

四川省示范性高职院校建设项目成果

射频

电路设计技术基础

主编 吴志毅 王建军

SHEPIN

DIANLU SHEJI JISHU JICHU



西南交通大学出版社

四川省示范性高职院校建设项目成果

校企合作共同编写，与企业对接，实用性强

射频

电路设计技术基础

主 编 吴志毅 王建军

副主编 吴柯男 熊建云 李华

主 审 徐秀会

SHEPIN

DIANLU SHEJI JISHU JICHU



西南交通大学出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

射频电路设计技术基础 / 吴志毅, 王建军主编. —
成都: 西南交通大学出版社, 2014.8
四川省示范性高职院校建设项目成果
ISBN 978-7-5643-3405-5

I. ①射… II. ①吴… ②王… III. ①射频电路—电
路设计—高等职业教育—教材 IV. ①TN710.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 197630 号

四川省示范性高职院校建设项目成果

射频电路设计技术基础

主编 吴志毅 王建军

责任编辑	李芳芳
助理编辑	宋彦博
封面设计	米迦设计工作室
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区交大路 146 号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	四川川印印刷有限公司
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	18
插 页	1
字 数	450 千字
版 次	2014 年 8 月第 1 版
印 次	2014 年 8 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-3405-5
定 价	39.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

序

2014年6月23至24日，全国第七次职业教育工作会议在北京召开，中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平就加快职业教育发展作出重要指示。他强调，职业教育是国民教育体系和人力资源开发的重要组成部分，是广大青年打开通往成功成才大门的重要途径，肩负着培养多样化人才、传承技术技能、促进就业创业的重要职责，必须高度重视、加快发展。

在国家大力发展职业教育、创新人才培养模式的新形势下，加强高职院校教材建设及课程资源建设，是深化教育教学改革和全面培养技术技能人才的前提和基础。

近年来，四川信息职业技术学院坚持走“根植信息产业、服务信息社会”的特色发展之路，始终致力于打造西部电子信息高端技术技能人才培养高地，立志为电子信息产业和区域经济社会发展培养技术技能人才。在省级示范性高等职业院校建设过程中，学院通过联合企业全程参与教材开发与课程建设，组织编写了涉及应用电子技术、软件技术、计算机网络技术、数控技术四个示范建设专业的具有较强指导作用和较高现实价值的系列教材。

在编著过程中，编著者基于“理实一体”、“教学做一体化”的基本要求，秉承新颖性、实用性、开放性的基本原则，以校企联合为依托，基于工作过程系统化课程开发理念，精心选取教学内容、优化设计学习情境，最终形成了这套示范系列教材。本套教材充分体现了“企业全程参与教材开发、课程内容与职业标准对接、教学过程与生产过程对接”的基本特点，具体表现在：

一是编写队伍体现了“校企联合、专兼结合”。教材以适应技术技能人才培养为需求，联合四川军工集团零八一电子集团、联想集团、四川长征机床集团有限公司、宝鸡机床集团有限公司等知名企业全程参与教材开发，编写队伍既有企业一线技术工程师，又有学校的教授、副教授，专兼搭配。他们既熟悉国家职业教育形势和政策，又了解社会和行业需求；既懂得教育教学规律，又深谙学生心理。

二是内容选取体现了“对接标准，立足岗位”。教材编写以国家职业标准、行业标准为指南，有机融入了电子信息产业链上的生产制造类企业、系统集成企业、应用维护企业或单位的相关技术岗位的知识技能要求，使课程内容与国家职业标准和行业企业标准有机融合，学生通过学习和实践，能实现从学习者向从业者能力的递进。突出了课程内容与职业标准对接，使教材既可以作为学校教学使用，也可作为企业员工培训使用。

三是内容组织体现了“项目导向、任务驱动”。教材基于工作过程系统化理念开发,采用“项目导向、任务驱动”方式组织内容,以完成实际工作中的真实项目或教学迁移项目为目标,通过核心任务驱动教学。教学内容融基础理论、实验、实训于一体,注重培养学生安全意识、团队意识、创新意识和成本意识,做到了素质并重,能让学生在模拟真实的工作环境中学习和实践,突出了教学过程与生产过程对接。

四是配套资源体现了“丰富多样、自主学习”。本套教材建设有配套的精品资源共享课程(见 <http://www.scitc.com.cn/>),配置教学文档库、课件库、素材库、习题及试题库、技术资料库、工程案例库,形成了立体化、资源化、网络化的开放式学习平台。

尽管本套教材在探索创新中还存在有待进一步提升之处,但仍不失为一套针对高职电子信息类专业的好教材,值得推广使用。

此为序。

四川省高职高专院校
人才培养工作委员会主任



前 言

为了更好地贯彻《国家中长期教育改革和发展规划纲要（2010—2020年）》的相关精神，完成教育部制定的《高职高专教育专业人才培养目标及规格》所提出的要求，我们结合多年的教学经验、企业工作经验以及高职教育特色，以校企合作的形式编写了这本适合高职院校人才培养的《射频电路设计技术基础》。本教材注重培养高职学生今后从事射频电路产品设计、开发、调试、维修以及生产工作所需的专业核心能力和职业素养，突出实用性、综合性和先进性，是一本实践性较强的教材。

本书具有以下特色：

1. 本书采用“项目引导，任务驱动”的编写模式，融理论知识传授和工程能力培养于一体，充分体现“学中做，做中学，学中练”的目的。书中每个项目由不同任务构成，每个任务又由任务目标、相关知识、技能训练等环节构成，使课程教学易于开展。

2. 本书强调开放式的思维和工程方案的设计、软件仿真设计与优化、企业典型产品案例分析、参数测量等，注重培养学生的创新意识和实践能力。教材中，以大量企业成果为实例进行分析，从而引导学生将理论学习同工作实际相联系。

3. 本书强调“以能力为本位，以学生为中心，以培养技能为前提”，从而使该书具有很强的实用性和前瞻性。全书体系结构安排合理，知识体系衔接有序，遵循教育部对高职高专提出的“以应用为目的，以必需、够用为度”原则，减少过时的、偏僻的、实用性不强的理论。本书把当今射频新技术、新动态、新成果融入到教材中，从而避免了知识与社会脱节。

本书由四川信息职业技术学院的教师和四川军工集团零八一电子集团长胜机器有限公司的工程技术人员联合编写。项目2~13由吴志毅高级工程师和川北医学院吴柯男共同编写，项目1由王建军高级工程师编写。全书由吴志毅统稿。徐秀会高级工程师对本书进行了认真审阅。四川信息职业技术学院熊建云副教授、李华副教授作为本书副主编，对各项目的编写提供了大力支持。此外，编者参阅了大量的论著以及互联网提供的资料，在此向有关作者表示衷心的感谢。

