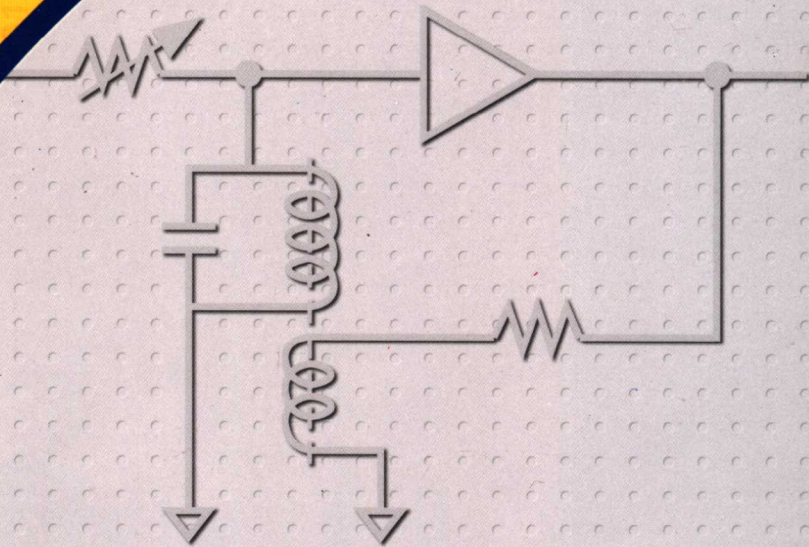


图解实用电子技术丛书

LC滤波器设计与制作

[日] 森 荣二 著
薛培鼎 译



科学出版社

www.sciencep.com

图解实用电子技术丛书

LC 滤波器设计与制作

〔日〕 森 荣二 著
薛培鼎 译

科学出版社

北京

图字: 01-2005-1162 号

内 容 简 介

本书是“图解实用电子技术丛书”之一。本书作为一本介绍 LC 滤波器设计和制作方法的实用性图书,内容包括了经典设计方法和现代设计方法,如定 K 型、 m 推演型、巴特沃思型、切比雪夫型、贝塞尔型、高斯型、逆切比雪夫型、椭圆函数型等低通、高通、带通、带阻滤波器及电容耦合谐振器型窄带滤波器。本书中还详细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。

本书的最大特点是简明易懂、实用性强。即使是不具备电子技术专业知识的人,也能够利用本书设计和制作出性能符合使用要求的 LC 滤波器。

本书可作为信号处理、信息通信等相关领域的工程技术人员的参考书,也可供大专院校的师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

LC 滤波器设计与制作/(日)森 荣二著;薛培鼎译. —北京:科学出版社, 2005

(图解实用电子技术丛书)

ISBN 7-03-016510-1

I. L… II. ①森…②薛… III. LC 滤波器-设计-制作 IV. TN713-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 139334 号

责任编辑:赵方青 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平 / 封面设计:李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

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

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 1 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006 年 1 月第一次印刷 印张: 19 1/2

印数: 1—4 000 字数: 293 000

定 价: 35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

编写本书时,作者特别注重了以下三点:

(1) 本书只采用加减乘除、幂乘和开平方这样的简单运算,使得没有专业知识的人也能顺利地设计出 LC 滤波器,在设计之前预先知道其特性。

(2) 尽可能多地给出一些设计实例和实验结果。

(3) 充分发挥仿真工具的作用,使滤波器特性的说明尽量简单明了。

在市场上,已经有许多关于 LC 滤波器和滤波器理论方面的优秀著作,但这些著作在讲述滤波器设计问题时,大都涉及较深的数学知识,不免令人望而生畏。本书是作者对滤波器设计方面的内容做了精心研究之后编写的,因而利用本书所讲述的设计方法,既不必进行复杂运算,又能设计、制作出令人满意的 LC 滤波器。

