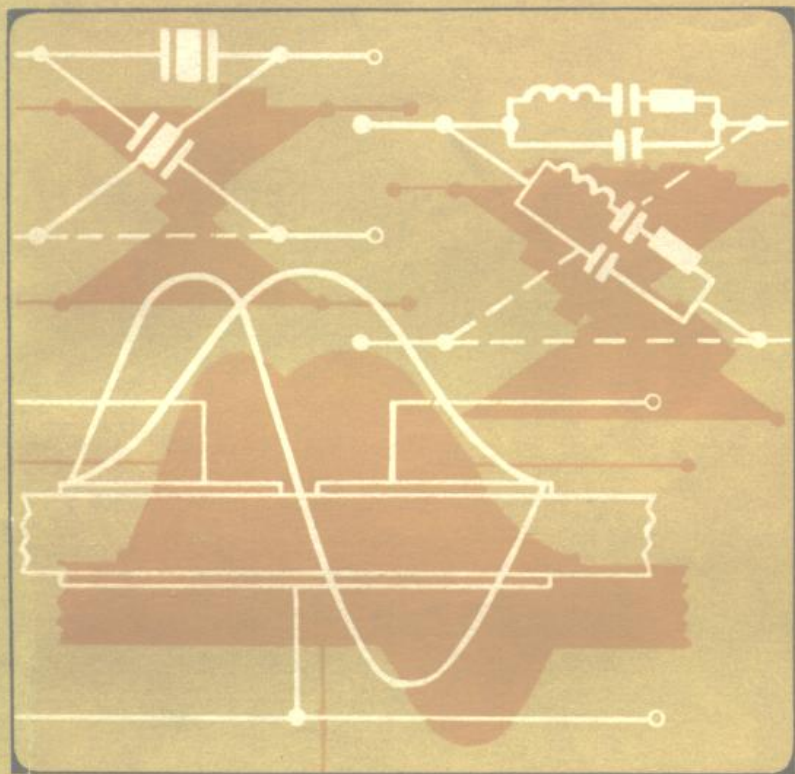


何芳鈞等 编著



# 压电陶瓷滤波器

科学出版社

# 压电陶瓷滤波器

何芳钧 等 编著

科学出版社

## 内 容 简 介

这是一本介绍压电陶瓷滤波器的理论专著，是作者多年来从事科研和教学实践的总结。书中围绕压电陶瓷滤波器这一内容，从基础知识到理论分析、设计计算以至实际应用进行了详细的论述。条理分明，深入浅出，可供从事这方面工作的专业人员及高等院校师生参考。

全书共分八章。前三章是预备知识，第四章讨论了目前使用最多的桥形和梯型滤波器，第五、六两章分别讨论了带有电抗元件的及机电耦合型的滤波器，第七、八两章介绍了能陷型滤波器和声表面波滤波器，最后，在附录中给出了一些主要公式的推导及常用数表，以便读者查阅。

## 压电陶瓷滤波器

何芳钧 等 编著

\*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1980年7月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1980年7月第一次印刷 印张：15

印数：0001—3,920 字数：341,000

统一书号：15031·282

本社书号：1744·15—7

定 价： 2.30 元

## 前 言

压电陶瓷滤波器是利用压电陶瓷的压电效应和谐振特性制成的滤波器。这种滤波器至今只有约二十年的历史，是一种新型的滤波器。

压电陶瓷滤波器与  $LC$  滤波器比较，体积小、重量轻、矩形系数小、稳定性好；与晶体滤波器及机械滤波器比较，制作简易、成本低微。所以压电陶瓷滤波器在短短的二十年时间里，已在有线通信、无线通信、测量、广播、电视等各个领域得到了广泛的应用，显示了强大的生命力。

