



射頻機械濾波器

蘇聯 M. Γ. 格魯布曹夫著

叢 茂 森 譯

人 民 郵 電 出 版 社

蘇 聯
蘇 聯 無 綫 電

內 容 提 要

在这本小册子是介绍应用在无綫电技术中的新型滤波器。它由一些金屬片和棒等组成。具有接近矩形形状的頻率特性曲綫。

作者本来目的是为业余无綫电爱好者写的，但对从事电信及广播工作的中初级技术人員也很适合。

射 頻 机 械 滤 波 器

著 者：（苏联） M. Г. 格 魯 布 曹 夫

譯 者： 丛 茂 森

出 版 者： 人 民 邮 电 出 版 社

北京东四六条13号

（北京市書刊出版业营业許可証出字第〇四八号）

印 刷 者：“煤炭工业出版社 印 刷 厂

发 行 者： 新 華 書 店

开本 787×1092 1/32

印张 1 4/32 頁数 20

印刷字数 32,000 字

印数 1—5,000 册

1958年12月第一版

1958年12月北京第一次印刷

统一书号：15045·总946—无247

定价：（10）0.19元

目 录

1	前言.....	1.
2	机械滤波器工作的物理基础.....	3
3	带通机械滤波器的结构.....	9
4	棒型和薄板型机械滤波器的计算.....	15
5	滤波器的制作精确度.....	26
6	滤波器的制作与装置.....	28
7	机械滤波器的频率特性曲线及接线.....	31

1. 前 言

改进无线电接收机的工作质量的方法之一，是提高它的选择性。为了这一目的，愈来愈多地采用多节带通滤波器来代替由双耦合槽路组成的普通带通滤波器。这种滤波器能够获得很好的频率特性，它在阻带内具有很大的工作衰减而在通带内则很平直。

制作频率特性曲线近似矩形的带通滤波器是相当困难的，因为滤波器电气槽路的品质因数比较低（一般不超过几百），这就难以制作在通带内具有很陡峭的前沿和很小的介入衰减的滤波器。

多节带通滤波器的应用受到限制的另一原因是它的尺寸问题。这是因为要获得好的频率特性曲线就必须有很多的节数，若缩小滤波器元件的尺寸，照例会使它的槽路的品质因数降低，从而使它的频率特性曲线变坏。

这些情况显然是最近无线电专家们所以注意机械谐振器的原因。机械谐振器的品质因数是很大的，一般为数以千计，而在射频范围内这种谐振器的尺寸较小。就本身的特性来说，机械滤波器可以同时代替普通槽路的电感和电容。

机械滤波器的工作原理，是基于将高频电振荡变换为机械振动，再通过由一系列机械谐振器组成的滤波器。经滤波之后，再把机械振动变换为电振荡，然后用普通方法加以放大和检波。谐振器是用金属棒，小球圆片和矩形薄板等制成的。这种谐振器的品质因数高，所以可以使带通滤波器具有陡峭的边沿和平顶。

中频机械滤波器可以保证无线电接收机具有良好的选择性。这种滤波器的矩形系数 $K_{0.001}$ 可能达到的数值为

$$K_{0.001} = \frac{2\Delta f_{0.001}}{2\Delta f_{0.7}} = 1.5 \sim 2,$$

轉振器

決定

式中 $2\Delta f_{0.1}$ —电平为0.7的滤波器通频带； $2\Delta f_{0.001}$ —相当于使干扰电压衰减为1/1000的频带。这种滤波器的频率范围是从几十千赫到一兆赫。根据滤波器的中心频率和所选择的元件联接电路，机械滤波器的通频带宽度可以为几赫到几十千赫。

