



晶体滤波器的理论与计算

周承联编著 · 人民邮电出版社出版

晶体滤波器的理论与计算

周承联 编著

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书的主要内容是按滤波器的分析法设计和综合法设计,分别介绍晶体窄带、带阻、带通(宽带通)滤波器计算公式的理论推导和设计方法。并以常用的晶体滤波器为例,就上述公式进行了归纳,具体地对每一种滤波器的设计步骤做了详细计算。除第一章主要是介绍晶体谐振器外,二、三、四、五、六章分别介绍分析法设计晶体窄带、带阻、宽带通、高低通滤波器计算公式的理论推导和设计实例。七、八、九、十章则是分别介绍综合法设计晶体窄带、带通、带阻滤波器计算公式的理论推导和设计实例。在设计实例中还介绍了各种晶体滤波器的调测方法和部分的工艺要求。本书可供滤波器设计人员,通信院校师生阅读,也可供具有一定网络基础理论知识的同志学习时参考。

晶体滤波器的理论与计算

周承联 编著

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

天津市第一印刷厂印刷

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 1978年4月 第一版

印张: 10 20/32 页数170 1978年4月天津第一次印刷

字数: 244千字

印数: 1—17,200册

统一书号: 15045·总2204·有580

定价: 1.00元

出版说明

在伟大领袖和导师毛主席的无产阶级革命路线指引下，我国的邮电通信事业得到了迅速发展，在载波通信技术方面积累了不少经验。为了实现通信现代化，赶超世界先进水平。我们十分希望从事这方面工作的同志，运用理论联系实际的方法，把实践的经验总结出来，广为交流，为促进载波技术的发展，为我国实现通信现代化作出贡献。

《晶体滤波器的理论与计算》一书，就是作者根据滤波器设计的理论、分析总结设计制做晶体滤波器的经验编写而成。在内容上，对晶体滤波器设计的理论和各种常用晶体滤波器的计算方法，都做了详细介绍。同时用载波机中的晶体滤波器为例做了实际计算，便于读者应用。书末附有主要符号名词索引和参考资料目录供阅读时查阅。这是一本理论联系实际的书，我们把它推荐给读者，供同志们在设计制做晶体滤波器时参考。

目 录

第一章 晶体滤波器和晶体谐振器	1
1-1 概述	1
1-2 压电效应和晶体谐振器的等效电路	2
1-3 石英晶体的切割类型和它们的应用范围	5
1-4 石英晶体谐振器尺寸的计算	6
1-5 石英晶体谐振器电气参数的测量	15
1-6 四极晶体谐振器及其等效电路	19
第二章 晶体滤波器的分析法设计	22
2-1 桥型晶体窄带滤波器	23
2-1-1 单节桥型双晶体窄带滤波器	23
2-1-2 单节桥型四晶体窄带滤波器	33
2-1-3 双节桥型双晶体窄带滤波器	46
2-1-4 双节桥型四晶体窄带滤波器	51
2-2 π 型晶体窄带滤波器	55
2-3 损耗对晶体窄带滤波器通带的影响	64
2-4 晶体窄带滤波器匹配半节的计算	66
2-5 差接桥型晶体窄带滤波器	71
第三章 晶体带阻滤波器	82
3-1 桥型晶体带阻滤波器	82
3-2 低通型带阻滤波器	94
3-3 低阻抗低通型带阻滤波器	105

第四章	宽带通晶体滤波器	112
4-1	桥型宽带通晶体滤波器	112
4-2	梯型宽带通晶体滤波器	125
第五章	梯型晶体低通和高通滤波器	151
第六章	晶体滤波器的分析法设计实例	160
6-1	晶体窄带滤波器的设计实例	160
6-2	晶体带阻滤波器设计实例	168
6-3	晶体宽带通滤波器设计实例	175
第七章	晶体滤波器的综合法设计	203
7-1	差接桥型晶体窄带滤波器	203
7-1-1	差接桥型双晶体窄带滤波器	210
7-1-2	差接桥型三晶体窄带滤波器	215
7-1-3	差接桥型四晶体窄带滤波器	218
7-1-4	差接桥型六晶体窄带滤波器	221
7-1-5	差接桥型八晶体窄带滤波器	224
7-2	梯型晶体窄带滤波器	244
第八章	差接桥型及桥型晶体带通滤波器	253
8-1	直接综合法	253
8-2	低通函数转换综合法	264
第九章	桥 T 型晶体带阻滤波器	284
第十章	晶体滤波器综合法设计实例	294
10-1	晶体窄带滤波器设计实例	294

