

21 世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

射频电路理论与设计 (第2版)

黄玉兰 编著

RF Circuit Theory
and Design (2nd Edition)

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS


精品系列

014012923

黄玉兰
编著

TN710-43
72-2

射频电路理论与设计 (第2版)

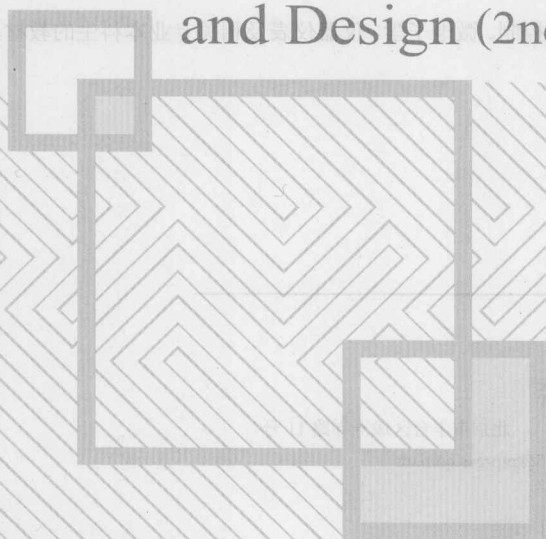
高等院校信息与通信工程规划教材
University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

要 索 容 内

本书共分10章。第1章介绍射频电路的基本概念、常用器件和电路模型。第2章介绍匹配理论。第3章介绍传输线理论。第4章介绍波导理论。第5章介绍微波器件。第6章介绍微波集成电路。第7章介绍微波天线。第8章介绍微波测量技术。第9章介绍微波通信系统。第10章介绍微波工程应用。本书可作为高等院校电子信息工程、通信工程、微波工程等专业及相关专业的教材，也可供从事微波工程工作的工程技术人员参考。



RF Circuit Theory
and Design (2nd Edition)



TN710-43
72-2



北航

C1699837

人民邮电出版社
北京



精品系列

3325101010

图书在版编目 (CIP) 数据

射频电路理论与设计 / 黄玉兰编著. — 2版. — 北京: 人民邮电出版社, 2014.1
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
ISBN 978-7-115-32530-3

I. ①射… II. ①黄… III. ①射频电路—电路理论—高等学校—教材②射频电路—电路设计—高等学校—教材
IV. ①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第203173号

内 容 提 要

本书从传输线理论和射频网络的观点出发,系统地介绍了射频电路的基本理论及设计方法,同时将史密斯圆图的图解方法应用到射频电路的设计之中。

本书为《射频电路理论与设计》第2版。全书共12章,第1章为引言;第2~4章为传输线理论、史密斯圆图和射频网络基础,系统地介绍了射频电路的基本概念、基本参数、图解工具和基本研究方法;第5~11章为谐振电路、匹配网络、滤波器、放大器、振荡器、混频器和检波器的设计,这些电路设计可以构成完整的射频电路解决方案;第12章为ADS射频电路仿真设计简介,目的是架起射频电路理论与ADS射频仿真设计的桥梁。书中不仅列举了大量具有实用价值的例题,并且以较大的篇幅详细地给出了设计求解过程。书中每章都配有小结、思考题和练习题,并在书末附有思考题和练习题的答案。本书有配套的ADS射频电路仿真教材,分别为《ADS射频电路设计基础与典型应用》和《ADS射频电路仿真与实例详解》。

本书可作为高等学校电子工程、通信工程、自动控制、微电子学、仪器仪表及相关专业本科生的教材,也可作为射频、微波及相关专业技术人员的参考书。

-
- ◆ 编 著 黄玉兰
责任编辑 武恩玉
责任印制 彭志环 杨林杰
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京中新伟业印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 22.25
字数: 546千字
-

定价: 49.80 元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316
反盗版热线: (010)81055315

射频电路理论与设计第2版第8章 射频电路仿真设计 第7章 射频电路设计 第6章 射频电路设计 第5章 射频电路设计 第4章 射频电路设计 第3章 射频电路设计 第2章 射频电路设计 第1章 射频电路设计

本书主要介绍射频电路的基本概念、基本参数、图解工具和基本研究方法。基本设计包括第12章 ADS 射频电路仿真设计简介, 第11章 混频器和检波器的设计, 第10章 振荡器的设计, 第9章 放大器的设计, 第8章 射频电路仿真设计, 第7章 射频电路设计, 第6章 射频电路设计, 第5章 射频电路设计, 第4章 射频电路设计, 第3章 射频电路设计, 第2章 射频电路设计, 第1章 射频电路设计

第2版前言

《射频电路理论与设计》自2008年10月出版以来, 已重印多次。为适应当前射频电路理论与设计的发展和教学要求, 编者对第1版进行了修订。第2版在保留第1版主要内容的同时, 本着“打好基础、面向应用”的原则, 重新编写了第1章“引言”、第10章“振荡器的设计”、第11章“混频器和检波器的设计”和第12章“ADS 射频电路仿真设计简介”。第2版在每章最后增加了小结, 将第1版的“习题”修改为第2版的“思考题和练习题”, 并在书末给出了答案。本次修订对全书文字、公式、插图、设计做了全面的修改和校对, 力求概念准确、设计详细、内容流畅、图文并茂。