在机械滤波器制成和调谐之后，它的中心频率和频带宽度便固定不变，要改变这些参数就得以另一滤波器来代换这一滤波器。

前面说过，在射频范围内，机械滤波器的尺寸很小，这正是它与由普通电感线圈及电容组成的滤波器相比的优点，并且还能成功地与印刷电路、小型零件配用。

为了比较起见，图1中画出了某种电气滤波器和机械滤波器的

频率特性曲线。

窄带机械滤波器还可用来稳定振荡器的频率，分离单边带接收中自动频率微调所需的载波频率，以及用在频谱分析器中等。

在这本小册子里，我们将简要地叙述物体机械振动理论的物理基础，以及它与LC回路的电气振荡相类似的性质，并阐明基本类型机电带通滤波器的工作。

同时，还将给无线电爱好者们介绍关于自己制造和装配机械滤波器所必须的计算知识。

好多机械滤波器是苏联科学院无线电技术与电子学研究所研

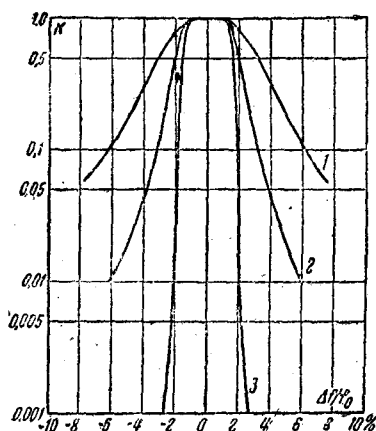


图1 滤波器的频率特性曲线

1—双谐振槽路带通滤波器的频率特性曲线；2—两级双谐振槽路带通滤波器的频率特性曲线；3—七个元件组成的滤波器的频率特性曲线。

究的。在这本小册子里，引用了这种滤波器的某些照片和频率特性曲线。

2. 机械滤波器工作的物理基础

由金属圆棒组成的带通滤波器,在射频范围内已经获得了应用。为了了解这种滤波器的工作,我们先来研究一下图 2, a 所示的单根金属棒的振动。在射频范围内,是利用这种棒的纵向振动和扭转振动。在纵向振动的情况下,金属棒沿自己的轴线一会见缩短,一会见伸长。当外加压力的频率和棒振动的自然频率一致时,便开始谐振。这时,棒长度的周期变化为最大。两端悬空(或固定住)的金属棒的自然频率,决定于棒的长度 l 和机械振动沿其轴线的传播速度 v_{np} 。可用下列公式决定:

$$f_n = n \cdot \frac{v_{np}}{2l} = n \cdot \frac{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}{2l}, \quad (1)$$

式中 n —进入谐振的谐波序数。

机械振动的传播速度可以由棒的材料、容积、密度 ρ 和代表的弹性系数 E 来算出。其中的 E 是指作用于截面积为 1 厘米² 的棒上的力能使它长度拉长为原来两倍时的情况。

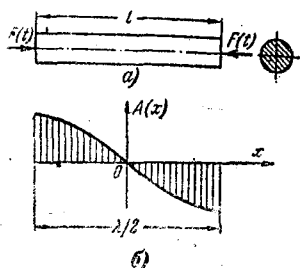


图 2 圆形截面棒型金属谐振器

a—全貌; б—振动幅度的变化与由中点算起沿棒轴的距离的关系(棒的长度等于 $\lambda/2$)。

最低振动频率等于 $\frac{v_{np}}{2l}$ 。在这种情况下,棒的长度等于半个波长 ($l = \frac{v_{np}}{2f_1} = \frac{\lambda}{2}$),并且如果棒的两端没有固定,那末棒的中点为静点或波节,如图 2б。

与纵向振动不同,扭转振动在棒中产生于更低的频率。它也是决定于棒的长度 l 和机械振动的传播速度

v_{kp} 。但是扭轉振動沿棒傳播較慢，並且諧振頻率為：

$$f_n = \frac{n \cdot v_{kp}}{2l} = n \frac{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}{\sqrt{2+2\sigma}} \cdot \frac{1}{2l} \quad (2)$$

式中 n —諧波序數，而 σ —泊松比（當棒延伸時，橫向壓縮與縱向伸長的比）。

金屬的泊松比 $\sigma \approx 1/3$ 。有趣的是在自然頻率的公式 (2) 中沒有圓棒的直徑這項。如果棒的两端是自由的，且其長度等於半个機械波長（ $l = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_{kp}}{f} = \frac{1}{2} \lambda$ ），那末棒的中心將為波節，而其兩端為波腹。

