

陶瓷滤波器

姜远祥 编著



人民邮电出版社

内 容 提 要

本书介绍陶瓷滤波器的基本概念和设计方法。此外还介绍了陶瓷滤波器的制造工艺和温度补偿方法等。可供从事该项工作的科研和工程技术人员参考。

陶 瓷 滤 波 器

蔡远祥 编著

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：787×1092 1/32 1982年6月第 一 版

印张：6 28/32页数：110 1982年6月河北第一次印刷

字数：154 千字 印数：1—3,900 册

统一书号：15045·总2581—无6181

定价：0.76 元

前 言

在我国，陶瓷滤波器只有十多年的历史，但已广泛使用。

陶瓷滤波器具有许多优点，但人们对它的认识却经历了一段时间。在六十年代后期，陶瓷滤波器才刚刚研制出来，由于当时对它的特性未能深入研究，其成品尚不成熟。在现场使用常常发生特性变化等问题。对陶瓷滤波器的进一步研究是从七十年代初开始的。这方面的工作，包括压电材料的试验、滤波器电路的设计、稳定性和可靠性试验，以及生产工艺的研究等，都陆续地取得了显著的成绩。最近几年，一些特性很好，稳定性很高的陶瓷滤波器已进入使用现场。实际情况表明，陶瓷滤波器的许多优点和特点是其它电气滤波器所没有的。目前，陶瓷滤波器已广泛应用于通信、导航、电视以及电子仪器等设备中。

本书的头两章介绍了陶瓷滤波器的一般概念，并概括地叙述了压电陶瓷的基本理论。第三至第五章详细介绍了陶瓷滤波器的设计原理、方法和步骤，并推导了计算公式。接着的两章，专门介绍陶瓷滤波器稳定性设计原理，温度补偿理论和方法，并推导了必要的设计公式。可靠性问题已成为现代电子设备的突出问题，本书第八章讨论了陶瓷滤波器的可靠性试验设计，试验数据处理及提高陶瓷滤波器可靠性的途径等问题。后面的三章是关于陶瓷滤波器的结构、测量和生产制造中要解决的一些问题，最后一章列举了设计实例。

本书的主要内容曾在国内有关杂志上发表过，发表前

到中山大学郑曾同教授的指导，广东邮电科研所林汉强工程师和余健泉工程师也曾提过有益的意见。本书的初稿完成后，邮电部523厂杨熙亮副总工程师和南京邮电学院欧阳明教授对书稿又提供了许多有益的意见。四机部七九八厂设计研究所主任李远工程师对本书的内容和结构提出了十分有益的建议，而且对本书进行了细致的校审，在此一并表示感谢。

本书错误之处，敬请批评指正。

蔡远祥

1980.3.

目 录

第一章	陶瓷滤波器的基本概念	(1)
§ 1.1	概述	(1)
§ 1.2	压电陶瓷谐振体	(4)
§ 1.3	陶瓷滤波器的种类	(8)
§ 1.4	陶瓷滤波器常用术语和主要的特性要求	(10)
第二章	压电陶瓷材料	(14)
§ 2.1	压电陶瓷的结构和电畴	(14)
§ 2.2	压电陶瓷的相图	(17)
§ 2.3	压电陶瓷材料的改性	(21)
第三章	陶瓷带通滤波器设计	(26)
§ 3.1	陶瓷梯型带通滤波器	(26)
§ 3.2	桥型及差接桥型滤波器	(46)
§ 3.3	单片式陶瓷滤波器	(49)
§ 3.4	陶瓷均衡器	(53)
第四章	陶瓷带阻滤波器设计	(58)
§ 4.1	陶瓷带阻滤波器的构成原理	(58)
§ 4.2	陶瓷梯型带阻滤波器特性分析	(60)
§ 4.3	Π 型带阻滤波器的计算	(66)
第五章	采用电容器与谐振体混合结构的陶瓷滤波器	(70)
§ 5.1	电容器与谐振体构成滤波器	(70)
§ 5.2	谐振体串电容和并电容的等效计算	(73)
第六章	陶瓷带通滤波器阻抗选择与稳定性的关系	(77)
§ 6.1	阻抗变化率及阻抗极点的频率位置	(78)