随着科学技术的不断进步, 无线通信系统的工作频率不断提高, 目前应用日趋广泛的移动通信、全球定位、无线局域网和射频识别等, 工作频率都在几百 MHz 到 GHz, 这使得在此频率范围内的射频电路应用日趋广泛。此外, 新型半导体器件也使高速数字系统不断发展, 对计算机来说, CPU 的时钟频率已经达到 GHz, 同样需要考虑在此频率下射频电路的设计问题。可以看出, 射频技术在各个领域都越来越显示出其重要性。

在电子通信系统中, 只有使用更高的载波频率, 才能获得更宽的带宽, 才能更有效地传输信息; 无线通信需要采用天线发射和接收信号, 工作频率越高, 天线尺寸越小, 这迎合了现代通信对尺寸小型化的要求。正是由于上述技术原因, 越来越多的电子通信系统使用了频率较高的射频频段, 带来了射频应用的繁荣, 并推动了射频技术的进一步发展。

在射频频段, 电路出现了许多独特的性质, 这些性质在常用的低频电路中没有遇到过, 因此需要建立射频电路的理论体系。射频电路理论是电磁场理论与传统电子学的融合, 它将电磁场的波动理论引入电子学, 形成了射频电路的理论体系和设计方法。电磁场理论的方法涵盖了微波传输线的知识, 却没有触及放大器、振荡器和混频器等有源电路的内容; 传统电子学涵盖了基本电路的理论, 但没有涉及电压和电流的波动性质, 这些波的反射和传输是影响射频电路特性的重要因素。低频电路理论称为集总参数电路理论, 射频电路理论称为分布参数电路理论, 低频电路理论与射频电路理论显著不同。

射频电路主要应用在无线通信领域, 在一个射频系统里需要处理收、发2个过程, 其中涉及很多射频电路的设计, 包括滤波器、放大器、振荡器、混频器和检波器的设计等, 这些电路设计构成了射频电路的基本组成部分。本书涵盖了射频电路的基本理论和基本设计方法。基本理论包括第2章传输线理论、第3章史密斯圆图、第4章射频网络基础, 系统地介绍了射频电路的基本概念、基本参数、图解工具和基本研究方法。基本设计包括第

射频电路主要应用在无线通信领域, 在一个射频系统里需要处理收、发2个过程, 其中涉及很多射频电路的设计, 包括滤波器、放大器、振荡器、混频器和检波器的设计等, 这些电路设计构成了射频电路的基本组成部分。本书涵盖了射频电路的基本理论和基本设计方法。基本理论包括第2章传输线理论、第3章史密斯圆图、第4章射频网络基础, 系统地介绍了射频电路的基本概念、基本参数、图解工具和基本研究方法。基本设计包括第

5 章谐振电路、第 6 章匹配网络、第 7 章滤波器设计、第 8 章放大器的稳定性增益和噪声、第 9 章放大器的设计、第 10 章振荡器的设计、第 11 章混频器和检波器的设计, 这些设计方法可以构成完整的射频电路解决方案。

鉴于目前国内科研院所、大型 IT 公司和高校都推广使用 ADS 软件设计射频电路, 本书第 12 章对 ADS 射频电路仿真设计进行了简单介绍, 目的是架起射频电路理论与 ADS 射频仿真设计间的桥梁。使用软件工具已经成为射频和微波电路设计的趋势, 在深入理解射频电路理论的基础上, 结合 ADS 软件工具进行设计, 是通向射频电路和射频系统设计成功的最佳路线。

本书每章都有小结, 便于读者总结和复习。本书每章配有较多例题, 均详细给出了设计求解过程。本书每章附有思考题和练习题, 并在书末给出了答案。本书有配套的 ADS 射频电路教材, 分别为《ADS 射频电路设计基础与典型应用》和《ADS 射频电路仿真与实例详解》。本书附录中给出了国际单位制 (SI) 词头、电磁学和光学的量和单位、常用材料的电导率、常用材料的相对介电常数和损耗角正切、常用同轴射频电缆特性参数, 供读者参考。

本书由黄玉兰编写。中国科学院西安光学精密机械研究所的研究生夏璞协助完成了本书的插图和习题校对工作, 在此表示感谢。

由于作者水平有限, 书中难免会有缺点和错误, 敬请广大读者予以指正。电子邮件: huangyulan10@sina.com。

编 者

2013 年 5 月

于西安邮电大学

目 录

第1章 引言	1
1.1 射频概念	1
1.1.1 频谱划分	1
1.1.2 射频和微波	2
1.1.3 射频通信系统的工作频率	3
1.1.4 射频的基本特性	3
1.2 射频电路的特点	4
1.2.1 频率与波长	4
1.2.2 低频电路理论是射频电路理论的特例	5
1.2.3 射频电路的分布参数	6
1.2.4 射频电路的集肤效应	7
1.3 射频系统	8
1.3.1 射频系统举例	9
1.3.2 收发信机	9
1.3.3 ADS 射频仿真设计	11
1.4 本书安排	12
本章小结	13
思考题和练习题	14
第2章 传输线理论	15
2.1 传输线结构	15
2.1.1 传输线的构成	15
2.1.2 几种常用的 TEM 传输线	16
2.2 传输线等效电路表示法	18
2.2.1 长线	18
2.2.2 传输线的分布参数	19
2.2.3 传输线的等效电路	20
2.3 传输线方程及其解	20
2.3.1 均匀传输线方程	20
2.3.2 均匀传输线方程的解	21
2.3.3 行波	22
2.3.4 传输线的二种边界条件	23