压电陶瓷滤波器出现的初期，品种单调、稳定性和可靠性不好，当时应用的只有通信及广播接收机的中频 465kHz 滤波器。在无线电电子技术发展的要求和推动下，由于压电陶瓷材料性能不断提高，新的压电陶瓷材料不断涌现，滤波器的设计理论及制造方法逐步完善，使压电陶瓷滤波器出现了品种繁多、性能优异、应用越来越广的新局面。特别值得注意的是，根据能陷振动理论制造的陶瓷单片滤波器，大大提高了陶瓷滤波器的可靠性和高频性能。最近几年出现的陶瓷表面波滤波器大幅度地提高了压电陶瓷滤波器的使用频率和相对带宽，而且为陶瓷滤波器的集成化提供了现实的道路。目前，陶瓷滤波器的使用频率范围由数千赫到约 10 兆赫，相对带宽约为千分之几到百分之几十。压电陶瓷滤波器做为多路通信中的话路带通滤波器、调幅收音机滤波器、电视接收机的中频滤波器、卫星地面通信及其他各种无线通信和测量仪器中的各种滤波器，已经有了越来越广泛的应用。

压电陶瓷滤波器是一种新型器件，目前较为系统的资料甚为缺乏。我们根据国内外有关文献，结合几年来在教学、科研、生产中的有关工作，编写了本书。本书主要介绍压电陶瓷滤波器的基本原理、设计理论、制造和测试方法以及使用中的有关问题，希望对从事压电陶瓷滤波器的研制、生产和使用的科技人员、工人以及有关专业的师生有所裨益。

本书由山东大学压电铁电物理教研室何芳钧同志主编。参加编写工作的还有钟维烈、肖鸣山、宋道仁、张仲渊、张沛林等同志。由于我们水平较低，本书难免有不妥之处，热诚地希望广大读者提出宝贵意见。

编 者

一九七八年元旦

## 主要符号表

$A$	面积		能量
$a$	能陷振子电极半径或宽度 又指换能器指条宽度	$E_i$	电场强度分量
$B$	介入衰耗 又指换能器的相对带宽	$F$	作用力
$B_z$	阻带防卫度	$f$	频率
$\Delta B$	通带波动	$f_a$	反谐振频率
$b$	传输衰耗 特性衰耗 又指换能器指条间隔	$f_c$	截止频率
$b_n$	谐波衰耗	$f_m$	最大输出频率
$b_p$	工作衰耗	$f_n$	最小输出频率
$b_p$	失配衰耗	$f_0$	中心频率
$b_p$	反射衰耗	$f_p$	并联谐振频率
$C$	电容	$f_r$	谐振频率
$C_0$	压电振子静电容	$f_s$	串联谐振频率
$C_1$	又指换能器一个周期段的 电容	$f_{\infty}$	衰耗峰频率
$C_t$	又指换能器的总电容	$g$	传输常数 能陷振子电极间隙
$C_{ij}^E$	短路弹性刚度系数	$H$	能陷振子厚度
$C_{ij}^D$	开路弹性刚度系数	$I$	电流
$D$	直径	$K$	矩形系数 机电耦合系数
$D_i$	电位移分量	$K_p$	平面机电耦合系数
$d_{ij}$	压电常数	$K_s$	表面波机电耦合系数
$E$	电动势	$K_t$	厚度伸缩机电耦合系数
		$K_{1s}$	切变机电耦合系数
		$K_{31}$	横向机电耦合系数
		$K_{33}$	纵向机电耦合系数

$k$  波数  
 $L$  电感  
 $l$  振子长度  
 $M$  又指换能器周期长度  
 振子的优值  
 $N$  奈培  
 又指换能器又指对数  
 频率常数  
 $n$  变压器变化  
 滤波器节数  
 $P$  功率  
 $P_1$  输入端失配反射系数  
 $P_2$  输出端失配反射系数  
 $Q$  线圈品质因数  
 $Q_e$  振子电学品质因数  
 $Q_m$  振子机械品质因数  
 $R$  电阻  
 $R_n$  介质损耗电阻  
 $r$  半径  
 $S_i$  应变分量  
 $S_{ij}^E$  短路弹性柔顺常数  
 $S_{ij}^D$  开路弹性柔顺常数  
 $T_i$  应力分量  
 $t$  厚度  
 时间  
 $T_c$  居里温度  
 $U$  电压

