

微波通信专业

学位综合实验

主 编◎徐 军

副主编◎杨宏春 洪劲松 肖绍球



电子科技大学出版社

WEIBO
TONGXIN ZHUANYE

微波通信专业

学位综合实验

主 编◎徐 军

副主编◎杨宏春 洪劲松 肖绍球

编 委◎杨雪松 杨啸林 赵德双 张小川 李桂萍
喻梦霞 朱昭君 谈亚芳 卜婷婷



电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

微波通信专业学位综合实验 / 徐军主编. —成都:

电子科技大学出版社, 2014. 1

ISBN 978-7-5647-1878-7

I. ①微… II. ①徐… III. ①微波通信—实验—高等学校—教学参考资料 IV. ①TN925

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 208861 号

微波通信专业学位综合实验

主 编 徐 军

副主编 杨宏春 洪劲松 肖绍球

编 委 杨雪松 杨啸林 赵德双 张小川 李桂萍

喻梦霞 朱昭君 谈亚芳 卜婷婷

出 版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦
邮编: 610051)

策划编辑: 杜 倩

责任编辑: 李 毅 李燕琴 徐 波

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 郫县犀浦印刷厂

成品尺寸: 185 mm×260mm 印张 16.25 字数 450 千字

版 次: 2014 年 1 月第一版

印 次: 2014 年 1 月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-5647-1878-7

定 价: 42.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83201495。

◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

绪 论

随着微波元件、微波集成电路以及相关工艺的迅速发展，微波系统工作频段也由传统的射频频段向 100GHz 以上延伸，并且已广泛用于卫星通信、遥测系统、中继通信、导航、人造卫星、雷达、遥控遥感、全球定位系统等领域。因此，如何深刻地掌握微波电路设计方法，熟悉制作和调试过程成为广大通信、电子工程专业学生的迫切需求。

多年来，微波技术给人们的印象是抽象的概念和繁琐的公式。相关课程被学生称为“杀手”课程。如何让学生掌握在专业课程的核心知识的基础上，提高实际工作技能，培养科学作风，为学习后续课程和从事实践技术工作奠定基础，是我们需要认真研究的问题。

《微波通信专业学位综合实验》是以实验设计、制作和测试为主，结合学科最前沿理论进行讲解的一门综合性创新实验课程。让学生从电路指标要求出发，通过方案制定、器件选择、设计制作、调试及测试等方面进行全面综合的训练。

该实验课程分为频域和时域两大部分：

频域部分主要介绍频域微波通信方式中涉及的相关器件、电路和系统技术的实验设置。实验包含器件和电路设计、加工制作、调试和测试以及频域通信系统搭建和演示等内容，具体包括人工介电材料的频域应用、微波无源电路、频域天线、微波信号源、微波控制电路以及频域微波通信系统等工作原理、设计制作以及测试方法。通过该课程的学习，使学生了解频域微波通信系统的前沿知识，掌握频域微波通信系统相关的基本实验技能。

时域部分主要介绍时域微波通信方式中涉及的相关器件、电路和系统。实验包含器件和电路设计、加工制作、调试和测试以及时域微波通信系统搭建和演示等内容，具体包括人工介电材料的时域应用、时域微波无源电路、时域天线、时域微波信号源、时域控制电路以及时域微波通信系统的工作原理、设计制作以及测试方法。通过该课程的学习，使学生了解时域微波通信系统的前沿知识，掌握频域微波通信系统相关的基本实验技能。

目 录

绪 论.....	1
实验一 微波滤波器电路的设计及测试.....	1
一、实验目的.....	1
1.1 实验主要目的.....	1
1.2 预习要求.....	1
二、实验原理.....	1
2.1 微波滤波器.....	1
2.2 微波滤波器新技术.....	9
三、实验样品设计.....	10
四、实验器材及连接方法.....	10
4.1 实验器材.....	10
4.2 连接方法.....	10
五、实验内容及步骤.....	10
5.1 实验内容.....	10
5.2 实验方法.....	10
六、注意事项.....	11
七、思考题.....	11
八、实验总结.....	12
8.1 提交样品设计、测试数据及结果分析.....	12
8.2 实验报告要求.....	12
实验二 微波天线的设计及测试 半波振子天线与八木天线.....	13
一、实验目的.....	13
1.1 实验主要目的.....	13
1.2 预习要求.....	13
二、实验原理.....	13
2.1 半波振子天线辐射原理及设计.....	13
2.2 八木辐射原理及设计.....	15
三、实验内容.....	16
四、实验器材.....	16
五、实验报告要求.....	16
六、思考题.....	16