2.4 传输线的基本特性参数	24
2.4.1 特性阻抗	25
2.4.2 反射系数	26
2.4.3 输入阻抗	29
2.4.4 传播常数	30
2.4.5 传输功率	32
2.5 均匀无耗传输线工作状态分析	33
2.5.1 行波工作状态	33
2.5.2 驻波工作状态	34
2.5.3 行驻波工作状态	39
2.5.4 $\lambda/4$ 阻抗变换器	41
2.6 信号源的功率输出和有载传输线	43
2.6.1 包含信号源与终端负载的传输线	43
2.6.2 传输线的功率	44
2.6.3 信号源的共轭匹配	45
2.6.4 回波损耗和插入损耗	46
2.7 微带线	46
2.7.1 微带线的有效介电常数和特性阻抗	46
2.7.2 微带线的传输特性	50
2.7.3 微带线的损耗与衰减	50
本章小结	51
思考题和练习题	53
第3章 史密斯圆图	55
3.1 复平面上反射系数的表示方法	55
3.1.1 反射系数复平面	55
3.1.2 等反射系数圆和电刻度圆	57
3.2 史密斯阻抗圆图	58
3.2.1 归一化阻抗	58
3.2.2 等电阻圆和等电抗圆	59
3.2.3 史密斯阻抗圆图	60

3.2.4 史密斯阻抗圆图的应用	62	4.5 多端口网络的散射参量	100
3.3 史密斯导纳圆图	68	4.5.1 多端口网络散射参量的定义	100
3.3.1 归一化导纳	68	4.5.2 常见的多端口射频网络	101
3.3.2 史密斯导纳圆图	70	4.6 信号流图	104
3.3.3 史密斯阻抗-导纳圆图	71	4.6.1 信号流图的构成	104
3.4 史密斯圆图在集总参数元件电路中的应用	72	4.6.2 信号流图的化简规则	106
3.4.1 含串联集总参数元件时电路的输入阻抗	73	本章小结	109
3.4.2 含并联集总参数元件时电路的输入导纳	73	思考题和练习题	109
3.4.3 含一个集总电抗元件时电路的输入阻抗	74	第5章 谐振电路	111
3.4.4 含多个集总电抗元件时电路的输入阻抗	76	5.1 串联谐振电路	111
本章小结	77	5.1.1 谐振频率	111
思考题和练习题	78	5.1.2 品质因数	112
第4章 射频网络基础	80	5.1.3 输入阻抗	112
4.1 二端口低频网络参量	80	5.1.4 带宽	113
4.1.1 阻抗参量	81	5.1.5 有载品质因数	114
4.1.2 导纳参量	82	5.2 并联谐振电路	115
4.1.3 混合参量	84	5.2.1 谐振频率	115
4.1.4 转移参量	85	5.2.2 品质因数	116
4.2 二端口射频网络参量	89	5.2.3 输入导纳	116
4.2.1 散射参量	89	5.2.4 带宽	117
4.2.2 传输参量	94	5.2.5 有载品质因数	117
4.3 二端口网络的参量特性	94	5.3 传输线谐振器	119
4.3.1 互易网络	94	5.3.1 终端短路 $\lambda/2$ 传输线	120
4.3.2 对称网络	95	5.3.2 终端短路 $\lambda/4$ 传输线	121
4.3.3 无耗网络	96	5.3.3 终端开路 $\lambda/2$ 传输线	121
4.4 二端口网络的参量互换	97	5.3.4 终端开路 $\lambda/4$ 传输线	122
4.4.1 网络参量 $[Z]$ 、 $[Y]$ 、 $[h]$ 、 $[ABCD]$ 之间的相互转换	97	5.4 介质谐振器	124
4.4.2 网络参量 $[S]$ 和 $[T]$ 之间的相互转换	98	本章小结	126
4.4.3 网络参量 $[Z]$ 、 $[Y]$ 、 $[h]$ 、 $[ABCD]$ 与 $[S]$ 之间的相互转换	99	思考题和练习题	127
		第6章 匹配网络	129
		6.1 匹配网络的目的及选择方法	129
		6.2 集总参数元件电路的匹配网络设计	130
		6.2.1 传输线与负载间L形匹配网络	130

