

信号与信息处理丛书

Microstrip Circuits Design

微波电路设计

韩庆文 陈世勇 陈建军 编著



清华大学出版社

信号与信息处理丛书

Microstrip Circuits Design

微波电路设计

韩庆文 陈世勇 陈建军 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书介绍了微波电路的基本知识,微波滤波器以及微波天线的原理和设计。主要内容包括射频/微波工程设计基础,传输线理论,匹配电路及微波网络基础,常用无源微波器件,滤波器设计,射频放大器设计,振荡器和混频器,微带天线的基础理论和基本设计方法。附录中给出了实际微波电路的设计方法,便于工程人员在工程设计中参考。

本书可以作为电子信息工程、通信工程、测控与仪器等微波工程相关专业的教材,也可以作为雷达、通信、测控、航空航天等方面科研人员的参考书。

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

微波电路设计/韩庆文,陈世勇,陈建军编著.——北京:清华大学出版社,2012.1

(信号与信息处理丛书)

ISBN 978-7-302-26515-3

I. ①微… II. ①韩… ②陈… ③陈… III. ①微波电路—电路设计 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 172537 号

责任编辑:王丽娜

责任校对:李建庄

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

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

印 刷 者:三河市君旺印装厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:21 字 数:521 千字

版 次:2012 年 1 月第 1 版 印 次:2012 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:36.00 元

《信号与信息处理丛书》编委会

主 编 李衍达

编 委(排名不分先后)

王宏禹 张贤达 李衍达 何振亚

迟惠生 保 铮 侯朝焕 袁保宗

阎平凡 谭铁牛

丛书出版说明

信号与信息处理可以说是信息技术中的核心部分。随着信息科学与技术的飞速发展,随着信息技术深入到各个领域而得到广泛的应用,信号与信息处理也作为前沿技术而发生着重大的变化。编辑出版“信号与信息处理丛书”正是为了反映这种变化,为了加速培养这方面的人才,也为了进一步推动这一领域的发展。本丛书的内容力求能反映信号与信息处理技术的前沿内容,具有高的学术意义与应用价值。入选的书稿可以是创作的专著,也可以是高水平的译作。

这套丛书不仅适合于研究生教学,也可作为高校教师与有关领域研究人员学习与工作的参考书。

从历史来看,真正影响着生活的是不断增长的知识与技术的积累和经反复探索所形成的观念。相信这套丛书的出版,会增加正在成长中的信号与信息处理技术的积累,而它对生活的作用则是显而易见的。

李衍达

2004年8月24日

前言

FOREWORD

作为微波技术课程的后续课程,微波电路设计重点在于培养学生的微波电路设计基础能力和设计素质,是电子通信类专业的重要专业课程。

微波电路设计课程侧重于培养学生的微波电路设计思想,使学生通过学习具备设计简单微波电路的能力,并因此积累初级设计经验,培养学生的工程素质,进而培养学生分析问题、解决问题的能力 and 创新思想。本教材针对微波电路设计课程编写,从电路设计机理出发,采用多种设计手段,对微波电路的设计以及实践应用进行了详尽阐述,使学生能了解基本的微波电路设计思想,培养一定的工程素养。

本书涉及各种主要微波电路的设计问题,包括微波电路概念、多端口网络、参量与测量方法、电路稳定性、各种微波元件与器件,并给出放大器、振荡器、滤波器、天线等设计实例。本书侧重于设计实践,兼顾理论的严谨性和实用性,以目前先进的开发手段完成设计实例,数值分析采用了 MATHCAD 软件进行辅助计算,微波电路设计软件采用 Microwave Office 和 ADS 以及 HFSS,它们都是目前微波电路设计的主流软件。

本书的安排如下:第 1 章为射频/微波工程设计基础;第 2 章为传输线理论;第 3 章为匹配电路及微波网络基础;第 4 章为常用无源微波器件;第 5 章为滤波器设计;第 6 章为射频放大器设计;第 7 章介绍了振荡器和混频器;第 8 章为微带天线设计基础。