环天线与折合振子天线.....	17
一、实验目的.....	17
1.1 实验主要目的.....	17
1.2 预习要求.....	17
二、实验原理.....	17
三、实验内容.....	20
四、实验报告要求.....	20
五、思考题.....	21
六、实验器件.....	21
微带天线的设计与分析.....	22
一、实验目的.....	22
1.1 实验主要目的.....	22
1.2 预习要求.....	22
二、实验原理.....	22
2.1 微带天线的基本原理及分析方法.....	22
2.2 微带天线的参数设计.....	23
三、实验内容.....	24
四、实验报告要求.....	25
五、思考题.....	25
六、实验器材.....	25
实验三 微波放大器电路的设计及测试.....	26
一、实验目的.....	26
1.1 实验主要目的.....	26
1.2 预习要求.....	26
二、实验原理.....	26
2.1 放大器的主要性能指标.....	27
2.2 放大器各种功率之间的关系.....	27
三、实验样品设计.....	33
四、实验器材及连接方法.....	33
4.1 实验器材.....	33
4.2 连接方法.....	33
五、实验内容及步骤.....	34
5.1 实验内容.....	34
5.2 实验方法.....	34
六、注意事项.....	34
七、思考题.....	35
八、实验总结.....	35

8.1 提交样品设计、测试数据及结果分析.....	35
8.2 实验报告要求.....	35
实验四 微波连续波信号源的设计及测试.....	36
一、实验目的.....	36
二、实验原理.....	36
2.1 微波信号源概述.....	37
2.2 微波信号源的设计举例.....	41
2.3 微波信号源主要参数实验测试.....	43
三、实验样品设计.....	43
四、实验器材及测试设备.....	44
五、注意事项.....	44
六、实验总结.....	44
实验五 微波变频电路的设计及测试.....	46
一、实验目的.....	46
二、实验原理.....	46
2.1 微波变频电路概述.....	46
2.2 微波变频器的设计举例.....	55
2.3 微波变频器主要参数实验测试.....	59
三、实验样品设计.....	60
四、实验器材及测试设备.....	60
五、注意事项.....	60
六、实验总结.....	61
实验六 微波开关电路的设计与测试.....	62
一、实验目的.....	62
二、实验原理.....	62
2.1 微波开关电路概述.....	62
2.2 微波开关电路的设计举例.....	63
2.3 微波开关主要参数实验测试.....	64
三、实验样品设计.....	65
四、实验器材及测试设备.....	66
五、注意事项.....	66
六、实验总结.....	66
实验七 频域微波通信系统.....	68
一、实验目的.....	68
二、实验原理.....	68
2.1 通信系统的组成.....	68



2.2	数字通信系统	69
2.3	微波通信系统	71
2.4	微波通信的调制和解调	72
2.5	调相信号的产生和解调	76
2.6	电波在自由空间的传播损耗	86
三、	实验编程设计	87
3.1	计算收发天线传输距离	87
3.2	进行幅度键控的调制和解调	87
3.3	根据四进制的自然码和格雷码逻辑关系,编写自然码和格雷码的差分编码和解码程序	87
3.4	编写二相相位键控的调制和解调程序	87
3.5	编写四相相位键控的调制程序	87
四、	实验器材	87
五、	实验步骤及操作	88
5.1	硬件系统搭建	88
5.2	仪器操作部分	88
六、	注意事项	89
七、	实验总结	89
实验八	时域信号源的设计与实验测试(时域)	90
一、	实验目的	90
二、	实验原理	90
2.1	雪崩晶体管的工作机制	90
2.2	阶越恢复二极管工作原理	91
2.3	隧道二极管工作原理	92
2.4	光导半导体开关	93
2.5	时域脉冲波形设计	95
2.6	MARX 电路的工作原理	97
2.7	脉冲形成电路原理	97
四、	实验样品设计	98
五、	实验器材及测试设备	99
六、	注意事项	100
七、	实验总结	100
实验九	实时延迟控制电路设计与测试	102
一、	实验目的	102
二、	实验原理	102
2.1	可编程逻辑器件的简述	102
2.2	锁相环技术基础	104

