

QINGSONG XUEHUI
LÜBOQI
SHEJI YU
ZHIZUO

轻松学会 滤波器 设计与制作

■ 周 新 主编 ■ 李 虎 张明霞 副主编



一看就懂 一学就会

助你全面掌握滤波器应用技术



化学工业出版社

QINGSONG XUEHUI
LÜBOQI
SHEJI YU
ZHIZUO

轻松学会 滤波器 设计与制作

■ 周 新 主编 ■ 李 虎 张明霞 副主编



化学工业出版社

本书全面介绍了各类型滤波器的设计方法、制作技巧以及选用等相关知识和技能,主要包括滤波器的种类及特性、RC 滤波器设计方法、低通滤波器设计方法、切比雪夫型低通滤波器设计、巴特沃斯型低通滤波器设计、高斯型低通滤波器设计、贝塞尔型低通滤波器设计、高通滤波器设计、有源滤波器设计元器件选择、有源高通滤波器设计、带通滤波器设计、带阻滤波器设计、谐振耦合式带通滤波器设计、匹配衰减器的设计与应用、电感线圈的设计与制作、数字滤波器的设计、开关电容滤波器设计等内容。同时书中还介绍了对于实现滤波器有重要意义的元件值变换方法、匹配衰减器设计方法和电感线圈的设计、制作和测试方法等。本书可帮助读者由浅入深,全面了解和掌握滤波器相关的知识和技能。

· 本书可供各种电子电路设计人员、电子爱好者阅读,也可作为职业院校电子专业及相关专业的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

轻松学会滤波器设计与制作/周新主编. —北京: 化学工业出版社, 2014. 5

ISBN 978-7-122-19939-3

I. ①轻… II. ①周… III. ①滤波器-设计②滤波器-制作 IV. ①TN713

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 039760 号

责任编辑: 刘丽宏

文字编辑: 陈 喆

责任校对: 宋 夏

装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 13 字数 347 千字 2014 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 49.00 元

版权所有 违者必究

前言

滤波器可以有效地抑制带外噪声，均衡所有频带的幅度、相位特性。因此，它在通信、控制信号处理等领域都发挥着重要作用，被广泛地应用于通信、数据采集、控制等各类电子系统中。

在电路设计中，要求滤波器的设计工程师不但要具备相当的工程经验，还要具备一定的数学及工程知识，以掌握复杂的理论及烦琐的计算。随着电子技术，特别是微电子技术的发展，传统的手工计算被计算机代替，以往的模拟信号处理方式也被数字信号处理所代替，这些变化给滤波器的设计理论和设计方法带来了很大变化。对于模拟滤波器，设计者不再需要关注设计的细节，而要用更多的精力关注应用本身的需求、元器件的可实现性，而对数字滤波器，设计的自动化程度更高。为帮助广大设计人员尽快掌握滤波器的设计，我们特编写本书。

本书详细讲述了滤波器的种类及特性、RC 滤波器设计方法、低通滤波器设计方法、切比雪夫型低通滤波器设计、巴特沃斯型低通滤波器设计、高斯型低通滤波器设计、贝塞尔型低通滤波器设计、高通滤波器设计、有源滤波器设计元器件选择、有源高通滤波器设计、带通滤波器设计、带阻滤波器设计、谐振耦合式带通滤波器设计、匹配衰减器的设计与应用、电感线圈的设计与制作、数字滤波器的设计、开关电容滤波器设计等内容。同时书中还介绍了对于实现滤波器有重要意义的元件值变换方法、匹配衰减器设计方法和电感线圈的设计、制作和测试方法等内容。书中所讲解的内容，都是从生产实践中提炼出来的，读者经过学习、理解和掌握后即可快速掌握滤波器的设计技术。

本书由周新主编，李虎、张明霞任副主编，侯江薇、马子敬、吴晶晶、张红芳、陈晔、郭杨杨、谢永昌、张超、董硕、张伯虎等也参与了全书编写工作。

由于时间仓促，书中不足之处难免，敬请读者批评指正。

编者

目录

第一章 滤波器的种类及特性	1
第一节 滤波器的种类和名称	1
一、LC 滤波器	1
二、RC 滤波器	1
三、有源滤波器	1
四、开关电容滤波器	1
五、滤波器的名称	2
第二节 理想滤波器	3
一、理想低通滤波器	3
二、理想高通滤波器	3
三、理想带通滤波器	3
四、理想带阻滤波器	3
五、全通滤波器	4
第三节 实际滤波器	4
第四节 函数型滤波器及分类	5
第五节 频率响应的归一化	6
第二章 RC 滤波器的设计方法	7
第一节 一阶 RC 滤波器的设计	7
第二节 电路组成及仿真	8
第三节 性能测试	8
第四节 多种信号源实测	11
第三章 低通滤波器的设计方法	17
第一节 定 K 型低通滤波器的特性	17
第二节 定 K 型低通滤波器依据归一化 LPF 设计	18
第三节 定 K 型归一化 LPF 设计参数	18
第四节 m 推演型低通滤波器	20
第五节 m 推演型 LPF 归一化设计	21
第六节 m 推演型与定 K 型低通滤波器整合设计	23
第七节 滤波器的匹配及优化设计	24

