

应用型本科 电子及通信工程专业“十三五”规划教材
江苏高校品牌专业建设工程资助项目

通信电子线路

主 编 钱志文

副主编 诸一琦

- 内容新颖：新知识、新技术、新工艺
- 特色鲜明：突出“应用、实践、创新”
- 定位准确：面向工程技术型人才培养
- 质量上乘：应用型本科专家全力打造



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

应用型本科 电子及通信工程专业“十三五”规划教材
江苏高校品牌专业建设工程资助项目

通信电子线路

主 编 钱志文

副主编 诸一琦



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

全书共 9 章, 分别是绪论、通信电子线路基础、高频小信号谐振放大器、高频功率放大器、LC 正弦波振荡器、振幅调制与解调器、混频器、角度调制与解调器及反馈控制电路等。

除绪论外, 本书各章均设有应用背景、典型例题及习题, 有的章还附有电路设计应用举例。通过应用背景引出该章内容, 以启发读者思考; 典型例题用以示范解决问题的思路与方法; 电路设计应用举例均来自于实际应用电路或实验结果; 习题的选取由浅入深, 有基础题, 也有综合题。

本书可作为高等学校通信工程、电子信息工程等专业“通信电子线路”、“高频电子线路”以及“非线性电路”课程的本科教材和参考书, 也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

通信电子线路/钱志文主编. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2018. 1

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4578 - 0

I. ① 通… II. ① 钱… III. ① 通信系统—电子电路—高等学校 IV. ① TN91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 176905 号

策 划 高 樱

责任编辑 王 斌 马武装

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西利达印务有限责任公司

版 次 2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 15.5

字 数 362 千字

印 数 1~3000 册

定 价 31.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4578 - 0/TN

XDUP 4870001 - 1

*** 如有印装问题可调换 ***

应用型本科 电子及通信工程专业“十三五”规划教材

编审专家委员名单

主 任：沈卫康(南京工程学院 通信工程学院 院长/教授)

副主任：张士兵(南通大学 电子信息学院 副院长/教授)

陈 岚(上海应用技术学院 电气与电子工程学院 副院长/教授)

宋依青(常州工学院 计算机科学与工程学院 副院长/教授)

张明新(常熟理工学院 计算机科学与工程学院 副院长/教授)

成 员：(按姓氏拼音排列)

鲍 蓉(徐州工程学院 信电工程学院 副院长/教授)

陈美君(金陵科技学院 网络与通信工程学院 副院长/副教授)

高 尚(江苏科技大学 计算机科学与工程学院 副院长/教授)

李文举(上海应用技术学院 计算机科学学院 副院长/教授)

梁 军(三江学院 电子信息工程学院 副院长/副教授)

潘启勇(常熟理工学院 物理与电子工程学院 副院长/副教授)

任建平(苏州科技学院 电子与信息工程学院 副院长/教授)

孙霓刚(常州大学 信息科学与工程学院 副院长/副教授)

谭 敏(合肥学院 电子信息与电气工程系 系主任/教授)

王杰华(南通大学 计算机科学与技术学院 副院长/副教授)

王章权(浙江树人大学 信息科技学院 副院长/副教授)

温宏愿(南京理工大学泰州科技学院 电子电气工程学院 副院长)

严云洋(淮阴工学院 计算机工程学院 院长/教授)

郁汉琪(南京工程学院 创新学院 院长/教授)

杨会成(安徽工程大学 电气工程学院 副院长/教授)

杨俊杰(上海电力学院 电子与信息工程学院 副院长/教授)

于继明(金陵科技学院 智能科学与控制工程学院 副院长/副教授)

前 言

“通信电子线路”是高等学校电子信息工程、通信工程等相关专业的主要专业技术课程，该课程讲授的大部分是非线性电子线路，电路种类繁多，分析方法复杂，学生普遍认为学习比较困难，戏称它是“魔鬼电路”。为此，为了适应教学一线的实际需求，编者根据自己二十几年的教学实践，结合应用型本科院校的学生特点和基础，力求将教学思想、方法融入本书内容中，以充分体现“基础性、启发性、应用性、设计性”等特色。

本书详细介绍了通信系统中主要的电子线路(高频电子线路)的基本原理、基本概念和基本分析方法。全书共分9章：第1章为绪论，简略介绍电子线路分类和无线电广播系统，以便学生了解通信电子线路的特点和作用，也为以后各章的学习建立初步认识；第2章为通信电子线路基础，简要介绍通信电子线路常用元件电感线圈和电容器在高频运用下的特性以及通信电子线路中广泛采用的串并联谐振回路特性，这是后续各章学习的基础知识；第3章至第5章分别为高频小信号谐振放大器、高频功率放大器和LC正弦波振荡器，这三章介绍的电路概念、原理与分析方法与先修课程“模拟电子技术基础(低频电子线路)”的低频放大器、低频功率放大器和RC正弦波振荡器知识密切联系，因此在介绍时侧重突出各种功能电路之间的区别与相同点；第6章至第8章分别为振幅调制与解调器、混频器和角度调制与解调器，分为频谱线性搬移和频谱非线性搬移两部分，这部分概念、原理与分析方法对于读者来说都是新内容，也是比较难学的内容，在介绍时注重各部分内容之间的联系，使学生明白各种功能的实现都是器件的非线性特性在各种特定条件下的不同形式的表现；第9章是反馈控制电路，对自动增益控制、自动频率控制和锁相环进行了简单介绍。

