


机械滤波器

[美] 罗伯特·A·约翰逊 著

柳力源 译
陈双 译
蒋瑞兴 校



机械滤波器技术协会
《电讯技术》编辑部

机械滤波器

〔美〕罗伯特·A·约翰逊 著

柳 力 源 译
陈 双
蒋 瑞 兴 校

机械滤波器技术协会
《电讯技术》编辑部

1985.12.成都

内 容 提 要

本书系统地论述机械滤波器设计原理、制造技术、测量方法以及应用与使用技术的专著。主要内容包括：机械滤波器的基本概念、机电换能器、振子与耦合元件、线路设计方法、设计与制造、用途与使用、技术指标拟定与测试、材料选择等。

本书可供有关专业的工程技术人员、大中专院校师生参考用书。

Mechanical Filters in Electronics

机械滤波器

〔美〕罗伯特·A·约翰逊 著

柳力源 译

陈 双

蒋瑞兴 校

机械滤波器技术协会 出版
《电讯技术》编辑部

电子部第十研究所印刷厂 印刷

内部交流 工本费：4.60元

原版前言

本书的目的是向工程技术人员介绍机械滤波器的设计、制造和应用。我要寻求的读者对象是那些从事滤波器的研究、设计与制造的工程技术人员。除了上述人员之外，对于滤波器的使用者——系统工程师、线路工程师、应用工程师，以及可靠性与试验工程师，也同样是适用的。因为在西方世界，这是第一本综合论述机械滤波器的专著。除美国之外，我已向世界各国推荐，使它有助于机械滤波器研制工作的积极开展。

本书是针对熟练的滤波器设计师和具有一定基础知识的电气工程师写的。书中对机械滤波器的设计原理作了充分的论述，能使初次接触机械滤波器的人了解到机械滤波器是怎样工作的，以及如何制造、拟定技术条件、测试及使用。而对于已具备这方面知识的人，则本书为他提供了大量的难以得到的新信息，并且还可作主要的参考书来使用。

书中，我采用目前生产的滤波器来阐述它的基本概念。这样，当读者在学习机械滤波器基础知识的同时，还可了解到当今的工艺技术水平。此外，因为这是一本应用科学方面的书，因此，根据我从事机械滤波器设计工作二十五年之经验，冒昧地对其作了一些评价。但当我在书中这样做时，通常是作了说明的。

由于本书的广大读者是滤波器的制造者和使用者，所以尽可能做到各章自成体系。例如，为向滤波器研制者提出技术条件的使用者可直接参阅第八章，而不一定去看有关机械滤波器的设计章节。同样，重点讨论设计问题的章节就不兼谈其他问题了。但我建议，第一章的内容每个读者都应当读一读。

第一章的主要内容是回答什么是机械滤波器？它的特点是什么？这样一类的问题。

第二章讨论换能器问题。换能器通过使用模拟和等效电路起着电气—机械之间连接的重要作用。对于每个滤波器设计者来说，整个章节都是极为重要的。但非专业人员可以跳过这些问题，读读磁致伸缩换能器这一节。同样，非专业人员可以接着读或跳过压电陶瓷换能器这一节。

第三章介绍谐振子和耦合元件。这一章对滤波器的设计师来说也很重要，尤其是关于等效质量概念问题。而滤波器使用者，只要阅读本章开头几页和关于耦合振子一节就行了。

第四章谈线路设计方法问题，这是滤波器使用者最感兴趣的。因为本章详细地描述了电调谐的条件，另外还以图解说明机械滤波器制造者所采用的各种换能器——谐振子—

耦合元件的组合情况。本章内容丰富，写得详细，许多专家看了后无不赞许。

第五章和第六章是机械滤波器技术中密切相关的两章，对滤波器设计师和使用者具有重要的价值。这两章对应用工程师和可靠性工程师有着特殊的用途，因为他们的责任是选择滤波器，并要能使其可靠地承受预期的恶劣环境条件。