第四章 切比雪夫型低通滤波器的设计	28
第一节 切比雪夫型低通滤波器的特性及定义	28
第二节 切比雪夫型低通滤波器依据归一化 LPF 设计	28
第三节 归一化切比雪夫型 LPF 设计参数	31
第五章 巴特沃斯型低通滤波器的设计	41
第一节 巴特沃斯型低通滤波器的特性	41
第二节 巴特沃斯型低通滤波器依据归一化 LPF 设计	42
第三节 归一化巴特沃斯型 LPF 设计参数及计算	44
第六章 高斯型低通滤波器的设计	51
第一节 高斯型低通滤波器的特性	51
第二节 高斯型低通滤波器依据归一化 LPF 设计	51
第三节 归一化高斯型 LPF 设计参数	55
第七章 贝塞尔型低通滤波器的设计	57
第一节 贝塞尔型低通滤波器的特性	57
第二节 贝塞尔型低通滤波器依据归一化 LPF 设计	57
第三节 归一化贝塞尔型 LPF 设计参数	60
第八章 有源滤波器设计元器件的选择	65
第一节 电容器的选择	65
一、表面贴装电容器	66
二、轴向及径向引线结构	67
三、电解电容器结构	68
四、根据滤波器的用途选择电容器	68
第二节 电感器的选择	72
一、电感器选择简述	72
二、片式磁珠	72
三、空气芯电感	72
四、色码电感线圈	72
五、电感的频率特性	73
六、品质因数 Q 值	73
第三节 电阻器的选择	73
一、固定电阻器	73
二、可变电阻器	77
第四节 运算放大器的选择	78
一、运算放大器基本原理	78
二、非理想放大器的分析	80
三、运算放大器有限增益的影响	80
四、实际放大器需要考虑的问题	81

第九章 高通滤波器的设计	84
第一节 高通滤波器的定义	84
第二节 用定 K 型低通滤波器变换设计高通滤波器	85
一、归一化 LPF 电路中的电感、电容互换	85
二、对变换后电路的所有元件值求倒数	85
第三节 用 m 推演型低通滤波器变换设计高通滤波器	87
第四节 用巴特沃斯型滤波器变换设计高通滤波器	89
第五节 用贝塞尔型低通滤波器变换设计高通滤波器	91
第六节 用高斯型低通滤波器变换设计高通滤波器	93
第七节 高通滤波器设计中对于寄生电感的有效利用	94
第十章 有源高通滤波器设计	97
第一节 低通到高通的变换	97
第二节 全极点高通滤波器	97
第三节 椭圆函数高通滤波器	98
第四节 状态变量高通滤波器	102
一、状态变量	102
二、全极点电路	102
第五节 使用通用阻抗变换器的高通滤波器	108
第六节 使用通用阻抗变换器的有源椭圆函数高通滤波器	110
第十一章 带通滤波器设计	112
第一节 带通滤波器的定义与特性	112
第二节 带通滤波器设计步骤	112
第三节 用定 K 型低通滤波器变换设计带通滤波器	113
第四节 带通特性与低通特性的关系	115
第五节 带通滤波器截止频率和陷波频率计算	115
第六节 不同类型的带通滤波器特性	117
一、不同类型 BPF 对比	118
二、BPF 制作实例	124
第七节 有源带通滤波器设计	129
第十二章 带阻滤波器设计	136
第一节 带阻滤波器定义	136
第二节 带阻滤波器设计步骤	136
第三节 用定 K 型归一化 LPF 变换设计带阻滤波器	137
第四节 用巴特沃斯型归一化 LPF 变换设计带阻滤波器	138
第十三章 谐振耦合式带通滤波器设计	140
第一节 谐振耦合式带通滤波器结构	140
第二节 谐振耦合式带通滤波器设计方法	140