由于编写时间紧迫，加之编者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请广大读者批评指正，以便本书进一步修订完善。

编 者

2014年4月

目 录

项目 1	射频电路基础知识	1
项目 2	噪声与非线性失真分析	35
任务 1	信噪比测量	36
任务 2	级联噪声系数分析	39
任务 3	噪声温度测量	42
任务 4	射频电路中非线性失真分析	44
任务 5	灵敏度与动态范围分析与测试	49
任务 6	S 波段雷达接收机增益、噪声系数和动态范围三者关系案例分析	51
项目 3	匹配电路分析与设计	53
任务 1	集总参数匹配电路分析与设计	53
任务 2	微带线匹配网络分析与设计	67
任务 3	S 参数分析与测试	72
项目 4	射频滤波器分析与设计	75
任务 1	集总参数滤波器分析与设计	77
任务 2	微带滤波器分析与设计	89
项目 5	低噪声放大器分析与设计	96
任务 1	低噪声放大器分析与设计方法	97
任务 2	低噪声放大器设计案例分析	114
项目 6	射频功率放大器分析与设计	119
任务 1	射频功率放大器主要技术指标分析与测试	121
任务 2	射频功率放大器分析与设计方法	123
项目 7	混频器分析与设计	137
任务 1	混频器原理、主要技术指标分析与测试	138
任务 2	混频干扰与失真分析	142
任务 3	混频器分析与设计方法	143
任务 4	混频器设计案例分析	160

项目 8 振荡器分析与设计	164
任务 1 振荡器的基本原理分析与技术参数测试	165
任务 2 反馈型振荡器工作过程分析	168
任务 3 <i>RC</i> 正弦波振荡器工作过程分析	171
任务 4 <i>LC</i> 振荡器工作过程分析	175
任务 5 晶体振荡器工作过程分析	180
任务 6 压控振荡器工作过程分析	184
任务 7 负阻正弦波振荡器工作过程分析	188
任务 8 利用 ADS 仿真软件设计 1 GHz 的振荡器	193
项目 9 频率合成器分析与设计	194
任务 1 锁相环频率合成器分析与设计	200
任务 2 利用 AD9914 芯片设计一个微波中频信号源	209
任务 3 PLL + DDS 频率合成器分析与设计	213
任务 4 频率综合发生器设计案例分析	216
项目 10 功率分配器分析与设计	218
任务 1 功率分配器的基本原理、技术指标与参数测试	219
任务 2 集总参数功率分配器分析与设计	224
任务 3 分布参数功率分配器分析与设计	228
任务 4 相控阵雷达天线不等分功率分配器设计案例分析	236
项目 11 定向耦合器分析与设计	239
任务 1 定向耦合器的原理、技术指标分析与测试	241
任务 2 常见类型定向耦合器分析与设计	244
任务 3 定向耦合器设计案例分析	254
项目 12 功率衰减器分析与设计	255
任务 1 集总参数衰减器设计与分析	257
任务 2 分布参数衰减器原理分析	265
任务 3 电调衰减器原理分析	268
项目 13 其他常用微波电路原理与案例分析	271
任务 1 隔离器与环行器原理与案例分析	271
任务 2 倍频器与分频器原理分析	275
任务 3 开关与移相器原理分析	276
参考文献	279

项目 1

射频电路基础知识



学习目标

1. 知识目标

- (1) 了解射频电路的基本概念、特点及应用；
- (2) 了解电磁波频谱的划分；
- (3) 了解微波晶体管的有关知识；
- (4) 掌握分贝的具体含义及其换算关系；
- (5) 掌握无源元件在射频微波段的基本特性；
- (6) 掌握信号时域与频域的关系；
- (7) 掌握低频传输线与高频传输线的区别；
- (8) 掌握史密斯圆图的特点及其应用；
- (9) 掌握二端口网络参数的含义。

2. 技能目标

- (1) 掌握无源元件在低频段和高频段的不同特性；
- (2) 学会在射频段如何选择微波晶体管；
- (3) 学会根据史密斯圆图进行阻抗匹配；
- (4) 学会二端口的连接方式及射频电缆的制作。



相关知识

一、射频电路简介

到目前为止，射频技术无论是在理论方面，还是在工艺、材料、元器件以及设计技术方面，都已经发展得非常成熟，并且应用领域越来越广泛。

工程中所讲的射频电路，通常是指工作频率较高、电路尺寸可以与波长相比拟的电路。由于射频电路的工作频率较高，因此在电路结构形式、元器件选择、元器件材料、设计方法和传输线等方面，与一般的低频电路相比，有许多不同之处。

1. 射频电路的特点

射频电路的特点一般可概括为三点：趋肤效应、分布参数、 $\lambda/8$ 设计准则。

1) 趋肤效应

当交变电流通过导线时，电流密度在导线横截面上的分布是不均匀的，并且随着电流变化频率的升高，电流将集中于导线表面附近，而导线内部的电流越来越小，这种现象便被称

为趋肤效应。引起趋肤效应的原因是涡流。

2) 分布参数

在低频电路设计中，集总参数元件特性仅由自身特性决定，不受周围环境影响，元件的电磁场都集中在元件内部。所以，在低频电路设计中，通常忽略集总参数元件分布参数对电路的影响。但随着频率的升高，集总参数元件特性发生了变化，表现出分布参数的性质。比如，一个理想的电阻，随着频率升高，会表现出电容的效应；而随着频率继续升高，又会表现出电感效应。因此，我们可以把在高频段工作的集总参数元件称为分布参数元件。

分布参数元件：指一个元件的特性延伸扩展到一定的空间范围内，不再局限于元件自身，而存在分布电容、分布电感等。

分布电容：主要指元件自身封装、元件之间、线圈的相邻两匝之间、两根相邻导线间、线路板布线间形成的非期望电容。它对电路的影响等效于给电路并联上一个电容器。

分布电感：主要指元件引脚、连线、元器件的分布、线路板布线等形成的非期望电感。它对电路的影响等效于给电路串联上一个电感器。

案例分析：在电路设计中，如果分布电容 $C = 1 \text{ pF}$ ，电路的工作频率 f 分别为 3 kHz 、 3 MHz 和 3 GHz ，则分布电容的容抗分别为：

$$\begin{cases} X_C = 53 \text{ M}\Omega & (f = 3 \text{ kHz}) \\ X_C = 53 \text{ k}\Omega & (f = 3 \text{ MHz}) \\ X_C = 53 \text{ }\Omega & (f = 3 \text{ GHz}) \end{cases}$$