编者认为尽管目前电路的主角已经让位给IC，但是分立电路是基础，培养学生分立电路的读图能力、分析与解决问题的能力依然是非常重要的。因此本书各章均以晶体管分立电路为主，适当兼顾场效应管和集成电路。

除绪论外，本书各章包含有应用背景、典型例题及习题，有的章还附有电路设计应用举例。本书各章节均以问题引出，给出问题背景，以启发读者思考。书中内容一环扣一环，力求逻辑清晰，层次分明，符合认知规律，做到“老师易教，学生易学”。精选的典型例题用以示范分析、解决问题的思路与方法，加深学生对重点和难点内容的理解。增加的电路设计应用举例均来源于实际应用电路或实验的结果，力求使学生做到学以致用，培养学生的电路设计能力。书中习题的选取由浅入深，有基础题，也有综合题，不仅能够测试学生对本章内容的理解程度，同时也能促使他们拓展对这些内容的思考。期望通过本书的学习，学生能够掌握电子线路的分析方法，认识各种电路的物理本质，为以后胜任岗位工作打下一定基础。

本书由钱志文副教授担任主编，诸一琦老师担任副主编。全书由钱志文副教授审定。本书部分内容参考了睦竹林高级工程师编写的《高频电路》讲义和谈发明老师编写的实验讲义，引用了潘亚兰、张莉、潘碧云等研究生绘制的部分插图和编写的习题；书中电路图的绘制得到了吴俊彦工程师的支持；本书的编写得到了编者家人的大力支持；本书的出版得到了西安电子科技大学出版社的大力支持和帮助，尤其是高樱编辑和王斌编辑。在此一并对以上人员表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请广大读者批评指正！

编 者

2017年9月于江苏常州

目 录

第 1 章 绪论	1	3.2.1 Y 参数等效电路(形式等效 电路)	34
1.1 电子线路分类	1	3.2.2 混合 π 型等效电路(物理模拟 等效电路)	35
1.2 非线性电子线路在通信中的应用	3	3.3 晶体管的频率参数	37
1.2.1 无线通信的发展与应用	3	3.4 小信号单调谐回路谐振放大器	39
1.2.2 非线性电子线路应用举例:无线电 广播系统	4	3.4.1 单级单调谐回路放大器	39
1.3 无线电波的传播	6	3.4.2 多级单调谐回路放大器	47
1.3.1 无线电波波段的划分	6	3.5 小信号双调谐回路谐振放大器	49
1.3.2 无线电波各波段的传播特点	7	3.5.1 双调谐回路放大器的 Y 参数 等效电路	49
1.4 本课程的特点与学习要求	9	3.5.2 双调谐放大器性能指标分析	50
第 2 章 通信电子线路基础	11	3.6 高频小信号谐振放大器的稳定性	52
2.1 电路元件的高频特性	11	3.6.1 放大器工作不稳定的原因及其 分析	52
2.1.1 电感线圈的高频特性	12	3.6.2 高频小信号谐振放大器的稳定 措施	54
2.1.2 电容器的高频特性	14	3.7 小信号谐振放大器设计应用举例	56
2.2 LC 谐振回路	15	习题	57
2.2.1 串联谐振回路	15	第 4 章 高频功率放大器	60
2.2.2 并联谐振回路	17	4.1 概述	60
2.2.3 谐振特性与品质因数的关系	20	4.1.1 高频功率放大器的分类	60
2.2.4 谐振回路的通频带与选择性	20	4.1.2 高频功率放大器的特点	60
2.2.5 并联谐振回路的耦合方式及 接入系数	22	4.2 谐振功率放大器工作原理	61
2.2.6 耦合回路	25	4.2.1 谐振功率放大器电路组成	61
2.3 LC 谐振回路应用举例	28	4.2.2 谐振功率放大器工作原理	61
习题	29	4.2.3 丙类工作状态效率高的原因	63
第 3 章 高频小信号谐振放大器	31	4.2.4 谐振功率放大器的性能 指标分析	65
3.1 概述	31	4.3 谐振功率放大器的折线近似 分析法	66
3.1.1 高频小信号谐振放大器的特点	31		
3.1.2 小信号谐振放大器的主要 技术指标	32		
3.2 晶体管高频小信号等效电路	34		