6.2.2 信源与负载间 L 形 共轭匹配网络	134
6.2.3 L 形匹配网络的带宽	137
6.2.4 T 形匹配网络和 π 形 匹配网络	140
6.3 分布参数元件电路的 匹配网络设计	142
6.3.1 负载与传输线的阻抗匹配	142
6.3.2 信源与负载的共轭匹配	146
6.4 混合参数元件电路的 匹配网络设计	149
本章小结	150
思考题和练习题	151
第 7 章 滤波器的设计	153
7.1 滤波器的类型	153
7.2 用插入损耗法设计 低通滤波器原型	154
7.2.1 巴特沃斯低通滤波器原型	154
7.2.2 切比雪夫低通滤波器原型	158
7.2.3 椭圆函数低通滤波器原型	160
7.2.4 线性相位低通滤波器原型	161
7.3 滤波器的变换	162
7.3.1 阻抗变换	162
7.3.2 频率变换	162
7.4 短截线滤波器	168
7.4.1 理查德变换	168
7.4.2 科洛达规则	169
7.4.3 低通滤波器设计举例	171
7.4.4 带阻滤波器设计举例	173
7.5 阶梯阻抗低通滤波器	175
7.5.1 短传输线段的 近似等效电路	176
7.5.2 滤波器设计举例	177
7.6 平行耦合微带线滤波器	178
7.6.1 奇模和偶模	179
7.6.2 平行耦合微带线的 滤波特性	180
7.6.3 带通滤波器设计举例	183

本章小结	185
思考题和练习题	186
第 8 章 放大器的稳定性、 增益和噪声	188
8.1 放大器的稳定性	188
8.1.1 稳定准则	188
8.1.2 稳定性判别的图解法	189
8.1.3 绝对稳定判别的解析法	194
8.1.4 放大器稳定措施	196
8.2 放大器的增益	198
8.2.1 功率增益的定义和 计算公式	198
8.2.2 最大功率增益	204
8.2.3 晶体管单向情况	204
8.2.4 晶体管双向情况	209
8.3 输入输出电压驻波比	212
8.3.1 失配因子	212
8.3.2 输入、输出驻波分析	212
8.4 放大器的噪声	214
8.4.1 等效噪声温度和噪声系数	214
8.4.2 级连网络的等效噪声 温度和噪声系数	216
8.4.3 等噪声系数圆	218
本章小结	220
思考题和练习题	221
第 9 章 放大器的设计	225
9.1 放大器的工作状态和分类	225
9.1.1 基于静态工作点的放大器 分类	225
9.1.2 基于信号大小的放大器 分类	226
9.2 放大器的偏置网络	227
9.2.1 偏置电路与射频电路 之间的连接	227
9.2.2 偏置电路的设计	227
9.3 小信号放大器的设计	228
9.3.1 小信号放大器的设计步骤	228

9.3.2 最大增益放大器的设计	229	11.1.4 单端二极管混频器	295
9.3.3 固定增益放大器的设计	233	11.1.5 单平衡混频器	299
9.3.4 最小噪声放大器的设计	241	11.2 检波器	301
9.3.5 低噪声放大器的设计	243	11.2.1 整流器与检波器	301
9.3.6 宽带放大器的设计	247	11.2.2 二极管检波器	302
9.4 功率放大器的设计	252	11.2.3 检波器的灵敏度	305
9.4.1 A类放大器的设计	252	本章小结	308
9.4.2 交调失真	256	思考题和练习题	309
9.5 多级放大器的设计	258		
本章小结	260	第12章 ADS 射频电路仿真	
习题	261	设计简介	310
第10章 振荡器的设计	263		
10.1 振荡电路的形成	263	12.1 美国安捷伦 (Agilent) 公司与	
10.1.1 振荡器的基本模型	263	ADS 软件	310
10.1.2 振荡器的有源器件	264	12.2 ADS 的设计功能	312
10.1.3 振荡器与放大器的比较	264	12.3 ADS 的仿真功能	317
10.2 微波振荡器	265	12.4 ADS 的4种主要工作视窗	322
10.2.1 振荡条件	265	12.4.1 主视窗	322
10.2.2 晶体管振荡器	268	12.4.2 原理图视窗	323
10.2.3 二极管振荡器	272	12.4.3 数据显示视窗	324
10.2.4 介质谐振器振荡器	272	12.4.4 版图视窗	325
10.2.5 压控振荡器	276	本章小结	326
10.3 振荡电路的一般分析	277	思考题和练习题	327
10.3.1 晶体管振荡器的			
一般电路	277	附录A 国际单位制 (SI) 词头	328
10.3.2 考毕兹 (Colpitts)		附录B 电学、磁学和光学的量和	
振荡器	278	单位	329
10.3.3 哈特莱 (Hartley)		附录C 某些材料的电导率	330
振荡器	281	附录D 某些材料的相对介电常数和	
10.3.4 皮尔斯 (Pierce)		损耗角正切	331
晶体振荡器	282	附录E 常用同轴射频电缆特性参数	332
10.4 振荡器的技术指标	283	思考题和练习题答案	333
本章小结	285	参考文献	347
思考题和练习题	287		
第11章 混频器和检波器的设计	289		
11.1 混频器	289		
11.1.1 混频器的特性	289		
11.1.2 混频器的种类	291		
11.1.3 混频器主要技术指标	293		

第1章 引言

在电子通信领域，只有使用更高的工作频率，才能更有效地传输信息。目前应用日趋广泛的移动通信、全球定位、无线局域网和射频识别等领域，工作频率都已经达到 GHz 频段。此外，新型半导体器件也使高速数字系统不断发展，对计算机来说，CPU 的时钟频率已经达到 GHz。这使得与此工作频率相适应的射频电路逐渐成为工程领域中一个普遍存在的技术，这就需要熟悉相应的射频电路理论及设计方法。