在频率 $f = 3 \text{ GHz}$ 时，其容抗接近射频电路标准阻抗 $Z_0 = 50 \text{ }\Omega$ ，并联影响明显。

如果分布电感 $L = 1 \text{ nH}$ ，电路的工作频率 f 分别为 3 kHz 、 3 MHz 和 3 GHz ，则分布电感的感抗分别为：

$$\begin{cases} X_L = 18.84 \times 10^{-6} \text{ }\Omega & (f = 3 \text{ kHz}) \\ X_L = 18.84 \times 10^{-3} \text{ }\Omega & (f = 3 \text{ MHz}) \\ X_L = 18.84 \text{ }\Omega & (f = 3 \text{ GHz}) \end{cases}$$

在频率 $f = 3 \text{ GHz}$ 时，其感抗接近射频电路标准阻抗 $Z_0 = 50 \text{ }\Omega$ ，串联影响明显。

由以上分析可知，在射频电路中，分布电感的存在，可能使电容器呈现出电感特性；分布电容的存在，可能使电感器呈现出电容特性。所以，在射频电路设计中，必须考虑分布参数对电路的影响。

3) $\lambda/8$ 设计准则

当电路板的几何尺度小于工作波长 λ 的 $1/8$ 时，可以不使用传输线理论进行电路设计。当电路板的几何尺度大于工作波长 λ 的 $1/8$ 时，必须使用传输线理论进行电路设计。

2. 射频电路的应用

射频电路的经典应用是在通信和雷达系统领域，具体体现在以下几方面。

(1) 无线通信系统：空间通信、卫星通信、航空通信、航海通信、无线局域网、蜂窝移动通信与无线对讲等。例如，卫星通信与卫星电视广播工作在 C 波段时，下行频率为 4 GHz ，上行频率为 6 GHz ；工作在 Ku 波段时，下行频率为 11 GHz ，上行频率为 14 GHz 。又如微波

中继通信：干线微波(2.1 GHz, 8 GHz, 11 GHz)、支线微波(6 GHz, 8 GHz, 11 GHz, 36 GHz)。

(2) 导航系统：微波着陆系统(MLS)、中国北斗、航空与航海等。

(3) 遥感：自然灾害检测、森林火灾检测，以及矿藏、沙漠、海洋与水资源监测等。

(4) 射频识别：防盗与安保、身份识别、产品检查、自动验票等。

(5) 传感器：微波传感器等。

(6) 医学应用：磁共振成像、微波成像、微波理疗等。

(7) 空间研究：射电望远镜、外层空间探测等。

(8) 电子战系统：干扰与反干扰等。

(9) 军事、民用雷达系统：远程警戒雷达、火控雷达、制导雷达、导航雷达、机载雷达、气象雷达、空管雷达等。

3. 射频电路中的分贝

在分析射频电路时，能量的传输通常用功率来描述，而不用电压或电流。工程中为了便于测量与计算，通常使用分贝(dB)作为功率单位。

1) 分贝的含义

我们知道，放大器输出与输入的比值称为放大倍数，单位为“倍”，如1000倍放大器。当改用“分贝”作为单位时，放大倍数称为增益，即分贝就是放大器增益的单位。这是一个概念的两种称呼。

2) 电压增益与功率增益

(1) 电压增益：

$$K = 20 \lg U_o / U_i$$

其中， U_o 为输出信号电压， U_i 为输入信号电压。

(2) 功率增益：

$$K = 10 \lg P_o / P_i$$

其中， P_o 为输出信号功率， P_i 为输入信号功率。

如果 $K > 0$ ，说明信号被放大； $K = 0$ ，说明信号直通； $K < 0$ ，说明信号被衰减。

综上所述，分贝是一个纯计数单位，其意义在于把一个很大(后面跟一长串0)或者很小(前面有一长串0)的数用比较简短的形式表示出来。

例如：

$$X = 10\,000\,000\,000 \quad 10 \lg X = 100 \text{ (dB)}$$

$$X = 0.000\,000\,000\,1 \quad 10 \lg X = -100 \text{ (dB)}$$

3) 0 dB 与 -3 dB 的含义

(1) 0 dB：表示输出信号与输入信号一样大。分贝所表示的是相对大小，不代表绝对的值。采用分贝表示方法时，通常可通过选取固定的参考值来表示物理量的绝对值。常用的0 dB基准有：0 dBFS，以满刻度的量值为参考值，常用于各种特性曲线上；0 dBm，以1 mW(在600 Ω负载上产生0.775 V电压)为参考值，常用于交流电平测量仪表上；0 dBV，以1 V为参考值；0 dBW，以1 W为参考值。

(2) -3 dB : 被称作半功率点或截止频率点, 表示功率是正常时的一半, 电压或电流是正常时的 0.707 倍。随着输入频率的上升, 放大器的电压放大倍数将下降, 当电压幅度降至最大值的 0.707 倍时, 该频率为截止频率。这时功率恰好是最大功率的一半, 所以称为半功率点。若用分贝表示, 正好下降了 3 dB [根据电压幅度计算, $20\lg(0.707) = -3\text{ dB}$; 根据功率计算, $10\lg(0.5) = -3\text{ dB}$]。

4) dBm 与功率 (W) 的换算方法

dBm 可用来表示功率的绝对值 (也可以认为是以 1 mW 功率为基准的一个比值)。其计算公式为:

$$P(\text{dBm}) = 10\lg(\text{功率值}/1\text{mW})$$

将 dBm 转换为 W 的口算规律是“1 个基准”和“2 个原则”。

1 个基准:

$$30\text{ dBm} = 1\text{ W}$$

2 个原则:

① $+3\text{ dBm}$ 代表增大到 2 倍, 计算时乘以 2; -3 dBm 代表减小到 $1/2$, 计算时除以 2。

例如: $33\text{ dBm} = 30\text{ dBm} + 3\text{ dBm} = 1\text{ W} \times 2 = 2\text{ W}$

$$27\text{ dBm} = 30\text{ dBm} - 3\text{ dBm} = 1\text{ W} \times 1/2 = 0.5\text{ W}$$

② $+10\text{ dBm}$ 代表增大到 10 倍, 计算时乘以 10; -10 dBm 代表减小到 $1/10$, 计算时除以 10。

例如: $40\text{ dBm} = 30\text{ dBm} + 10\text{ dBm} = 1\text{ W} \times 10 = 10\text{ W}$ 。

$$20\text{ dBm} = 30\text{ dBm} - 10\text{ dBm} = 1\text{ W} \times 0.1 = 0.1\text{ W}。$$

