

XIAN DAI JING TI LU BO QI SHE JI



现代晶体滤波器设计

李 忠 诚 编 著

国 防 工 业 出 版 社 出 版

现代晶体滤波器设计

李忠诚 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书比较系统地介绍了现代晶体滤波器的设计原理和计算方法。全书分十章，内容包括：基础知识；差接桥式带通晶体滤波器；单边带晶体滤波器；低通和带阻晶体滤波器；单片晶体滤波器；声表面波石英谐振器；声表面波带通滤波器；声表面波谐振器及谐振器滤波器；晶体滤波器的制造、调整、测量和使用；影象参数法设计介绍等。书末有八个附录，给出了设计用的曲线、数据以及必要的说明。

本书可供通信、广播、电视、测量等专业有关的工人、科技人员和院校师生参考。

现代晶体滤波器设计

李忠诚 编著

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

上海中华印刷厂承排 国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/16 印张 23 1/4 539 千字

1981年1月第一版 1981年1月第一次印刷 印数：0,001-5,000册

统一书号：15034·2020 定价：2.40元

前 言

滤波器,这一在频率选择系统中占有确定地位的重要器件,自1917年问世以来,在无线电工程技术迅速发展的带动下,有着很大的发展。早期古典式的LC电气滤波器,在不断的改进和提高。晶体、陶瓷、机械一类谐振体的滤波器,也在发展和创新。近年来,还出现了各种具有不同工作原理的新型滤波器,其中声表面波滤波器就是被人们注视的一种。当然,在这许多种类的滤波器中,虽然不能简单地认为可以淘汰哪一种,但在具体工程技术应用中,往往是优点多一些的哪一种容易被选用。事实上,各种不同的滤波器,也各有其长短,从选用的角度来看,它们之间并不是相互竞争,而是相互补充的。

目前,晶体滤波器已被广泛应用于广播、电视、通信、导航、遥控、遥测和航天技术之中,因而对其性能和质量的特定要求,就显得更加重要。

相应于电子技术,尤其是微电子技术的迅速发展,已促使滤波器由“古典”走向“现代”。根据声学振动理论和现代网络理论进行综合设计,应用新材料和当前半导体平面工艺,改进装配结构,使分立元件式的滤波器在结构上走向集成化、固体化。也就是说,过去用很多电感、电容组装的滤波器,现在可以用一块晶片做成的单片晶体滤波器或声表面波滤波器来代替。于是,元件数目大大减少,体积变小,重量变轻,稳定性和可靠性增强,从而出现了一个飞跃,形成了所谓“现代晶体滤波器”。

本书编写重点放在现代晶体滤波器的设计原理和计算方法上。全书分十章,从滤波器设计的基础知识开始,写到了分立式晶体滤波器、单片晶体滤波器、声表面波带通滤波器、体波谐振器和声表面波谐振器。在设计方法上,重点介绍以现代网络理论为基础的综合设计方法。此外,还用了一章的篇幅介绍影象参数法的设计公式。因为综合法固然先进合理,但在有的地方,如在设计高通晶体滤波器等处,目前还不能应用。在设计每臂多晶体的高次滤波器时,还不能脱离影象参数法。这样,两种方法都作了介绍,就比较全面,便于设计工作。对晶体滤波器的制造工艺、装调测试以及正确使用也作了简要的介绍。为了便于理解,书中对较复杂的设计都举例说明。书末有八个附录,列有许多必要的数据、图表和一些专门问题的介绍,可供工程设计时参考。

在编写过程中,得到王之兴、张学礼、陈湘凝、钱树明等同志的支持、帮助。中国电子学会副理事长蔡金涛教授和四川大学无线电系武以立老师审阅了本书,并提出了宝贵的意见,在此一并表示衷心感谢。