2.3 全数字 DLL 架构设计	105
2.4 可调延迟线	106
2.5 逻辑门延时方法	107
2.6 Quartus II 设计方法以及流程, VHDL 语言	107
2.7 信号抖动的测量方法, 产生机制以及减小抖动的方法	109
四、实验样品设计	111
五、实验器材及测试设备	111
六、注意事项	112
七、实验总结	112
实验十 时域天线设计与实验测试	113
一、实验目的	113
二、实验原理	113
2.1 时域天线概述	113
2.2 描述时域天线的特征参数	114
2.3 时域天线的设计举例	116
三、实验样品设计	119
四、实验器材与实验测试	119
4.1 实验测试电路	119
4.2 实验测试步骤	119
五、注意事项	120
六、实验总结	121
实验十一 时域信号接收及数据采集系统的设计与测试	122
一、实验目的	122
二、实验原理	122
2.1 数据采集原理	122
2.2 等效采样和实时采样的概念	124
2.3 AD 转换	126
2.4 时域信号接收的相关参数的定义	129
2.5 冲激雷达时域最优相关接收机理论	130
2.6 典型的接收机设计方案	130
三、实验样品设计	131
四、实验器材及测试设备	132
五、注意事项	132
六、实验总结	132
实验十二 人工电磁材料在微波无源器件中的应用 (时域)	134
一、实验目的	134
二、实验原理	134



2.1 吸波材料材料概述.....	134
2.2 铁氧体材料吸波原理.....	136
2.3 基于铁氧体吸波材料的钻孔测井雷达定向接收天线设计示例.....	137
三、实验样品设计.....	140
四、实验器材与实验测试.....	140
4.1 实验测试电路.....	140
4.2 实验测试步骤.....	140
五、注意事项.....	141
六、实验总结.....	142
实验十三 时域通信系统的测试与实现.....	143
一、实验目的.....	143
二、实验原理.....	143
2.1 时间反演技术基本简介.....	143
2.2 时间反演超宽带 (TR-UWB, Time Reversal Ultra-Wideband) 无线通信原理.....	143
2.3 TR-UWB 信号的获取与产生.....	144
2.4 信息调制.....	144
2.5 信号发射与接收.....	144
2.6 信号检测与判决.....	145
2.7 时间反演的时间聚焦现象.....	146
三、实验设计.....	146
3.1 高斯调制脉冲编程实验.....	146
四、实验器材及测试设备.....	151
4.1 硬件系统搭建.....	152
4.2 TR_UWB 软件系统操作.....	152
五、注意事项.....	154
六、实验总结.....	155
附录 软件与仪器使用.....	156
附录一 微波常用软件基本原理与使用介绍.....	156
一、实验目的.....	156
二、实验原理.....	156
2.1 HFSS 软件概述及仿真原理简介.....	156
2.2 CST 软件概述及仿真原理简介.....	158
2.3 ADS 软件概述及仿真原理简介.....	160
2.4 AWR MWO 软件概述及仿真原理简介.....	162
三、实验样品设计.....	163
四、仿真实验内容及步骤.....	163

4.1 梳状滤波器的仿真实验	163
4.2 相控阵天线的仿真实验	165
4.3 低噪声放大器的仿真实验	168
4.4 均衡器的仿真实验	170
五、注意事项	172
六、实验总结	172
附录二 微波常用仪器工作原理与使用介绍	174
一、实验目的	174
二、主要内容	174
2.1 电子通信工程专业研究生实验室的主要仪器种类	174
2.2 掌握射频信号发生器的工作原理与使用方法	174
2.4 掌握示波器的工作原理与使用方法	189
三、实验样品设计	247
四、实验总结	247

实验一 微波滤波器电路的设计及测试

一、实验目的

1.1 实验主要目的

1. 熟悉 ADS 软件设计微波滤波器基本方法和步骤；
2. 了解微波无源器件小型化的相关原理及方法；
3. 测试微波滤波器相关性能指标，与仿真结果比较，从而了解实际制作中哪些因素会影响其特性。

1.2 预习要求

1. 熟悉微波滤波器的相关理论知识；
2. 熟悉 ADS 软件设计环境。

二、实验原理

微波系统是由无源微波电路、有源微波电路以及天线组成的。无源微波电路的每种微波器件都具有其独特的功能，了解它们的功能、结构及特性是十分必要的。由于微波无源器件的种类繁多，本实验不能一一列举，仅就微波滤波器进行讨论。