實際上，棒的扭轉總會使其長度發生變化，因而扭轉振動必然伴有縱向振動，並且如果扭轉振動的頻率與縱向振動的自然頻率一致，那末在棒上可以觀測到諧振的縱向振動。

在機械濾波器中所應用的另一類型的振動是利用金屬圓片的彎

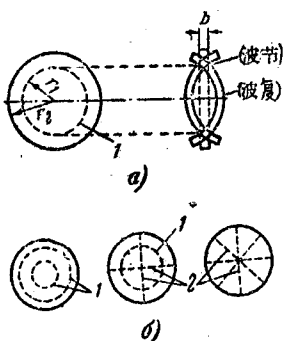


圖 3 金屬圓片的彎曲振動

a—圓片具有一個節環的（變曲）振動的形狀（1—節環）；b—圓片的各種振動形狀（1—節環，2—節徑）。

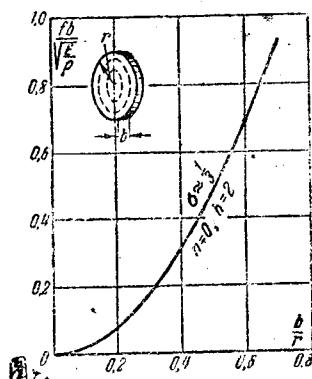


圖 4 金屬圓盤的諧振頻率與其尺寸的關係

曲振動。圖 3a 表示具有一個節環的自由圓薄片的諧振振動形狀。虛綫表示處於靜止狀態的薄片沿直徑的截面；實綫表示薄片振動時

的两个边界情况。位于半径为 r_1 的节环上的点始终不动。由图 86 可以看出, 某些类型的振动, 除了有节环以外, 还有节径。在这种情况下, 薄板的中心是不振动的。不管怎样, 振动只有在离开薄板中心的地方才有节环。

圆薄板的各种形状的弯曲振动, 是由和数值 $(n+2h)^2$ 近似成比例的各种频率激起来的, 其中 n 为节径数; h 为节环数。

实际应用上, 是利用圆薄板的双节环 ($n=0, h=2$) 振动。在图 4 所绘的薄板的振动频率 f 和薄板的厚度 b 与其半径 r 的比的关系, 即是指的这种情形。其余的振动形状是由于出现比较接近于基频频率的寄生振荡而激起来的。当用圆薄板设计滤波器时, 应当力求采用双节环的振动形状, 以便把寄生振荡的频率尽可能地离基频远一些。这就要适当地选择薄板的厚度与它的半径的比。

在射频范围内, 高与宽的比值 b/L 较大的方形金属薄板的弛张振动也获得了应用 (图 5a)。图 56 表示该薄板的谐振频率与比值 mb/L 的关系, 其中 m 为被激起的谐波序数; $\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ 为用薄板同一材料制成的棒中纵向振动的传播速度。在所选择的谐波序数

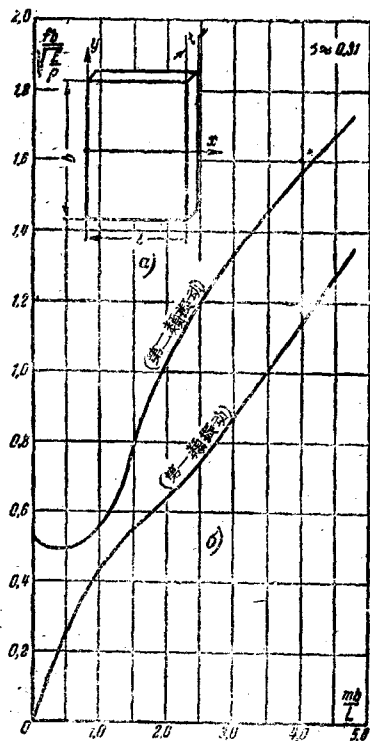


图 5 金属薄板的谐振振动的频率与其尺寸的关系

a—薄板的一般形状; b—薄板的第一类振动和第二类振动的曲线。

中，薄板的諧振振動可能在兩個頻率上出現。按照圖 56 的下面一曲綫或上一曲綫求得其頻率的諧振振動，分別叫做第一類振動和第二類振動。第一類振動用于低頻，并且薄板的尺寸也不大。第二類振動用于高頻，在這種情況下，機械濾波器有較堅固的結構。

