

21世纪高等学校规划教材 | 电子信息

射频电路设计原理

刘轶 严伟 著



清华大学出版社

21世纪高等学校规划教材 | 电子



射频电路设计原理

刘轶 严伟 著



内 容 简 介

本书系统地介绍了射频集成电路与系统的基本设计原理、设计思路和实际应用。全书分为射频微波的基础知识、射频电路系统中常用模块的设计和实际应用中需要考虑的问题三个部分。主要包括 RF 分布参数与集总参数模型、品质因数、4 种滤波器的设计、传输线理论、S 参数、阻抗匹配网络、Smith 圆图、信号流图、梅森公式、转换功率增益、小信号放大器的设计、功率分配器和功率合成器以及功率耦合器的相关理论、PIN 二极管和开关基本原理、功率放大器的应用、电磁兼容理论和应用等内容。本书自成体系，系统地介绍了射频电路设计过程中所涉及的基本理论，是作者从事射频电路设计二十余年经验总结的精华，并辅以一些经典例题帮助读者理解，是理论与实践的结合，将有助于我国培养出更多更优秀的射频电路设计人员。

本书通俗易懂，便于自学，是作为高等院校微电子、无线电、通信与电路系统等专业高年级本科生或研究生的理想教材，本书也可作为射频集成电路工程技术人员的参考书。

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

射频电路设计原理/刘轶等著. —北京：清华大学出版社，2014

21 世纪高等学校规划教材·电子信息

ISBN 978-7-302-34068-3

I. ①射… II. ①刘… III. ①射频电路—电路设计—高等学校—教材 IV. ①TN710.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 238081 号

责任编辑：郑寅堃 薛 阳

封面设计：傅瑞学

责任校对：梁 毅

责任印制：宋 林

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

质 量 反 馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载：<http://www.tup.com.cn>，010-62795954

印 装 者：三河市中晟雅豪印务有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：185mm×260mm 印 张：12.25 字 数：306 千字

版 次：2014 年 1 月第 1 版 印 次：2014 年 1 月第 1 次印刷

印 数：1~2000

定 价：24.00 元

出版说明

随着我国改革开放的进一步深化,高等教育也得到了快速发展,各地高校紧密结合地方经济建设发展需要,科学运用市场调节机制,加大了使用信息科学等现代科学技术提升、改造传统学科专业的投入力度,通过教育改革合理调整和配置了教育资源,优化了传统学科专业,积极为地方经济建设输送人才,为我国经济社会的快速、健康和可持续发展以及高等教育自身的改革发展做出了巨大贡献。但是,高等教育质量还需要进一步提高以适应经济社会发展的需要,不少高校的专业设置和结构不尽合理,教师队伍整体素质亟待提高,人才培养模式、教学内容和方法需要进一步转变,学生的实践能力和创新精神亟待加强。

教育部一直十分重视高等教育质量工作。2007年1月,教育部下发了《关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见》,计划实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程(简称‘质量工程’)”,通过专业结构调整、课程教材建设、实践教学改革、教学团队建设等多项内容,进一步深化高等学校教学改革,提高人才培养的能力和水平,更好地满足经济社会发展对高素质人才的需要。在贯彻和落实教育部“质量工程”的过程中,各地高校发挥师资力量强、办学经验丰富、教学资源充裕等优势,对其特色专业及特色课程(群)加以规划、整理和总结,更新教学内容、改革课程体系,建设了一大批内容新、体系新、方法新、手段新的特色课程。在此基础上,经教育部相关教学指导委员会专家的指导和建议,清华大学出版社在多个领域精选各高校的特色课程,分别规划出版系列教材,以配合“质量工程”的实施,满足各高校教学质量和教学改革的需要。

为了深入贯彻落实教育部《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》精神,紧密配合教育部已经启动的“高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作”,在有关专家、教授的倡议和有关部门的大力支持下,我们组织并成立了“清华大学出版社教材编审委员会”(以下简称“编委会”),旨在配合教育部制定精品课程教材的出版规划,讨论并实施精品课程教材的编写与出版工作。“编委会”成员皆来自全国各类高等学校教学与科研第一线的骨干教师,其中许多教师为各校相关院、系主管教学的院长或系主任。

