

水声换能器技术

阎福旺 凌青 张增平 编著



海洋出版社

PDG

序

《水声换能器技术》一书较全面论述了水声换能器技术所涉及的各个方面，以必要的深度介绍了水声换能器材料选择、设计及制作工艺等 12 个方面的技术内容，内容丰富，使声纳装备使用人员、声纳技术人员以及水声换能器技术人员都可以从中获取较系统的水声换能器技术的知识。该书将成为一本水声学方面的重要论著，有力地促进声纳技术及水声换能器技术的发展。

长期从事水声学研究的阎福旺及他的同事，用辛勤的劳动为广大的声纳装备使用、管理人员、声纳技术人员及水声换能器技术人员提供了《水声换能器技术》一书，这是对水声技术发展的重要贡献，也是对水声科技事业忠心耿耿的表现。我对他们取得的成果表示祝贺，对他们的敬业精神表示钦佩。

《水声换能器技术》一书对水声换能器技术作了详细的论述。这些技术是 60 年代末以后逐步发展起来而至今仍起着重要作用并对以后的水声换能器技术的研究与发展有着重要的指导作用。水声换能器技术的发展与声纳技术的发展和海军水下作战的需求密切相关，该书对于声纳技术研究和海军水下作战需求研究均有重要的参考价值。

该书是迄今为止国内外较系统且全面地讲述水声换能器技术的论著，相信此书定会受到广大读者的厚爱。

祝愿作者在今后为水声事业的发展不断做出新贡献。

中国科学院院士

李启虎

1998 年 7 月



1010739

前 言

水声换能器技术是水声换能器发展的基础,也是促进现代声纳发展的基础。近20年来,水声换能器的材料、设计与制作工艺都有新的飞跃。水声换能器技术的发展,与现代声纳的发展密切相联。认真学习和掌握水声换能器技术,是发展水声换能器、促进声纳发展的关键。

本书的目的是以必要的深度介绍水声换能器技术,以便使读者能够掌握水声换能器技术的关键内容。本书主要适于声纳装备的使用与管理人員阅读,也适合水声专业的高年级学生和研究生以及从事水声换能器研究的科研人员参考。

全书共分十二章,各章分别介绍了水声换能器技术的作用、水声换能器的基础效应、构成论、压电陶瓷换能器、压电薄膜水听器、光纤传感器、水声换能器接口电路、水声换能器的材料选择、水声换能器设计、制作工艺、可靠性改进及水声换能器的主要性能参数等12方面的内容。试图通过这些内容的描述使读者真正达到了解和熟悉水声换能器技术的目的。

本书编著中,凌青参与执笔第六章,张增平参与执笔第八章,其余各章由阎福旺执笔。阎福旺、凌青、张增平共同完成了全书的内容拟定,阎福旺完成了全部书稿的编撰工作。

国内外著名水声专家、中国科学院院士李启虎教授为本书作序,是对作者们的鼓励、支持与期望,在此深表谢意。

由于水平有限,书中错误和不足之处在所难免,热忱希望读者批评指正。

编 著 者

1998年7月

目 次

第一章 概述	(1)
1.1 水声换能器技术的作用	(1)
1.2 水声换能器技术分类	(2)
1.3 水声换能器技术的发展	(2)
第二章 水声换能器的基础效应	(11)
2.1 磁致伸缩效应.....	(11)
2.2 压电效应.....	(16)
第三章 水声换能器构成论	(18)
3.1 原理结构.....	(18)
3.2 机电类比.....	(18)
3.3 水声换能器的构成方法.....	(20)
第四章 压电陶瓷换能器	(22)
4.1 压电元件制作.....	(22)
4.2 压电元件的加工.....	(32)
4.3 压电换能器制作.....	(33)
第五章 压电薄膜水听器	(35)
5.1 PVDF 压电薄膜水听器.....	(35)
5.2 PVF ₂ 压电薄膜水听器	(36)
5.3 压电薄膜水听器的发展.....	(39)
第六章 光纤传感器	(41)
6.1 引言.....	(41)
6.2 光波强度调制型光纤传感器.....	(41)
6.3 相位调制型光纤传感器.....	(51)
第七章 水声换能器接口电路	(60)
7.1 阻抗匹配.....	(60)
7.2 水听器自噪声的抑制.....	(61)
第八章 水声换能器的材料选择	(65)
8.1 水声材料选择.....	(65)
8.2 电声换能材料选择.....	(66)
第九章 水声换能器设计	(70)
9.1 圆柱形压电陶瓷管的接收电压灵敏度.....	(70)
9.2 发射器的功率极限.....	(76)