由于编者水平有限,时间仓促,书中难免会有不少错误和不足,敬请广大读者和同行给予批评指正。

编者

2011 年 5 月

目 录

CONTENTS

第 1 章 射频/微波工程设计基础	1
1.1 微波的频率范围	1
1.2 射频/微波电路设计简介	2
1.2.1 射频/微波的主要特性	2
1.2.2 射频/微波设计的基本特点	3
1.2.3 射频/微波设计的困难	4
1.3 无源元件的射频特性	5
1.3.1 金属导线	5
1.3.2 电阻	6
1.3.3 电容	7
1.3.4 电感	8
1.4 射频/微波设计的主要参数	8
1.4.1 频率	9
1.4.2 功率	9
1.4.3 阻抗	9
1.5 射频/微波设计软件	10
1.5.1 MATHCAD 软件与数值计算	10
1.5.2 史密斯圆图仿真软件	15
1.5.3 Microwave Office 软件与微波电路设计	17
1.5.4 ADS 软件	19
1.6 习题	21
第 2 章 传输线理论	23
2.1 传输线	23
2.1.1 传输线的基本理论	23
2.1.2 传输线	25
2.2 常用传输线	31
2.2.1 双线传输线	31
2.2.2 同轴线	32
2.2.3 波导	33

2.2.4	微带线	34
2.3	史密斯圆图基础	42
2.3.1	阻抗圆图	42
2.3.2	导纳圆图	46
2.3.3	史密斯阻抗圆图应用举例	46
2.4	习题	48
第3章	匹配电路及微波网络基础	50
3.1	基本阻抗匹配理论	50
3.1.1	匹配电路的概念和意义	50
3.1.2	共轭匹配	51
3.1.3	行波匹配	52
3.2	集总参数匹配电路	53
3.2.1	L型匹配电路	53
3.2.2	T型匹配电路	62
3.2.3	II型匹配电路	65
3.3	微带线匹配电路	67
3.3.1	串联型微波匹配电路	67
3.3.2	并联型微波匹配电路	68
3.3.3	混合式匹配电路	76
3.4	端口网络	77
3.4.1	单端口网络和多端口网络	78
3.4.2	网络参量的定义	80
3.4.3	散射参量 S	86
3.4.4	传输散射矩阵(T 矩阵)	90
3.4.5	网络参量之间的变换关系	91
3.5	习题	92
第4章	常用无源微波器件	95
4.1	功率衰减器	95
4.1.1	功率衰减器的原理	95
4.1.2	固定功率衰减器模型	96
4.1.3	功率衰减器的选择原则	101
4.2	功率分配器	102
4.2.1	功率分配器的原理	102
4.2.2	功率分配器的主要技术指标	102
4.2.3	功分器的集总参数模型	103
4.2.4	分布参数功率分配器	106
4.3	方向耦合器	115

4.3.1	方向耦合器的原理	116
4.3.2	支路型	117
4.3.3	平行线型	121
4.4	习题	122
第5章	滤波器设计	123
5.1	微波滤波器	123
5.1.1	滤波器的种类	123
5.1.2	滤波器的参数	124
5.1.3	低通滤波器的原理	125
5.1.4	高通滤波器的原理	128
5.1.5	带通滤波器和带阻滤波器的原理	129
5.1.6	品质因数	131
5.2	低通原型滤波器	133
5.2.1	归一化低通原型滤波器	133
5.2.2	巴特沃斯低通滤波器	134
5.2.3	切比雪夫低通滤波器	138
5.2.4	巴特沃斯滤波器与切比雪夫滤波器的比较	143
5.2.5	椭圆函数滤波器	145
5.3	滤波器的频率变换	148
5.3.1	从低通原型到高通的频率变换	149
5.3.2	从低通原型到带通的频率变换	151
5.3.3	从低通原型到带阻的频率变换	152
5.3.4	带通滤波器的设计	155
5.4	集总参数到分布参数的变换	157
5.4.1	Richards 变换	157
5.4.2	单位元件	159
5.4.3	Kuroda 规则	159
5.5	微带线滤波器的设计	161
5.5.1	Kuroda 规则实现滤波器设计	161
5.5.2	高低阻抗线实现滤波器设计	166
5.6	耦合微带线滤波器	170
5.6.1	耦合微带线	170
5.6.2	耦合微带线的传输特性	171
5.6.3	耦合微带带通滤波器单元	173
5.6.4	级联耦合微带线带通滤波器	174
5.6.5	耦合微带线带通滤波器设计实例	175
5.7	习题	176

