

声学译丛之一

超声物理

同济大学物理教研组主编
上海市科学技术翻译馆

声 学 译 丛 之 一
超 声 物 理

同济大学物理教研组主编

上海市科学技术翻译馆出版

(上海南昌路50号)

新华书店上海发行所发行 各地新华书店经售

商务印书馆上海厂印刷

开本787×1092 1/16 印张17 5/16 字数433,700

1962年1月第1版 1962年1月第1次印刷

印数1—2,500

书 号 : 5003·22

定 价 : 3.50 元

(内 部 发 行)

前 言

超声学是一门尖端科学，苏、美、英、德、日、法等国在超声的研究和应用方面都有相当成就。介绍这些国外成就，肯定有利于国内超声研究与应用的开展。1960年1月，北京中国科学技术情报研究所曾出版了“超声译丛第一册”，介绍了1959年以前国外在超声研究和应用方面的一些重要文献。此外，国内各出版社也陆续出版了不少超声应用方面的译著，例如“超声波在建筑工业中的应用”，“超声波在机械制造中的应用”等等。这些书刊颇受各方欢迎，对国内超声研究与应用的发展起有一定的作用。为了加速祖国社会主义的建设，进一步更全面地介绍国外的最新成就，以资工作时的借镜，实有其必要。有鉴于此，上海市超声工作者愿在这一项工作中略尽绵薄。今年8月，经上海市科技翻译馆的建议，由上海市科技情报所及上海市物理学会声学委员会超声小组会商后，决定先着手编译“声学译丛”三辑：第一辑是“超声物理”，第二辑是“超声工业应用”，第三辑是“超声诊断”。当时并一致同意出版三辑以后仍继续编译的建议。

本辑——声学译丛之一超声物理——由同济大学物理教研组主编。参与选题编译审校等工作的有：上海无线电技术研究所、热工仪表科学研究所、上海医药工业研究所、一机部材料研究所、中原电器厂、华东纺织工学院等单位的同志。经过两个多月的工作，终于在10月底完成初稿。

本辑所选的文献都是1959年以后发表的，其中，尤以1960年以后发表的占大多数。内容大体分成四个方面。第一方面是关于超声换能器方面的文献。由于已经出版的译著中对于超声波发生器的介绍已相当的多，因此，本辑中在这方面就选译很少，但却补充了一些测定发生器振动的方法。对于超声波接收器及其校正和定标的方法，本辑选译了若干最近文献。在换能器材料方面，虽然过去的译著中已有介绍，本辑仍选译了一些可以看出最新发展的文献，并介绍了若干关于测定换能器材料特性的方法的资料。第二方面大体上都属于超声测量技术，其中以声速和衰减的测定作为重点；在声场测定、弹性测定和超声显象技术方面亦各选译了几篇资料。我们认为声速与衰减的实测是很多超声研究工作的主要基础，以此作为编选重点，是希望能引起国内更多的超声工作者对这方面的重视。第三方面所涉及的是超声波对物质作用的机理。所选入的文献都有一定价值，特别是其中几篇评论文字，总结了有关方面的成就，并指出了发展的方向，这点是值得注意的。第四方面选译了若干有关超声波传播理论方面的文献，包含一些宏观的从流体力学出发的声学理论，也涉及一些微观声学理论。1960年1月北京出版的超声译丛中已经译出了两篇有关流体中微观声学的重要文献，因此本辑中多选了一些固体中的资料。第三、第四两个方面是目前国际上超声理论研究的重点，近年来发表的文献特多，要选译少数文献来介绍其概貌是有一定困难的。国内已出版的译著中对这两方面的介绍尚不多见，因此，本辑中所选的文獻虽还非常不够，但一鳞半爪，也可略窥其门径了。总之，这一辑的选题工作是做得很不够的，既不全面，亦不深入。好在以后尚需继续选译，希望在这方面能有所纠正！

本辑中的译文大多数是照原文全译的（删去了文前的摘要与文后的致谢等），仅有少数，为

了節約篇幅,刪節較多,可算“摘譯”。摘譯中的取舍問題,難免主觀片面,有待讀者指正。審校工作基本上都是把譯文對照原文來進行的,但有少數幾篇為時間所限,或由於審校者對原文不熟悉,而未曾對照原文,僅按譯文加上一些專業名詞方面的校正。在這幾篇譯文之後,一律不用“審校”字樣,僅用“校”字,以示區別。譯文中涉及的專門名詞盡量採用常用譯名,基本上均以科學院頒布的名詞為根據,但個別過於專門的譯名還是杜撰的,也難免有少數譯名前後不統一的情況。人名方面則未曾很好注意,各篇中可能還存在同名異譯的情況,但一般都附有原文。

限于編譯時間的匆促、資料的不全以及譯校工作者的專業水平與外文水平,肯定存在不少缺點和錯誤,歡迎各方面專家和讀者的批評指正。

同濟大學物理教研組 魏墨龔

1961, 10, 31

目 录

一、超声换能器及其材料

1. 换能器材料及其特性测定	1
(1) 磁致伸缩铁氧体用作电声换能器的材料	1
(2) 特种压磁铁氧体及其在滤波器和高功率超声仪器中的应用	9
(3) 一些陶瓷息格涅特电体的工艺特点和性质	17
(4) 息格涅特陶瓷制备和研究的快速方法	20
(5) 用“颗粒法”测量晶体的压电模量	24
(6) 低Q值压电陶瓷的耦合系数和Q值的测量	25
2. 超声接收器及其校正定标	28
(7) 一种测量 50 赫至 2 兆赫间极小振幅用的电容探测器	28
(8) 高灵敏度超声波传声器	37
(9) 半导体热敏电阻的超声热接收器	42
(10) 用互易法根据压强校准测量用传声器	45
(11) 一种新校准的标准水听器	52
(12) ADP 晶体传声器的高频校准	59
3. 超声发生器及振动的测定	64
(13) 用于对空气传输的高效率换能器	64
(14) 高温压电加速度发送器	71
(15) 10000 兆赫的声波	73
(16) 用复光束干涉量度术测量超声振动器的位移分布	74
(17) 用应变计测量磁致伸缩超声换能器的输出——光学测量的缺陷	76

二、超声测量

1. 声速和衰减的测量	81
(18) 由全反射角的测量来测定超声速度	81
(19) 线栅超声干涉仪	84
(20) 用孔脱管测量气流产生的超声振动的波长	85
(21) 在高温熔融体中测量超声速度和吸收的装置	86
(22) 超声波衰减测定装置	89
(23) 超声衰减元件及其在卤化砷中测量衰减的应用	97
(24) 关于用干涉仪测量气体中超声吸收的问题	108
(25) 20—400 千赫频率范围内测量固体内耗的装置	110
(26) 塑料中超声纵波的衰减	112
(27) 1000 兆赫以下频率的超声波在石英晶体中的吸收	117
(28) 连续改变频率的超声频谱学	118