2.1 微波滤波器

微波滤波器是微波工程中重要的微波器件之一。理想的滤波器应该是这样一种二口网络：在要求的频率范围内，能使微波信号无衰减地传输，此频带范围称为通带；在其余频率范围内能使微波信号完全不能传输，这其余的频率范围称作阻带。一个实际的滤波器只能尽可能地接近理想滤波器的特性。关于滤波器，有两类问题需要研究，一是分析，二是综合。已知滤波器的电路结构和元件参数，计算它的工作特性，这属于分析问题；与此相反，从预定的工作特性出发，确定滤波器的电路结构和元件数值，这一过程则属于综合问题。在实际工作中遇到的大多是综合问题。本节只讨论微波滤波器的综合设计问题。

2.1.1 微波滤波器的工作特性

滤波器的综合设计一般包括四个环节：根据系统要求确定滤波器的工作特性；选择适当的描述上述工作特性的逼近函数的数学表达式；确定滤波器的集总参数的网络结构；选择合适的微波结构予以实现。

微波滤波器可以看作一个二端口网络，工程上习惯特征衰减 L 来描述滤波器的工作特性，特征衰减(简称衰减)的表示式为



$$L = 10 \log \frac{1}{|S_{21}|} \text{ (dB)} \quad (1.1)$$

一般将滤波器的工作特性分为四类：低通、高通、带通和带阻。一个微波滤波器的几项主要技术指标为：

- (1) 截止频率 ω_c 和通带最大衰减 L_p ；
- (2) 阻带边界频率 ω_s 和阻带最小衰减 L_s 。

此外，还有一个微波滤波器的特殊问题：寄生通带。由于微波滤波器是由微波传输线、分布参数元件构成，所以当频率变化时，这些分布参数元件的数值，甚至电抗性质都将发生变化，使得本应是阻带的频段出现了通带，称为寄生通带。在微波滤波器的设计、研制中应使这种寄生通带远离所要求的通带频率范围。

对于以上四种类型的滤波器，我们并不需要一一自始至终地进行综合设计，只需要把低通原型滤波器分析清楚，然后利用频率变换把实际的低通、高通、带通、带阻滤波器变换成低通原型来综合设计。

理想的低通原型滤波器的工作特性应如图 1-1(a)所示，在通带内，功率衰减为零，阻带内功率衰减为无限大。但实际上这是无法实现的。工程上只能用一些函数去尽量逼近理想的衰减特性。常用的三种逼近函数是最平函数、切比雪夫多项式和椭圆函数。这三种逼近函数分别形成低通原型滤波器的三种衰减频率特性，如图 1-1 所示，而与之对应的滤波器分别称为最平坦式滤波器、切比雪夫式滤波器和椭圆函数式滤波器。