第三节 制作高频带通滤波器时注意的问题	144
第十四章 匹配衰减器的设计与应用	147
第一节 滤波器匹配作用	147
第二节 特征阻抗变换器	148
第三节 T 形阻抗变换器与 π 形阻抗变换器	148
第四节 匹配衰减器设计	149
一、T 形匹配衰减器	149
二、 π 形匹配衰减器	150
第五节 归一化匹配衰减器与阻抗变换器	150
第十五章 电感线圈的设计与制作	153
第一节 空心线圈的作用	153
第二节 空心线圈的设计与制作	153
第三节 环形磁芯线圈的设计与制作	154
第四节 可变线圈的设计与制作	158
第五节 空心线圈的设计参数	158
第十六章 数字滤波器的设计	167
第一节 信号处理	167
第二节 数字信号处理	168
第三节 数字信号表示	168
第四节 数字滤波器与模拟滤波器	171
一、数字系统的优势	171
二、模拟系统的优势	172
第五节 FIR 数字滤波器	172
第十七章 开关电容滤波器设计	186
第一节 开关电容滤波器概述	186
第二节 通用开关电容二阶滤波器	186
一、操作模式	187
二、电源连接	191
第三节 开关电容滤波器的分类	194
第四节 开关电容滤波器的选择	195
参考文献	197

滤波器的种类及特性

第一节 滤波器的种类和名称

所谓滤波器，就是能够过滤波动信号的器具。在电子线路中，滤波器的作用是从具有不同频率成分的信号中，取出（即过滤出）具有特定频率成分的信号，阻止或者消耗掉不需要的频率信号。滤波器的英文用“filter”表示。

一、LC 滤波器

LC 滤波器具有较好的低通滤波特性。但当要求通带截止频率很低时，为了保证滤波性能，势必要求电感量很大，导致电感的重量和体积过大，既不易制作（特别是不利于集成化），成本又高，有时还要加磁屏蔽，制造和安装都很麻烦。

二、RC 滤波器

避免了 LC 滤波器的缺点，但是电阻在消耗噪声能量的同时也消耗信号的能量。

三、有源滤波器

为了克服 RC 无源滤波器消耗信号能量的缺点，使用放大电路和 RC 网络组成了有源滤波器，以提高滤波性能。有源滤波器的优点是：

- a. 不使用电感元件，体积小、重量轻，不需要磁屏蔽。
- b. 有源滤波器电路中的运算放大器可加电压串联负反馈，可以获得高输入阻抗和低输出阻抗，从而可在输入与输出之间进行很好的隔离。这样可以通过级联的形式得到高阶的滤波器，不必像 LC 滤波器那样需要考虑级间的影响。
- c. 可在滤波的同时实现信号放大。

四、开关电容滤波器

开关电容滤波器是一种利用开关电容网络构成的滤波器，它的出现使有源滤波器的集成

化成为现实。

开关电容滤波器的基本组件是由开关电容网络组成的电阻、反相积分器、同相积分器。这种滤波器的通带增益和通带截止频率都与电路中的电容之比有关。随着现代集成工艺的发展,皮法级电容的相对精度可以做到 0.1%,而且这些电容都制在同一个芯片上,可以有比较好的温度补偿作用,因此通带增益和截止频率都可以做到十分精确、稳定。此外,只要改变时钟频率就能方便地改变中心频率/截止频率。例如用开关电容滤波器电路制成带通滤波器时,通过改变时钟频率可以使中心频率跟踪信号的频率,从而可以将滤波器的带宽做得很窄。

必须指出的是,开关电容滤波器实质上是将时间上离散的模拟信号离散化,因此输出波形不是光滑的。其次时钟信号的频率必须大于信号中最高频率的两倍,否则会出现混叠现象。开关电容滤波器主要用于通信系统和数字系统,如用于多选一开关和 A/D 转换器之间,以消除混叠效应,抑制输入信号频谱中的杂散分量和串模干扰。

五、滤波器的名称

图 1-1 所示是个形象的比喻,或许更有助于弄清滤波器的作用及其分类。图 1-1(a) 中,我们把 100Hz、5kHz、20MHz 等不同频率的正弦波信号比喻成大小不同的球,球越大,表示信号的频率越高;图 1-1(b)~(d) 是用分类球的过程来比喻滤波器的滤波作用及其所对应的滤波器种类。

