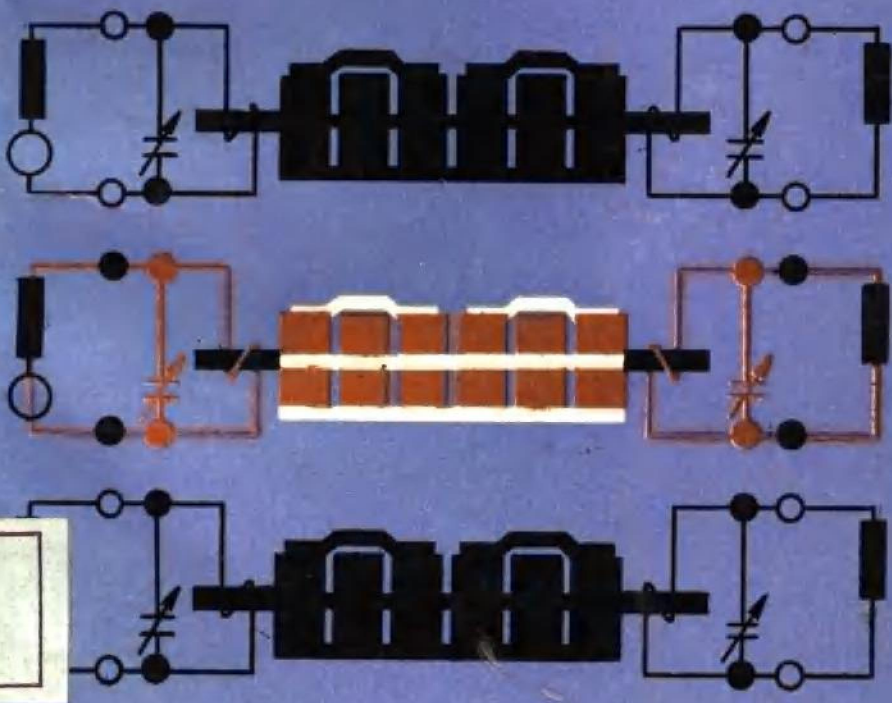


机械滤波器 及其应用

金静乐 张文献 杨毓申 严言忠 叶芝华 合编



中国铁道出版社

前 言

机械滤波器自1947年问世以来，由于它具有高选择性、高可靠性、高稳定性和体积小、重量轻、成本低，以及适合自动化生产等优点，在电子设备中已广为采用。从民用收音机、载波通信到数据传输、遥控遥测，直至宇宙航行通信装置等各个方面，都有应用实例。其中载波通信技术的发展与机械滤波器有着最密切的关系。

我国在六十年代初已开始制造和应用机械滤波器，随着应用领域的扩大，品种也不断增加，并在相当多的电子设备中取代了晶体滤波器和LC滤波器。但是，国内系统论述机械滤波器的专业书籍尚少，因此编者根据多年实践，并广泛吸收国内外制造和应用经验编写了本书。

本书根据深入浅出的原则，简要地阐述了机械滤波器的工作原理，并介绍了大量设计实例。书中给出的计算公式和数据具有实用价值。为使读者对机械滤波器的关键材料——恒弹性合金（特种精密合金）有深入的了解，本书对它作了较全面的介绍，附录中还列出了国产恒弹性合金的型号和规格，供读者选用。

本书由金静乐主编。北方交通大学王文煊教授对全书进行了审阅，吕孝、邹德纯两位高级工程师对编写本书给予了热情支持，一并致以衷心的感谢。

由于编者经验不足，水平有限，难免有谬误之处，敬请读者批评指正。

编 者

一九八五年六月

目 录

第一章 概 论	1
第一节 滤波器的定义.....	1
第二节 滤波器的种类.....	3
第三节 滤波器技术指标的定义.....	5
第四节 机械滤波器的构成和工作原理.....	8
第五节 机械滤波器的一般特性.....	13
第二章 机械振子	16
第一节 振动和波.....	16
第二节 振子的伸缩振动模式.....	21
第三节 振子的弯曲振动模式.....	27
第四节 振子的扭转振动模式.....	37
第五节 振子的剪切振动模式.....	39
第六节 振子的复合振动模式.....	40
第七节 变截面振子.....	48
第八节 机械振子和耦合子的选择.....	54
第三章 机电类比和等效网络	58
第一节 基本概念.....	58
第二节 机电类比参数.....	65
第三节 等效网络.....	67
第四节 振子的窄带等效网络和等效参数.....	69
第五节 耦合子的等效网络和等效参数.....	72
第四章 恒弹性合金	76
第一节 基本物理特性.....	77
第二节 恒弹性合金的构成及其主要类型.....	85