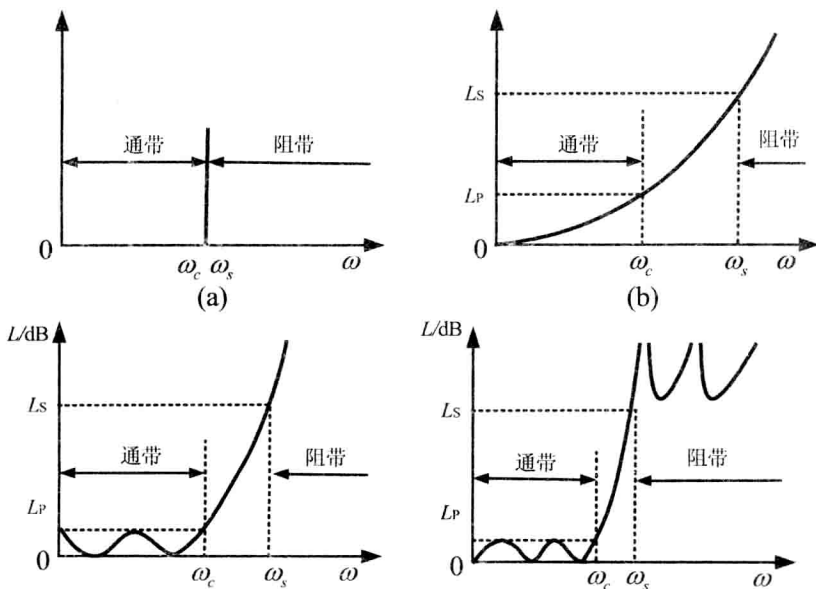


图 1-1 低通原型滤波器的衰减频率特性

这三种逼近函数所形成的衰减频率特性各有其特点，其中最平坦式特性表现为衰减量 L 随频率的增加而单调增大。在通带内， L 随频率增加而缓慢增长，变化平缓；在通带外， L 随频率增加而加速增长，但此种滤波器的 $(\omega_s - \omega_c)$ 比较宽，即由通带过渡到阻带比较平缓，这是它的不足之处。而切比雪夫式特性，表现为在通带内衰减量有等起伏变化，通带外衰减

量 L 单调增加。它与最平坦式特性相比, $(\omega_s - \omega_c)$ 较窄, 即由通带过渡到阻带比较陡。椭圆函数式特性表现为无论是在通带内还是在通带外, 衰减量 L 都有起伏变化, 它的 $(\omega_s - \omega_c)$ 更窄, 即带外衰减具有最大的上升斜率, 但由于其电路结构复杂, 元件数目多, 因而不如前两种滤波器用得普遍。

当逼近函数选定以后, 运用数学运算(目前这些繁杂的计算已被查阅有关曲线和图表所替代), 可以得出由电感和电容等集总参数元件所构成的 T 形网络结构, 如图 1-2 所示。

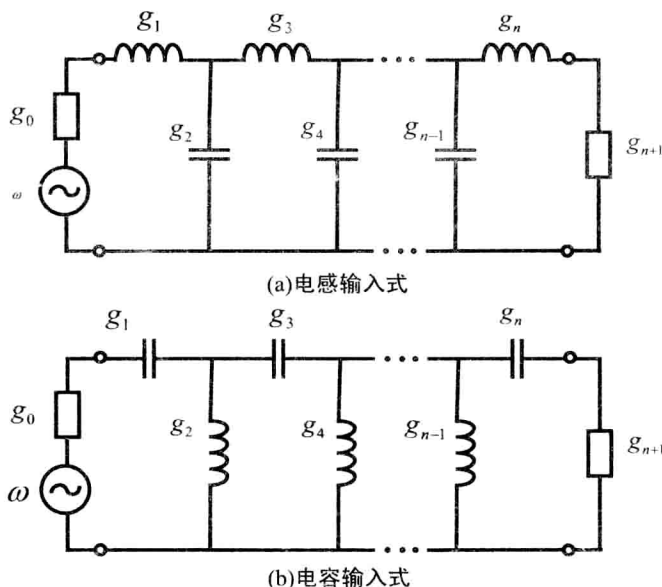


图 1-2 滤波器的梯形网络结构

如何将滤波器的 T 形网络结构在微波工程中具体实现是微波滤波器不同于低频滤波器的关键问题。在微波工程中, 研究的是分布参数电路的问题。根据工作波段的不同, 功率容量的大小等具体要求, 选择不同的传输线形式, 例如同轴线、波导、微带线等等。

2.1.2 低通原型滤波器

低通原型滤波器是各种滤波器的设计基础。所谓低通原型滤波器, 是实际的低通滤波器的频率对通带截止频率归一化, 各元件阻抗对信源内阻归一化后的滤波器。

最平坦响应的数学表达式为

$$L_A(\omega') = 10 \log_{10} \left[1 + \varepsilon \left(\frac{\omega'}{\omega'_1} \right) \right] \text{ (dB)} \quad (1.2)$$

式中,

$$\varepsilon = 10^{\frac{L_{Ar}}{10}} - 1 \quad (1.3)$$

对最平坦低通原型滤波器而言, 常选 $L_{Ar} = 3\text{dB}$, 则 ω'_1 就是它的 3dB 通带宽度。对于两端都接有电阻的最平坦低通原型滤波器, 其归一化元件值可用下式计算:

$$g_0 = g_{n+1} = 1 \quad (1.4)$$



$$g_k = 2 \sin \left[\frac{(2k-1)\pi}{2n} \right] \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (1.5)$$