在射频频段，电路出现了许多独特的性质，这些性质在常用的低频电路中没有遇到过，因此需要建立新的射频电路理论体系。由于无线通信的快速发展，需要结构更紧凑、性能更高的射频滤波器、放大器、振荡器和混频器等，只有确切地知道射频电路与低频电路有什么区别以及如何实现，才能开发、改进射频电路，满足射频领域不断发展的需求。

射频电路理论是电磁场的波动理论与传统电子学的融合，射频电路的设计比较繁杂，需要采用电子设计自动化软件工具。ADS 软件是当前射频电路设计的首选工程软件，可以支持从模块到系统的设计，已经在国内的科研院所和 IT 公司中推广使用。在深入理解射频电路理论的基础上，结合软件仿真工具进行设计，是通向射频电路设计成功的最佳路线。

1.1 射频概念

在电子通信领域，信号采用的传输方式和信号的传输特性主要是由工作频率决定的。对于电磁频谱，按照频率从低到高（波长从长到短）的次序，可以划分为不同的频段。电子通信的发展历程，实际上就是所使用的工作频率由低到高的发展过程。电子通信的容量几乎与所使用的频率成正比，人们对通信容量的要求越高，使用的工作频率就越高。

1.1.1 频谱划分

在频谱分配上有一点需要特别注意，那就是干扰问题。频谱可供使用的范围是有限的，频谱被看作大自然中的一项资源，不能无秩序地随意占用，而需要仔细地计划，加以利用。频谱的分配主要是根据电磁波传播的特性和各种通信业务的要求确定的，但也要考虑一些其他因素，例如历史的发展、国际的协定、各国的政策、目前使用的状况和干扰的避免等。各国都有相应的机构对频谱进行严格的管理，国际范围内更有详细的频谱用途规定，例如，我国进行频率分配的组织是工业和信息化部无线电管理局，国际上进行频率分配的组织有国际

无线电咨询委员会（CCIR）等。

由于应用领域众多，对频谱的划分有多种方式，而今较为通用的频谱分段法是由 IEEE 建立的，见表 1.1。

表 1.1 IEEE 频谱

频 段	频 率	波 长
ELF（极低频）	30~300Hz	10 000~1 000km
VF（音频）	300~3 000Hz	1 000~100km
VLF（甚低频）	3~30kHz	100~10km
LF（低频）	30~300kHz	10~1km
MF（中频）	300 ~3 000kHz	1~0.1km
HF（高频）	3~30MHz	100~10m
VHF（甚高频）	30~300MHz	10~1m
UHF（特高频）	300~3 000MHz	100~10cm
SHF（超高频）	3~30GHz	10~1cm
EHF（极高频）	30~300GHz	1~0.1cm
亚毫米波	300~3 000GHz	1~0.1mm
P 波段	0.23~1GHz	130~30cm
L 波段	1~2GHz	30~15cm
S 波段	2~4GHz	15~7.5cm
C 波段	4~8GHz	7.5~3.75cm
X 波段	8~12.5GHz	3.75~2.4cm
Ku 波段	12.5~18GHz	2.4~1.67cm
K 波段	18~26.5GHz	1.67~1.13cm
Ka 波段	26.5~40GHz	1.13~0.75cm

在表 1.1 中，1GHz=10³MHz，1MHz=10³kHz，1kHz=10³Hz。

1.1.2 射频和微波

目前射频（Radio Frequency）没有一个严格的频率范围定义，广义地说，可以向外辐射电磁信号的频率称为射频；而在电路设计中，当频率较高、电路的尺寸可以与波长相比拟时，电路可以称为射频电路。一般认为，当频率高于 30MHz 时电路的设计就需要考虑射频电路理论；而射频电路理论应用的典型频段为几百 MHz 至 4GHz，在这个频率范围内，电路需要考虑分布参数的影响，低频的基尔霍夫电路理论不再适用。需要说明的是，随着射频电路的广泛应用和不断发展，射频的频率范围还在向更高的频率延伸，已有资料将射频的高端频率定为大于 4GHz。

微波（Microwave）也是经常使用的频段，当频率高于 4GHz 时，电路常采用微波电路的设计方法。微波是指频率从 300MHz 到 3 000GHz 的电磁波，对应的波长从 1m 到 0.1mm，分为分米波（波长 1m~100mm）、厘米波（波长 100~10mm）、毫米波（波长 10~1mm）和

亚毫米波（波长 $1\sim 0.1\text{mm}$ ）4 个波段。从上面的频率划分可以看出，微波的低频端与射频频率相重合，目前射频频率与微波频率之间没有定义出明确的频率分界点。微波电路设计需要用到场的模式理论及 TE 和 TM 传输线，这超出了本书射频电路理论的范畴，本书不予讨论。