10-2 晶体带阻滤波器设计实例	305
10-3 晶体带通滤波器设计实例	313
附录 I 交叉定理	324
附录 II 诺顿变换	327
主要符号名词索引	331
参考资料目录	333

第一章 晶体滤波器和晶体谐振器

1-1 概述

随着通信技术的发展，对电气滤波器的要求，特别是在稳定性和选择性方面的要求愈来愈高了。从电信网络的理论可知，带通滤波器的通带衰减是与元件的品质因数 Q 及频带宽度成反比的。因此，要在高频时设计制造滤波器，就需要使用品质因数较高（即 Q 值较高）的元件。实践告诉我们，制做一个性能比较满意的滤波器，如果希望设计和生产不太困难的话，就要求元件的品质因数

$$Q > (20 \sim 25) \frac{f_0}{\Delta f}, \quad (1-1)$$

其中 f_0 为通带中心频率， Δf 为带宽。

从公式(1-1)可见，在通带宽度相同的条件下，为了使滤波器的衰减频率特性具有相同的陡度，中心频率高多少倍， Q 值就需要高多少倍。例如在做一个80千赫的窄带滤波器时，如果它的通带宽度为100赫，那末根据上述公式，就要求品质因数

$$Q > (20 \sim 25) \frac{80 \times 10^3}{100} = 16000 \sim 20000$$

这样高的 Q 值，对于一般的铁心线圈来说，是无法达到的。因此，就需要使用压电晶体。压电晶体除了具有高稳定的物理化学性能外，还因具有弹性振动损耗极小，而品质因数可达数百万这一可贵的特点，用它制作的滤波器，除了可以用在

高频率外，还可使滤波器十分稳定，从而实现带宽很窄的滤波器。

1-2 压电效应和晶体谐振器的等效电路

自然界有很多晶体具有很大实用价值的电气机械性能，也就是当我们压缩或拉长晶体时，在它的表面就产生电荷，并且当力的方向改变时，电荷的符号也随着改变，这种现象叫做压电效应。具有压电效应的晶体很多，天然的有石英、电石等；人工的有钽酸锂、酒石酸钾钠盐、酒石酸钾、酒石酸乙烯二胺、磷酸氨、钛酸钡陶瓷和锆钛酸钡等。

压电晶体有三个互相垂直的轴，即通过晶体两顶端的轴线称为光轴（Z轴），与光轴垂直且通过晶体横截面六边形六个角的两条轴线称为电轴（X轴），与光轴垂直且与晶体横截面六边形六条边垂直的三条轴线称为机械轴（Y轴）。

电轴X表示压电晶体的电气性能。当压力作用在晶体电轴时，晶体表现出最大的压电效应。压电效应的产生是由于晶体的晶格在压力的作用下发生形变。以石英晶体为例（见图1-1），平时它在电气上是中性的，如图1-1（b），图中连接相同电荷的线形成一个等边三角形，两个三角形的中心是重合的，因而对外表现为中性。如果在X轴方向加一压力，如图1-1（c），电荷便产生位移，每组电荷的中心向相反方向移动，形成一个偶极子，从而在晶体表面产生电荷。反过来，如果在X轴方向拉长晶体，如图1-1（d），则产生相反的电荷。

由石英晶体或其他晶体切出的晶体片，它们和X、Y、Z轴的夹角不同时，具有的电气性能也不相同。因此，为了得到必需的电气特性，就需要对晶体进行各种不同的切割加工。

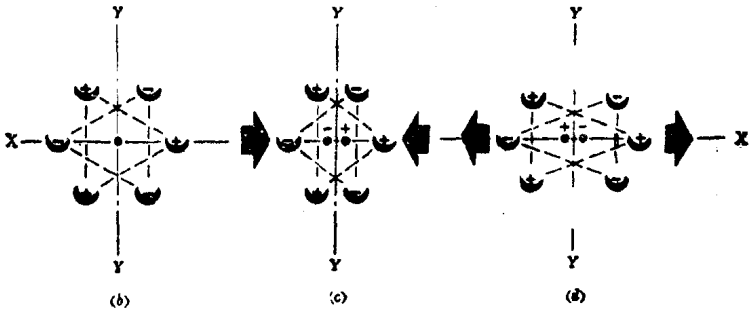
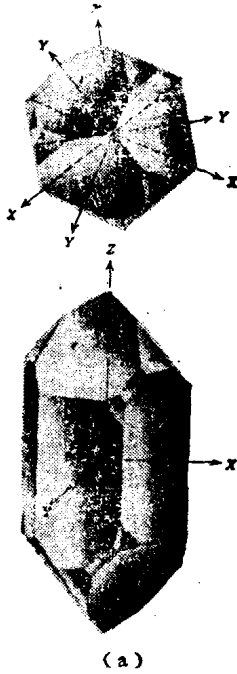


