

[苏]B.Φ.波波夫 著

超 声
及其在化学工业中的应用

化学工业出版社

超声及其在化学工业中的应用

〔苏〕B.Φ.波波夫 著

东 生 译

化学工业出版社

В. Ф. ПОПОВ
**УЛЬТРАЗВУК
И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ
В ХИМИЧЕСКОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

ЛУГАНСК 1959

超声及其在化学工业中的应用

东 生 译

化学工业出版社 出版 北京安定门外和平街

北京市书刊出版业营业许可证出字第092号

化学工业出版社印刷厂印刷 新华书店发行

开本: 787 × 1092毫米1/32 1960年5月第1版

印张: 1 $\frac{1}{2}$

1960年5月第1版第1次印刷

字数: 40千字

印数: 1—10,000

定价: (8) 0.15元

书号: 15063·0739



目 录

1. 超声的物理性質	1
2. 声振动和超声振动的振动源	4
机械振子	5
机电变换器	6
超声汽笛和普通汽笛	7
液流动力式变换器	8
磁致伸缩式变换器	11
压电式变换器	15
3. 超声在化学工业中的应用	20
超声对化学过程和物理化学过程的作用	20
氧化过程	22
脱气作用	24
聚合作用	25
解聚作用	25
脂肪的水解和皂化	26
超声对多相扩散过程的作用	26
金属的超声电镀法	27
物質的结晶过程在超声作用下的加速	28
乳浊液和碎粉的制取	29
利用超声来消除和防止热交换设备中的积垢层	32
清除空气和气体中的固态悬浮体	36
滤去液体中的固态悬浮体	38
超声在探伤中的应用	39
应用超声来控制工艺过程	41
超声气体分析器	41
超声液面計	42
超声計尘器	43
超声粘度計	44

1. 超声的物理性質

在苏联1959—1965年发展国民經济的控制数字中，规定要进一步大力发展化学工业。化学生产将差不多增加两倍，为了达到这个目的，将建造許多新的，并改造现有的化学企业，以及将基于广泛利用苏联的科学技术成就与其他国家的經驗来强化工艺过程和提高生产力。

近年来，超声能在国民經济各部門中的应用越来越广泛了。超声在化学中的应用也是前途远大的。

在这本小册子中，将仅描叙超声在化学工业中的某几种应用——里西强斯基化学公司的中央實驗室已实验成功并已运用到生产过程中的某几种应用。然而，在討論具体例子，以前，必須先了解有关声音和超声在科学技术中的应用的原理，以及声音和超声的基本性質。

各种声音的物理性質是一致的，而把它們分为普通声音（听得到的）和超声（听不到的）——这是人为的。正象我們把太阳光譜分为一个可见区域和两个不可见区域——紅外綫和紫外綫的情形一样，声音也可以分为三类：人耳感觉不到的声音（頻率在 16次/秒以下）——超低声；听得到的声音——頻率从 16次/秒到2 0000 次/秒；听不到的声音——超声，其頻率在 20000次/秒以上。振动頻率的上限尚未肯定，但我們已获得的頻率能达到每秒几百万次振动。

总之，超声——这就是人耳所感觉不到的高頻声音。

頻率較低的超声振动的特性，跟听得到的声振动的特性之間的差別不大。声振动和超声振动的頻率都是用赫芝来度量的。对声振动和超声振动來說，頻率、波长和它們在介质中的传播速度之間的关系，可以用下面这个公式来表示：

03574

$$\lambda = \frac{C}{f}$$

式中， C ——声音的传播速度(米/秒)；

f ——频率(赫)；

λ ——波长(米)。

从这方程式可以得出下面的结论：对于每一种给定的介质来说，波长跟频率成反比，也就是说，频率越高，则波长越短。因此，超声波的波长比声波的波长短得多。这一点说明，超声波与光波是性质类似的。

