

—普通高等院校—

电子信息类系列教材

*ShePin DianLu
LiLun Yu SheJi*

射频电路 理论与设计

© 黄玉兰 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

普通高等院校电子信息类系列教材

射频电路理论与设计

黄玉兰 编著

人民邮电出版社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

射频电路理论与设计/黄玉兰编著. —北京: 人民邮电出版社, 2008.10

(普通高等院校电子信息类系列教材)

ISBN 978-7-115-18471-9

I. 射… II. 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. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 099522 号

内 容 简 介

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, 同时将圆图的图解方法应用到射频电路的设计中。全书除引言外共 9 章, 第 1~3 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 4~9 章为谐振电路、匹配电路、滤波器、放大器、振荡器和混频器, 这些电路可以构成完整的射频电路解决方案。书中不仅列举了大量具有实用价值的例题, 并以较大的篇幅详细地给出了求解过程; 而且每章配有一定数量的习题, 可供教师选用和学生自测。

本书可以作为普通高等院校电子、通信、微电子及计算机通信类本科生的教材或参考书, 也可供从事射频、微波及相关专业的技术人员阅读参考。

普通高等院校电子信息类系列教材

射频电路理论与设计

◆ 编 著 黄玉兰

责任编辑 蒋 亮

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号

邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京通州大中印刷厂印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 16.75

字数: 406 千字

印数: 1—3 000 册

2008 年 10 月第 1 版

2008 年 10 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-18471-9/TN

定价: 32.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

前 言

随着科学技术的不断进步,电子通信系统的工作频率不断提高。目前,几百 MHz 到 GHz 频率的无线通信应用越来越多,例如,GSM 移动电话系统工作于 890 ~ 915 MHz 及 935 ~ 960 MHz 频段,全球定位系统(GPS)工作于 1 227.60 ~ 1 575.42 MHz 频段,无线局域网(WLAN)、个人通信、码分多址(CDMA)和第三代移动通信(3G)等也都工作于 GHz,这使得在此频率范围内的射频电路应用日趋广泛。对计算机来说,CPU 的工作频率已经达到 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,才能获得更大的带宽。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有较高频率的射频频段,带来了射频应用的繁荣,并推动射频技术进一步发展。

基尔霍夫电路理论只能用于直流和低频电路的设计,不能用于射频电路的设计。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,低频电路与射频电路显著不同。对于目前广泛使用的射频频段,必须采用全新的射频电路理论加以分析。

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,包括滤波器的设计、放大器的设计、混频器的设计及振荡器的设计等,这些电路构成射频电路的基本组成部分。读者通过掌握上述电路的原理和构成,可以对射频电路有一个全面的认识。

本书除引言外共 9 章,第 1 章为传输线理论,第 2 章为史密斯圆图,第 3 章为射频网络基础,这 3 章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 4 ~ 9 章为谐振电路、匹配网络、滤波器的设计、放大器的稳定性及增益和噪声、放大器的设计、振荡器和混频器,这 6 章构成了完整的射频电路解决方案。

本书每章都配有一定数量的习题。

全书由黄玉兰编写,第 1 章插图由范谨绘制。

由于作者水平有限,书中肯定会有一些缺点和错误,敬请广大专家和读者予以指正。

编 者
2008 年 6 月

目 录

0 引言	1
0.1 射频概念	1
0.2 射频系统举例	3
0.3 射频电路的特点	4
0.3.1 频率与波长	4
0.3.2 低频电路理论是射频电路理论的特例	5
0.3.3 射频电路的分布参数	6
0.3.4 集肤效应	7
0.4 本书安排	8
习题	8
第1章 传输线理论	10
1.1 传输线举例	10
1.1.1 传输线的构成	10
1.1.2 传输线举例	11
1.2 传输线等效电路表示法	13
1.2.1 长线	13
1.2.2 传输线的分布参数	14
1.2.3 传输线的等效电路	15
1.3 传输线方程及其解	15
1.3.1 均匀传输线方程	15
1.3.2 均匀传输线方程的解	16
1.3.3 行波	17
1.3.4 传输线的两种边界条件	18
1.4 传输线的基本特性参数	19
1.4.1 特性阻抗	19
1.4.2 反射系数	20
1.4.3 输入阻抗	23
1.4.4 传播常数	25
1.4.5 传输功率	26

