调电路	195
6.3.1 幅度调制	195
6.3.2 普通调幅波的产生电路	198
6.3.3 普通调幅波的解调电路	201
6.4 抑制载波调幅波的产生和解调电路	203
6.4.1 抑制载波调幅波的产生电路	203
6.4.2 DSB/SC AM 波解调电路	204
6.5 混频电路	206
6.6 倍频器	208
6.7 调角波的基本性质	208
6.7.1 瞬时相位和瞬时频率的概念	208
6.7.2 调相波和调频波	209
6.7.3 调频波的频谱和频谱宽度	211
6.8 直接调频电路	215
6.8.1 变容二极管调频电路	215
6.8.2 晶体振荡器直接调频电路	222
6.8.3 电容话筒调频电路	225
6.8.4 电抗管调频电路	225
6.9 间接调频电路	227
6.10 调频波的解调	230
6.10.1 斜率鉴频器	231
6.10.2 相位鉴频器	233
6.10.3 比例鉴频器	237
6.10.4 移相乘积鉴频器	242
6.10.5 脉冲均值鉴频器	245
6.10.6 锁相环鉴频器	246
6.10.7 跟相环鉴频器	246
6.11 限幅器	248
6.11.1 晶体二极管限幅器	249
6.11.2 晶体三极管限幅器	249
本章小结	251
习题六	252
第 7 章 数字调制解调电路	261
7.1 概述	261

7.2	二进制振幅键控(ASK)调制与解调	261
7.2.1	ASK 调制	261
7.2.2	ASK 解调	263
7.3	二进制频移键控(FSK)调制与解调	266
7.3.1	FSK 信号的产生	266
7.3.2	FSK 信号的解调	268
7.4	二进制相位键控(PSK)调制与解调	271
7.4.1	绝对调相和相对调相	271
7.5	多进制数字调制系统	279
7.5.1	多进制数字振幅调制(MASK)系统	280
7.5.2	多进制数字频率调制(MFSK)系统	282
7.5.3	多进制数字相位调制(MPSK)系统	283
7.6	正交振幅调制(QAM)	288
7.6.1	QAM 信号的产生与解调	288
7.6.2	8 QAM	290
7.6.3	16 QAM	292
7.7	其他形式的数字调制	293
7.7.1	时频调制(TFSK)	293
7.7.2	时频相调制(TFPSK)	294
	本章小结	294
	习题七	295
第 8 章	无线电技术中的反馈控制电路	297
8.1	反馈控制系统的概念	297
8.1.1	反馈控制系统的组成、工作过程和特点	297
8.1.2	反馈控制系统的基本分析	299
8.2	自动增益控制(AGC)电路	306
8.2.1	AGC 电路的组成、工作原理和性能分析	308
8.2.2	放大器的增益控制——可控增益电路	311
8.2.3	AGC 控制电压的产生——电平检测电路	317
8.2.4	AGC 电路举例	320
8.3	自动频率控制(AFC)电路	320
8.3.1	AFC 电路的组成和基本特性	321
8.3.2	AFC 电路的应用举例	324
8.4	自动相位控制(APC)电路(锁相环路 PLL)	327
8.4.1	锁相环路的基本工作原理	327
8.4.2	锁相环路的跟踪性能——锁相环路的线性分析	335
8.4.3	锁相环路的应用	340