2. 声場測定	120
(29) 空气中高强度超声場的測量	120
(30) 調頻对声学測量的应用	128
3. 彈性的測量	135
(31) 用共振法进行彈性的动力測量	135
(32) 用超声連續波共振技术測量 RbBr、RbI、CsBr 和 CsI 等的彈性模量	137
4. 超声显象	142
(33) 近代超声象变换器	142
(34) 超声物质鏡	148
(35) 吸收式超声显微鏡	150

三、超声波的作用

(36) 声場中产生的恒定力(評論)	153
(37) 超声波空化	160
(38) 应用相似理論研究空化引起的振动	174
(39) 超声成雾动力学	180
(40) 声致发光論述	185
(41) 关于乳化过程与超声波强度关系的研究問題	190
(42) 超声乳化中声强对分散及凝聚的影响	192
(43) 空化腐蝕与液体上方气体溶解度的关系	194
(44) 超声波加工速度与温度关系的研究	196
(45) 論超声波对大分子的化学作用	198
(46) 超声波对生物大分子的作用	215
(47) 两列具有相差的超声波所引起的光繞射	224
(48) 两列同頻率超声波所引起的光繞射	227

四、超声波的傳播理論与微观声学

(49) 超声干涉仪理論中普遍流体力学之一維綫性边界問題	233
(50) 超声干涉仪的普遍流体力学理論	236
(51) 若干声学問題中的非綫性效应	240
(52) 波导中的超声波束	242
(53) 有限振幅超声波在弛豫液体中的傳播	244
(54) 电解液中的超声吸收問題	247
(55) 单原子气体中超声的吸收	251
(56) 固体中的超声方法和輻射效应	252
(57) 金属中超声吸收理論	257
(58) 金属中的声电效应	261
(59) 简单半导体中声波与傳导电子的相互作用	266
(60) 固体环己烷中的共振吸收	274

一、超声换能器及其材料

1. 换能器材料及其特性测定

(1) 磁致伸缩铁氧体用作电声换能器的材料

Голямина И. П.

Аку. ж. VI, 311~320, 1960 [俄文]

1951年Н. Н. 安德列也夫(Андреев Н. Н.)曾发表过用铁氧体作为磁致伸缩电声换能器材料的可能性的见解。以铁氧体代替金属的磁致伸缩材料(如镍、坡明德合金等)的可能性是非常有前途的:这是由于实际上在铁氧体中不存在傅科电流的损耗,在这种情况下,采用整块的芯子就成为可能,废除了将材料分为一层层薄片的繁杂工序;磁致伸缩换能器使用范围推广到高频方面,它的效率是提高了。在科学与技术中超声被应用日广的情况下,铁氧体的制备比较便宜,原料又不缺乏,这种情况也是很重要的。

按照安德列也夫提出的课题,从1954年起,在苏联科学院声学研究所他所领导的实验室里,开始了把铁氧体用在电声换能方面的研究工作,包括磁致伸缩铁氧体材料的参数测定,化学成分和制备工艺的探索,以及试制换能器的性质的检验。这部分工作的某些结果已经发表(参阅[2][4][7-9][12-13][15][18])* 同样,国外在声学上应用铁氧体问题的著作也列在本文所附文献目录中(参阅[1][3][5-6][10-11][14][16-17],其中必须特别重视的是布格特(O. M. von der Burgt)的基础研究。

在本文中,将介绍安德列也夫实验室研究出来的一些铁氧体的性质,这些铁氧体是可以推荐作为制备磁致伸缩电声换能器材料的。

磁致伸缩材料对电声换能器的适用性,由它的参数数值来决定,这些参数能影响到换能器的重要性质,如发射和接收状态下的灵敏度、效率、输出系数、以及所发出的声音的极限强度;同时,当媒质的温度或激发场的振幅改变时,换能器性质的稳定性基本上也取决于材料参数的稳定性。

换能器的性质同材料参数的关系,可由磁致伸缩换能器的计算求得,刊载在著作[19-21]以及一系列其他著作中的计算,均可作例。这种计算一般总是根据 H 、 B 、 σ 及 ε 值之间有线性关系的假设进行的,这里的 B 、 σ 、 ε 是交变的磁感应、机械应力和形变的振幅,是由于加上了振幅为 H 的交变磁场的结果,这交变磁场的振幅较恒定磁化场值 H_0 为小。磁饱和现象破坏这种关系的线性特征,因此,为了换能器性质不随交变场振幅的增大而改变,希望感应饱和值与磁致伸缩饱和值 λ 总足够地大。量 λ 是决定辐射器极限功率的因素之一。另一方面,极限功率则取决于以最大容许机械应力为表征的材料的机械强度。

磁-机耦合系数 k 对于换能器起重要的作用,它决定了换能器在频率低于机械共振的辐射状态,而忽略种种损失的条件工作的条件下,机械能对磁场能之比。

輻射器的电-声效率 η_{sa} 可表示为

$$\eta_{sa} = \eta_{sm} \eta_{ma}, \quad (1)$$

式中 η_{sm} 为电-机效率, η_{ma} 为机-声效率。 η_{ma} 的量值在一定声负载条件下取决于换能器材料的机械损耗, 或者换句话说, 取决于它的机械品质因数。 η_{sm} 的量值在共振频率下, 根据由著作^[20-21]给出的公式可表示如下:

$$\eta_{sm} = \frac{1}{1 + \frac{R_{ak} \rho_{\pi} q_1}{\lambda^2 \eta_{ma}}}, \quad (2)$$

式中 R_{ak} 是负载阻抗, q_1 是与换能器几何特性有关的量, λ 为磁致伸缩常数, 等于 $\left(\frac{\sigma}{B}\right)$, 下标 ϵ 表示没有形变的情况, ρ_{π} 为材料中的电损耗系数, 损耗功率由 $\rho \int_v B^2 dv$ 决定, 其中 v 为体积, 线圈中的欧姆损耗不计。 ρ_{π} 的量值可表示为

$$\rho_{\pi} = \rho_r + \rho_{\phi}, \quad (3)$$

式中 ρ_r 为磁滞损耗系数, ρ_{ϕ} 为傅科电流损耗系数, ρ_{ϕ} 取决于公式^[22]

$$\rho_{\phi} = \frac{\pi^2 f^2 d^2}{6r}, \quad (4)$$

式中 f 为频率, d 为材料层的厚度, r 为电阻率; ρ_r 可间接地由矫顽力 H_c 来确定。

由公式(1)及(2)得知, 材料的 λ 及 r 的量值越大, 它的机械品质因数越好, 以及其中的磁滞损耗越小, 则磁致伸缩辐射器的 η_{sa} 就越大。影响换能器输出系数(参阅^[23])的 $\cos \varphi$ 值, 当 η_{sm} 为较大的数值时, 可近似地确定为