圖 6 表示具有泊松比 $\sigma=0.31$ 和不同高度與寬度比 b/L 的薄板諧振振動的形狀。虛綫表示處於靜止狀態的薄板的形狀；實綫表示薄板在振動時兩個極邊的情況。如果減少薄板的高與寬的比值，那末薄板極邊的振動形狀將變為中間為凹凸的曲綫形式，當這個比值變得很小時（薄板變為細長條），極邊振動的形狀近似一條直綫。

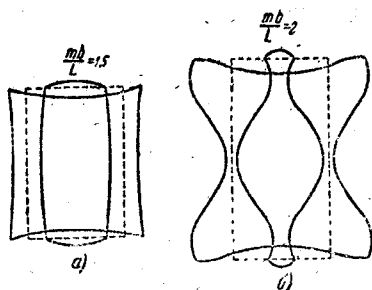


圖 6 金屬薄板在第二類振動時的極端形狀 ($m=1$)

a— $\frac{mb}{L}=1.5$ 的情形，

b— $\frac{mb}{L}=2$ 的情形。

上面所敘述的各類諧振器具有和機械振動的波長不太懸殊的尺寸。因此，可以把諧振器看作是具有分布參數的機械長綫。這可以從棒型諧振器的例子中（圖 2）明顯地看出來。在機械長綫和電氣長綫中所產生的過程，可以用許多類似的微分方程來描述。比較這些方程可以看出，作用在棒的橫斷面上的力 F 相當于電氣長綫導綫間的電壓 U ；機械阻尼相當于電阻；質量相當于電感。橫斷層沿棒縱軸的縱向位移 Δx 類似于通過電氣長綫導綫的電荷 q ，而橫斷層沿棒縱軸的位移速度類似電流。電容 $C=\frac{q}{U}$ 類似 $\vartheta=\frac{\Delta x}{F}$ ——材料彈性。

可見，機械諧振器可以用具有本身特性阻抗的等效電氣長綫段來代替。如果機械諧振器是在基波上激振，那末等效綫的長度等于半個電氣波長（圖 7a）。在諧振頻率 f_n 附近，長綫的分布元件可以用集

中元件来代替。

在半个波长上分析长綫綫段的等效电路表明，在频率 f_1 附近，这綫段可能是串联电路，电路的参数决定于长綫的特性阻抗 Z_p 。如果棒的一端是未被固定的，那末这和等效电路上的相当接綫柱短路的情形相类似，如图 76 所示。这是因为棒的自由端能够以很大的幅度和很快的速度振动的緣故。如已指出，横断层沿棒縱軸的位移速度是和电路中的电流相当的。因此，棒端大的位移速度相当于在綫路短路端产生的大电

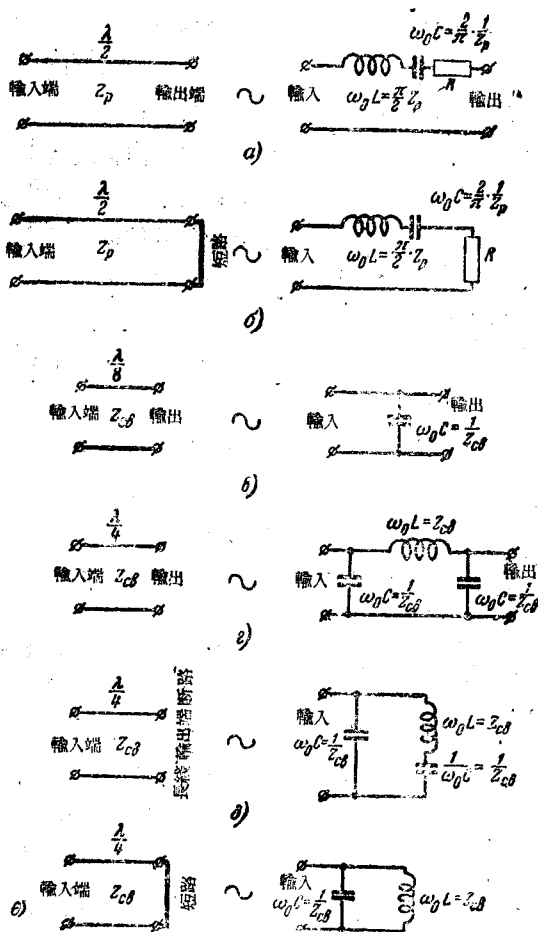


图 7 以具有集中参数的四端网络表示的长綫的等效电路
 a—与具有兩自由端的諧振器($l = \lambda/2$)等效;
 b—与具有一自由端的端諧振器($l = \lambda/2$)等效;
 a—与交連杆($l = \lambda/8$)等效; b— $\lambda/4$ 长綫的代換电路;
 a—与 $\lambda/4$ 固緊裝置的交連杆等效; b—与 $\lambda/4$ 端交連杆等效。