5) $+1\text{ dBm}$ 和 $+2\text{ dBm}$ 的计算技巧

$$\begin{aligned} +1\text{ dBm} &= +10\text{ dBm} - 3\text{ dBm} - 3\text{ dBm} - 3\text{ dBm} \\ &= X \times 10 \times 1/2 \times 1/2 \times 1/2 = X \times 1.25 (\text{W}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} +2\text{ dBm} &= -10\text{ dBm} + 3\text{ dBm} + 3\text{ dBm} + 3\text{ dBm} + 3\text{ dBm} \\ &= X \times 0.1 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = X \times 1.6 (\text{W}) \end{aligned}$$

在计算中, 有时候也可以根据上面的规律变换为 -1 dBm 和 -2 dBm , 达到快速准确计算目的。

例如: $-1\text{ dBm} = -10\text{ dBm} + 3\text{ dBm} + 3\text{ dBm} + 3\text{ dBm}$

$$= X \times 0.1 \times 2 \times 2 \times 2 = X \times 0.8 (\text{W})$$

$$-2\text{ dBm} = -3\text{ dBm} + 1\text{ dBm} = X \times 1/2 \times 1.25 = X \times 0.625 (\text{W})$$

$$51\text{ dBm} = 30\text{ dBm} + 10\text{ dBm} + 10\text{ dBm} + 1\text{ dBm} = 1\text{ W} \times 10 \times 10 \times 1.25 (\text{W})$$

一般来讲, 在工程中, dB 和 dB 之间只有加减运算, 没有乘除运算。而工作中用得最多的是减法运算, 即 dBm 减 dBm, 实际上代表两个功率相除, 例如信号功率和噪声功率相除就是信噪比 (SNR)。dBm 加 dBm 实际上代表两个功率相乘, 这已经不多见。

结论: (1) 常用的几个标准:

$$\text{dB} = 10 \lg \frac{P_2}{P_1} = 20 \lg \frac{V_2}{V_1}; \quad \text{dBm} = 10 \lg \frac{P_{\text{signal}}}{1 \text{ mW}}$$

$$\text{dBW} = 10 \lg \frac{P_{\text{signal}}}{1 \text{ W}}; \quad \text{dBmV} = 20 \lg \frac{V_{\text{signal}}}{1 \text{ mV}}$$

负载为 50Ω 时, $47 \text{ dBm} = 1 \text{ mV}$; $0 \text{ dBm} = 110 \text{ mV}$; $13 \text{ dBm} = 1 \text{ V}$ 。

(2) 常用对应关系:

$0 \text{ dBm} \rightarrow 1 \text{ mW}$; $10 \text{ dBm} \rightarrow 10 \text{ mW}$; $20 \text{ dBm} \rightarrow 100 \text{ mW}$

$30 \text{ dBm} \rightarrow 1 \text{ W}$; $33 \text{ dBm} \rightarrow 2 \text{ W}$; $36 \text{ dBm} \rightarrow 4 \text{ W}$

二、电磁波频谱的划分

电磁波频谱的划分有许多种方法。例如,以前人们认为 $0.3 \sim 1 \text{ GHz}$ 为射频段,但随着科技的进步,人们则以 $0.3 \sim 5 \text{ GHz}$ 为射频段。对于微波,人们常把它划分为四个波段:分米波、厘米波、毫米波、亚毫米波,如表 1.1 所示。为了在工程中应用方便,国际上又把微波波段划分得更细并给出相应的拉丁字母作为代号。表 1.2 为微波波段的代号及对应的频率范围。

表 1.1 微波波段的划分

波段名称	波长范围	频率范围	频段名称
分米波	1 m ~ 10 cm	0.3 ~ 3 GHz	超高频
厘米波	10 ~ 1 cm	3 ~ 30 GHz	特高频
毫米波	1 cm ~ 1 mm	30 ~ 300 GHz	极高频
亚毫米波	1 ~ 0.1 mm	300 ~ 3 000 GHz	超极高频

表 1.2 微波波段的代号及对应的频率范围

波段	频率范围/GHz	波段	频率范围/GHz
UHF	0.3 ~ 1.12	Ka	26.50 ~ 40.00
L	1.12 ~ 1.70	Q	33.00 ~ 50.00
LS	1.70 ~ 2.60	U	40.00 ~ 60.00
S	2.60 ~ 3.95	M	50.00 ~ 75.00
C	3.95 ~ 5.85	E	60.00 ~ 90.00
XC	5.85 ~ 8.20	F	90.00 ~ 140.00
X	8.20 ~ 12.40	G	140.00 ~ 220.00
Ku	12.40 ~ 18.00	R	220.00 ~ 325.00
K	18.00 ~ 26.50		

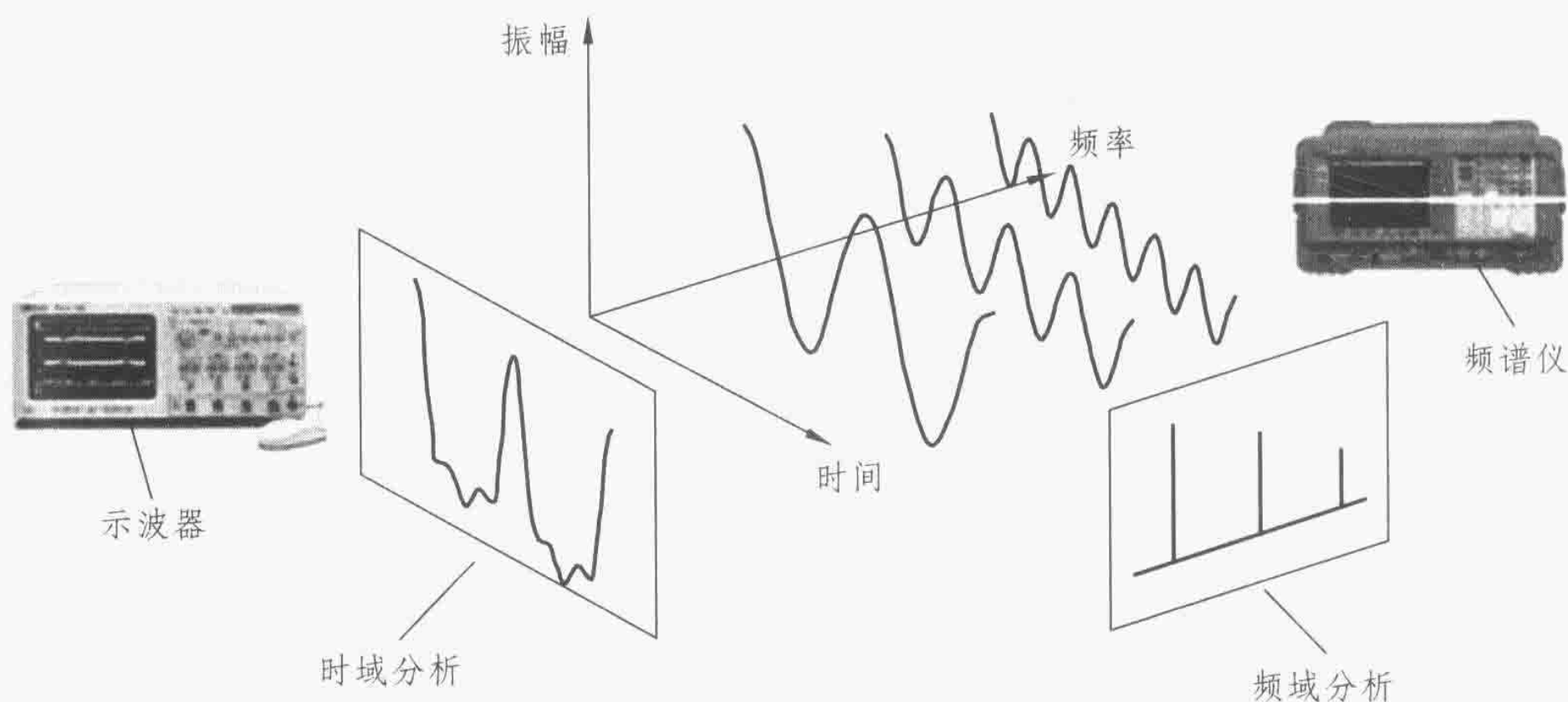
在雷达、通信及常规微波技术中,人们习惯使用另一种波段划分方法,如表 1.3 所示。