§ 6.2	Z_T 和 Z_π 变化速率的比较	(85)
§ 6.3	因阻抗失配引起的通带波动及阻抗型式的选择	(87)
第七章	陶瓷滤波器的温度补偿	(93)
§ 7.1	陶瓷滤波器衰耗特性变化与温度的关系	(94)
§ 7.2	温度补偿的原理和方法	(103)
§ 7.3	补偿参数和元件值的计算	(106)
第八章	陶瓷滤波器的可靠性	(113)
§ 8.1	陶瓷滤波器的可靠性试验	(114)
§ 8.2	可靠性计算	(120)
§ 8.3	陶瓷滤波器的失效形式、失效机理和提高可靠性的途径	(128)
第九章	陶瓷谐振体尺寸的计算和滤波器的装配结构	(137)
§ 9.1	陶瓷谐振体的振动模式	(137)
§ 9.2	谐振体几何尺寸的计算	(143)
§ 9.3	陶瓷滤波器的装配结构	(144)
第十章	陶瓷谐振体参数和滤波器特性的测量	(148)
§ 10.1	参数的测量	(148)
§ 10.2	特性的测量	(150)
第十一章	陶瓷滤波器的质量因素	(156)
§ 11.1	陶瓷谐振体的陈老处理	(156)
§ 11.2	陶瓷谐振体的寄生频率筛选	(160)
§ 11.3	谐振体静电容 C_0 的实现方法	(161)
§ 11.4	阻带掉点及其解决办法	(162)
§ 11.5	改善通带特性的方法	(163)
§ 11.6	陶瓷滤波器成品的陈老稳定处理	(164)
第十二章	陶瓷滤波器的设计举例	(166)
§ 12.1	话路陶瓷带通滤波器设计实例	(166)

§ 12.2 陶瓷带阻滤波器设计实例	(183)
§ 12.3 农话载波机话路陶瓷滤波器设计实例	(185)
附录 I 压电陶瓷的制造工艺	(191)
附录 II 陶瓷滤波器应用举例	(200)

第一章 陶瓷滤波器的基本概念

§ 1.1 概 述

自从一九一七年第一只LC滤波器问世以来，滤波器已经有六十年的历史。现在，它的种类繁多。实用中主要有：LC滤波器、晶体滤波器、机械滤波器、陶瓷滤波器、有源滤波器及数字滤波器等。

LC滤波器是由电感和电容元件组成的最古老的滤波器。从一九一七年开始应用，至今，它的理论和设计方法已经相当完整。LC滤波器的最大优点是相对频宽 $\Delta F/F$ 大，组合也比较灵活，能按不同的功能构成低通、高通、带通、带阻等各种滤波器。缺点是体积大、重量重、Q值不高（一般 <600 ）和选择性不够高等。它在某些方面的应用，已逐步被其它滤波器所取代。

晶体滤波器于一九三五年开始出现，它由压电晶体元件构成。压电晶体的Q值可高达 10^5 以上，因此，做出的滤波器具有异常陡峭的衰减特性，这正是晶体滤波器的突出优点。它的另一优点是稳定性高。晶体的频率温度系数可达 $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 的数量级，而电感的温度系数一般只有 $1 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ 。由于这些优点，晶体滤波器迅速地在高频和其它要求选择性高的领域取代了LC滤波器。晶体滤波器的缺点是相对频宽很小，其上限约为0.5%左右。如果要加宽通带，就得加展宽电感线圈。这样一来，就大大失去了晶体滤波器的特色，使体积和成本增

大，而特性降低。其次，晶片的切割制造工艺较复杂，晶体材料稀有而且价格昂贵。由于这些缺点，晶体滤波器主要用在带宽要求较窄，过渡带特性要求陡峭的地方，应用范围受到一定的限制。