第 6 章 射频放大器设计	178
6.1 放大电路的基本结构和性能指标	178
6.2 稳定性分析	179
6.2.1 稳定性圆	180
6.2.2 稳定性的判定和设计	182
6.3 功率增益	186
6.3.1 功率增益的定义	186
6.3.2 单向化设计法	188
6.3.3 单向化设计误差因子	193
6.3.4 双共轭匹配设计法	194
6.3.5 功率增益和资用功率增益圆	197
6.4 噪声系数圆	201
6.5 等驻波比圆	203
6.6 直流偏置电路	206
6.6.1 放大器的工作状态	206
6.6.2 双极晶体管的偏置电路	208
6.6.3 场效应晶体管的偏置电路	209
6.7 低噪声放大器设计	210
6.8 宽带放大器、功率放大器和多级放大器的设计	213
6.8.1 宽带放大器	213
6.8.2 功率放大器	214
6.8.3 多级放大器的设计	217
6.11 习题	218
第 7 章 振荡器和混频器	220
7.1 振荡器的基本模型	220
7.1.1 振荡器的基本理论	221
7.1.2 反馈振荡器的设计	222
7.1.3 振荡器的设计步骤	224
7.1.4 石英晶体振荡器的原理	226
7.2 高频振荡器电路	227
7.2.1 固定频率振荡器	229
7.2.2 介质谐振腔振荡器	235
7.2.3 YIG 调谐振荡器	238
7.2.4 压控振荡器	239
7.3 混频器的基本特性	241
7.3.1 混频器的指标	241
7.3.2 混频器的基本原理	243

7.3.3	频域分析	245
7.3.4	混频器的分类	247
7.4	习题	254
第8章	微带天线设计基础	256
8.1	天线辐射与接收基本理论	256
8.1.1	天线的基本辐射原理	256
8.1.2	电基本振子的辐射场	258
8.1.3	天线的电参数	260
8.2	天线阵	265
8.2.1	二元阵	266
8.2.2	均匀直线阵	267
8.2.3	隙缝天线	269
8.2.4	波导隙缝天线	270
8.3	微带天线的定义	271
8.3.1	微带天线的概念和结构	271
8.3.2	微带天线的优缺点及发展前景	272
8.3.3	馈电方法	273
8.3.4	微带天线的极化	276
8.3.5	微带天线的分析方法	277
8.4	微带阵列天线的分析	279
8.4.1	概述	279
8.4.2	面阵的方向性	283
8.4.3	互耦效应对阵列性能的影响	285
8.4.4	阵列天线的馈电形式	287
8.5	圆极化五边形微带天线的仿真与实现	288
8.5.1	圆极化的特性及实现方法	289
8.5.2	五边形贴片微带天线的设计步骤	291
8.5.3	五边形贴片微带天线的单点馈电	292
8.5.4	单点背馈的五边形微带天线的设计与实现	297
8.6	微带阵列	300
8.6.1	微带馈电网络的分析	300
8.6.2	馈电网络的设计	302
8.6.3	4阵元五边形天线阵的设计与仿真	303
8.7	习题	304
附录A	切比雪夫低通滤波器的设计	305
A.1	设计要求	305
A.2	设计原理	305

A.3 设计步骤	306
附录B 高低阻抗线低通滤波器设计	314
B.1 设计原理	314
B.2 设计要求	314
B.3 设计过程	314
参考文献	319

射频/微波工程设计基础

随着无线通信的快速发展,射频/微波电路的设计问题引起了学术界的广泛关注,而且,这种趋势毫无疑问将持续下去,这就要求设计者具备解决射频/微波电路设计中面临的各种问题的能力,而这些问题在低频系统中并不存在。

本章主要讲述射频/微波电路设计的基础知识,介绍微波网络基本参量的定义和计算方法,以及在设计过程中采用的 MATHCAD 计算设计软件、Microwave Office 微波设计软件和 ADS 设计软件。

1.1 微波的频率范围

波长为 $1\text{m}\sim 0.1\text{mm}$ 的电磁波称为微波。对应的频率范围是 $300\text{MHz}\sim 3000\text{GHz}$; 这个波段被称为微波波段。

在实际应用中,常把微波波段按照波长划分为分米波段、厘米波段、毫米波段和亚毫米波段,其具体划分情况如表 1.1 所示。

表 1.1 微波波段的划分

名称	波长范围	频率范围
分米波	$1\text{m}\sim 10\text{cm}$	$300\text{MHz}\sim 3\text{GHz}$
厘米波	$10\sim 1\text{cm}$	$3\sim 30\text{GHz}$
毫米波	$1\text{cm}\sim 1\text{mm}$	$30\sim 300\text{GHz}$
亚毫米波	$1\sim 0.1\text{mm}$	$300\sim 3000\text{GHz}$

