

THE ANALYSIS AND DESIGN OF RF CIRCUIT

逯贵祯 等编著

射频电路的 分析和设计

北京广播学院出版社

射频电路的 分析和设计

逯贵祯 夏治平 徐衍艳 编著
张 莉 辛双百 关 健

北 京 广 播 学 院 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

射频电路的分析和设计/逯贵楨等著. - 北京: 北京广播学院出版社, 2003.5

ISBN 7-81085-154-3

I. 射… II. 逯… III. ①射频电路-电路分析 ②射频电路-电路设计 IV. TN710.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 031069 号

射频电路的分析和设计

编 著: 逯贵楨 夏治平 徐衍艳 张 莉 辛双百 关 健

责任编辑: 龙学锋

封面设计: 曹 春

出版发行: 北京广播学院出版社

北京市朝阳区定福庄东街1号 邮编: 100024

电话: 010-65738557 65738538 传真: 010-65779405

网 址: <http://www.cbbip.edu.cn>

经 销: 新华书店总店北京发行所

印 刷: 北京密云胶印厂

开 本: 787×1092 毫米 1/16

印 张: 16.5

版 次: 2003 年 6 月第 1 版 2003 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 7-81085-154-3/N·65

定价: 30.00 元

版权所有 翻印必究 印装错误 负责调换

前 言

本书是在参考了国外教材《射频电路设计》、Besser 先生在上海举办的“射频电路设计讲座”的部分内容以及国内部分有关教材的基础上进行改编的。

本书反映了国外在射频技术教学方面的较新内容。首先，书中介绍了射频电路理论基础，讨论了射频电路分析方法。其次，书中介绍了射频电路中无源器件的基本性质及其应用，有源器件的基本性质和应用。在讨论了射频技术中基本元器件之后，书中讨论了常用的射频电路及其应用。最后书中讨论了无线接收机的射频电路。

本书可以作为电磁场与微波技术专业的本科生用教材或教学参考书。学习本书最好具有电子线路、微波技术基础的知识。本书是由逯贵祯、夏治平、徐衍艳、张莉、辛双百、关健共同编写的。最后由逯贵祯进行统一编排。

书中不妥之处，望批评指正。最后对北京广播学院领导的支持和帮助表示感谢。

编者

目 录

第一章 射频电路基础	(1)
1.1 电磁频谱	(1)
1.2 波长的定义	(2)
1.3 功率单位的换算	(3)
1.4 基本电路中电压与电流关系	(4)
1.5 Q 因子的定义	(6)
1.6 归一化参数	(6)
1.7 RF 元件复阻抗的串联表示形式	(6)
1.8 RF 元件复导纳的并联表示形式	(7)
1.9 射频串联 LC 和并联 LC 谐振电路的阻抗特性	(8)
1.10 集总参数与传输线特性.....	(9)
1.11 史密斯圆图.....	(13)
1.12 RF 电路的阻抗匹配	(30)
1.13 散射矩阵.....	(32)
第二章 射频电路元件	(33)
2.1 电感器	(33)
2.2 电容器	(41)
2.3 LC 谐振电路	(46)
2.4 RF 电路中的可变电容	(57)
2.5 电感线圈的设计与制作	(64)
2.6 PIN 二极管及其应用	(72)
2.7 UHF 和微波二极管、晶体管及集成电路.....	(80)
第三章 信号发生器与振荡器	(112)
3.1 振荡电路的类型	(112)
3.2 1—20MHz 频率范围的晶体振荡器	(113)
3.3 HF/VHF 缓冲放大器	(115)
3.4 455kHz 的 AM 中频放大器与测试、定位调整振荡器	(116)
3.5 调幅波与短波波段的信号发生器	(117)
3.6 微波晶体管振荡器	(121)
第四章 滤波电路	(125)
4.1 低通、高通、带通和带阻滤波器	(125)
4.2 滤波器应用	(126)
4.3 滤波器构造	(128)
4.4 滤波器设计方法	(128)

4.5	低通滤波器	(129)
4.6	高通滤波器	(131)
4.7	带通滤波器	(132)
4.8	带阻滤波器	(135)
4.9	其它带通滤波器	(138)
4.10	抗电磁干扰的滤波电路	(139)
第五章	放大电路与预选电路	(150)
5.1	预选器电路	(151)
5.2	RF 预放大器	(156)
5.3	IF 放大器	(165)
5.4	微波晶体管放大器	(176)
第六章	耦合器和混合器	(179)
6.1	射频定向耦合器	(179)
6.2	射频混合器与分配器	(182)
6.3	微波混合分配器	(187)
第七章	检波器与解调电路	(194)
7.1	AM 包络检波器	(194)
7.2	噪声	(198)
7.3	平衡解调器	(199)
7.4	同步 AM 解调	(200)
7.5	双边带 (DSBSC) 和单边带 (SSBSC) 抑制载波解调器	(200)
7.6	FM 和 PM 解调电路	(206)
7.7	鉴相器电路	(207)
7.8	比例检波器电路	(209)
7.9	脉冲计数检波器	(210)
7.10	锁相环 FM/PM 检波器	(211)
7.11	正交检波器	(212)
第八章	无线接收机	(213)
8.1	调谐电路	(214)
8.2	射频调谐 (TRF) 接收机	(217)
8.3	超外差接收机	(218)
8.4	接收机电路设计	(228)
8.5	直接下变频收音机	(240)

