

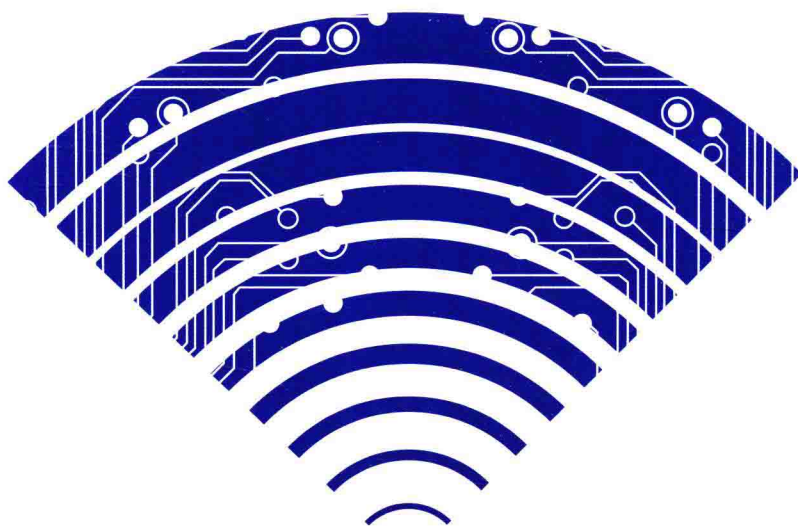


教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材  
高等学校电子信息类专业系列教材

# 通信电子线路

孙冬艳 吴嶽 编著

Sun Dongyan Wu Yue



清华大学出版社





教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材  
高等学校电子信息类专业系列教材

# 通信电子线路

孙冬艳 吴嶽 编著

Sun Dongyan Wu Yue



清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书以无线通信收发信机的组成框图为基础,系统地介绍了通信电路中各模块的电路原理与设计方法。全书共分12章,包括绪论、选频网络、阻抗变换与阻抗匹配、传输线和Smith图、双端口网络参数和稳定性、放大器、噪声及低噪声放大器、非线性电路及其分析方法、正弦波振荡器、振幅调制与解调、角度调制与解调、反馈控制电路和频率合成、收发信机的整体设计介绍。每一章都有对关键知识的小结,并附有部分习题答案。

本书可作为高等院校通信专业和电子信息工程专业本科生“通信电路”等课程的教材或参考书,也可供相关专业的工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

通信电子线路/孙冬艳,吴嶽编著. —北京:清华大学出版社,2017

(高等学校电子信息类专业系列教材)

ISBN 978-7-302-48201-7

I. ①通… II. ①孙… ②吴… III. ①通信系统—电子电路—高等学校—教材 IV. ①TN91

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第207810号

责任编辑:曾 珊 梅荣芳

封面设计:李召霞

责任校对:时翠兰

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印装者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:20.75

字 数:502千字

版 次:2017年11月第1版

印 次:2017年11月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:49.00元

产品编号:071943-01

# 高等学校电子信息类专业系列教材

## 顾问委员会

|     |                   |     |                   |
|-----|-------------------|-----|-------------------|
| 谈振辉 | 北京交通大学（教指委高级顾问）   | 郁道银 | 天津大学（教指委高级顾问）     |
| 廖延彪 | 清华大学（特约高级顾问）      | 胡广书 | 清华大学（特约高级顾问）      |
| 华成英 | 清华大学（国家级教学名师）     | 于洪珍 | 中国矿业大学（国家级教学名师）   |
| 彭启琮 | 电子科技大学（国家级教学名师）   | 孙肖子 | 西安电子科技大学（国家级教学名师） |
| 邹逢兴 | 国防科学技术大学（国家级教学名师） | 严国萍 | 华中科技大学（国家级教学名师）   |