在雷达、通信以及常规微波技术中,常用英文字母来表示更为详细的微波波段划分,如表 1.2 所示。

不同频段的无线电信号用途不同,其具体使用也需要遵从规范,服从管理。作为一种公用资源,频谱需要接受固定机构的管理,这种管理包括对工作频率、发射功率的管理。国际无线电咨询委员会(Consultative Committee of International Radio, CCIR)针对频谱的用途给出了明确的规定,对各种不同用途的无线电设备所允许的工作频段进行了严格的界定。

无线电频段的基本用途如表 1.3 所示。

表 1.2 微波常用波段代号

波段代号	标称波长 /cm	频率范围 /GHz	波长范围 /cm	波段代号	标称波长 /cm	频率范围 /GHz	波长范围 /cm
L	22	1~2	30~15	K	1.25	18~27	1.67~1.11
S	10	2~4	15~7.5	Ka	0.8	27~40	1.11~0.75
C	5	4~8	7.5~3.75	U	0.6	40~60	0.75~0.5
X	3	8~12	3.75~2.5	V	0.4	60~80	0.5~0.375
Ku	2	12~18	2.5~1.67	W	0.3	80~100	0.375~0.3

表 1.3 无线电频段的基本用途

频 段	基本用途	备 注
VHF,UHF (30MHz~3GHz)	电视广播、警察、防灾、道路、电力、矿山、汽车、火车、航空、卫星通信、行业专用指挥系统、个人无线电、气象雷达、地面雷达、海事雷达、二次雷达、生物医学、工业加热等	技术发展成熟,应用范围最广,频谱最拥挤
SHF (3~30GHz)	公用微波中继通信、行政专用中继通信、卫星电视、导航、遥感、射电天文、宇宙研究、探测制导、军用雷达、电子对抗等	穿透大气层,广泛应用于空间技术
EHF (30~300GHz)	各种小型雷达、专门用途通信、外太空研究、核物理工程、无线电波谱学	尺寸更小,接近红外线,与近代物理学相关

随着无线通信技术的进一步发展,频谱资源越来越紧缺,也对从事射频/微波设计的从业者提出了更高的要求。从军用通信的角度来说,随着电子对抗的升级,需要设法掌握敌方所使用的无线电频率,并给其以毁灭性打击;从民用通信角度来说,随着移动通信系统的不断升级,巨大的市场潜力和飞速的更新步伐,使得无线通信领域的发展进入了一个全新的时代,并迅速成长为全球性的支柱产业,也使得社会对无线通信人才的需求不断攀升。

1.2 射频/微波电路设计简介

对无线通信从业者的基本要求就是,必须具备射频/微波电路及系统的设计能力。问题在于,射频/微波电路及系统的设计方法与一般的低频电路和高频电路的设计方法不完全相同。

1.2.1 射频/微波的主要特性

射频/微波波段有着与其他波段不同的显著特性,主要表现在以下几方面。

(1) 似光性

射频/微波具有与几何光学相似的特性,称之为“似光性”。即射频/微波能像光线一样在空气或其他媒体中以光速沿直线传播,并在不同媒体界面存在入射和反射现象,这使得射频/微波能像光线一样直线传播并容易集中。根据此特性,即可以获得方向性极好、体积小的天线设备,用于接收地面或宇宙空间中各物体反射回来的微弱信号,从而确定该物体的方位与距离,实现雷达探测。

(2) 穿透性

射频/微波比其他用于辐射加热的电磁波,如红外线、远红外线等波长更长,因此具有更好的穿透性。射频/微波照射于介质物体时,能深入该物体内部的特点称为穿透性。微波信号(特别是厘米波段)能穿透电离层,成为人们探测外层空间的窗口;它能穿透云雾、植被、积雪和地表层,具有全天候工作能力,是遥感技术的重要手段;它能穿透生物组织,是医学透热疗法的重要方法;它能穿透等离子体,是等离子体诊断、研究的重要手段。

(3) 非电离性

射频/微波的量子能量还不够大,与物质相互作用时,虽能改变其运动状态,但不能改变物质分子的内部结构。非电离性使得微波成为探索物质内部结构的有效手段。

(4) 信息性

射频/微波波段信息容量巨大,即使很小的相对带宽也具有很宽的可用频带,这使得射频/微波波段成为现代通信系统的主要工作波段,如移动通信、多路通信、卫星通信等,多采用射频/微波作为传输手段;射频/微波信号还可提供相位信息、极化信息、多普勒频率信息等,这些特性使得射频/微波能在目标探测、遥感、目标特征分析等领域发挥重要作用。