$u$  位移  
 $V$  速度  
 $V_o$  纵波波速  
 $V_s$  表面波波速  
 $V_t$  横波波速  
 $W$  振子相对带宽  
 又指换能器孔径  
 $w$  振子宽度  
 $X$  电抗  
 $Y$  导纳  
 杨氏模量  
 $Z$  阻抗  
 $\alpha$  相移常数  
 $\beta$  传播常数  
 $\gamma$  电容比  
 $\delta$  介质损耗角  
 $\epsilon$  介电常数  
 $\epsilon_0$  真空介电常数  
 $\epsilon_{ij}^T$  自由介电常数  
 $\epsilon_{ij}^s$  夹持介电常数  
 $\lambda$  波长  
 $\rho$  密度  
 反射系数  
 $\sigma$  泊松比  
 $\tau$  群时延  
 $\Phi$  机电变换器变换系数  
 $\omega$  角频率

# 目 录

## 主要符号表

第一章 压电陶瓷滤波器的网络基础	1
§ 1-1 线性二端网络	1
1. 线性元件	1
2. 二端网络	3
3. 二端网络的等效和倒量	10
§ 1-2 线性四端网络	15
1. 四端网络	15
2. 线性四端网络的传输方程和网络参数	17
3. 四端网络的输入阻抗和特性阻抗	22
4. 用影象参数表示的四端网络方程	28
5. 几种基本四端网络的参数	32
6. 四端网络的联接	37
7. 等效四端网络	43
8. 四端网络的衰耗	50
9. 电阻衰耗器	57
第二章 滤波器的一般概念	61
§ 2-1 滤波器的一般性质	61
1. 什么叫滤波器	61
2. 滤波器的特性	64
§ 2-2 滤波器的主要术语和定义	71
§ 2-3 滤波器电气性能的测量	75
1. 衰耗特性的测量	75
2. 阻抗特性的测量	81
3. 反射系数及反射衰耗的测量	83



4. 谐波衰耗的测量 .....	85
5. 相位特性的测量 .....	86
§ 2-4 梯形和桥型滤波器的理论分析 .....	87
1. 梯形滤波器的传通和截止条件 .....	88
2. 桥型滤波器的传通和截止条件 .....	95
3. 差接桥型滤波器 .....	99
<b>第三章 压电陶瓷振子</b> .....	<b>102</b>
§ 3-1 压电陶瓷的压电效应和主要参数 .....	103
1. 压电陶瓷振子的形变与极性 .....	103
2. 压电陶瓷材料的主要参数 .....	106
§ 3-2 压电振子的等效电路和谐振特性 .....	114
1. 压电振子的等效机电网络和等效电路 .....	114
2. 压电振子的谐振特性 .....	119
§ 3-3 压电陶瓷振子的振动模式 .....	124
1. 伸缩振动模式 .....	124
2. 厚度切变振动模式 .....	129
3. 弯曲振动模式 .....	131
4. 能陷振动模式 .....	136
§ 3-4 压电陶瓷振子的假响应 .....	140
1. 振子的内部结构和外形对杂波的影响 .....	140
2. 其他振动模式和泛音的影响 .....	142
3. 力学夹持状态对杂波的影响 .....	145
§ 3-5 压电陶瓷振子的非线性失真和声辐射 .....	147
1. 压电陶瓷振子的非线性失真 .....	147
2. 压电陶瓷振子中出现的啸叫声 .....	149
§ 3-6 压电陶瓷振子性能的稳定性 .....	149
1. 时间稳定性 .....	150
2. 温度稳定性 .....	151
§ 3-7 压电陶瓷振子参数的测量 .....	152
1. 静电容 $C_0$ 的测量 .....	152
2. 谐振频率的测量 .....	152

