

机 械 滤 波 器

(专题译丛)

中国人民解放军京字一八三部队

一九七二年十二月

机械滤波器

(专题译丛)

1972年12月出版

编辑者

天津第80号邮政信箱
中国人民解放军京字183部队

出版者

中国人民解放军京字183部队

前 言

机械滤波器作为带通滤波器，发展已有几十年的历史，由于其具有高选择性、高稳定性、高可靠性和体积小、重量轻、成本低等优点，在电子设备中已广为应用，从民用收音机以及载波电话、载波电报、单边带通讯、调频通讯、数据传输、频率合成技术、噪音分析装置、遥控遥测、袖珍振铃直到宇宙航行通讯装置等各个方面都有其踪迹可寻。随着电子工业的飞速发展，机械滤波器和机械振子将获得更为广泛的应用。

金属振子的机械滤波器的工作频带为 $50\text{Hz}\sim 600\text{KHz}$ ，相对带宽为 $0.1\sim 15\%$ ，其频率温度系数视结构而异，为 $1\sim 30\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ， $60\text{dB}/6\text{dB}$ 矩形系数为 $1.1\sim 5$ 。在上述范围内已经成功地部分取代了 LC 滤波器和晶体滤波器。

目前对于机械滤波器的研究不断向纵深发展，从理论研究到实际构成都有新的成果，例如有衰耗极点的结构，多重模式振动的利用，线性相移的获得，小型化及高性能化等等。遵照毛主席的“洋为中用”的教导，我们选择了部分文章凑成此集，仅供参考。文中谬误之处望同志们指正。

目 录

1. 机械滤波器进展述评·····	(1)
2. 机械滤波器总论·····	(28)
3. 高频机械滤波器·····	(44)
4. 低频机械滤波器·····	(57)
5. 机电滤波器的设计·····	(65)
6. 机械滤波器振子尺寸和容许外加电平·····	(77)
7. 采用粘接有压电陶瓷的横振振子的机械滤波器特性分析·····	(89)
8. 在12KHz到10MHz频率范围内实现信道机械滤波器的几种方法的比较 ·····	(103)
9. 小型中频机械滤波器·····	(113)
10. H型谐振器及其在音频遥测中的应用 ·····	(120)
11. 用附加耦合提高衰耗斜率的机械滤波器·····	(132)
12. 用机械方法任意选择衰耗峰的机械滤波器·····	(135)
13. 双谐振模式音叉滤波器·····	(145)
14. 压电音叉·····	(153)
15. 采用U形I形耦合子的低频机械滤波器 ·····	(162)
16. 话路机械滤波器·····	(169)

机械滤波器——进展述评*

Rober A. Johnson, Manfred Börner, Masashi Konno

摘要——本文评述了机电带通滤波器、谐振器和换能器的发展。讨论了由圆棒、圆片和弯曲模式方条谐振子以及磁致伸缩铁氧体和压电陶瓷换能器构成的各型中频和低频滤波器。对谐振子和换能器从它们的动态特性和材料特性方面进行了分析。文中还述及在实数频率与复数频率上实现衰减极点的一些方法。末节是对今后发展的展望。

引 言

自从Adler[1]、Roberts[2]和Doelz[3]的第一批实用的机械滤波器问世以来已经有二十多年了。在为音频通信设计的调幅和单边带接收机的中频级中，这些滤波器曾经满足了较高的选择性要求。现代接收机和电话通信设备不仅传送话音而且还要传递数据信息，因此就要求较低的通带波纹以及十分明确的和稳定的通带范围。此外，往往还要求较好的选择性和较低的损耗。

机械滤波器的发展过去一直是与通信工程师的要求保持着同一步伐的。例如，通带波纹要求为 $\angle 0.5$ 分贝的或60分贝/3分贝带宽比为1.3/1的滤波器都并非是不寻常的产品。包装尺寸也已缩小；一种10个极点的滤波器可以纳入一个1立方厘米的包装之中。此外，机械滤波器的频率下限现在是在声频频域；上限则已达到了 AJ 截割晶体的频域了。虽然机械滤波器的构想始于美国，然而在欧洲和日本现在正在进行着大量的发展工作。

由于Campbell和Wagner于1917年研制了电气带通滤波器[4]，从而引致了早期在使用机械元件来提供通带特性方面的兴趣。此后不久提出了有关某些簧—块系统(Spring-mass Systems)[5]的若干专刊，而Maxfield和Harrison在留声机录放设备方面[6]曾经进行了从实用器件的角度来说的最有意义的工作。图1所示是按照一种机电滤波器来设计的留声机的频率响应（以实线绘出的曲线）与当时可能得到的最佳的留声机之比较。同这些结果一样给人以深刻印象的是在随后的20年当中在为执行频率选择器件功能而设计的机械滤波器方面的工作却做得很少。

在1940年代早些时候，Mason继他在晶体滤波器设计方面的卓越的贡献之后研制了令人

*译自：IEEE Transactions on sonics and ultrasonics, vol. SU-18, No.3, July 1971, pp. 155—70.