## 编审委员会

|     |     |           |     |                |
|-----|-----|-----------|-----|----------------|
| 主 任 | 吕志伟 | 哈尔滨工业大学   |     |                |
| 副主任 | 刘 旭 | 浙江大学      | 王志军 | 北京大学           |
|     | 隆克平 | 北京科技大学    | 葛宝臻 | 天津大学           |
|     | 秦石乔 | 国防科学技术大学  | 何伟明 | 哈尔滨工业大学        |
|     | 刘向东 | 浙江大学      |     |                |
| 委 员 | 王志华 | 清华大学      | 宋 梅 | 北京邮电大学         |
|     | 韩 焱 | 中北大学      | 张雪英 | 太原理工大学         |
|     | 殷福亮 | 大连理工大学    | 赵晓晖 | 吉林大学           |
|     | 张朝柱 | 哈尔滨工程大学   | 刘兴钊 | 上海交通大学         |
|     | 洪 伟 | 东南大学      | 陈鹤鸣 | 南京邮电大学         |
|     | 杨明武 | 合肥工业大学    | 袁东风 | 山东大学           |
|     | 王忠勇 | 郑州大学      | 程文青 | 华中科技大学         |
|     | 曾 云 | 湖南大学      | 李思敏 | 桂林电子科技大学       |
|     | 陈前斌 | 重庆邮电大学    | 张怀武 | 电子科技大学         |
|     | 谢 泉 | 贵州大学      | 卞树檀 | 第二炮兵工程大学       |
|     | 吴 瑛 | 解放军信息工程大学 | 刘纯亮 | 西安交通大学         |
|     | 金伟其 | 北京理工大学    | 毕卫红 | 燕山大学           |
|     | 胡秀珍 | 内蒙古工业大学   | 付跃刚 | 长春理工大学         |
|     | 贾宏志 | 上海理工大学    | 顾济华 | 苏州大学           |
|     | 李振华 | 南京理工大学    | 韩正甫 | 中国科学技术大学       |
|     | 李 晖 | 福建师范大学    | 何兴道 | 南昌航空大学         |
|     | 何平安 | 武汉大学      | 张新亮 | 华中科技大学         |
|     | 郭永彩 | 重庆大学      | 曹益平 | 四川大学           |
|     | 刘缠牢 | 西安工业大学    | 李儒新 | 中科院上海光学精密机械研究所 |
|     | 赵尚弘 | 空军工程大学    | 董友梅 | 京东方科技集团        |
|     | 蒋晓瑜 | 装甲兵工程学院   | 蔡 毅 | 中国兵器科学研究院      |
|     | 仲顺安 | 北京理工大学    | 冯其波 | 北京交通大学         |
|     | 黄翊东 | 清华大学      | 张有光 | 北京航空航天大学       |
|     | 李勇朝 | 西安电子科技大学  | 江 毅 | 北京理工大学         |
|     | 章毓晋 | 清华大学      | 张伟刚 | 南开大学           |
|     | 刘铁根 | 天津大学      | 宋 峰 | 南开大学           |
|     | 王艳芬 | 中国矿业大学    | 靳 伟 | 香港理工大学         |
|     | 苑立波 | 哈尔滨工程大学   |     |                |

# 序

## FOREWORD

我国电子信息产业销售收入总规模在 2013 年已经突破 12 万亿元,行业收入占工业总体比重已经超过 9%。电子信息产业在工业经济中的支撑作用凸显,更加促进了信息化和工业化的高层次深度融合。随着移动互联网、云计算、物联网、大数据和石墨烯等新兴产业的爆发式增长,电子信息产业的发展呈现了新的特点,电子信息产业的人才培养面临着新的挑战。

(1) 随着控制、通信、人机交互和网络互联等新兴电子信息技术不断发展,传统工业设备融合了大量最新的电子信息技术,它们一起构成了庞大而复杂的系统,派生出大量新兴的电子信息技术应用需求。这些“系统级”的应用需求,迫切要求具有系统级设计能力的电子信息技术人才。

(2) 电子信息系统的功能越来越复杂,系统的集成度越来越高。因此,要求未来的设计者应该具备更扎实的理论基础知识和更宽广的专业视野。未来电子信息系统设计越来越要求软件和硬件的协同规划、协同设计和协同调试。

(3) 新兴电子信息技术的发展依赖于半导体产业的不断推动,半导体厂商为设计者提供了越来越丰富的生态资源,系统集成厂商的全方位配合又加速了这种生态资源的进一步完善。半导体厂商和系统集成厂商所建立的这种生态系统,为未来的设计者提供了更加便捷却又必须依赖的设计资源。

教育部 2012 年颁布了新版《高等学校本科专业目录》,将电子信息类专业进行了整合,为各高校建立系统化的人才培养体系,培养具有扎实理论基础和宽广专业技能的、兼顾“基础”和“系统”的高层次电子信息人才给出了指引。

传统的电子信息学科专业课程体系呈现“自底向上”的特点,这种课程体系偏重对底层元器件的分析与设计,较少涉及系统级的集成与设计。近年来,国内很多高校对电子信息类专业课程体系进行了大力度的改革,这些改革顺应时代潮流,从系统集成的角度,更加科学合理地构建了课程体系。

为了进一步提高普通高校电子信息类专业教育与教学质量,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》和《教育部关于全面提高高等教育质量若干意见》(教高【2012】4 号)的精神,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会开展了“高等学校电子信息类专业课程体系”的立项研究工作,并于 2014 年 5 月启动了《高等学校电子信息类专业系列教材》(教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材)的建设工作。其目的是为推进高等教育内涵式发展,提高教学水平,满足高等学校对电子信息类专业人才培养、教学改革与课程改革的需要。