流。在机械滤波器中，除了谐振器以外，还含有把机械振动从这一谐振器传送到另一谐振的交连杆，它被做成长度为 $\lambda/8$ 和 $\lambda/4$ 的细棒。在滤波器的中间频率 ω_0 附近交连杆的等效电路如图 7a 和 c。在滤波器中，还有用来把滤波器紧固在底架上的等于四分之一波长的交连杆。它们的等效电路相当于接“地”的串联电路(图 7d)。

为了用电的方法在棒上激起机械振动，可以利用压电效应或磁致伸缩效应。在中频机械滤波器中，还常常使用磁致伸缩变换器。它的动作原理是以铁磁体在磁化时其尺寸和形状的变化为基础。这种变换器通常是利用镍或铁镍合金以及其它金属或磁致伸缩铁素体等来制成。

当磁场激励磁致伸缩材料制成的棒时，棒的长度发生变化。当棒的长度在磁场的作用下伸长时，是所谓正磁致伸缩效应；当棒的长度缩短时，是所谓负磁致伸缩效应。棒的长度的增量符号不决定于磁场的方向，而是决定于铁素体的成分。因此，必须在棒上建立附加的固定磁场，以便使棒不以双频振动。固定偏磁场的影响示于图 8。偏磁的数值 H_0 应当选得大于交变磁场的幅度。当场强相当

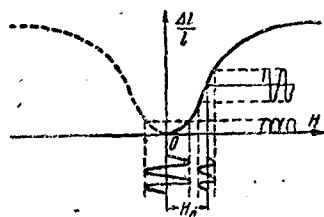


图 8 附加恒定磁场对磁致伸缩变换器中机械振动形状的影响

大时，偏磁将进入非线性状态，因而使机械振动的幅度降低。铁磁体棒除了具有磁致伸缩的性质以外，还具有逆磁致伸缩的性质，亦即在改变棒长度的外力作用下，棒中将有纵向磁场产生。

由图 9 可以看出，镍棒长度的相对变化，是用 10^{-5} 的数量级来量度的。镍棒长度的变化，大约在磁场强度为 500 奥斯特时减弱。镍的磁致伸缩特性曲线的起初弯曲部分约在 0.1—0.3 奥斯特。某些类型的坡莫合金也具有磁致伸缩的性质

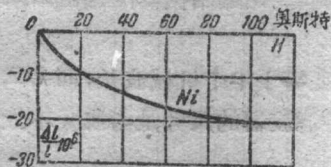


图9 鎳的磁致伸縮特性曲綫

如果把偏磁鉄放置由强磁致伸縮性材料(例如鉄素体)制成的棒旁,并在棒两端绕置激振綫圈和取振綫圈,那末我們就制成一个磁致伸縮滤波器了(图10)。在激振綫圈的交变磁場作用下,金屬棒开始周期地改变其长度。当外加磁場的頻率和棒的自然頻率一致时,机械振动的幅度便急剧地增大。在这里是把鉄素体棒为品質因數約为1000的机械諧振器。依靠逆磁致伸縮效应,諧振的棒在次級綫圈中会产生交变磁場,因而,在綫圈两端产生电动势,其頻率和棒的諧振頻率是一致的。由此可見,在这种滤波器中存在如下过程:把电气振荡变换为机械振动,经过机械滤波后,再把机械振动反变换为电气振荡。通过滤波器的振荡,由于磁致伸縮效应,其强度很强,使由于滤波器两个綫圈間的电感耦合作用而通过的振荡可略而不計。