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{R_{ak} f^2 q_1}{4 \lambda^4 \mu^2 \eta_{ma}}}}, \quad (5)$$

即在给定辐射器的几何形式和它的机械负载下, $(\lambda^2 \mu)^2$ 值越大(其中 μ 为材料的磁导率), $\cos \varphi$ 将越接近于 1。

辐射器的电压灵敏度, 即有共振频率时轴线上的声压 p 和电压 V 值之比, 可由下式确定:

$$\frac{p}{V} = q_2 \frac{\lambda}{fn} \eta_{ma}, \quad (6)$$

式中 n 为换能器绕组线圈的匝数, q_2 取决于它的几何参量和材料中声速的大小。

由公式(6)可知: 对于辐射状态下换能器灵敏度的值来说, 材料参数 λ , 同样具有决定性的意义。

接收器的灵敏度是在无限大阻抗负载的条件下绕组内电压 V 和外加声压强 p 的比。

著作^[21]中对于 $\frac{V}{p}$ 的表达式可表示如下: 低于机械共振频率时,

$$\frac{V}{p} = \frac{\lambda \mu_s}{E_n} \cdot n \cdot f \cdot q_3, \quad (7)$$

在共振频率时,

$$\frac{V}{p} = \frac{\lambda \mu_s}{E_{ak}} n \eta_{ma} q_4, \quad (8)$$

式中 q_3 和 q_4 是由换能器的几何参量和材料中的声速决定的两个量, μ_s 为没有形变时材料的

磁导率, E_H 是当 H 的值不变时的楊氏模量。

由材料的各种参数間的关系可得

$$\frac{\lambda \mu_s}{E_H} = \frac{A}{4\pi}, \quad (9)$$

式中 $A = \left(\frac{B}{\sigma}\right)_H$ 称为灵敏度的磁致伸縮常数, 因此, 在低頻时, 接收器灵敏度由材料常数 A 确定, 而在共振时, 由 $A \cdot E_H$ 确定。

根据前面所介紹的关于換能器性质和材料参数的关系的討論, 在研究鉄氧体这种換能器材料时, 对于 λ_s 、 k 、 λ 、 A 、 r 、 H_c 、 μ 以及机械品质因数和机械强度等的量值, 进行了測定。为了使任何形式的換能器的共振頻率計算成为可能, 也测定了密度 d , 声速 c , 楊氏橫量 E 及泊松系数 σ_p 。

k , μ , λ 及 A 的量值是在不同的 H_0 值上和在剩余磁化时測定的。

为了測定 μ , k , H_c , 以所研究的材料作一环状試件, 其平均直徑約为 7.6 厘米, 截橫面是 0.8×0.8 厘米, 为了測定 λ_s 及 σ_p , 是把所研究的材料做成长 5 厘米、直徑 0.5 厘米的杆; d 、 c 及 E 的測量, 則应用上述两种形状的試件。

d 值用流体靜力悬浮法測定, c 、 E_H 及 σ_p 用共振法測定 (参閱^[24]), H_c 是根据用冲击电流方法繪出的磁滯回綫来測定的, λ_s 是利用干涉显微鏡 (参閱^[25]) 測定的, μ_s 是根据低頻时測量得到的繞在試件上的綫圈的感应来确定的。 K 值是根据共振頻率 f_r 和反共振頻率 f_a 算出来的, f_r 和 f_a 則由試件的电阻抗模量的頻率特性来确定:

$$k^2 = 2 \frac{f_a - f_r}{f_a}. \quad (10)$$

机械质量因数也根据这个特性来确定。 λ 及 A 的量值是根据測得的 k 、 E_H 及 μ_s 值, 利用公式:

$$\lambda = \frac{k}{1 - k^2} \sqrt{\frac{E_H}{4\pi\mu_s}}, \quad (11)$$

$$A = \frac{k^2}{(1 - k^2)\lambda} \quad (12)$$

算出的。机械强度是根据振动杆共振时发生的最大容許机械应力 $\sigma_{\max}$ 值估計出来的 (当 $\sigma > \sigma_{\max}$ 时, 試件就断裂了)。 $\sigma_{\max}$ 值, 根据杆端振动的振幅算出, 而这振幅的測定, 是利用鈦酸鋇薄片。

曾选择鎳-鋅鉄氧体类型作为研究材料, 在这种材料的化学計量成分中, 鋅鉄氧体的含量为 0, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50% 的分子量, 也选用了鎳鉄氧体, 其中具有含量为 1, 2, 3, 4, 5% 分子量的鈷鉄氧体杂质; 附加少量的鈷鉄氧体, 如同^[26]指出的, 将导致一定温度下磁晶各向异性的补偿, 以及相应地导致 μ , k 及 $\frac{1}{E}$ 的增大与 H_c 的减小。

由于鉄氧体的性质不仅取决于它的化学成分, 而且在很大程度上决定于制备的工艺, 也进行了工艺因素对材料性质的影响的研究 (参閱^[13])。結果, 选定了一种对所有成分都可用的同样的工艺制度, 这种制度能保証得到尽可能大的鉄氧体密度, 因为試驗証明, 密度較大的鉄氧体具有較大的机械强度、較大的品质因数, 以及較小的磁滯損耗; 当化学成分已定时, 試驗的換能器的 η_{sa} 值随材料密度的增大而显著地增加。根据所确立的工艺程序获得的鉄氧体的孔

隙率,即 $P=1-\frac{d}{D}$, 不超过 2~3%, 式中 D 是物质的結晶密度。

在鎳-鋅鉄氧体类型, 观察到其性质随鋅含量的增加作单值的变化—— λ_s 、 k 、 H_c 、 λ 的减小, 以及 μ 和 Δ 的增大。在一系列鎳-鋅鉄氧体中, 在室温下, 这种鉄氧体的成分中有 2% 鋅鉄氧体时, k , μ , λ , Δ 具有最大值。下面将由所研究的鉄氧体中, 选出四种类型鉄氧体, 对其性质作較詳細的討論。对換能器的制备, 选用这种或那种类型的材料, 决定于对換能器的具体要求。

在表 1 中, 引进四种类型鉄氧体的編号、化学成分和主要的机械参数。这些参数值是在室温下得到的。又根据文献中的数据, 列出磁致伸縮金属的相应的参数以供比較。

表 1

材料类型	化 学 成 分	d 克/厘米 ³	σ 米/秒	E 达因/厘米 ²	σ_p
鉄 氧 体 21	NiO Fe ₂ O ₃	5.20	5790	1.75×10^{12}	0.34
鉄 氧 体 38	NiO _{0.5} ZnO _{0.5} Fe ₂ O ₃	5.27	5940	1.75×10^{12}	0.35
鉄 氧 体 41	NiO _{0.99} CoO _{0.01} Fe ₂ O ₃	5.21	5750	1.75×10^{12}	0.32
鉄 氧 体 42	NiO _{0.98} CoO _{0.02} Fe ₂ O ₃	5.21	5490	1.57×10^{12}	0.34
鎳		8.85	4780	2.0×10^{12}	
坡 明 德 合 金		8.2	5180	2.2×10^{12}	
鋁鉄合金 АІІбфеп		6.7	4750	1.5×10^{12}	