表 1.3 某些波段的划分及其代号

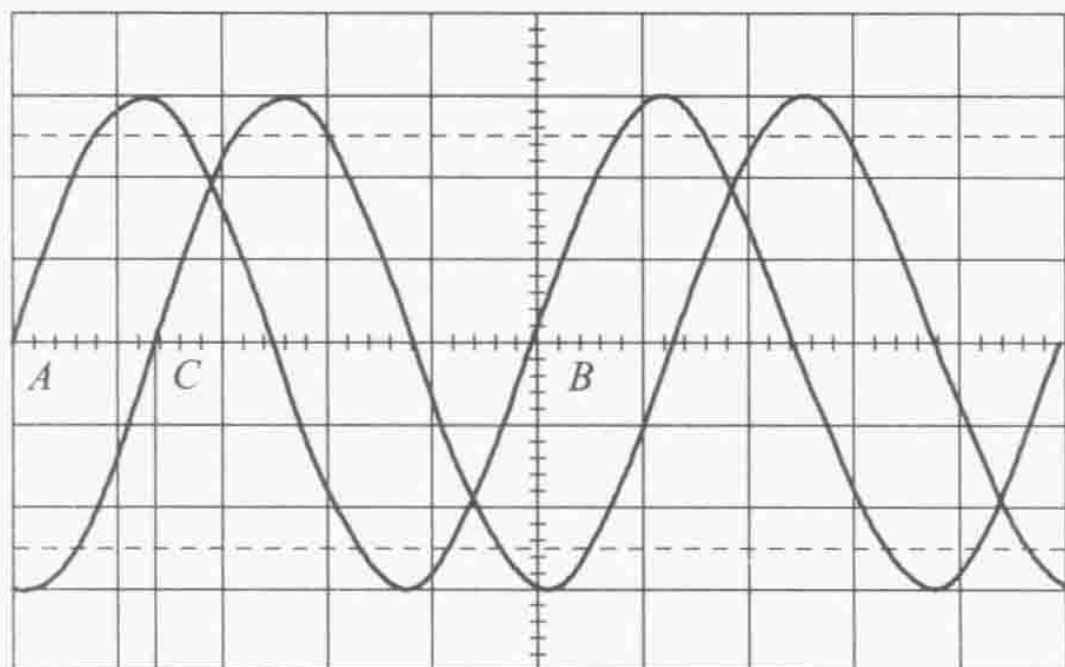
波段名称	频率范围/GHz	标称波长/cm	波长范围/cm
S 波段	2 ~ 4	10	15 ~ 7.5
C 波段	4 ~ 8	5	7.5 ~ 3.75
X 波段	8 ~ 12	3	3.75 ~ 2.5
Ku 波段	12 ~ 18	2	2.5 ~ 1.67
K 波段	18 ~ 27	1.3	1.67 ~ 1.11
Ka 波段	27 ~ 40	8	1.11 ~ 0.75
U 波段	40 ~ 60	6	0.75 ~ 0.5
F 波段	80 ~ 100	3	0.375 ~ 0.3

三、时域与频域分析

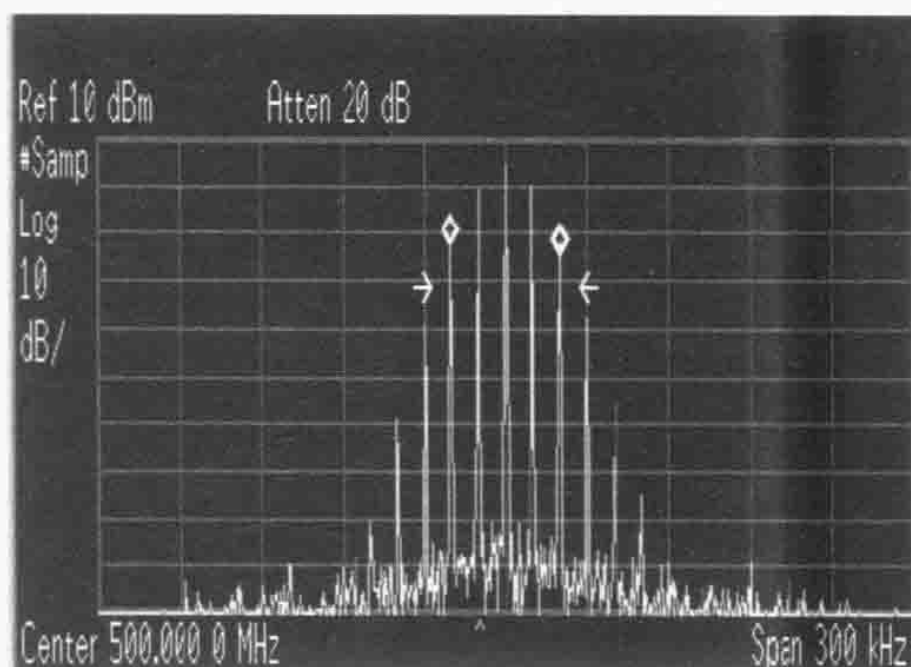
在电子测量技术中，电路中的电压、电流、功率随时间变化的情况，需要借助测量仪器来观测。只有通过测试才能发现信号通过电路后放大、衰减或畸变的现象，这个过程称为时域分析。时域的自变量是时间，若用坐标图表示，则横轴表示时间，纵轴表示信号的变化情况，如图 1.1 (b) 所示。频域分析是对包含频率分量多的复杂信号进行分析，或考察特定网络在不同频率正激励信号作用下所产生的响应特性。频域的自变量是频率，若用坐标图表示，则横轴代表频率，纵轴代表该频率信号的幅度，整体描述的是信号频率结构与该频率信号幅度的关系，即通常所说的频谱图，如图 1.1 (c) 所示。对于一个信号，可以进行时域分析，也可以进行频域分析，要视其具体情况而定，两者相辅相成、互为补充。