第七章，机械滤波器的用途，讨论机械滤波器在各种系统设备中的应用情况。因此，应用工程师和系统工程师，及设备设计师一定会感兴趣的。

第八章描述机械滤波器的技术指标与测试，本章对从滤波器设计师到使用者进行检验都有帮助的。

第九章讲机械滤波器的使用，是为把机械滤波器用于他们的设备中的这部分人编写的。至此，我们阐述完了机械滤波器的整个问题，包括第一章滤波器使用者提出的选择什么样的滤波器问题，以及随后各章节中涉及的机械滤波器的技术条件、设计、制造和测试问题。

罗伯特·A·约翰逊

1982年12月于加州塔斯廷

目 录

原版前言

第一章 导论	1
一、基本原理.....	1
1. 机械滤波器的元件.....	1
2. 机械滤波器的类型.....	5
二、机械滤波器的特点与用途.....	6
1. 机械滤波器的特性.....	7
2. 与其他滤波器的比较.....	7
3. 机械滤波器的应用.....	10
三、机械滤波器的发展简史.....	10
第二章 机电换能器	14
一、引言.....	14
二、等效电路.....	16
1. 原理图.....	16
2. 换能器等效电路.....	21
三、磁致伸缩换能器.....	23
1. 磁致伸缩效应.....	23
2. 磁致伸缩换能器材料.....	25
3. 铁氧体棒状换能器.....	28
四、压电陶瓷换能器.....	33
1. 压电效应.....	33
2. 压电陶瓷材料.....	34
3. 复合换能器.....	38
五、测量电路.....	43
第三章 谐振子和耦合元件	48
一、谐振子的振动模式.....	49
1. 计算频率和幅度的经典方法.....	49
2. 纵振模式和扭振模式棒状谐振子.....	50
3. 曲振模式谐振子.....	55

4. 异形模式·····	66
5. 非经典解法·····	69
6. 复杂的谐振子·····	70
7. 频率、位移和等效质量方程小结·····	71
二、谐振子的等效电路·····	71
1. 一般柔量—质量谐振子等效电路·····	71
2. 简单的谐振子等效电路·····	75
三、谐振子的材料·····	79
四、耦合元件·····	82
1. 伸张振动模式和扭振模式的耦合·····	82
2. 曲振模式耦合·····	84
3. 耦合丝方程小结·····	86
五、耦合丝材料·····	86
六、耦合谐振子组·····	86
1. 弹簧—质量系统·····	86
2. 谐振子和耦合谐振子的测量·····	90
第四章 电路设计方法·····	95
一、一般的综合概念·····	96
1. 传递函数·····	96
2. 电气等效电路的实现方法·····	100
二、实际构造·····	118
1. 振子耦合和桥接·····	118
2. 换能器设计考虑·····	131
第五章 机械设计·····	141
一、最小尺寸的设计·····	141
1. 谐振子形状和振动模式·····	141
2. 减小滤波器尺寸的结构·····	143
3. 尺寸减小的极限·····	143
二、谐振子支撑系统的设计·····	145
1. 谐振子阻抗·····	145
2. 谐振子支撑结构·····	147
三、高可靠性设计·····	151
1. 失效率与失效机理·····	151

2. 高可靠性设计	152
四、内部输入与输出馈通	153
1. 机械馈通	153
2. 电信号馈通	154
五、封装	156
1. 空气谐振	156
2. 减少冲击和振动的影响	157
3. 封装设计	158
第六章 制造	160
一、一般的制造概念	160
1. 制造方法	160
2. 工艺流程图	163
二、谐振子制造	163
1. 材料考虑	163
2. 制造和尺寸考虑	164
3. 热处理	167
4. 谐振子调谐	167
5. 自动进料和辅助方法	171
三、耦合丝制造	171
1. 耦合丝处理	171
2. 耦合丝测量	172
四、压电陶瓷换能器	172
1. 陶瓷换能器片的制造	172
2. 陶瓷与金属的连接	172
3. 调整频率和耦合	173
五、磁致伸缩换能器	174
1. 丝耦合铁氧体换能器谐振子	174
2. 线圈与磁铁	175
六、耦合丝与谐振子的焊接	175
1. 基本的焊接概念	175
2. 焊接机械滤波器耦合丝	177
3. 焊接谐振子支撑金属丝	180
4. 焊料焊接	181
七、滤波器组装	181