按照教育部的要求,“编委会”一致认为,精品课程的建设工作从开始就要坚持高标准、严要求,处于一个比较高的起点上;精品课程教材应该能够反映各高校教学改革与课程建设的需要,要有特色风格、有创新性(新体系、新内容、新手段、新思路,教材的内容体系有较高的科学创新、技术创新和理念创新的含量)、先进性(对原有的学科体系有实质性的改革和发展,顺应并符合21世纪教学发展的规律,代表并引领课程发展的趋势和方向)、示范性(教材所体现的课程体系具有较广泛的辐射性和示范性)和一定的前瞻性。教材由个人申报或各校推荐(通过所在高校的“编委会”成员推荐),经“编委会”认真评审,最后由清华大学出版

社审定出版。

目前,针对计算机类和电子信息类相关专业成立了两个“编委会”,即“清华大学出版社计算机教材编审委员会”和“清华大学出版社电子信息教材编审委员会”。推出的特色精品教材包括:

- (1) 21 世纪高等学校规划教材·计算机应用——高等学校各类专业,特别是非计算机专业的计算机应用类教材。
- (2) 21 世纪高等学校规划教材·计算机科学与技术——高等学校计算机相关专业的教材。
- (3) 21 世纪高等学校规划教材·电子信息——高等学校电子信息相关专业的教材。
- (4) 21 世纪高等学校规划教材·软件工程——高等学校软件工程相关专业的教材。
- (5) 21 世纪高等学校规划教材·信息管理与信息系统。
- (6) 21 世纪高等学校规划教材·财经管理与应用。
- (7) 21 世纪高等学校规划教材·电子商务。
- (8) 21 世纪高等学校规划教材·物联网。

清华大学出版社经过三十多年的努力,在教材尤其是计算机和电子信息类专业教材出版方面树立了权威品牌,为我国的高等教育事业做出了重要贡献。清华版教材形成了技术准确、内容严谨的独特风格,这种风格将延续并反映在特色精品教材的建设中。

清华大学出版社教材编审委员会

联系人:魏江江

E-mail: weijj@tup.tsinghua.edu.cn

前言

进入 21 世纪以来,无线通信技术及其应用得到了突飞猛进的发展。分立元件已经很难满足高速发展的信息社会了,射频集成电路以其高性能,低成本的优势应运而生。因此,培养出大批的射频集成电路设计人员,对推进一个国家的信息化水平起着至关重要的作用,而我国在这方面的技术实力还不如一些发达国家,因而普及射频集成电路设计基本原理已迫在眉睫。国内关于这方面的教材大多是从国外引进的,存在很多理解上的分歧和问题。而本书是刘轶教授在美国教学讲义的基础上,同时总结了自己在海外射频电路设计二十余年的经验,并融入了相关的微波理论,撰写而成的,便于国内学生理解和接受。

全书共分 11 章来展开讲述。第 1 章介绍 RF 基本概念与集总参数模型,主要包括微波的基本概念,电阻、电感以及电容的等效模型。第 2 章介绍谐振电路和滤波器的相关知识,主要涉及品质因数的概念和高通、低通、带通滤波器的设计。第 3 章讲述传输线理论及其类型和射频领域极其重要的概念——S 参数。第 4 章主要介绍阻抗匹配的相关理论以及三种匹配网络:L 形、 π 形和 T 形匹配网络。第 5 章讲述的是射频电路设计的重要工具——Smith 圆图,该章是通过介绍 Smith 圆图的主要组成——等阻抗圆和等电抗圆,阻抗变换以及 Smith 圆图在传输线的应用来展开论述的。第 6 章讲述信号流图,主要包括信号流图的基本概念,梅森公式以及转换功率增益的相关理论。第 7 章论述小信号放大器的设计以及几个重要的概念:增益、稳定性及噪声系数。第 8 章介绍功率分配器、功率合成器和功率耦合器的相关理论。第 9 章讲述 PIN 二极管和开关的基本原理。第 10 章简述在功率放大器中的一些应用:数字预失真(DPD)、波峰因数消减(CFR)、包络跟踪(ET)。第 11 章阐述芯片电磁兼容相关理论和应用。