(a) 时域与频域立体图



(b) 示波器上显示的正弦波



(c) 频谱仪上显示的频谱图

图 1.1 时域与频域

四、无源器件射频特性分析

所谓无源器件，就是无须能源即可工作的器件，主要用来进行信号传输。电子系统中的无源器件可以按照其所担当的电路功能分为电路类器件、连接类器件，比如：电容、电感、电阻、耦合器、功分器、环行器、隔离器、衰减器等属于电路类器件，连接器、插座、连接电缆、印制电路板等属于连接类器件。

电阻类、电感类和电容类器件是最主要的无源器件。它们的共同特点是在电路中无须加电源即可在有信号时工作。在低频电路中，它们表现出自身应有的特性，而在射频电路中，它们所表现出的不是“纯”电阻、电容或电感的性质，这是在射频电路设计与分析过程中必须考虑的。

1. 电阻（器）的射频特性

电阻器是在电路中起阻流作用的元器件。其主要用途是降压、分压或分流，还在一些特殊电路中用作负载、反馈、耦合、隔离等。

电阻器在射频段工作时不仅具有阻值，还会有引线电感和线间寄生电容，其性质将不再是纯电阻，而是“阻”与“抗”兼有。其具体等效电路如图 1.2 所示。图中， C_a 表示电阻引脚的极板间等效电容， C_b 表示引线间电容， L 表示引线电感。

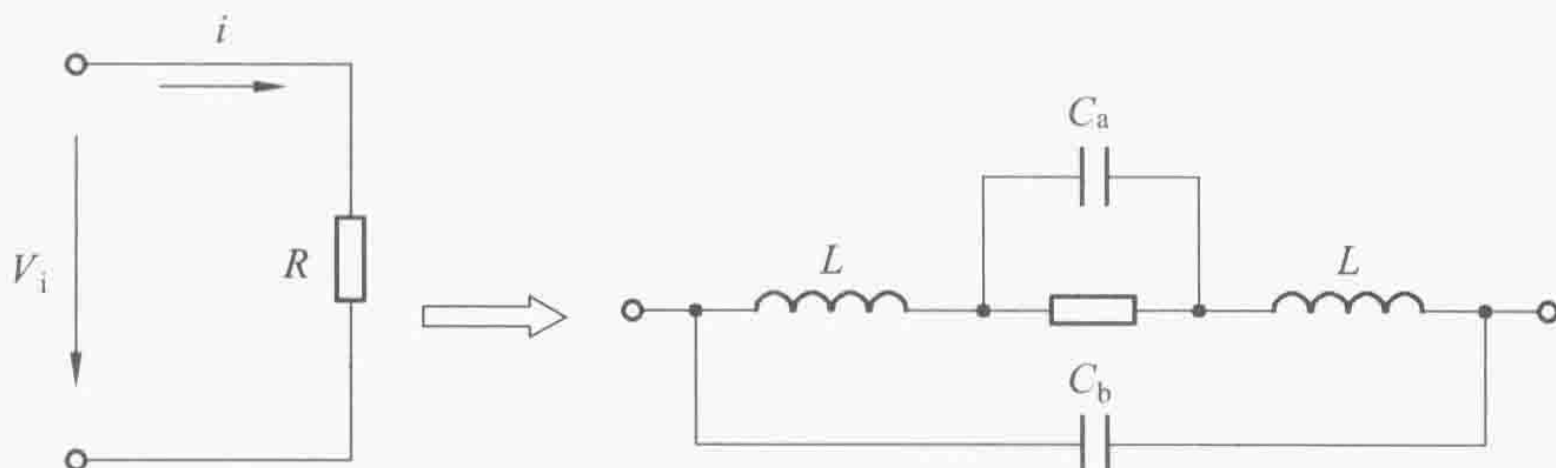


图 1.2 电阻在射频段的等效电路

图 1.3 所示为一个金属膜电阻的阻抗绝对值与频率的关系。可以看出，随着频率的升高，电阻阻抗下降，其原因为寄生电容的影响。随着频率进一步升高，电阻的总阻抗上升，其原因为引线电感的影响。在频率很高时，引线电感会成为一个无限大的阻抗甚至开路。因此，在射频/微波段应用电阻时要特别注意。目前，在射频电路中主要应用的是薄膜片状电阻，其