4.3.1 晶体管特性曲线的折线化(理想化)	66	6.2.2 抑制载波的双边带调制	117
4.3.2 集电极余弦电流脉冲的分解	68	6.2.3 抑制载波的单边带调制	119
4.3.3 谐振功率放大器的动态线	70	6.2.4 抑制载波的残留边带调制	121
4.3.4 R_p 、 E_C 、 U_{bm} 、 E_B 对谐振功率放大器性能的影响	71	6.3 振幅调制信号产生原理	122
4.4 谐振功率放大器实际电路	76	6.3.1 非线性器件的相乘作用	122
4.4.1 直流馈电电路	76	6.3.2 线性时变器件的相乘作用	126
4.4.2 滤波匹配网络	79	6.4 振幅调制电路	127
4.4.3 谐振功率放大器实际电路举例	81	6.4.1 低电平调幅电路	128
4.5 倍频器	81	6.4.2 高电平调幅电路	133
习题	82	6.5 振幅解调电路	134
第5章 LC 正弦波振荡器	86	6.5.1 振幅解调(检波)的基本概念	134
5.1 概述	86	6.5.2 包络检波器	136
5.2 反馈式振荡器的基本原理	86	6.5.3 同步检波器	142
5.2.1 平衡条件	86	6.6 振幅调制解调电路设计应用举例	143
5.2.2 起振条件	87	6.6.1 振幅调制电路设计举例	143
5.2.3 稳定条件	88	6.6.2 包络检波器设计举例	145
5.2.4 反馈式振荡器的基本组成及其分析方法	90	习题	147
5.3 LC 正弦波振荡器	91	第7章 混频器	152
5.3.1 LC 正弦波振荡器的组成原则(相位平衡条件)	91	7.1 概述	152
5.3.2 LC 三点式振荡器电路分析	93	7.1.1 混频器的组成框图及波形、频谱	152
5.3.3 改进型电容三点式振荡器	97	7.1.2 混频器的技术指标	153
5.4 振荡器的频率稳定度	99	7.2 混频电路	153
5.4.1 频率稳定度的定义	99	7.2.1 三极管混频器	153
5.4.2 频率不稳定的原因及稳频措施	100	7.2.2 二极管混频器	156
5.5 石英晶体振荡器	101	7.2.3 调幅、检波和混频电路小结	159
5.5.1 石英晶体振荡器的电抗特性	101	7.3 混频干扰	160
5.5.2 石英晶体振荡器的类型	103	7.3.1 干扰哨声	160
5.6 LC 正弦波振荡器设计应用举例	105	7.3.2 副波道干扰	161
习题	106	7.3.3 交叉调制干扰和互相调制干扰	162
第6章 振幅调制与解调器	113	7.3.4 减小混频干扰的措施	163
6.1 概述	113	7.4 三极管混频器应用举例	163
6.2 振幅调制信号	114	习题	165
6.2.1 普通调幅波	114	第8章 角度调制与解调器	169
		8.1 概述	169
		8.2 角度调制信号的特性	169
		8.2.1 时域特性	169

8.2.2 频谱特性	173	8.7 调频器与鉴频器设计应用举例	204
8.2.3 功率特性	177	8.7.1 变容管直接调频器设计	204
8.3 调频信号的产生方法	177	8.7.2 斜率鉴频器设计	205
8.3.1 调频方法	177	习题	207
8.3.2 调频电路的性能指标	178	第9章 反馈控制电路	213
8.4 变容二极管调频电路	179	9.1 概述	213
8.4.1 变容二极管	179	9.2 自动增益控制电路	214
8.4.2 变容二极管直接调频电路	181	9.3 自动频率控制电路	216
8.4.3 变容二极管间接调频电路	187	9.4 锁相环	218
8.5 调频信号的解调器	190	习题	221
8.5.1 鉴频方法	191	附录一 频段划分表	223
8.5.2 鉴频器的性能指标	192	附录二 余弦脉冲分解系数表	225
8.5.3 斜率鉴频器	193	附录三 第一类贝塞尔函数	228
8.5.4 相位鉴频器	195	附录四 宽带传输线变压器的基础	
8.5.5 比例鉴频器	198	知识	231
8.6 限幅器	202	参考文献	238
8.6.1 限幅器的作用和限幅特性	202		
8.6.2 限幅器电路	203		

第1章 绪 论

1.1 电子线路分类

电子线路是指含有晶体三极管、场效应管等有源电子器件并能实现某种特定电功能的电路。例如,振荡器、放大器、滤波器等各种信号的产生、放大、变换和处理电路。

在工程上可以接触到各种电子线路,它们有其各自的工作特点、设计方法和应用场合。从不同角度分类,电子线路的种类繁多。下面从工作频率、流通信号的形式、线性与非线性等方面对电子线路进行分类,并简要介绍其特点。

1. 按照工作频率分类

按照工作频率分类,电子线路可分为低频电子线路、高频电子线路和微波电子线路。低频工作频率一般低于 300 kHz,如语音电信号、生物电信号、地震电信号和机械振动电信号等,低频信号的产生、放大、变换、处理等电路都属于低频电子线路。高频工作频率的范围一般为 300 kHz~300 MHz,如广播、电视、短波通信设备等无线电设备均属于高频电子线路。微波工作频率一般高于 300 MHz,如移动通信设备、卫星通信设备、微波中继通信设备、雷达、导航设备等均属于微波电子线路。