颇感兴趣但未被广泛使用的机械滤波器（示于图2）〔7〕。该设计的某些主要特点是采用了压电换能器、分布参数元件半波长谐振子，以及一种产生衰减极点的耦合元件。

仅在几年之后就由Adler研制出了第一个实用的中频机械滤波器（示于图3a）。该滤波器利用了由短的细径导线耦合的半波长的板状谐振子。这些板状谐振子可以由并连的调谐电路表示，耦合线可以由串连电感器表示，如图3（b）等效电路所示。镍制的端板起着磁致伸缩输入和输出换能器的作用。

频率响应特性曲线都是平的（*monotonic*），即是没有有限的衰减极点。Adler的滤波器是大多数现代机械滤波器（在这些滤波器中分布参数谐振子是通过非谐振线来耦合的）的典型。在板一线型滤波器与最新型机械滤波器（图4a所示的单片或晶体机械滤波器）之间有显著的近似性。

由Beaver和Sykes〔8〕以及Nakazawa〔9〕研制的石英机械滤波器，利用了陷能结构，在每对电极之下建立了驻波。在各个电极之间的区域内声波按指数衰减，各个有电极的区域作用有如谐振子，各个无电极区域作用有如耦合件。板一线型机械滤波器与示于图4(b)的石英机械滤波器的等效电路，除板一线型滤波器的输入和输出电容器为线圈所取代而外，其余都是相同的。单片式滤波器也具有平的频率响应特性。类似于上述单片式滤波器的一种结构已由Börner和Schüssler〔10〕所采用。

滤波器的各种基本结构

平的设计

继Adler研制的板一线型机械滤波器之后，不久Doelz就研制出园片-导线型滤波器〔11〕，示于图5(a)。园片-导线型滤波器利用了园片谐振子的弯曲振模。两种最通用的模式是单波节园模式（50~200千赫）和双园模式（200~600千赫）。谐振子是由点焊在园片周边的细径导线耦合的。由于在园片的边缘上变位很复杂，因此耦合模式兼含伸张和弯曲，所以很难分析。最初的一些设计利用了细径的奇数 $1/4$ 波长铁镍合金换能器。稍后的设计，诸如图5(a)所示，采用了 $1/2$ 波长的和全波长的铁氧体换能器。

图5(b)所示的园棒-导线型滤波器也采用了铁氧体换能器。扭振园棒-导线型滤波器是由西德的Börner〔12〕、〔13〕和日本的Janaka〔14〕分别研制的；Janaka的设计采用了Langevin金属合金/陶瓷换能器（取代了铁氧体）。园棒谐振子是为在 $\angle 250$ 千赫频率下以 $1/2$ 波长的扭振模式振动来设计的；而当滤波器按455千赫工作频率来设计时，则以 $1/2$ 波长的纵向模式振动。采用扭振模导致谐振子之间的纵向耦合；而在455千赫下则包含弯曲耦合。

利用一根导线把换能器接至端部谐振子，如图5(b)所示，结果就减少了乱真信号或不希望的响应，特别是若是它被接在最强的所不希望的那些模式的节点上时，则更是这样。这种技术常用于园片-导线型滤波器，结果则使受到抑制的乱真模式在60分贝以上，如图6(a)所示。与扭振园棒-导线型滤波器的优异的乱真响应抑制形成对比的是图7(a)所示的棒颈型滤波器的响应〔图6(b)〕，后者受到同样激励，然而却易于蒙受宽带宽的各种弯曲模式

的影响。

棒-颈型滤波器是在园片-导线型滤波器正在研制的同一个时候由 Robert[2] 研制的。这种设计基本上是以 $1/2$ 波长的颈来耦合 $1/2$ 波长的扭振式或纵振式谐振子的。早期的设计的两个主要问题是易于激起一些乱真的曲振模[15]以及难于制作和调谐（由于是由一根园棒车制的）。此外，在像 100 千赫这样的比较低的频率下，滤波器就太长了。为缩小长度，Janaka 研制了图 7(b) 所示的一种摺列型滤波器。谐振子是以 $1/2$ 波长纵振模式振动的，并且是由直径较大的短线来耦合的。由于采用了纵振模式 Langevin 换能器和缩小了总长，于是就使所不希望的那些模式受到了较大抑制。园片-导线型滤波器，同园棒-导线型和摺列型设计一样，也具有比较低的乱真响应电平。

以上所述四型滤波器工作频率都在 50 千赫以上。除 Mason 和 Konno 报导过一些工作外，在 1964 年以前，在 50 千赫以下是没有什么活动的。Mason 和 Thurston 的设计是首批实用的设计之一[16]，他们采用了扭式耦合的反对称模式的弯曲模式谐振子，如图 8(a) 所示。反对称模式谐振使这种设计不那么易于受到微音激励的影响。更为广泛使用的设计是图 8(b) 所示的对称模式滤波器。Konno[17,18]、Yakuwa[19] 和 Albsmeier[20] 已经使之成为一种在 300 赫~30 千赫频域内颇为实用的器件。对称模式滤波器是由压电陶瓷换能器来激励的。谐振子的耦合线接在节点上，遂构成了扭式耦合这种型式的滤波器对于耦合线位置的变化是很敏感的，因此在制做时须相当小心以保证各个弯曲模式不被传播。由于采用了减震性能高的硅橡胶垫作为支承，因此颤噪效应问题已得到部分解决。

除了弯曲方条/导线型低频机械滤波器之外，在日本在研制音叉型机械滤波器[21]（诸如图 9 所示）方面已经做了大量工作。三叉型滤波器的意义在于它的作用有如一个耦合的双谐振子滤波器，因此它的选择性就比简单的双叉型器件大。音叉式和弯曲方条型滤波器在日本被广泛应用于遥控和自动控制、选择呼叫和寻人呼叫、遥测、测量仪器以及监控和载波信号检拾器。

有限的衰减极点

方条-导线型、园片-导线型和摺列谐振子型高选择机械滤波器，采用多达 15 个谐振子是可以实现的。虽然由此而产生的通带幅度和延迟响应对于音频通信是令人满意的，然而当要进行数据传输时波纹振幅和差动延迟的变化可能是过大的。利用有限的频率衰减极点，所需谐振子就较少，借此可减小差动延迟、尺寸、成本以及通带波纹。