当温度为 18°~20° 时, 这些类型的鉄氧体的主要的磁学性质和磁致伸縮性质的数据, 給在表 2 及图 1-5 之中。

图 1 給出表征物质磁性行为的不同成分的磁致伸縮鉄氧体的主要磁化曲綫。在表 2 中除已經提到的換能器的一些重要参数外, 又給出了經常用来表現磁性材料特性的起始磁导率 μ_0 的数值。給出的 μ 、 k 、 λ 及 Δ 的数值, 是在剩余磁化条件下(以 r 为下标)和在 H_0 的最佳值条件下(以 O_{onm} 为下标)。 H_{0onm} 相应于最大 k 值, 根据图 3 中的图綫来确定。应该指出, 如試驗所表明, 輻射器以大振幅工作时, 采用的 H_0 应較 H_{0onm} 大些, 因为这时能較長時間地保持住声压与振幅 B 的綫性关系和 η_{sa} 的不变性。

取自不同来源的磁致伸縮金属的参数值常有显著的差异。表 2 給出的是它們的极限值。

表 2 中的数据表明, 根据对換能器很重要的一些参数看, 鉄氧体实际上不比磁致伸縮的金属差。由获得高强度声輻射的可能性观点看, 鉄氧体 21、41 及 42 的 λ_s 值是足够高的。鉄氧体 42 有最高的 k , λ 及 Δ 值, 在 20° 时发生对磁各向异性的补偿。它也具有 H_c 的最小值, 即具有上述成分中的最小的磁滯損耗。由于有很大的 λ 及 Δ 值, 这种材料無論在輻射状态和接收状态中, 都可以有效地应用。鉄氧体 21 及 41 的 k 和 λ 仅略差于鉄氧体 42, 它們可以有成效地用在輻射器的制备方面。可以看得出, 各向异性补偿点在 0° 以下的鉄氧体 41 的性质介于鉄氧体 21 及 42 之間。鉄氧体 38 是在所有的各組成分中有最大的軟磁性的, 但它的磁致伸縮效应最小。由于 λ_s , k , λ 等的值較小, 所以不能推荐它作为輻射器的材料, 但是与高值的 μ 有关的 Δ 值, 对于用鉄氧体 38 作超声接收器, 則有相当大的意义。

比較表 2 中的 Δ_r 、 Δ_{onm} 值及图 5 中的数据, 可以看出, 在有剩余磁化的情况时, Δ 值略大

于 Δ_{onm} 值,且低于 Δ 最大值不到20%,因此,在接收状态中,宜于采用具有剩余磁化的铁氧体。

图2-5上的图线表明铁氧体的一些参数与 H_0 的显著关系。 σ , ε , B 和磁场振幅的非线性关系的这个特性是铁氧体的饱和磁感应低的后果。在高强度上工作时,辐射器性质的稳定性一经破坏,就出现了 σ , ε , B 与 H 间的非线性关系,因而辐射强度限于极限以下。

用直径为5毫米的铁氧体的杆测定机械强度时,机械应力达到400公斤/厘米²。但是必须注意,对于具有很大的横截面面积和较复杂的构形的样品,机械强度应该较小(陶瓷材料的典型现象)。可达到的声强的实际极限还应按辐射器本身情况来判定。