超声波跟光波一样，在传播过程中不会散逸，有确定的方向，遵从几何光学定律，能够反射、折射和聚焦。因此，现在除了关于光波的光学以外，还有关于声波的光学。

至于超声振动的传播速度，那将随介质的不同而不同，因为传播速度要由介质的弹性和密度来决定。影响传播速度的因素是：温度、压力、有无外来杂质以及其他等因素。

超声的最重特征在于它的功率。我们都知道，振动着的物质粒子的动能是跟振动频率的平方成正比的。因此，超声所产生的声功率比普通声音的大得多。

当声压 P 均匀地分布在面积 S 上时，声功率 W 等于声压乘振动速度 V 再乘上与声波波前垂直的截面积，即：

$$W = P \cdot S \cdot V$$

与声波波前垂直的单位面积上的平均声功率称为声强 I ：

$$I = \frac{W}{S} = P \cdot V$$

超声的声强通常都表示成每平方厘米多少瓦特。超声的声强可以达到很大的值。例如，通常说话声的响度所相当的声强，如果等于每平方厘米十亿分之一瓦特左右，那么，超声的声强可以达到100瓦/厘米²。

超声的特点之一是：当它在液体中传播时，将引起空化现象。流体力学中的所谓空化作用，是指液流的连续性遭到破坏因而液流中产生了空穴的现象。在一定的条件下，出现在液体中的空穴型气泡（蒸汽的或气体的气泡），可以无限制地增长。这些气泡随着液流一道流动，进入到超过临界压力的区域，而气泡便在这压力的作用下突然闭合。气泡的突然闭合现象将以巨大的速度进行，这时将产生液压。

至于液体中的超声振动，它也会造成空穴型气泡。当这类气泡突然闭合时，将产生很大的瞬时压力，其值达到几百大气压。

液体因受超声振动的作用而发生的空化作用具有很大的实际意义。为了产生这种作用，超声振动的强度必须超过 0.03 瓦/厘米²。为了使声音能传送很远的距离，应该把它集中到给定的方向。

如果超声波在无限长的介质中运动，那么，超声的被吸收首先是由于介质的粘滞性，这时，超声能量的一部分将转变成热量。吸收的程度跟超声振动的频率之间有很大的关系。吸收程度将随着频率的增加而增加，因而对超声的吸收率比对普通声音的要大得多。

在粘度很大的液体中，超声被吸收得很快。例如，在 20°C 时，为了使频率为 300 仟赫的超声的强度减至二分之一，只需要 0.4 米厚的空气层就够了，至于水——要 440 米；变压器油——100 米左右；而石蜡油——3 米左右。粒度极大的物质（橡皮、胶木、电木、沥青）是超声的良绝缘体。

粉末状物质中的吸收过程特别剧烈，而无论这粉末是掺在什么物体中——在空气中或在液体中。正象当我们把透明体研成粉末后它就变成不透明的情形一样，当声音在粉末微粒的界面上受到多次反射后，结果在很短距离内就已吸收得很厉害了。

当超声波从空气中射到固体上时，100%的超声波将反射回来，而当它从水中射到固体上时——一部分将穿入固体。例如，鋼在这时将吸收入射超声波的能量的12%，而反射88%。对于油-玻璃的交界面来说，反射率达到70%，对于水-铁表面来说——86%。

当超声所必须通过的各个层——油层、容器底、反应液体——的厚度，选择来等于半波长的整数倍时，是传送超声的最适宜条件。如果超声波从某一介质中倾斜地射到另一介质的平面上，那么，超声会折射，因而沿另一方向在第二介质中传播。如果折射角等于或大于 90° ，那么，射线就完全反射回来了，并不会进入第二介质。

通常都认为，如果在液体与固体交界面上的入射角大于 15° (临界的入射角)，那么，波就不会进入第二介质；如果两介质的分界面不是平面，那么，折射的情况可能非常复杂。

当超声波通过空气或其他气体时，该气体粒子的振动方向与波的运动方向一致。如果把超声波的传播方向称作超声射线，那么就可以说，在气体中，粒子的振动方向与声波射线是一致的。这种现象也可以在液体中观察到，因为液体的弹性性质跟气体的一样，也仅仅取决于体积弹性。