本系列教材定位于高等学校电子信息类专业的专业课程,适用于电子信息类的电子信

息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、光电信息科学与工程、信息工程及其相近专业。经过编审委员会与众多高校多次沟通,初步拟定分批次(2014—2017年)建设约100门课程教材。本系列教材将力求在保证基础的前提下,突出技术的先进性和科学的前沿性,体现创新教学和工程实践教学;将重视系统集成思想在教学中的体现,鼓励推陈出新,采用“自顶向下”的方法编写教材;将注重反映优秀的教学改革成果,推广优秀的教学经验与理念。

为了保证本系列教材的科学性、系统性及编写质量,本系列教材设立顾问委员会及编审委员会。顾问委员会由教指委高级顾问、特约高级顾问和国家级教学名师担任,编审委员会由教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员和一线教学名师组成。同时,清华大学出版社为本系列教材配置优秀的编辑团队,力求高水准出版。本系列教材的建设,不仅有众多高校教师参与,也有大量知名的电子信息类企业支持。在此,谨向参与本系列教材策划、组织、编写与出版的广大教师、企业代表及出版人员致以诚挚的感谢,并殷切希望本系列教材在我国高等学校电子信息类专业人才培养与课程体系建设中发挥切实的作用。

吕志伟 教授

# 前言

## PREFACE

通信电路讲述发射机和接收机的射频部分和中频部分,其电路功能有射频放大、中频放大、变频、调制和解调等。当前移动通信飞速发展,通信机的工作频率已超出了 2GHz,因而一部分射频电路成为分布参数电路。电路技术的发展早已进入了集成电路设计的时代,分立器件用得越来越少,整机生产技术的无调整化趋势使原来通信机中经常使用的 LC 调谐电路逐渐被各种体积小、设计精良的滤波器取代,整机设计人员必须准确地选用集成电路并能熟练使用 CAD 软件。考虑到以上形势,编写本书旨在较全面地介绍通信电路的有关知识,为集成电路和整机设计工作打好基础。

本书的特点是注重培养扎实的专业基础,从通信系统框图着手,系统地介绍通信电路的基础知识和各单元电路的基本原理与实现方法,强调对基本概念的理解与运用,全书的内容与应用的结合比较紧密,理论与实践的结合也比较紧密,并有一定的电路设计实例和仿真分析。

第 1 章为绪论,通过对通信机框图的介绍,使读者了解通信电路的主要功能以及各种功能电路在整机中所处的位置。

第 2 章为选频网络、阻抗变换与阻抗匹配,突出了单谐振回路的阻抗变换和阻抗匹配功能。电路分析时应用了电网络的对偶原理,在末尾简单介绍了各种滤波器的工作原理和适用频率。

第 3 章为传输线和 Smith 图,这是分析分布参数电路必备的知识,进一步介绍了用 Smith 图实现阻抗匹配的方法,为后面讲述放大器打基础。传输线变压器是宽带阻抗匹配和功率合成的主要部件,因而一并在本章介绍。

第 4 章为双端口网络参数和稳定性,主要为下一章放大器设计打基础。在此讲述了 Y 参数和 S 参数以及相关的稳定性判据。用信号流图的方法配合 S 参数进行电路分析可使过程简单,分析结果明了,因而在 4.5 节简单介绍了信号流图。定向耦合器本属多端口网络,由于它是 S 参数测量中必须采用的器件,因此在附录 4A 着重分析了由传输线变压器构成的定向耦合器的原理,用这种定向耦合器可以构成有线电视网络中的分支器。

放大器的分析放在第 5、6 两章,第 5 章的分析重点在于最大功率传输和稳定性,第 6 章的出发点在于减小噪声系数,有关噪声的基础知识也放在第 6 章介绍。

第 7 章介绍非线性电阻电路的常用工程分析方法。通过幂级数分析法解释了非线性压缩或扩张、交调、互调等电路现象,用折线分析法分析了二极管包络检波、功率放大和倍频器,在介绍非线性时变电路后分析了各种混频器,模拟四象限乘法器可用于较低频率的混频、同步检波、鉴频及可控增益放大,因而将此内容安排在本章。

第 8 章为正弦波振荡器,除了 LC 振荡器、RC 振荡器等一般内容外,还加入了用 S 参数

分析潜在不稳定双端口网络产生振荡的条件,并分析了相位噪声的产生机理以及相位噪声的功率谱密度曲线。

第9章为振幅调制与解调,第10章为角度调制与解调,考虑到本课程有可能安排在“通信原理”课程前面,因而在每章前面首先讲述信号。目前调制与解调均用集成电路实现,因而在电路讲述时侧重于方法的介绍,像二极管包络检波器、斜率鉴频器一类电路在实际中已很少用到,将它们留在教材中是考虑到内容的完整性。