李忠诚 1979年7月于北京

目 录

主要符号说明	1
第一章 概论	7
1.1 滤波器的发展简况	7
1.2 滤波器的分类	7
1.3 滤波器的应用	8
1.4 理想滤波器	9
1.5 四端网络基本知识	13
1.6 常用的等效电路	18
1.7 滤波器的变换	25
1.8 滤波器的选择及常用的几种典型近似函数表示的滤波器的特点	28
1.9 滤波器技术指标定义	29
1.10 全极点低通 LC 滤波器	29
1.11 全极点带通 LC 滤波器	31
1.12 全极点带阻 LC 滤波器	33
1.13 全极点高通 LC 滤波器	35
1.14 声表面波晶体谐振器的等效电路和质量因数	36
参考资料	38
第二章 差接桥形带通晶体滤波器	40
2.1 差接桥形电路原理	40
2.2 窄带差接桥形带通晶体滤波器元件值计算	40
2.3 差接变量器的设计计算	47
2.4 宽带差接桥形带通晶体滤波器元件值计算	48
2.5 中等带宽晶体滤波器	52
2.6 设计举例	53
参考资料	58
第三章 单边带晶体滤波器	59
3.1 单边带晶体滤波器的特点	59
3.2 一臂三晶体和一臂二晶体的差接桥形电路	59
3.3 每臂三晶体的差接桥形电路	64
3.4 每臂多晶体等参数差接桥形电路	65
3.5 卡索夫斯基晶体滤波器	67
3.6 相同晶体的上边带梯形电路	77
3.7 相同晶体的下边带梯形电路	79
3.8 相同晶体的单边带梯形电路的简化设计	81
3.9 考尔-契比雪夫晶体滤波器(梯形)	85
3.10 混合单边带晶体滤波器	87

	参考资料	87
第四章	低通和带阻晶体滤波器	88
4.1	低通晶体滤波器设计	88
4.2	带阻晶体滤波器设计	88
	参考资料	90
第五章	单片晶体滤波器	91
5.1	概述	91
5.2	基本工作原理	91
5.3	设计方法	92
5.4	设计参量和结构选取原则	100
5.5	泛音单片晶体滤波器	101
5.6	最大、最小相对带宽分析	102
5.7	设计举例	104
5.8	钽酸锂和铌酸锂单片晶体滤波器	107
5.9	制造问题	109
5.10	讨论	109
	参考资料	110
第六章	声体波滤波石英谐振器	111
6.1	声体波滤波石英谐振器的特点	111
6.2	0.8~5 兆赫 AT 切型石英谐振器	112
6.3	5~200 兆赫 AT 切型石英谐振器	118
6.4	BT 切型石英谐振器	124
6.5	CT 切型石英谐振器	124
6.6	DT 切型石英谐振器	126
6.7	沿宽度斜切的 DT 切型石英谐振器	127
6.8	X+5° XY' 厚度弯曲石英谐振器	128
6.9	X+5° 面弯曲石英谐振器	131
6.10	X+5° 双弯曲石英谐振器	132
6.11	X+5° 伸缩振动石英谐振器	133
6.12	NT 切型面弯曲振动石英谐振器	135
6.13	石英谐振器的激励电平	137
6.14	石英谐振器的参数测量	138
6.15	石英谐振器寄生模的测量	141
6.16	滤波石英谐振器设计和制造中的几个问题	141
6.17	石英谐振器设计举例	144
6.18	低频弯曲振动滤波石英谐振器在滤波电路中的联接法和计算	148
	参考资料	149
第七章	声表面波带通滤波器	151
7.1	概述	151
7.2	基本工作原理	152
7.3	叉指换能器	154
7.4	滤波器的设计	171

7.5	各种寄生波的抑制和观测	181
7.6	减小介入损耗的措施	189
7.7	材料的选择	191
7.8	高次谐波的利用	193
7.9	设计举例	193
	参考资料	199
第八章	声表面波谐振器及谐振器滤波器	201
8.1	概论	201
8.2	声表面波谐振器结构、等效电路和质量因数	202
8.3	声表面波谐振器的设计	206
8.4	声表面波谐振器滤波器的组成	210
8.5	串联栅表面波滤波器	214
8.6	声表面波谐振器的频率微调	217
8.7	设计举例	218
	参考资料	223
第九章	晶体滤波器的制造、调整、测量和使用	224
9.1	分立式晶体滤波器的制造及温度补偿	224
9.2	单片晶体滤波器的制造	228
9.3	声表面波滤波器的制造	229
9.4	分立式晶体滤波器的调整	232
9.5	晶体滤波器的测量	233
9.6	晶体滤波器的使用	234
第十章	影象参数法设计公式	236
10.1	概论	236
10.2	带通晶体滤波器	237
10.3	带阻晶体滤波器	270
10.4	低通和高通晶体滤波器	273
	参考资料	292

附 录

附录 I	常用的几种滤波器的衰减、群时延、单位脉冲响应和单位阶跃响应	293
附录 II	典型滤波器归一化元件值表	320
附录 III	可用晶体谐振器等效的基本二端网络元件值的关系表	345
附录 IV	牛顿法解超越方程	349
附录 V	声表面波空心叉指换能器	351
	参考资料	357
附录 VI	多条耦合器设计	358
附录 VII	分贝表	359
附录 VIII	国外无线电波段和频段表	361