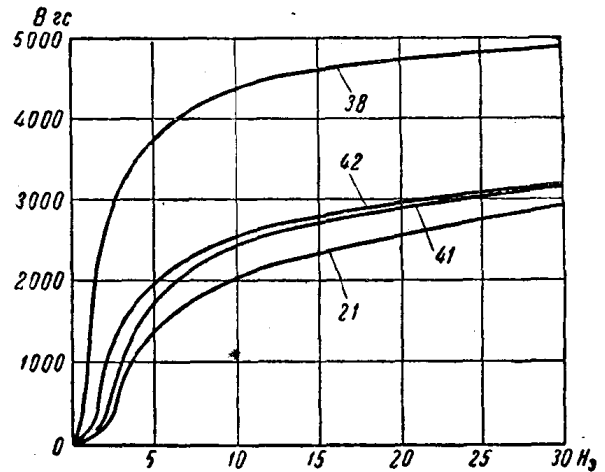


图1 不同成分磁致伸缩铁氧体的磁感应 B (高斯)与磁场 H (奥斯特)的关系

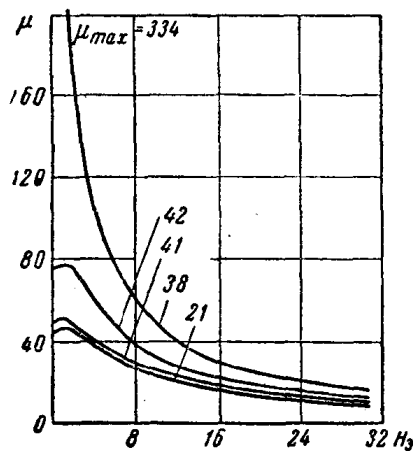


图2 四种类型磁致伸缩铁氧体的可逆磁导率 μ 与恒定磁场 H_0 (奥斯特)的关系

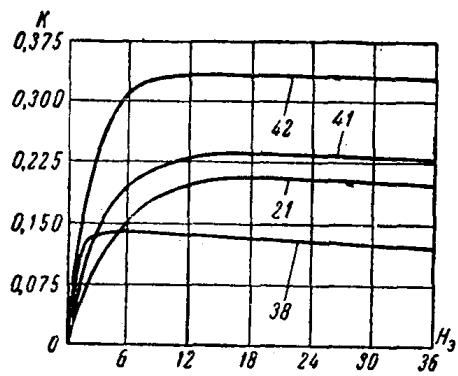


图3 磁致伸缩铁氧体的磁-机耦合系数 K 与 H_0 (奥斯特)的关系

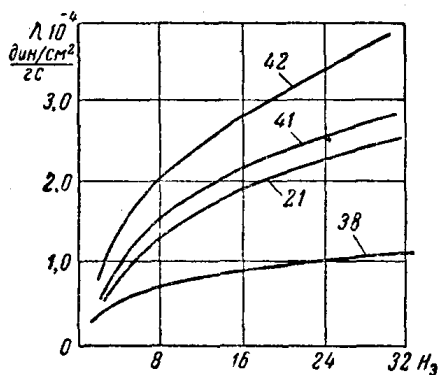


图4 磁致伸缩铁氧体的磁致伸缩常数 λ ($10^{-6} \frac{\text{达因/厘米}^2}{\text{高斯}}$)与 H_0 (奥斯特)的关系

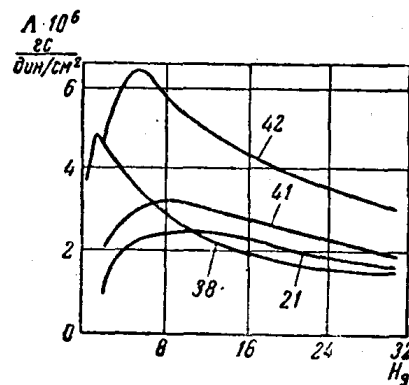


图5 磁致伸缩铁氧体的磁致伸缩常数 Δ ($10^6 \frac{\text{高斯}}{\text{达因/厘米}^2}$)与 H_0 (奥斯特)的关系

环状磁致伸缩铁氧体在空气中工作,而激发场振幅约为 $10 \sim 15$ 兆奥斯特时,其机械品质因数约为 600。

所有四种类型铁氧体的电阻率,数量级为 10^3 欧姆·厘米。在这情形下,当频率为 100 千赫,而 μ 值为 300 (所有类型铁氧体的最高的 μ 值)时,交变磁场的穿透深度约为 30 厘米,这一点证明了有制备整块芯子的可能性。在同样条件下当材料厚度为 1 厘米时,根据公式(4)计算出来的 ρ_e 值约为 0.015 CGSM 制单位。如果材料内的电损耗仅取决于傅科电流,则电损耗的正切 $\operatorname{tg} \delta_e$ 值的数量级为 10^{-5} 。实验得到的最小的 $\operatorname{tg} \delta_e$ 值为 3×10^{-2} ,由此可见,在磁致伸缩铁氧体中,傅科电流的损耗实际上并不表现出来,而材料中电损耗的主要型式应该认为是磁滞损耗。用铁氧体换能器时,可以遇到必须在不同温度下工作的情况(在换能器强烈振动时,温度变化既与外部介质有关,也取决于辐射器本身的加热)。因此必须知道材料性质如何随温度 t° 而变化。磁致伸缩铁氧体在温度 $0 \sim 120^\circ$ 范围内的 f_r 、 K 、 μ 、 λ 、 Δ_r 和 t° 的关系,表示在图 6-11 中。由这些图中可以看出,从声学观点看最有效的材料是铁氧体 42,它的性质和温度有极显著的关系。诚然,铁氧体 42 的 K 和 λ 在所有的温度范围内都超过了其他类型的铁氧体,但在这种情况下, f_r 和它在 20° 时的值相比,是偏差了 4%, K_{onm} 的偏差是 24%, λ_{onm} 的偏差是 22%, Δ_r 的偏差达 43%。因此当要求换能器工作稳定时,铁氧体 42 是不能推荐给入用的。在这些情况下,应选择具有较小的有效参数,而具有较大的温度的稳定性的材料。例如,在 $0 \sim 50^\circ$ 的温度范围内,接收器宜采用铁氧体 38 来代替铁氧体 42。从声学应用的观点看,铁氧体 21 的性质具有很大的稳定性: f_r 的温度系数(由 $\frac{\Delta f_r}{\Delta t}$ 确定)。在上述范围内约为 -6×10^{-5} , K 的温度系数约为 $+3 \times 10^{-5}$, λ_{onm} 的温度系数约为 $+1 \times 10^{-4}$, Δ_r 的温度系数约为 $+8 \times 10^{-4}$ 。铁氧体 41 在温度高于 $20^\circ \sim 40^\circ$ 时,具有足够的稳定性。当选择换能器的材料时,还应该考虑到 μ 和温度的关系,因为它的变化可能影响到换能器和供能仪器协调的情况。

表 2

材料类型	λ_s	H_c 奥斯特	H_{conm} 奥斯特	μ_0	μ_r	μ_{onm}	k_r	k_{onm}	λ_r 达因/厘米 ² 高斯	λ_{onm} 达因/厘米 ² 高斯	Δ_r 高斯/达因 厘米 ²	Δ_{onm} 高斯/达因 厘米 ²
铁氧体 21	-26×10^{-5}	2.8	18	44	34	16	0.15	0.21	0.9×10^4	2.0×10^4	2.2×10^{-6}	2.2×10^{-6}
铁氧体 38	-9×10^{-6}	0.35	5	380	270	90	0.10	0.14	0.23×10^4	0.55×10^4	3.9×10^{-6}	3.6×10^{-6}
铁氧体 41	-26×10^{-6}	2.3	16	51	40	19	0.16	0.24	1.0×10^4	2.2×10^4	2.8×10^{-6}	2.7×10^{-6}
铁氧体 42	-26×10^{-6}	2.0	16	73	82	22	0.23	0.33	1.0×10^4	2.8×10^4	5.8×10^{-6}	4.5×10^{-6}
镍	$-30 \sim -40 \times 10^{-6}$	0.7	$10 \sim 15$	100 ~ 400		40 ~ 70	0.14 ~ 0.20	0.15 ~ 0.31	$0.5 \sim 0.8$ $\times 10^4$	$1.7 \sim 2.0$ $\times 10^4$	$1.5 \sim 7.2$ $\times 10^{-6}$	6.1×10^{-6}
坡明德合金	$+70 \times 10^{-3}$	2		700	50 ~ 70		0.18 ~ 0.31	0.25 ~ 0.37	$1.1 \sim 1.2$ $\times 10^4$		$3.6 \sim 8.3$ $\times 10^{-6}$	
钴铁合金 (Альфер)	$+40 \times 10^{-6}$	0.7	$6 \sim 10$	1000	100 ~ 350	190	0.20 ~ 0.25	0.25 ~ 0.28	1.0×10^4	$0.4 \sim 1.0$ $\times 10^4$	7×10^{-3}	$6 \sim 7 \times 10^{-6}$

测定材料参数和温度 t° 的依赖关系,可以发现:当 H_0 变化时,假如 k 、 f 、 λ 的依赖关系的特征不变,则 μ 的依赖关系的形式可以大大地改变(见图 8, 9)。

应用具有上述性质的材料制成的试验用的换能器的芯子,如图 12 所示。

由铁氧体 21 及 42 制成的杆状辐射器在水中工作时, η_{oa} 的量值为 $70 \sim 80\%$,而与其共振频率无关;在脉冲状态下,用上面杆状辐射器所产生的声强达到 7 瓦/厘米²,并且这还是由于