尺寸能够做得非常小，可以有效减少引线电感和分布电容的影响。

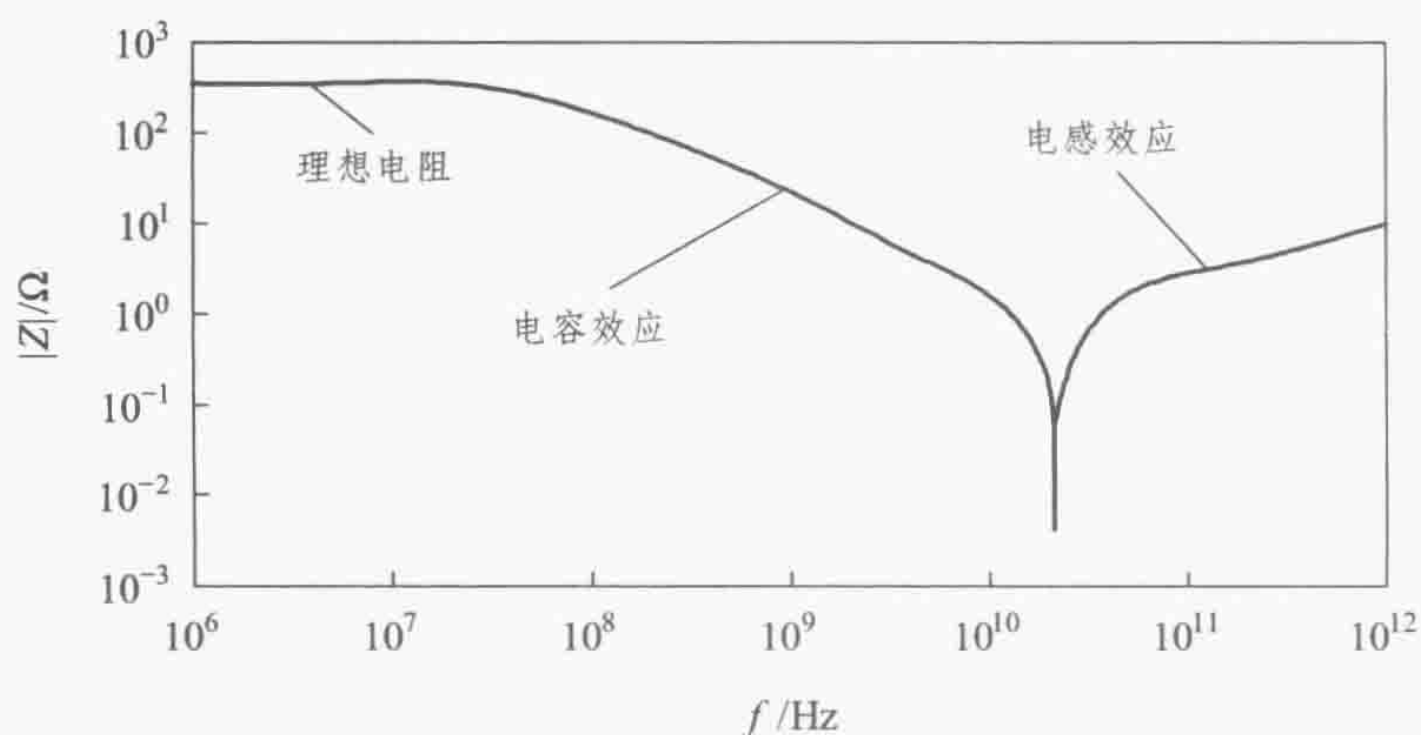


图 1.3 电阻阻抗的绝对值与频率的关系

2. 电容（器）的射频特性

电容器在电路中是一种存储电能的器件，其作用是阻止直流通过，而允许交流通过。交流频率越高，通过能力越强。因此，电容器在电路中常用作耦合、旁路滤波、反馈、定时及振荡等。电容器在电路中所表现的特性是非线性的，其对电流的阻抗称为容抗。在低频段时，电容器一般看成是平行板结构，其极板的尺寸要远大于极板间距。在射频段，要考虑引线电感 L 以及引线导体损耗的串联电阻 R_s 和介质损耗电阻 R_e 。其等效电路如图 1.4 所示。

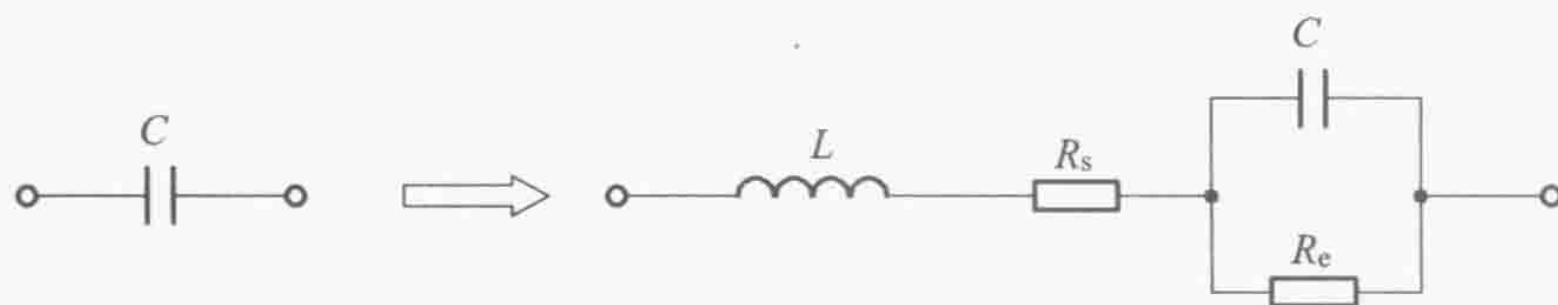


图 1.4 电容在射频的等效电路

图 1.5 所示为电容阻抗的绝对值与频率的关系。可以看出，在一定频段内随着频率的升高，电容的容抗不但不减小，反而增大。目前，多层陶瓷片状电容器在射频电路中被广泛使用，它们可用于射频电路的各个部分，使用频率可以高达 15 GHz。