机械滤波器的历史要比晶体滤波器短十年，但由于机械加工工业的迅速发展，这种滤波器在国外发展得很快。构成机械滤波器的基本元件叫机械振子，振子的 Q 值可达 10^4 之高，温度系数也可以达到 $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 的数量级。因此制成的滤波器也具有很陡峭的频率衰耗特性。这些是它的优点。缺点是加工精度要求高，电路变换不灵活，不同品种的滤波器要求不同尺寸的机械振子，而不同的振子又要有不同的冲模。因此，一个新品种的滤波器从设计到投产周期长。另外，其体积较大、较重而且还要有换能器和 LC 匹配滤波器节等。

数字滤波器是一种有源滤波器，从它的第一个论文发表到现在，也有三十年的历史了。这种滤波器比较复杂，用到模拟电路时，首先要经一个模数转换装置将模拟信号转换成数字信号（一般为二进制信号），然后用电子计算机对传输函数进行运算，再通过数模转换装置将数字信号重新转换成模拟信号，最后通过恢复装置把信号复原。这种滤波器的优点是精度高，且随着集成电路的发展，其造价可望逐步降低，从长远的观点看，它有可能在一些领域获得优势。但由于其技术复杂，造价较高，目前尚未得到推广。

有源滤波器是从五十年代开始出现的，目前种类也不少，有采用 RC 反馈放大器式的，有采用负阻变换式的，还有采用回转器式的等等。它的主要优点是体积小，尤其在低频段，与 LC 滤波器比较有更明显的优越性。但它的弱点比较多，主要是稳定性不高、有附加杂音和可用的频带上限不高等。因此，

这种滤波器的实际使用范围还较小。但在甚低频领域，近年来发展很快。

与上述滤波器比较，陶瓷滤波器差不多是最年轻的一个，和有源滤波器一样，它是从五十年代才出现的一种新器件。这种滤波器的基本元件是压电陶瓷谐振体，谐振体的 Q 值大致为50~6000左右。这种滤波器的优点是体积小、重量轻、造价低等。

陶瓷滤波器的另一个优点是相对带宽范围比较大，上限可达20%，远比晶体滤波器为大，其下限加电容后可达0.02%，这又是 LC 滤波器无法达到的。但这种滤波器的缺点是，稳定性和可靠性不够好，还有待提高。今后研究工作的重点是：①瓷料方面，在进一步提高频率温度稳定性的同时，着重提高 Q 值温度稳定性；②工艺方面，要把实现生产自动化作为一个紧迫的目标，以便大幅度降低成本，使陶瓷滤波器成本低的优点更加突出；③改进产品结构，提高陶瓷滤波器的机械性能；④进一步寻找元、器件陈老、储存和筛选的最佳方法，彻底解决时间稳定性问题，并提高可靠性。

综上所述，各种滤波器都有自己的优点和缺点。目前看来，在相当一段时期内，不可能出现某种滤波器取代其它全部滤波器的局面，相反地，可能是相互并存，互相补充，而各有自己比较优越的应用领域。

§ 1.2 压电陶瓷谐振体

(一) 压电效应

经过极化处理的陶瓷片，在其内部有以电偶极矩形式出现的极化强度，在陶瓷片的一端出现正束缚电荷，在另一端出现负束缚电荷。在束缚电荷的作用下，陶瓷片的电极面上吸附了一层来自外界的自由电荷如图1-1a所示。若给极化了的陶瓷片沿极化方向施加一个压力 T_3 ，陶瓷片将出现压缩变形，片内的正、负束缚电荷之间的距离变小，极化强度也减少，于是，原来吸附在电极上的自由电荷，将有一部分被释放而出现放电现象如图1-1b所示。当压力去除后，陶瓷片恢复原状，片内的正、负束缚电荷之间的距离又变大了，极化强度也变大，电极上重又吸附一部分自由电荷而出现充电现象。这种由机械能转变为电能的现象，称为正压电效应，可用下式表示：