为实现有限的衰减极点的第一批实用器件之一是有电容分路的晶体板型滤波器[22,23]，示于图 10(a)。虽然板型结构在 Adler 的基本的专刊[24]中曾有过介绍，但是利用石英和电容分路都是新概念。把电容器从输入板的顶电极接到输出板的底电极是与在图 10(b) 的等效电路的两个输出端跨接一个倒相器是一样的，于是就导致了如图 10(c) 所示的一对衰减极点。与耦合件相邻的倒相器表示在机械系统的最低的固有振模下谐振子之间的 180° 的相移。谐振子以长度伸张模式 ($5^\circ - X$ 或 $-18.5^\circ - X$) 或面切模式 (CT) 振动，并且是通过所谓的“Poisson”耦合来耦合的。虽然以往设计和制做的这些滤波器都有不只两个谐振子，但是目前为用于单边带和调频接收机而制做的滤波器大都是按 455 千赫极点级联来设计的。

利用导线来机械耦合间隔的谐振子是由Börner[25]和Johnson[26]分别研究的。Börner的滤波器[示于图11(a)]利用了1/2波长的扭振模式谐振子和伸张模式耦合元件。图11(b)的园片-导线型滤波器是由曲振模式园片和基本上是伸缩模式耦合元件组成的。当谐振子之间的间距使跨接导线长度小于1/2声波波长时,图11(c)等效电路中的变压器就执行像一种简单的变换比为一的变压器的作用,并且在滤波器通带的高频侧实现一个衰减极点。欲弄懂这一点只须把由两个相邻的谐振子耦合导线(电感器)和跨接线组成的 π 形网络变换为它的T形等效电路即可。与中间的谐振子串接的电感器产生一个阻抗零点,遂在滤波器通带以上出现一个衰减极点,如图11(d)所示。

当跨接导线长度在1/2波长和全波长之间时,等效电路里的变压器就执行象一个倒相器的作用,并且在滤波器通带以下实现一个衰减极点。在园棒-导线型滤波器里实现倒相的另一种办法以虚线示于图11(a)。在这样的情况下,各个间隔的谐振子的异相区被耦合。有一种类似的方法应用于园片-导线型滤波器,该滤波器里的间隔的园片之一以一种直径模式(而不是节园模式)振动,三个相邻园片导线接于同相区,跨接导线接到谐振子的异相部分[27]。

若是在滤波器通带以上以下都要求高度的选择性,则可以用一个耦合线来跨两个谐振子以便产生一对对称的衰减极点。这种型式的设计是能够以每个跨接导线来实现一个倒相器的。当未有倒相时,频率响应选择性就劣于平的反应,但给予右半面衰减极点应有的延迟补偿是可能的(见表1)。对于园棒-导线型滤波器,为实现倒相器所采取的最普通的办法是使相邻的谐振子(中心距)相隔1/4波长,于是跨接线长度就是3/4波长了。1/4波长耦合的优点是所有的谐振子全都被调至滤波器的中心频率;此外,这种耦合对导线长度的变化也是比较敏感的。

表 1 各种跨接结构的衰减极点的位置

正的 (1 : 1)		倒的 (-1 : 1)
单谐振子	上阻带极点	下阻带极点
双谐振子	延迟补偿	上、下阻带极点

为保持小的包装尺寸,在园片谐振子之间的耦合导线长度通常小于1/8波长。在455千赫下,由于每个园片的厚度约为1/4波长,因此简单的隔两个园片的跨接就导致了对称的有限衰减极点。图12示出了示于图13的12个园片的滤波器的频率响应。可以看出,通带波纹是很低的。这部分地是由于园片-导线型以及园棒-导线型有限极点滤波器是用现代插入损耗技术设计的。在设计方法中所包含的是诸如图14(a)所示的变换,图中把一个低通或带通梯形网络变换为一个等效的跨接形式[28]。由于机械滤波器具有窄带特性,因此可以把一个倒换器1变换为一个由绝对值相同的两个负电感器和一个正电感器组成的 π 形网络[29]。举例来说,图14(b)所示低通网络(或许是一个Cauer型滤波器[30])能够被变换成示于图14(c)的带通双谐振子跨接拓扑(topology)。由于采用了双(同时存在的)极点遂导致了一种物理上对

称的机械结构,它有助于下降制做成本。谐振子之间的短耦合线(如图13所示),不仅减小了包装尺寸而且还提高了滤波器强度。这种结构之所以具有高的耐冲、耐振能力还在于耦合线的位置都避开了结构的质心。

在过去的15年当中,园片-导线型机械滤波器一直都是按照利用乱真模式振动以控制阻带选择性来设计的。虽然迄今未曾弄清理论[31],但已发现,通过改变环绕园片周边的耦合导线方位,响应曲线的一个边的斜率是能够在牺牲另一个边的条件下使之增大的。例如,在图15(a)中每个园片有一个接近通带之中频率 F_1 的一个自然谐振。每个园片还有一个接近滤波器通带以上频率 F_2 的一个自然谐振。利用图15(b)所示简化的等效电路,可以看出,在 F_1 和 F_2 之间的 F_∞ 下产生一个衰减极点。这样一来在滤波器通带以上的响应就更为陡峭了,它可以通过改变耦合线方位予以控制,而后者又控制着谐振子 F_2 的效应。同样的技术已经应用于板型滤波器[32]设计,在板型滤波器中长度和宽度控制着频率 F_1 和 F_2 ,如图15(c)所示。

从园片谐振子的边缘去掉一个园缺,就可产生对应于每对退化模式的两个可控制的直径模式[33]。这种技术已被用来设计各种各样的多模式滤波器[34~36],它们当中大多数目前依然只是实验室的样品。图16(a)所示就是这种型式设计的一例。这种特殊的滤波器利用了单园单直径振动模式(像压电陶瓷换能器一样)并具有相当于一种四谐振子设计的频率响应。实线波节线相当于最高的自然谐振模。