第一章 射频电路基础

在电子技术领域,射频电路的特性不同于普通的低频电路。主要原因是在高频条件下,电路的特性与低频条件下不同,因此需要利用射频电路理论去理解射频电路的工作原理。在高频条件下,杂散电容和杂散电感对电路的影响很大。杂散电感存在于导线连接以及组件本身存在的内部自感。杂散电容存在于电路的导体之间以及组件和地之间。在低频电路中,这些杂散参数对电路的性能影响很小,随着频率的增加,杂散参数的影响越来越大。在早期的 VHF 频段电视接收机中的高频头,以及通信接收机的前端电路中,杂散电容的影响都非常大以至于不再需要另外添加电容。

此外,在射频条件下电路存在趋肤效应。与直流不同的是,在直流条件下电流在整个导体中流动,而在高频条件下电流在导体表面流动。其结果是,高频的交流电阻要大于直流电阻。

在高频电路中的另一个问题是电磁辐射效应。随着频率的增加,当波长可与电路尺寸相比拟时,电路会变为一个辐射体。这时,在电路之间、电路和外部环境之间会产生各种耦合效应,因而引出许多干扰问题。这些问题在低频条件下往往是无关紧要的。

1.1 电磁频谱

在现代无线通信中,大部分无线通信是在 500kHz 至 12GHz 的频率范围。通常为了方便起见,将频谱分为几个频带。射频范围是指从 10MHz 到 1GHz 的频率。从 1GHz 到 30GHz 人们习惯称之为微波频率。在 30GHz 的频率,自由空间的波长约 1cm。称 30GHz 以上的频率为毫米波。图 1-1 给出频率划分的表示。

在实际中,人们还经常用符号表示表示电磁频谱的某一个频段,常用的表示符号有:

ELF 表示极低频率范围,在这个范围的频率包括 25—10kHz 的电磁波;

VLF 表示较低频率范围,电磁波的频率从 10—100kHz;

LF 表示低频电磁波,电磁波的频率从 100—1000kHz;

MF 表示中等频率,电磁波的频率从 1—3MHz,通常的调幅广播就在 LF 和 MF 范围(540—1630kHz);

HF 表示高频,电磁波的频率从 3—30MHz,高频电磁波也称为短波;

VHF 表示非常高频率,电磁波的频率从 30—300MHz,在这个频率范围包括了调频广播,广播电视;

SHF 表示超高频,电磁波的频率从 300—900MHz;

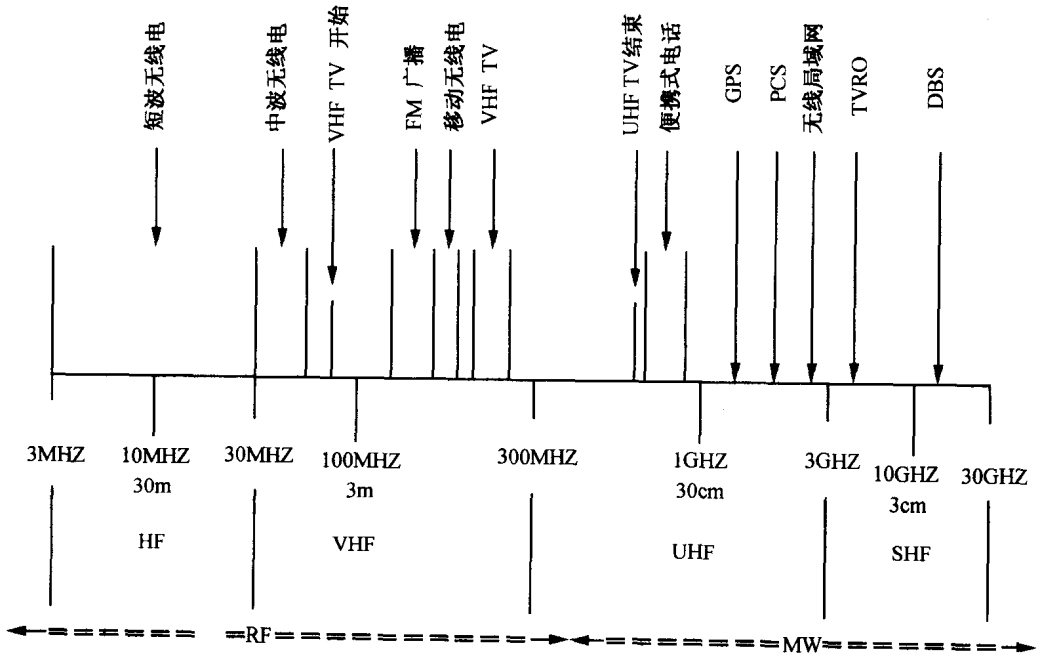


图 1-1 无线电的频谱

1.2 波长的定义

对于频率为 f 的正弦波，当在自由空间传播的时候，波长定义为：

$$\lambda = \lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{30 \text{ (cm)}}{f \text{ (GHz)}} \quad (1-1)$$