第11章为反馈控制电路和频率合成,介绍了AGC、AFC和PLL以及锁相环频率合成器,重点放在PLL和频率合成部分。反馈控制电路均是非线性电路,因而以定性分析为主,配以一定的电路实例和设计实践。

第12章为收发信机整体设计介绍,讲述了收发信机的各种技术指标、发射机和接收机的各种技术方案,最后是设计实例。

本书涉及高频电路、微带电路、电网络分析等内容,教学时可根据实际情况选用。建议教学学时为64学时。

学习本教材须具备电路分析基础、模拟电子技术、概率论与随机过程的基础知识。本书适用于大学本科的教学,也可供相关工程技术人员参考。

本书的前7章为吴嶽老师任教时编写,孙冬艳老师接任教学后完成了后5章,全书的绘图和计算机录入由孙冬艳老师完成。另外,孙老师在最后增加了各章小结并补充增加了前7章的习题。

由于编者业务水平有限,加之编写时间紧迫,因而教材中难免有不足之处,恳请专家和读者批评指正。

教材编写得到了南开大学电子信息与光学工程学院的支持,特此表示感谢。

编 者

2017年5月

# 常用符号说明

---

|        |     |
|--------|-----|
| $I, i$ | 电流  |
| $V, v$ | 电压  |
| $P$    | 功率  |
| $R, r$ | 电阻  |
| $G, g$ | 电导  |
| $X, x$ | 电抗  |
| $B, b$ | 电纳  |
| $Z, z$ | 阻抗  |
| $Y, y$ | 导纳  |
| $L$    | 电感  |
| $\phi$ | 相位  |
| $D$    | 二极管 |
| $Tr$   | 变压器 |
| $T$    | 三极管 |

|                  |       |
|------------------|-------|
| $C$              | 电容    |
| $M$              | 互感    |
| $t$              | 时间    |
| $f, F$           | 频率    |
| $\omega, \Omega$ | 角频率   |
| $BW$             | 带宽    |
| $Q$              | 品质因数  |
| $\Gamma$         | 反射系数  |
| $S$              | 驻波比   |
| $\theta$         | 流通角   |
| $VD$             | 变容二极管 |
| $X$              | 石英晶体  |
| $A_v$            | 电压增益  |
| $G_p$            | 功率增益  |

# 目录

## CONTENTS

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                      | 1  |
| 1.1 无线通信系统的组成 .....                 | 1  |
| 1.1.1 通信系统的组成 .....                 | 1  |
| 1.1.2 无线通信收发信机的框图 .....             | 3  |
| 1.2 无线电频率划分和电波传播 .....              | 5  |
| 本章小结 .....                          | 6  |
| 习题与思考题 .....                        | 6  |
| 第 2 章 选频网络、阻抗变换与阻抗匹配 .....          | 7  |
| 2.1 单谐振回路 .....                     | 7  |
| 2.1.1 串联谐振回路 .....                  | 7  |
| 2.1.2 并联谐振回路 .....                  | 10 |
| 2.1.3 信号源内阻和负载电阻对谐振回路的影响 .....      | 11 |
| 2.2 串并联阻抗等效互换与阻抗变换 .....            | 12 |
| 2.2.1 电阻与电抗串并联的等效互换 .....           | 12 |
| 2.2.2 电抗回路和支路抽头时电阻变换关系及电源等效电路 ..... | 14 |
| 2.3 匹配网络设计之一 .....                  | 17 |
| 2.3.1 L 型匹配网络 .....                 | 17 |
| 2.3.2 T 型和 $\Pi$ 型匹配网络 .....        | 19 |
| 2.4 双耦合谐振回路 .....                   | 20 |
| 2.4.1 双耦合谐振回路的电路形式 .....            | 20 |
| 2.4.2 耦合回路的频率特性 .....               | 21 |
| 2.5 其他形式选频器件 .....                  | 23 |
| 2.5.1 滤波器主要性能指标 .....               | 23 |
| 2.5.2 LC 集中选择性滤波器 .....             | 24 |
| 2.5.3 石英晶体谐振器与晶体滤波器 .....           | 25 |
| 2.5.4 陶瓷滤波器和声表面波滤波器 .....           | 27 |
| 本章小结 .....                          | 28 |
| 附录 2A 调幅波通过谐振回路的失真 .....            | 29 |
| 附录 2B 电抗曲线和电纳曲线 .....               | 30 |
| 习题与思考题 .....                        | 31 |
| 第 3 章 传输线和 Smith 图 .....            | 34 |
| 3.1 均匀传输线上电磁能量传输定理 .....            | 34 |
| 3.1.1 电报方程及其解 .....                 | 34 |