八、组装后的调整·····	182
1. 电路调谐和端接·····	182
2. 机械谐振子调谐与耦合调整·····	182
九、滤波器自动化生产·····	183
第七章 机械滤波器的应用·····	187
一、通信设备·····	187
1. 无线电设备应用的机械滤波器·····	187
2. 电话通信应用的机械滤波器·····	191
3. 移频键控系统应用的机械滤波器·····	204
二、信号传输、检波与控制·····	207
1. 无线电导航用的机械滤波器·····	207
2. 列车控制用的机械滤波器·····	209
3. 记录系统、远距离监视和控制设备·····	211
第八章 机械滤波器技术指标拟定和测试·····	215
一、机械滤波器技术指标拟定·····	215
1. 损耗和选择性·····	216
2. 相位、延迟和时间响应·····	223
3. 输入和输出参数·····	225
4. 环境条件指标·····	226
二、机械滤波器的测试·····	227
1. 频率响应测试·····	227
2. 特殊的测试·····	231
第九章 机械滤波器的使用·····	236
一、电路连接法·····	236
1. 机械滤波器在系统中的位置·····	236
2. 实际的使用设计·····	242
二、端接·····	244
1. 改变端接情况的影响·····	245
2. 通带波动过大的原因·····	249
三、特殊电路的连接法·····	250
1. 颤噪和寄生响应·····	251
2. 选择性的改善·····	252
后记·····	255

第一章 导 论

这是一本论述机械滤波器（更确切地说，是机电带通滤波器）的书。“机电”这个术语源于它的工作过程：在滤波器中，先把电信号转换成机械能，接着滤波，最后将滤波后的信号转换成原来的电信号形式。“带通”意指滤波器允许通过一个频带（通带），和对此频带外的频率进行衰减。机电滤波器并不单指机械滤波器，还应包括诸如晶体滤波器、陶瓷滤波器和表面声波（SAW）滤波器等这样一些机电带通滤波器。所以，我们有必要进一步说明机械滤波器这个名词的真实含义是什么，并将机械滤波器与其他机电滤波器进行比较。

机械滤波器由声（机械）耦合的机械谐振子构成。它不同于集中元件石英晶体滤波器或陶瓷滤波器，后两种滤波器都是由电耦合的谐振子构成。机械滤波器不论是分散的或集中的谐振子，通常采用金属丝耦合。在一单块基片上使用两个或多个谐振子构成的单片晶体滤波器和陶瓷滤波器，尽管要采用声耦合，但显然是与机械滤波器不同的。机械滤波器与表面声波滤波器的不同还在于：信号在表面声波滤波器中只能向一个方向传播，而信号在机械滤波器中允许在输入与输出端之间可逆向地传输。

机械滤波器是一种无源滤波器，它不需要外加电源或外加时钟脉冲，处理的是模拟信号而不是数字信号。这就把机械滤波器与有源滤波器、开关电容滤波器（SC）、电荷耦合器件（CCD），以及数字滤波器区别开来了。

一、基本原理

要了解机械滤波器的工作原理，除了熟悉机电换能器概念外，还包括对它的基本物理原理、线路理论和振动理论的了解。在人们了解机械滤波器的过程中，也正是这些必需的知识使人望而生畏。所以，在跟电子工程师谈论时，机械滤波器设计师通常使用电子模拟和等效电路这类术语；而与机械工程师讨论机械滤波器时，也许就要用弹性（柔量）和质量的术语。