2. 切比雪夫低通原型滤波器

如图 1-1(c)所示的切比雪夫低通原型滤波器的衰减特性, 其数学表达式为

$$L_A(\omega') 10 \log_{10} \left\{ 1 + \varepsilon \cos^2 \left[n \cos^{-1} \left(\frac{\omega'}{\omega'_1} \right) \right] \right\} \quad \omega' \leq \omega'_1 \quad (1.6)$$

$$L_A(\omega') 10 \log_{10} \left\{ 1 + \varepsilon \cosh^2 \left[n \cosh^{-1} \left(\frac{\omega'}{\omega'_1} \right) \right] \right\} \quad \omega' \geq \omega'_1 \quad (1.7)$$

式中

$$\varepsilon = 10^{\frac{L_{Ar}}{10}} - 1 \quad (1.8)$$

L_{Ar} 是通带内衰减最大值。

对于两端都接有电阻的双终端切比雪夫低通原型滤波器, 设其通带波纹为 L_{Ar} , $g_0 = 1$, $\omega'_1 = 1$ (归一化), 则其他各元件数值可用下式来计算:

$$g_1 = \frac{2a_1}{\gamma}, \quad g_k = \frac{4a_{k-1}a_k}{b_{k-1}g_{k-1}} \quad (k=2, 3, \dots, n)$$

$$g_{n+1} = \tan h^2 \left(\frac{\beta}{4} \right) \quad (n \text{ 为偶数}), \quad g_{n+1} = 1 \quad (n \text{ 为奇数}) \quad (1.10)$$

式中

$$\beta = \ln \left(\cosh \frac{L_{Ar}}{17.37} \right), \quad \gamma = \sinh \left(\frac{\beta}{2n} \right)$$

$$a_k = \sin \left[\frac{(2k-1)\pi}{2n} \right] \quad (k=1, 2, \dots, n), \quad a_k = \gamma^2 + \sin^2 \left(\frac{k\pi}{n} \right) \quad (k=1, 2, \dots, n)$$

2.1.3 频率变换

频率变换的作用是双向的。对于一个实际的滤波器, 它可能是低通、高通、带通、带阻滤波器中的某一种, 通过频率变换, 将其转化为低通原型滤波器; 经过综合设计, 有了低通原型滤波器的归一化元件值后, 再一次通过频率变换, 求出实际滤波器的归一化元件数值, 而后进一步求出真实的元件数值。在此由于仅对表示频率标度的横坐标进行了变换, 而对表示衰减标度的纵坐标没有变换, 故称之为等衰减条件下的频率变换。直观的印象仅是频率坐标轴的搬迁或伸缩, 在变换后的坐标下, 新的衰减频率特性形成, 下面逐一对四种类型的滤波器的频率变换予以说明。

1. 低通滤波器与低通原型的频率变换

设实际的和原型的低通滤波器的频率变量分别为 ω 和 ω' , 两者的衰减频率特性如图 1-3 所示。

要求在频率为 $\omega=0$, ω_c , ω_s , ∞ 的点上分别对应于 $\omega'=0$, 1 , ω'_s , ∞ , 两者的衰减量 L 彼此相等, 两者间应有频率变换式

$$\omega' = \frac{\omega}{\omega_c} \quad (1.11)$$

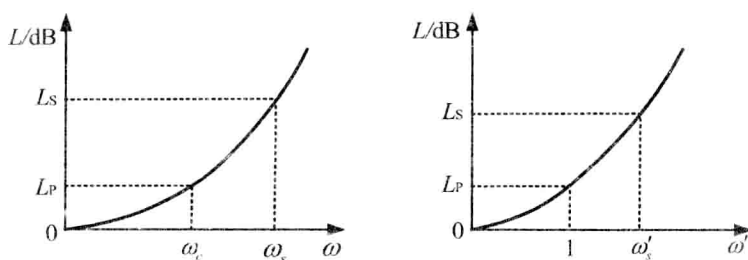


图 1-3 低通滤波器的频率变换

为使两种滤波器在上述对应频率点上衰减量不变, 必须要求网络中对应元件在两种频率变量下具有相同的归一化阻抗, 用公式表示为

$$z'_k(\omega) = z_k(\omega') \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (1.12)$$