那么工作频率高低不同的电子线路有什么区别吗?由于工作频率不同,对有源器件的性能要求、电子线路的工艺结构都不尽相同。随着工作频率升高,对器件的上限频率要求也提高,晶体管极间电容、电极的引线电感、载流子扩散漂移时间等因素的影响都会逐渐明显起来,以至于变成必须考虑的主要因素。例如,电感线圈在直流工作状态等效为普通导线,而在低频状态等效为电感量和损耗电阻,在高频状态线圈匝与匝之间存在分布电容,具有电容效应。因此随着工作频率升高,电子线路由集中参数电路转变成了分布参数电路。另外,电路的制造工艺由印刷电路板结构转变成微型集成电路结构,电路各级间的隔离、屏蔽和电源的馈给等都随之发生变化。

2. 按照流通的信号形式分类

按照流通的信号形式分类,电子线路可分成模拟电子线路和数字电子线路。凡是完成模拟信号的产生、放大、变换、处理和传输的电子线路统称为模拟电子线路。模拟信号比较直观形象,但是电路的抗干扰能力差且不利于用计算机处理。凡是完成数字信号的产生、放大、变换、处理和传输的电子线路统称为数字电子线路。数字信号可以再生,其抗干扰能力强,并且便于用计算机处理。在电子信息各个领域,要根据不同的用途和要求选取不同的电路。例如,一个信息传输系统,由于自然界中存在的都是模拟量,因此信息源拾取信息的电路采用模拟电路;为提高传输的速度和质量,信息的处理、传输电路一般采用数字

电路；终端为了得到直观的信号形象，往往又采用模拟电路。

3. 按照线性和非线性分类

按照线性和非线性分类，电子线路可分为线性电子线路和非线性电子线路。线性电子线路由线性元件组成，具有叠加性和均匀性，适用叠加定理。非线性电子线路含有非线性元件。非线性电子线路具有以下几个特点：

(1) 不符合叠加定理。若某非线性电路输入 x 与输出 y 的关系为 $y=x^2$ ，当输入量为 x_1 时，输出量 $y_1=x_1^2$ ；当输入量为 x_2 时，输出量 $y_2=x_2^2$ ；当输入量为 x_1+x_2 时，输出量 $y=(x_1+x_2)^2=x_1^2+x_2^2+2x_1x_2$ ，显然 $y\neq y_1+y_2$ 。因此非线性电路不符合叠加定理。

(2) 信号通过非线性电路后输出信号中出现新的频率成分。仍然以 $y=x^2$ 为例，当 $x=\cos\omega_1 t$ 时，有

$$y=\cos^2\omega_1 t=\frac{1}{2}+\frac{1}{2}\cos 2\omega_1 t$$

可见，输入信号 x 中仅有角频率为 ω_1 的分量，而输出信号 y 中含有直流分量和角频率为 $2\omega_1$ 的分量，这两个分量是因电路的非线性产生的新的频率分量。

再例如，当 $x=\cos\omega_1 t+\cos\omega_2 t$ 时，有

$$y=1+\frac{1}{2}\cos 2\omega_1 t+\frac{1}{2}\cos 2\omega_2 t+\cos(\omega_1+\omega_2)+\cos(\omega_1-\omega_2)$$

可见，输入信号 x 中只有角频率分别为 ω_1 和 ω_2 的两个频率分量，而输出信号 y 中含有直流分量以及角频率为 $2\omega_1$ 、 $2\omega_2$ 、 $\omega_1+\omega_2$ 和 $\omega_1-\omega_2$ 的新的频率分量。

(3) 非线性器件的响应取决于工作点位置与输入信号大小。图 1-1 所示是晶体三极管非线性转移特性。在图 1-1(a) 中，静态工作点 Q 位于放大区，当输入信号很小时，动态范围位于线性段，可以近似为线性工作，输出信号不失真，即所谓的甲类工作状态；当输入信号为大信号时，输入信号有部分进入截止区，即进入非线性区，为非线性工作，输出信号失真，即所谓的甲乙类工作状态。在图 1-1(b) 中，静态工作点 Q 位于截止区，无论输入信号有多大，都将进入非线性区，输出信号失真，即所谓的乙类工作状态。