LC 滤波器在难以使用运算放大器等器件的高频领域中起着极为重要的作用,但在设计高频 LC 滤波器的时候,经常会遇到这样的问题:按照理论计算辛辛苦苦设计出来的滤波器,一经实际测试,却发现其特性距离设计值相距甚远。当就这一问题去请教经验丰富的技术人员时,他们大都能一眼就看出问题所在,一语道破“那是寄生电感的影响”或“那是因为有寄生电容的缘故”。然而在多数情况下,这些寄生因素并不应该成为我们未能设计出实测特性与理论相符合的滤波器的辩解理由。

这一问题也是本书所重视的一个问题。实际上,上面所说的寄生电感和寄生电容总是存在的,它们所造成的滤波器实测特性与设计计算结果不一致的问题不可能彻底消除。本书将以测试实例为依据,对于什么样的参数会带来多大程度影响的问题作深入说明,并在此基础上给出最合适的实际装配方法。

在讲述带通滤波器(BPF)的各相关章节中,作者特意多安排了一些具体的设计实例,目的在于澄清关于带通滤波器设计方面的一些“讹传”,例如“宽带 BPF 难以实现”、“不能用高 Q 值的谐振电路来制作宽带 BPF”、“想要加宽 BPF 的频带,就得把谐振电路

的谐振频率按顺序排列在一起”等,这些说法其实都是不对的。

遗憾的是,不仅一些年轻的工程师常会说上述错话,就连一些有经验的工程师,也有人会有这种错误的观点。如果本书能使更多的人对于 BPF 的设计问题和步骤有深刻理解,作者将感到非常荣幸。

书中虽然略去了滤波器理论方面的复杂数学公式,但对于实际制作滤波器所需要的重要变换和实际装配方法则作了尽可能详细的介绍。如果这些内容能被年轻工程师和经验丰富的骨干工程师们作为“备用手册”来用,作者更感荣幸。

在本书出版之际,作者对为本书出版付出了很多心血的 CQ 出版株式会社的各位同仁表示衷心的感谢。

著 者

目 录

| | |
|---|-----------|
| 第 1 章 滤波器的种类和特性 | 1 |
| 1.1 滤波器的种类和名称 | 2 |
| 1.2 理想滤波器的特性 | 3 |
| 1.3 实际滤波器的特性 | 5 |
| 1.4 函数型滤波器的特性 | 6 |
| 【专栏】 本书中所涉及的数学运算 | 9 |
| 第 2 章 低通滤波器的经典法设计——定 K 型及 m 推演型 LPF 的设计和应用 | 11 |
| 2.1 定 K 型低通滤波器特性概述 | 11 |
| 2.2 依据归一化 LPF 来设计定 K 型滤波器 | 13 |
| 2.3 定 K 型归一化 LPF 的设计数据 | 19 |
| 2.4 m 推演型低通滤波器 | 28 |
| 2.5 m 推演型 LPF 的归一化设计数据及滤波器设计方法 | 29 |
| 2.6 m 推演型滤波器与定 K 型滤波器的组合设计 | 39 |
| 2.7 利用 m 推演型改善匹配性的滤波器设计技术 | 41 |
| 第 3 章 巴特沃思型低通滤波器的设计——以其通带衰减特性平坦而闻名,且易于设计 | 49 |
| 3.1 巴特沃思型低通滤波器特性概述 | 49 |
| 3.2 依据归一化 LPF 来设计巴特沃思型低通滤波器 | 49 |
| 3.3 归一化巴特沃思型 LPF 的设计数据 | 58 |
| 3.4 巴特沃思型 LPF 的电路元件值计算 | 59 |
| 第 4 章 切比雪夫型低通滤波器的设计——以通带内允许特性起伏来换取截止特性陡峭 | 71 |
| 4.1 切比雪夫型低通滤波器特性概述 | 71 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 4.2 | 依据归一化 LPF 来设计切比雪夫型低通滤波器 | 75 |
| 4.3 | 归一化切比雪夫型 LPF 的设计数据 | 84 |
| 第 5 章 | 贝塞尔型低通滤波器的设计——通带内群延迟特性最平坦的滤波器 | 97 |
| 5.1 | 贝塞尔型低通滤波器特性概述 | 97 |
| 5.2 | 依据归一化 LPF 来设计贝塞尔型低通滤波器 | 97 |
| 5.3 | 归一化贝塞尔型 LPF 的设计数据 | 102 |
| 第 6 章 | 高斯型低通滤波器的设计——群延迟特性在通带内就开始缓慢变化的滤波器 | 109 |
| 6.1 | 高斯型低通滤波器特性概述 | 109 |
| 6.2 | 依据归一化 LPF 来设计高斯型低通滤波器 | 110 |
| 6.3 | 归一化高斯型 LPF 的设计数据 | 116 |
| 第 7 章 | 高通滤波器的设计方法——先把归一化 LPF 变换成归一化 HPF, 再求待设计 HPF 的元件值 | 119 |
| 7.1 | 依据定 K 型 LPF 的数据来设计高通滤波器 | 120 |
| 7.2 | 定 K 型 HPF 的特性 | 123 |
| 7.3 | 依据 m 推演型归一化 LPF 的数据来设计高通滤波器 | 125 |
| 7.4 | 依据巴特沃思型归一化 LPF 的数据来设计高通滤波器 | 130 |
| 7.5 | 巴特沃思型归一化 HPF 的设计数据 | 132 |
| 7.6 | 依据贝塞尔型归一化 LPF 的数据来设计高通滤波器 | 135 |
| 7.7 | 依据高斯型归一化 LPF 的数据来设计高通滤波器 | 137 |
| 7.8 | 高通滤波器设计中元件寄生电感的有效利用 | 139 |