本书自成体系,系统地介绍了射频电路设计过程中所涉及的基本理论,是作者从事射频电路设计二十余年经验总结的精华,并辅以一些经典例题帮助读者理解,这些例题是作者在多年的射频电路设计前沿所遇到的第一手材料,极具代表性。全书通俗易懂,便于自学,是作为高等院校微电子、无线电、通信与电路系统等专业高年级本科生或研究生的理想教材,本书也可作为射频集成电路工程技术人员的参考书。因此本书是集基本理论与实践为一体的结晶,将有助于我国培养出更多更优秀的射频电路设计人员。

本书由刘轶教授、严伟和宋昆仑研究员主持编著和审校。参加本书翻译、制图工作的有崔杰、陈俊安、王雨辰、徐西峰、宫光天、杨爽。同时,金婕博士,陈磊博士对本书的翻译工作提出了宝贵的意见。对于以上同事、同仁的大力支持和帮助,在此一并表示感谢。

限于作者水平,书中难免存在不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

刘 轶

于中国科学院上海高等研究院
2013 年 8 月

目 录

第 1 章 RF 基本概念与集总参数模型	1
1.1 电磁波频谱	1
1.2 直角坐标与极坐标形式矢量	2
1.3 组合元件	2
1.4 趋肤效应	3
1.5 平板及电荷间的电场分布	4
1.6 磁场——右手法则	4
1.6.1 功率单位	5
1.6.2 相对分贝	5
1.6.3 绝对功率	5
1.7 直导线电感	6
1.8 直导线电抗	8
1.9 电阻等效电路	8
1.10 金属膜电阻与碳质电阻器的频率特性	8
1.11 例题	9
1.12 电感的等效电路	9
1.13 电感的阻值与频率的关系	10
1.14 电感 Q 值与频率的关系	11
1.15 提高 Q 值的途径	11
1.16 单层空芯电感设计	11
1.17 环形电感	12
1.18 磁芯特性	12
1.19 磁芯材料	13
1.20 磁芯电感等效电路	14
1.21 环形电感器设计	14
1.22 例题	15
1.23 实际绕阻实例	17
1.24 电容等效电路	17
1.25 电容阻抗随频率的变化	17
第 2 章 滤波器与谐振电路	19
2.1 振荡电路	19

2.2	滤波器响应的定义	20
2.3	一个简单 RC 低通滤波器的频率响应	21
2.4	简单高通滤波器	21
2.5	LC 谐振电路频率衰减的计算	22
2.6	有载品质因数	23
2.6.1	R_s 与 R_L 对 Q 的影响	23
2.6.2	R_s 和 R_L 对有载品质因数 Q 的影响	24
2.6.3	有载品质因数 Q	24
2.6.4	例题	25
2.6.5	串并转换	25
2.6.6	组件 Q 值对有载 Q 值的影响	26
2.6.7	例题	26
2.6.8	元件品质因数对插入损耗的影响	27
2.6.9	例题	27
2.6.10	通过阻抗变换增大品质因数 Q	29
2.6.11	例题	29
2.7	不同滤波器的比较	31
2.8	有载品质因数、纹波与器件个数的关系	31
2.9	归一化与低通原型	32
2.10	巴特沃斯滤波器	33
2.10.1	巴特沃斯滤波器的响应特性	33
2.10.2	巴特沃斯低通滤波器元件取值	34
2.10.3	例题	35
2.10.4	负载不等	35
2.11	切比雪夫滤波器	38
2.11.1	切比雪夫响应(通带有波纹的滤波器)	38
2.11.2	更多的波纹会产生更大的衰减	38
2.11.3	切比雪夫滤波器	39
2.11.4	例题	46
2.12	贝塞尔滤波器	47
2.13	频率和阻抗缩放	50
2.14	低通滤波器设计	51
2.15	高通滤波器设计	52
2.16	带通滤波器设计	55
2.17	频率响应呈现出几何对称	55
2.18	低通网络转换为带通网络	56
2.19	带通滤波器频率和阻抗的扩展	56
2.20	带通滤波器设计过程总结	57
2.21	带阻滤波器设计	58