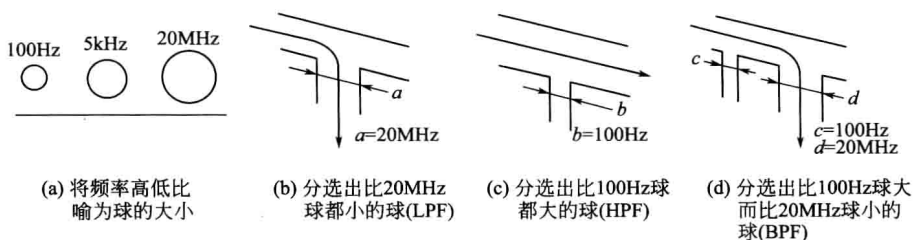


图 1-1 用分选球的原理来理解滤波器对信号的过滤作用

图 1-1(b) 能够分选出所有比 20MHz 球都小的球,也就是说,它所对应的滤波器只允许频率低于 20MHz 的所有正弦信号通过,因而称其为低通滤波器。低通滤波器英文是“Low Pass Filter”,其缩写形式为 LPF,它常作为低通滤波器的简称和标记符号来使用。

图 1-1(c) 能够分选出所有比 100Hz 球都大的球,也就是说,它所对应的滤波器只允许频率高于 100Hz 的所有正弦波信号通过,因而称其为高通滤波器。高通滤波器一词的英文是“High Pass Filter”,其缩写形式为 HPF,它常作为高通滤波器的简称和标记符号来使用。

图 1-1(d) 能够分选出比 100Hz 球大而比 20MHz 球小的球。也就是说,它所对应的滤波器只允许 100Hz~20MHz 范围内的所有正弦波信号通过,因而称其为带通滤波器。带通滤波器的英文是“Band Pass Filter”,其缩写形式为 BPF,它常作为带通滤波器的简称和标记符号来使用。

此外,如果滤波器的过滤作用是阻止某个频率范围内的信号通过,就称其为带阻滤波器。带阻滤波器的英文是“Band Reject Filter”,其缩写形式为 BRF,它常作为带阻滤波器的简称和标记符号来使用。

实际的滤波器是按对频率成分的过滤特性和设计滤波器时所用函数形式的组合情形来区分和命名的,且其中的函数形式名称大都采用了某个数学家的名字命名。例如,所有函数形式为巴特沃斯函数的低通滤波器就称为巴特沃斯型低通滤波器,所用函数形式为切比雪夫函数的低通滤波器就称为切比雪夫型低通滤波器等,而所用函数为椭圆函数的高通(或其他)滤波器则直接称为椭圆函数型高通(或其他)滤波器。

第二节 理想滤波器

下面具体介绍理想滤波器。理想过滤特性的滤波器，对信号的过滤是完全的、准确的。可是理想滤波器实际上是做不出来的，但只要能尽可能地接近理想特性，就是好滤波器。

一、理想低通滤波器

特性如图 1-2 所示，能够让从零频（即直流）到截止频率 f_c 之间的所有信号都没有任何损失地通过，而让高于截止频率 f_c 的所有信号完全阻塞。

二、理想高通滤波器

特性如图 1-3 所示。正好与理想低通滤波器相反，让高于截止频率 f_c 附近某一频率范围内的所有信号都毫无损失地通过，而让该频率范围以外的任何信号完全阻塞。

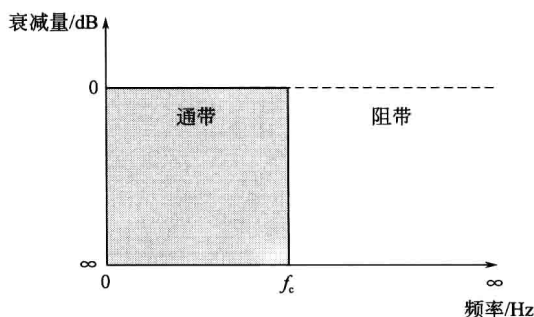


图 1-2 理想低通滤波器的特性

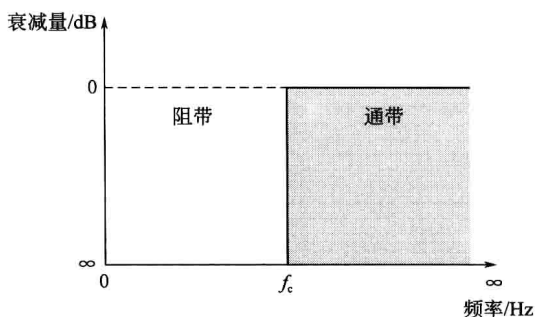


图 1-3 理想高通滤波器的特性

三、理想带通滤波器

特性如图 1-4 所示，让中心频率 f_c 附近某一频率范围内的所有信号都毫无损失地通过，而让该频率范围以外的任何信号完全阻塞。

四、理想带阻滤波器

特性如图 1-5 所示，正好与理想带通滤波器相反。带阻滤波器有时也被称为带陷器（Band Elimination Filter, BEF）或陷波器（Notch Filter）。