第三节	恒弹性合金的制造技术	95
第四节	新型恒弹性合金	101
第五章	机电换能器和匹配网络	103
第一节	概述	103
第二节	压电效应和压电陶瓷片	106
第三节	压电换能器的结构形式和设计方法	113
第四节	压电片的选择和设计实例	123
第五节	磁致伸缩换能器	131
第六节	匹配网络	134
第六章	机械滤波器的设计方法	141
第一节	工作参数滤波器	141
第二节	机械滤波器的设计方法(综合法)	149
第三节	机械滤波器的有耗设计和定K型设计	158
第四节	支撑方法的设计	162
第七章	棒状机械滤波器	164
第一节	话路滤波器和边带滤波器的传输特性	164
第二节	折叠式纵振棒状机械滤波器	166
第三节	曲振棒状机械滤波器	178
第四节	扭振棒状机械滤波器	183
第五节	具有有限衰减极点的棒状机械滤波器	186
第六节	其它结构形式	189
第八章	板状机械滤波器	191
第一节	圆盘机械滤波器	191
第二节	复耦合圆盘机械滤波器	196
第三节	其它板状机械滤波器	200
第九章	音叉、音片谐振器和滤波器	205
第一节	压电音叉谐振器	206
第二节	单音叉滤波器	212

第三节	耦合音叉滤波器·····	216
第四节	音片滤波器·····	221
第十章	双谐振机械滤波器和差接机械滤波器·····	226
第一节	双曲音片滤波器·····	226
第二节	其它形式的双谐振机械滤波器·····	234
第三节	差接机械滤波器·····	237
第四节	带阻机械滤波器·····	241
第五节	双谐振耦合机械滤波器·····	243
第十一章	制造与维修·····	247
第一节	振子的制造·····	247
第二节	压电换能器的制造·····	252
第三节	机械滤波单元的制造·····	256
第四节	匹配电路的制造·····	258
第五节	调整和测量·····	259
第六节	失效和维修·····	263
第十二章	在载波通信系统中的应用·····	268
第一节	概述·····	268
第二节	在12路载波电话终端机中的应用·····	270
第三节	在移频键控 (FSK) 装置中的应用·····	279
第十三章	在无线通信和遥控遥测中的应用·····	286
第一节	边带机械滤波器·····	286
第二节	收信中频机械滤波器·····	290
第三节	奥米格导航机械滤波器·····	293
第四节	音叉振荡器·····	296
第五节	在音频遥测技术中的应用·····	300
第六节	在选择性传信和控制系统中的应用·····	301
附录一	国产恒弹性合金型号 (频率元件用) 及 相应的国外产品型号·····	303

附录二	国产恒弹性合金(频率元件用)规格一览表…	304
附录三	几种压电片的主要技术性能……………	305
附录四	国内外压电片性能比较……………	306

第一章 概 论

第一节 滤波器的定义

在电子工程领域内，为了分离信号、抑制干扰，以及变换阻抗、匹配阻抗和延迟信号等，都要使用滤波器。因此，就广泛的意义来说，滤波器可以定义为在给定的激励信号下，能够产生某一预定响应信号的一种网络。而就整个工程系统（例如载波电话终端机）来说，滤波器是一种选频器件。它对某一频率（频带）的电信号给予很小的衰减，使这部分信号能顺利通过，而对其它频率的电信号则给予很大的衰减，尽可能地阻止这些信号通过。从工程数学的角度来说，滤波器的特性可以用一个数学函数来表征，也就是说，给定技术条件，要求设计一个滤波器，这个滤波器的衰减频率特性（或相位特性）总可以用数学函数来表示。