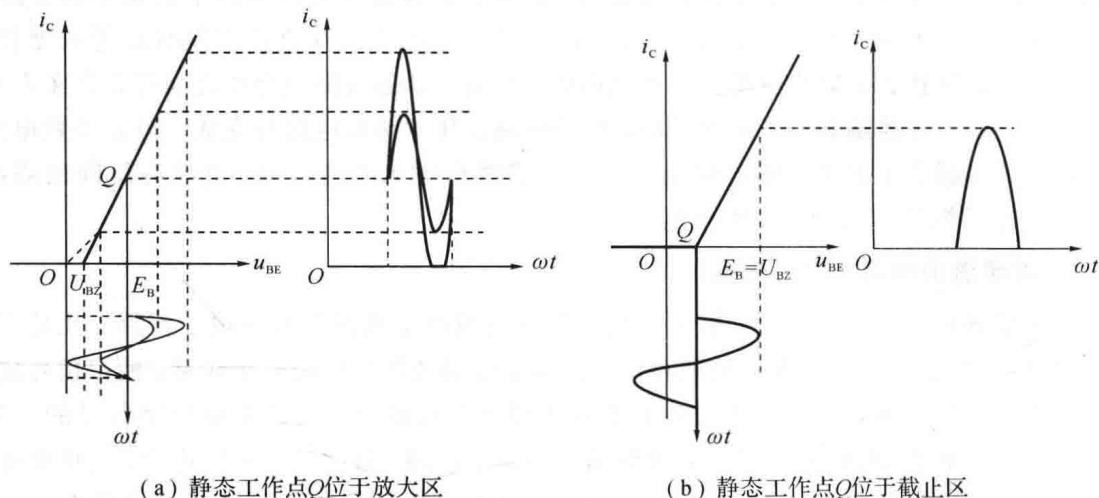


图 1-1 晶体三极管非线性转移特性

(4) 采用工程近似分析方法。非线性电路的数学描述是非线性方程，在求解非线性方

程时颇为复杂和困难。在工程上一般采用近似分析方法,根据实际情况对器件的数学模型和电路条件进行合理近似,以便使用简单的分析方法获得具有实用意义的结果。

本书介绍的通信电子线路是高频的、模拟的、非线性的电子线路。

1.2 非线性电子线路在通信中的应用

非线性电子线路广泛地应用于无线通信领域,因此又称之为通信电子线路。本书主要介绍无线通信设备中电子线路的基本概念、基本工作原理和基本分析方法,因此在学习通信电子线路之前,首先了解一下无线通信的发展与应用。

1.2.1 无线通信的发展与应用

无线通信是在逐渐发展的电路理论和电磁场理论的基础上得以实现的。

1831年,英国的法拉第发现了电磁感应定律。

1837年,英国的麦克斯韦提出了电磁场理论。

1888年,德国的赫兹用实验证明了电磁波的存在。

以上这一切,都为发明无线通信奠定了重要的基础。

1895年,意大利的马可尼和俄国的波波夫几乎同时发明了无线电通信装置,从而开辟了无线电技术这一新的领域,马可尼和波波夫都被称为无线电之父。

近百年来,无线通信获得了飞速发展。而无线通信的发展又与电子学的发展紧密地交织在一起,互为条件,互相促进。归纳起来,无线通信技术的发展具有以下三个特征:

(1) 无线通信所应用的振荡频率不断升高,从长波、中波发展到短波、超短波,直至微波,随之传送的信号频率范围不断加宽,从几百赫兹、几千赫兹到几千兆赫兹。

(2) 无线通信技术所采用的电子元件和器件不断更新,由电子管到晶体管,又发展到集成电路。电阻器、电容器、电感线圈以及各种接插件、开关、导线等各种新型元器件不断出现。

(3) 近代无线通信承担的任务远远超出了通信范围,它与各学科的发展紧密地联系在一起,成为各门学科发展的重要工具。

无线通信从诞生到现在的近百年历史证明,它对人类的生产活动和社会进步产生了非常深刻和极为广泛的影响。事实上,现在已经很难确切地说明无线通信技术的应用范围。但是,对学习电子信息相关专业的人来说,在学习无线通信的基本理论时,还是应该大致了解一下无线通信技术的主要应用方面,这对提高专业兴趣和探讨知识都是有好处的。下面列出无线通信技术的一些主要应用场合:

(1) 无线电报——利用无线电波传递电报信号。

(2) 无线电话——利用无线电波传送语音信号。

(3) 无线电广播——利用无线电波给千家万户送去语音、音乐和各种信息。

(4) 无线电传真——将照片、文字(文件)等随着无线电波的传播从一个地方传送到另一个地方。

(5) 无线电广播电视——随着无线电波的传播给千家万户送去活动影像和信息。电视技术还在工业、医疗、教育、国防、公安等部门得到广泛应用。

(6) 无线电定位——利用无线电波的反射来测定天空中、水面上或陆地上各种目标的位置和运动情况,军事上应用极广,如航空雷达。

(7) 无线电导航——利用无线电定位设备和其他电子设备,引导飞机在复杂气象条件下飞行和着陆,或帮助舰船在大雾中航行和靠岸。

(8) 无线电超声波技术——利用超声波(可以在水中传播)测海深、探鱼群和暗礁的位置,测绘海底地图。超声波可作为水中通信工具或操纵水中武器,在这方面已发展成为一门与国防有关的科学——水声学。