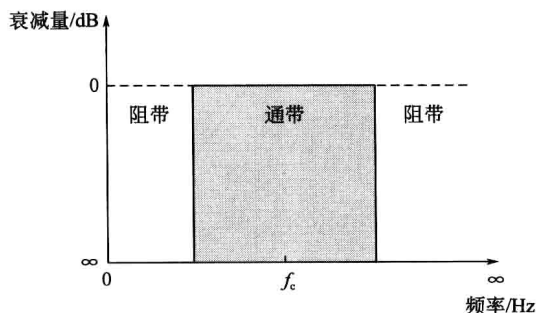


图 1-4 理想带通滤波器的特性

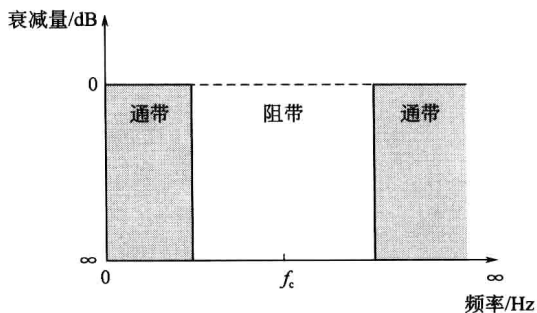


图 1-5 理想带阻滤波器的特性

五、全通滤波器

全通滤波器 (All Pass Filter, APF) 的理想特性如图 1-6 所示, 从图中无法看出它的用处, 因为信号通过该滤波器后, 其频率成分 (或能量) 不会有任何损失。但当信号通过这种滤波器时, 信号中所包含各频率成分的延时情形随频率不同而不同, 这一特点常用于需要对系统延时进行补偿的场合。全通滤波器也常称为延时均衡器 (Delay Equalizer) 或移相器 (Phase Shifter)。

在以后提到各种滤波器时, 将使用表 1-1 所列出的简称 (英文符号)。

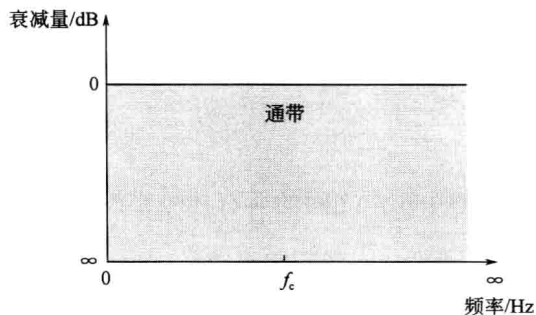


图 1-6 理想全通滤波器的特性

表 1-1 按通带特性分类的滤波器名称和英文简称

一般名称	简称
低通滤波器	LPF
高通滤波器	HPF
带通滤波器	BPF
带阻滤波器	BRF
全通滤波器	APF

第三节 实际滤波器

现实当中所设计出的滤波器, 其特性不可能达到图 1-7 所示的理想特性, 一般都是图 1-8 所示的情形。也就是说, 实际滤波器对信号的衰减量是以截止频率 f_c 为分界线而缓慢变化的。并且, 图 1-8 所示特性还只是设计特性, 也就是说, 这个特性是在所使用的电容器和电感线圈都具有理想特性的前提下得到的。而实际上, 按照这个设计特性用实际电容器和实际电感线圈所制作出来的滤波器, 有可能连图 1-8 的特性也得不到, 而只能得到图 1-9 所示的特性。于是, 便有了根据不同应用目的而形成不同种类的滤波器。

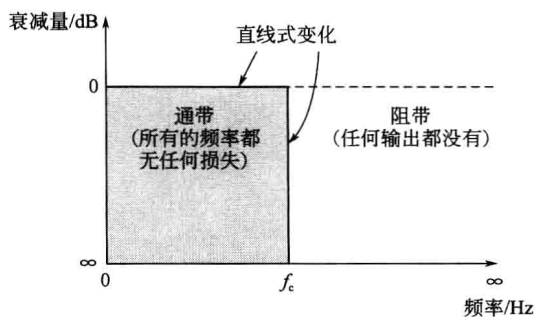


图 1-7 理想低通滤波器的特性

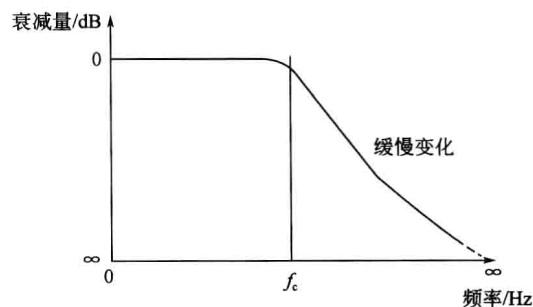


图 1-8 实际可设计的 LPF (巴特沃斯型)