2.22	低通到带阻的转换	59
2.23	带阻滤波器频率和阻抗扩展	59
2.24	有限 Q 值的影响	60
2.25	对使用最高 Q 值元件的建议	60
第 3 章	传输线与 S 参量	61
3.1	低高频之间的差异分析	62
3.2	传输线的等效集总电路模型	62
3.3	行波方程与特征阻抗 Z_0	62
3.4	反射系数 $\Gamma(x)$	63
3.5	无耗传输线	64
3.6	四分之一波变压器	64
3.7	传输线的基本类型	65
3.7.1	基本传输线	65
3.7.2	开放双线(横电磁模式)	65
3.7.3	有损电介质(损耗角正切)	66
3.8	同轴线	67
3.8.1	TEM 波模式	67
3.8.2	同轴线路单位长度衰减	67
3.8.3	同轴线中高次模的传播	67
3.9	高次模传播在功率传输中的作用	68
3.10	对称带状线	69
3.10.1	TEM 波磁场分布	69
3.10.2	带状线的特征阻抗	69
3.10.3	两个高阶带状线模	71
3.11	非对称带状传输线(微带线)	71
3.11.1	封闭微带配置	72
3.11.2	有效介电常数(ϵ_{eff})	72
3.11.3	微带线特征阻抗	73
3.11.4	微带线中高次波的抑制	74
3.12	其他类型传输线	74
3.13	网络特性	75
3.13.1	传统网络	75
3.13.2	H 参量测量	76
3.13.3	双端口网络传输线	76
3.13.4	二端口网络的 S 参数	77
3.14	多端口网路	78
第 4 章	阻抗匹配	79
4.1	阻抗匹配	79

4.2	匹配网络的类型	80
4.3	L形匹配网络	81
4.4	阻抗匹配的方法	82
4.5	三元件匹配	85
4.5.1	π 形匹配网络	85
4.5.2	T形匹配网络	87
4.6	低 Q 及宽带匹配网络	89
第5章	Smith圆图及其应用	91
5.1	Smith圆	91
5.2	Smith圆的构成	92
5.3	等阻抗圆和等电抗圆	93
5.3.1	等阻抗圆	93
5.3.2	等电抗圆	93
5.4	阻抗转换为导纳	96
5.5	叠加导纳坐标	97
5.6	增加并联电容	97
5.7	增加并联电感	98
5.8	串并联电感与电容在Smith圆图中的变化	100
5.9	利用Smith圆进行阻抗匹配	101
5.10	压缩Smith圆图	102
5.11	网络的频率响应	103
5.12	Smith圆图在传输线中的应用	104
第6章	信号流图	106
6.1	信号流图技术	106
6.1.1	信号流图的作用与规则	106
6.1.2	激励源信号流图	107
6.2	梅森公式	108
6.3	功率转换增益(G_T)	110
6.4	功率转换增益方程	111
第7章	小信号放大器设计	112
7.1	单向功率转换增益	112
7.2	稳定性考察	114
7.2.1	稳定条件与不稳定条件	114
7.2.2	稳定圆	114
7.3	最大传输功率增益	116
7.3.1	最大传输功率增益条件	116

7.3.2	最大可用增益(MAG)与最大稳定增益(MSG)	117
7.3.3	恒定增益圆	119
7.3.4	双端口网络中的噪声	122
7.4	噪声系数	122
7.4.1	噪声系数的定义	122
7.4.2	两级放大器的噪声系数	123
7.4.3	等噪声系数圆	124
第 8 章	功率分配器、合成器与耦合器	131
8.1	Wilkinson 功率分配器/耦合器	132
8.1.1	偶-奇模分析	132
8.1.2	分析找到 S_{11}	134
8.1.3	Wilkinson 分配器的频率响应	135
8.2	正交混合分支线	135
8.3	180° 混合环形波导管	137
8.4	方向耦合器	138
8.5	耦合线理论	139
8.6	Lange 耦合器	143
第 9 章	PIN 二极管电路	147
9.1	PIN 二极管结构	147
9.2	PIN 二极管原理	148
9.3	PIN 二极管等效电路	148
9.4	单刀开关	149
9.4.1	单刀开关(串联结构)	149
9.4.2	单刀开关(并联结构)	151
9.5	多二极管设计	151
9.5.1	设计方法	151
9.5.2	单刀多掷(SPNT)	152
9.6	PCN 单刀双掷 T/R(发送/接收)开关	154
9.7	恒定阻抗开关与衰减器的设计	154
9.8	PIN 二极管移相器	156
9.8.1	开关线移相器	156
9.8.2	负载线移相器	156
9.8.3	反射式移相器	157
第 10 章	数字技术在射频功率放大器系统中的应用	159
10.1	数字技术在射频功率放大器系统应用中的介绍	159
10.2	数字预失真(DPD)	160