以很小衰减通过滤波器的工作频率范围称为滤波器的“通频带”，简称“通带”。被阻止通过滤波器的另一部分频率范围，称为滤波器的“阻频带”，简称“阻带”。而有效通带与有效阻带之间的频带称为“过渡频带”，简称“过渡带”。通带与阻带的分界频率称为滤波器的“截止频率”，在带通滤波器与带阻滤波器中有两个截止频率，称为“上截止频率”和“下截止频率”。

滤波器根据其通带和阻带所处的不同范围分为4种：

1. 低通滤波器：理想的低通滤波器可使某一截止频率以下的所有电信号能够无衰减地通过，而对于截止频率以上的所有电信号则给予较大的衰减，阻止其通过。图1-1(a)是理想低通滤波器的衰减频率特性。实际上，在截止频率以下

的电信号仍有少量衰减，经过过渡频带后，才升至较大的阻带衰减，如图1-1(b)所示。

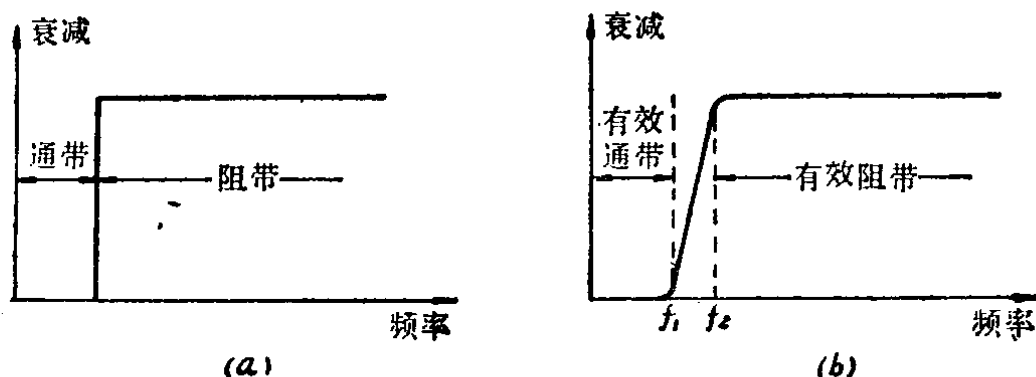


图 1-1 低通滤波器

2. 高通滤波器：理想的高通滤波器可使截止频率以上的所有电信号能够无衰减地通过，而对于截止频率以下的所有电信号则给予较大的衰减，阻止其通过。图1-2(a)是理想高通滤波器的衰减频率特性，图1-2(b)为实际情况下的衰减频率特性。