| | |
|---|------------|
| 第 8 章 带通滤波器的设计方法——先设计带宽与 BPF 相同的 LPF,再进行元件变换而得 BPF | 145 |
| 8.1 依据定 K 型归一化 LPF 的数据来设计 BPF | 146 |
| 8.2 两种中心频率(几何中心频率和线性坐标中心频率) | 149 |
| 8.3 BPF 特性与 LPF 特性的关系 | 153 |
| 8.4 BPF 的截止频率和陷波频率的计算 | 158 |
| 8.5 不同类型的 BPF 的特性比较 | 161 |
| | |
| 第 9 章 带阻滤波器的设计方法——先设计带宽与 BRF 相同的 HPF,再进行元件变换而得 BRF | 179 |
| 9.1 依据定 K 型归一化 LPF 的数据来设计带阻滤波器 | 180 |
| 9.2 依据巴特沃思型归一化 LPF 的数据来设计带阻滤波器 | 182 |
| | |
| 第 10 章 变换滤波器构成元件值的方法——旨在使 用适当参数的部件来实现滤波器特性 | 187 |
| 10.1 整备元件值的必要性 | 187 |
| 10.2 诺顿变换 | 192 |
| 10.3 π - T/T - π 变换 | 199 |
| 10.4 变压器的使用 | 204 |
| 10.5 巴特莱特二等分定理 | 205 |
| 10.6 III 型基本电路单元的变换 | 207 |
| 10.7 利用回转器进行的电路变换 | 208 |
| 10.8 通过添加足够大耦合电容器的办法进行电路变换 | 211 |
| 附录 A 为了使滤波器易于制作而常用的电路变换 | 217 |
| | |
| 第 11 章 电容耦合谐振器式带通滤波器的设计——适合于窄带滤波器设计 | 223 |
| 11.1 谐振器耦合式带通滤波器的设计方法 | 223 |
| 11.2 设计步骤的归纳 | 229 |