9.3	水声换能器的设计倾向	(79)
第十章	水声换能器制作工艺	(81)
10.1	电声转换器件的减隔振安装	(81)
10.2	粘接工艺	(81)
10.3	密封工艺	(82)
第十一章	水声换能器的可靠性改进	(85)
11.1	引言	(85)
11.2	水声换能器填充材料	(85)
11.3	水声换能器的电晕抑制	(86)
11.4	水声换能器的加速环境应力试验	(86)
11.5	水听器自噪声控制	(86)
第十二章	水声换能器的主要性能参数	(88)
12.1	发射与接收换能器共同要求的参数	(88)
12.2	对发射换能器着重要求的性能参数	(89)
12.3	对接收换能器着重要求的性能参数	(90)
	参考文献及资料	(92)

第一章 概 述

1.1 水声换能器技术的作用

水声换能器是声纳的重要组成部分，它能将水下的声信号转换成电信号，或将电信号转换成水下的声信号。一部声纳¹⁾的性能优劣与水声换能器的性能优劣直接相关，由水声换能器获取的增益是实实在在的增益。水声换能器类似于滤波器，水下声信号首先由它过滤。如果水声换能器的设计与制作出现影响声纳性能的缺陷，则会直接影响声纳的正常工作。水声换能器技术是水声换能器的设计与制作技术，是保障水声换能器的性能质量的关键。水声换能器技术也直接促进水声换能器的升级换代。长期以来，水声换能器技术的发展已成为水声换能器发展的核心。水声换能器设计与适当的选用换能器材料紧密相联；水声换能器制作与合理的先进工艺密切相关。无论是过去、现在，还是未来，合理地选用水声换能器材料、正确地进行水声换能器设计及采用先进的工艺等3方面，都是水声换能器技术发展努力追求的目标。

从水声发展史来看，水声应用的每一步进展都离不开水声换能器技术的发展。早在19世纪，由于一批物理学家都对换能现象感兴趣，他们在水声事业的发展中不约而同地联系在一起了。约在1840年就已发现，当线圈中电流变化时，或线圈中的电流受马蹄形磁铁扰动时就会发生响声，这是最早的磁致伸缩演示试验。1840年焦耳定量测量了磁致伸缩引起的长度变化。因此，一般认为焦耳是磁致伸缩现象的发现者了。1880年居里发现了压电效应，当压缩某种晶体时，则在某一对晶面上会出现电荷。在此以前，有些科学家曾在压电效应方面做过一些试验。库仑曾预言过，加压可能会产生电；而伦琴也曾著文叙述在应力作用下不同晶面上将出现电荷。这些研究工作，奠定了水声换能器发展的基础，也构成了声纳发展的基石之一。在19世纪初，为了解决回声定位的问题，美国的R. A. Fessenden设计和制造了一种新型动圈式换能器，这种动圈式换能器既能用作水下通信，又能用来回声定位。利用这项水声换能器技术，在1914年就能探测到2 n mile外的冰山了。Fessenden的振荡器工作在500~1 000 Hz附近，在第一次世界大战时曾被美国潜艇装用，完成潜艇下潜状态的相互通信。在这个时期，年轻的俄国电气工程师Constantin Chilowsky与著名的物理学家郎之万合作，利用电容（静电）发射器和一只放在凹曲面焦点的碳粒微音器进行实验，在1916年收到了海底回波以及200 m外的一块装甲板的回波。在1917年郎之万转向压电效应研究，并用石英-钢的夹心换能器来代替电容发射器。利用该项研究成果，到了1918年第一次收到了潜艇的回波，有时甚至可远至

1) Sonar一词在国际中称“声呐”，但在军标中一直使用“声纳”。由于本书读者很大一部分为军职人员，为使该术语与军内有关文献资料统一，本书仍按军标使用“声纳”，特此说明——编者。