1.1.3 射频通信系统的工作频率

1864~1873 年，麦克斯韦（James Clerk Maxwell）集人类有关电与磁的知识于一体，提出了描述电磁场特性的著名麦克斯韦方程，并在理论上预言电磁波存在。1887~1891 年，赫兹（Heinrich Rudolf Hertz）通过一系列实验验证了麦克斯韦的理论，证实了电磁波的存在。从 1901 年马可尼（Guglielmo Marconi）将相对较低的频率应用到长距离的商业通信时起，无线通信领域就在不断发展，工作频率也在不断提高。目前移动通信 GSM 系统、第三代移动通信系统（3G）、全球定位系统（GPS）、无线局域网（WLAN）、射频识别（RFID）和电视广播（DS14~68 频道）等都工作于几百 MHz 到 GHz 频段，这使得几百 MHz 到 GHz 频段的无线通信应用日趋广泛，也使得在此频段范围内的射频电路受到广泛关注。无线通信系统的工作频率见表 1.2。

表 1.2 无线通信系统的工作频率

系统名称	工作频率
GSM (900MHz 频段)	上行 890~915MHz, 下行 935~960MHz
GSM (1 800MHz 频段)	上行 1 710~1 785MHz, 下行 1 805~1 880MHz
3G (WCDMA)	上行 1 920~1 980MHz, 下行 2 110~2 170MHz
3G (TD-SCDMA)	2 010~2 025MHz, 1 880~1 920MHz, 2 300~2 400MHz
3G (CDMA2000)	825~835MHz, 870~880MHz, 1 920~1 935MHz, 2 110~2 125MHz
GPS	1 227.60 ~1 575.42MHz
WLAN (802.11 标准)	2 400~2 483.5MHz
RFID (我国超高频频段)	840~845MHz, 920~925MHz
RFID (微波频段)	2.400~2.483 5GHz, 5.725~5.875GHz
电视广播 (DS14~68 频道)	470~950MHz

另外，新型半导体器件也使高速数字系统不断发展，对计算机来说，CPU 的时钟频率已经达到 GHz，同样需要考虑在此频率下射频电路的设计问题。可以看出，随着科学技术的不断进步，射频频率的通信系统在各个领域越来越显示出其重要性。

1.1.4 射频的基本特性

射频技术的迅速发展和广泛应用与其特性密切相关。为了有效地传输信息，无线通信系统需要采用较高频率的信号，因此越来越多的电子通信系统使用了射频频段，带来了射频的繁荣，并推动射频技术进一步发展。但由于射频本身的特点，也会带来一些技术上的不利因素。

1. 射频的优点

(1) 射频提供的带宽较大。射频的工作频率较高，因此带宽较大。当工作频率为 1GHz

时,若传输的相对带宽为 10%,可以传输 100MHz 带宽的信号;当工作频率为 1MHz 时,若传输的相对带宽也为 10%,只可以传输 0.1MHz 带宽的信号。通过比较可以看出,较高的工作频率可以带来较大的带宽。大带宽的优点在于可以带来通信系统更高的信息容量。

(2) 射频所需的天线较小。射频的工作频率较高,因此天线的尺寸较小。无线通信需要采用天线发射和接收信号,当天线的尺寸可以与波长相比拟时,天线的辐射会更为有效。由于工作频率与波长成反比,提高工作频率可以降低波长,进而可以减小天线的尺寸。也就是说,工作频率的提高导致需要的天线尺寸减小,这迎合了现代通信对尺寸小型化的要求。

(3) 射频所需的元器件较小。射频电路中电感和电容等元器件的尺寸较小,这使得射频设备的体积进一步减小。

(4) 射频的频谱宽。射频通信可以提供更多的可用频谱,频谱不拥挤。

(5) 射频的速度快。射频的工作频率较高、带宽较大,因此数据传输和信号处理的速度快。

2. 射频的不利因素

由于射频本身的技术特点,也带来一些不利因素。射频技术的不利因素主要为元器件的成本高、辐射损耗大、输出功率小、设计工具精度低等。

1.2 射频电路的特点

本书的目的是全面介绍射频电路理论及设计方法,在该频段,普通低频电路的分析方法是不适用的。由此引出的问题是,射频电路为什么与低频电路有如此大的差别?射频电路的“新”理论是什么?为了更清楚地了解将要讨论的问题,下面简要分析射频电路的特点。

基尔霍夫电路理论只能用于直流电路和低频电路的设计,不能用于射频电路的设计。低频频率与射频频率有很大差异,正是由于这种频率的差异,导致低频电路理论与射频电路理论不同。