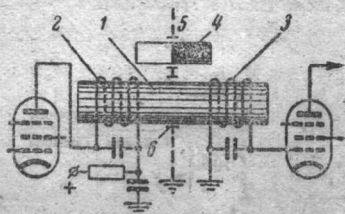


图10 磁致伸縮滤波器

1—鉄素体棒; 2—激振綫圈; 3—取振綫圈; 4—偏移永久磁鉄; 5—屏蔽装置; 6—棒的紧固装置。

3. 带通机械滤波器的結構

在图11a所示的机械滤波器中,电机变换过程和机械滤波过程是分开进行的。

滤波器两端的鉄素体棒执行磁致伸縮变换器和选择性元件的职能。中間的五个諧振器(大圓柱体)和六个交連元件(小圓柱体)是鋼制的。高品質因數的金屬諧振器基本上起滤波作用。滤波器两

端的諧振器插入激振繞圈和取振繞圈里面。兩端諧振器的偏磁由永久磁鐵來完成。

在圖 11a 的濾波器中，諧振器的長度等於半個機械波長，即 $\lambda/2$ ，而交連元件的長度等於 $\lambda/8$ 。因為這種濾波器的尺寸是與波長不太懸殊的，所以可以把它看作機械長綫。

機械濾波器的各元件都可以由和它們等效的具有分布參數的電氣長綫綫段來代替，如圖 11b 所示。在濾波器的中間頻率附近，長綫的分布元件可以由集中元件來代替（見圖 7）。由圖 11b 可以看出，諧振器相當於串聯電路 $L_p C_p$ ；交連杆相當於接“地”電容 $C_{c\beta}$ 。為了

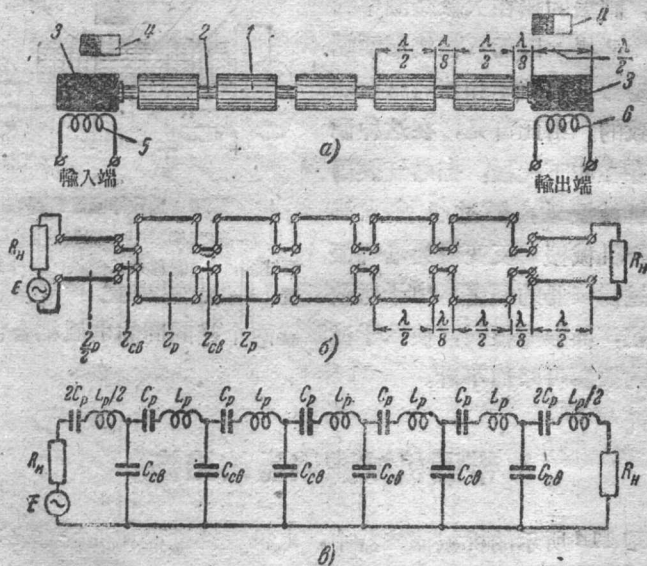


圖 11 七個圓棒型機械濾波器

a—濾波器的機械示意圖(1—鋼制諧振器；2—鋼交連杆；3—鐵素體磁致伸縮變換器；4—偏移永久磁鐵；5—激振繞圈；6—取振繞圈)；b—由等效於機械濾波器各元件的電氣長綫綫段組成的綫路；c—具有集中參數的等效電路。

使两端一致起见，滤波器应当有每节电感的一半和双倍的电容，这在铁素体谐振器的参数选择适当的情况下是可以实现的。滤波器两端的所需负荷 R_{H} 是由两端谐振器的阻尼而获得的。

交連杆比谐振器细得越多，图 11a 所示的电容 C_{on} 也就越大；各 $L_p C_p$ 回路之间的耦合减少，则滤波器的通过频带也变窄。

在滤波器中，还可能含有长度等于四分之一机械波长即等于 $\lambda/4$ 的交連杆和谐振器。四分之一波长的交連杆能够改善机械滤波器的频率特性曲线。

对于其动作以扭转为基础的滤波器来说，它的等效电路也可以用和以棒的纵向振动为基础的滤波器相同的方法来构成。它们的区别仅在于：磁致伸缩变换器的结构以及扭转变振和取振等的不同。

图 12 简略地表示出这种变换器的一种装置。两根长度等于四分之一波长奇数

倍的细金属杆，各连接在端谐振器的极边上。在两杆上激起反相的纵向振动。当一杆的长度缩短时，另一杆

则伸长。因此，接有细杆的金属棒就会发生扭转。为了增大振动幅度，细金属杆应当用具有高磁致伸缩性质的合金（含有镍、铁、铬和钛的合金）制成。由图 12 可以看出，端谐振器的长度为 $\lambda/4$ ，并且两端的和中间的谐振器的直径选得一样。