|       |                                                                       |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.2 | 无损耗均匀传输线                                                              | 36 |
| 3.2   | 均匀传输线接负载后的电特性                                                         | 37 |
| 3.2.1 | 反射系数、终接负载传输线上任意一点的视入阻抗                                                | 37 |
| 3.2.2 | 驻波、驻波系数及行波系数                                                          | 38 |
| 3.2.3 | 几种情况讨论                                                                | 39 |
| 3.2.4 | 电压入射波计算                                                               | 40 |
| 3.3   | Smith图                                                                | 42 |
| 3.3.1 | Smith阻抗圆图                                                             | 42 |
| 3.3.2 | Smith导纳圆图                                                             | 45 |
| 3.4   | 阻抗匹配网络设计之二                                                            | 46 |
| 3.4.1 | 用Smith图设计集中参数阻抗匹配                                                     | 46 |
| 3.4.2 | 用Smith图设计分布参数匹配电路                                                     | 49 |
| 3.4.3 | 短传输线和集中参数元件间的等效                                                       | 52 |
| 3.4.4 | 传输线变压器及宽带阻抗匹配                                                         | 53 |
|       | 本章小结                                                                  | 56 |
|       | 习题与思考题                                                                | 56 |
| 第4章   | 双端口网络参数和稳定性                                                           | 58 |
| 4.1   | 概述                                                                    | 58 |
| 4.2   | 双端口网络的Y参数                                                             | 59 |
| 4.2.1 | 双端口网络的短路导纳参数                                                          | 59 |
| 4.2.2 | 不定导纳矩阵与不同组态Y参数间转换                                                     | 62 |
| 4.3   | 散射参数                                                                  | 64 |
| 4.3.1 | 单端口网络的S参数                                                             | 64 |
| 4.3.2 | 多端口网络的S参数及归一化散射矩阵                                                     | 66 |
| 4.3.3 | 双端口网络的S参数                                                             | 69 |
| 4.3.4 | 归一化入射和反射分量及S参数的物理意义                                                   | 72 |
| 4.3.5 | 散射参数的测量                                                               | 74 |
| 4.4   | 双端口网络的稳定性                                                             | 75 |
| 4.4.1 | 双端口网络稳定性的概述                                                           | 75 |
| 4.4.2 | Y参数绝对稳定条件                                                             | 75 |
| 4.4.3 | S参数绝对稳定条件                                                             | 78 |
| 4.5   | 信号流图                                                                  | 83 |
| 4.5.1 | 信号流图基本概念                                                              | 83 |
| 4.5.2 | 散射参数信号流图                                                              | 84 |
|       | 本章小结                                                                  | 86 |
|       | 附录4A 定向耦合器                                                            | 86 |
|       | 附录4B 有关公式的推导                                                          | 89 |
|       | 附录4B.1 式(4-119)和式(4-120)的推导                                           | 89 |
|       | 附录4B.2 式(4-124)的推导                                                    | 89 |
|       | 附录4B.3 $ \Gamma_{2S}  > \rho_{2S}$ 和 $ \Gamma_{2S}  < \rho_{2S}$ 条件推导 | 90 |
|       | 习题与思考题                                                                | 90 |
| 第5章   | 放大器                                                                   | 92 |
| 5.1   | 概述                                                                    | 92 |