1.5 均匀无耗传输线工作状态分析	27
1.5.1 行波工作状态	27
1.5.2 驻波工作状态	28
1.5.3 行驻波工作状态	33
1.5.4 $\lambda/4$ 阻抗变换器	35
1.6 信号源的功率输出和有载传输线	37
1.6.1 包含信号源与终端负载的传输线	37
1.6.2 传输线的功率	38
1.6.3 信号源的共轭匹配	39
1.6.4 回波损耗和插入损耗	40
1.7 微带线	40
1.7.1 微带线的有效介电常数和特性阻抗	41
1.7.2 微带线的传输特性	43
1.7.3 微带线的损耗与衰减	44
习题	44
第2章 史密斯圆图	47
2.1 复平面上反射系数的表示方法	47
2.1.1 反射系数复平面	47
2.1.2 等反射系数圆和电刻度圆	49
2.2 史密斯阻抗圆图	50
2.2.1 归一化阻抗	50
2.2.2 等电阻圆和等电抗圆	51
2.2.3 史密斯阻抗圆图	52
2.2.4 史密斯阻抗圆图的应用	54
2.3 史密斯导纳圆图	59

2.3.1 归一化导纳	59	3.5.1 多端口网络散射参量的 定义	86
2.3.2 史密斯导纳圆图	60	3.5.2 常见的多端口射频 网络	86
2.3.3 史密斯阻抗-导纳 圆图	61	3.6 信号流图	89
2.4 史密斯圆图在集总参数元件电路 中的应用	62	3.6.1 信号流图的构成	89
2.4.1 含串联集总参数元件时 电路的输入阻抗	63	3.6.2 信号流图的化简规则	91
2.4.2 含并联集总参数元件时 电路的输入导纳	63	习题	93
2.4.3 含串联或并联集总电抗元件 时电路的输入阻抗	64	第4章 谐振电路	95
2.4.4 含串联及并联集总电抗元件 时电路的输入阻抗	65	4.1 串联谐振电路	95
习题	66	4.1.1 谐振频率	95
第3章 射频网络基础	68	4.1.2 品质因数	96
3.1 二端口低频网络参量	68	4.1.3 输入阻抗	96
3.1.1 阻抗参量	69	4.1.4 带宽	97
3.1.2 导纳参量	70	4.1.5 有载品质因数	98
3.1.3 混合参量	71	4.2 并联谐振电路	99
3.1.4 转移参量	73	4.2.1 谐振频率	99
3.2 二端口射频网络参量	76	4.2.2 品质因数	99
3.2.1 散射参量	76	4.2.3 输入导纳	100
3.2.2 传输参量	80	4.2.4 带宽	100
3.3 二端口网络的参量特性	80	4.2.5 有载品质因数	101
3.3.1 互易网络	80	4.3 传输线谐振电路	102
3.3.2 对称网络	81	4.3.1 终端短路 $\lambda/2$ 传输线	103
3.3.3 无耗网络	82	4.3.2 终端短路 $\lambda/4$ 传输线	104
3.4 二端口网络的参量互换	83	4.3.3 终端开路 $\lambda/2$ 传输线	105
3.4.1 网络参量 $[Z]$ 、 $[Y]$ 、 $[h]$ 、 $[ABCD]$ 之间的 相互转换	83	4.3.4 终端开路 $\lambda/4$ 传输线	105
3.4.2 网络参量 $[S]$ 和 $[T]$ 之间的相互转换	83	4.4 介质谐振器	107
3.4.3 网络参量 $[Z]$ 、 $[Y]$ 、 $[h]$ 、 $[A]$ 与网络参量 $[S]$ 之间的相互转换	84	习题	109
3.5 多端口网络的散射参量	86	第5章 匹配网络	111
		5.1 匹配网络的目的及选择 方法	111
		5.2 集总参数元件电路的匹配 网络设计	112
		5.2.1 传输线与负载间 L 形 匹配网络	112
		5.2.2 信源与负载间 L 形共轭 匹配网络	116