当粒子的位移方向与波的传播方向一致时，这波称为纵波。

2. 声振动和超声振动的振动源

每一个振动体都可以作为声音或超声的振动源。在扩音器中，薄膜在振动；在水声学定位设备中，以及在超声探伤设备中，振动是由铁磁材料或石英晶体、钛酸钡、酒石酸钾钠等的机械变形引起的。

为了保证能对各种工艺过程和反应产生作用，声音或超声

的振动源(发射器)必須滿足下列基本要求:

甲) 要保證能获得强度大的振动(从发射器的表面上能获得1瓦/厘米²以上的强度);

乙) 效率要高, 也就是說, 在把电能或机械能轉变成超声振动的能量时, 損耗应最小;

丙) 必須是机械强度高的、不受腐蝕的、价錢相当便宜而使用时又很簡便的。

在許多情况下, 发射器的結構必須能保證在腐蝕性介質以及在高溫条件下进行工作。

现在已制出了各种各样的、能产生声音和超声振动的設備。在工业上, 应用得最广的是机械振子、电磁式和电动式轉換器、空气动力式和流体动力式轉換器、磁致伸縮式和压电式发射器。

机 械 振 子

偏心式机械振子的頻率范围最广——达200仟赫*。近来, 这类振子在建筑业中应用得很广: 用以搗固混凝土、把桩和管子埋入地下, 剝碎各种材料、洗漂布疋、輸送散粒性材料等等。

苏联工业已生产出好几种偏心式机械振子装置, 它們无需特別地改变就可以应用到化学工业中。偏心式振子的組成如下: 一个电动机, 其軸上安装偏心装置。

当馬达的軸旋轉时, 偏心装置迫使振子的金属座作振动, 而这振动又将传给粘滯的介質或传给設備的底。

* 此处疑原文有誤: 原文为200赫, 但超声汽笛的頻率为10—200仟赫(參見Л.Д.Ровенвер著, 方明譯“超声波及其应用”第18頁第1行)。

机电变换器

利用机电变换器可以获得频率从50赫到15千赫的声音。这类变换器的效率达50—60%。它们可以分成两类：电磁式的和电动式的。电磁式变换器的工作原理(参看图1，甲)如下：薄膜3同时又是反应容器的底；当流过励磁绕组1的电流为最大值时，薄膜3被吸向电磁铁2。当绕组中的电流等于零或近乎