10.2.1	PA 放大器模型	160
10.2.2	DPD 结构	162
10.2.3	DPD 性能结果	163
10.3	波峰因数消减	164
10.3.1	一些基本概念	164
10.3.2	波峰因数消减	164
10.4	包络跟踪	166
10.4.1	包络跟踪系统结构	167
10.4.2	宽带高效包络放大器	168
10.4.3	ET 功率放大器的测量	168
第 11 章	芯片电磁兼容问题	170
11.1	基本概念	170
11.1.1	电磁干扰	170
11.1.2	串扰的电磁场描述方程	171
11.1.3	电磁辐射	173
11.2	电磁兼容测试方法	174
11.2.1	电磁辐射测试方法	174
11.2.2	电磁辐射发射测试方法	174
11.2.3	电磁传导发射测试方法	175
11.2.4	集成电路电磁抗扰度测试方法	176
11.2.5	辐射抗扰度测试方法	177
11.3	电磁兼容仿真模型	177
11.3.1	IBIS 模型	177
11.3.2	ICEM 模型	178
11.3.3	ICIM 模型	180
11.3.4	仿真实验	181
参考文献	183

第1章

RF基本概念与集总参数模型

概要

- 基本概念回顾
- 直导线电感
- 电阻等效电路
- 电感等效电路
- 磁芯电感
- 电容等效电路

1.1 电磁波频谱

微波一般指交变信号的频率在 300MHz 左右的电流信号,微波信号的周期($T=1/f$)一般在 $3\text{ns}(3\times 10^{-9}\text{s})$ 到 $3\text{fs}(3\times 10^{-12}\text{s})$ 之间,其波长($\lambda=c/f$)范围在 1m 到 1mm 之间,其中 $c=3\times 10^8\text{m/s}$,为真空中的光速。信号波长在毫米数量级时被称为毫米波。由于频率过高(或者短波太长),标准电路理论不能直接用来解决微波网络问题。在一定意义上,标准电路理论是一种近似或者特殊情况下的由麦克斯韦方程描述的广义电磁学理论,并由麦克斯韦方程描述。在一般情况下,近似电路理论中的集总电路元件近似方法并不适用于微波。微波元件一般都是分布式元件,而且微波波长与器件尺度在同一数量级,电压或电流的相位随着器件物理尺寸有明显的变化。对于大部分频率非常低的波,由于其波长很长,传播器件尺寸的距离相位几乎没有什么变化。电磁微波频谱如图 1.1 所示。