还有另一种结构的机械滤波器，例如，上述滤波器的棒谐振器可以利用退火钢珠（取自滚珠轴承）来代替。钢珠钻一孔，并焊接

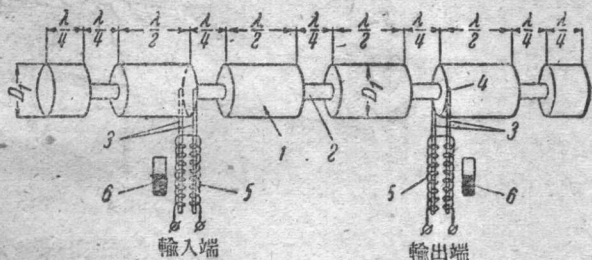


图 12 以扭转为基础的机械滤波器的示意图

1—谐振器；2—交連杆；3—磁致伸缩变换器；4—变换器固定于谐振器上的部位；5—激振线圈；6—偏移磁铁。

在細鎳杆或細薄壁鎳管上，它們在鋼珠間完成磁致伸縮變換器和交連杆的作用。鋼珠的直徑應當近似地等於四分之一波長；頻帶寬度決定於交連杆的橫斷面積。

圖 13 表示由六個金屬圓盤組成的機械濾波器的示意圖及其等效電路。由細鎳杆或專用磁致伸縮合金制成的磁致伸縮變換器的長度應當等於四分之一波長的奇倍數，這種變換器相當於兩個調諧在圓盤諧振頻率上的並聯槽路 $L_n C_n$ (圖 7, e)。這些槽路的等效品質因數是不大的，因此，在濾波器的中間頻率附近，槽路 $L_n C_n$ 可以用它在諧振時的電阻來代替。

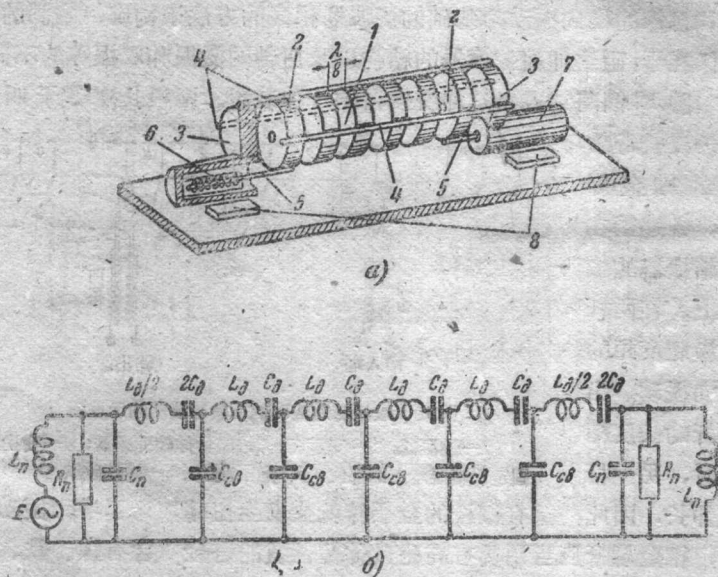


圖 13 六個圓盤型機械濾波器

a—濾波器的機械圖形 (1—金屬圓薄板；2—端金屬圓薄板；3—支撐圓盤；4—圓盤間的金属交連杆；5—細鎳杆制磁致伸縮變換器；6—激振線圈；7—取振線圈的黃銅屏蔽裝置；8—偏移磁鉄)；b—具有集中參數的等效電路。

圆盘是和高品质因数的串联谐振电路 $L_n C_n$ 等效的。它们是被三根长度等于 $\lambda/8$ 机械波长的交连杆连接起来的。圆盘间的细杆相当于接“地”电容。当改变交连杆的粗度时，可能使滤波器的通过频带发生变化。在两端的圆盘中心需要穿孔，它的直径应当小到这种程度，以至于使两端圆盘的谐振频率不发生变化。中心孔会使机械圆盘的总阻减半，这和端圆盘的等效电感减半而等效电容加倍的情形相类似。此外，端圆盘的中心孔能减低同被利用的振动频率邻近的寄生振动的幅度。在两端的调谐圆盘外面，应当各有一个固定用的