对于低频滤波器,可以采用一种类似的技术,即可以把曲振方条倒角,通过破坏惯性矩的对称来产生两个自然谐振模。图16(b)所示就是这种型式的谐振子的一例,其中箭头表示两个谐振模的位移方向[37]。图17所示的是利用这种技术取得全部六个自然谐振以及附加的衰减极点的一个早期的滤波器[38]。利用这种方法已经设计出许多器件,其中包括一种由单一个方条构成的三个谐振两个衰减极点的滤波器[39]。

谐振子与耦合元件的分析

在过去的不多的几年当中曾经就机械谐振子和耦合元件的分析与模拟问题进行了大量的工作。这项工作已经取得的结果使人们对于在谐振子和耦合线两者中发现的所不希望的模式对机械滤波器响应特性的影响有了较好的了解。此外,经过改进的模拟网络对于新型机械滤波器的研制是极有助益的。

集总元件等效电路

一个线性机械谐振子的激励点的易动性(mobility)(速度与力之比)在点 i 可以表示为[40]

$$V_i/f_i = (\omega/j) \sum_{j=1}^{\infty} [M_{ij}(\omega^2 - \omega_j^2)]^{-1} \quad (1)$$

式中, V_i 和 f_i 是激励点 i 的速度和所施之力, M_{ij} 是对应于自然频率 ω_j 的模式 j 的等效质量。利用一个匝数比为 ϕ_{ij} 的速度变换器并把(1)式看作为一个电抗函数的部分分数展开式,就能构成图18(a)所示的电路图。

该网络描绘了一种双模式谐振子在 $i=1$ 的一个激励点（用电气术语表示就是“port”）上的特性。该谐振子可能是一个以弯曲模式和纵向模式振动的园棒或方条，或如图18(b)所示的一个以双直径弯曲模式和单园弯曲模式振动的园片。若就只有某一个模式而在园片上有两个激励点的情况而论，力-速关系则可以从图18(c)电路图中找出。一般说来，具有 M 个 ports 和 N 个自然模式的一个谐振子可以由矩阵方程式

$$V = [Z] f, Z_{ki} = \sum_{j=1}^N \Phi_{kj} \Phi_{ij} Z_j \quad (2)$$

表示之。

在(2)式中， V 和 f 是阶次 M 的直列矩阵， Z_{ki} 和 $M \times M Z$ 矩阵中的一个单元。根据(2)式而来的一个一般化等效电路示于图19。

园片谐振子

为了能够利用任一谐振子模拟，就必须能够计算或测量在谐振子的一些具体的激励点上的自然谐振频率和等效质量数值。对于厚的园片谐振子，Deresiewicz 和 Mindlin[41]和 Sharma[42]（对于对称的模式）已经取得了频率的计算与实验数值之间的极好的一致；即弯曲模式具有园的波节图案。新近，Onoe 还解决了转轴对称模式（波节直径）的问题，他利用了线性的组合独立波，后者满足了运动的微分方程和园片的各个主要表面上的边界条件[43]。同在分析一个电气网络时所指望的那些正合解不同，对于一个机械谐振子的频率和等效质量的解，都只不过是和被计及的较高阶次波的数目一样的。波的数目愈大，边界条件就能愈精确地满足。

关于求厚园片谐振子的等效质量，最早的分析工作是由 Sharma 针对轴对称模式进行的[44]。他的分析所依据的求等效质量的方法是，以（在园片的一个点上在一规定方向上的）速度平方的1/2去除系统（园片）中的总动能[45]。与 Onoe [43]的技术相关联的这种相同的技术，已经被用来计算兼以对称模式和非对称模式振动的园片的等效质量[46]。对于二邻接振动模式的等效质量与园片表面上位置的关系的示例示于图20。可以看出，在园片边缘上（ $r=1.0$ ）等效质量，对于邻接的双直径单园模式则比双园模式低。一般说来，一个模式的阻抗越低，它的耦合的响应就越宽，并且就越难于控制。

对于园片-导线型滤波器，在有关的频域（50~600千赫）内，存在着多种多样的其他所不希望的模式，诸如径向的和同心的剪切模式。对于宽带滤波器，往往造成麻烦，一些模式有时就落在通带范围内。这些特殊的模式，被称作轮廓模式，因为它们不涉及横向（弯曲）振动而只是在园片的外形或轮廓上有个变化，Onoe 曾对这些模式进行了研究[47]。

园棒谐振子和耦合元件

弯曲模式谐振子还被用于低频。在500赫~50千赫频率范围内，谐振子都是诸如图8所示的方条形谐振子。对于厚的弯曲模式方条谐振子的谐振频率已由 Mason[45]和 Näser[48]进行了分析。如果把谐振子作为一个薄的条来看待，那末类似于描述传输线的那些方程式就可以写作[15、49]

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ M_1 \\ V_1 \\ \dot{\theta}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_9 & -H_8(\alpha/l) & -H_7(k\alpha^3/j\omega l^3) \\ H_7(\alpha/l) & H_9 & H_{10}(k\alpha^2/j\omega l^2) \\ H_8(j\omega l^3/k\alpha^3) & H_{10}(j\omega l^2/k\alpha^2) & H_9 \\ -H_{10}(j\omega l^2/k\alpha^2) & H_7(j\omega l/k\alpha) & H_8(\alpha/l) \\ -H_{10}(k\alpha^2/j\omega l^2) & -H_8(k\alpha/j\omega l) & -H_7(l/\alpha) \\ H_9 & & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_2 \\ M_2 \\ V_2 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} H_1 &= S \cdot s & H_6 &= S \cdot c + C \cdot s & S &= \sinh \alpha \\ H_2 &= C \cdot c & H_7 &= s + S & s &= \sinh \alpha \\ H_3 &= C \cdot c - 1 & H_8 &= s - S & C &= \cosh \alpha \\ H_4 &= C \cdot c + 1 & H_9 &= c + C & c &= \cosh \alpha \\ H_5 &= S \cdot c - C \cdot s & H_{10} &= c - C \end{aligned}$$

$$\alpha^4 = (\rho A/K)\omega^2 l^4 \quad K\alpha^2/(j\omega l^2) = (\rho AK)^{1/2}/j$$