3. 等效电阻 $R$ 的测量 .....	158
4. 机械品质因子 $Q_m$ 的测量 .....	159
第四章 梯形和桥型压电陶瓷滤波器 .....	164
§ 4-1 陶瓷滤波器的几种结构形式 .....	164
§ 4-2 梯形陶瓷滤波器的电气特性 .....	168
1. 衰耗特性 .....	176
2. 特性阻抗 .....	184
3. 相移特性 .....	185
§ 4-3 实际工作状态下的梯形滤波器的衰耗特性 .....	187
1. 失配对衰耗特性的影响 .....	189
2. $Q_m$ 对衰耗特性的影响 .....	194
3. 假响应对衰耗特性的影响 .....	198
4. 振子的泛音和其他振动模式对衰耗特性的影响 .....	199
5. 串并臂振子频率分布对衰耗特性的影响 .....	203
§ 4-4 陶瓷滤波器中的均衡器 .....	206
1. 衰耗均衡器的结构和作用 .....	207
2. 桥 T 型均衡网络 .....	208
3. 应用陶瓷振子的均衡器 .....	210
§ 4-5 梯形陶瓷滤波器的设计 .....	212
1. 设计步骤 .....	212
2. 设计举例 .....	217
§ 4-6 桥型陶瓷滤波器的理想特性 .....	226
§ 4-7 差接桥型滤波器制作实例 .....	235
§ 4-8 陶瓷滤波器的稳定性 .....	242
1. 陶瓷滤波器性能变化的原因 .....	242
2. 提高陶瓷滤波器稳定性的途径 .....	244
§ 4-9 滤波器调整和装配中的问题 .....	249
第五章 含有电抗元件和陶瓷振子的陶瓷滤波器 .....	252
§ 5-1 由一个电抗元件和陶瓷振子组成的二端网络的阻抗特性 .....	252

1. 振子与电感元件串并联后的阻抗特性和谐振频率	253
2. 振子与电容元件串并联后的阻抗特性和谐振频率	258
§ 5-2 带有展宽线圈的陶瓷带通滤波器	262
§ 5-3 含有电容元件的陶瓷带通滤波器	269
1. 振子为串臂、电容为并臂的 L 节滤波器	270
2. 振子为并臂、电容为串臂的 L 节滤波器	273
§ 5-4 陶瓷带阻滤波器	280
1. 桥型带阻滤波器	280
2. 梯形带阻滤波器	283
3. 陶瓷带阻滤波器的两个实例	292
第六章 机电耦合型陶瓷滤波器	303
§ 6-1 二瓷片粘合或中间夹有机械耦合体的三端滤波器	304
1. 三端滤波器的节点和极性	305
2. 厚度弯曲振动机电耦合滤波器的等效电路	309
3. 粘合三端滤波器的阻抗特性和衰耗特性	312
4. 厚度弯曲振动的三端滤波器的设计与制作	322
5. 伸缩振动的三端机电耦合滤波器	326
§ 6-2 分割电极的圆片或方片形三端滤波器	329
§ 6-3 分割电极的长条形三端和四端滤波器	336
1. 振子的电容及其测量	337
2. 等效电路分析	338
3. 设计制作中的有关问题	342
第七章 单片能陷型滤波器	347
§ 7-1 压电陶瓷能陷模振子	347
§ 7-2 单片能陷型滤波器	353
1. 能陷型振子的频谱	354
2. 多重模滤波器	359
§ 7-3 带有浮游电极的能陷型滤波器	365
第八章 压电陶瓷表面波滤波器	371
§ 8-1 表面波的类型和性质	372

§ 8-2	叉指换能器 .....	376
1.	叉指换能器的等效电路 .....	379
2.	均匀叉指换能器的频率响应(频域特性) .....	386
3.	叉指换能器的脉冲响应(时域特性) .....	390
4.	叉指换能器的加权 .....	392
5.	脉冲响应的抽样 .....	396
§ 8-3	表面波带通滤波器的设计原理 .....	400
1.	表面波带通滤波器的基本原理 .....	400
2.	窗口函数设计法 .....	402
3.	利用数字傅氏变换技术的综合设计法 .....	403
§ 8-4	二次效应对表面波滤波器特性的影响 .....	408
1.	阻抗失配效应和压电再生效应 .....	409
2.	体波效应 .....	411
3.	波束偏向和衍射 .....	411
4.	直通信号的影响 .....	412
§ 8-5	表面波滤波器用压电材料 .....	412
附录 A	传输单位、电平和主要公式推导 .....	415
附录 B	常用数表 .....	437

# 第一章 压电陶瓷滤波器的网络基础

## § 1-1 线性二端网络

### 1. 线性元件

在一个电路元件上，若电压与电流之间的关系可写成线性方程（代数、积分或微分方程），则这个元件称为线性元件。图 1.1 所示的理想的电阻  $R$ 、电感  $L$ 、电容  $C$  和变压器都是线