$$D_3 = d_{31}T_1 + d_{32}T_2 + d_{33}T_3,$$

$$D_2 = d_{15}T_4$$

$$D_1 = d_{15}T_5$$

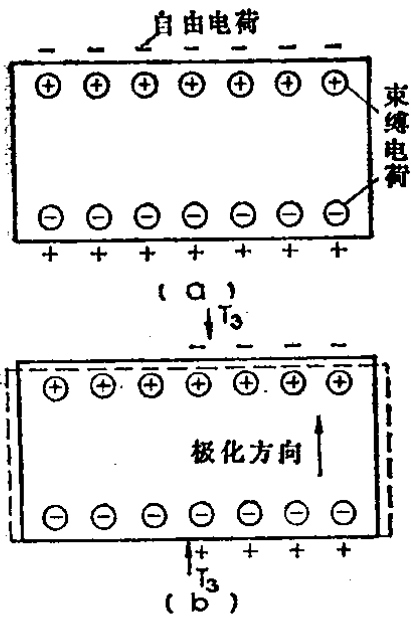
式中， D 为电位移（库仑/米²） D 的下标表示电位移的方向； T 为应力（牛顿/米²）； d 为压电常数（库仑/牛顿）或（米/伏）。压电常数脚标的第一个字表示电场或电位移的方向，第二个字表示应力或应变的方向。例如 d_{31} 表示电场的方向为3，应变的方向为1。

正压电效应还可用另一组式子来表示：

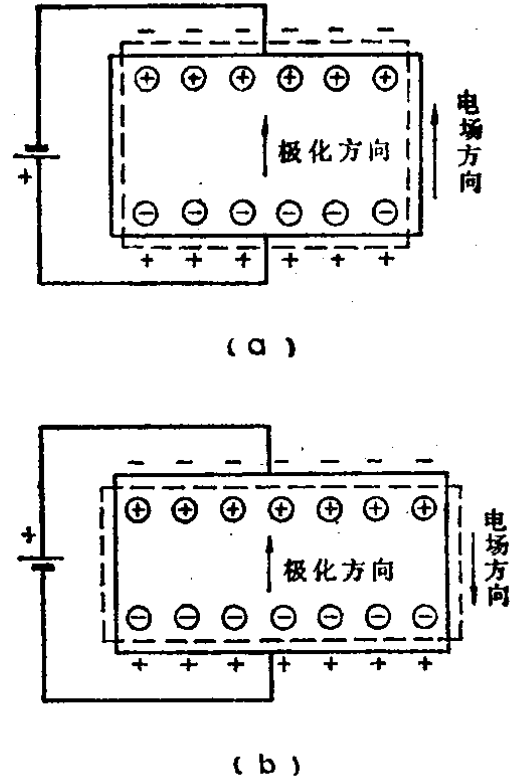
$$E_3 = -(g_{31}T_1 + g_{32}T_2 + g_{33}T_3)$$

$$E_2 = -g_{21}T_4 = -g_{15}T_4$$

• 4 •



(a) 未施加压力前，电极上吸附着自由电荷
 (b) 施加外力后出现放电现象
 图 1-1 正压电效应示意图

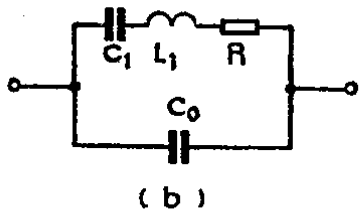


(a) 沿极化方向产生伸长的变形
 (b) 沿极化方向产生缩短的变形
 图 1-2 逆压电效应示意图

$$E_1 = -g_{15} T_5$$

式中， E 表示电场强度（伏/米），下标表示场强的方向。 g 为压电常数（伏·米/牛顿），下标的第一个字为电场方向，第二个字表示应力方向，如 g_{31} 表示电场方向为3，应力方向为1。