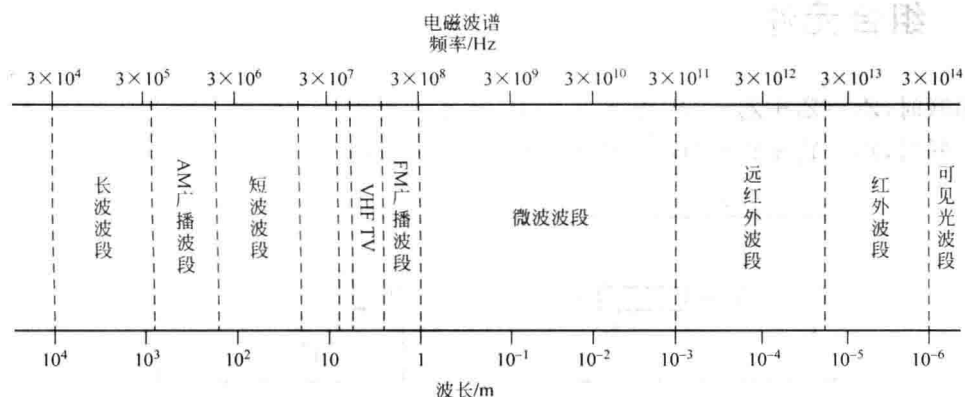


图 1.1 电磁微波频谱

典型频率		大致频段分配	
AM广播波段	535~1605kHz	L波段	1~2GHz
短波波段	3~30MHz	S波段	2~4GHz
FM广播波段	88~108MHz	C波段	4~8GHz
甚高频TV(2~4)	54~72MHz	X波段	8~12GHz
甚高频TV(5~6)	76~88MHz	Ku波段	12~18GHz
极高频TV(7~13)	174~216MHz	K波段	18~26GHz
极高频TV(14~83)	470~890MHz	Ka波段	26~40GHz
微波炉所用波段	2.45GHz	U波段	40~60GHz

图 1.1 (续)

1.2 直角坐标与极坐标形式矢量

阻抗由电阻和电抗构成(阻抗与电导屏幕如图 1.3 所示),即 $Z=R\pm jX$ (电感型电抗为“+”,电容型电抗为“-”),其中 $X_L=2\pi fL$ 、 $X_C=\frac{1}{2\pi fC}$ 。导纳由电导和电纳组成,即 $Y=\pm jB=\frac{1}{Z}=\frac{1}{R\pm jX}G$ (电感型电纳为“-”,电容型电纳为“+”),其中, $B_L=\frac{1}{(2\pi fL)}$ 、 $B_C=2\pi fC$ 。直角坐标与极坐标形式矢量如图 1.2 所示。

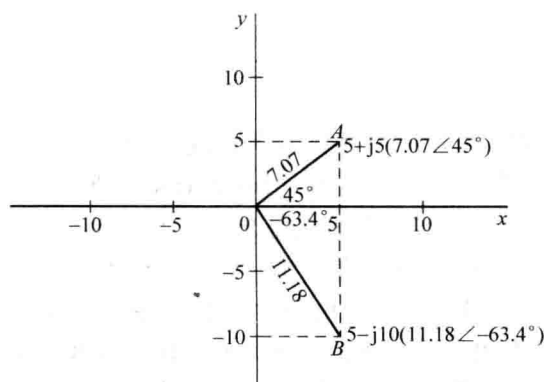


图 1.2 直角坐标与极坐标形式矢量

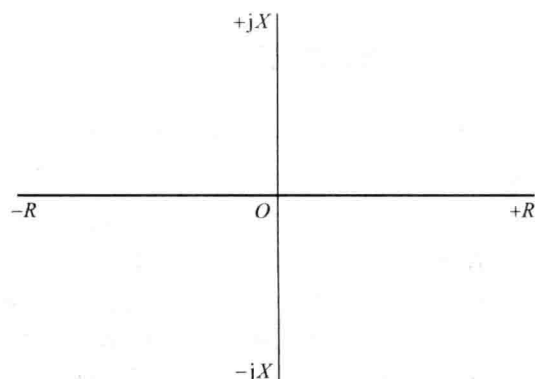
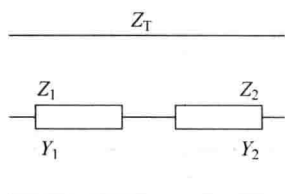
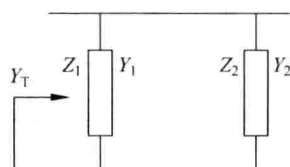