| | | |
|---------------------|---|------------|
| 11.3 | 制作高频 BPF 时的一个重要问题 | 235 |
| 第 12 章 | 逆切比雪夫型 LPF 的设计——通带内最大平坦, 阻带内有陷波点 | 249 |
| 12.1 | 阻带频率与阻带衰减量的关系 | 250 |
| 12.2 | 逆切比雪夫型 LPF 特性概述 | 251 |
| 12.3 | 归一化逆切比雪夫型 LPF 的设计数据 | 252 |
| 第 13 章 | 椭圆函数型 LPF 的设计——允许通带内和阻带内均有起伏, 截止特性得以改善 ... | 255 |
| 13.1 | 椭圆函数型归一化 LPF 的设计数据 | 256 |
| 13.2 | 椭圆函数型 LPF 特性概述 | 256 |
| 第 14 章 | 匹配衰减器的设计和应用——为了准确地测得滤波器特性, 必须进行阻抗匹配 ... | 263 |
| 14.1 | 特征阻抗变换器 | 264 |
| 14.2 | T 形阻抗变换器和 π 形阻抗变换器 | 265 |
| 14.3 | 匹配衰减器的设计 | 266 |
| 14.4 | 归一化匹配衰减器及阻抗变换器 | 269 |
| 第 15 章 | 电感线圈的设计和制作方法——依据形状和导磁率求匝数 | 273 |
| 15.1 | 空芯线圈的设计和制作方法 | 273 |
| 15.2 | 环形磁芯线圈的设计和制作方法 | 276 |
| 15.3 | 磁芯骨架式可变线圈的设计和制作方法 | 282 |
| 15.4 | 空芯线圈的设计数据 | 283 |
| 附录 B | 谐振频率测试设备的制作 | 289 |
| 参考文献 | | 293 |
| 设计示例和计算示例一览表 | | 295 |

第 1 章

滤波器的种类和特性

顾名思义，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各种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。滤波器一词的英文是“filter”。

图 1.1 是对滤波器作用的说明。由 0.7kHz 和 1.7kHz 两个正弦波所合成的信号，经过只允许频率低于 1kHz 的信号通过的滤波器之后，输出端就只剩下 0.7kHz 一个正弦波了。可以想像，如果采用各种不同的滤波器，就可以取出各种不同的信号。

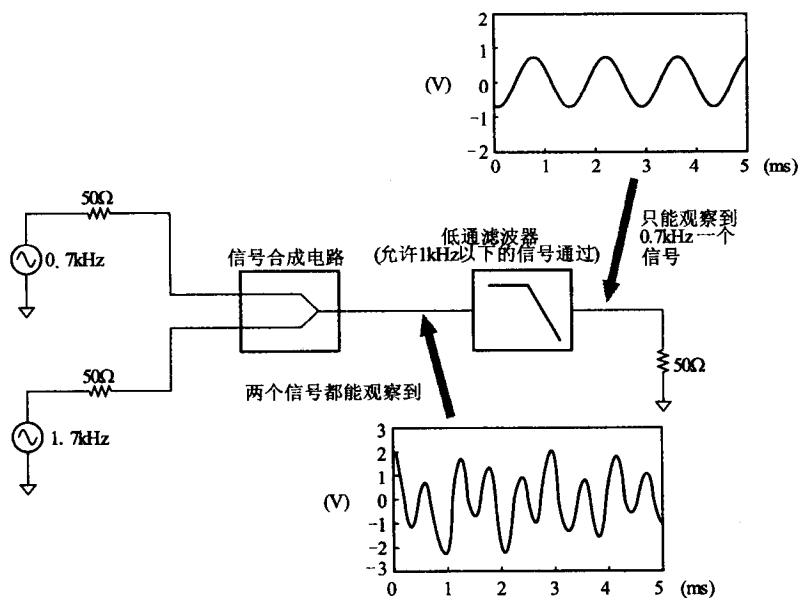


图 1.1 滤波器的作用

1.1 滤波器的种类和名称

图 1.2 是个形象的比喻, 这个比喻或许更有助于弄清滤波器的作用及其分类。图 1.2(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 1.2(b)~(d) 是用分选球的过程来比喻滤波器的过滤作用及其所对应的滤波器种类。