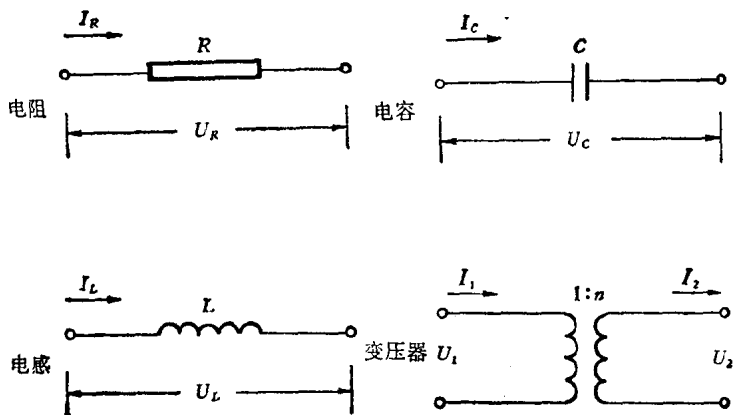


图 1.1 理想的线性元件

性元件，在这些元件上，任意电压  $U$  和电流  $I$  满足的方程分别为

$$U_R = I_R R \quad (1.1a)$$

$$U_L = L \frac{dI_L}{dt} \quad (1.1b)$$

$$U_C = \frac{1}{C} \int I_C dt \quad (1.1c)$$

$$\left. \begin{aligned} U_2 &= nU_1 \\ I_2 &= I_1/n \\ I_1U_1 &= I_2U_2 \end{aligned} \right\} \quad (1.1d)$$

这些元件的参数  $R$ 、 $L$ 、 $C$  和变压器的变比  $n$ ，与加在元件上的电压及电流无关。

在稳态情况下，电压和电流都是按正弦规律变化的，可以用复数表示为  $U = U_m e^{j\omega t}$ ， $I = I_m e^{j\omega t}$ 。本书以后讨论的都是这种情况，故本书以后的符号  $U$  和  $I$  都表示复数形式的电压和电流。在这种情况下，方程 (1.1) 可写成 (1.2) 的形式

$$U_R = I_R R \quad (1.2a)$$

$$U_L = j\omega L I_2 \quad (1.2b)$$

$$U_C = \frac{1}{j\omega C} I_C \quad (1.2c)$$

$$\left. \begin{aligned} U_2 &= nU_1 \\ I_2 &= I_1/n \\ I_1U_1 &= I_2U_2 \end{aligned} \right\} \quad (1.2d)$$

式中  $\omega$  是信号的角频率， $\omega = 2\pi f$ 。(1.2) 式表明，在理想电路元件上，复数电压和复数电流满足线性方程，且成比例关系，电压和电流之比值即为元件的复数阻抗。用  $Z$  表示复数阻抗，用  $U$  表示复数电压，用  $I$  表示复数电流，则线性电路元件上电压和电流之间符合一般关系式