图 1.3 阻抗与电抗平面

1.3 组合元件

串联时, $Z_T=Z_1+Z_2=(R_1\pm jX_1)+(R_2\pm jX_2)$,如图 1.4 所示。

并联时, $Y_T=Y_1+Y_2=(G_1\pm jB_1)+(G_2\pm jB_2)$,如图 1.5 所示。

图 1.4 Z_1 与 Z_2 串联组合图示图 1.5 Z_1 与 Z_2 并联组合图示

波长与相位的变化(如图 1.6 所示)。

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{v}{f}$$

其中, v 为波的传播速度, f 为振荡频率, ϵ_r 为相对介电常数。

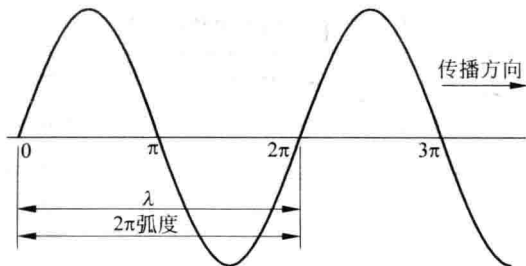


图 1.6 波长与相位的变化

1.4 趋肤效应

随着频率的增加,导体表面的电流增加。

趋肤深度公式 $\delta_s = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_r \mu_0 \sigma}}$, 并且 $J_x = \frac{J_0}{e} \approx 37\% J_0$ 。

当频率升高时,导线表面的电流密度会随之增加,而内部电流密度将会减小。因此当高频电流通过导线时,可以认为电流只在导体表面很薄一层内流过,如图 1.7 所示。当电流密度衰减为表面电流密度的 $\frac{1}{e}$ ($\approx 37\%$) 时距离表面的距离定义为趋肤深度 δ_s , 定量地,

$$\delta_s = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_r \mu_0 \sigma}}$$

其中 f 为信号频率, μ_r 为相对磁导率, μ_0 为真空磁导率, σ 为导体电导率。对于铜, $\mu_r = 1$, $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ s/m}$, 因此其趋肤深度为 $\delta_{\text{Cu}} = \frac{0.066}{\sqrt{f}} \text{ m}$, 若 $f = 10\,000 \text{ MHz}$, 则 $\delta_{\text{Cu}} = 0.66 \mu\text{m}$ 。

趋肤深度表示只有 $2\mu\text{s}$ 或 1in 的百万分之八十。趋肤效应曲线图如图 1.8 所示。换言之

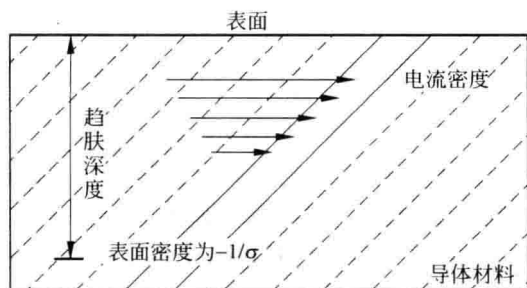


图 1.7 趋肤效应

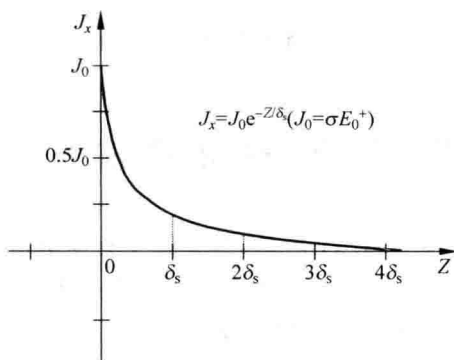


图 1.8 趋肤效应曲线图

之,在微波频率下,金属里的功率和电流流动只集中在金属表面。微波工程师充分利用这种特性,在导电能力比较好的导体(铜、铝)电镀上具有较小趋肤深度的优良导体(金、银)。用这种方法可以以最小的成本获得电性能优良的导体。表 1.1 为 4 种材料的趋肤深度比较。

表 1.1 4 种材料的趋肤深度

材料	$\sigma /(\text{mhos/m})$	$\mu /(\text{H/m})$	δ / mm	δ / in
铜	58.00×10^6	$4\pi \times 10^{-7}$	0.000 66	0.000 025
铝	38.10×10^6	$4\pi \times 10^{-7}$	0.000 80	0.000 031
银	61.70×10^6	$4\pi \times 10^{-7}$	0.000 60	0.000 023
金	40.98×10^6	$4\pi \times 10^{-7}$	0.000 50	0.000 019