在与图21(a)有关的(3)式中, K 表示杨氏模量与方条横截面的惯性矩的乘积, ρ 、 A 和 l 分别表示密度、横截面积和方条长度。

利用(3)式, 就可以用图21所示的等效电路来表示一个弯曲模式谐振子。该等效电路表示类似于图18(c)所示的一个单谐振子双 port 系统。可以看出, 在这种情况下采用(力是横向可变的)这种表示法结果就导致一个双式, 其中谐振子以一个串联调谐电路来表示。此外, 在谐振子上的两个“port”或激励点实际上在等效电路中是以4个“port”来表示的(两个表示线性运动, 两个表示旋转)。如同早些时候的园片情况一样, 一个一般的等效电路用形式如图21(b)[49]所示的并联网路描绘出来是不困难的。Konno 的归一化函数 Ξ 是类似于(2)式的 Φ 函数的(当外加挠矩等于零时)。

图21(b)的等效电路和(3)式, 对于园棒-导线型滤波器(其中园棒谐振子是按伸缩模式振动的)是很有用的[50]。图22(a)所示是接于两个谐振子的端部的一种耦合线。耦合线受到弯曲激励, 但在与谐振子接触的那些点上耦合线不旋转; 也即是 $\theta_1 = \theta_2 = 0$ 。(3)式在经过变换之后可以写成

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ F_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_6/H_7 & j(\omega l^3/\alpha^3 k)H_3/H_7 \\ (1/j)(\alpha^3 k/\omega l^3)(2H_1/H_7) & H_6/H_7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

(4)式的 $ABCD$ 矩阵可以被变换成一个 Y 矩阵, 而后者可以被用于计算图22(b)的 π 等效电路的 Y_a 和 Y_b 。得出

$$\begin{aligned} Y_a &= j(k\alpha^3/\omega l^3)[(H_6 + H_7)/H_3] \\ Y_b &= -j(k\alpha^3/\omega l^3)(H_7/H_3) \end{aligned} \quad (5)$$

耦合线当 $H_6 = 0$ 时其作用有如一个 $1/4$ 波长的线路。在这种情形下, 从(5)式可以看出 $Y_a = Y_b$, 并从(4)式经过变换之后可以看出[50]

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ F_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & j(\omega l^3 / \sqrt{2} \alpha^3 k) \\ (1/j)(\sqrt{2} \alpha^3 k / \omega l^3) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_2 \\ F_2 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

对于伸缩模式谐振子或耦合线的分析,同分析弯曲模式元件相比,其难度多少要小些。以伸缩模式振动的园棒或导线,其作用有如一个简单的传输线;因此可以用 $ABCD$ 矩阵

$$\begin{bmatrix} V \\ F_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta l) & jZ_0 \sin(\beta l) \\ j(\sin(\beta l)/Z_0) & \cos(\beta l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

来说明。式中 $\beta = \omega \sqrt{\rho/E}$, $Z_0 = (A \sqrt{\rho E})$ 。 E 是杨氏模量。伸缩模式谐振子和耦合元件在[14]和[40]中已经作了相当详细的介绍。

谐振子材料

由于换能器带宽的限制、存在所不希望的振动模式以及与 LC 和陶瓷滤波器的竞争,对于机械滤波器其带宽对中心频率之比通常在10%以下,而更为普遍的约为1%。这样的小的分数带宽要求谐振子须具有 $1 \sim 10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 的频率温度系数、相当低的老化速率以及至少为10,000的 Q 值。

在一种金属合金中频率随温度的变动,它的主要影响是材料的刚度或杨氏模量的变化。含Ni27%或44%的铁镍合金,刚性温度系数低,但就镍的的百分比的变化来说却是相对不稳定的。当加进铬时,稳定性可显著改进;但是这些所谓的 *Elinvar* 材料(一种恒弹性镍铬弹性钢——译注)的老化特性和 Q 值则都是不可接受的。在 $Fe-Ni-Cr$ 中加进钛或钼,则老化特性和 Q 值两者都会得到改进;此外,加进钛或钼还可以通过冷加工和热处理使之有可能改变谐振频率材料的温度系数[51]。

为取得比较低的温度系数, $Fe-Ni-Cr$ 和 Be 或 Ti 材料是首先经过溶液退火、随后淬火、而后再进行冷加工(15~50%)的。其次,材料是通过在400~675 $^\circ\text{C}$ 下至少持续2小时的热处理来进行沉淀硬化的(Ni 是靠 Be 或 Ti 从过饱和溶液中沉淀出来的)。材料的温度系数取决于冷加工率和温度一时间。图23(a)和(b)示出了 $Thermalast5409(Be)$ 和 $Ni-spanC(Ti)$ 为取得最好的温度系数在经过调整之后的温度曲线。这两种材料,在500千赫下在100 $^\circ\text{C}$ 的温度范围内,频移都小于50赫。

加进 Be 或 Ti ,其效果是使老化速率下低到 $1 \times 10^{-7} \times 10^{-6}$ /每周,或在10年期间在500千赫下约有25赫之变化。 Be 或 Ti 还提高了谐振子的 Q 值,使 Q 值达到10,000~25,000,视沉淀硬化和冷加工率而不同。为数20,000的 Q 值,对于大多数应用场合是个典型值;这样的 Q 值在一个1/100的分数带宽滤波器的通带边缘上只引致小量的损耗。例如,在200千赫下的一个3千赫带宽的滤波器的响应实际上是一个无损耗网络的响应。