下面将在不同频率下对电路进行讨论,从中可以看出低频电路与射频电路有显著的不同,对于目前广泛使用的射频频段,必须采用全新的方法加以分析。

1.2.1 频率与波长

众所周知,在自由空间工作频率与工作波长的乘积等于光的速度,也即

$$f\lambda = c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (1.1)$$

式(1.1)中, f 为工作频率, λ 为工作波长, c 为光的速度。式(1.1)的结论是:频率越高,波长越短。射频频段有很高的频率,所以射频的工作波长很短。

在电路设计中,当频率较高、电路的尺寸可以与波长相比拟时,电路可以称为射频电路。利用式(1.1),可以得到如下数据。

1. 50Hz 市电可以采用低频电路理论

50Hz 的市电属于 ELF 频段,对应的工作波长为

$$\lambda = c / f = 6\,000\text{ km}$$

6 000km 这个工作波长比电路的尺寸大得多, 对此工作频率完全可以用低频的基尔霍夫电路理论进行电路设计。

2. 2.4GHz 无线局域网必须采用射频电路理论

无线局域网的工作频率为 2.4GHz, 对应的工作波长为

$$\lambda = c / f = 12.5\text{ cm}$$

12.5cm 这个工作波长与电路的尺寸可以相比拟, 在此工作频率下, 低频的基尔霍夫电路理论不再适用, 与此工作频率相适应的是射频电路理论。

结论是, 50Hz 的市电属于低频电路, 2.4GHz 的无线局域网属于射频电路。

1.2.2 低频电路理论是射频电路理论的特例

低频电路理论只适用于低频电路设计, 射频电路理论有更大的适用范围, 低频电路理论是射频电路理论的特例。

图 1.1 所示为终端短路的传输线, 根据射频电路理论将会得到距离短路终端 l 处的阻抗为

$$Z_{\text{in}} = jZ_0 \tan \frac{2\pi}{\lambda} l \quad (1.2)$$

式 (1.2) 中, Z_0 为常数, Z_0 的取值范围一般为几十到几百欧姆之间。

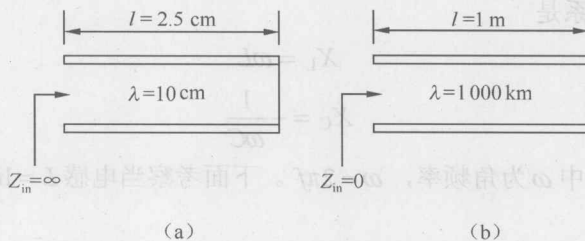


图 1.1 终端短路的传输线

式 (1.2) 改变了低频电路理论的观点, 因为低频电路理论会认为 $Z_{\text{in}} = 0$ 。下面对式 (1.2) 加以分析。

1. 假设工作波长 $\lambda = 10\text{ cm}$

由式 (1.2) 可以得到, 这时若

$$l = 2.5\text{ cm}$$

则

$$Z_{\text{in}} = jZ_0 \tan \frac{\pi}{2} = \infty$$

也即离开短路终端 2.5 cm 处, 阻抗为无穷大, 传输线等效于开路, 如图 1.1 (a) 所示。这个结论完全颠覆了低频电路的理论基础! $\lambda = 10\text{ cm}$ 属于射频波段, 可以看出射频电路理论与低频电路理论完全不同, 低频电路理论在射频时已经不再适用, 必须采用全新的射频电路理论

处理射频电路的问题。

2. 假设工作波长 $\lambda = 1000\text{km}$

由式 (1.2) 可以得到, 这时若

$$l = 1\text{m}$$

则

$$Z_{\text{in}} = jZ_0 \tan\left(\frac{2\pi}{1000000}\right) \approx 0$$

结果是: 即便离开短路终端 1m 处, 阻抗为 0 , 传输线还相当于短路, 如图 1.1 (b) 所示。这个结论符合低频电路的理论观点。 $\lambda = 1000\text{km}$ 属于低频波段, 在低频波段低频电路理论和射频电路理论都适用, 由此可以看出低频电路理论是射频电路理论的特例。

从上面的讨论可以看出, 低频电路理论是射频电路理论的特例, 低频电路理论不能用于射频电路, 必须采用射频的电路理论分析、设计射频电路。

1.2.3 射频电路的分布参数

低频电路理论称为集总参数电路理论, 射频电路理论称为分布参数电路理论, 分布参数是射频电路的最大特色。

从正弦交流 (AC) 电路分析中可以知道, 电感 L 和电容 C 的电抗 X_L 和 X_C 与频率有关, X_L 和 X_C 与频率的关系是

$$X_L = \omega L \quad (1.3)$$

$$X_C = -\frac{1}{\omega C} \quad (1.4)$$

式 (1.3) 和式 (1.4) 中 ω 为角频率, $\omega = 2\pi f$ 。下面考察当电感 $L = 1\text{nH}$ 和电容 $C = 1\text{pF}$ 时的电抗 X_L 和 X_C 。

(1) 当 $f = 100\text{Hz}$ 时

$$X_L = 2\pi \times 100 \times 10^{-9} = 6.28 \times 10^{-7} \Omega \Rightarrow 0$$

$$|X_C| = \left| -\frac{1}{2\pi \times 100 \times 10^{-12}} \right| \approx 1.59 \times 10^9 \Omega \Rightarrow \infty$$

也就是说, 100Hz 时 1nH 电感相当于短路、 1pF 电容相当于开路。

(2) 当 $f = 3\text{GHz}$ 时

$$X_L = 2\pi \times 3 \times 10^9 \times 10^{-9} \approx 18.8 \Omega$$

$$|X_C| = \left| -\frac{1}{2\pi \times 3 \times 10^9 \times 10^{-12}} \right| \approx 53.1 \Omega$$

结论是: 在 3GHz 时 1nH 电感和 1pF 电容的影响必须考虑。

需要说明的是, 一段直导线 (甚至电阻、电感或电容的引线) 都可以达到 1nH 电感的量级。上面的数据说明, 当频率升高到射频以后, 必须重新考虑电路上电感和电容的分布。

1. 传输线上的分布参数

图 1.2 (a) 为一段传输线。从上面计算的数据可以看出, 低频时这段传输线既不用考虑直导线的电感, 也不用考虑 2 根导线之间的电容, 等效电路如图 1.2 (b) 所示。当频率达到射频以后, 传输线上直导线的电感分布不可忽略、传输线上 2 根直导线之间的电容分布也不可忽略, 传输线的等效电路如图 1.2 (c) 所示。