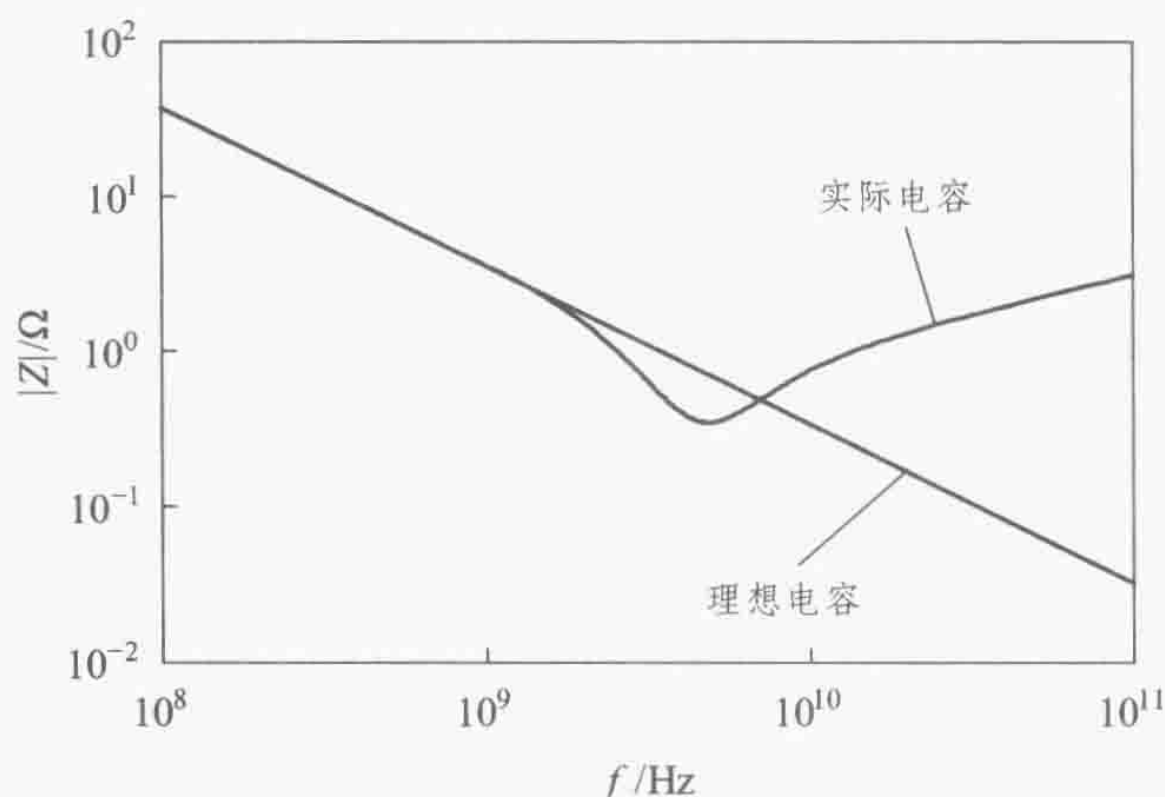


图 1.5 电容阻抗的绝对值与频率的关系

3. 电感（器）的射频特性

电感器与电容器一样，也是一种储能器件。当线圈两端加上交流电压时，在线圈中会产生感应电动势，阻碍通过线圈的电流发生变化，这种阻碍作用称作感抗，它与电感量和信号的频率成正比。电感器对直流电不起阻碍作用（不计线圈的直流电阻）。所以，电感在电子线路中的基本作用是：通直流、阻交流，以及与电容配合用作调谐、振荡、滤波、陷波、选频等。电感器在射频段的等效电路如图 1.6 所示，其中 C_s 为等效分布电容， R_s 为等效电感线圈电阻。

图 1.7 所示为电感阻抗的绝对值与频率的关系。可以看出，当频率升高到某一值时，电感与分布电容产生了并联谐振，使阻抗迅速增加，达到最大值，此后感抗随频率的升高迅速降低。目前，片式电感也在射频电路中被广泛使用。

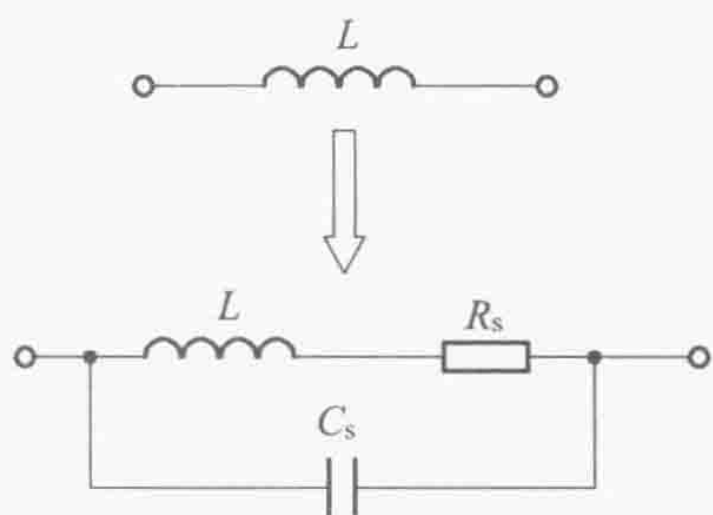


图 1.6 电感在射频段的等效电路

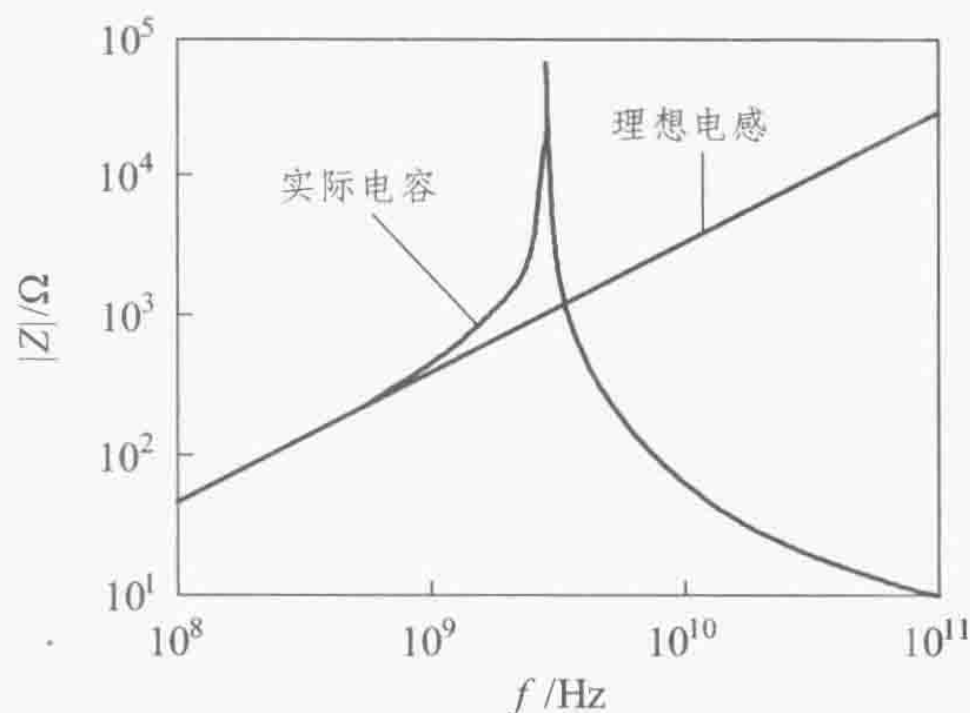


图 1.7 电感阻抗的绝对值与频率的关系

五、有源晶体管简介

随着硅基和砷化镓基化合物半导体的发展，以及大量双极型、场效应晶体管的出现，射频电路设计师根据所设计电路的应用领域及有源晶体管的规格要求可选择的射频晶体管比以往任何时期都多。本节将介绍射频/微波晶体管分类、特性、结构、应用等。

1. 结型晶体管

1) 双极型晶体管 (BJT)

双极型晶体管又称为半导体三极管，它是通过一定的工艺将两个 PN 结结合在一起的器件。就射频应用而言，在超高频至 S 波段的频率范围内，双极型晶体管占统治地位。由于技术的发展，这类晶体管的工作频率上限正在继续增高。目前，先进的双极型晶体管可在高至 22 GHz 频率处产生有效功率，并且可工作在 Ka 波段。砷化镓双极型晶体管由于其在工作频率、高温工作特性和抗辐射性能等方面的改善，获得了很好的应用前景。其特点为廉价、耐用、可集成、增益比场效应管高、 $1/f$ 噪声特性比砷化镓场效应晶体管低 10 ~ 20 dB。

双极型晶体管的外部共引出三个极：集电极、发射极和基极。其放大作用主要依靠发射极电流通过基区传输到达集电区而实现。为了保证这一传输过程，一方面要满足内部条件，即要求发射区杂质浓度远大于基区杂质浓度，同时基区厚度要很小；另一方面要满足外部条件，即发射结要正向偏置（加正向电压），集电结要反偏置。

双极型晶体管的工作区：