当为取得最好的温度系数而经过调整时,谐振子频移对于通带波纹的影响是没有什么的。通带波纹的变化多半将取决于换能器的特性曲线。

换能器和换能器材料

换能器结构

迄今使用最广泛的换能器，用于60千赫以上的是简单的磁致伸缩铁氧体园棒型换能器（图5）和Langevin陶瓷-金属合金换能器〔图7（b）〕，用于低频的是混合型或层结构型的陶瓷-金属换能器（图8）。虽然目前最普遍的是这些，但是采用纵向模式陶瓷园棒、铁-镍合金线和各种各样石英晶体截割的滤波器也在制做。

一个机电换能器，不拘型式如何，可以用它的谐振频率、耦合系数和静态电抗来表征其特性。例如，图24所示的磁致伸缩铁氧体换能器，可以由机械谐振频率 f_1 （实际上即与开路电气端接的机械谐振）、机电耦合系数（它关涉一些电气和机械参数）和换能器线圈 L_1 的电感来确定。若把换能器直接接至端部谐振子，那么它就与它的有关等效质量成正比地影响到该组合的谐振频率。对于机电耦合系数，重要的是它的恒定性，因为把电气端接电阻变换为必须与滤波器的机械阻抗匹配的机械端接负载直接取决于它。在大多数应用场合，电感与用于在各个临界情况下进行温度补偿的电容器谐振。

滤波器设计人员有责任寻求最稳定的并将与电气和机械网络适当匹配的换能器。这首先就要选择一种耦合系数稳定的材料，其次是选择结构以便使换能器等效质量降到最小极限从而减小随温度而引致的频移。这一点通过减小铁氧体园棒的直径或陶瓷的厚度（在Langevin换能器中）是能够做到的。而减小尺寸又受到线圈灵敏度或静态电容的限制，或对于宽带滤波器则受到电感-电容组合实际上即是端部谐振子这一事实的限制。

磁致伸缩铁氧体换能器

使用最广泛的滤波器换能器材料是掺钴镍铁氧体，它是为用于机电滤波器而专门研制的〔52〕。加进0.6%的钴可取得高稳定的耦合系数，而加进1.0%的钴则可使随温度而来的频率 f_1 变化大大减小。图25示出了一个200千赫的实际设计随温度的变化而引致的耦合系数和频率 f_2 的变化〔53〕。为了能够减小换能器对末端谐振子频率的影响，必须选择最佳值的永磁偏偏和线圈尺寸以便使耦合系数达到最大极限。图25所示10%的耦合系数，它是精心设计的换能器的典型，也是滤波器分数带宽的限制值。耦合系数的变化约为5%，这相当于端接电阻变化10%，后者是否过高取决于应用场合。谐振频率随温度而来的变化在100℃的温度范围内约为0.1%或在500千赫下约为500赫。换能器线圈 Q 值变化范围为10~40或更好些，视采用金属合金屏蔽或铁氧体屏蔽而不同。

采用磁致伸缩铁氧体作为换能器材料同压电陶瓷相比的某些优点是：容易制出性能一致的材料，耦合和频率的时间稳定性极好（这是由于利用稳定的偏置永磁之结果），电容调谐简单。对于高性能的话路滤波器，借助于利用调谐（和匹配）电容器的串并组合可以取得滤波器与外部电路之间的优异匹配。对于高性能的压电陶瓷换能器机械滤波器，用变压器进行调谐和阻抗的匹配；而对于廉价的小型滤波器则无需调谐〔54〕。

压电陶瓷换能器

在美国和西德,最早的换能器研制工作集中于磁致伸缩铁氧体换能器;而在日本最初的(其实也即是最流行的)研究工作却陷于压电陶瓷换能器方面。在早期的设计中,所用的钽-钛材料的缺点是耦合系数和频率的温度稳定性差,从而通带波纹的温度稳定性也差。大大改进了温度特性的锆钛酸铅陶瓷(PZT)材料的发展[55],已经使一些压电陶瓷材料不仅堪与磁致伸缩铁氧体换能器相媲美而且在若干场合能够用来取代后者。

压电陶瓷的主要优点是它具有优异的机电耦合系数。一种条型铁氧体换能器的耦合系数为10%,而一个温度稳定性好的压电陶瓷的侧面被镀的条(side-plated bar)的耦合系数则是15~25%。因此,在混合式端部谐振子/换能器组合件的设计中,同温度稳定性高的金属园片合金(metal disk alloy)相比,比较高的耦合系数为使用最少量的陶瓷材料提供了可能。此外,由于压电材料电气 Q 值较高所以滤波器插入损耗就比较低;又由于具有较好的固有的线性所以相互调制失真也比较低。图26示出了耦合系数 K_{13} 约为23%振PZT陶瓷的频率和耦合的温度特性。

目前使用最广的陶瓷换能器是Langevin型换能器,它是由夹在两个金属合金园棒之间的一个陶瓷园片构成的园棒,见图7(b)。薄园片的高的平面耦合系数(对于稳定的材料约为25~40%)和Langevin结构,为设计机械 Q 值高和温度特性好(耦合系数只有少许下降)的谐振子/换能器组合件提供了可能[54]。用于滤波器的这种型式的换能器的研制,大约是在15年前在日本由Tanaka[14]和Tagawa[56]开始的。由于大多数粘结材料(如环氧树脂)稳定性不好和 Q 值不高,以及由于粘合剂本身也具有明显的厚度;因此陶瓷/金属合金的粘结是一个重要问题,并且对于这一问题的解决需要付出很大力量。

在过去不多的几年当中,在西德对于Langevin型换能器曾进行了大量的分析工作[54、57、58]。这种分析工作,其中包括一些方程式,这些方程式说明了随着陶瓷园片的相对厚度和位置的改变而出现的耦合、频率、 Q 值和温度系数的变动,并已应用于某些新型455千赫滤波器。