图1-1 石英晶体及其分子模型

压电晶体还具有与上述效应相反的效应，即在晶体的表面加上一个交流电场，在交流电场作用下，晶体体积将产生压缩和伸张的变化，形成机械振动，这种振动的幅度很小，它的频

率等于激励电场的频率。晶体振动时，在它的表面就产生交变电荷，结果在电路中就会产生交变电流。这时，由于压电效应晶体就产生某种电纳的作用，这种电纳叫做压电电纳，它和介电体引起的电纳是不同的。像所有弹性体一样，压电晶体具有惰性，即具有固定的振动频率，这个频率决定于晶体片的尺寸和弹性。当外加电场的频率等于晶体片的固有振动频率时，晶体片振动的幅度最大，压电效应在晶体片表面产生的电荷数量和压电电纳也最大，这时外电路中的电流也最大。因此，晶体片的机械振动在外电路中表现为电压谐振（串联谐振）。当外加频率远离晶体片的固有谐振频率时，晶体片就好象一个电容。所以，我们可以用图1-2(b)所示的等效电路来表示晶体谐振器的电气特性。它相当于在LCr串联电路上并联一个电容 C_0 。

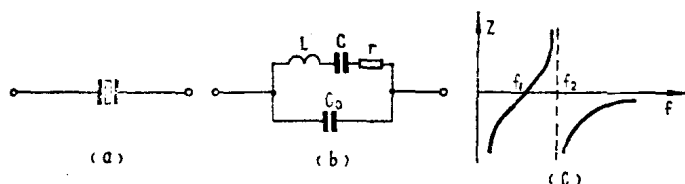


图1-2 压电晶体等效电路和频率特性

电容 C_0 是晶体谐振器电极间的静电容。L和C代表它的动态电感和动态电容，r代表晶体损耗的等效电阻。

由电信网络理论可知，在忽略损耗（由于晶体谐振器的Q值很高，一般在设计计算时可不考虑）的情况下，这个电路有一个串联谐振频率 f_1 和一并联谐振频率 f_2 ，并且

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}; \\ f_2 &= f_1 \sqrt{1 + \frac{C}{C_0}} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

由上述公式可知， f_2 和 f_1 之间的间隔取决于比值 C/C_0 。根据切割型式和振动型式不同，石英晶体的比值 C/C_0 在0.16%到0.8%之间，因而 f_2 和 f_1 之间的间隔约为0.08%到0.4%。对于人造晶体来说，酒石酸钾的间隔约为2.2%，酒石酸乙烯二胺的间隔约为1.35%到1.8%，磷酸氨的间隔约为3.7%到6.7%。