1500 m。第一次世界大战结束以后,水声的实际应用继续发展,约在1925年将回声测深设备定名为测深仪。当时的美国海军研究实验室正在寻求各种对舰艇进行回声定位的实用方法。在这个时期,磁致伸缩发射换能器技术解决了回声定位中的发射换能器所需要的足够功率问题;用酒石酸钾钠的合成晶体代替了压电换能器的主要压电材料,即天然石英,扩展了压电换能器的材料来源。随着第二次世界大战逼近和水声换能器技术的发展,促使美国于1938年开始批量生产声纳。在第二次世界大战初期,大批美国舰艇都装上了水声听测设备和回声定位设备。第二次世界大战后至20世纪60年代,水声换能器技术的发展重点表现在两个方面,一是压电陶瓷材料的工程应用;二是追求高性能的水声换能器设计。在这将近20年中,依靠水声换能器技术的发展,使声纳装备的工作频段得以向低频发展,声纳的作用距离明显提高,为声纳的可靠工作创造了条件。从20世纪60年代至今,研究了高性能的换能器材料,如压电复合材料、稀钽材料及铁电材料等;对换能器的性能作优化设计,提高了接收换能器的灵敏度和发射换能器的发射响应;加强了水声换能器的可靠性设计工作。所有这些水声换能器技术的发展,为从20世纪60年代末至90年代末的新型声纳的发展奠定了重要基础。拖曳线列阵声纳在世界主要国家海军中的使用、舷侧线阵声纳的大力发展、主动拖曳线列阵声纳的研制成功等等,这些都离不开水声换能器技术的发展。

近代水声换能器技术的发展支撑了近代声纳的发展,这个作用是明显的。随着压电陶瓷材料的越来越广泛的应用以及水声换能器设计技术的提高,成功地研制出了复合棒形和嵌镶式水声换能器。这两种水声换能器工作频率低、功率大、耐高静水压,并且能使声纳工作在较深的海洋中,所以,为远程探测声纳的发展创造了条件。高分子压电聚合换能材料的发展及接收用的压电薄膜水声换能器的设计成功,可以展宽水声换能器的工作频带,提高水声换能器的接收灵敏度。宽带水声换能器的使用,为抗干扰声纳的发展创造了条件。

1.2 水声换能器技术分类

水声换能器技术由3类组成,一是水声换能器材料;二是水声换能器设计;三是水声换能器制作。水声换能器材料方面涉及材料的配置、生成及成型等3方面的技术。水声换能器设计方面涉及性能设计及结构设计等两个方面的技术。水声换能器制作涉及加工、安装及检测等3方面的技术。这3类水声换能器技术,是获取高性能、高质量水声换能器的保障。这3类水声换能器技术的发展,直接促进了水声换能器的发展,影响着声纳的发展。

1.3 水声换能器技术的发展

1.3.1 水声换能器机理研究

约有7种基本上不同的电声能量转换的物理机理,然而即使把我们的注意力局限在水下声能学和超声学应用这样一个宽的频带——从大约1 Hz到几兆赫范围,也需要多种多样的技术和器件。所以我们将首先回顾这些机理的基本特征,并指出其中最适宜

于水声应用。

1.3.1.1 动圈换能器

动圈换能器是我们很熟悉的换能器,它在通讯和音乐重放系统中有着广泛的应用。在这种器件中,电声转换的力是作用在磁场中的通电流导线上的力。图 1.1 示出了动圈换能器的主要部件。载有信号电流的环形线圈在磁铁的环形缝隙中的恒定磁场里运动,只要线圈的偏离不超出恒定磁场的区域,则作用在线圈上的力就是信号电流的线性函数。线圈的运动传到由机械弹簧与外壳相连的膜片上,膜片的运动向外部介质辐射声波。作用在动圈上最大的力受缝隙里的磁场强度和线圈中的安匝数限制。实际上,能够达到的最大的力比一些其他转换机理小(表 1.1),这样就使动圈换能器在声阻抗比较低的空气中使用比在声阻抗比较高的水中使用更适宜。在甚低的频段,在水中使用和空气中使用差别不那么大了。实际的设计考虑是,由于换能器比声波波长小,因而要辐射有效的声功率需要大的位移。所以动圈换能器被广泛用作水下宽带校准声源(有效的声输出可低至 10 Hz 左右)。

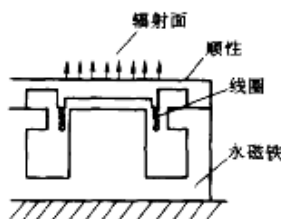


图 1.1 动圈换能器简图

表 1.1 换能机理的比较 (以单位面积可达到的近似最大力作为比较标准)