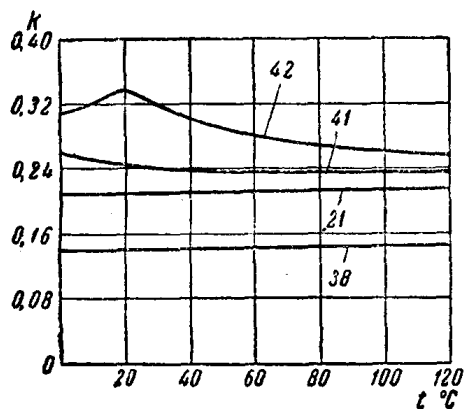


图6 磁致伸缩铁氧体的磁-机械耦合系数 k 与温度 t° 的关系;对于每种成分 H_0 有最佳值

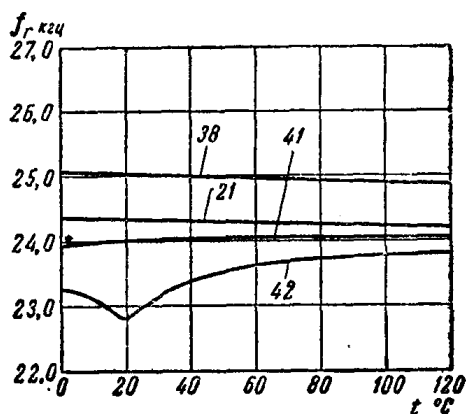


图7 当 H_0 值为最佳值时,共振频率 f_r (千赫)和温度 t° 的关系

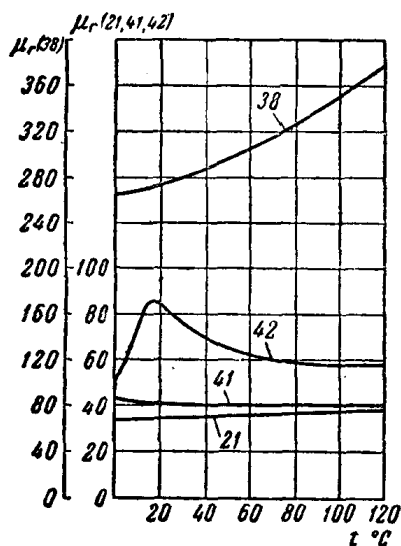


图8 在有剩余磁化时,磁导率 μ_r 和温度 t° 的关系

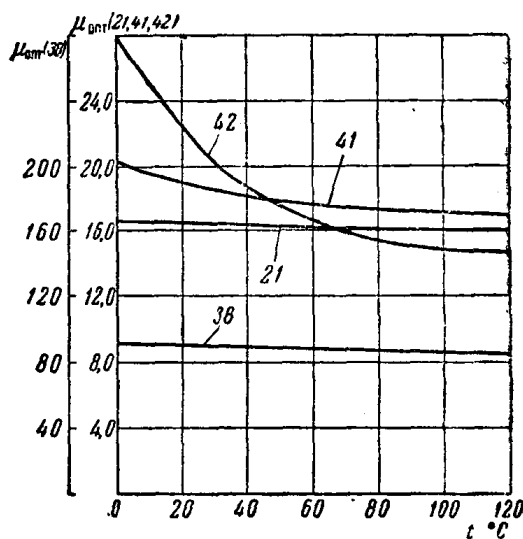


图9 H_0 有最佳值时,磁导率 μ_{nm} 和温度 t° 的关系

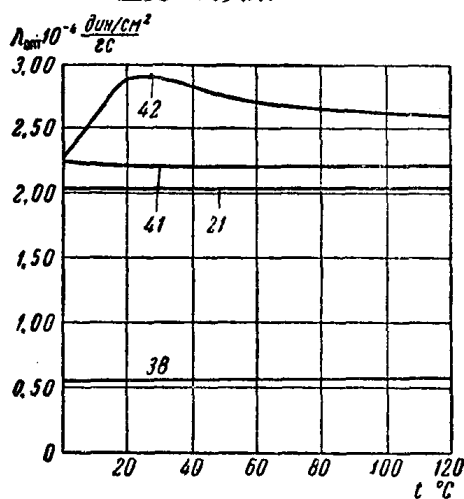


图10 当 H_0 有最佳值时,磁致伸缩常数 λ_{nm} (10^{-4} 达因/厘米² 高斯) 与温度 t° 的关系

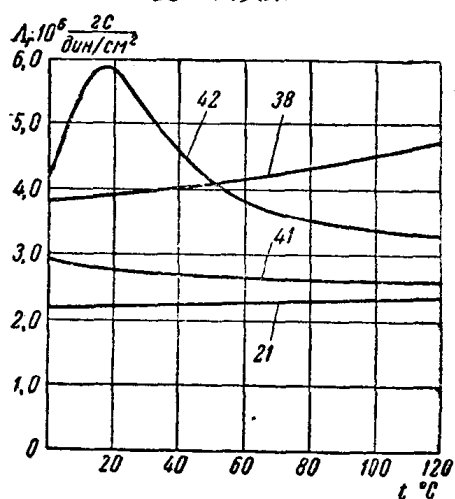


图11 在有剩余磁化时,磁致伸缩常数 λ_r (10^{-6} 高斯 达因/厘米²) 与温度 t° 的关系

当时材料的非线性性质和提供材料的困难才限定下表的;在連續状态中,在有发展的空化的情况下工作时,极限强度不超过 $2 \sim 3$ 瓦/厘米²,并受到材料强度的限制。