|              |                                                 |            |
|--------------|-------------------------------------------------|------------|
| 5.1.1        | 双端口网络的有源性 .....                                 | 92         |
| 5.1.2        | 放大器设计时要考虑的主要问题 .....                            | 94         |
| 5.1.3        | 射频放大器的分类及主要指标 .....                             | 94         |
| 5.1.4        | 晶体管和场效应管的高频等效电路 .....                           | 95         |
| 5.2          | 集中参数中频放大器和高频放大器的电路实例 .....                      | 97         |
| 5.2.1        | 集中参数中频放大器 .....                                 | 97         |
| 5.2.2        | 集中参数高频小信号放大器 .....                              | 97         |
| 5.3          | Y 参数小信号放大器设计 .....                              | 98         |
| 5.3.1        | 单向化及单向化小信号放大器分析 .....                           | 98         |
| 5.3.2        | 一般小信号放大器分析 .....                                | 101        |
| 5.4          | S 参数小信号放大器设计 .....                              | 106        |
| 5.4.1        | S 参数小信号放大器的一般分析 .....                           | 106        |
| 5.4.2        | 最佳负载反射系数 .....                                  | 108        |
| 5.4.3        | 输入、输出同时共轭匹配的情况 .....                            | 109        |
| 5.4.4        | 等功率增益圆 .....                                    | 110        |
| 5.4.5        | 潜在不稳定情况下放大器的设计 .....                            | 112        |
| 5.4.6        | 转换器功率增益与输入阻抗匹配 .....                            | 114        |
| 5.4.7        | 资用功率增益和等资用功率增益圆 .....                           | 116        |
|              | 本章小结 .....                                      | 116        |
|              | 附录 5A 有关公式的推导 .....                             | 117        |
|              | 附录 5A.1 式(5-70)第二项取减号的说明 .....                  | 117        |
|              | 附录 5A.2 式(5-76)的推导 .....                        | 117        |
|              | 附录 5A.3 从 $g_{20}$ 求 $\Gamma_{\text{Lm}}$ ..... | 119        |
|              | 附录 5A.4 式(5-107)的推导 .....                       | 119        |
|              | 习题与思考题 .....                                    | 120        |
| <b>第 6 章</b> | <b>噪声及低噪声放大器 .....</b>                          | <b>121</b> |
| 6.1          | 噪声的统计描述,元器件内部噪声 .....                           | 121        |
| 6.1.1        | 噪声的统计描述 .....                                   | 121        |
| 6.1.2        | 热噪声 .....                                       | 122        |
| 6.1.3        | 散弹噪声 .....                                      | 123        |
| 6.1.4        | 闪烁噪声 .....                                      | 123        |
| 6.1.5        | 双极晶体管和场效应管的噪声及噪声模型 .....                        | 124        |
| 6.2          | 噪声电路计算、双端口网络噪声参数 .....                          | 124        |
| 6.2.1        | 电阻串并联的噪声计算 .....                                | 124        |
| 6.2.2        | 噪声通过网络时的计算 .....                                | 125        |
| 6.2.3        | 双端口网络的等效噪声带宽 .....                              | 126        |
| 6.2.4        | 噪声系数 .....                                      | 126        |
| 6.2.5        | 等效噪声温度 .....                                    | 129        |
| 6.2.6        | 噪声系数的测量 .....                                   | 130        |
| 6.3          | 低噪声放大器设计 .....                                  | 131        |
| 6.3.1        | 双端口网络的最佳信源阻抗和最小噪声系数 .....                       | 131        |
| 6.3.2        | 低噪声放大器设计 .....                                  | 133        |
|              | 本章小结 .....                                      | 135        |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 附录 6A 单调谐回路的等效噪声带宽计算 .....     | 135        |
| 附录 6B 等噪声系数圆推导 .....           | 136        |
| 习题与思考题 .....                   | 137        |
| <b>第 7 章 非线性电路及其分析方法 .....</b> | <b>139</b> |
| 7.1 概述 .....                   | 139        |
| 7.2 非线性电路的基本概念与非线性元件 .....     | 140        |
| 7.2.1 非线性电路的基本概念 .....         | 140        |
| 7.2.2 非线性电阻及其性能描述 .....        | 141        |
| 7.2.3 非线性电感和非线性电容 .....        | 142        |
| 7.2.4 非线性电路的分类 .....           | 143        |
| 7.3 非线性电阻电路的幂级数分析法 .....       | 143        |
| 7.3.1 幂级数分析法 .....             | 143        |
| 7.3.2 非线性压缩或扩张、交调和互调 .....     | 144        |
| 7.3.3 1dB 压缩点和三阶交截点 .....      | 146        |
| 7.3.4 非线性产物的一般规律 .....         | 147        |
| 7.4 折线分析法及其应用 .....            | 148        |
| 7.4.1 二极管包络检波器电路分析 .....       | 148        |
| 7.4.2 谐振功率放大器的折线分析法 .....      | 152        |
| 7.4.3 倍频器 .....                | 156        |
| 7.5 双极型四象限模拟乘法器 .....          | 156        |
| 7.6 混频器和线性时变参量电路 .....         | 160        |
| 7.6.1 双极晶体管混频器 .....           | 160        |
| 7.6.2 二极管混频器 .....             | 162        |
| 本章小结 .....                     | 166        |
| 附录 7A 余弦脉冲系数表 .....            | 166        |
| 习题与思考题 .....                   | 170        |
| <b>第 8 章 正弦波振荡器 .....</b>      | <b>173</b> |
| 8.1 反馈振荡器的基本原理 .....           | 174        |
| 8.1.1 LCR 回路的暂态过程 .....        | 174        |
| 8.1.2 反馈振荡器的基本组成 .....         | 175        |
| 8.1.3 振荡平衡条件 .....             | 176        |
| 8.1.4 振荡器的起振条件 .....           | 176        |
| 8.1.5 振荡器的稳定条件 .....           | 176        |
| 8.2 LC 正弦波振荡器 .....            | 179        |
| 8.2.1 三端式振荡器 .....             | 179        |
| 8.2.2 互感耦合振荡器 .....            | 183        |
| 8.3 石英晶体振荡器 .....              | 185        |
| 8.3.1 并联型晶体振荡器 .....           | 186        |
| 8.3.2 串联型晶体振荡器 .....           | 188        |
| 8.3.3 用 TTL 电路构成晶体振荡器 .....    | 188        |
| 8.4 RC 正弦波振荡器 .....            | 189        |
| 8.4.1 RC 相移振荡器 .....           | 189        |
| 8.4.2 文氏桥振荡器 .....             | 191        |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 8.5 负阻振荡器 .....              | 192 |
| 8.5.1 负阻的概念 .....            | 192 |
| 8.5.2 负阻振荡的原理 .....          | 193 |
| 8.5.3 潜在不稳定双端口网络构成振荡器 .....  | 194 |
| 8.6 几种特殊的振荡现象 .....          | 196 |
| 8.6.1 寄生振荡 .....             | 196 |
| 8.6.2 间歇振荡 .....             | 196 |
| 8.6.3 频率牵引 .....             | 196 |
| 8.7 振荡器的频率稳定 .....           | 197 |
| 8.7.1 频率稳定度的表示 .....         | 197 |
| 8.7.2 影响振荡器稳定的因素 .....       | 197 |
| 8.7.3 振荡器的稳频措施 .....         | 199 |
| 8.7.4 振荡器的相位噪声 .....         | 200 |
| 本章小结 .....                   | 203 |
| 习题与思考题 .....                 | 203 |
| <b>第9章 振幅调制与解调</b> .....     | 206 |
| 9.1 调幅信号分析 .....             | 206 |
| 9.1.1 普通调幅 .....             | 206 |
| 9.1.2 双边带调幅 .....            | 209 |
| 9.1.3 单边带调幅 .....            | 210 |
| 9.2 调幅电路 .....               | 210 |
| 9.2.1 高电平调制 .....            | 211 |
| 9.2.2 二极管调制电路 .....          | 213 |
| 9.2.3 模拟乘法器调制电路 .....        | 214 |
| 9.2.4 单边带调制电路 .....          | 214 |
| 9.3 振幅解调电路 .....             | 216 |
| 9.3.1 振幅解调电路的质量指标 .....      | 216 |
| 9.3.2 二极管包络检波器 .....         | 216 |
| 9.3.3 同步检波 .....             | 219 |
| 9.4 正交平衡调幅 .....             | 220 |
| 本章小结 .....                   | 221 |
| 习题与思考题 .....                 | 222 |
| <b>第10章 角度调制与解调</b> .....    | 224 |
| 10.1 角度调制信号的分析 .....         | 224 |
| 10.1.1 调频波和调相波的表示式 .....     | 224 |
| 10.1.2 调频波和调相波的频谱和频带宽度 ..... | 227 |
| 10.2 调频信号的产生 .....           | 230 |
| 10.2.1 调频的性能指标 .....         | 230 |
| 10.2.2 调频信号的产生方法 .....       | 231 |
| 10.2.3 扩大调频器线性频偏的方法 .....    | 231 |
| 10.2.4 直接调频电路 .....          | 231 |
| 10.3 调相信号的产生 .....           | 235 |
| 10.3.1 矢量合成法 .....           | 235 |