5.2.3 L形匹配网络的品质 因数	118	6.6.3 级连耦合微带线 滤波器	159
5.2.4 T形和 π 形匹配网络	120	习题	161
5.3 分布参数元件电路的匹配 网络设计	122	第7章 放大器的稳定性、增益和 噪声	163
5.3.1 负载与传输线的 阻抗匹配	122	7.1 放大器的稳定性	163
5.3.2 信源与负载的 共轭匹配	125	7.1.1 稳定准则	163
5.4 混合参数元件电路的匹配 网络设计	128	7.1.2 稳定性判别的图解法	164
习题	129	7.1.3 绝对稳定判别的 解析法	169
第6章 滤波器的设计	131	7.1.4 放大器稳定措施	171
6.1 滤波器的类型	131	7.2 放大器的增益	173
6.2 用插入损耗法设计低通 滤波器原型	132	7.2.1 功率增益的定义	173
6.2.1 巴特沃斯低通滤波器 原型	132	7.2.2 最大功率增益	178
6.2.2 切比雪夫低通滤波器 原型	135	7.2.3 晶体管单向情况	178
6.2.3 椭圆函数低通滤波器 原型	138	7.2.4 晶体管双向情况	183
6.2.4 线性相位低通滤波器 原型	138	7.3 输入、输出电压驻波比	185
6.3 滤波器的变换	139	7.3.1 失配因子	185
6.3.1 阻抗变换	139	7.3.2 输入、输出驻波分析	186
6.3.2 频率变换	140	7.4 放大器的噪声	187
6.4 短截线滤波器的实现	145	7.4.1 等效噪声温度和噪声 系数	188
6.4.1 理查德变换	145	7.4.2 级连网络的等效噪声 温度和噪声系数	189
6.4.2 科洛达规则	146	7.4.3 噪声系数圆	191
6.4.3 滤波器设计举例	148	习题	193
6.5 阶梯阻抗低通滤波器	152	第8章 放大器的设计	196
6.5.1 短传输线段的近似 等效电路	152	8.1 放大器的工作状态和分类	196
6.5.2 滤波器设计举例	153	8.1.1 基于静态工作点的 放大器分类	196
6.6 耦合微带线滤波器	155	8.1.2 基于信号大小的放大器 分类	197
6.6.1 奇模和偶模	155	8.2 放大器的偏置网络	197
6.6.2 耦合线的滤波特性	157	8.2.1 偏置电路与射频电路 之间的连接	198
		8.2.2 偏置电路的设计	198
		8.3 小信号放大器的设计	199
		8.3.1 小信号放大器的设计	

步骤	199	9.1.3 使用场效应晶体管的 共栅极振荡电路	234
8.3.2 最大增益放大器的 设计	200	9.1.4 晶体振荡器	236
8.3.3 固定增益放大器的 设计	203	9.2 微波振荡器	236
8.3.4 最小噪声放大器的 设计	211	9.2.1 振荡条件	237
8.3.5 低噪声放大器的设计 ...	212	9.2.2 晶体管振荡器	239
8.3.6 宽带放大器的设计	217	9.2.3 二极管振荡器	243
8.4 功率放大器的设计	221	9.2.4 介质谐振器振荡器	243
8.4.1 A类放大器的设计	221	9.3 混频器	246
8.4.2 交调失真	225	9.3.1 混频器的特性	246
8.5 多级放大器的设计	226	9.3.2 单端二极管混频器	249
习题	228	9.3.3 单平衡混频器	251
第9章 振荡器和混频器	231	习题	252
9.1 振荡器的基本模型	231	附录 A 国际单位制 (SI) 词头	254
9.1.1 振荡电路的一般分析 方法	232	附录 B 电学、磁学和光学的量和 单位	255
9.1.2 使用双极结型晶体管的 共发射极振荡电路	233	附录 C 某些材料的电导率	256
		附录 D 某些材料的相对介电常数和 损耗角正切	257
		附录 E 常用同轴射频电缆特性参数 ...	258
		参考文献	259