式(1.12)称之为等衰减条件。等衰减条件运用于此处, 有

$$\begin{cases} j\omega L'_k = j\omega' g_k = j \frac{\omega}{\omega_c} g_k \\ \frac{1}{j\omega C'_i} = \frac{1}{j\omega' g_i} = \frac{1}{j \frac{\omega}{\omega_c} g_i} \end{cases} \quad (1.13)$$

式中 L'_k 和 C'_i 是实际滤波器元件的归一化值 (对信源内阻 R_g 归一化)。于是得到

$$\left. \begin{aligned} L'_k &= \frac{g_k}{\omega_c} \\ C'_i &= \frac{g_i}{\omega_c} \end{aligned} \right\} \quad (1.14)$$

若求元件的真实值, 只需对信源内阻 R_g 反归一化, 结果为

$$\left. \begin{aligned} L_k &= L'_k R_g = \frac{g_k}{\omega_c} R_g \\ C_i &= \frac{C'_i}{R_g} = \frac{g_i}{\omega_c R_g} \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

而实际负载则由原型电路的负载性质所确定。若 g_{n+1} 与 g_n 并联, 则

$$R_L = g_{n+1} R_g = R_g \quad (1.16)$$

若 g_{n+1} 与 g_n 串联, 则

$$G_L = g_{n+1} G_g = \frac{1}{R_g} \quad (1.17)$$

图 1-4 所示为电感输入式低通原型和实际低通滤波器的对应电路。对于电容输入式电路, 以上分析同样适用。

2. 高通滤波器与低通原型的频率变换

设高通滤波器的频率变量为 ω , 低通原型的频率变量为 ω' , 两者的衰减频率特性如图 1-5 所示。

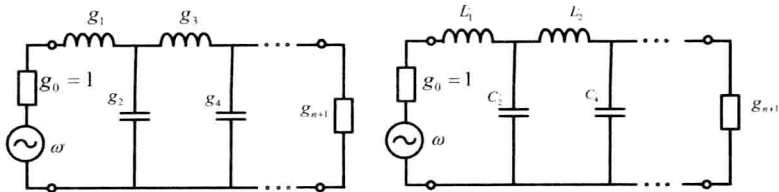


图 1-4 低通原型与低通滤波器的对应电路

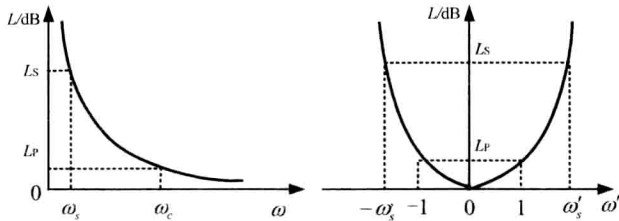


图 1-5 高通滤波器的频率变换

要求在频率为 $\omega=0$, ω_c , ω_s , ∞ 的点上分别对应于 $\omega'=-\infty$, 1 , ω'_s , 0 , 两者的衰减量 L 彼此相等, 两者间应有频率变换式

$$\omega' = -\frac{\omega_c}{\omega} \quad (1.18)$$

运用等衰减条件有

$$\begin{cases} j\omega'g_k = j\left(-\frac{\omega_c}{\omega}\right)g_k = \frac{1}{j\omega\left(\frac{1}{\omega_c g_k}\right)} = \frac{1}{j\omega C'_k} \\ \frac{1}{j\omega'g_i} = \frac{1}{j\left(-\frac{\omega_c}{\omega}\right)g_i} = j\omega\left(\frac{1}{\omega_c g_i}\right) = j\omega L'_i \end{cases} \quad (1.19)$$

可见低通原型中的电感, 变换为高通滤波器中的电容, 而低通原型中的电容, 变换为高通滤波器中的电感。高通滤波器元件的归一化值为

$$\left. \begin{aligned} C'_k &= \frac{1}{\omega_c g_k} \\ L'_i &= \frac{1}{\omega_c g_i} \end{aligned} \right\} \quad (1.20)$$

上式对信源内阻 R_g 反归一化, 得元件的真值为

$$\left. \begin{aligned} C_k &= \frac{1}{\omega_c g_k R_g} \\ L_i &= \frac{R_g}{\omega_c g_i} \end{aligned} \right\} \quad (1.21)$$

负载性质的判别依据同前。低通原型和高通滤波器的对应电路如图 1-6 所示。图中只画出了低通原型中电感输入式网络所对应的高通滤波器的电路, 读者不难自行画出电容输入式