主要符号说明

- A ——谐振器的电极面积
- $A(\omega)$ ——四端网络转移函数的分子多项式
- A_{\max} ——滤波器衰减特性的通带最大波动幅度(分贝)
- A_{\min} ——滤波器衰减特性阻带最小衰减幅度(分贝)
- A_s ——单边带滤波器边带抑制范围的最小衰减幅度
- A_{12} ——转移电流比
- a ——相对带宽的倒数($a = \frac{f_0}{B}$)
- a' ——叉指换能器指条(间隙)宽度
- a_{\max} ——滤波器衰减特性通带最大波动幅度(奈贝)
- a_{\min} ——滤波器衰减特性的阻带最小衰减幅度(奈贝)
- B ——滤波器衰减特性相等的两任意衰减点之间的频带宽度
- B_0 ——声表面波滤波器衰减特性的零分贝衰减带宽
- B_a ——滤波器衰减特性曲线上,特定衰减处的频带宽度(a 为特定衰减值)
- B' ——声表面波空心叉指换能器的指宽系数(指宽 = $\frac{\lambda_0}{B'}$)
- B_3 ——滤波器衰减特性的3分贝带宽
- $B_{3\max}$ ——滤波器最大可实现的3分贝衰减带宽
- $B_{3\min}$ ——滤波器最小可实现的3分贝衰减带宽
- BW ——按角频率计算的带通滤波器通带宽度($BW = 2\pi B$)
- C ——电容
- c ——晶体片球面的曲光度
- C' ——声表面波空心叉指换能器空心宽度系数(空心宽度 = $\frac{\lambda_0}{C'}$)
- C_{TS}, C_{TL} ——分别为差接桥式带通晶体滤波器的输入和输出电容
- C_s ——晶体谐振器的等效动态电容
- C_{s_i} ——第 i 个晶体谐振器的等效动态电容
- C_l ——与电感线圈 L_l 在 f_0 并联谐振的电容
- C_0 ——晶体谐振器的等效静电容(包括声表面波谐振器)
- C_P ——差接桥式带通晶体滤波器的每个桥臂中晶体谐振器静电容的总和、声表面波叉指换能器每对叉指的静电容
- C_T ——声表面波叉指换能器的总静电容
- $C_{i,i+1}$ ——耦合电容
- $C_n(j\omega)$ —— n 次契比雪夫多项式

- D' ——声表面波空心叉指换能器叉指间隙系数(指间隙 = $\frac{\lambda_0}{D'}$)
- D_1 ——单片晶体滤波器端部谐振器的损耗
- d ——单片晶体滤波器的电极间距
- d_1, d_n ——分别为归一化低通 LC 滤波器信号源和负载衰减 ($d_1 = \frac{1}{q_1}, d_n = \frac{1}{q_n}$)
- d_r ——声表面波反射栅周期 ($d_r = \frac{\lambda_0}{2}$)
- e ——自然对数的底
- F ——石英谐振器的谐振频率(兆赫)
- f ——任意频率
- f_b ——声表面波滤波器中的体波频率
- f_c ——单边带通信的载波频率
- f_m ——单边带通信的调制频率; 声表面波带通滤波器中等间隔取的特征频率
- f_0 ——带通滤波器的通带中心频率; 声表面波叉指换能器的声同步频率
- f_P ——晶体谐振器的并联谐振频率
- f_{PL} ——晶体谐振器与负载电容的组合并联谐振频率
- f_r ——叉指换能器反射最强的频率
- f_S ——晶体谐振器的串联谐振频率
- $f_{Si\pm}$ ——差接桥式带通晶体滤波器第 i 节较高和较低晶体谐振器的串联谐振频率
- f_{SL} ——晶体谐振器与负载电容的组合串联谐振频率
- f_u ——未镀电极的片子(白片)谐振频率
- f_s ——低通(或高通)滤波器 3 分贝衰减点处的频率
- f_{3H} ——下边带梯形晶体滤波器上侧通带的截止频率
- Δf_M ——多模声表面波谐振器的模间距
- Δf_{SB} ——声表面波谐振器反射栅阻带宽度
- Δf_N ——带阻滤波器的 3 分贝阻带宽度
- G_{12} ——四端网络转移电压比
- G_{S2} ——四端网络输出、输入电压比
- G_1, G_n ——LC 滤波器信号源和负载电导
- \hat{G}_a ——声表面波叉指换能器在 $\omega = \omega_0$ 处的声辐射电导
- $G_a(\omega)$ ——声表面波叉指换能器声辐射电导
- g_0 ——低通 LC 滤波器归一化元件值
- $H(\omega)$ ——四端网络的转移函数
- $h(t)$ ——单位脉冲响应函数
- h ——镀膜厚度
- $h^S(t)$ ——取样时间响应
- h_{ij} ——压电常数(也叫压电劲度常数)