1-3 石英晶体的切割类型和它们的应用范围

近年来，由于提高了人造石英晶体的培养工艺，生长出的人造石英，其质量已达到天然石英的水平，加以成本低，加工

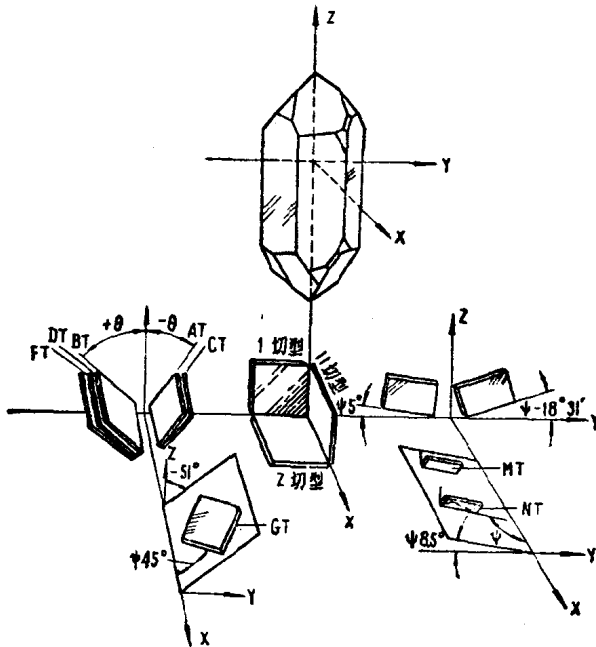


图1-3 常用的石英晶体切割类型

方便，目前在滤波器中几乎只使用石英晶体。

通常我们是根据不同的电气特性要求，从不同的角度来切割石英晶体。切割的类型很多，常用的有 $+5^\circ$ 、 -18.5° 、MT、NT、AT、BT、CT、DT、FT、GT等切型。图1-3表示了滤波器中常用切割对晶体轴的定向。

不同切割类型的石英晶体用在不同的频率范围。频率低于50千赫时，通常使用扭曲振动，切割的型式是NT和 $+5^\circ$ 。50到150千赫，往往使用 $+5^\circ$ 长度伸缩振动和MT长度伸缩振动的切型。频率高于150千赫低于500千赫时，如果仍使用一般的长度伸缩振动，则晶体尺寸太小，不仅制造困难，而且也不稳定，因而一般使用CT、或GT及 $+5^\circ$ 切割的二次泛音和三次泛音晶体。频率高于500千赫低于1兆赫时，采用HT切割或边比 ρ 为0.20~0.25及0.32~0.38的长方形DT切割片。频率高于1兆赫时，采用厚度切变振动型的AT或BT切割，为了减少寄生谐振频率，这种切型的晶体片都做成圆形的。

1-4 石英晶体谐振器尺寸的计算

石英晶体的切割方位及振动型式，是根据对滤波器提供的要求来选定的。一般对滤波晶体提出的要求是频率温度系数小；寄生谐振频率应尽可能远离主谐振频率，其幅度要小；Q值高；等效电感尽可能小等等。选定了所用的切割方位和振动型式后，即可根据谐振频率和电感来计算晶体的尺寸。

晶体的几何尺寸和等效参数之间，有着严格的关系。这个关系由切割方位及振动型式决定。

对于长度伸缩振动见图1-4，它们之间的关系表达式如下

$$\left. \begin{aligned}
 \text{长度 } l &= \frac{K_f}{f} \quad (\text{毫米}); \\
 \text{宽度 } w &= \rho l \quad (\text{毫米}); \\
 \text{厚度 } t &= \frac{L}{K_L} \cdot \rho \quad (\text{毫米}).
 \end{aligned} \right\} (1-3)$$

式中 K_f ——频率常数, 单位为千赫-毫米(kHz-mm);
 K_L ——电感常数, 单位为亨/毫米(H/mm);
 L ——等效电感, 单位为亨(H)。

图1-5给出了+5°长度伸缩振动时频率常数 K_f 和边比 ρ 之间的关系,图1-6给出了+5°长度伸缩振动时频率温度系数(TCF)和边比 ρ 之间的关系。

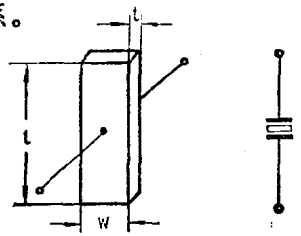


图1-4 长度伸缩振动晶体

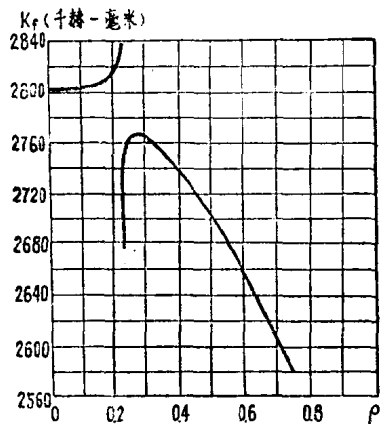


图1-5 +5°长度伸缩振动晶体 K_f - ρ 曲线

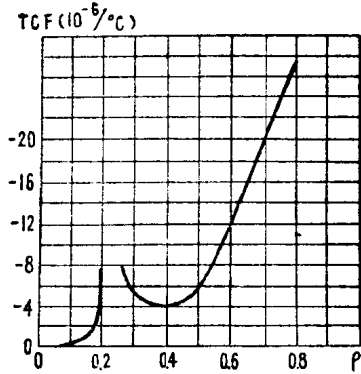


图1-6 +5°长度伸缩振动晶体TCF- ρ 曲线

在设计4千赫至50千赫的晶体谐振器时，采用扭曲振动见图1-7，这时晶体的几何尺寸和电气参数大致有下列的关系

$$\left. \begin{aligned}
 \text{长度 } l &= \frac{K_{f1}}{f} \quad (\text{毫米}); \\
 \text{宽度 } w &= \rho l \quad (\text{毫米}); \\
 \text{厚度 } t &= \frac{L}{K_{L1}} \quad (\text{毫米}).
 \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