反之，若在陶瓷片上加一个与极化方向相同的电场，这将使极化强度增大，于是，陶瓷片内的正负束缚电荷之间的距离也就增大，陶瓷片沿极化方向产生伸长的变形，如图1-2(a)所示。如果外加电场的方向与极化方向相反，则陶瓷片出现沿极化方向缩短的变形，如图1-2(b)所示。这种由电能转变为机械能的现象，称为逆压电效应。



(a)符号 (b)等效电路

图 1-3 压电陶瓷谐振体

一般把具有压电效应的陶瓷片称为压电陶瓷谐振体。陶瓷谐振体通常用图1-3(a)的符号表示，图1-3(b)是它的等效电路。

(二)陶瓷谐振体的主要参数

陶瓷谐振体的主要参数有

1. 机电耦合系数 K

机电耦合系数是谐振体的一个重要参数，它的定义是：以机械应力的形式在压电陶瓷内部储存起来的能量与输入的总电能之比的平方根：

$$K = \sqrt{\frac{\text{电能转换的机械能}}{\text{输入的电能}}} \quad (1-1)$$

2. 频率常数 N

压电陶瓷谐振体的谐振频率与沿振动方向的尺寸之乘积为一常数，此常数称为频率常数。根据定义，当 N 已知时，如果待求的谐振频率为 f_s ，则长条谐振体的长度 l 为：

$$l = \frac{N_{31}}{f_s} \quad (1-2)$$

3. 机械品质因数 Q_m

机械品质因数表示谐振体在谐振时，机械损耗的大小，是衡量压电陶瓷材料性能的重要参数之一。用 Q_m 大的压电谐振体制作的陶瓷滤波器，在节数相同的情况下，插入损耗较小，选择性较好。机械品质因数可以通过下式求出：

$$Q_m = \frac{1}{2\pi RC_0} \cdot \frac{f_s}{f_p^2 - f_s^2} \quad (1-3)$$

式中： R ——谐振体的等效串联电阻(欧)；

C_0 ——谐振体等效静电容(法)；

f_p ——谐振体并联谐振频率(赫)。

4. 静电容 C_0 。

静电容反映出压电材料介质常数的大小，它是直接影响滤波器阻抗水平的重要参数，是设计滤波器时需要认真计算的一个量。 C_0 的大小，与材料配方、制造工艺，尤其是与谐振体的几何尺寸有关（ C_0 值与它的面积成正比，与其厚度成反比）。

5. 相对频宽

谐振体的相对频宽与滤波器的相对频宽是两回事，滤波器的相对频宽是指滤波器的带宽与中心频率 f_0 之比；而谐振体的相对频宽是并联谐振频率 f_p 与串联谐振频率 f_s 之差（ $f_p - f_s$ ）与串联谐振频率 f_s 之比。它的大小与材料的配方、制造工艺及振动模式等有关。长条谐振体的振动模式还与振子的长宽比的大小有关。