- I_1 和 I_2 ——分别为四端网络输入和输出电流
- IL——介入损耗(插入损耗)的分贝表示
- j ——虚数
- K^2 ——材料的机电耦合系数
- K_e ——有效机电耦合系数
- K_f ——晶体谐振器频率常数
- $K_{i,i+1}$ ——带通耦合系数
- K_L ——晶体谐振器的电感常数
- K_X ——单片晶体滤波器 X 方向的耦合系数
- $K_{Z'}$ ——单片晶体滤波器 Z' 方向的耦合系数
- K_α ——单片晶体滤波器与 X 轴呈 α 角方向的耦合系数
- K_θ ——单片晶体滤波器与 Z' 轴呈 θ 角方向的耦合系数
- $k_{i,i+1}$ ——归一化低通耦合系数
- L ——电感
- L_D ——卡索夫斯基(Kosowsky)晶体滤波器的电感常数
- L_S ——晶体谐振器等效电感
- L_{S_i} ——第 i 个晶体谐振器的等效动态电感
- L_l ——变量器线圈电感
- l ——晶体片长度
- l_a ——加权叉指换能器总长
- l_{rr} ——声表面波谐振器的反射栅边对边的距离
- l_{ef} ——声表面波谐振器的有效腔长度
- l_p ——声表面波反射器边缘到设想的反射栅的反射中心的距离
- l_{rl} ——换能器与反射器之间距
- l_u ——未加权叉指换能器总长
- l_X ——晶体谐振器矩形电极在 X 轴方向的电极尺寸
- $l_{Z'}$ ——晶体谐振器矩形电极在 Z' 轴方向的电极尺寸
- $l_{X\max}, l_{X\min}$ ——分别为晶体谐振器获得最大、最小质量因数时,在 X 方向的电极尺寸
- $l_{Z'\max}, l_{Z'\min}$ ——分别为晶体谐振器获得最大、最小质量因数时,在 Z' 方向的电极尺寸
- M ——声表面波叉指换能器用数字傅里叶变换加权时等间隔取的特征频率的个数
- $M_{i,i+1}$ ——电磁耦合网络互感
- m ——影象参数法设计中的中间参数, $m = \left(\frac{x_{\infty-1}}{x_{\infty+1}}\right)^{\frac{1}{2}}$
- N ——声表面波叉指换能器叉指对数
- N_i ——电感线圈匝数比
- N_r ——声表面波谐振器中反射栅的条数
- n' ——谐振器的泛音次数
- n ——滤波器次数,即晶体滤波器的谐振器数目

- n'_i, n'_o ——滤波器的输入和输出端电感线圈的总匝数
 n_i, n_o ——滤波器输入和输出端电感线圈的抽头数
 P_a ——信号源提供的最大功率
 P_o ——在负载 R_L 中耗散的功率
 Q ——晶体谐振器的质量因数
 Q_1, Q_n ——格式晶体滤波器电路的信号源和负载质量因数
 Q_e ——声表面波叉指换能器的电质量因数
 Q_r ——声表面波叉指换能器的辐射质量因数
 Q_{LD} ——声表面波叉指换能器外部负载质量因数
 Q_i ——变量器电感线圈的实际质量因数
 Q_{i_i} ——滤波器电路中第 i 个电感线圈的质量因数
 $Q_{\text{实}}$ ——晶体谐振器的实际质量因数
 $Q_{\text{设}}$ ——设计要求的晶体谐振器质量因数
 q_1, q_n ——分别为归一化低通滤波器信号源和负载质量因数
 q_0 ——归一化低通滤波器内部元件质量因数
 R_1, R_n ——LC 滤波器和链式晶体滤波器输入和输出负载电阻
 R' ——晶片倒棱(或磨球面)用的弧度盘曲率半径, 也是该晶片成形球面的半径
 R_i ——传输法测量晶体谐振器参数装置中的隔离电阻
 R_{Hi}, R_{Ho} ——分别为差接桥形宽带晶体滤波器考虑线圈损耗后, 输入和输出端的实际负载电阻
 R_L ——负载电阻
 R_0 ——格形电路特性阻抗; 考尔-契比雪夫滤波器特性阻抗; 声表面波滤波器特性阻抗
 R_S ——信号源内阻
 R_q ——晶体谐振器等效动态电阻(包括声表面波谐振器)
 R_T ——差接桥形带通晶体滤波器特性阻抗
 R_{TS}, R_{TI} ——差接桥形带通晶体滤波器输入端特性阻抗(或负载电阻)
 R_{TO}, R_{TO} ——差接桥形带通晶体滤波器输出端特性阻抗(或负载电阻)
 $R_a(\omega)$ ——声表面波叉指换能器声辐射电阻
 \hat{R}_a ——声表面波叉指换能器在 $\omega = \omega_0$ 处的声辐射电阻
 RW ——压电再生反射
 r ——晶体谐振器的电容率; 声表面波叉指换能器叉指边缘反射系数
 r_1 ——反射器不连续性的声阻之比
 r_0 ——电压驻波比(VSWR)
 S ——复数频率变量
 S_l ——叉指换能器之间的距离
 T_0 ——零频率温度系数点温度
 t ——时间; 晶片厚度