说明： μ 为自由空间磁导率。

1.5 平板及电荷间的电场分布

当在自由空间或电介质中的电荷彼此接近时,在介质中会存在电场,如图 1.9 和图 1.10 所示,电场从正电荷发出终止于负电荷。

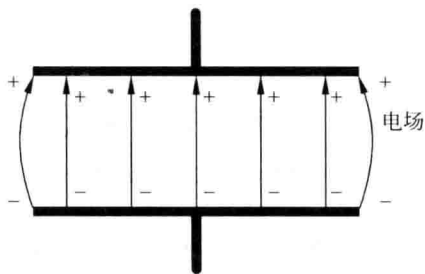


图 1.9 两个带电板之间的电场分布

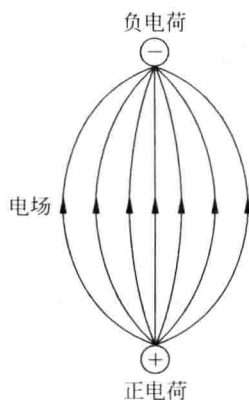


图 1.10 自由空间中正负电荷的电场分布

1.6 磁场——右手法则

如图 1.11 所示,当导线中有净电荷沿特定方向运动时,该电荷周围会建立一个磁场。因电流而激发的磁场方向遵循右手准则。该准则规定,右手大拇指的方向指向电流方向,那么弯曲的四指所指的方向就是磁感线的环绕方向,见图 1.12。一对正负电荷周围分布的磁场如图 1.13 所示。

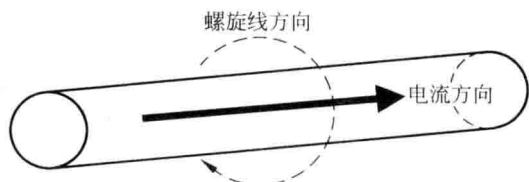


图 1.11 右手法则原理图

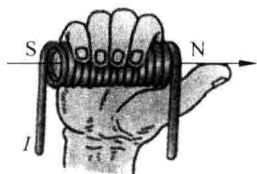


图 1.12 右手法则图示

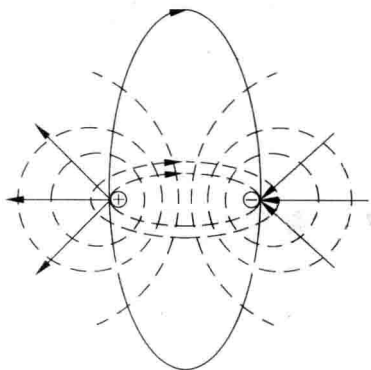


图 1.13 正负极性电荷磁场分布图

1.6.1 功率单位

$$P = \frac{V^2}{R}$$

其中, P 为信号功率, 单位为 W ; V 为均方根电压, 单位为 V ; R 为电阻。RF 电路中, 功率分为绝对功率和相对功率。

1.6.2 相对分贝

功率增益 $G = 10 \log \left(\frac{P_o}{P_i} \right) \text{dB}$

功率损失 $G_l = 10 \log \left(\frac{V_o^2/R_o}{V_i^2/R_i} \right) \text{dB}$

电压变化 当 $R_o = R_i$ 时, $\Delta V = 20 \log \left(\frac{V_o}{V_i} \right) \text{dB}$

使用 dB 为单位表示网络功率的增益和损失有两个主要优势。第一, 它是一个紧凑的标记符, 它能很容易地表示相当大的数值; 第二, 比起线性制相乘的方法, 通过添加单位 dB 可以很简单地发现级联网络的网络效应。

值得注意的是, dB 是两个数量之间简单的比率, 这个数量可以是功率或者电压。只要一个网络具有同等的输入和输出阻抗, 一定可以给出一个分贝值的功率比和电压比。

1.6.3 绝对功率

- $\text{dBm} = 10 \log (P/1\text{mW})$

Also dBW and dBK

EX. $2\text{mW} \rightarrow 10 \log (2\text{mW}/1\text{mW}) = 3\text{dBm}$

- $\text{dBmV} = 20 \log (V/10^{-3})$

EX. $1\text{V} \rightarrow 20 \log (1/10^{-3}) = 60\text{dBmV}$