这两种学科间的交叉，我们可用电动机与扬声器（电—机）和发电机与唱机拾音器（机—电）的例子加以说明。电动机—发电机概念有助于我们理解电抗是如何通过机电换能器被反射的。例如，当发电机的输出端被短路时，电枢两端的力阻抗（转矩与角速度比）就会突然增大。扬声器和唱机拾音器的基本原理对理解许多具有各种振幅和频率的信号转换过程是有帮助的。因为受机电换能器的频率响应限制，扬声器和唱机拾音器起电—机带通滤波器和机—电带通滤波器的作用。通带越宽，以及通带的振幅响应越平坦，则保真度也就越好。

1. 机械滤波器的元件

机械滤波器是一种由电的、机电的和组合的机械元件构成，用作带通滤波的器件。

图1.1所示的是机械滤波器的频率响应特性曲线。曲线对应于滤波器输出端的电压常用分贝为单位表示。激励滤波器的输入信号是一恒压、频率可变的正弦波。由最大的电压输出可测出对输入信号的衰耗。3分贝衰耗所对应的两个频率的差为3分贝带宽，即 B_3 。两个3分贝衰耗点频率之间的范围便是滤波器通带。通常称60分贝衰耗点频率差为60分贝带宽，用 B_{60} 表示，而60分贝两点之外的区域则是阻带。 B_{60} 与 B_3 之比，便是滤波器的矩形系数。中心频率 f_0 常定在3分贝衰耗点频率的中间频率上。 B_3 与 f_0 之比值，即为滤波器的相对带宽。要想弄明白机械滤波器的频率特性，现就让我们来观察一下机械滤波器的元件，这些元件经恰当地组合便可实现所要求的目的。

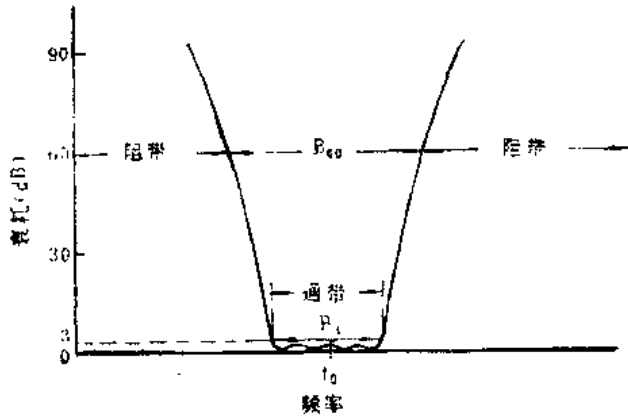


图1.1 带通滤波器的衰耗-频率特性曲线

图1.2示出用于机械滤波器的电的、机电的和机械的元件，电调谐元件调谐换能器的电抗，但这种方法仅仅用于通常所说的中等频带滤波器和宽带滤波器。常用的换能器有磁致伸缩型和压电型两种。单独的换能器连到金属棒或板上时，都应谐振在滤波器通带内的某一频率上。该换能器激励由金属丝耦合而成的谐振子系统，并由它去激励输出换能器和电调谐线圈或调谐电容。终端电阻 R 表示输入（电源）和输出（负载）电路电阻。为了获得一平坦的或波动适中的通带响应，必须在滤波器末端端接所要求的电阻。滤波器的所有元件都具有线性和可逆特性，因此当不同振幅的，或不同频率的信号在输入端与输出电阻器之间均能单独的，或简单的相加后进行传输，并是可逆的。