公式中的 c 是真空中光速，数值为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

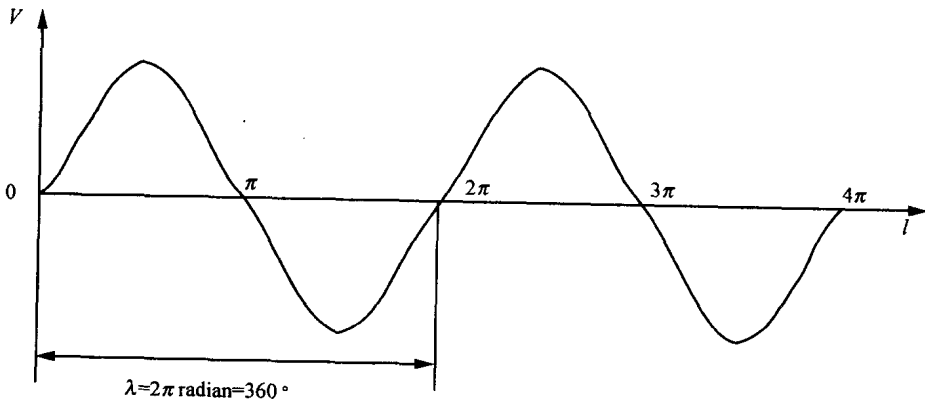


图 1-2 波长

当电磁波入射到非磁性的、各向均匀的介质中时，传播速度相对于真空需要乘以因子

$\frac{1}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}$ 。相应地波长可以表示为：

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \tag{1-2}$$

因此，在介质中，波长比真空中的波长要短。

1.3 功率单位的换算

在发射端，信号电平的功率可以达到几千瓦的数量级 (10^3W)，而在接收端信号电平可能只有几个 μW (10^{-12}W)。为了有效地表示功率电平的大小，最好的方法就是用 dB 来作为功率的单位。它的定义是信号功率与参考功率比值的对数，即

$$\text{dB} = 20\log\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = 10\log\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \tag{1-3}$$

上式中， P_1 、 P_2 、 V_1 、 V_2 是进行比较的功率和电压。

反之，如果给出 dB，可以利用指数求出比值：

$$\frac{V_2}{V_1} = 10^{\frac{\text{dB}}{20}}, \quad \frac{P_2}{P_1} = 10^{\frac{\text{dB}}{10}} \tag{1-4}$$

常用功率、电压比值与 dB 值的换算表 表 1

电 压			功 率	
电压比值	电压指数	分 贝	功率比值	功率指数
1.0	10^0	0	1	10^0
1.41	$10^{0.15}$	3	2	$10^{0.30}$
1.73	$10^{0.24}$	4.77	3	$10^{0.477}$
2.0	$10^{0.30}$	6	4	$10^{0.60}$
3.16	$10^{0.50}$	10	10	10^1
7.07	$10^{0.85}$	17	50	$10^{1.7}$
10.0	10^1	20	100	10^2
0.707	$10^{-0.85}$	-3	0.5	$10^{-0.3}$
0.5	$10^{-0.30}$	-6	0.25	$10^{-0.60}$
0.316	$10^{-0.5}$	-10	0.1	10^{-1}
0.1	10^{-1}	-20	0.01	10^{-2}

dB 表示两个功率的比值。在实际中，经常采用 dBm 和 dBW 表示功率的绝对单位。如果以 1mW 作为参考功率，则 0dBm 表示 1mW 的功率。如果以 1W 作为参考功率，则 0dBW 表示 1W 的功率。对于任意电平值的功率，可以用以下公式计算：

$$\text{dBm} = 10\log(P_{\text{mw}}) \quad \text{dBW} = 10\log(P_{\text{w}}) \tag{1-5}$$

从以上 dBm 或 dBW 的数值可以得到实际的功率值：

$$P_{\text{mW}} = 10^{\frac{\text{dBm}}{10}}, P_{\text{W}} = 10^{\frac{\text{dBW}}{10}} \quad (1-6)$$

绝对功率 dB 值

表 2

绝对功率	dBm	dBW
1nW	-60	-90
10nW	-50	-80
0.1μW	-40	-70
1μW	-30	-60
10μW	-20	-50
0.1mW	-10	-40
1mW	0	-30
10mW	10	-20
0.1W	20	-10
1W	30	0
10W	40	10
0.1kW	50	20
1kW	60	30