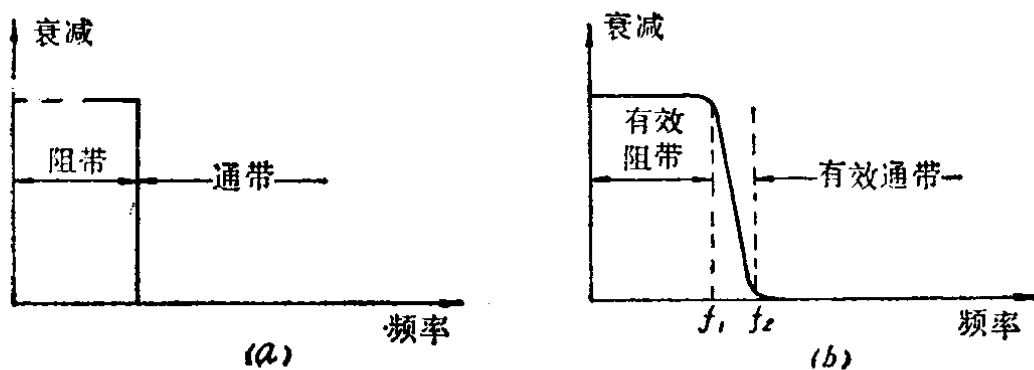


图 1-2 高通滤波器

3. 带通滤波器：理想的带通滤波器可使某一频带内的信号无衰减地通过，而对于这个频带范围之外的所有电信号则给予较大的衰减，阻止其通过。图1-3是实际的带通滤波

器衰减频率特性。

4. 带阻滤波器：它和带通滤波器的衰减频率特性正好相反，如图1-4所示。它抑制某一频带内的电信号，而让这频带以外的其他信号通过。

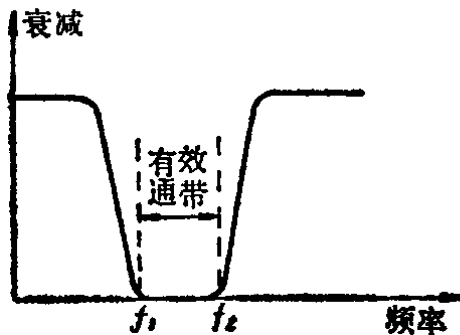


图 1-3 带通滤波器

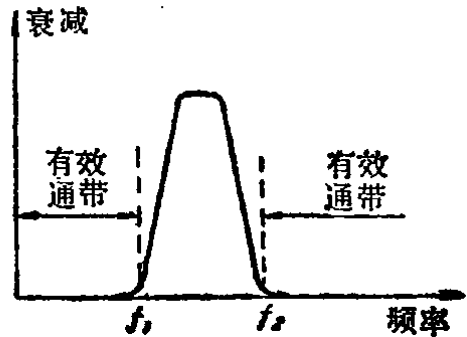


图 1-4 带阻滤波器

第二节 滤波器的种类

随着电子技术的发展，滤波器的种类也越来越多。但总的来说，滤波器可以分为两大类：无源滤波器和有源滤波器。

无源滤波器中所使用的元件是无源元件。在这一大类滤波器中，根据选用的不同元件又大致分为7种：

(1) LC滤波器：由电感（ L ）和电容（ C ）这两种集总参数元件组成的滤波器。

(2) 晶体滤波器：用石英晶体作为谐振元件的滤波器。

(3) 陶瓷滤波器：用压电陶瓷作为谐振元件的滤波器。

(4) 机械滤波器：用恒弹性合金制成的机械谐振子作为谐振元件的滤波器。

(5) 螺旋振子滤波器：将芯线（例如镀银铜线）做成螺旋状谐振子作为谐振元件的滤波器。

(6) 单片石英晶体滤波器：只由一块石英晶体构成的滤波器。单片晶体滤波器是根据能陷理论，在一块 AT 切割的石英片上按一定间隙排列两对以上电极而构成的。

(7) 声表面波滤波器：它是完全利用集成电路制造技术，在压电基片（压电陶瓷或压电晶体）上形成叉指换能器来产生、控制和检出表面波以实现滤波的一种器件。

有源滤波器中不仅使用无源元件，而且使用有源器件。随着微处理技术的发展，有源滤波器的品种和应用进一步扩大。有源滤波器也分为两大类：第一类为 RC 有源滤波器。利用硅单片运算放大器和薄膜或厚膜 RC 电路，可以制成优质 RC 有源滤波器。第二类为数字滤波器，这是一种以数字形式进行运算的滤波器。数字滤波器实际上是一种计算过程或运算方法，用这种方法把一个输入数列变换成另一个输出数列。这种计算可作为通用计算机的子程序，利用软件来实现，也可以通过专用计算机的硬件来实现。

此外，近年发展起来的开关电容 (SC) 滤波器则是另一种新型的有源滤波器。它由 MOS 电路的电容、晶体管模拟开关和运算放大器组成。目前开关电容滤波器有两种设计方法：(1) 状态变量法：它根据预定的频率特性要求，按经典方法设计出两端等阻的 LC 网络，然后将其变换为等效的“状态变量网络”，最后用 SC (开关电容) 积分器作其中的积分运算。(2) 双线性变换法：它用一个由开关、电容和运算放大器组成的单端网络取代电阻或电感，这样可以把 RC 有源网络或 LC 无源网络直接转换成 SC 网络。利用这种滤波器，可以在面积不大的单块硅片上制作各种音频网络，体积可达微型化，而且准确性、稳定性均很高。

表 1-1 列出了各种滤波器的频率范围、相对带宽和它们所能实现的功能。各种滤波器在电子工程领域的应用中显示了它们的优缺点，目前还不能简单地认为哪一种滤波器将被淘汰。实践证明它们将互相补充、以满足各种需要。尤其应该指出的是：每一种滤波器总是在某一个特定频段内显示它的优点，而在这特定频段之外则暴露了它的缺点。因此，在电子设备中如何合理选用滤波器是一个极其重要的问题，必须综合考虑滤波器的衰减频率特性、相位特性、温度和时间稳定性、阻抗特性以及体积等因素。