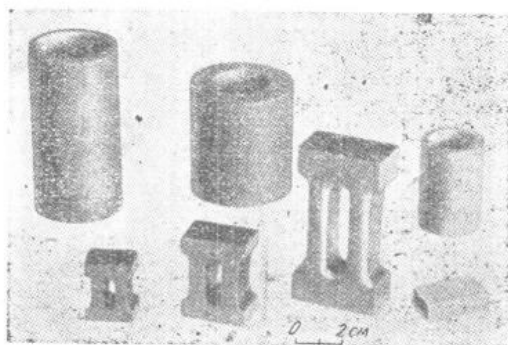


图 12 由磁致伸縮鉄氧体制备的,杆状与圆柱状型式的换能器芯子,杆状試件的
共振频率为 26、55 和 74 千赫

参 考 文 献

- [1] Thiede. *Acustica*, **4**, 532—536 (1954)
- [2] И. П. Голямина и др. Отчет. Акустический ин-т АН СССР, (1955)
- [3] U. Enz. *Techn. Mitt. PTT*, **6**, 209—212 (1955)
- [4] И. П. Голямина. *Акуст. ж.*, **2**, 225—228 (1956)
- [5] C. M. von der Burgt. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **28**, 1020—1031 (1956)
- [6] C. M. von der Burgt. *Philip's techn. Rundschau*, **18**, 277—290 (1956—1957)
- [7] И. П. Голямина, Доклад на Всесоюзной конференции по использованию Ультразвуковой техники в промышленности. Май 1957 г. М., Машгиз, 1959.
- [8] И. П. Голямина, А. Д. Соколов, В. К. Чулкова. *Акуст. ж.*, **3**, 288—290 (1957)
- [9] И. П. Голямина, Н. Ф. Старостина, В. К. Чулкова. отчет. Акустический ин-т АН СССР, (1957)
- [10] Y. Kikuchi. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **29**, 569—573 (1957)
- [11] H. D. Root, J. Mc Donald. *J. Amer. Ceram. Soc.*, **40**, 1—5 (1957)
- [12] И. П. Голямина, Доклад на конференции по вопросам электроакустических преобразователей. Крыница, (ПНР), сентябрь 1958.
- [13] И. П. Голямина, Н. Ф. Шишкина. Доклад на конференции по вопросам электроакустических преобразователей. Крыница (ПНР), сентябрь, 1958.
- [14] S. F. Ferebee, C. M. Davis. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **30**, 747—750 (1958)
- [15] И. П. Голямина. М., Вивити, 1959.
- [16] C. M. von der Burgt. *Valvo Berichte*, V, I, 1—33 (1959).
- [17] C. M. von der Burgt. Доклад на III Международном акустическом конгрессе, Штутгарт (ФРГ), сентябрь 1959.
- [18] И. П. Голямина. Доклад на III Международном акустическом конгрессе, Штутгарт (ФРГ), сентябрь, 1959.
- [19] S. Butterworth, F.D. Smith. *Proc. Phys. Soc. (London)*. **43**, 166—185 (1931)
- [20] Л. Я. Гутин. *Ж. техн. физ.*, **15**, 239—247 (1945).
- [21] Л. Я. Гутин. *Ж. техн. физ.*, **15**, 924—941 (1945)
- [22] Р. Бозорт. М, ИЛ., стр. 614 (1956)
- [23] В. В. Фурдуев. М.-Л. ГТТИ, (1948)

[24] И. П. Голямина, Е. В. Романенко. Приборы и техн. эксперим, 5, 90—94 (1958)

[25] И. П. Голямина, Н. А. Рой. Приборы и техн. эксперим., 2, 129—131 (1956)

[26] C. M. Van der Burgt. Phillip's Res. Rept., 12, 97—122 (1957)

(华金龙译 孙熙民审校)

(2) 特种压磁铁氧体及其在滤波器和功率超声仪器中的应用

[西德] C. M. Von der Burgt

(Elektronische Rundschau, 3/1961 S. 103~106) [德文]

1. 关于压磁铁氧体最重要用途的概述

非导电性陶瓷铁氧体自从1946年以来不仅在通讯、广播和电视技术中得到了广泛的应用,而且在新型的微波单路导体以及存储器系统中也获得了新的用途。在发展这类铁氧体过程中,曾经把磁致伸缩的性能保持较小,而当用来作为机械式滤波器或超声换能器时,磁致伸缩效应必须保持较大。只有最近几年,才用一种具有高度磁致伸缩效应的镍铁氧体,让它和铜铁氧体和(或)钴铁氧体混合,而发展出好多种通用的铁氧体。这样,就保证了对稳定而有效的滤波转换器和功率超声换能器的应用。

首先谈一谈声传送系统以及电和机械的滤波器中的各种不同应用的可能性。垂直和水平的回声测深仪(声拿)在第二次世界大战结束以前只限于国防方面的应用,而目前已有效而大量地用来探测鱼群和鲸鱼。在工业和医学中的应用,也要求具有大振幅的设备,例如超声焊接机和焊铝器以及超声钻孔机(具体的有工业上用的支架式钻孔机和牙医用的钻牙设备等)。但其最重要的应用范围包括有超声表面清洗机的给金属、陶瓷或玻璃部件、宝石、钟表、滚珠轴承和外科医用仪器等的去油和清洗。大部分的超声表面清洗机是利用在50千赫以下所产生的所谓空化作用的局部高压效应来工作的。

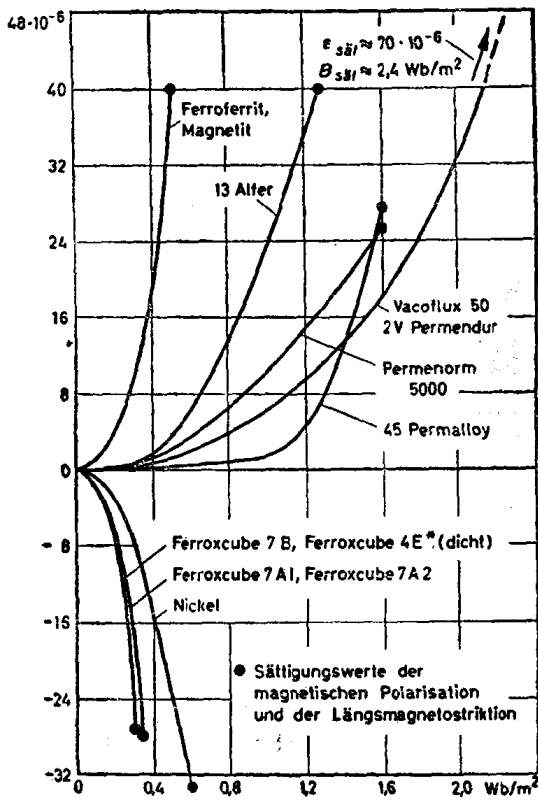
在不久以前,所产生的压磁振子一般都是由金属叠层体,例如表面经过氧化的镍薄片构成的。但一些由新的压磁铁氧体所构成的块状的陶瓷振子却具有较高的电声效率。利用合适的绝缘线圈(或者圈数很少时,甚至可以不用任何绝缘)可以把全部铁氧体振子直接浸入大部分非导电性的和导电性的清洗液体和清洗溶液中使用,但不能浸入强酸中。由于多孔性特别低,铁氧体能产生空腔作用,在较长的时期里,使辐射面不因空化的腐蚀而受到过份破坏。另一方面,如果换能器及其线圈和处理的液体相隔离,把换能器的辐射面焊接在清洗液体容器外边,那么就可更好地利用铁氧体振子的高电声效率。虽然铁氧体振子并不很坚固,可是它比镍叠片体便宜。此外还可用作小型电子高频发生器,因为至少有加倍的高频能转换成有效的声功率。压磁铁氧体,如:“Ferroxcube 7A”和“Ferroxcube 7B”,能在500°C以下时保持高度压磁活动性能,比镍和所有的压磁材料更为优越。

在声波转换为电信号的检测应用(水听器)和其他低强度的超声应用范围中,宁可用“Ferroxcube 7B”所制的转换器而不愿用“Ferroxcube 7A”所制的转换器,因为前者由于长时期的剩余极化作用更适合于工作。凡是可以实际使用的场合,在辐射器和接收器方面都应利用一种以陶瓷永磁材料做的薄极化板组成的铁氧体振子,因为这种铁氧体振子在最佳预磁化作用下能保证稳定工作。“Ferroxcube 7B”本来是用在电机式振荡回路中的电气滤波器中,在这方