6. 阻抗 Z

一只陶瓷谐振体相当于一个 LC 二端网络，其等效阻抗 Z 可近似用下式表示：

$$Z = \frac{1}{j\omega C_0} \cdot \frac{f_s^2 - f^2}{f_p^2 - f^2} \quad (1-4)$$

式中， f 为工作频率。

由上式看出，当 $f = f_s$ 时，阻抗出现一个零点；当 $f = f_p$ 时，阻抗出现一个极点。如图

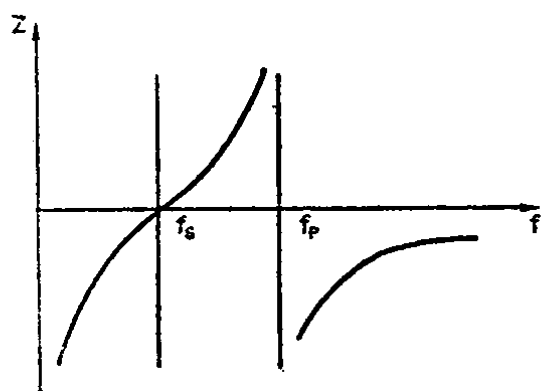
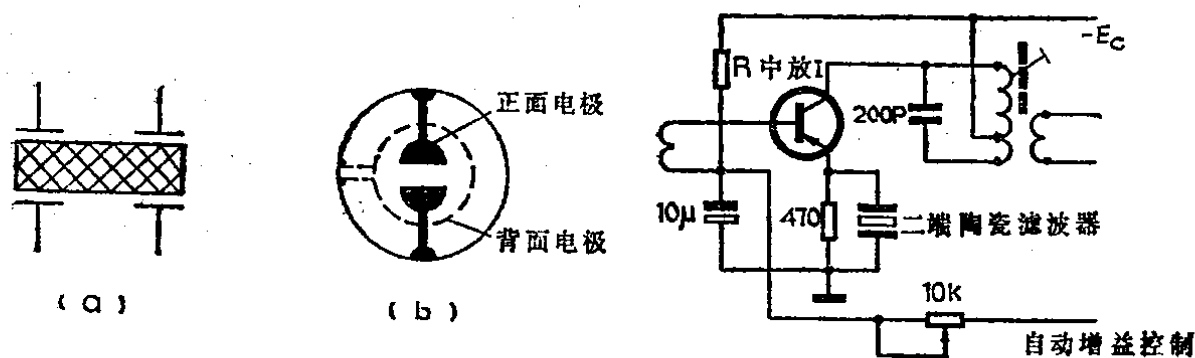


图 1-4 陶瓷谐振体阻抗曲线

1-4所示。

§ 1.3 陶瓷滤波器的种类

陶瓷谐振体用于滤波器时，大多数是接成二端式的，也有一些是接成四端式的（或三端式的）。有三个或四个端子的谐振体，实际上就构成了一只滤波器（等效于桥型电路），如图1-5所示。这种用一只谐振体构成的滤波器叫作单片式滤波器。在低频和某些高频领域常常用到它。



(a) 四端式（适用于低频）

(b) 三端式（适用于高频）

图 1-5 单片陶瓷滤波器

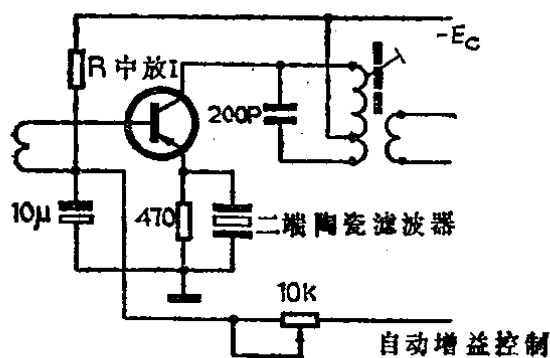


图 1-6 二端式谐振体应用在放大电路中

因为一个二端式的压电陶瓷谐振体对信号频率有选择作用，所以，当把它接在某些电路中时有滤波作用。图1-6是接在半导体收音机中频放大器发射电路中的情形，这里，我们只把它看作是起滤波作用的二端振子，有时也称它为二端式滤波器。