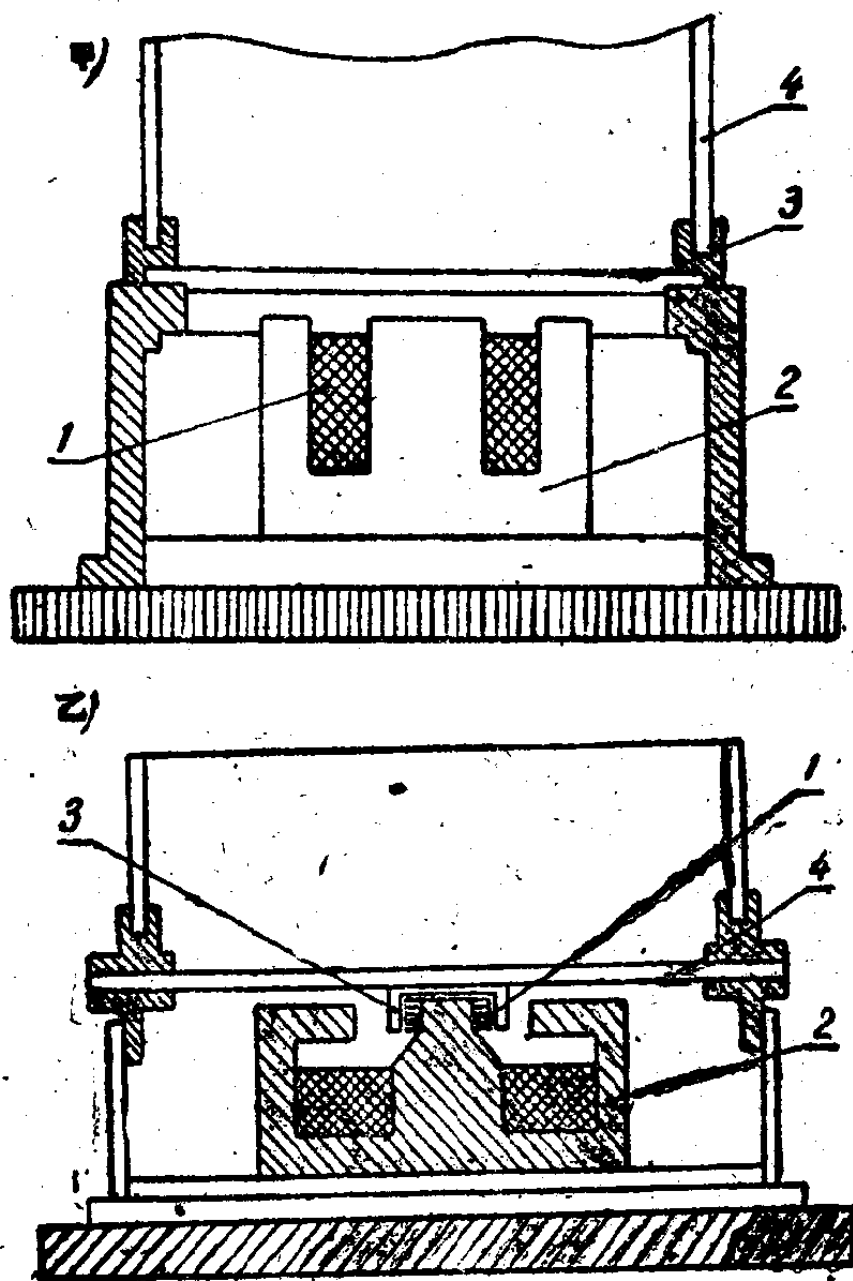


图 1 变换器的示意图

甲——电磁式的，乙——电动式的。

零时，薄膜便离开电磁铁，因而造成弹性振动。随后，这振动随着又传给反应容器4内的介质。在电流的每个半波内，薄膜都吸向电磁铁一次。所以，当电流的频率为50赫时，薄膜被吸的次数为100次/秒，即频率加了一倍。

电动式变换器是基于永久磁铁的磁场与由交流电供电的音圈之间的作用。

(图1,乙)所示的是电动式变换器装置的示意图。在直流电磁铁铁心2的上部，绕着一次绕组1，二次绕组3做成圆柱体的形式，而且是用高导磁率的非铁磁金属(铜、铝、银等等)做成的。这圆柱体固定在薄膜4上，而薄膜则是反应容器的底。

高频的电磁式或电动式振子可以由机械变换器——电动发电机来供电，或由具有相应频率的振荡器供电。为了将机电型变换器励磁，可以采用电子电路(这电路中接有小输出功率3—5瓦的振荡器，例如，3Г—10，3Г—12、3Г—2A等型号的振荡器)，也可以采用TV—600型的功率放大器或具有所需功率的自制功率放大器。

超声汽笛和普通汽笛

汽笛形式的空气动力式变换器，是研究气体介质中的声波和超声波时所采用的、最有前途的一种空气动力式变换器。

汽笛的原理很简单。汽笛由两个主要元件组成：一个是定盘，另一个是转盘，定盘和转盘上都有许多沿圆周分布的小孔，当转盘旋转时，这两组小孔将周期性吻合。在来自汽笛箱的空气或其他气体的压力作用下而喷出小孔的气流脉冲或气流脉冲，便是超声或普通声音的振动源。振动频率由下面这个方程决定：

$$f = \frac{n \cdot n_0}{60}$$

式中： m ——定盘上的小孔数（或轉盘上的小孔数，这两个数目是一样的）；

n_c ——汽笛的轉盘每分鐘內的旋轉次数。*

汽笛的結構有两种：軸狀的和輻狀的。在第一种汽笛中，定盘上的小孔呈軸狀分布，声音直接传向配音室。在第二种汽笛中，小孔呈輻狀分布，声音是利用特制的反射器而反射到配音室中去的。軸狀汽笛的主要部件是传声筒，它的作用是保証有效地把声能发送到四周的介质中。