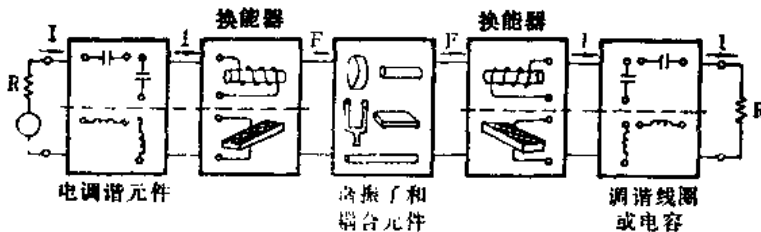


图1.2 由各种主要元件构成的机械滤波器系统图

至此，我们已对机械滤波器作了一般性的描述。现让我们再来研究一种特殊型滤波器，并观察一信号从信号发生器到负载电阻的传输过程。图1.3示出一种采用磁致伸缩铁氧体换能器的圆盘—金属丝机械滤波器。见图1.3，自电压发生器产生的电流 I 流经调谐电容 C_R 和换能器线圈。电流通过线圈时就会产生一个穿过铁氧体磁棒的磁场，使铁氧体磁棒按照发生器信号频率振动。由于磁场的变化，引起铁氧体磁棒尺寸的变化而产生振动的现象称之为磁致伸缩。这种振动借助一小根金属丝被耦合到第一节圆盘谐振子上。两圆盘间的机械能耦合是通过焊接在每个圆盘外缘上的金属丝实现的。末端圆盘谐振子和耦合丝的振动，激励输出换能器，输出换能器的形变产生一交变磁场，从而在线圈和负载电阻 R 的两端感应出电压 V_L 。尽管我们叙述的信号是按从输入端到输出端方向传输的，但应当记住，能量在恒态状态时，可在两个方向传送。图1.4为圆盘—金属丝机械滤波器的实物照片图。

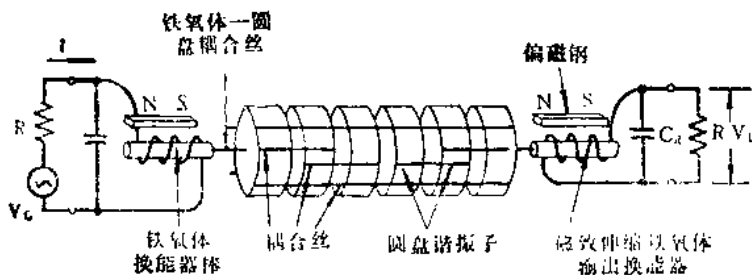


图1.3 圆盘机械滤波器的主要元件构成图

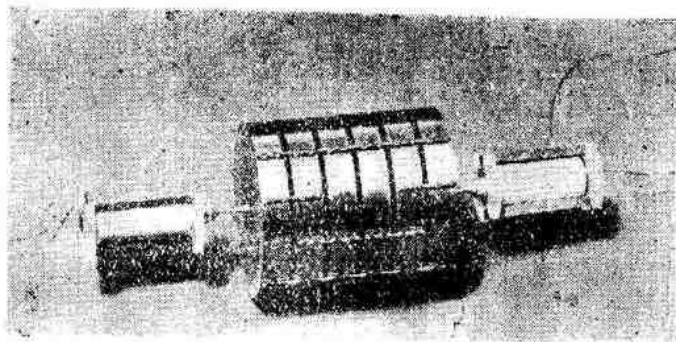


图1.4 用于33分多路调制 (FDM) 电话系统的机械滤波器 (美国罗克韦尔国际公司)

图1.5示出的是圆盘—金属丝机械滤波器的等效电路图。机械元件——弹性体、质量块和阻尼元件借助直接的，或变换的和模拟的方式，被转换成对应的等效电元件。如果我们借助一数字计算机对图1.5中的电感耦合网络的频率响应进行分析，就会获得类似于图1.1中的特性曲线。显然，一般人对滤波器的基本理论是熟悉的，但对新手来说就并不清楚了。