功率单位的改变规律是功率值改变 1000 倍时，相应地有一个新的单位。例如： $\mu\text{W} \rightarrow \text{nW} \rightarrow \mu\text{W} \rightarrow \text{mW} \rightarrow \text{W} \rightarrow \text{kW} \rightarrow \text{MW}$ ，每当功率改变一个单位时，相邻的功率变化是 30dB。

在有些情况，人们愿意使用电压单位衡量信号的功率，因为功率与电压之间存在关系 $P = \frac{V^2}{R}$ 。所以，在用 dBV、dBmV 等电压单位说明功率时，应当指明相应的电阻值。例如“0dBmV/75Ω”表示在 75Ω 电阻两端的电压是 1mV；“20dBμV/50Ω”表示在 50Ω 电阻两端的电压是 10μV。

1.4 基本电路中电压与电流关系

在理想电阻的情况下，电流和电压之间的相位是相同的；在理想电感的情况下，电流和电压之间的相位相差 90 度，电压相位超前电流的相位；在理想电容的情况下，电流和电压之间的相位相差 90 度，电流相位超前电压的相位。这些元件在电路中的这种性质可以利用元件的阻抗来描述。一个元件的阻抗定义了元件两端的电压与通过元件电流之间的关系。

电阻的阻抗：

$$Z_R = R + j0 = \frac{v}{i} \quad (1-7a)$$

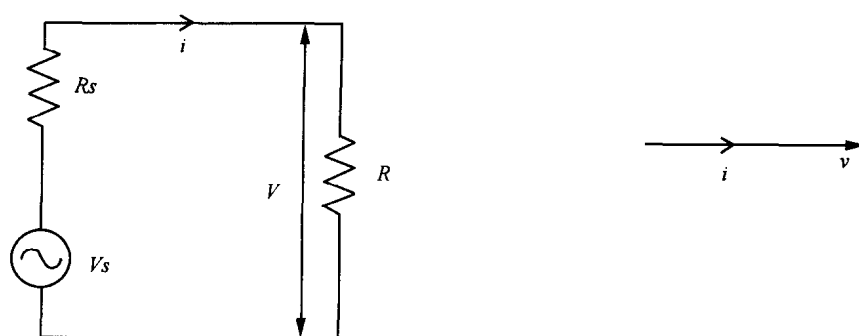


图 1-3 (a) 理想电阻的电压和电流关系

电感的阻抗:

$$Z_R = 0 + jX_L = \frac{v}{i} \quad (1-7b)$$

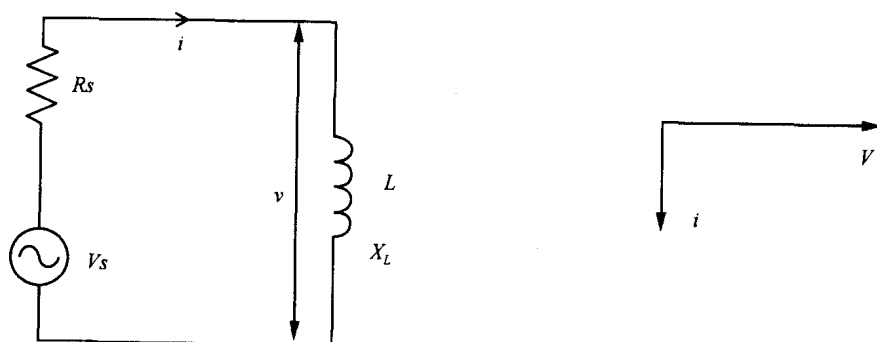


图 1-3 (b) 理想电感的电压和电流关系

电容的阻抗:

$$Z_R = 0 - jX_C = \frac{v}{i} \quad (1-7c)$$

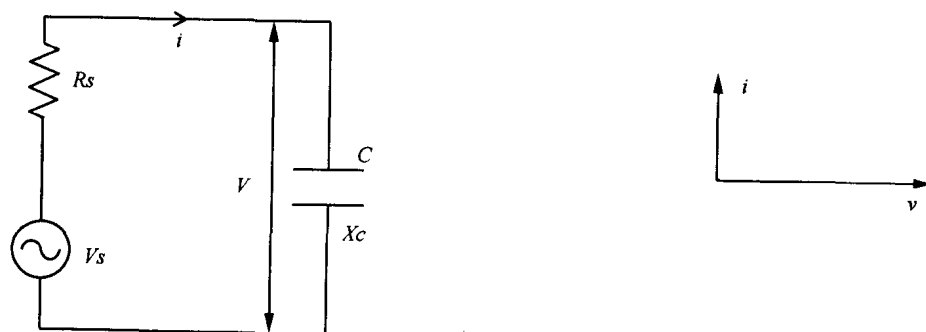


图 1-3 (c) 理想电容的电压和电流关系

一般地讲, 阻抗是电压与电流的函数, 它是一个复数, 具有实部和虚部。元件的阻抗表明了元件通过电流的难易程度。

1.5 Q 因子的定义

对于一个电抗元件, 它具有储存能量的性质。为了描述电抗元件的能量储存性质, 人们定义了 Q 因子。Q 因子定义为: 元件内储存的能量和元件内损耗能量之比。即

$$Q = \frac{\text{储能}}{\text{耗能}} \quad (1-8)$$

对于理想电感和电容器, 它们的能量损耗为零, 因此它们的 Q 因子是无穷大。

当元件放在电路中的时候, 这时“加载”元件的 Q 因子定义为: 元件内储存的能量与相关电路以及元件内损耗能量和之比。即

$$Q = \frac{\text{元件储能}}{\text{元件耗能} + \text{相关电路耗能}} \quad (1-9)$$

Q 因子与信号的工作频率有关, “加载”电路元件的 Q 因子可以用来控制电路的信号带宽。

1.6 归一化参数

在分析射频电路的时候, 对阻抗数值进行归一化常常可以简化分析过程。电路参数的归一化是通过除以一个参考数值得到的。对于阻抗而言, 一般地是除以系统的阻抗。下面考虑几个例子。