(9) 无线电天文学——无线电技术和天文学结合而形成的学科。它通过分析天体所发射的电磁波来研究宇宙,用天文无线电望远镜来观测天体。

(10) 无线电气象学——用无线电技术研究地球表面大气中的复杂气象过程,可准确预报台风、暖流、寒流、雨、雪等气象情况。

(11) 无线电遥测、遥控技术——利用无线电技术远距离测量各种物理量,控制各种机件的动作,可以使生产过程自动化。

(12) 办公室自动化、家用电器自动化——利用无线电技术控制办公室设备和家用电器。

(13) 电子计算机系统是近代无线电技术发展的一大成就。

上述各种无线通信技术的应用,都伴随着各种性质的消息的传送。而无线通信技术在工业上的其他许多应用,却并不传送什么消息,如高频加热、高频焊接、微波炉等。

此外,无线通信在医疗和农业上也得到日益广泛的应用。通过上面的介绍足以说明,无线通信在国民经济各个领域的应用是极其广泛的,发展前途不可估量。

下面列举非线性电子线路在无线电广播系统中的应用。

1.2.2 非线性电子线路应用举例:无线电广播系统

1. 无线电广播发送设备的工作原理

如何才能把代表消息的原始电信号(如语音信号、图像信号等)传到远方,进行无线传输呢?由电磁理论可知,当电磁波波长与天线尺寸越接近时,天线辐射越强。原始电信号由于其频率低,不能通过天线有效辐射,无法进行无线发送。因此要实现低频信号的远距离无线传播,必须借助“运载工具”,即高频载波,让低频信号“装载”到高频载波上,随着高频载波发送出去。就好比人要去远方旅行,必须坐火车或飞机一样。

一个典型的无线电广播发送设备(或无线电广播发射机)的组成框图及各点波形如图1-2所示。要进行无线电广播通信,首先必须有一个能产生高频信号的高频振荡器,然后将高频信号进行倍频,使其达到高频载波的频率,再将高频载波进行电压放大,并将其与通过音频放大后的音频信号一起加到调制器上,通过调制器把音频信号“装载”到高频载波上去(图1-2中采用的调制方式是将音频信号的变化规律“装载”到高频载波的幅度上),最后通过高频功率放大器和天线将已调制的高频信号发射出去。

图1-2中的高频振荡器、倍频器、高频放大器、调制器、高频功率放大器等通信电子线路都将是本书重点学习的内容。

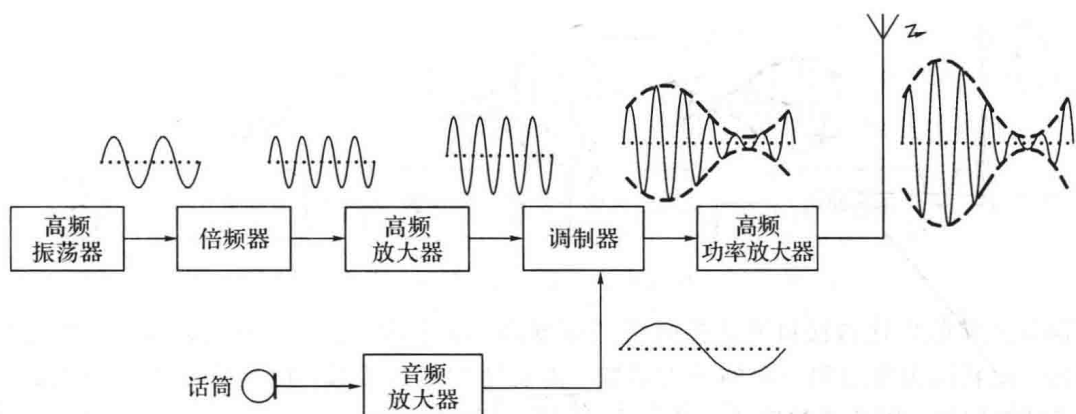


图 1-2 无线电广播发送设备的组成框图

2. 无线电广播接收设备的工作原理

无线电广播接收机的工作过程恰好和发射机相反，是发送的逆过程。接收机的基本任务是将天空传来的高频电磁波接收下来，并从中取出原来的音频信号。无线电广播接收机经历了以下几个发展阶段。

1) 最简单的接收机——直接检波式接收机

最简单的直接检波式接收机的组成框图及各点波形如图 1-3 所示。图中的接收天线收集从空中传来的高频调幅电磁波，即广播电台信号。由于广播电台很多，在同一时间内，接收天线所收到的将不仅有我们所希望收听的广播电台信号，还包含若干个不同电台的信号，即具有不同发射载频的广播电台信号。输入回路通常是由电感线圈 L 和电容器 C 构成的谐振回路，具有选择性，能把所希望收听的广播电台信号挑选出来，把其他不要的电台信号滤除掉，以免产生干扰。检波器用于从挑选出来的高频调幅信号中取出音频信号。耳机把音频信号还原成原来的声波，以便收听者收听。

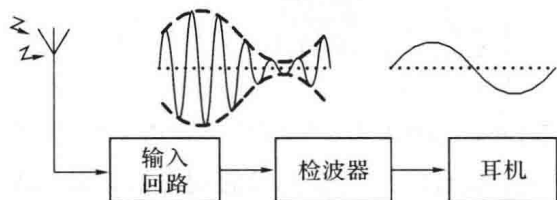


图 1-3 直接检波式接收机的组成框图及各点波形

直接检波式接收机电路简单，但是其灵敏度太低，主要原因是从天线获得的高频无线电信号很微弱，只有几十微伏到几毫伏。因此直接检波式接收机的检波信号太微弱，所以其检波效率很低，输出的音频功率很小，用耳机听起来的声音很小且杂音大。

为此，最好在输入回路和检波器之间插入一个高频放大器，把高频调幅信号放大到约几百毫伏后，再送给检波器去进行检波。这就是高放式接收机。

2) 高放式接收机

一般把带有高频放大器的接收机称为高放式接收机。另外，为了能推动功率大一点的扬声器放声，还需在检波器后面加音频放大器。高放式接收机的组成框图及各点波形如图 1-4 所示。