表 1-1 滤波器的分类及其应用频段

	滤波器名称	应用频段	相对带宽	功 能
无源	LC	100Hz~100MHz	5~100%	低通、高通、带通、带阻
	晶体	10kHz~30MHz	0.4~10%	带通、带阻
	陶瓷	50kHz~20MHz	1~3.7%(7%)	带通、带阻
	机械	100Hz~600kHz	0.1~20%	带通、带阻
	螺旋	10~500MHz	0.5~40%	带 通
	单片石英晶体 声表面波	5~200MHz 10MHz~2GHz	0.001~0.3% 最大50~100%	带 通 带通、带阻
有源	模拟式RC	0.1Hz~1MHz	5~100%	低通、高通、带通、带阻
	数 字	正在研制中	—	—
	开关电容	正在研制中	—	—

第三节 滤波器技术指标的定义

当信号通过滤波器时，不同的滤波器对信号会有不同的影响。因此，必须根据信号的要求对滤波器规定严格的技术指标，否则就无法满足信号传输要求。

滤波器技术指标的定义是以四端网络理论为基础的，在实际应用中，计算方法可以简化，以方便工程设计。

1. 中心频率 f_0 ：由网络分析可知，滤波器中心频率 f_0 是滤波器上下两个截止频率的几何平均值，即

$$f_0 = \sqrt{f_{c1} f_{c2}} \quad (1-1)$$

式中 f_{c1} ——下截止频率；

f_{c2} ——上截止频率。

在实际计算带通滤波器的中心频率时，把衰减频率特性曲线上两个3dB（也可以是1.5或6dB）衰减点之间的中间频率，称为带通滤波器的通带中心频率，计算公式为

$$f_0 = \frac{f_2 + f_1}{2} \quad (1-2)$$

式中 f_1 、 f_2 ——3dB（也可以是1.5或6dB）衰减点的频率。

对于带阻滤波器，是将衰减频率特性曲线上最高衰减点左右各下降3dB（也可以是1.5或6dB）点之间的中间频率，称为带阻滤波器的阻带中心频率。而对于音叉（或音片）谐振器，则是将其谐振曲线最高点左右各下降3dB（也可以是1.5或6dB）点之间的中间频率，称为音叉（或音片）谐振器的中心频率。

应该指出，有的滤波器对于中心频率 f_0 无严格要求，有的滤波器仅仅在计算时使用中心频率，而在实际应用中无要求。

2. 通带 ΔF ：在实际应用中，通带或通带范围也可以是滤波器衰减频率特性曲线上相同电平点之间的频率间隔，即

$$\Delta F = f_{n2} - f_{n1} \quad (1-3)$$

式中 f_{n1} 、 f_{n2} ——衰减频率特性曲线上相同电平点的频率。

在有的滤波器中，根据信号传输特点，对衰减有一定要求，也就是说，对其通带范围可以有不同的要求。若是3dB带宽，则是指滤波器衰减频率特性曲线上3dB衰减点之间的频率宽度，记为 ΔF_3 。

描述带通滤波器传输特性的一个重要参数是其相对带宽。相对带宽 B 定义为

$$B = \frac{\Delta F}{f_0} \% \quad (1-4)$$

在设计滤波器时，常常采用相对带宽的倒数。

3. 通带介入衰减 N_P ：在滤波器衰减频率特性曲线上，通带衰减最高点称为“通带介入衰减”，又称“通带插入衰减”。根据实际应用要求，在有的滤波器中，以通带内特定频率点上的介入衰减作为通带衰减要求。

4. 通带波动 Δa ：在滤波器的通带内，衰减频率特性曲线的最大峰值与谷值之差称为“通带波动”。根据信号传输要求，在有的滤波器中， Δa 的允许值只有一个；而在有的滤波器中，则将通带分成几段，在每一段中允许有一个 Δa 。