1.2.2 射频/微波设计的基本特点

由于射频/微波的频率高、波长短,使得在低频电路中完全可以忽略的一些现象和效应,如趋肤效应、辐射效应、相位滞后等现象在射频/微波波段不可忽略,低频电路中常用的集总参数元件电阻、电感、电容不再适用,电压、电流在该波段甚至失去了确切的含义,因此无法用低频电路的分析手段完成射频/微波系统分析,必须建立一套新的、能够描述这些现象及效应的理论分析方法来完成分析。

用于直流和低频集总参数系统的基尔霍夫(Kirchhoff)类型的电压电流定律等分析工具,在射频/微波电路设计中几乎完全失灵,因为射频/微波的能量传播已经不再依赖一般意义上的传输线,而是利用电磁能量的空间交联耦合完成。

射频/微波技术的基本理论是经典的电磁场理论。研究电磁波沿传输线的传播特性有两种分析方法:一种是“场”的分析方法,即从麦克斯韦方程出发,在特定边界条件下求解电磁波动方程,获得场量的时空变化规律,分析电磁波沿线的各种传输特性;另一种是“路”的分析方法,即将传输线作为分布参数电路处理,用基尔霍夫定律建立传输线方程,获得传输线上电压和电流的时空变化规律,分析电压和电流的各种传输特性。将“场”的分析方法和“路”的分析方法用于研究同一问题,所得结论是一致的,在具体研究中,到底选用哪种方法,则取决于研究的方便程度。对于射频/微波工程设计中的大量问题,采用网络方法和分布参数概念即可得到满意的工程结果。相对于严谨的麦克斯韦方程组及其数值解法,“路”的方法具有更好的实用性,并成为射频/微波工程师们的常用方法。

基于OFDM的无线局域网协议802.11a给出了物理层的收发模块框图,如图1.1所示。

在这个系统中,发射机射频系统框图如图1.2所示。

OFDM基带处理部分输出一个20MHz的OFDM信号,经过基带/中频变换模块,输出频率为810MHz的OFDM信号,再经过中频/射频变换模块,输出5GHz的OFDM信号,经过功率放大后送至天线。

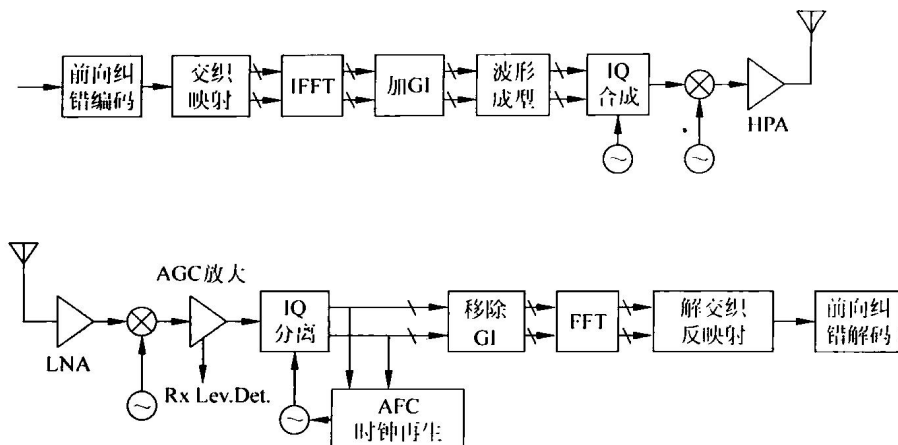


图 1.1 OFDM 物理层发射/接收机模块框图

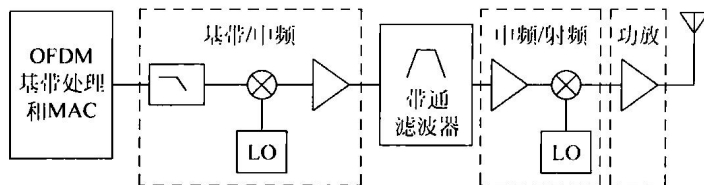


图 1.2 发射机射频系统框图

现在以功放模块为例展开讨论,此系统采用的是一个 5GHz 功放,通常功率放大器包括驱动级和放大级两级。图 1.3 所示为频率范围 5.15~5.35GHz 的功率放大器的末级结构示意图,该功放采用场效应管及微带匹配网络构成。要设计这样的功率放大器,需要考虑许多具体问题,如匹配问题、隔离问题等,而这些问题都是射频/微波电路设计中所必须涉及的关键性问题。对于设计一个能工作的功率放大器,不仅需要理论研究支撑,更加需要深厚的工程经验。在射频/微波频率范围内,模块的几何尺寸与信号的工作波长是可比拟的,分布参数的概念始终贯穿于工程设计的各个方面,同一功能的模块,在不同的工作频率,其结构与具体实现方式也大不相同。射频/微波电路的设计必须密切关注结构设计,其设计目标就是处理好材料、结构与电路功能之间的关系,而这也正是需要重点关注的内容。