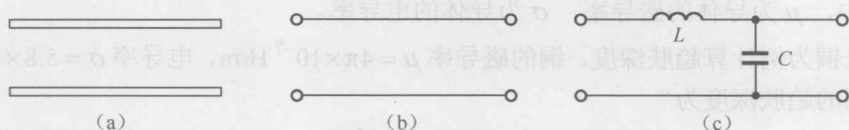


图 1.2 一段传输线

射频电路认为传输线上到处都分布着电感和电容, 所以射频电路也称为分布参数电路。由于分布参数的存在, 传输线上电压、电流和阻抗的分布与低频电路完全不同, 射频传输线上电压和电流出现了波动性, 并导致反射的产生, 因此需要建立射频电路的理论体系。

2. 无源器件的寄生参数

分布参数的存在还会导致无源器件产生寄生参数, 改变无源器件的参量。电阻、电感或电容的引线都存在寄生电感和寄生电容, 寄生参数使电阻、电感或电容的等效电路变得复杂, 例如低频下的电阻在射频时可能会产生感性或容性。

低频下的器件一般不能用于射频, 生产厂商会给出元器件的使用频段。为减小寄生参数的影响, 射频元器件的尺寸比低频元器件的尺寸小, 射频时经常使用小尺寸的片状电阻或片状电容等。

1.2.4 射频电路的集肤效应

在射频电路中, 信号是通过导体传输的, 导体存在集肤效应。集肤效应如图 1.3 所示。所谓集肤效应是指当频率升高时, 电流只集中在导体的表面上, 导体内部的电流密度非常小, 如图 1.3 (a) 所示。集肤效应使导线的有效导电横截面积减小, 交流电阻增加, 如图 1.3 (b) 所示。

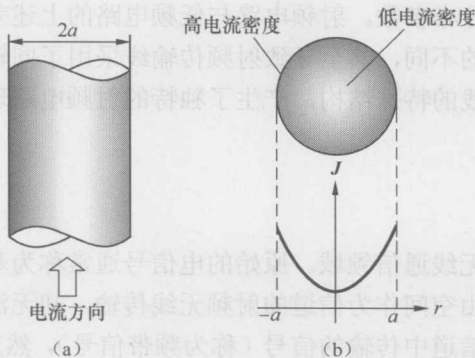


图 1.3 集肤效应

1. 趋肤深度

可以用趋肤深度描述集肤效应的程度,导体内的电流主要集中在导体表面的趋肤深度内。趋肤深度 δ 定义为

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1.5)$$

式 (1.5) 中, μ 为导体的磁导率, σ 为导体的电导率。

下面以铜为例计算趋肤深度。铜的磁导率 $\mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, 电导率 $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$, 不同频率下铜的趋肤深度为

$$f = 50\text{Hz} \quad \Rightarrow \quad \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \times 50 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 5.8 \times 10^7}} \approx 9.34\text{mm}$$

$$f = 1\text{MHz} \quad \Rightarrow \quad \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \times 10^6 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 5.8 \times 10^7}} \approx 0.066\text{mm}$$

$$f = 1\text{GHz} \quad \Rightarrow \quad \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \times 10^9 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 5.8 \times 10^7}} \approx 0.002\text{09mm}$$

比较上面的数值可以看出,随着频率的升高趋肤深度不断减小,当 $f = 1\text{GHz}$ 时,电流将主要集中在铜表面的 0.00209mm 范围内。

2. 射频电阻

对于半径为 a 的圆柱形导体,可以用趋肤深度估算其直流电阻和射频电阻的差异。计算的结果是:当 $f > 500\text{MHz}$ 时,直流电阻 R_{DC} 和射频电阻 R_{RF} 的近似关系为

$$R_{\text{RF}} \approx \frac{a}{2\delta} R_{\text{DC}} \quad (1.6)$$

以导体半径 $a = 0.5\text{mm}$ 、射频频率 $f = 1\text{GHz}$ 为例,射频电阻为

$$R_{\text{RF}} \approx 120 R_{\text{DC}}$$

也即圆柱形导线的射频电阻达到直流电阻的 120 倍。

在射频电路中,集肤效应引起电路损耗急剧增加,必须考虑分布电阻对射频电路的影响。也就是说,传输线的射频电阻较大,在传输线上不仅需要考虑电感的分布参数和电容的分布参数,还需要考虑电阻的分布参数。射频电路与低频电路的上述差异,不仅导致射频电路理论与低频电路理论有显著的不同,甚至导致射频传输线采用了同轴线、平行双导线、带状线和微带线等不同于低频导线的特殊结构,产生了独特的射频电路理论。

1.3 射频系统

射频电路主要应用于无线通信领域。原始的电信号通常称为基带信号,有些信道可以直接传输基带信号,但以自由空间作为信道的射频无线传输,却无法直接传送基带信号。将基带信号变换成适合在无线信道中传输的信号(称为频带信号),然后在接收端进行反变换,这个过程需要采用射频系统。射频系统主要由收发信机构成,在射频系统一端的发射机发送携