压电换能器的最重要的特性之一,是以各种各样振动模式进行工作以及以大量的机械位形来使用的能力。

图8示出了一个很好的例子,其中弯曲模式是由混合式的陶瓷/金属合金换能器来激励的。此外,陶瓷的高机电耦合系数为设计稳定度很好的宽带(10~20%)低频的这种型式的滤波器提供了可能。

在说明混合式弯曲换能器谐振子的机电特性方面,在日本已进行了大量的分析工作。Konno和Kusakabe单单关于这一专题的已发表的著述总共有200多页,其中包括以不退化模式振动的方条、如有惯性负荷的方条、扭绞的方条以及由局部地覆盖在上、下表面的陶瓷板来激励的“单纯的”方条[59]。Okamoto等人已成功地对满复盖的方条进行了颇为详细的分析[60],并且在[19]中作了摘要报道。

今 后 展 望

这里仅根据目前的技术趋向对今后不多几年作一展望。今后将会有象几年前的单片式滤

波器那样的进程的突破，但是这些是难以预言的，即使是在研制方面扮演活跃角色的人们也不例外。某些比较可预言的方面是：尺寸的缩小，低频滤波器应用的扩大，延迟和波纹特性的改进，具有有限衰减极点的多谐振子单片式滤波器的实现，以及作为付诸单片式滤波器的大量努力的结果的分立单元机械滤波器的多方面的改进。

缩小尺寸

就机械滤波器来说，减小尺寸仍然是一个相对地说未曾探索过的技术。对于园片-导线型机械滤波器，尺寸从5.0缩到1.3立方厘米过去做到这一步所付出的努力相对地说是 不大的，并且除采用了较低次振模而外在技术上也没有什么突破。通过采用陶瓷换能器和小直径的园片，体积可以缩小1/2是没有多大困难的。目前，由Börner[54]和Konn[18]（见图27）分别研制的纵向振模条、弯曲耦合棒设计，其包装尺寸不足1立方厘米。虽然这种设计尺寸的缩小，由于谐振子的固定的长度，同园片-导线型滤波器相比可能多少比较困难一些；但是通过减小园棒直径来缩小尺寸是可能的，只不过要达到弯曲模式的程度就成问题了。分立单元滤波器（诸如园片或园棒型滤波器）确有胜过单片式滤波器（图28）的一个优点，即缩小滤波器的阻抗电平和杂散电容效应无需较大的被镀表面。园片和园棒型滤波器都是低阻抗器件；这是由于PZT换能器材料的介电常数高，或对于磁致伸缩铁氧体则是由于采用了低匝线圈。此外，它们只需两个换能器，谐振子中心距（不拘滤波器带宽是怎样的）通常为0.025厘米，为减少来自间界（boundary）的反射毫未占用体积，并且支座所占体积也很小。

至于一个分立单元机械滤波器能够搞得何等小，应该说，在这方面也是存在某些基本限制的。当然，一个是零件的制造和装配要求无过份的频率和耦合不当的限制。第二个限制，如前所述，就是（由于不得不固定某一尺寸从而减小了附近的一些弯曲模式的频率间隔而引致的）失真模式的限制[54]。另一个减小尺寸的限制与（作为尺寸的一个函数的）换能器和谐振子的材料的非线性有关。Yakuwa曾经对铁氧体磁心电感器、压电陶瓷、镍合金和石英进行了一个很有意义的比较，表明了对于某一具体带宽滤波器的最小尺寸与各种各样的损耗因数之间的关系[61]。最后一个问题就是大多数分立单元机械滤波器的立体形状，这不仅妨碍了采取平面制造技术而且根本或许就是减小体积的最为严重的限制。

低频率

日本在低频滤波器方面的大量研制工作将最有可能为世界其他地方所查觉。例如，图29所示就是Fujitsu公司目前制造的广泛的各种滤波器当中的一些产品。低频机械滤波器的应用场合大都涉及选择单音（Single tones），而这就意味着只需要一个或两个谐振子。因此，选择性就完全取决于被耦合于外部安装结构的谐振子。这样一来就降低了谐振子Q值并且还导致了由于外部振动而引起的颤噪响应。

颤噪效应问题由于采用高阻尼支座（support）已经得到某种程度的解决。这已为采用基振模提供了可能，基振模可以使滤波器结构简化，尺寸减小。关于使冲击噪声引致的所不希望的输出下降到最小值的问题，通过使用H形谐振子可以得到某种程度解决[62]。这种型式的滤波器有两个同样的垂直的块（mass），两者由一个可挠的腰（H的水平件）相连。压

电陶瓷换能器可使水平腰曲挠,使两个垂直块旋转。每个垂直块的支撑点接近其质量中心,从而就防止了遇有冲击脉冲通过支撑点时水平腰的曲挠。Konn^o已经对此器件的频率响应特性进行了详细的分析[63]。

延迟和通带波纹的改进

利用跨接导线可使一个机械梯式滤波器取得内部延迟均衡[25]。已经证明这是一个很实用的办法[64]、[65]。该设计是以采用很精确的 $1/4$ 波长的长耦合线为基础的。对于具有成对衰减极点的话路滤波器(图30和[66])和对于延迟均衡的话路滤波器(图31),在预先调谐过的谐振子组装之后无需频率调整。另一个实用的办法是要以象使用石英谐振子大致一样的方法在电气网络结构中使用机械谐振子和耦合元件[67]。在桥式滤波器(X型滤波器)方面的研究工作已经引致某些利用计算机来进行的新的调谐技术,这些技术也已由Yan^o[68]进行了报道。为了进一步改进话路滤波器的优异的响应,有时在工厂里利用在线(on-line)计算机将是有利的。实用的利用计算机来进行的调谐方法的发展,可能起因于目前正在进行的在石英单片式机械滤波器方面的研究工作。