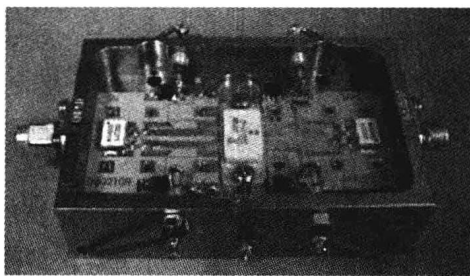


图 1.3 功率放大器结构示意图

射频/微波设计工程师在设计、制造专门的射频电路过程中,需要掌握以上所有的设计关键问题。本书将重点关注射频/微波电路的设计理论及其具体应用问题。

1.2.3 射频/微波设计的困难

射频/微波系统具有不可否认的优点,但是其设计也存在诸多困难。射频/微波系统的设计不仅需要理论运算支持,更加需要工程经验方面的保证,而不同的设计师对于射频/微

波电路设计中的问题也可能有多种解决方案；但总体来说，设计者的经验积累是电路设计是否成功的保证，这些需要在不断的实践过程中积累进步。

1.3 无源元件的射频特性

对于低频电路而言，电阻 R 与频率无关，电容 C 和电感 L 也能简单地用其电抗值表示为

$$X_C = \frac{1}{\omega C}, \quad X_L = \omega L \quad (1-1)$$

而在射频/微波波段，通常意义上的金属导线、电阻、电容和电感都不再是单纯的元件。

1.3.1 金属导线

对于低频电路而言，导线的意义是传导(conductor)，它仅仅是一根良导体的连接线，电阻、电感、电容等寄生参数可以忽略不计，传导电流在整个导体横截面上呈均匀分布。但是，当工作频率提高到射频/微波频段，情况就变得复杂了：首先是导线的意义发生了改变，在射频/微波频段，导线已经不再是单纯地完成传导作用，其英文表示方式也变成了 Guide Line(引导线)，此时的导线起的是引导作用，即引导电磁波的传播方向；其次，此时的金属导线不仅具有自身的电阻、电感或电容，而且还是频率的函数，而这些寄生参数对电路工作性能影响极大，在设计中必须给予重视。

举例说明，一根半径为 a 、长度为 l 、材料电导率为 σ 的圆柱形铜导体，其直流电阻为

$$R_{DC} = \frac{l}{\pi a^2 \sigma} \quad (1-2)$$

在直流条件下，可以认为导线的全部横截面都用于传输电路，其电流密度可表示为

$$J_{z0} = \frac{I}{\pi a^2} \quad (1-3)$$

但在交流情况下，交变电荷载流子流动形成了交变磁场，该磁场感应电场的电流密度与原始电流正好相反，这种效应在导体中心位置即 $r=0$ 处表现最强，从而导致导体中心处电阻明显增加，随着工作频率的提高，电流的分布也趋于导体外表面，这就是所谓的“趋肤效应”。此时导体截面的电流密度已经不再均匀，而是随着观测点距离导体中心的位置而变化。 z 方向的电流密度幅值可以表示为

$$J_z = J_{z0} e^{-\alpha r} \quad (1-4)$$

其中， J_{z0} 为 $r=a$ 时的电流密度； $\alpha = \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}} = \frac{1}{\Delta}$ ，定义 Δ 为导体的趋肤深度。

从趋肤深度的定义可以看出，该参数与频率密切相关，满足平方反比关系。随着频率的增加，趋肤深度按平方率减小，这就意味着能量将快速趋于导体表面的传播。一些材料趋肤深度与频率的关系如图 1.4 所示。

进一步则可得到高频条件下的电阻和电感的表达式

$$R \approx \frac{l}{2\pi a \sigma \Delta} = \frac{a R_{DC}}{2\Delta}, \quad \omega L = \frac{a R_{DC}}{2\Delta} \quad (1-5)$$

该式在 $\Delta \ll a$ 条件下成立。