例: 阻抗 150 欧姆, 参考阻抗 50 欧姆, 求归一化阻抗。

$$z_L = \frac{Z_L}{Z_0} = \frac{150}{50} = 3$$

例: 频率 500MHz, 参考频率 100MHz, 求归一化频率。

$$f_x = \frac{F_x}{F_0} = \frac{500}{100} = 5$$

在实际计算和设计中, 为了得到最后需要的结果, 往往要进行去归一化, 去归一化过程就是用归一化的数值乘以参考值。

例: 归一化的阻抗是 $z_L = 2 + j1$, 参考阻抗是 50 欧姆, 求去归一化的实际阻抗。

$$Z_L = z_L \times 50 = 100 + j50 \quad \text{欧姆}$$

归一化的应用包括史密斯图、S 参数、滤波器设计等等。

1.7 RF 元件复阻抗的串联表示形式

对于有耗情况下的电感或电容, 它们的阻抗是一个复数。这个复数可以表示为电阻和电抗的串联。

对于电感器, 感抗是

$$X_S = X_L = 2\pi f_{Hz} L_H \quad (1-10a)$$

对于电容器, 容抗是

$$X_s = X_c = \frac{1}{2\pi f_{Hz} C_F} \quad (1-10b)$$

非理想情况下的复阻抗为：

$$Z_s = R_s \pm jX_s \quad (1-11)$$

上式中的“+”号表示感抗，“-”号表示容抗。

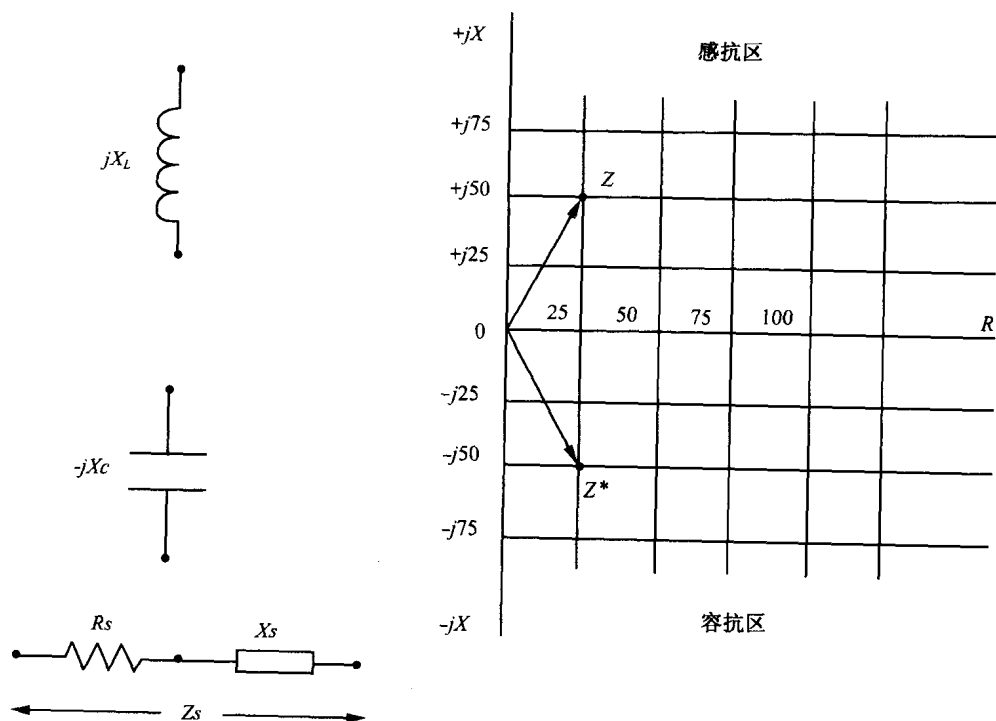


图 1-4 复阻抗的串联表示形式

利用阻抗的表达式，Q 因子可以表示为：

$$Q = \frac{X_s}{R_s} \quad (1-12)$$

复阻抗包括实部电阻和虚部电抗。串联形式的复阻抗适于用在串联电路中，这时各个元件的总阻抗是每个元件的实部之和与虚部之和。

为了对于电抗有一个感性的认识，最好的办法是记住 1nH 电感和 1pF 电容在 1GHz 频率的电抗值。它们分别是：感抗 6.28 欧姆、容抗 159 欧姆。记住以上数值，可以很快地换算出在其它频率时电感、电容的电抗值。

1.8 RF 元件复导纳的并联表示形式

非理想电感和电容两端的阻抗除了可以表示为以上串联形式的复阻抗以外，它还可以表示为并联形式的复导纳。

对于电容器，电纳的表示式为：

$$B_p = B_C = 2\pi f_{Hz} C_F \quad (1-13a)$$

对于电感器，电纳的表示式为：

$$B_p = B_L = \frac{1}{2\pi f_{Hz} L_H} \quad (1-13b)$$

非理想情况下的复导纳是：

$$Y_p = G_p \pm jB_p \quad (1-14)$$

上式中的正号对应于电容，负号对应于电感。

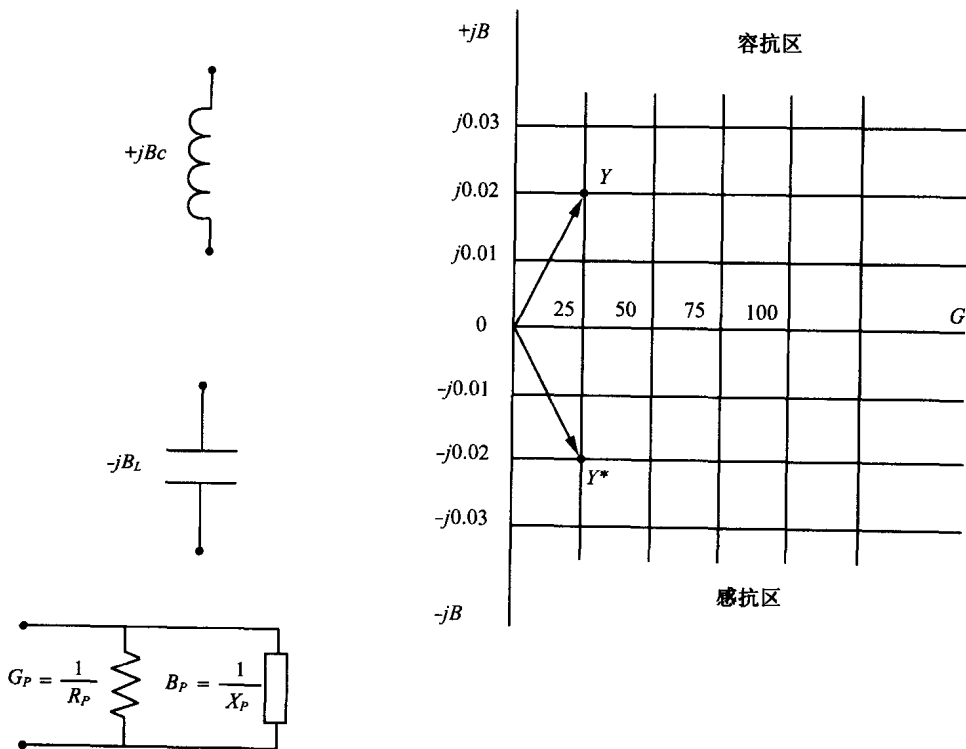


图 1-5 复导纳的并联表示形式

相应的 Q 因子是：

$$Q = \frac{B_p}{G_p} \quad (1-15)$$

复导纳包括一个实部电导和虚部电纳。复导纳的并联形式适用于电路中元件是并联的形式。在元件并联的情况下，各个元件的总的导纳是各个元件实部电导之和与虚部电纳之和。

1.9 射频串联 LC 和并联 LC 谐振电路的阻抗特性

在 LC 的串联或并联谐振电路，当电路处于谐振频率时，感抗和容抗具有同样大小的数值，这时串联谐振电路具有 0 阻抗，即

$$jX_T = jX_L - jX_C = 0 \quad (1-16)$$

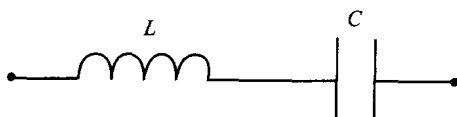


图 1-6 (a) 串联谐振电路

并联谐振电路具有无穷大的阻抗,

$$jX_T = \frac{(jX_L)(-jX_C)}{jX_L - jX_C} = \infty \quad (1-17)$$

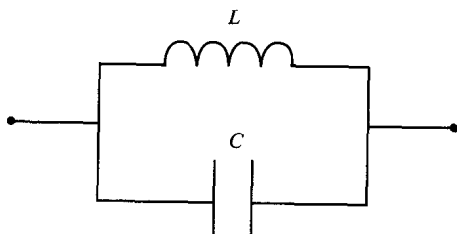


图 1-6 (b) 并联谐振电路

谐振电路的谐振频率是:

$$f_{r, \text{GHz}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1000}{L_{\text{nH}} C_{\text{pF}}}} \quad (1-18)$$

1.10 集总参数与传输线特性

当电容器是由两个平行金属板构成的时候, 金属板的尺寸与实际波长的比值直接影响元件的射频性能。

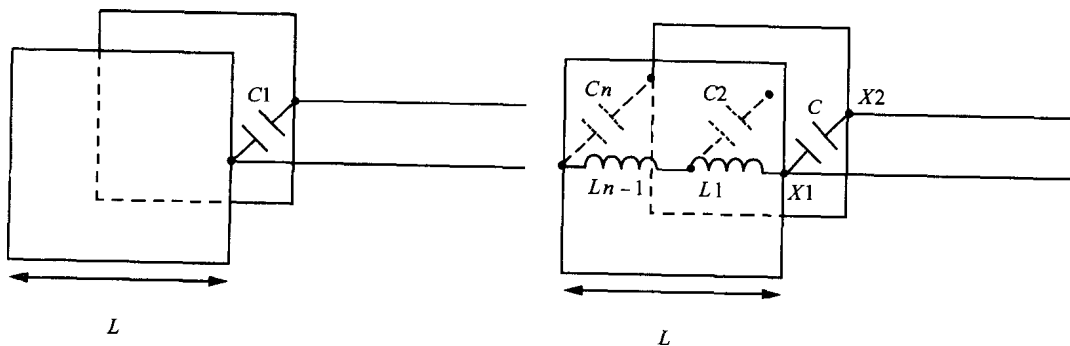


图 1-7 传输线与集总元件

例如,如果元件的尺寸远小于工作波长,平行金属板电容器可以认为是一个集总元件;若元件的尺寸大于 0.05 个工作波长,平行金属板电容器必须用分布参数处理。

导体和元器件的尺寸相对于工作波长的比值关系决定了采用分析电路的方法。通常,在元件的尺寸远小于工作波长的情况,可以用低频电路的基尔霍夫方程分析电路的工作情况;当元件尺寸可以波长相比较的时候,需要采用传输线的方法处理电路的工作情况。

1. RF 传输线

传输线是用来传输电磁能量和信息各种形式传输系统的总称。传输线的种类很多,若按被传输线引导的电磁波的特征分类,可以分为两类:1) TEM 传输线,例如平行双导线、同轴线、带状线;2) 波导传输线,例如矩形波导、圆形波导。常见的 RF 传输线如下图所示:

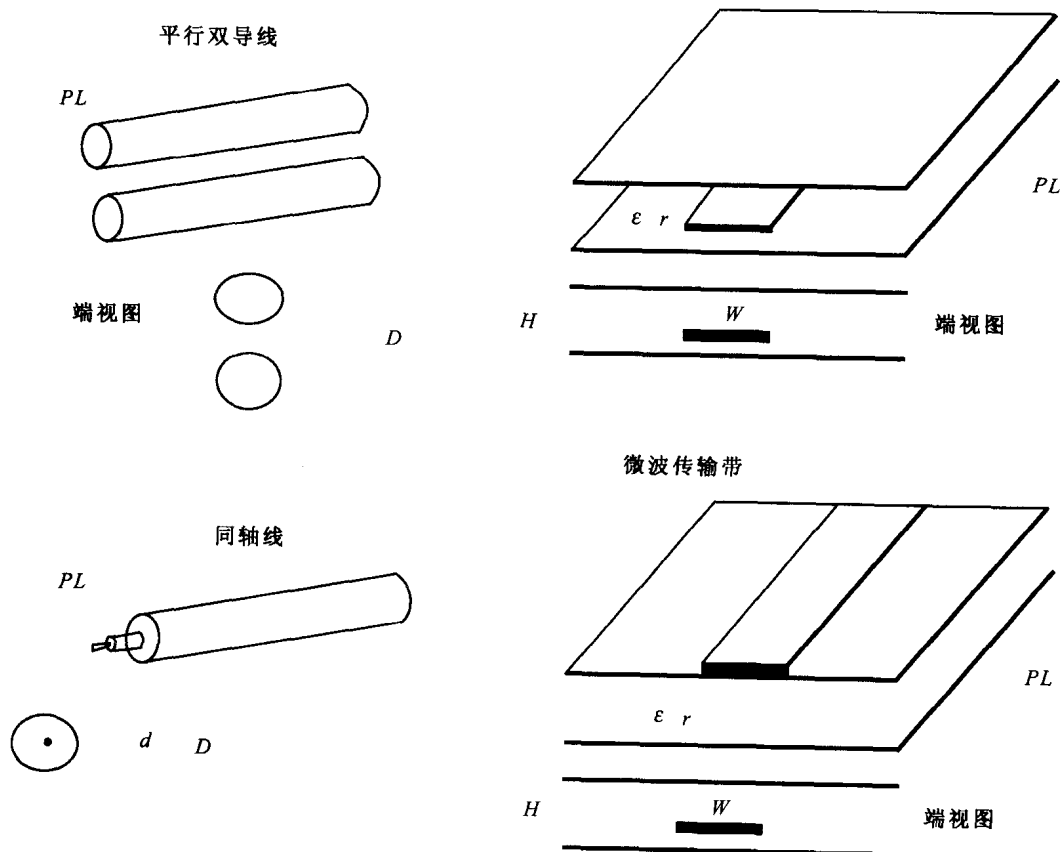


图 1-8 常用射频传输线

2. 传输线特性阻抗

均匀传输线的特性阻抗是一个复数。传输线的特性阻抗定义为:微分传输线串联阻抗与并联导纳之比。对于一个微分传输线,相应的复数阻抗为:

$$Z_{TL} = \sqrt{\frac{Z_s}{Y_p}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \frac{v_T}{i_T} \quad (1-19)$$

上式中的 R 、 G 分别表示传输线的损耗， L 、 C 表示传输线的分布电感和分布电容。对于无耗传输线， $R=0$ ， $G=0$ 。因此

$$Z_{TL} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1-20)$$

特性阻抗是信号通过传输线时所“感受”到的一种特性，它是瞬时电压和瞬时电流之间的比值。在一个高阻抗的传输线中，分布电感在阻抗中起着主要作用；在低阻抗传输线中，电容项起主要的作用。

3. 传输线的电长度

传输线的电长度定义为：传输线的实际长度与工作波长的比值。它的计算公式为：

$$E = \frac{l}{\lambda} 360^\circ = \beta l = \frac{360^\circ f_{\text{GHz}} \sqrt{\epsilon_r} l_{\text{cm}}}{30 \text{cm}} = 12 f_{\text{GHz}} l_{\text{cm}} \sqrt{\epsilon_r} \quad (1-21)$$

公式中 β 是相位常数， l 是传输线的实际长度。

例：15 厘米的同轴传输线，中介质的相对介电常数是 4，求 2GHz 的电长度。

$$E = \frac{360^\circ (2) \sqrt{4} (15)}{30} = 720^\circ$$

因此 15 厘米的同轴传输线的电长度是 720 度，或者 2 个波长。

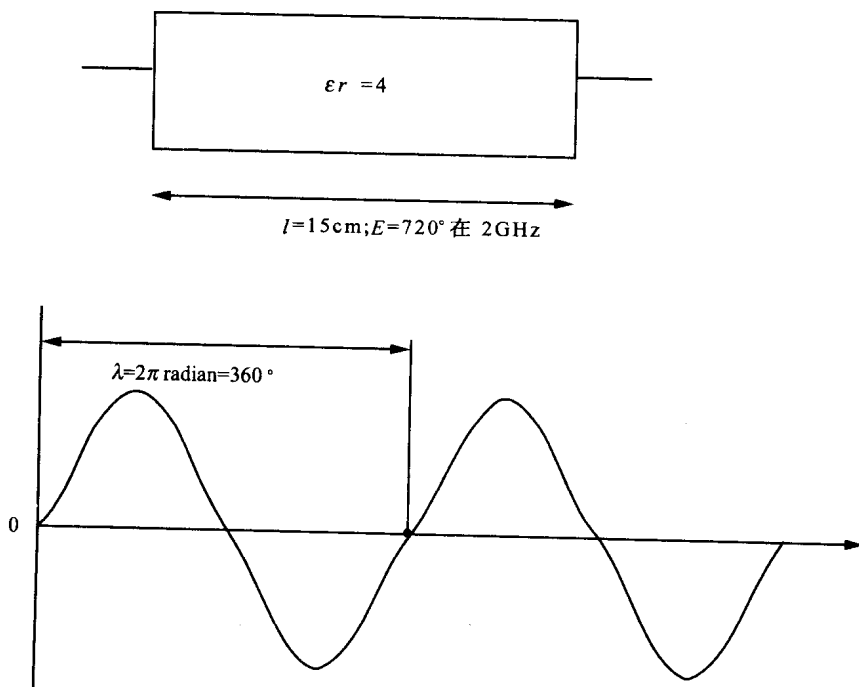


图 1-9 传输线的电长度