0 引 言

在电子通信系统中，只有使用更高的载波频率，才能获得更大的带宽。随着科学技术的不断进步，电子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、计算机工程和遥控遥感等领域，工作频率都已经达到吉赫〔兹〕（GHz）频段，使得与此频段相适应的射频电路逐渐成为科学和工程领域中一个普遍存在的技术，这就迫切需要人们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从未遇到，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，需要结构更紧凑的射频放大器、滤波器、振荡器及混频器，只有确切地知道射频电路与低频电路有什么区别及如何实现，才能开发改进射频电路，满足射频领域不断发展的需求。

0.1 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载波频率由低到高的发展过程。电通信的容量几乎与所使用的频率成正比，对通信容量的要求越高，使用的频率就越高。

由于应用领域的众多，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，如表0.1所示。

表 0.1

IEEE 频谱

频 段	频 率	波 长	频 段	频 率	波 长
ELF（极低频）	30 ~ 300 Hz	10 000 ~ 1 000 km	UHF（特高频）	300 ~ 3 000 MHz	100 ~ 10 cm
VF（音频）	300 ~ 3 000 Hz	1 000 ~ 100 km	SHF（超高频）	3 ~ 30 GHz	10 ~ 1 cm
VLF（甚低频）	3 ~ 30 kHz	100 ~ 10 km	EHF（极高频）	30 ~ 300 GHz	1 ~ 0.1 cm
LF（低频）	30 ~ 300 kHz	10 ~ 1 km	亚毫米波	300 ~ 3 000 GHz	1 ~ 0.1 mm
MF（中频）	300 ~ 3 000 kHz	1 ~ 0.1 km	P波段	0.23 ~ 1 GHz	130 ~ 30 cm
HF（高频）	3 ~ 30 MHz	100 ~ 10m	L波段	1 ~ 2 GHz	30 ~ 15 cm
VHF（甚高频）	30 ~ 300 MHz	10 ~ 1m	S波段	2 ~ 4 GHz	15 ~ 7.5 cm

续表

频 段	频 率	波 长	频 段	频 率	波 长
C 波段	4 ~ 8 GHz	7.5 ~ 3.75 cm	K 波段	18 ~ 26.5 GHz	1.67 ~ 1.13 cm
X 波段	8 ~ 12.5 GHz	3.75 ~ 2.4 cm	Ka 波段	26.5 ~ 40 GHz	1.13 ~ 0.75 cm
Ku 波段	12.5 ~ 18 GHz	2.4 ~ 1.67 cm			

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 30 MHz 时电路的设计就需考虑射频电路理论; 而射频电路理论应用的典型频段为几百 MHz 至 4 GHz, 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 4 GHz。

1864 ~ 1873 年, 麦克斯韦 (James Clark 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 Hertz) 通过一系列实验验证了麦克斯韦的理论, 证实电磁波存在。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, 无线通信领域在不断发展, 工作频率也在不断提高。目前移动通信 GSM900 系统工作于 890 ~ 915 MHz 及 935 ~ 960 MHz, 全球定位系统 (GPS) 工作于 1 227.60 ~ 1 575.42 MHz, 14 ~ 83 频道的电视广播工作于 470 ~ 890 MHz, 无线局域网 (WLAN)、个人通信、码分多址 (CDMA) 和第三代移动通信 (3G) 等都工作于 GHz, 这使几百 MHz 到 GHz 频率的无线通信应用日趋广泛, 也使在此频率范围内的射频电路应用日趋广泛。另外, 对计算机来说, 高性能工作站及个人计算机所采用的电路频率不断增加, 计算机主频的工作频率已经达到 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, 射频技术在各个领域越来越显示出其重要性。