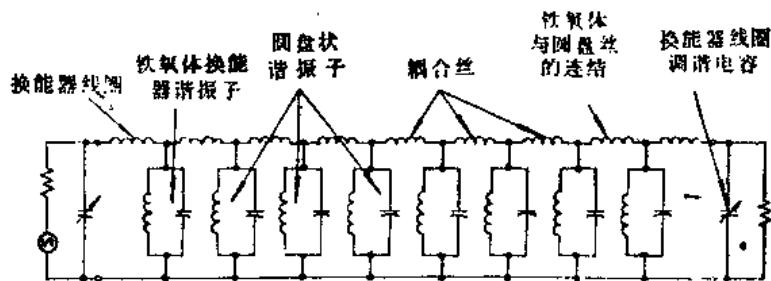


图1.6 图1.3和1.4中的机械滤波器的电感耦合电等效电路图

对于已受过电子学方面的某些培训，但对滤波器理论不十分熟悉的人员，下面的讨论或许是有帮助的。图1.6示出的是一节电感耦合的机械滤波器等效电路图。两个调谐电路均谐振在 f_1 频率上，因为该节有两个谐振子，因此就有两个固有谐振（频率）。换言之，当谐振子被激励时，该电路将在两个频率上振动。一个频率是在谐振子中电流是同相、电感 L_{12} 两端的电位一直处零的地方。第二个固有频率是在调谐电路中电流彼此不同相，耦合电感 L_{12} 两端电压被提高的地方。因为 L_{12} 的对边的电位幅度是相等的，但正负号相反，因此在耦合电感的中心电位总是等于零。所以该中点可接地，而且该节的两半调谐电路能各自单独振动，而振动频率却是相同的。

$$f = f_2 = 1 / 2 \pi \sqrt{L' C}$$

式中，

$$L' = (L_{12} / 2) L / [(L_{12} / 2) + L]。$$

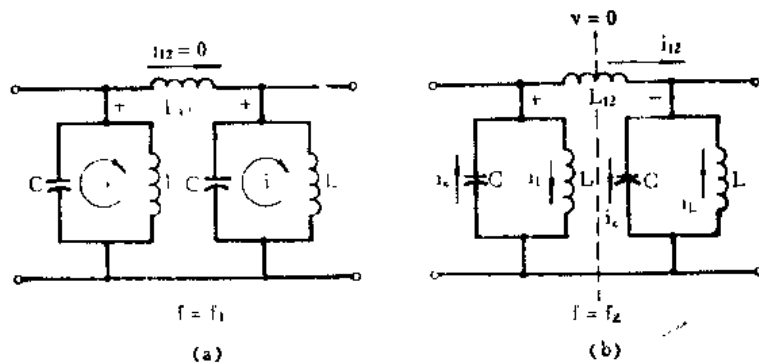


图1.6 双谐振子滤波器的谐振条件

- (a) 在调谐电路的 f_1 频率上的同相谐振；
- (b) 在 f_2 高端频率上的非同相谐振。

如果我们用一电流源激励图1.6所示的电路的一端，并测量另一端上的电压时，便可在频率 f_1 和 f_2 上看到有大的电压峰。如用串有电阻的电压源代替电流源，并用纯阻端接输出端，则输出电压的响应（作为频率的函数）将是一带通滤波器的响应（参见图4.9）。频率 f_1 和 f_2 确定通带范围。这种分析可扩展到多个谐振子，如像图3.33和图

3.34所做的弹性—质量分析。假如你有扎实的机械系统方面的基础知识，那么图3.33的分析可能比图1.6的更有帮助些。机械滤波器元件与滤波器特性（带宽、中心频率、波形因素）之间的一般关系，将在第三章的开头部分予以讨论。