$$U = ZI \quad (1.3)$$

对于电阻  $R$   $Z = R$

对于电感  $L$   $Z = j\omega L$

对于电容  $C$   $Z = \frac{1}{j\omega C}$

在这些理想的电路元件中,电阻是有功元件,在电路中要消耗能量;电感、电容和变压器是无功元件,它们在电路中不消耗能量。

对于一个实际元件,在一定条件下,可以近似地看成是理想元件或理想元件的组合。

## 2. 二端网络

以两个端子用来联接电源或其他电路的任何电路,都称为二端网络,见图 1.2。

二端网络里,两端子间电流  $I$  和电压  $U$  的关系由下式决定

$$Z = \frac{U}{I}$$

或

$$Y = \frac{I}{U}$$

式中  $Z$  为二端网络的阻抗,  $Y$  为二端网络的导纳,  $Y = \frac{1}{Z}$ 。

由线性元件电阻、电感、电容或变压器所组成的二端网络称为线性二端网络,它可能是单个元件电路,也可能是由很多元件串联、并联或混合联接起来的复杂电路。在线性网络

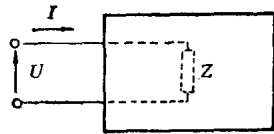


图 1.2 二端网络方框图

中,  $Z$  和  $Y$  与流经网络的电流和加在网络上的电压无关。

按照二端网络本身消耗能量与否,二端网络可分为有耗

二端网络和无耗二端网络两种。含有电阻元件的二端网络都是有耗二端网络，由理想的电感和电容组成的电抗二端网络则是无耗二端网络。理想的电感、电容是纯电抗元件。任何实际的电感和电容都是有损耗的，严格说来，含有电感和电容的二端网络总是属于阻抗形式。由于电感电容元件的损耗电阻相对于电抗来说是很小的，为把问题简化，通常把电感电容看成是无耗的理想元件，由这些元件组成的二端网络也被认为是纯电抗二端网络。

二端网络是构成四端网络的基础。

### (1) 单元件电抗二端网络

在单元件电抗二端网络里，只含一个元件。图 1.3(a) 所示的是只含一个电感的二端网络。

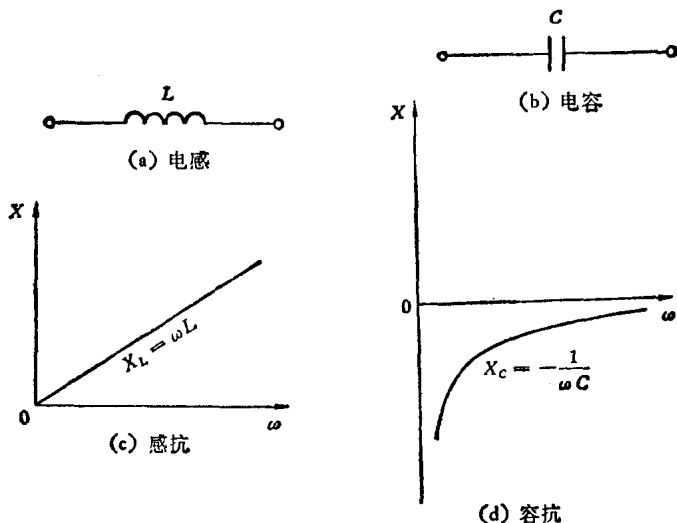


图 1.3 单元件二端网络及其电抗特性

图 1.3(b) 所示的是只含一个电容的二端网络。

电感的阻抗和导纳为



$$\left. \begin{aligned} Z_L &= j\omega L = jX_L \\ Y_L &= \frac{1}{j\omega L} \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

电容的阻抗和导纳为

$$\left. \begin{aligned} Z_C &= \frac{1}{j\omega C} = jX_C \\ Y_C &= j\omega C \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

式中  $\omega$  是角频率,  $X_L$  是电感的电抗,  $X_C$  是电容的电抗。

图 1.3(c) 和图 1.3(d) 分别表示了一个电感和电容的电抗特性。  $X_L$  随  $\omega$  变化是直线关系,  $X_L$  随  $\omega$  直线上升且为正值。  $X_C$  随  $\omega$  变化是双曲线关系,  $X_C$  随  $\omega$  升高其绝对值减小,  $X_C$  为负值。

## (2) 二元件电抗二端网络

二元件电抗二端网络是由一电容和一电感串联或并联组成, 如图 1.4 所示。

LC 串联二端网络的阻抗为  $Z_a$ , 即

$$\begin{aligned} Z_a &= j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} = jL_1 \left( \omega - \frac{1}{\omega L_1 C_1} \right) \\ &= jL_1 \frac{\omega^2 - \omega_1^2}{\omega} = jX_a \end{aligned} \quad (1.6)$$

式中,  $X_a = L_1 \frac{\omega^2 - \omega_1^2}{\omega}$ ,  $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$

LC 并联二端网络的阻抗为  $Z_b$ , 即

$$Z_b = -j\omega \frac{1}{C_2 \omega^2 - \omega_2^2} = jX_b \quad (1.7)$$

式中,  $X_b = -\frac{\omega}{(\omega^2 - \omega_2^2) C_2}$ ,  $\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$

由电感的电抗  $X_L$  和电容的电抗  $X_C$  随频率变化规律可