在設計和制造汽笛时要特別精密。汽笛的效率正取决于这种精密度。汽笛的效率可以达到90%。工业型汽笛的功率达几十瓦特。

液流动力式变换器

液体中的强功率超声振动，可以利用液流动力式振子来获得。在液体中，利用液流动力式变换器而获得的最常用頻率范围是2—50千赫。液流动力式变换器的工作原理是基于下面这个声学原理：当液流从狭縫流向尖形边（尖形板）时，压力将发生周期性的增加，这是由于在尖形板左右依次产生旋涡而造成的。为了使旋涡处于原来的断續状态（первоначальное прерывание），板与縫之間必需有一定的距离。液流的压力转变成了金属板的运动。当液流的速度越高以及当板的端部与噴出液体的噴咀之間的距离越小时，則板的振动頻率就越高。

液流动力式变换器中板的振动頻率，可以按下面这公式計算：

* 原书中 n_c 的单位不明，按譯者估計，作者的意思是： f 的单位为（次/秒）。如

令 n_c 为轉盘每分鐘內的旋轉次数，則 $\frac{n_c}{60}$ 为每秒钟內的轉动次数，因而 $m \cdot n_c / 60$ 恰好是頻率——譯者。

$$f = \frac{u}{a}$$

式中： u ——液流速度(厘米/秒)；

a ——噴咀与薄膜間的距离(厘米)；

f ——板的振动頻率(赫)。

在液流动力式振子中，是利用长方形板来获得弹性振动的，这长方形板可以固定在两个支点上，或固定在支架上。当这板被固定在两个支点4上时(图2)，在压力的作用下以巨大速度从狭縫式噴咀1噴射出来的液体，将射在带有两个交叉薄膜3的金属板2的端部上，因而迫使它振动。

当液流的流速以及噴咀与諧振器(板)之間的距离选择得当时，便可以得到很强的諧振。由于这点，液体中将有很强的声波和超声波在传播。

按这种方式工作的液流动力式振子，可以把机械能轉变成超声能。当板是固定在两点上时，板的固有振动頻率就一次近似而言，可以用下面这公式計算：

$$f = \frac{22.4 t}{4\pi l^2 \sqrt{3}} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

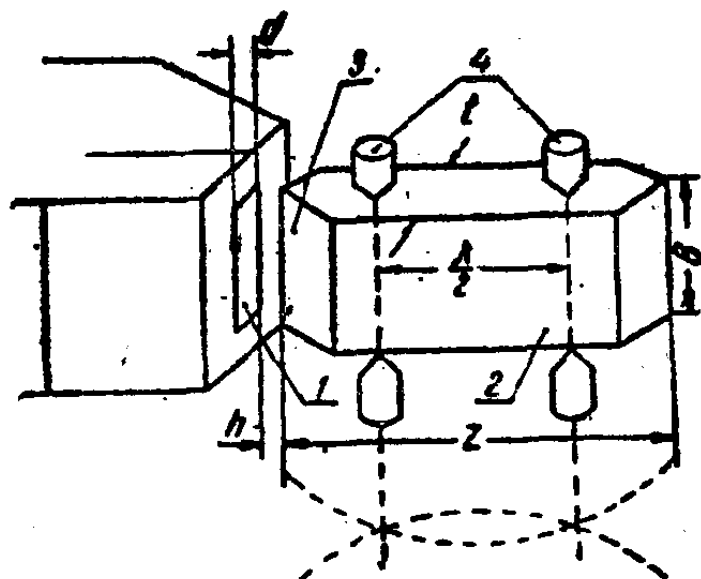


图 2 液流动力式变换器的示意图

式中: t ——板的厚度(厘米);
 E ——弹性模量(达因/厘米²);
 ρ ——密度(克/厘米³);
 L ——板的长度(厘米)。

振子所发出的功率可按下面的公式计算:

$$W = 981 \cdot 10^{-4} \cdot P \cdot V,$$

式中: W ——射线的功率(瓦);
 P ——压力(大气压);
 V ——流过喷嘴的液体量(厘米³/秒)。

液流的速度将在一定范围内影响到板的振动频率。

一系列的研究证明, 液流动力式振子的板必需满足下列要求:

$$\alpha = 30^\circ; \quad \frac{\lambda}{2} = 0.49l; \quad d \leq t; \quad L \geq 2b;$$