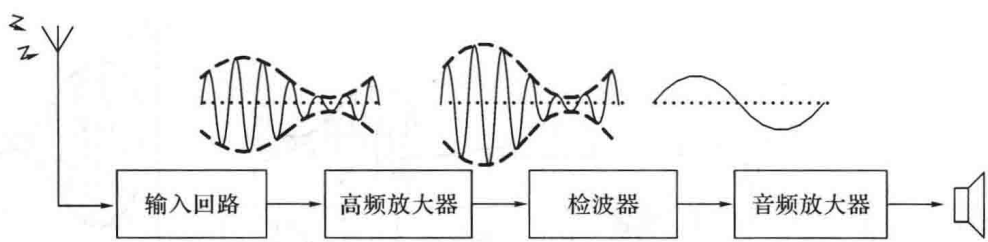


图 1-4 高放式接收机的组成框图及各点波形

高放式接收机比直接检波式接收机灵敏度高、输出功率大，但也有缺点，主要是选择性不好，而且因为要达到一定的放大倍数，需要增加高放级数，而高频放大器的负载均采用 LC 谐振回路，因此当接收不同电台信号(电台频率不同)时，每个 LC 回路都要重新调谐，这就很不方便了。

为了克服高放式接收机的上述缺点，现代接收机几乎都采用超外差式接收机。

3) 超外差式接收机

超外差式接收机的组成框图及各点波形如图 1-5 所示。超外差式接收机的核心部分是混频器。混频器的作用是将接收到的各种具有不同较高载波频率的高频信号转变成具有固定较低载波频率的中频信号。例如，我国中波广播收音机的接收频段为 $535\sim1605\text{ kHz}$ ，经过混频得到中频信号频率为 465 kHz 。为了产生混频作用，还需要一个外加的正弦信号，这个信号称为外差信号。产生外差信号的振荡器称为外差振荡器，习惯上又称为本地振荡器，简称本振。中频信号经过中频放大、检波和音频放大，送到扬声器。

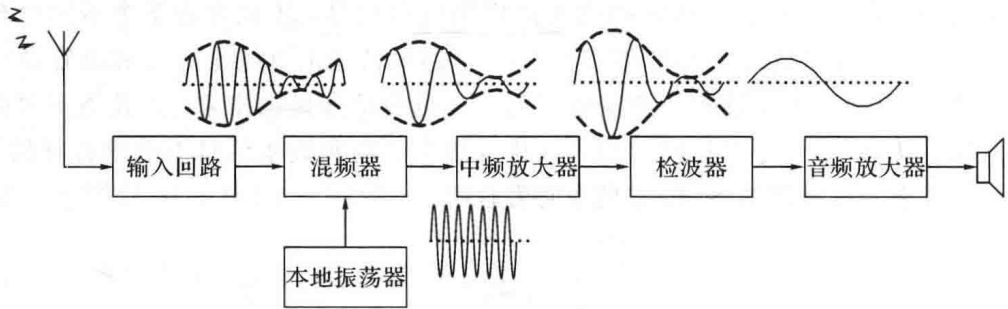


图 1-5 超外差式接收机的组成框图及各点波形

由于中频频率固定不变，选台时中频放大器的调谐回路就不需要再调整，中频放大器的选择性、通频带质量可以得到保证；而且中频频率相对较低，中频放大电路增益可以做得较高，能提高整机增益和灵敏度。这些都是超外差式接收机的优点。

图 1-5 中的输入回路、混频器、本地振荡器、中频放大器、检波器等都是本书的学习内容。那么，无线电波是如何从发射天线传播到接收天线的呢？下面简单介绍一下无线电波波段的划分与传播特点。

1.3 无线电波的传播

1.3.1 无线电波波段的划分

电磁波的范围很广，它包括无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、宇宙射线等

等。无线电波是波长比较长的一种电磁波，它所占有的频率范围很广，约为 10 kHz～10 000 GHz($10^4\sim10^{13}$ Hz)，波长范围为 30 000 m～0.3 mm。对频率或波长范围这样宽的无线电波，往往将其分成若干区段，称为波段或频段。为什么要做这种划分呢？原因是：各波段的无线电信号产生、放大和接收的方法不一样；各波段的无线电波的传播特点很不相同；各波段的应用范围也有很大差别；各波段的无线电设备的线路结构、工作原理以及所使用的元件、器件也有较大的差别。

无线电波各波段的名称、波长与频率范围、相应的频段名称以及主要用途如表 1-1 所示。

表 1-1 无线电波波段的划分

波段名称	波长范围	频率范围	频段名称	传播方式	应用场合
长波波段 (LW)	1000～10 000 m	30～300 kHz	低频 (LF)	地波	远距离通信
中波波段 (MW)	100～1000 m	300～3000 kHz	中频 (MF)	地波、天波	AM 广播、通信、导航等
短波波段 (SW)	10～100 m	3～30 MHz	高频 (HF)	天波、地波	广播、中距离通信等
超短波波段 (VSW)	1～10 m	30～300 MHz	甚高频 (YHF)	直线传播 散射传播	移动通信、电视广播、调频广播、导航等
分米波波段 (USW)	10～100 cm	300～3000 MHz	超高频 (UHF)	直线传播 散射传播	移动通信、电视广播、中继通信、卫星通信、雷达等
厘米波波段 (SSW)	1～10 cm	3～30 GHz	特高频 (VHF)	直线传播	中继通信、卫星通信、雷达等
毫米波波段 (ESW)	1～10 mm	30～300 GHz	极高频 (EHF)	直线传播	微波通信、雷达等