5. 阻带介入衰减（也称净衰减或防卫度） N_a ：阻带最小衰减 N_{\min} 减去通带介入衰减 N_P 为“阻带介入衰减”，即

$$N_a = N_{\min} - N_P$$

在有的滤波器中，也用矩形系数 $K_{\text{矩}}$ 来表示阻带情况，典型的矩形系数定义为

$$K_{\text{矩}} = \Delta F_{60} / \Delta F_3$$

根据实际应用要求的不同，上式中的 ΔF_{60} 也可以规定为 ΔF_{45} 、 ΔF_{40} 等， ΔF_3 也可规定为 ΔF_6 、 $\Delta F_{1.5}$ 或 ΔF_1 等。

6. 寄生响应 N_g ：在滤波器整个阻带范围内的某个频率点（或几个频率点）上出现“通带”的现象，称为“寄生响应”或“杂散响应”。

在机械滤波器中，这个技术指标十分重要，若不有效地抑制寄生响应，则会影响机械滤波器的使用。

7. 相移 ϕ ：某一特定频率的信号通过滤波器时，其在滤波器的输入和输出端的相位之差称为滤波器的“相移”。

8. 群延迟 τ 和群延迟波动 $\Delta\tau$ ：群延迟又称“包络延迟”，它是用相移对于频率的变化率来衡量的。群延迟 τ 定义为

$$\tau = d\phi/d\omega \quad (1-5)$$

即相移对角频率的导数。

在实际应用中，群延迟波动比群延迟更重要。群延迟波动 $\Delta\tau$ 等于滤波器通带范围内的最大群延迟与最小群延迟之差。

第四节 机械滤波器的构成和工作原理

一、机械滤波器的构成

机械滤波器又称为“机电滤波器”或“电气-机械滤波器”。它通常是指一种由特殊合金——恒弹性合金材料制成，并备有一对机电换能器的滤波器。目前，其实用品种很多，构成分为四种情况。

1. 第一种结构形式：由机械谐振子（简称“振子”）、机械耦合子（简称“耦合子”）和机电换能器（简称“换能器”）三部分构成。图 1-5 是这种滤波器的结构方框图。图中虚线部分称为机械振动单元，它包括振子和耦合子两部分。由于机械滤波器主要由机械振动单元来完成滤波功能，所以又称其为“机械滤波单元”。

大多数机械滤波器（尤其是中、高频机械滤波器）均属于这种结构。由于这种滤波器采用多个元件组合而成，故一般为拼装式。

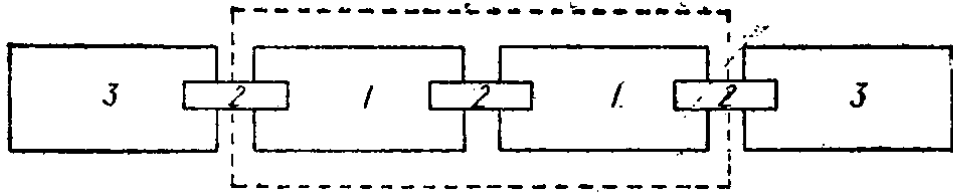


图 1-5 机械滤波器的第一种结构形式
1——振子；2——耦合子；3——换能器。

2. 第二种结构形式：没有耦合子，振子和换能器合为一体，称为一个“组合”。一般一个组合就构成一个滤波器。图 1-6 是这种滤波器的方框图，有的低频机械滤波器就属于这种结构。

3. 第三种结构形式：振子和换能器合为一体构成一个组合，然后把 2 个或 2 个以上的组合用导线连接起来组成滤波器。一部分中、低频机械滤波器采用这种结构。图 1-7 是这种滤波器的典型结构示意图。