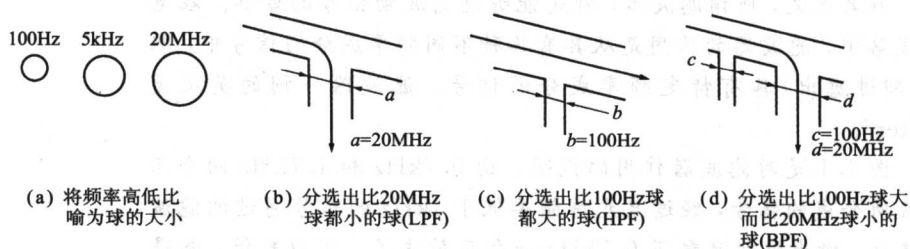


图 1.2 用分选球的原理来理解滤波器对信号的过滤作用

图 1.2(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。低通滤波器一词的英文是“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 1.2(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 1.2(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。带通滤波器一词的英文是“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。带阻滤波器一词的英文是“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。

实际的滤波器是按上述它对频率成分的过滤特性和设计滤波器时所用的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。例如,所用函数形式为巴特沃思函数的低通滤波器就称为巴特沃思型低通滤波器,所用函数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。也就是说,滤波器的名称一般包括函数名称和过滤特性两部分。

1.2 理想滤波器的特性

下面介绍具有理想过滤特性的滤波器对信号的过滤作用。虽然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,它就是好滤波器。

理想低通滤波器的特性如图 1.3 所示。它能够让从零频(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 的所有信号毫无遗留地丧失殆尽。

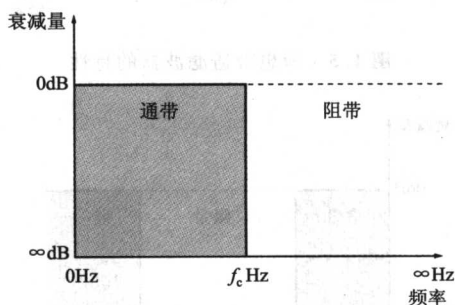


图 1.3 理想低通滤波器的特性

理想高通滤波器的特性如图 1.4 所示。它正好与理想低通滤波器相反,是让高于截止频率 f_c 的所有信号毫无损失地通过,而让低于截止频率 f_c 的所有信号毫无遗留地丧失殆尽。

理想带通滤波器的特性如图 1.5 所示,它是让中心频率 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毫无遗留地丧失殆尽。

理想带阻滤波器的特性如图 1.6 所示,它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)。

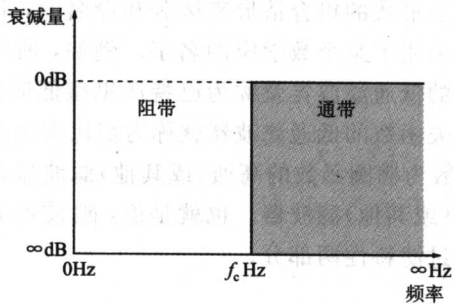


图 1.4 理想高通滤波器的特性

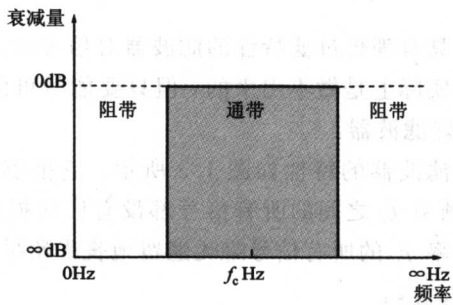


图 1.5 理想带通滤波器的特性

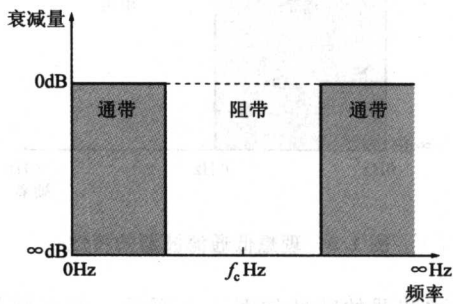


图 1.6 理想带阻滤波器的特性

还有一种全通滤波器(All Pass Filter, APF), 它的理想特性如图 1.7 所示。仅从这个图无法看出它有什么用处, 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而不同, 这一特点常用于需要对系统延时进行补偿的场合。这样