本章小结	349
习题八	350
第 9 章 频率合成技术	353
9.1 频率合成器的主要技术指标	353
9.2 直接频率合成法	355
9.2.1 非相干式直接合成器	355
9.2.2 相干式直接合成器	356
9.2.3 频率漂移抵消法	357
9.3 间接频率合成法(锁相环路法)	358
9.3.1 脉冲控制锁相法	359
9.3.2 间接合成制减法降频(模拟锁相环路法)	359
9.3.3 间接合成制除法降频(数字锁相环路法)	361
本章小结	370
习题九	371
第 10 章 无线电接收与发射设备	372
10.1 概述	372
10.2 无线电接收机	373
10.2.1 无线电接收机的主要技术指标	373
10.2.2 CXA1019 芯片构成的多波段收音机	375
10.2.3 CXA1238 芯片构成的多波段收音机	379
10.2.4 数字调谐收音机	385
10.3 调频发射机	402
10.3.1 调频发射机的性能指标	402
10.3.2 FM 调制器	403
10.3.3 前级功率放大器	409
10.3.4 末级功率放大器	409
10.3.5 直流稳压电源	416
本章小结	416
习题十	417
第 11 章 单片射频收发芯片的原理及应用	419
11.1 单片射频发射器芯片	419
11.1.1 UHF ASK 发射器芯片 MICRF102	419
11.1.2 ASK/FSK 发射器芯片 TDA5100	421
11.1.3 OOK/ASK 发射芯片 TX6000	422
11.2 单片射频接收器芯片	424
11.2.1 ASK 超外差无线电接收芯片 MICRF007	424
11.2.2 ASK 超外差无线电接收芯片 TDA5200	425

11.2.3	OOK/ASK 接收器芯片 RX6000	427
11.3	单片射频收发器芯片	430
11.3.1	单片射频收发芯片 nRF401/403	430
11.3.2	OOK/ASK 射频收发器芯片 TR3001	432
11.3.3	单片射频收发器芯片 TRF6900	433
11.4	蓝牙无线电收发器	437
11.4.1	蓝牙无线电收发器 PBA31301	437
11.4.2	蓝牙无线电收发芯片 RF2968	441
11.5	WCDMA 与 GSM900 双频双模手机射频单元	446
11.5.1	WCDMA 手机接收通道基本指标	446
11.5.2	WCDMA/GSM 双频双模手机射频单元参考设计方案的关键芯片	447
11.5.3	WCDMA/GSM 双频双模手机射频单元参考设计方案	451
11.6	数字卫星接收机(DBS)前端调谐器	453
11.6.1	数字卫星接收机基本参数	453
11.6.2	变频调谐 IC MAX2102/MAX2105	455
11.6.3	直接变频调谐 IC MAX2108	458
11.7	GPS 接收机射频芯片	460
11.8	无绳电话射频变换芯片	463
参考文献	467

绪 论

本书主要讨论用于各种无线电技术设备和系统中的高频电子线路。无线电技术已广泛应用于无线电通信、广播、电视、雷达、导航等几个主要方面,尽管它们在传递信息形式、工作方式和设备体制等方面有差别,但它们的共同特点都是利用高频(射频)无线电波来传递信息,因此设备中发射和接收、检测高频信号的基本功能电路大都是相同的。本书主要结合无线电通信这一方式讨论设备和系统中高频电路的线路组成、工作原理及工程设计计算。

0.1 无线电通信发展简史

信息传输是人类社会生活的重要内容。从古代的烽火到近代的旗语,都是人们寻求快速远距离通信的手段。直到19世纪电磁学的理论与实践已有坚实的基础后,人们开始寻求用电磁能量传送信息的方法。1837年莫尔斯(F. B. Morse)发明了电报,创造了莫尔斯电码,开创了通信的新纪元。1876年贝尔(Alexander G. Bell)发明了电话,能够直接将语言信号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。电报、电话都是沿导线传送信号的。能否不用导线,在空间传送信号呢?答复是肯定的,这就是无线电通信。

1864年英国物理学家麦克斯韦(J. Clerk Maxwell)发表了“电磁场的动力理论”这一著名论文,总结了前人在电磁学方面的工作,得出了电磁场方程,从理论上证明了电磁波的存在,为后来的无线电发明和发展奠定了坚实的理论基础。1887年德国物理学家赫兹(H. Hertz)以卓越的实验技巧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。麦克斯韦的理论得到了证实。从此以后,许多国家的科学家都在努力研究如何利用电磁波传输信息的问题,这就是无线电通信。其中著名的有英国的罗吉(O. J. Lodge),法国的勃兰利(Branly),俄国的波波夫(A. C. nOHOB)与意大利的马可尼(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通信。从此,无线电通信进入了实用阶段。但这时的无线电通信设备是:发送设备用火花发射机,电弧发生器或高频发电机等;接收设备则用粉末(金属屑)检波器。只有到了1904年,弗莱明(Fleming)发明电子二极