- l' ——倒棱、平凸和双凸石英片边缘的厚度
 $t(s)$ ——传输系数或传输函数
 $t_i(s)$ ——介入电压比
 V_1, V_2 ——分别为四端网络输入与输出电压
 V'_1 ——单片晶体滤波器由于旁路电容 C_{01} 引起的失谐
 V_{20} ——去掉耦合网络后信号源直接与负载联结时的输出电压
 \bar{v} ——声表面波在叉指换能器中的平均传播速度
 v_g ——声表面波在叉指换能器的指间隙区的传播速度
 v_m ——声表面波在镀金属膜区的传播速度
 v_0 ——声表面波在未镀金属膜的自由表面传播速度 ($v_0 = v_g$)
 W ——晶片宽度; 声表面波叉指换能器孔径
 W_{a1}, W_{an} ——宽带差接桥形晶体滤波器输入和输出线圈的并联谐振阻抗
 X ——电抗; 声表面波叉指换能器的频率变量 $\left[X = \pi N \left(\frac{f-f_0}{f_0} \right) \right]$
 X_m ——晶体谐振器在谐振附近的电抗
 $X(\omega)$ ——四端网络转移函数的虚部
 $X_a(\omega)$ ——声表面波叉指换能器的声辐射电抗
 x ——低通频率变量
 x_D ——卡索夫斯基晶体滤波器中的归一化频率常数
 x_i ——第 i 个特定的归一化频率
 x_∞ ——滤波器衰减曲线衰减极点的归一化频率
 Y ——四端网络的 Y 参数
 Y_{11}, Y_{22} ——分别为四端网络短路输入和输出导纳
 Y_{12}, Y_{21} ——分别为四端网络短路转移导纳
 Y_a, Y_b ——格形(或差接桥形)电路桥臂 a 和 b 的导纳
 $Y_a(\omega)$ ——声表面波叉指换能器的声辐射导纳
 $Y(t)$ ——四端网络输出信号函数
 Z ——四端网络 Z 参数
 Z_{11}, Z_{22} ——四端网络开路输入和输出阻抗
 Z_{12}, Z_{21} ——四端网络开路转移阻抗
 $Z_{\text{晶体}}$ ——晶体谐振器阻抗
 Z_a, Z_b ——差接桥形(或格形)电路的桥臂 a 和 b 的阻抗
 $Z_a(\omega)$ ——声表面波叉指换能器的声辐射阻抗
 Z_i ——影象阻抗
 Z_m ——影象参数法设计时, 晶体滤波器的特性阻抗; 声表面波传播时, 在晶片镀膜表面的声阻
 Z_0 ——声表面波传播时, 在晶片自由表面的声阻
 z ——卡索夫斯基 II_m 型格形晶体滤波器设计系数
 $\alpha(\omega)$ ——信号通过四端网络的衰减

$\alpha_{\text{R}}(S)$ ——信号源内阻与四端网络不匹配引起的反射衰减

α_{T} ——有 n 个极点的网络, 总的影象衰减

β ——声表面波叉指换能器匹配电路的带宽参数

Γ ——声表面波谐振器中反射栅的反射系数

Δ ——相对调回频率 $\left(\Delta = \frac{f_u - f_s}{f_s}\right)$

δ ——相对带宽 $\left(\delta = \frac{B}{f_0} = \frac{BW}{\omega_0}\right)$

ε ——契比雪夫转移函数中决定通带最大波动的系数, $\varepsilon = \sqrt{10^{0.14 \max} - 1}$

ε_0 ——自由空间的介电常数

ε_r ——材料的相对介电常数

η ——低通 LC 滤波器参数

$\eta(j\omega)$ ——介入衰减(插入衰减或传输损耗)函数

η_0 ——滤波器技术条件允许的最大介入损耗

θ ——晶片切角 ($\widehat{ZZ'}$)