为了有效地传输信息, 无线通信系统需要采用高频信号, 这种需要主要由下面 3 个因素导致。

(1) 工作频率越高, 带宽越大。当工作频率为 1 GHz 时, 若传输的相对带宽为 10% 时, 可以传输 100 MHz 带宽的信号; 当工作频率为 1 MHz 时, 若传输的相对带宽也为 10%, 只可以传输 0.1 MHz 带宽的信号。通过比较可以看出, 高工作频率可以带来大带宽。

(2) 工作频率越高, 天线尺寸越小。无线通信需要采用天线发射和接收信号, 如果天线的尺寸可以与波长相比拟, 天线的辐射更为有效。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。进一步说, 工作频率提高导致需要的天线尺寸减小, 迎合了现代通信对尺寸小型化的要求。

(3) 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。

正是由于上述技术原因, 越来越多的电子通信系统使用了射频频段, 带来了射频频段的繁荣, 并推动射频技术进一步发展。

微波也是经常使用的波段, 当频率高于 4 GHz 时, 电路常采用微波电路的设计方法。微波是频率从 300 MHz ~ 3 000 GHz 的电磁波, 对应的波长从 1 m ~ 0.1 mm, 分为分米波、厘米

波、毫米波和亚毫米波 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。

0.2 射频系统举例

本书的目的是全面介绍射频电路理论及设计方法,在该频段普通电路的分析方法不适用,由此引出的问题是,射频电路为什么与普通电路有如此大的差别?射频电路的“新”理论是什么?什么是射频电路系统?为更清楚地了解将要讨论的问题,这里分析一般的射频系统。

射频电路主要应用在无线通信领域,各种射频无线通信系统有类似的结构,下面以移动通信为例介绍射频系统的基本电路结构及主要特点。

现行的移动通信系统有几种标准,其载波频率集中在 900 ~ 1 800 MHz,属于射频的频率范围,表 0.2 列出了 2 种移动通信系统的参数。

表 0.2 移动通信系统的参数

系 统 名 称	GSM	DCS1800	系 统 名 称	GSM	DCS1800
上行频带/MHz	935 ~ 960	1 805 ~ 1 880	调制	GMSK	GMSK
下行频带/MHz	890 ~ 915	1 710 ~ 1 785	移动峰值功率/W	2 ~ 20	0.2 ~ 2
通道选择	时频多址 (TDMA)/ 频分多址 (FDMA)	TDMA/FDMA	移动平均功率/W	0.25 ~ 2.5	0.03 ~ 0.25

表 0.2 中上行频带是指手机发射的频率范围,下行频带是指手机接收的频率范围,上行频率和下行频率都属于射频,这说明在一个射频系统里需要处理收、发两个过程,所以移动通信设备也称为收发信机。移动通信系统收发的射频信号是模拟信号,这个射频模拟信号需要进行滤波和放大,滤波的目的是保证只让频带内的信号通过,抑制频带外的噪声;放大的目的是提高功率准备发射或放大接收到的微弱信号。射频模拟信号在收发信机中需要转换成数字信号,表 0.2 的配置里通道选择 TDMA 及调制选择高斯最小频移键控 (GMSK) 都是对数字信号进行处理,为此射频模拟信号需要混频。混频的目的是让频率较高的射频模拟信号转换为频率较低的中频模拟信号,收发信机中模数变换器转换的是中频模拟信号。在上述过程中,滤波、放大和混频都属于射频电路的范畴,图 0.1 示出了射频系统的一般框图。

图 0.1 所示的方框图称为收发信机,它包含了发射机电路、接收机电路和天线。天线接收到的信号通过双工器进入接收通道,然后通过带通滤波器进入低噪声放大器,这时信号的频率还为射频。射频信号在混频器中与本振信号混频,生成中频信号,中频信号的频率为射频与本振信号频率的差值,混频后射频信号转换为中频信号,中频信号的频率比射频信号的频率大幅度降低。上述处理过程属于射频电路的理论范畴,这是本书关注的重点。中频信号最后经过模数转换送入数字电路进行处理。发射的过程与接收的过程相反,在发射的通道中首先利用混频器将中频信号与本振信号混频,生成射频信号,然后将射频信号放大,最后经过双工器由天线辐射出去。