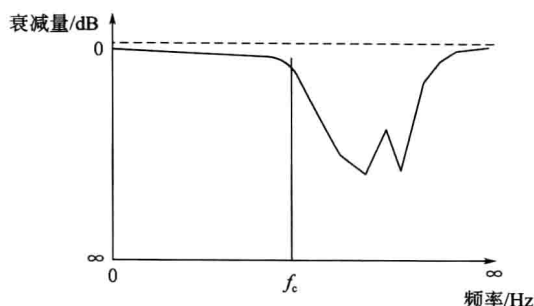


图 1-9 实际制作出来的 LPF 的特性

第四节 函数型滤波器及分类

由于理想滤波器的特性,在实际制作中难以实现,因此设计过程中是按某个函数形式来设计的,所以称其为函数型滤波器。按函数分类的滤波器有图 1-10 所示的一些类型。前面说

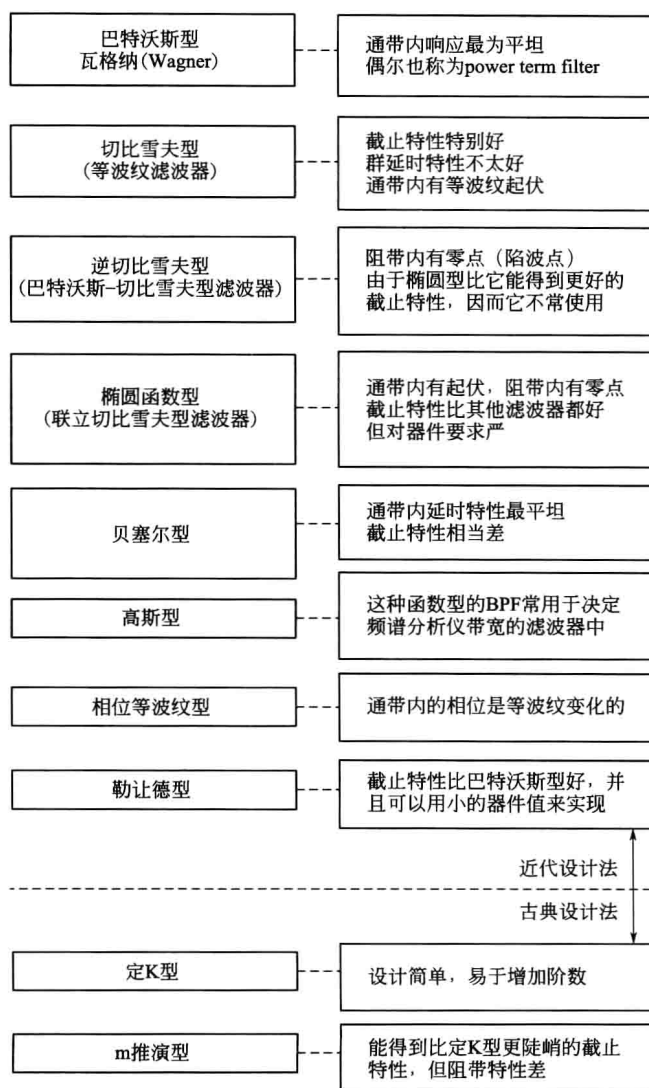


图 1-10 滤波器的类型及其特点

过, 这些函数形式都是某种低通滤波器、高通滤波器或带通滤波器名称中的一部分, 它决定着实际滤波器的特性。由这些函数所决定的实际滤波特性各有其突出特点, 有的衰减特性在截止区很陡峭, 有的相位特性 (即延时特性) 较为规律, 应用中可以根据实际需要来选用。

第五节 频率响应的归一化

在滤波器中, 一些参数是用来表征滤波器性能的, 最常见的是频率响应。当给出频率响应指标时, 设计人员就必须选择一种滤波器以实现这些要求, 可以通过把要求的频率响应变换到截止频率为 1rad/s 的归一化低通形式, 与截止频率也是 1rad/s 的归一化低通滤波器曲线进行比较。然后从这些曲线中确定一个满足要求的低通滤波器, 对所选的滤波器的归一化元件值进行变换或去归一化, 就可以实现最终设计。

现代网络理论提供很多不同幅度与频率形状的幅频特性曲线, 对传递函数加以各种约束, 用解析方法可导出这些曲线。低通响应的几种主要类型是巴特沃斯响应、切比雪夫响应、线性相位响应、瞬态响应、同步调谐响应及椭圆函数响应, 除椭圆函数响应以外, 其他所有响应的 23dB 截止频率都归一化到 1rad/s 。