λ_0 ——声表面波波长

ρ ——晶体材料密度

ρ_m ——金属膜材料密度

ρ' ——石英晶片边比

$\rho(s)$ ——输入反射系数

ρ_0 ——声表面波叉指换能器加串联电感调谐时的负载电阻参数

τ ——时间变量; 声表面波叉指换能器脉冲持续时间

τ' ——声表面波叉指换能器脉冲持续时间的一半

τ_0 ——起始时间

τ_1 ——声表面波发射和接收叉指换能器中心之间的固定延迟时间

τ_2 ——声表面波叉指换能器中心到基片端部的固定延迟时间

x ——声表面波叉指换能器带宽参数

$\phi(\omega)$ ——相移

ϕ_a ——晶片直径

ϕ_e ——晶体谐振器电极直径

ϕ_0 ——单片晶体滤波器耦合方程中的中间变量 ($\phi_0 = P_0 \cos \phi_0$)

ϕ ——晶片切角 ($\widehat{XX'}$)

ψ ——晶片切角 ($\widehat{YY'}$)

Ω ——归一化频率 $\left(\Omega = \frac{B}{B_3} \text{ 或 } \Omega = \frac{f}{f_0}\right)$

Ω_∞ ——归一化衰减极点频率 $\left(\Omega_\infty = \frac{f_\infty}{f_3}\right)$

ω_a ——凯塞尔加权函数中的过渡参数 $\omega_a = K_1 B$, 即带宽 B 的 K_1 倍

ω_1, ω_2 ——带通滤波器通带的较低和较高截止角频率

$\Delta\omega_N$ ——用角频率表示的带阻滤波器的 3 分贝阻带宽度

第一章 概 论

1.1 滤波器的发展简况

早在六十多年前,通信技术中就应用了古典式的滤波器。1917年美国的康贝尔(Campbell)和德国的华格耐尔(Wagner)分别发明了LC电气滤波器。1922年索贝尔(Zobel)根据传输线理论,提出了特性参数(或称影象参数)滤波器的设计方法。此后,随着现代理论和实践不断发展,使人们认识到集中的、线性的、有限的、无源的和双向的系统阻抗函数和其它转移函数,都是复频变量的有理函数。于是在1924~1941年间,法斯特尔(Foster)、达林顿(Darlington)、考尔(Cauer)、闵乃大、比罗基(Piloty)和柯色(Cocci)等人,先后又解决了由已知的系统阻抗函数和其它转移函数来实现实际网络的设计方法。亦即运用连分式展开和部分分式展开的方法,这就是现代的网络综合技术。网络的特性可由网络函数(阻抗函数或其它转移函数)来表示,而网络函数又根据网络特性的不同,可用波德瓦尔兹(Butterworth)、契比雪夫(Chebyshev)、高斯(Gauss)、贝塞尔(Bessel)等数学多项式来近似表示。这样,就构成了与这些名称相对应的滤波器,例如波德瓦尔兹滤波器、契比雪夫滤波器,等等。我国蔡金涛教授的著作^[1]从理论上系统地论述了滤波器的综合法原理和计算,某些方面并有所发展。

随着无线电工业技术的发展,出现了很多具有高质量因数的元件和谐振器。将它们应用于滤波器网络,使滤波器的元件数目大大减少,体积大大减小,参数性能和稳定性明显提高,扩大了频段和带宽范围。同时也提高了生产率,降低了成本。这些都是直接用L、R、C组装的滤波器所不能比拟的。

现代通信技术中,广泛地应用了声体波晶体滤波器、陶瓷滤波器、声表面波滤波器等等,其性能均在不断提高之中。

1.2 滤波器的分类

滤波器的分类,按频段可分为音频、射频和微波滤波器;按基本元件的电路结构可分为梯形滤波器和格形(或差接桥形)滤波器;按所用元件的特点可分为LC、RC滤波器、具有分布元件的滤波器和具有电机械元件的滤波器;按网络内部有无能源又可分为有源和无源滤波器;大多数还是按在电子设备中的频率鉴别特点分为低通、高通、带通、带阻和全通五种滤波器,其定义如下:

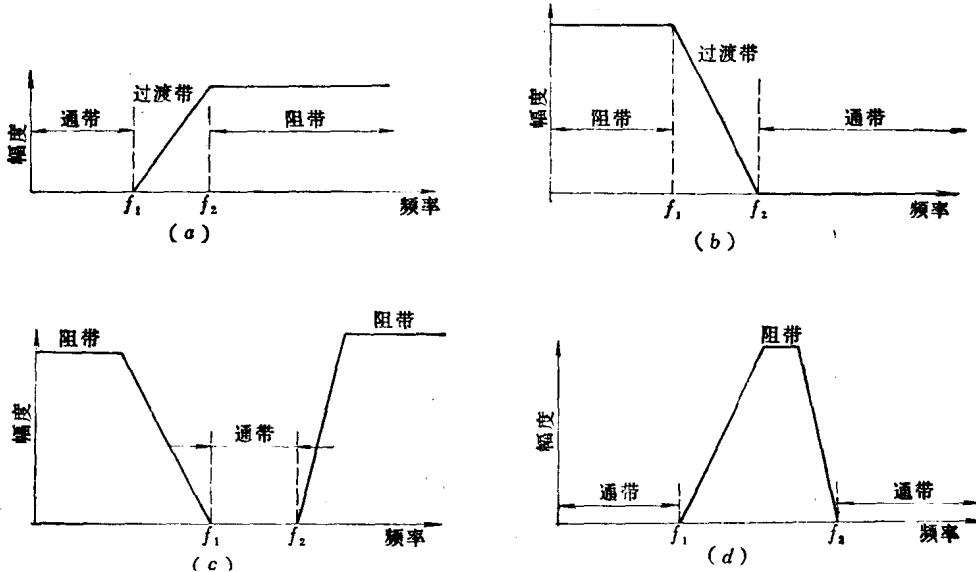
1. **低通滤波器** 它能通过从零频率到某一确定的截止频率的一个频带的能量,并抑制超过这个频率范围的所有能量通过,如图1.2.1(a)所示。

2. **高通滤波器** 它能通过某一个确定的截止频率以上的一个频带的能量,而抑制这个频率以下的所有能量通过,如图1.2.1(b)所示。

3. **带通滤波器** 它能通过某一较低截止频率到某一较高截止频率范围内的波的能量,而抑制此两个频率范围之外的所有能量通过,如图1.2.1(c)所示。

4. **带阻滤波器** 它能抑制某一个不需要的频率或频段的波的能量通过,而不在这个频率或频段范围的全部能量都将通过,如图 1·2·1(d)所示。

5. **全通滤波器** 它能通过输入信号全部频率的能量,但对不同频率会产生预定的相移。



(a) 低通滤波器; (b) 高通滤波器; (c) 带通滤波器; (d) 带阻滤波器。

图 1·2·1 低通、高通、带通和带阻滤波器的频率特性

1.3 滤波器的应用

随着科学技术的发展,电子设备在各个方面得到广泛应用。因而滤波器的应用也愈来愈多,几乎成了电子设备中不可缺少的器件。

1. **预选滤波器** 在所有高灵敏度的接收机的输入端,都需要预选滤波器。它能将需要与不需要的电信号分开。要求这种滤波器对需要的电信号呈现很低的介入损耗,而对于不需要的电信号呈现很高的衰减。通常预选滤波器在重要的频带上是可以调谐的。

2. **中频滤波器** 一个典型的接收机,输入信号在经过预选滤波器选择之后,下一步就是在中频放大器内进行选择。通常,将这种滤波器设计在两个或三个中间级单元中,并用电子管或晶体管将它们隔开。

3. **单边带(SSB)滤波器** 比之对称特性的预选滤波器来,单边带滤波器需要不对称的衰减特性。其目的是将不需要的边带抑制到使之在所接收的信号中不产生明显的幅度畸变和不稳定性。不需要的边带抑制不充分,就会引起不希望有的拍频。

4. **梳状滤波器** 当信号为一个周期脉冲系列表示时,其最佳滤波器可为一个由窄带滤波器链组成的梳状滤波器,它通过不连续的频率成分,并区分出噪声(噪声通常具有连续的频谱)。梳状滤波器最重要的应用是取出运动目标(如卫星、飞机和导弹等)的多普勒频率漂移数据。进入的信号将激励这些滤波器中的一个,并仅仅在那条通道上建立起输出。

5. 多路传输滤波器 远距离大型通信系统, 如果沿着一条线只能传输一个信息, 这将是很不经济的。采用多路传输技术可以同时传输很多个信息(可为几百个、几千个, 甚至几十万), 这样, 就从根本上将每个信道的价格降低了很多。对这种滤波器的主要要求是在通带外有尽可能尖锐的衰减, 以抑制通道之间的串音, 并且可以在同一条线内容纳更多的信道。