当把二端式的压电陶瓷振子连接成四端网络的形式时，就构成通带中具有纯电阻的滤波器。我们通常指的滤波器都是这种滤波器（当然也包括上面说的三端或四端式的单片滤波器）。

陶瓷滤波器按其结构分成 Γ 型、T 型、 Π 型、桥型以及差接桥型等，如图1-7所示。

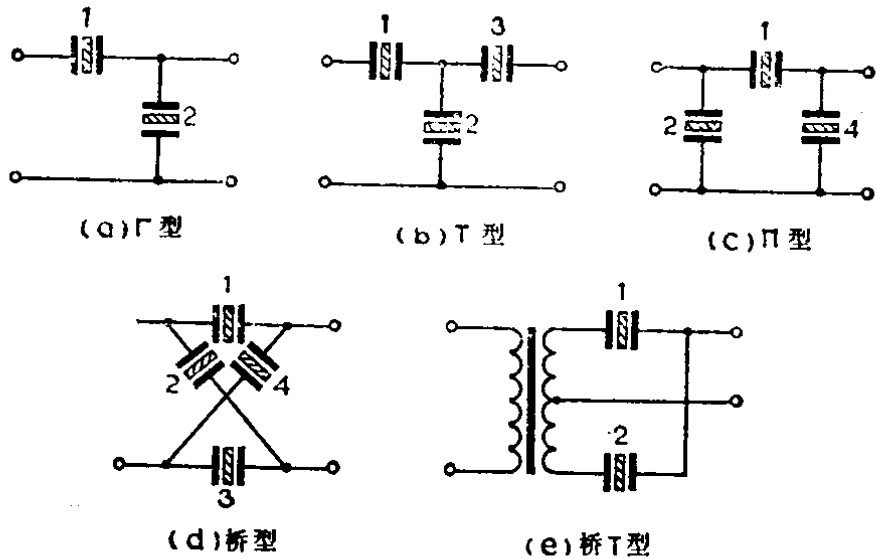


图 1-7 陶瓷滤波器电路结构

一般把 Γ 型、 T 型、 Π 型滤波器统称为梯型滤波器， Γ 型叫基本半节，由两个基本半节按不同方向连起来，就得到 T 型和 Π 型两种结构。 T 、 Π 型滤波器的衰耗特性是一样的（图1-8），但阻抗特性相差很远。

桥型电路的通带可以做得较宽，但要求元件的精度高，一般阻带防卫度难做得高，而且需要较多的谐振体，故很少采用。

差接桥型电路是由桥型电路等效变换来的，需外加变压器，在要求带宽特别宽的高频滤波器中常常要用到。

陶瓷滤波器按用途可分为带通、带阻、高通、低通四种。其中带通滤波器用得最广泛，根据通带宽度的不同还有许多不同的品种。高通、低通陶瓷滤波器目前都还用得不多，因为它需要加入电感。但对于某些要求较高的宽频带通滤波器，也可

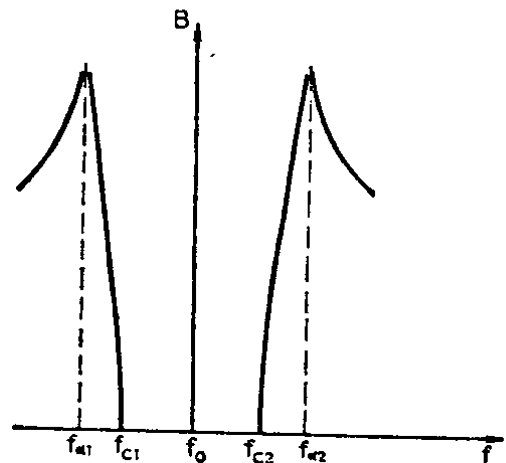


图 1-8 陶瓷梯型滤波器衰耗特性

以用陶瓷高通、低通滤波器组合构成。

陶瓷滤波器按使用频率可分为音频（3千赫以下）、甚低频（3—30千赫）、低频（30—300千赫）、中频（300—3000千赫）、高频（3—30兆赫）及甚高频（30兆赫以上）。音频滤波器的中心频率下限目前一般能达到500赫左右，甚高频滤波器的中心频率上限目前一般能达到70兆赫左右。

§ 1.4 陶瓷滤波器常用术语 和主要的特性要求

（一）陶瓷滤波器常用的术语有

1. 标称频率。滤波器中心频率的标称值，即在产品上标志的频率。

2. 截止频率。在通带边界上，相对衰耗达到某规定值的通带频率。

3. 中心频率。带通和带阻滤波器两个截止频率的几何平均值，即

$$f_0 = (f_{c1} f_{c2})^{\frac{1}{2}}。$$

式中： f_0 ——中心频率；

f_{c1} ——下截止频率；

f_{c2} ——上截止频率。

4. 带通滤波器的通带宽度 Δf ：衰耗为某一规定值的频率点之间的频率间隔。

5. 带阻滤波器阻带宽度 Δf_z 。衰耗为某一规定值时的频率点之间的频率间隔。