滤波器归一化的基础是将滤波器中电抗元件都除以一个频率变换系数 (Frequency-Scaling Factor, FSF), 把给定滤波器的响应变换到不同频率范围。对于带通滤波器, 则把中心频率选作参考频率。FSF 可表示为

$$\text{FSF} = \frac{\text{需要的参考频率}}{\text{已知的参考频率}}$$

因为式中分子、分母有相同的单位, 通常是 1rad/s , 所以 FSF 必定是一个无量纲数。下面的例子说明 FSF 的计算和滤波器的频率变换。

【例 1.1】 一个低通滤波器的频率变换。

要求: 一个 LC 滤波器或者有源低通滤波器, 具有 3dB 截止频率为 1000Hz 的 3 阶巴特沃斯传递函数。

解: LC 滤波器及有源的 3 阶巴特沃斯低通滤波器及其响应。

(1) 计算 FSF:

$$\text{FSF} = \frac{2\pi \times 1000\text{rad/s}}{1\text{rad/s}} = 6280$$

(2) 用 FSF 除全部电抗元件, 得到滤波器频率响应。

提示: 归一化响应频率轴上所有点已经乘以 FSF。而且由于归一化滤波器的截止频率为 1rad/s , 故 FSF 能够直接用 $2\pi f_c$ 表示, 其中 f_c 是以赫兹为单位的低通滤波器的截止频率。

RC 滤波器的设计方法

第一节 一阶RC 滤波器的设计

滤波器就是一个频率选择电路，只允许输入信号中的某些频率成分通过，而阻止其他频率成分到达输出端，也就是说所有频率成分中，只是选中的部分经过滤波器到达输出端。

低通滤波器允许输入信号中较低频率的分量通过而阻止较高频率的分量。图 2-1 为 RC 低通滤波器基本原理。

当输入是直流电时，输出电压等于输入电压，因为 X_C 无限大。当输入频率增加时， X_C 减小，也导致 V_{out} 逐渐减小，直到 $X_C=R$ 。此时的频率为滤波器的特征频率 f_c 。

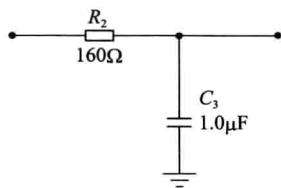


图 2-1 RC 低通滤波器基本原理

$$X_C = \frac{1}{2\pi f_c C} = R$$

解出 f_c ，得

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

在任何频率下，应用分压公式可得输出电压大小为

$$V_{out} = \frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} V_{in}$$

当 $f=f_c$ 时， $X_C=R$ ，在特征频率下的输出电压用分压公式表达为

$$\begin{aligned} V_{out} &= \frac{X_C}{\sqrt{R^2 + R^2}} V_{in} = \frac{R}{\sqrt{2R^2}} V_{in} = \frac{R}{R\sqrt{2}} V_{in} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} V_{in} = 0.707 V_{in} \end{aligned}$$