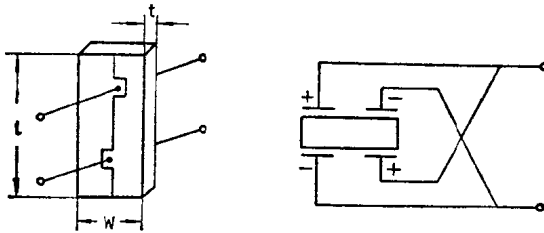


图1-7 扭曲振动晶体

在具体计算时，需要应用查曲线的方法确定晶体的几何尺寸。图1-8给出了+5°扭曲振动晶体谐振器频率常数 K_{f1} 和边比 ρ

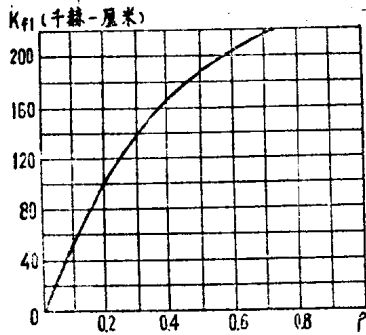


图1-8 +5°扭曲振动晶体 K_{f1} - ρ 曲线

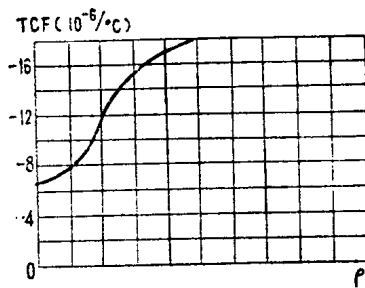


图1-9 +5°扭曲振动晶体TCF- ρ 曲线

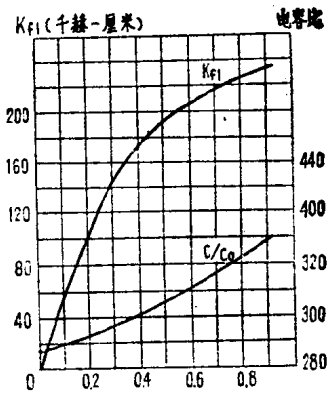


图1-10 NT切割扭曲振动 K_{f1} - ρ 曲线

之间的关系。图1-9给出了 $+5^\circ$ 扭曲振动晶体谐振体频率温度系数TCF与边比 ρ 之间的关系。图1-10给出了NT切割扭曲振动晶体谐振器频率常数 K_f 与边比 ρ 之间的关系。图1-11给出了单位厚度晶体电感常数和 ρ 之间的关系。以上这些曲线是用实验的方法绘制，在计算晶体谐振器的几何尺寸时是十分有用的。

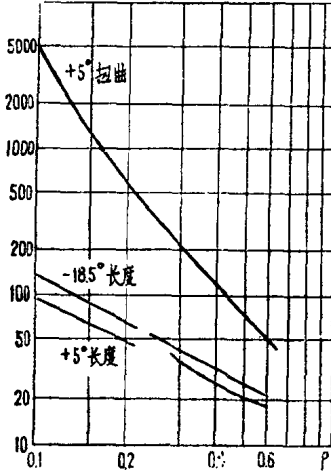


图1-11 单位厚度晶体 K_L - ρ 曲线

在150至300千赫这一频段内，考虑到晶体的几何尺寸应便于制造及工作稳定，采用了GT切割或 $+5^\circ$ 切割的二次泛音及三次泛音晶体。GT切割（见图1-12）和晶体的其它切型不同之处在于频率是由它的宽度来决定的。在这种情况下，晶体几何尺寸的计算公式为

$$\left. \begin{aligned}
 \text{宽度 } w &= \frac{K_f}{f} && (\text{毫米}); \\
 \text{长度 } l &= \frac{w}{\rho} && (\text{毫米}); \\
 \text{厚度 } t &= \frac{L\rho}{K_L} && (\text{毫米}).
 \end{aligned} \right\} (1-5)$$