石英单片机械滤波器

用象分立单元机械滤波器大致相同的方法可能从单片式机械滤波器技术获得好处,诸如声分路这样一些概念将被施用于单片滤波器。目前,通过加电容分路在双谐振子结构中实现了衰减极点。双谐振子节可进行电容耦合来形成一种略具等幅度波纹响应的多谐滤波器[69]。可能不久将会取得每个板具有4个或更多个谐振子和具有电分路的精确的设计。

已经证明,厚薄振模以大致象剪切振模的办法是能够“俘获”的[70],这启发我们联想到在今后不多的几年中间将会研制出其他新的结构。

已有大量的工艺技术被运用于单片式机械滤波器的制造加工(例如利用激光技术来改变电极对之间的耦合和制做极度扁平的和平行的晶体坯件等等)。这项工作必将长期继续下去,并且一般说来对于机械滤波器工艺理应是适用的。

其他国家的研制工作

在日本、西德和美国之外,机械滤波器的发展工作过去一直被集中在图7(a)所示的那种型式的分布参数线路滤波器方面。英国[71]波兰[72]、苏联[73]和东德的情况一直就是

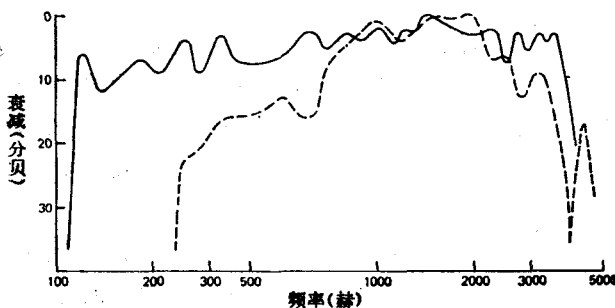


图1 在留声机设计中通过采用滤波器设计方法所取得的改进(6)。

是这样,在这些国家一些年来一直是制做这类滤波器。英国发表的新近的论文曾反映了在换能器设计[74]和低频弯曲模式谐振子[75]方面的兴趣。机械滤波器中弯曲模式的研究,在捷克也是一个感兴趣的课题[76]。今天,图5(b)所示的话路滤波器是东德(200千赫)[77]和捷克(64~108千赫)[78]制造的。

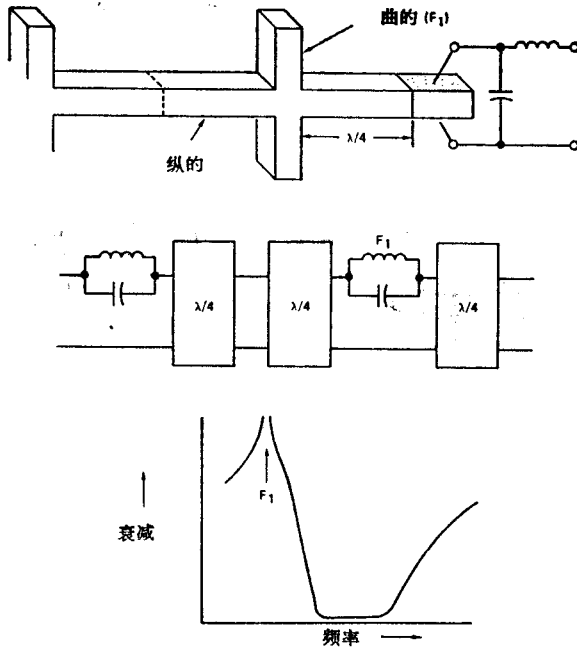


图2 分布参数元件机械滤波器 (Mason 1941)。

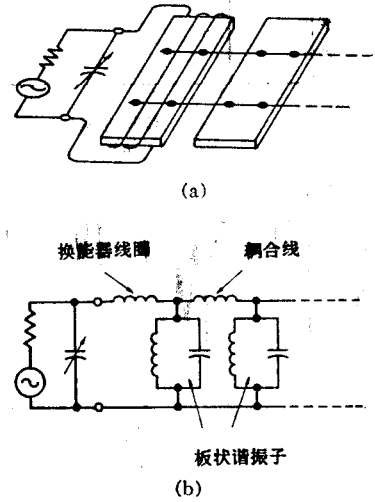


图3 谐振子-耦合线机械滤波器(Adler 1946)。(a)象形图(b)等效电路。

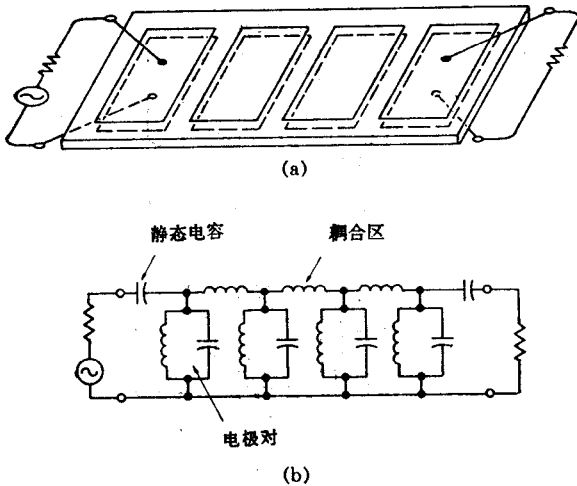


图4 石英单片机械滤波器：(a)象形图
(b)等效电路。

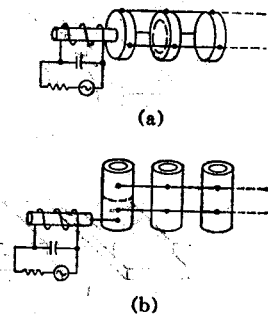


图5 (a)园片-导线式机械滤波器 (Doelz, 1949)。(b)园棒-导线机械滤波器 (Tanaka和Börner, 1957)。