6. 抗干扰滤波器 如果雷达系统没有抗干扰的措施, 人为产生的干扰噪声可能完全使雷达目标信号消失。为了改善对目标的操纵和探测能力, 需要一些特殊性能的设备, 而窄带滤波器是关键器件。在这种情况下的主要要求是在脉冲信号下工作的滤波器, 应当既具有选择性又具有减小超调量和瞬时扰动的能力。为满足这些要求, 滤波器的频率特性曲线通常是贝塞尔型或高斯型。

滤波器的应用还有很多, 此处不再一一列举, 现将常用的一些滤波器所适用的频段和带宽范围示于图 1·3·1, 供选取时参考。

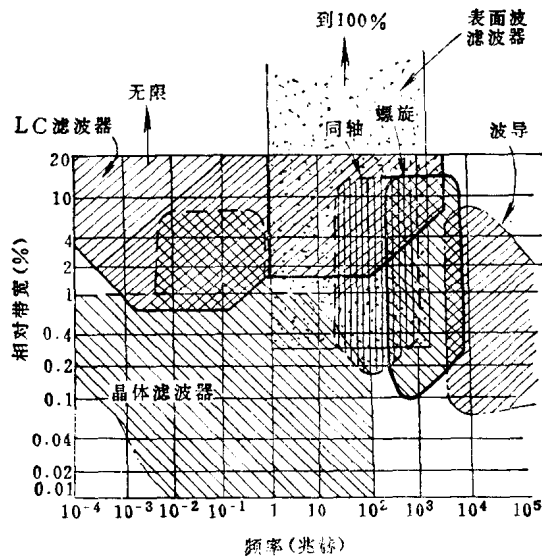


图 1·3·1 常用滤波器的频段和带宽范围

1.4 理想滤波器

为了评价滤波器的优劣, 根据使用的要求, 需要建立最佳滤波器或理想滤波器的概念。从使用上看, 有的滤波器使用在频(率)域, 有的使用在时(间)域。前者要求滤波器的幅频特性是理想的, 叫做理想频域滤波器(在国际上简称 IFDF), 后者要求滤波器的幅度-时间特性是理想的, 叫做理想时(间)域滤波器(在国际上简称 ITDF)。

1. 理想频域滤波器 一个滤波器在角频率间隔 $(-\omega_c, \omega_c)$ 内的信号通过时没有衰减, 在超过这个间隔就产生无穷大的衰减, 输出频率成分的相位比输入成分延迟 $n\pi\omega/2\omega_c$ 。(此处, n 为任意正整数), 我们把这样的滤波器叫做理想频域滤波器。它的幅度频率特性、相位频率特性、群时延、单位脉冲响应和单位阶跃响应的定量关系表示如下:

幅度频率特性(频率响应或频谱)

$$|H_f(j\omega)| = \begin{cases} 1 & -\omega_c \leq \omega \leq \omega_c \\ 0 & \text{在上述范围外} \end{cases} \quad (1.4.1)$$

相位频率特性

$$\phi = -\frac{n\pi}{2} \frac{\omega}{\omega_c} \quad (1.4.2)$$

群时延和相时延

$$\tau(\omega) = \frac{d\phi}{d\omega} = \frac{n\pi}{2\omega_c} \quad (1.4.3)$$

单位脉冲响应〔由对 $H_f(j\omega)$ 作傅里叶变换得〕

$$\begin{aligned} h_f(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} 1 \cdot e^{j\omega(t - \frac{n\pi}{2\omega_c})} d\omega \\ &= \frac{\omega_c}{\pi} \frac{\sin\left(\omega_c t - \frac{n\pi}{2}\right)}{\omega_c t - n\frac{\pi}{2}} \end{aligned} \quad (1.4.4)$$

单位阶跃响应(由对单位脉冲响应积分得)

$$\begin{aligned} a_f(t) &= \int_{-\infty}^t h_f(x) dx \\ &= \frac{\omega_c}{\pi} \int_{-\infty}^t \frac{\sin\left(\omega_c x - \frac{n\pi}{2}\right)}{\omega_c x - \frac{n\pi}{2}} dx \\ &= \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_c t - \frac{n\pi}{2}} \frac{\sin y}{y} dy \\ &= \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} Si\left(\omega_c t - \frac{n\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (1.4.5)$$

式中的 $Si\left(\omega_c t - \frac{n\pi}{2}\right)$ 由正弦积分表查出。

单位阶跃响应的起始时间

$$\tau_r = \frac{\pi}{\omega_c} \quad (1.4.6)$$

现将理想频域滤波器的幅度频率特性、相位频率特性、单位脉冲响应和单位阶跃响应示于图 1.4.1。