图 0.1 讨论的射频系统,涉及很多射频电路的设计,其中包括滤波器的设计、放大器的

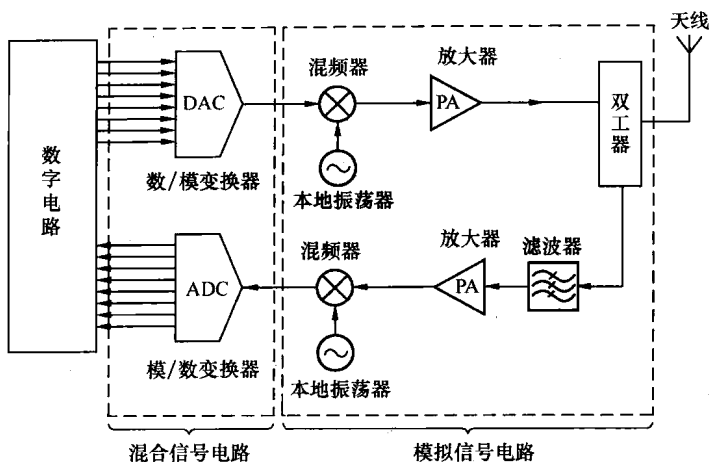


图 0.1 射频系统的一般框图

设计、混频器的设计及振荡器的设计等，这些电路都是射频电路的基本组成部分，需要使用射频电路的设计方法。

射频电路的设计方法与普通低频电路的设计方法不同。以放大器为例，低频电路放大器的设计只关心增益，射频电路放大器的设计不仅需要考虑增益，还需要考虑匹配、稳定性设计、交直流隔离、低噪声设计等多方面的因素。在射频频段为消除反射、保证最佳传输，射频放大器的输入输出端需要加阻抗匹配网络；射频频段的反射可能带来放大器工作不稳定，对放大器需要进行稳定性设计，因为如果放大器不稳定，放大器将有振荡倾向，可能成为振荡器；射频放大器交流信号与直流偏置之间可能形成干扰，所以射频放大器交直流之间需要隔离；天线接收到的射频信号十分微弱，接收机电路的前级需要低噪声放大器。

不仅射频放大器的设计与低频电路不同，射频滤波器、振荡器的设计也与低频电路不同，因此需要建立新的射频电路理论，在射频电路理论的基础上全面学习射频电路的设计方法。本书将首先介绍射频电路的基本理论，在此基础上讨论上述常用射频电路单元的原理和构成，使读者系统掌握射频电路的理论和设计方法，对射频电路有一个全面的认识。

0.3 射频电路的特点

基尔霍夫电路理论只能用于直流和低频电路的设计，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显著不同，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。

0.3.1 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

$$f\lambda = c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (0.1)$$

式中, f 为工作频率; λ 为工作波长; c 为光的速度。式 (0.1) 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 (0.1), 可以得到下面的数据。

(1) 50 Hz 的市电属于 ELF 频段, 对应的工作波长为 6 000 km, 这个波长比电路的尺寸大得多, 对此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) 个人通信的 1.9 GHz, 对应的工作波长为 15.8 cm, 这个波长与电路的尺寸可以相比拟, 在此频率下低频的基尔霍夫电路理论不再适用, 与此频率相适应的是射频电路理论。

结论是, 50 Hz 的市电属于低频电路, 1.9 GHz 的个人通信属于射频电路。

0.3.2 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 0.2 所示的是终端短路传输线, 根据射频电路理论会得到距离短路终端 l 处的阻抗为

$$Z_{in} = jZ_0 \tan \frac{2\pi l}{\lambda} \quad (0.2)$$

式中 Z_0 为常数, Z_0 的取值范围一般为几十到几百之间。式 (0.2) 改变了低频电路理论的观点, 因为低频电路理论会认为 $Z_{in} = 0$ 。下面对式 (0.2) 加以数值分析。