式中: α ——板的边缘的交角(度);

$\frac{\lambda}{2}$ ——两固定点之间的距离(厘米);

d ——狭缝的宽度(厘米);

b ——板的高度(厘米)。

当液流动力式变换器中的振动板是固定在支架上时, 板的振动频率按下面的公式计算:

$$f = \frac{\pi \cdot 2.5t^2}{2\sqrt{12}l^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

液流式变换器的结构简单, 维护也简单。它们的成本等于同样生产能力的普通设备的成本的十, 因此, 前者在许多工厂中得到越来越广泛的应用(用以制取难混和液体的乳浊液)。

在美国, 生产了好几种工业型的液流动力式发射器, 其生

产率在1500升/小时到630升/分钟之間。

在化学工业中，液流式发射器可以应用在混和腐蝕性液体的过程中及用在制造乳油液的过程中等等。

磁致伸縮式变换器

工业上最常用的超声射綫源之一是磁致伸縮式振子，它可以把电磁能变成声能。

物体的大小在磁场作用下将发生改变——这称作磁致伸縮效应。磁致伸縮效应是可逆的，也就是說，鉄磁材料的机械形变可以引起磁性的变化。在磁致伸縮的作用下，用磁致伸縮材料制成的杆的大小将发生稍許的改变。

例如，镍杆的长度之相对改变大約是 10^{-6} 毫米，而体积的改变則还要少些。磁致伸縮效应跟溫度有关：随溫度之增加而降低，当到达居里点（居里溫度）时，磁致伸效应便完全消失了。

长度变化的多少取决于材料、該材料的加工方式以及事先磁化到什么程度等。当磁致伸縮杆放在螺綫管的高頻交变磁场中时，这杆将按高頻振蕩的节拍而改变其綫长度，而其端部将发射出超声的弹性波。如果电磁场的頻率与杆的固有弹性振动頻率一致，則振幅最大。

磁致伸縮杆的固有振动頻率可以按下面的公式計算，

$$f = \frac{n \cdot c}{2l}$$

式中： n ——奇整数（諧波数）；

c ——声音在杆內的传播速度（厘米/秒）；

l ——杆的长度（厘米）。

这方程式的物理意义如下：如果杆的长度等于所激发的振动波长之半，那么，杆內便会产生半个驻波，而杆的两个端点

(即在上表面与下表面上的点) 将发生最大的位移, 因为在这时, 这两点处于位移的波腹区域。

用来制造振子的磁致伸缩式材料有下列几种: 纯镍, 镍、铁、钴的合金; 例如, 不变钢* (36%的镍和64%的铁), 透磁合金 (45%的镍和55%的铁), 坡门科尔合金 (49%的铁, 49%的钴和 2 %的钒)。

制造磁致伸缩式振子的材料之选择具有重大的意义。例如, 如果选用坡门科尔合金来作磁致伸缩材料, 就可以从振子上得到 60 瓦/厘米^2 的超声功率, 而当采用镍时——低于 30 瓦/厘米^2 。坡门科尔合金还有一个优点: 它的居里点很高—— 1110° , 而镍的居里点则为 360° 。

最简单的磁致伸缩式振子是用镍杆或镍管制成的。对实心的和管状的振子所进行的试验证明, 在同样的条件下以及当激发了同样的功率时, 利用管状振子而获得的超声振动的强度比利用实心振子而获得的高些。

将杆退火, 可以增强磁致伸缩效应, 这一点, 与杆由什么材料制成无关。在实心杆中会产生佛科电流, 会因磁滞等而产生损耗。因此, 功率较大的磁致伸缩式振子象变压器的铁心一样, 是由一些磁致伸缩材料制的薄片组成的, 在这些薄片上绕了两个绕组, 其中的一个是磁化绕组, 而另一个——供产生交变磁场用的。