机 理	单位面积上的最大力(Pa)	条 件
动 圈	8 000	$B=1\text{Wb/m}^2, N=200$ 匝, 环形线圈半径 $r=0.1\text{m}$, 通过电流 $i=2\text{A}$, 力 $=\frac{2\pi rBN}{\pi r^2}$
可变磁阻	4×10^5	磁极间 $B=1\text{Wb/m}^2$
磁致伸缩	10^6	材料: 镍, 加 1000 A/m 的极化磁场
压 电	8×10^6	材料: 锆钛酸铅, 加极化电场 4000 V/cm
流体声学	7×10^6	假定流体静压力的变化为 6 894 754 Pa ($\approx 1000 \text{ lbf/in}^2$)

1.3.1.2 可变磁阻换能器

可变磁阻换能器(图 1.2),其机理基于磁极面间的力,它被广泛用在电话接收器中的声发射器,它是静电换能器的磁学类比。作用力和磁极面间磁通量的平方成比例,改变线圈中的电流,引起磁极面间缝隙中力的变化,产生膜片的振动,从而辐射声波。可变磁阻换能器也是一个非线性机理,也可以把信号电流叠加到大的恒定磁化电流上使之线性化。可变磁阻换能器所能达到的最大的力(它是由实际所能达到的磁场决定的),比动圈和静电机理大,如表 1.1 所示。所以可变磁阻换能器比其他两种机理更适合在水中工作,它已被应用于一些实验声纳系统中。

1.3.1.3 磁致伸缩换能器

磁致伸缩材料包含着具有永久磁矩的原子,它们以这种方式被耦合到晶格上,使之在加磁场时能够改变晶格的间距,从而相应地改变宏观样品的尺寸。由于磁致伸缩力与晶格变化有关,所以这个力可以和固体材料受机械变形所产生的弹性力相比较。这些力

1) 1 lbf = 4.448 22 N.

2) 1 in² = 6.451 6 × 10⁻⁴ m².

(表 1.1) 比前面讨论的 3 种机理中的任意一种都要大。磁致伸缩换能器最适合在声阻抗比较高的介质(如水)中工作。

最普通的磁致伸缩换能器在结构上极其简单,如卷环式(Scroll)磁致伸缩换能器。它是用长而薄的镍带卷成环形,然后用环氧树脂加固。这样构成的分层圆环用螺线环绕组缠绕起来,卷环式换能器就基本上构成了。改变绕组中的电流,这样就产生沿着环的圆周方向的交变磁场,它通过改变环的大小而辐射声波。磁场和材料尺寸之间的磁致伸缩关系是非线性的。在大多数情况下,磁致伸缩换能器是把大的恒定磁场和较小的交变磁场叠加起来使之线性化,这种线性化的工作方式常常称为压磁。

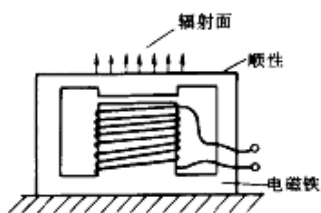


图 1.2 可变磁阻换能器简图

磁致伸缩换能器是把大的恒定磁场和较小的交变磁场叠加起来使之线性化,这种线性化的工作方式常常称为压磁。

1.3.1.4 压电换能器

压电换能器材料有真正的压电材料,像石英。(在这种材料中,力的规律是线性的),还有已极化的电致伸缩材料(采用极化措施使之线性化)。电致伸缩材料是磁致伸缩材料的电学类比,它有永久性的电矩。电矩与晶格之间这样耦合,使之在外加电场时,尺寸发生变化。实际上这些极化了的材料,由于已经线性化,因而能够用描述压电材料的方法描述它。无论哪一种压电材料的压电力都是大的,如表 1.1 所示。使用这些材料的换能器非常适合于水中工作。石英或许是最早实际用于换能器的材料,此后,被广泛用于实验工作、声能学和超声学方面。大约在 1950 年前后,能够实际应用的电致伸缩材料开始出现,这些材料能够做成陶瓷,在极化后有极好的压电性质。钛酸钡是这类材料中首先被广泛使用的材料。锆钛酸铅现在在很多应用中取代了钛酸钡。改变锆钛酸铅的成分,可以得到多种性质,使之适合不同的用途,Ouchi 相当广泛地研究了这些成分。双层叠片圆盘弯曲模换能器是各种不同的压电陶瓷换能器形式的一个例子。改变加在圆盘上的电压,激发弯曲模振动,于是振动的圆盘便向外部介质辐射声波。