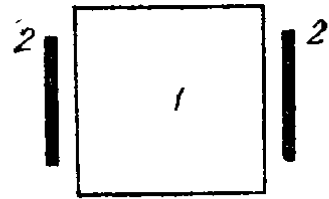


图 1-6 机械滤波器的第二种结构形式
1—振子；2—换能器。

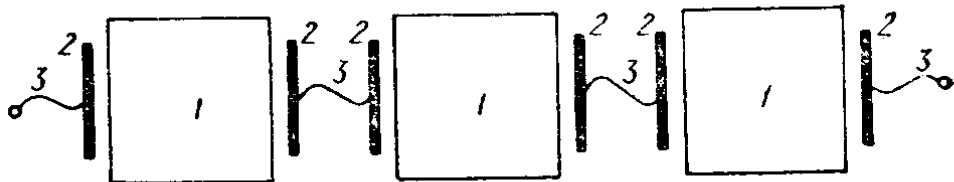


图 1-7 机械滤波器的第三种结构形式
1——振子；2——换能器；3——软连接线（导线）。

4. 第四种结构形式：与第三种不同的是将2个或2个以上组合用耦合子相连接。一部分中、低频机械滤波器采用这种结构。图1-8是这种滤波器的方框图。

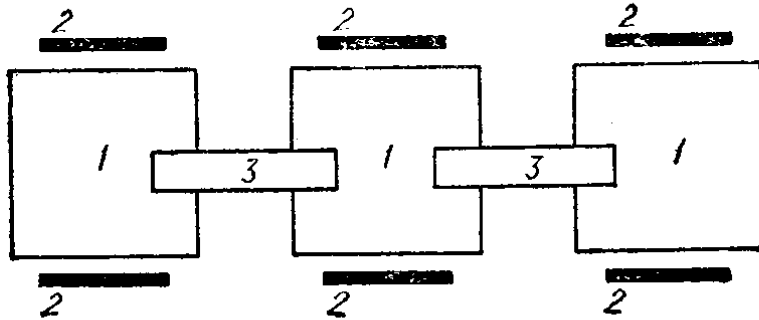


图 1-8 机械滤波器的第四种结构形式

1——振子；2——换能器；3——耦合子。

此外，大多数机械滤波器在输入和输出端都加有由电感和电容组成的“匹配网络”，又称“匹配电路”。它们也是机械滤波器的一部分。

二、机械滤波器的工作原理

机械滤波器的工作原理不仅区别于 LC 滤波器，而且和晶体滤波器、陶瓷滤波器也有不同。总的来说，机械滤波器的工作过程包括机电换能和机械振动两部分，其工作原理如下：换能器把外界电信号（电振荡）转换为具有一定振动模式的机械振动（它们的振动频率与电信号的频率相同），激励振子作同频率的机械振动。由于振子具有很高的品质因数，振动能量衰减极小，因此振动被传输到输出换能器上，通过能量转换又把机械振动转换成同频率的电信号，完成了滤波。

从它的工作原理可以看出，机械滤波器不仅涉及滤波网络所要解决的问题，而且还涉及振动理论、机电类比和机电换能等问题。

机械滤波器一般只能设计成带通滤波器，只有在特定的

条件下才可以设计成带阻滤波器，所以机械滤波器又称为“带通机械滤波器”。

机械滤波器的工作频率范围为 100Hz~600kHz，其中 50kHz 以下为低频机械滤波器，50~200kHz 为中频机械滤波器，200~600kHz 为高频机械滤波器。它的相对带宽为 0.5~15%，有的可达 0.1~30%。

表 1-2 是机械滤波器可实现的特性范围。从表中可以看出，机械滤波器具有明显的优点，这些优点在以后各章中将要具体讨论。

表 1-2 机械滤波器可实现的特性范围

指标名称	最小值	典型值	最大值
中心频率 f_0	50Hz	300Hz~500kHz	600kHz
相对带宽 B	0.01%	0.5~15%	30%
通带介入衰减 N_P	0.5dB	3~5dB	10dB
通带波动 Δa	0dB	0.5dB	1.5~3dB
阻抗 Z	几十 Ω	几百 Ω ~几十 k Ω	几十 k Ω
振子数	1	2~12	15
选择性 $K_{矩60/s}$	5	3~1.5	1.1
温度稳定性 β_T	$\pm 3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	$\pm 10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	$\pm 25 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
时间稳定性	$0.2 \times 10^{-4}/10a$	—	$3.0 \times 10^{-4}/10a$
工作电平	-70dB	-10dB	10dB
耐振动	1g	5g	15g
耐冲击	15g	50g	1500g

三、机械滤波器的分类和工程符号

实用机械滤波器的品种相当繁多，习惯上按不同的振子形状进行分类。

表 1-3 是目前实用机械滤波器分类表。从表中可以看出机械滤波器共有 5 种类型：音叉机械滤波器（包括音叉谐振