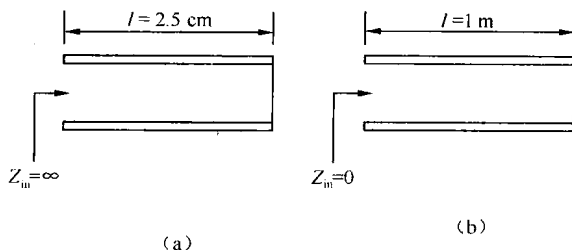


图 0.2 终端短路的传输线

(1) 假设工作波长 $\lambda = 10 \text{ cm}$, 由式 (0.2) 可以得到: 若

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

则

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

也即离开短路终端 2.5 cm 处, 传输线就等效于开路, 如图 0.2 (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问题。

(2) 假设工作波长 $\lambda = 1000 \text{ km}$, 由式 (0.2) 还可以得到: 若

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

则

$$Z_{in} = jZ_0 \tan \left(\frac{2\pi}{10^6} \right) \approx 0$$

结果是：即便离开短路终端 1 m 处，传输线还相当于短路，如图 0.2 (b) 所示。这个结论符合低频电路的理论观点。 $\lambda = 1\,000\text{ km}$ 属于低频波段，在低频波段射频电路理论适用，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。

0.3.3 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

$$X_L = \omega L \quad (0.3)$$

$$X_C = -\frac{1}{\omega C} \quad (0.4)$$

式 (0.3) 和式 (0.4) 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 。

- 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 100 Hz 时 1 nH 电感相当于短路，1 pF 电容相当于开路。

- 当 $f = 3\text{ GHz}$ 时

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

$$|X_C| = \left| \frac{1}{2\pi \times 3 \times 10^9 \times 10^{-12}} \right| \approx 0.05 \Omega$$

结论是：在 3 GHz 时 1 nH 电感和 1 pF 电容的影响必须考虑。

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

1. 传输线上的分布参数

图 0.3 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 0.3 (a) 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 根直导线间的电容分布也不可忽略，传输线的等效电路如图 0.3 (b) 所示。

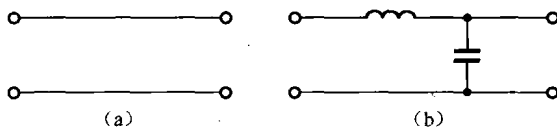


图 0.3 一段传输线

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，射频传输线上信号出现了波动性，并导致反射产生，因此需要建立射频电路理论体系。

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，例如射频常使用小尺寸的片状电阻或片状电容。

0.3.4 集肤效应

在电路中信号是通过导体传输的，导体存在集肤效应。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，导体内部的电流密度非常小。集肤效应使导线的有效导电横截面积减小，交流电阻增加。集肤效应如图 0.4 所示。

可以用趋肤深度描述集肤效应的程度。趋肤深度 δ 定义为

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (0.5)$$

式中 μ 为导体的磁导率， σ 为导体的电导率，导体内的电流主要集中在导体表面的趋肤深度内。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

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

$$f = 1 \text{ MHz} \Rightarrow \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \times 10^6 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 5.8 \times 10^7}} \approx 0.0661 \text{ mm}$$

$$f = 1 \text{ GHz} \Rightarrow \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \times 10^9 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 5.8 \times 10^7}} \approx 0.00209 \text{ mm}$$

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 $f = 1 \text{ GHz}$ 时电流主要集中在铜表面的 0.00209 mm 范围内。

对于半径为 a 的圆柱形导体，可以用趋肤深度估算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

$$R_{\text{RF}} \approx \frac{a}{2\delta} R_{\text{DC}} \quad (0.6)$$

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

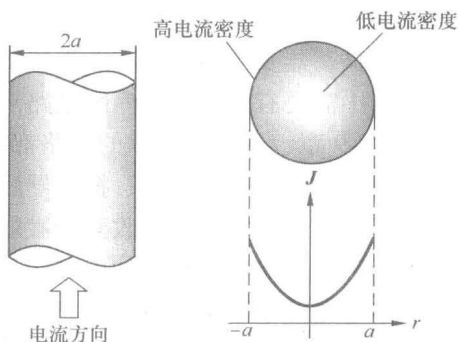


图 0.4 集肤效应

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

也即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。在传输线上不仅需要考虑电感和电容的分布参数,还需要考虑电阻的分布参数,这使得射频电路与低频电路显著不同。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与低频的特殊结构,产生了独特的射频电路理论。