|               |                    |            |
|---------------|--------------------|------------|
| 10.3.2        | 可变移相法              | 236        |
| 10.3.3        | 可变延时法              | 237        |
| 10.4          | 调频信号的解调            | 237        |
| 10.4.1        | 鉴频方法与鉴频特性          | 237        |
| 10.4.2        | 斜率鉴频器              | 239        |
| 10.4.3        | 正交鉴频器              | 241        |
|               | 本章小结               | 242        |
|               | 习题与思考题             | 243        |
| <b>第 11 章</b> | <b>反馈控制电路和频率合成</b> | <b>245</b> |
| 11.1          | 自动增益控制             | 245        |
| 11.1.1        | AGC 电路原理           | 245        |
| 11.1.2        | AGC 系统传输特性与主要质量指标  | 246        |
| 11.1.3        | 放大器的增益控制方法         | 248        |
| 11.2          | 自动频率控制             | 251        |
| 11.2.1        | AFC 电路的原理          | 251        |
| 11.2.2        | AFC 电路的应用          | 252        |
| 11.3          | 锁相环的组成与工作原理        | 254        |
| 11.3.1        | 锁相环工作原理            | 254        |
| 11.3.2        | 锁相环数学模型            | 255        |
| 11.3.3        | 鉴相器                | 256        |
| 11.3.4        | 环路滤波器              | 261        |
| 11.3.5        | 压控振荡器              | 262        |
| 11.4          | 锁相环简单分析            | 263        |
| 11.4.1        | 传递函数               | 263        |
| 11.4.2        | 捕获与锁定              | 265        |
| 11.4.3        | 跟踪特性               | 266        |
| 11.4.4        | 噪声性能               | 267        |
| 11.4.5        | 稳定性                | 268        |
| 11.5          | 频率合成器              | 269        |
| 11.5.1        | 频率合成器的主要技术指标       | 269        |
| 11.5.2        | 基本的锁相环频率合成器        | 270        |
| 11.5.3        | 带高速预分频器的频率合成器      | 270        |
| 11.5.4        | 双模预分频频率合成器         | 271        |
| 11.5.5        | 小数分频频率合成器          | 272        |
| 11.5.6        | 直接数字式频率合成器         | 273        |
| 11.6          | 锁相与频率合成芯片介绍与设计举例   | 276        |
| 11.6.1        | 4046 锁相环           | 276        |
| 11.6.2        | ADF4116 频率合成器      | 279        |
|               | 本章小结               | 284        |
|               | 习题与思考题             | 285        |
| <b>第 12 章</b> | <b>收发信机的整体设计</b>   | <b>287</b> |
| 12.1          | 收发信机的工作参数和技术要求     | 287        |
| 12.1.1        | 收发系统的主要工作参数        | 287        |