这些计算说明当 $X_C=R$ 时，输出为输入的 70.7%。按照定义，此时的频率称为特征频率。

第二节 电路组成及仿真

一阶 RC 电路 multisim 仿真电路原理如图 2-2 所示。一阶 RC 实物电路如图 2-3 所示。

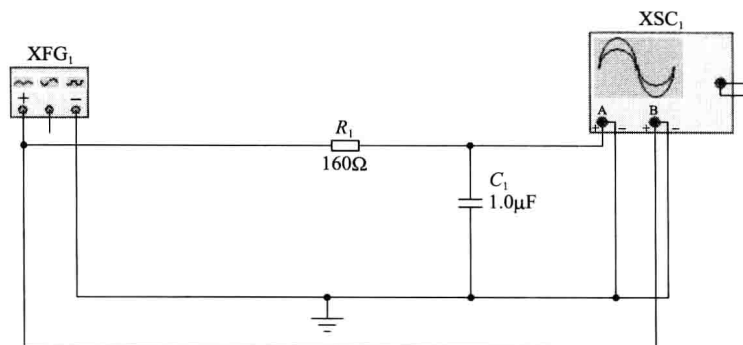


图 2-2 一阶 RC 电路 multisim 仿真电路原理

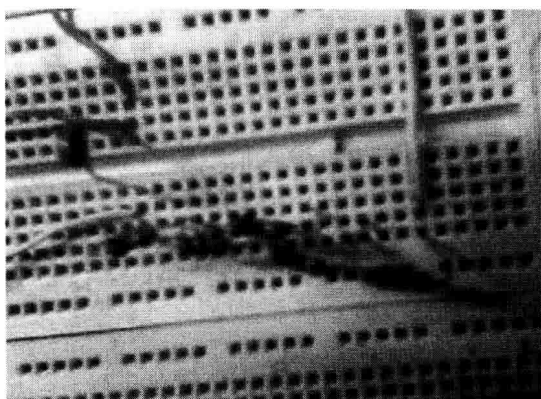


图 2-3 一阶 RC 实物电路

第三节 性能测试

对于一阶无源 RC 滤波器电路，可以用 100Hz、1000Hz、10000Hz 三种不同正弦频率信号检测，其仿真与实测电路如图 2-4~图 2-9 所示。

分析：由图 2-4 的仿真波形与图 2-5 的实测电路波形和表 2-1 中的数据可知，输入频率为 100Hz 的正弦信号时，该信号能够能过，输入输出波形间有较小相位差和较小衰减。仿真和实测数据间存在误差，误差值较小，在允许范围内。

表 2-1 $f=100\text{Hz}$ 时实测结果与仿真数据对比

数 据 项 目	输入幅值/V	输出幅值/V	衰减/dB	相 位 差
仿真电路	20.000	19.900	-0.0435	0.032π
实测电路	0.44	0.44	0	0

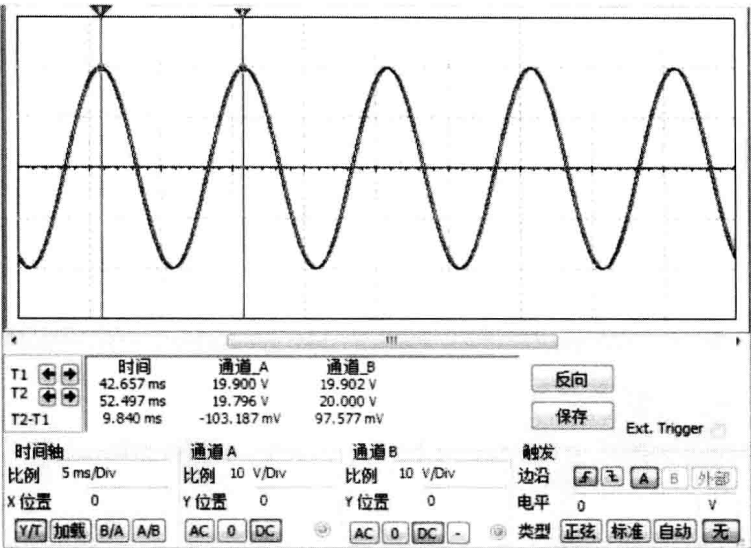


图 2-4 $f=100\text{Hz}$ 时正弦信号仿真波形图

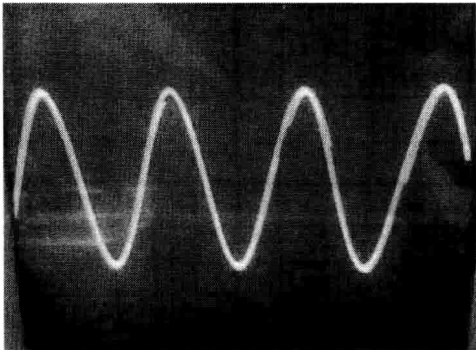


图 2-5 $f=100\text{Hz}$ 时正弦信号实测波形图

分析：由图 2-6 的仿真波形与图 2-7 的实测电路波形和表 2-2 中的数据可知，输入频率为 1000Hz 的正弦信号时，该信号能够通过，输入输出波形间有较小相位差和较小衰减。仿真和实测数据间存在误差，误差值较小，在允许范围内。

表 2-2 $f=1000\text{Hz}$ 时实测结果与仿真数据对比

数据项目	输入幅值/V	输出幅值/V	衰减/dB	相位差
仿真电路	19.997	14.101	-3.03	0.25π
实测电路	0.38	0.27	-2.97	0.248π

分析：由图 2-8 的仿真波形与图 2-9 的实测电路波形和表 2-3 中的数据可知，输入频率为 10000Hz 的正弦信号时，由分压定理可知输入频率较大时只有极小一部分的输入电压通过电路到达输出端。仿真和实测数据间存在误差，误差值较小，在允许范围内。

表 2-3 $f=10000\text{Hz}$ 时实测结果与仿真数据对比

数据项目	输入幅值/V	输出幅值/V	衰减/dB	相位差
仿真电路	19.997	1.979	-20.09	0.47π
实测电路	0.32	0.04	-18.06	0.46π