0.4 本书安排

射频电路涵盖的范围较广,包括传输线理论、射频网络理论、射频滤波电路、偏置网络、有源网络的稳定性、非线性网络、射频放大、振荡及混频电路等,将上述内容融合构成了射频电路的完整体系。本书共分 3 大部分,第 1 部分为射频电路基础知识,内容包括引言和第 1~3 章,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;第 2 部分为谐振电路和匹配电路,内容包括第 4 章和第 5 章,谐振电路和匹配电路是滤波器、放大器、振荡器及混频器的基本组成部分,例如滤波器和振荡器中需要有谐振电路、放大器和振荡器中需要有输入输出匹配电路。第 3 部分为滤波器、放大器、振荡器及混频器,内容包括第 6~9 章,这部分每章的电路都能完成独立的功能,例如在射频接收系统中需要用到带通滤波器、低噪声放大器、振荡器和混频器,其中带通滤波器只允许所需频率范围内的信号通过,低噪声放大器将接收到的微弱信号放大,振荡器产生本振信号、混频器将射频频率的接收信号转换成频率较低的中频信号。

本书避开了繁杂的电磁场理论背景知识,从传输线理论出发得到了电压和电流的波动性,并用射频网络的观点设计射频电路,同时将史密斯圆图的图解方法应用到电路的设计中。本书涵盖了射频电路的基本理论和基本设计方法,构成了完整的射频电路解决方案。

习 题

0.1 什么是射频? 射频有哪些特点? 举出射频应用的 3 个实例,并说明其使用的频率。

0.2 根据表 0.1 给出的 IEEE 频谱,利用式 (0.1) 计算:

- (1) ELF 频段频率为 30~300 Hz 时波长的范围;
- (2) LF 频段频率为 30~300 kHz 时波长的范围;
- (3) L 波段频率为 1~2 GHz 时波长的范围;
- (4) S 波段频率为 2~4 GHz 时波长的范围;

并将计算出来的波长与表 0.1 中的数值对比,验证计算的正确性。

0.3 利用式 (0.2) 计算:

- (1) 市电的波长 $\lambda = 6000 \text{ km}$, 当 l 为多长时 $Z_{\text{in}} = \infty$?
- (2) 射频的波长 $\lambda = 7.5 \text{ cm}$, 当 l 为多长时 $Z_{\text{in}} = \infty$?

从上面的计算中可以看出射频电路与普通低频电路的不同吗？

0.4 某双导线的分布电感为 $L = 0.999 \text{ nH/mm}$ ，分布电容为 $C = 0.0111 \text{ pF/mm}$ ，利用式 (0.3) 和式 (0.4) 计算：

(1) 当 $f = 40 \text{ Hz}$ 时，每毫米 X_L 和 X_C 为多少？

(2) 当 $f = 4 \text{ GHz}$ 时，每毫米 X_L 和 X_C 为多少？

低频时分布电感和分布电容能忽略吗？射频时分布电感和分布电容还能忽略吗？

0.5 什么是集肤效应？什么是趋肤深度？利用式 (0.5) 计算：

(1) 当 $f = 60 \text{ Hz}$ 时，铜的趋肤深度是多少？

(2) 当 $f = 3 \text{ GHz}$ 时，铜的趋肤深度是多少？

用铜线传输电能时，60 Hz 需要考虑集肤效应吗？用铜线传输射频信号时，3 GHz 需要考虑集肤效应吗？

0.6 圆柱形铜导体半径 $a = 1 \text{ mm}$ ，利用式 (0.6) 计算：

(1) 当 $f = 500 \text{ MHz}$ 时，射频电阻可以达到直流电阻的多少倍？

(2) 当 $f = 4 \text{ GHz}$ 时，射频电阻可以达到直流电阻的多少倍？

射频时电阻损耗大吗？