面的应用,要求具有不受温度影响的机械共振频率和很高的机械品质因数。至于压磁耦合回路和解耦回路的机械式通带滤波器可以采用这种材料,根据适当的频带宽度和所要求的稳定性作微型接头振子,因为不用“Ferroxcube 7A”,而改用“Ferroxcube 7B”时,其最大的频带宽度减少了,而稳定性和机械品质因数却增加了。

2. 关于压磁转换器所用材料的若干鉴定

决定压磁材料特性的最重要的参数之一就是磁致伸缩的饱和值,以下就称为饱和磁致伸缩 ϵ_{sat} 。一般地说,由于这一参数的绝对值的过高会使导磁率降低,但在室温下,对于较高和中等强度,要求 $|\epsilon_{sat}| \geq 20 \cdot 10^{-6}$ 。为了考虑到在高温时的各种不同用途,居里点须要做得尽可能高。



Ferroferrit, Magnetit 亚铁铁氧体
 Alfer Alfer 铝铁合金
 Vacoflux Vaco-磁力线
 Permendur 铁钴合金
 Permalloy 坡莫合金(镍铁合金)
 (dicht) (密)
 Nickel 镍
 Sättigungswerte der magnetischen Polarisation und der Längsmagnetostraktion 磁极化和纵向磁致伸缩饱和值

图 1 磁致伸缩对磁极化(预磁化)的作用;新曲线

图 1 表示不同声学换能器材料的极化(预磁化)与磁致伸缩关系的曲线。有效的金属振子只有用极为细致薄片叠层体形式才可能实现,这里相邻叠片之间的涡流和摩擦损失就会使“自由”声学换能器的磁品质因数 Q_μ 和机械品质因数 Q_v 二方面的值降低。(指数 v 是表示一个辐射面在空气或真空中自由振荡的完整的声学换能器的给定值)。虽然线圈和支持产生机械阻尼作用,块状铁氧体芯却具有很高的 Q_μ 和 Q_v 值。铁氧体振子具有很高的电声效率的特性,如图 2 所示。

在最佳设计和比例下可能产生的电声效率的最大值,通常称之为潜势效率 $\eta_{ea\ pot}$,并可用一个简单的,只含有三个自由振荡声学换能器常数的近似公式来表示:

$$\eta_{ea\ pot} \approx 1 - \frac{2}{K' \sqrt{Q_\mu Q_v}},$$

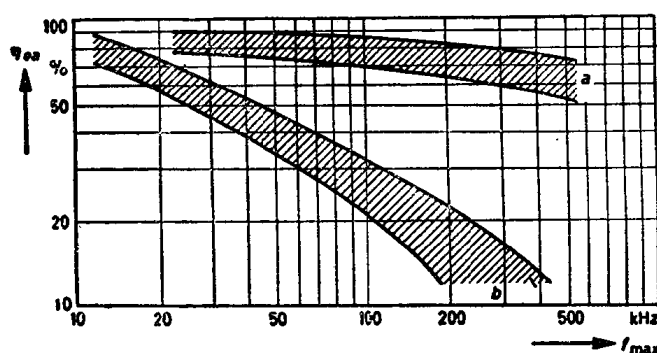


图2 体积铁氧体振子(a)和叠片镍振子(b)的电声效率 η_{ea} 对可达到高效率的特性频率 $f_{\max}$ (千赫)的关系

式中 K' 是压磁或机电耦合系数的实分量。一个 K' 的高值除了表示一个高的电声效率外,还代表着调谐的水声仪和(电)机滤波器的一个大的频带宽度。 K'^2 是当频率低于机械共振频率时,由储存的磁能量到储存的弹性能量(或反之)之部分转换的一个量度。在退磁和磁饱和的铁氧体中, $K'=0$, 并当磁感 $B_{opt} \approx 0.7B_{sat}$ (饱和磁感)时,显示出一个 K'_{opt} 的最高值。 K'_{opt} 和陶瓷铁磁材料的各向异性能量之间的关系如下:

$$K'_{opt} \approx \frac{\epsilon_{sat}^2 E_s}{\epsilon} \quad (\text{各向异性能量})$$

$$\approx \frac{\epsilon_{sat}^2 E_s}{\left[\begin{array}{c} \text{晶体各向异性} \\ |K_1| \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{内应力各向异性} \\ |\sigma_i \epsilon_{sat}| \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{内形各向异性} \\ \text{非球面孔} \end{array} \right]}$$

其中 E_s 为饱和材料的弹性模量,而 σ_i 为平均内应力。

适当的制造技术可以把内应力和空隙率减少,同时可以避免大量的非球面空隙,这样应力的各向异性和内形的各向异性可以保持较小。但磁晶的各向异性却不决定于工艺方法,而决定于化学成分。镍铜铁氧体和镍锌铁氧体有一个负的晶体各向异性常数 K_1 ,而钴铁氧体却有一个很高的正晶体各向异性常数。所以镍铜和镍锌铁氧体加入小量的钴铁氧体在接近室温或在必要温度下, $K_1(T)$ 曲线显示出一个曲线上另点,而在相同温度时,大致可在 $K'_{opt}(T)$, $\frac{1}{f^H(T)}$, $\frac{1}{f^B(T)}$ 和 $\mu'_{opt}(T)$ 的曲线上观察到较宽的最大值。

μ'_{opt} 是在最佳磁化情况下可逆导磁率的实分量,而 f^H 和 f^B 分别表示具有开路线圈(交变磁场强度 $H=0$)和具有短路线圈(交变磁感 $B=0$)的一个磁化铁心的自由振荡频率。频率 f^B 和特性频率 $f_{\max}$ 相等,它在功率辐射时达到最高的效率。同时 f^H 和 f^B 也是当自由转换器的电阻抗也具有一个最大和最小值时的频率,如图3所示。其相对距离在径向振荡的环圈式振子上为 $\frac{1}{2} K'^2$,而在其它形式的振子上是 $\frac{1}{2} K'_{eff}$ 。

其中 K'_{eff} 是“有效”压磁耦合系数,这一系数是在不均匀振荡的共振器上(例如半波振子上)出现的。 $\frac{K'_{eff}}{K'}$ 的比例约为0.9...0.95。

如上所述,通过一种新发展的铁氧体(如“Ferroxcube 7A1”)的化学合成,在室温范围(水声振子的工作范围)内,可以达到 $K'(T)$ 曲线的一个宽的峰值。这对室温下超声仪器的稳定性不可避免地会产生二种重大的后果:(1) $f_{\max}(T)$ 曲线的最小值;(2) 较高的 μ'_{opt} 对温度的关