另外，也把 1～300 GHz(波长为 30 cm～1 mm)频段称为微波波段。

无线电波的传播是无线电通信的重要环节之一，那么不同波段的无线电波传播的方式和传播的特点是什么？下面进行简要介绍。

1.3.2 无线电波各波段的传播特点

1. 无线电波的基本传递方式

无线电波和光波一样，具有直射、绕射、反射和折射等现象。按照由发射天线到接收天线的传播途径不同分类，无线电波传播包括表面波(地面波)、天波和空间波三种方式。

1) 表面波

表面波主要依靠绕射方式传播，即电波沿着弯曲的地球表面行进到接收点，如图 1-6 所示。

由于地球表面是半导体性质,电磁波能在其中感应出传导电流,使电磁波能沿着地面传播。另外,电磁波在传播过程中将消耗掉一部分能量。电磁波的频率越高,由于“集肤效应”的产生,地球表面对电磁波呈现的电阻越大,损耗越大。所以,这种传播方式对低频,也即长波有利。

2) 天波

天波是依靠电离层的反射和折射到达接收点的,如图 1-7 所示。

什么是电离层?简单地说,在离地面 50 km 以上的地方由于空气稀薄,当受到强烈的太阳紫外线和宇宙射线照射时,气体分子容易产生电离,形成电子和离子,这些被电离的空气,形成了几层密度较大的层次,分别称为 D 层、E 层、 F_1 层和 F_2 层。这些成层分布的被电离了的空气层称为电离层。D 层约在 60 km 处,E 层约在 100~130 km 处, F_1 层和 F_2 层约在 200~400 km 处。电离层的高度以及电子、离子的密度与太阳有密切的关系。白天有太阳照射,电离程度大,形成 D 层、E 层、 F_1 层和 F_2 层,而晚上 D 层消失, F_1 层和 F_2 层合并称为 F 层。电离层还随着季节和太阳活动情况而变化,对无线电波传播影响显著的是 E 层和 F 层。

当电磁波在电离层中传播时,一部分能量被吸收,另一部分能量被反射和折射返回地面接收点,形成天波。电离层相当于空中一面反射电磁波的镜子。由于惯性作用,频率越高,电子和离子振荡的幅度越小,因而它们吸收电磁波的能量也就越小。所以,利用电离层通信,高频较有效。但是,频率越高,电波的穿透能力越强,当频率高于一定值后,就会穿透电离层,一去不复返。因此,利用天波进行通信,一般只限于短波波段。

3) 空间波

空间波是在空间传播的,主要包括直射波和反射波,如图 1-8 所示。空间波一般适用于微波的传播。

为了增强接收效果和增大接收距离,要求发射天线和接收天线离地面较高。通信距离越远,要求天线越高。理论计算和实践经验都表明,当发射天线和接收天线的高度各为 50 m 时,直射波的传播距离约为 50 km。如果要传播更远的话,则需要采用中继通信。

2. 各波段传播特点

电波传播的规律比较复杂,影响它的因素也较多,这里不再详细论述。通过上面对电波传播基本方式的简要介绍,可以大致得出各波段的传播特点和主要应用。

(1) 长波波段用地面波方式传播有利,因损耗小,可远距离传输。长波穿入电离层很浅,吸收不大,在低电离层中受到强烈反射,因此利用天波方式也可传播得很远。长波波段主要用于导航和播送标准时间信号,也用于长距离无线电报。

(2) 中波波段的传播特点与长波相似,可用地面波方式和天波方式传播。在用地面波方式传播时,由于中波的频率比长波高,故地面损耗增大,传播距离减小,只有约 100 km。在用天波方式传播时,由于中波的频率比长波高,故穿入电离层也比长波深,这样电离层

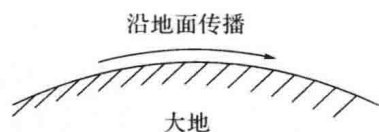


图 1-6 表面波传播方式

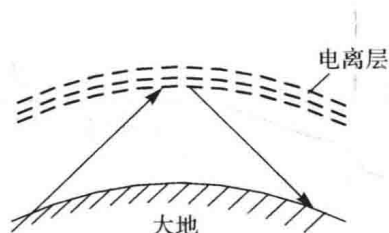


图 1-7 天波传播方式

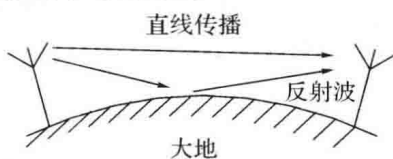


图 1-8 空间波传播方式