磁致伸缩式发射器有各种各样的形式, 可以按超声波的功率及其预定的方向来制造的。

图 3 所示的是工程上最常见的一种磁致伸缩式振子的结构: a, б—圆环状的, B—包裹式的, r—薄板状多谐振式的;

* 不变钢也常音译为依凡钢, 是一种膨胀系数很小的铁镍合金——译者注。

** 透磁合金——又常音译为坡莫合金, 是一种具有磁性的铁镍合金——译者注。

π —管状的。包裹式轉換器的发射面积达 200 厘米² 以上。它們的頻率各种各样，可以达到 200 千赫。

当采用单向发射时，我們在振子的另一面造成了一个空气反射垫。从这个空气垫反射回来的超声振动，当回到发射表面上时，其位相与該表面在发射时的位相相同。这样一来，振子所发射的功率便增加到 4 倍。

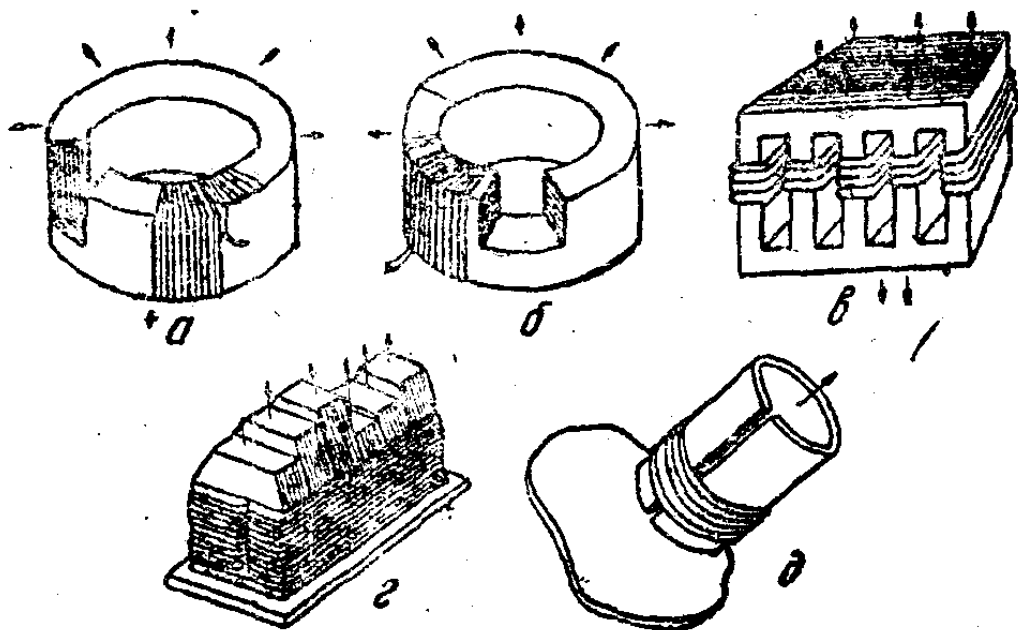


图 3 磁致伸縮式振子的几种結構：

a, б—圓环状的；в—包裹式的；г—薄板状多諧振式的，
д—管状的

为了形成空气垫，有时采用厚 0.5—1 厘米的多孔橡皮膜，把这橡皮膜貼在振子的不工作的那一面。

磁致伸縮式发射器的主要优点是：制造簡便，成本低，使用上可靠。因此，它們应用很广。

在工程上，采用苏联出产的、各种功率的电子管高頻振荡器来激发磁致伸縮发射器。例如，输出功率为 1.25 仟瓦，而频率为 18—25 千赫的 Y3Г—1 型振荡器，8 瓦的 Y3Г—10 型，30 仟瓦的、频率可調（由 12 千赫到 400 千赫）的 Y3Г—60 型。

苏联的許多单位都采用 БАР 型宽頻带振荡器（功率 800 瓦，