|        |                    |     |
|--------|--------------------|-----|
| 12.1.2 | 发信机的技术要求 .....     | 288 |
| 12.1.3 | 收信机的技术要求 .....     | 288 |
| 12.1.4 | 灵敏度 .....          | 289 |
| 12.1.5 | 动态范围 .....         | 289 |
| 12.2   | 接收机结构 .....        | 290 |
| 12.2.1 | 超外差接收机 .....       | 290 |
| 12.2.2 | 镜像抑制接收机 .....      | 294 |
| 12.2.3 | 直接变换接收机 .....      | 295 |
| 12.2.4 | 低中频接收机 .....       | 297 |
| 12.3   | 发射机结构 .....        | 297 |
| 12.3.1 | 直接变换发射机 .....      | 297 |
| 12.3.2 | 中频调制发射机 .....      | 298 |
| 12.4   | VHF 无线传输系统实例 ..... | 299 |
| 12.4.1 | 收发系统结构 .....       | 299 |
| 12.4.2 | 频率合成与调频电路 .....    | 299 |
| 12.4.3 | 射频功率放大与控制电路 .....  | 304 |
| 12.4.4 | 收发开关与射频滤波器 .....   | 305 |
| 12.4.5 | 接收电路 .....         | 306 |
|        | 本章小结 .....         | 307 |
|        | 习题与思考题 .....       | 307 |
|        | 部分习题参考答案 .....     | 308 |
|        | 参考文献 .....         | 311 |

## 1.1 无线通信系统的组成

无线通信是指利用电磁波在空间的传播进行信息传输的一种通信方法。在通信过程中信息具体体现为信号的形式,信号实际上是某些物理量,如电流、电压、电场或磁场随时间的变化,简单地说,信号是指某物理量的时间函数。信号的传输可以通过无线或有线的方式,在有线通信时,信号在电缆或光纤中传输,这样在通信以前首先要架设通信线路,因而通信的范围受到限制。而无线通信不需要通信线路,可以实现线路架设不到或无法架设线路的地点间的通信。

无线通信的产生要追溯到19世纪末,1895年,马可尼(Guglielmo Marconi)发明了世界上第一台无线接收机,实现了几百米距离间利用电磁波进行的通信。经过不断的改进和努力,马可尼于1901年实现了跨越大西洋的无线通信。1907年,福雷斯特(Lee De Forest)发明了电子三极管,使得弱信号的放大成为可能,而由电子管构成的电子振荡器可以大大扩展无线通信的工作频率,电子管还能实现调制、检波、变频等无线通信的基本功能,它使无线通信逐渐趋于成熟。在电子管无线通信电路的发明方面,贡献最大的要数阿姆斯特朗(Edwin Howard Armstrong)。他发明了再生式接收机、超外差式接收机和超再生式接收机。1948年,肖克莱(W. Shockley)等人发明了晶体三极管,1961年发明了集成电路,使通信电路耗电变小、体积变小且重量减轻,目前已经可以把无线收发信机的主要电路做到一块芯片上。

无线通信有以下种类:无线电广播、无线电电视广播、短波通信、微波通信、卫星通信及移动通信等。此外,导航和雷达也和无线电通信密切相关。

无线通信的工作频率为 $10\text{kHz}\sim 40\text{GHz}$ ,有人用 $10\text{kHz}$ 附近的频率传送频率基准,欧洲把 $37\sim 39.5\text{GHz}$ 频段用于固定无线点对多点通信。

### 1.1.1 通信系统的组成

通信系统的功能是将信息从一处传递到另一处,图1-1为通信系统的基本组成框图。

图1-1中的信息源指需传送的原始信息,例如语音、图像、数据、文字,一般是非电量。输入变换器将非电量转变成电信号,输入变换器可以是话筒、摄像机、键盘或者扫描仪。输入变换器输出的信号称基带(Baseband)信号。基带信号是直接从信息源转换而得的信号,其占有的频带从直流或很低的频率起一直到某一较高的频率,因而它是一种宽带信号。宽