2. 机械滤波器的类型

在上节中讨论的圆盘状机械滤波器只是众多机械滤波器类型中的一种。从图1.7到图1.10示出了采用弯曲、伸缩、扭转等振动模式的谐振子和耦合丝的机械滤波器。机械滤波器的换能器也是多种多样的，从简单的棒状或板状，到如象图2.18中所示的那些陶瓷—金属复合的换能器。把换能器耦合到第一节金属谐振子上的方法请参看图4.27。机械滤波器内金属谐振子的耦合方法示于图4.21。实现有限的频率衰耗极点的方法可参看图4.29。图4.34则描述电调谐方法和端接方法。

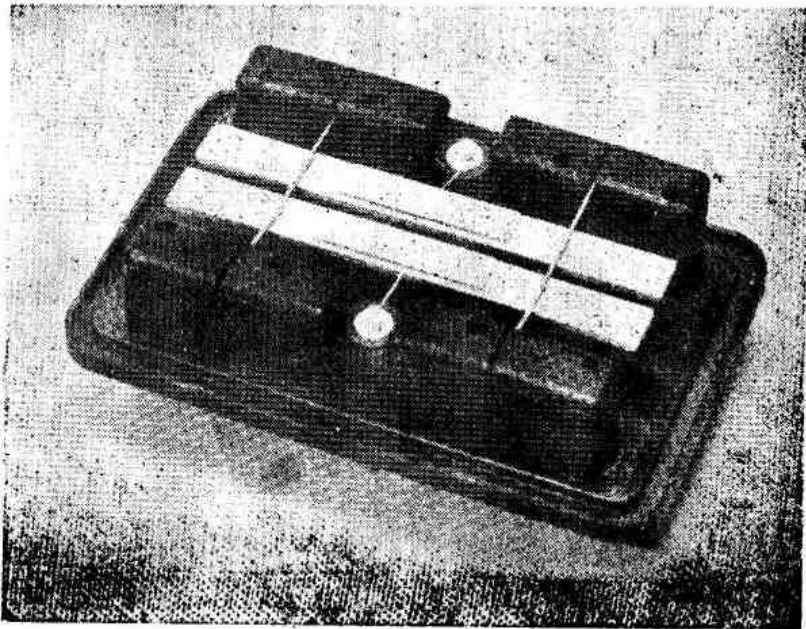


图1.7 用于电话信号传输设备的机械滤波器
 $f_0=3.825\text{KHz}$ (美国罗克韦尔国际公司)

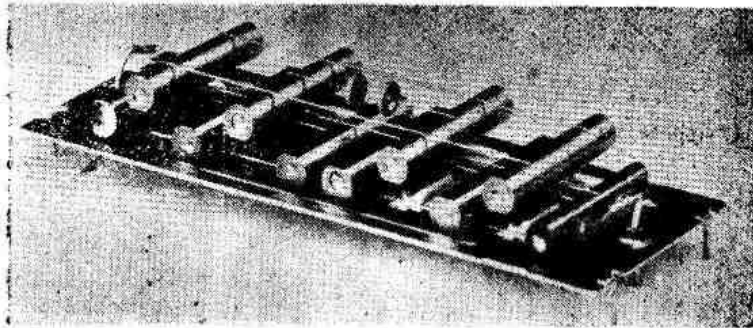


图1.8 具有质量加载金属丝桥接的48KHz
 电话信道滤波器 (意大利特莱姆公司)

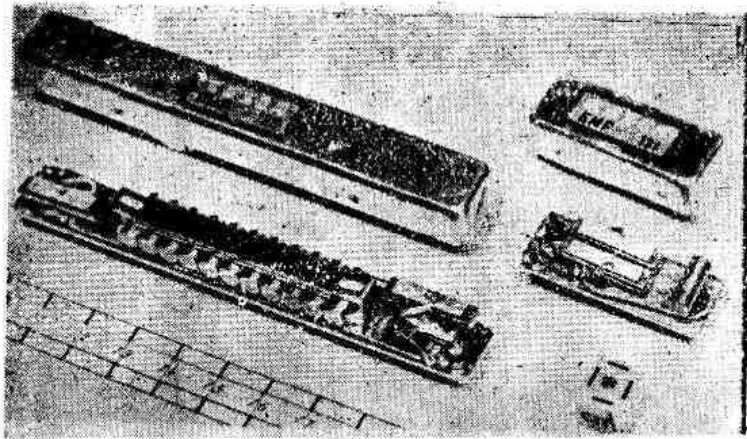


图1.9 电话信道和信号传输滤波器
 $f_0=128\text{KHz}$ (C.S.R. 特斯拉公司)