的非调谐圆盘，以便将整个谐振系统装在内有激振线圈和取振线圈的黄铜管上。调谐与非调谐圆盘之间的连接是借助于长度等于 $\lambda/4$ 的细金属杆来实现的。永久磁铁固定在线圈的黄铜屏蔽装置的旁边。两个线圈应调整至谐振，并直接接入电子管的屏极电路和栅极电路。

图 14 所示的电路，是为了确定薄板的谐振频率以及作为窄带机械滤波器用的。激振的与取振的细镍杆被连接在薄板的振动节上（见图 6）。杆的长度等于四

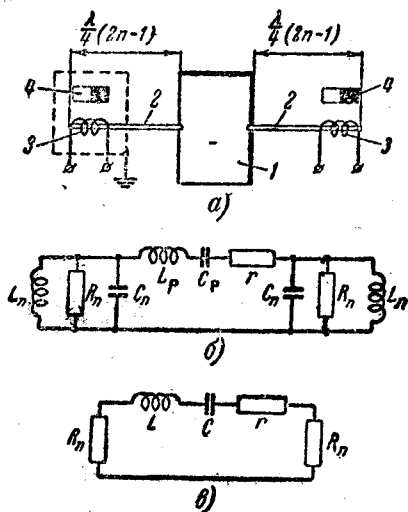


图 14 单一薄板型窄带滤波器

a—机械示意图 (1—由高品质因数材料制成的薄板；2—镍杆；3—取振线圈和激振线圈；4—偏磁磁铁)；b 和 c—等效电路。

分之一波长的奇数倍。在等效电路中的槽路 $L_n C_n$ 与细杆相当；槽路 $L_p C_p$ 与薄板相当。两端细杆的通过频带比薄板的通过频带宽得多，因此在滤波器的通过频带中，并联槽路可以用它在谐振时的电

阻 R_n 来代替。滤波器的通过频带可以按照下列公式求得

$$Q_s = \frac{f_p}{2\Delta f 0.7} = \frac{2\pi f_p L_p}{r_p + 2R_n} \quad (3)$$

当两端细杆的断面积减少时，谐振时的等效电阻 R_n 也减小。因此，改变断面积可以改变滤波器的通过频带。因为细杆连接在振动节，所以它对薄板的分路作用不大，因而滤波器的频带是很窄的。

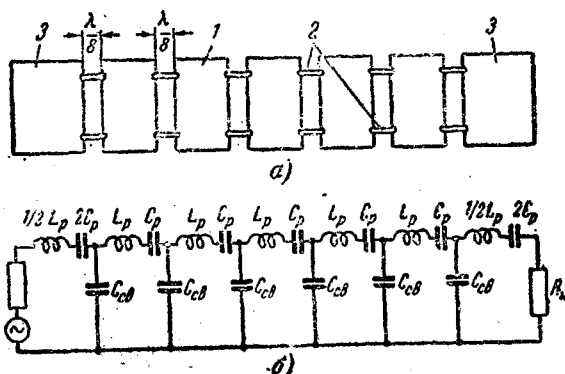


图 15. 七块矩形薄板型机械滤波器。a—滤波器的机械图形（1—中间谐振器；2—交连杆；3—磁致伸缩变换器薄板）；b—滤波器的等效电路。

是磁致伸缩变换器。中间五块薄板是由具有高品质因数和低温系数材料制成的（具有很大的精确度）。交连杆是作为各谐振薄板间的非谐振连接用。

图 15b 是其等效电路。在这一类型的滤波器中，也象前述各类滤波器一样，谐振元件可以用串联电路表示，而交连杆可以用对“地”电容表示。滤波器两端的串联电路应当具有 $\frac{1}{2}$ 电感量和双倍电容，这是为了使滤波器两端一致所必须的。它们可以由适当地选择滤波器两端的薄板的尺寸和材料来达到。

图 15a 表示七块薄板型滤波器的示意图。由机械示意图可以看出，平薄板组是被许多对细金属杆连接起来的。两端的镍制薄板是滤波器的选择性元件，同时也是