的滤波器也常称为延时均衡器(delay equalizer)或移相器(phase shifter)。

本书今后在说到各种滤波器时,将使用表 1.1 所列出的简称(英文符号)。

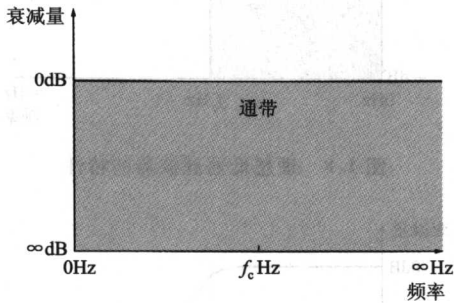


图 1.7 理想全通滤波器的特性

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 | LPE |
| 高通滤波器 | HPF |
| 带通滤波器 | BPF |
| 带阻滤波器 | BRF |
| 全通滤波器 | APF |

1.3 实际滤波器的特性

实际当中所设计出的滤波器,其特性不可能达到图 1.8 所示的理想特性,一般都是图 1.9 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 1.9 所示特性还只是个设计特性,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 1.9 的特性也得不到,而只能得到图 1.10 所示的特性。于是,便有了根据不同应用目的而形成的不同种类的滤波器。

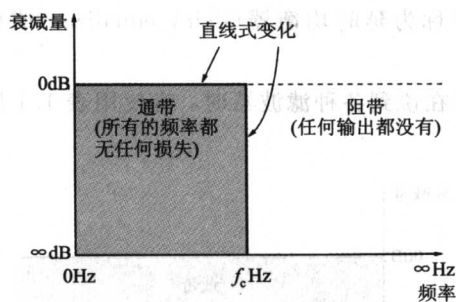


图 1.8 理想低通滤波器的特性

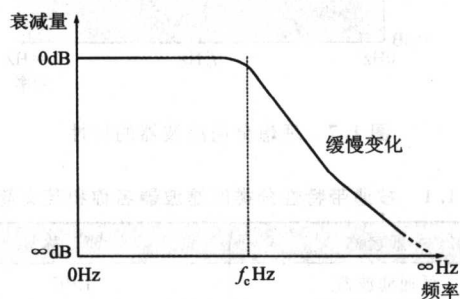


图 1.9 实际可设计的 LPF(巴特沃思型)

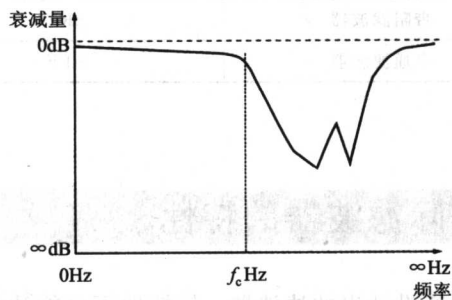


图 1.10 实际制作出来的 LPF 的特性

1.4 函数型滤波器的特性

由于理想滤波器的特性难以实现，因而设计当中都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

波器有如图 1.11 所示的一些类型。前面曾说过，这些函数形式都是某种低通、高通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，应用当中可以根据实际需要来选用。