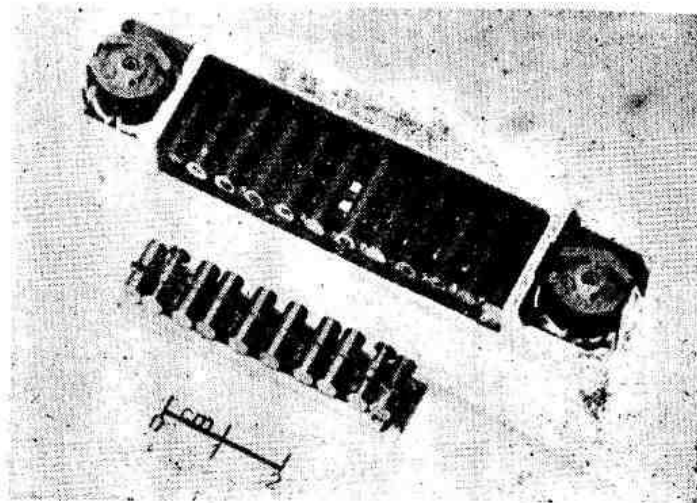


图1.10 48KHz(上)和128KHz(下)
 电话信道滤波器 (F.R.G 西门子公司)

二、机械滤波器的特点与用途

机械滤波器通常用于要求窄带宽、低损耗、高稳定性的系统设备中。这是因为机械谐振子能满足高Q值、极好的温度特性和时效特性等要求。铁—镍合金谐振子Q值达10000~25000，这就允许把机械滤波器的相对带宽窄到0.05%。而且不至于损耗过大，或通带过分圆滑。

与高Q值同等重要的参数还有频率温度系数和机械谐振子的频率老化。典型的谐振子频偏是正态分布的，并在 $2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 量级，即当频率为455KHz时，每 $\pm 50^\circ\text{C}$ 的温度变化范围，滤波器通带约有45Hz的偏移。偏移可是正、反向的，这取决于选用的材料。稳定度很重要，因为在单边带设备中，频偏大于100Hz时会导致载波抑制性变差，

北京路高第 英江古九門脈 左此左的安全物事 右此右的補法照人早世極了快六座

表1.1 窄带音叉滤波器、窄带弯曲型滤波器和中等频带通信滤波器特性一览表

滤波器特性	滤波器类型					
	窄带音叉		窄带弯曲型		中等频带通信	
	(最小)	(最大)	(最小)	(最大)	(最小)	(最大)
中心频率 (f_0)	200Hz	25KHz	2 KHz	75KHz	50KHz	600KHz
相对带宽 (B/f_0)	0.3%	1.0%	0.15%	10%	0.05%	10%
振子数量 (谐振子)	1	2	2	4	2	15
插入损耗 (IL)	2 dB	20dB	1.5dB	10dB	2 dB	15dB
中心频率温度系数 (TC_f)	$\pm 20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$\pm 60 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$\pm 8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$\pm 25 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$\pm 1.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$\pm 5 \times 16^{-6}/^{\circ}\text{C}$
终端电阻 (R_T)	10K Ω	300K Ω	2 K Ω	50K Ω	100 Ω	30K Ω
老化 (10年)	200×10^{-6}	750×10^{-6}	100×10^{-6}	750×10^{-6}	50×10^{-6}	250×10^{-6}
耐冲击震动	10g	35g	15g	200g	15g	250g