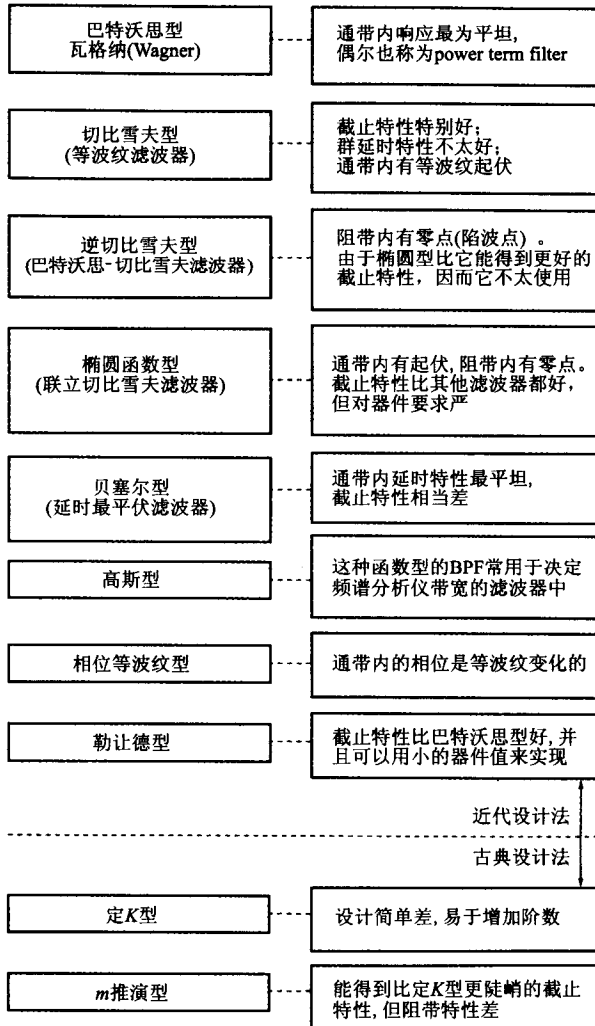


图 1.11 滤波器的类型及其特点

在最初设计或者不知道使用哪种函数型合适的情况下，可以选取巴特沃思型滤波器。这种滤波器的衰减特性和相位特性都相

当好,对构成滤波器的器件的要求也不甚严格,易于得到符合设计值的特性。

如果只对衰减特性有要求,可以选取切比雪夫型滤波器。不过切比雪夫型滤波器的相位特性不好,要注意它对非正弦波信号会产生波形失真影响的问题。

图 1.12~图 1.16 所示为巴特沃思型、切比雪夫型、逆切比雪夫型、椭圆函数型及贝塞尔型的低通滤波器特性示例。

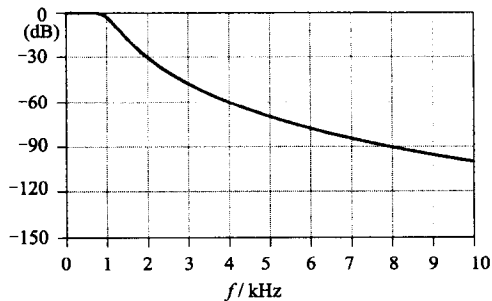


图 1.12 巴特沃思型 LPF 的特性示例

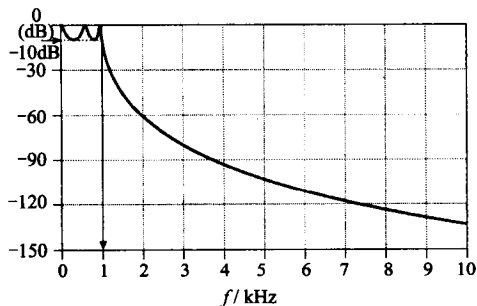


图 1.13 切比雪夫型 LPF 的特性示例

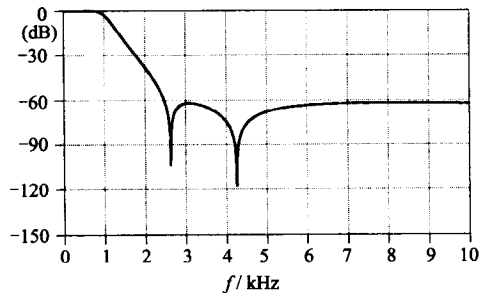


图 1.14 逆切比雪夫型 LPF 的特性示例