1.3.1.5 流体声学换能器

尽管实际应用的和实验的换能器是多种多样的,但是大多数都是上面讨论的几种基本电声换能器形式的变种,然而有些变种是非常不同的,如由电动机所推动的换能器。在这种换能器中,作用在磁场中载流线圈上的力把电能转换成机械能,机械能然后再转变为活塞的振动,从而辐射声波。用水中放电方法,也可以将电能转换成热,它再产生声辐射。还有非电声型换能器,像爆炸声源、气动声源和液压声源。在后面这类里最重要的形式通常称为流体声学换能器,如图 1.3 所示。它的机理是被调制的稳定液流使声激发空腔里的压力发生变化,后

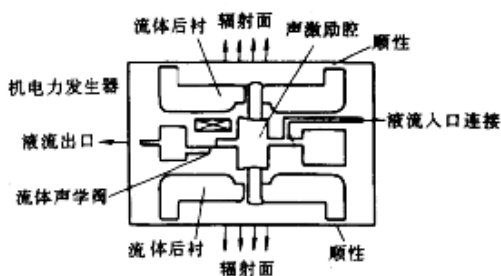


图 1.3 流体声学换能器简图

者给弯曲圆盘一个力，并使之运动。调制液体流动的阀门可以用液流本身控制，也可以受一个机电机构如压电换能器控制。在后一种情况下，尽管电声机构不限制力或者功率容量，而仅仅起调节作用，但是流体声学换能器和基本的电声换能器并非完全不同。力的限制由系统的其他部件的安全工作条件决定，力可能达到34 473.8~68 947.6 kPa。所以流体声学换能器所能达到的最大力超过可变磁阻换能器10~100倍，与磁致伸缩和压电换能器差不多。在过去制造出了许多不同形式的流体声学换能器，它们已经用于声纳发展工作和水声研究工作之中。

1.3.1.6 非线性声学换能器

在水中产生声波的另一个完全不同的方法是非线性参量转换——两个较高频率的声能向较低频率的差频声能的转换。这种转换的实现通常是使用普通的电声换能器向同一区域的水里辐射两个比较高频率的声波，通过水的非线性性质产生差频。这种非线性转换在水中虽然效率极低，但是差频辐射却有着独特的性质，如具有极低旁瓣的窄波束。在特殊的应用中，这种机理非常有用。这种声能由一个频率向另一个频率的非线性转换的潜力还没有得到充分研究。

1.3.1.7 光纤传感器

光学纤维是利用光的完全内反射原理传输光波的一种媒质，心部的折射率比包层的折射率要大。当满足一定的入射条件时，光波就能沿着纤心向前传播。

光导纤维最早是为光通讯用而研制出来的。目前光通讯中主要是利用光纤来传播光波的能量，利用光强变化来传递信息。光纤只是被用作传输光能的媒质。但是，表征光波特征的参量，诸如振幅（光强）、相位、偏振态和模式等，在通过光纤的传输过程中也会发生变化。尤其是外界因素（温度、压力、电场、磁场……）对光纤的作用，会引起光波的上述参量发生变化。因此我们只要能测出这些参量随外界因素的变化关系，就可以用它作为传感元件来探测温度、压力、电流、磁场等物理量的变化，这就是光纤传感器的作用原理。

光纤传感器用的光纤主要有两种：多模光纤和单模光纤。多模光纤的特点是心径大（ $2a=50\sim 200\ \mu\text{m}$ ），心、皮折射率差大（ $\Delta=0.01\sim 0.02$ ， $\Delta\approx 1-n_{\text{皮}}/n_{\text{心}}$ ），而单模光纤则是心径小（ $2a=4\sim 10\ \mu\text{m}$ ），心、皮折射率差小（ $\Delta=0.0005\sim 0.01$ ）。由于两种光纤有这种差别，因此光波在其中传播时，单模光纤中只能有一种场的横向分布（或称一个模式）在其中传播，而多模光纤中则有不只一个模式在其中同时传播。光通过多模光纤时，外界因素会引起传输损耗发生变化，而光通过单模光纤时，外界因素还会改变光波的相位和偏振态。

1.3.1.8 各种换能器机理的比较

为了指出哪一种基本的换能机理最适合于水声应用，我们主要从发射器角度来研究它们。有的电声机理也可以作为接收器（水听器）工作，但是流体声学机理却不能。根据电声互易原理，大多数机理在电激发时能产生大的力，在声激发时也能产生大的电输出，所能达到的最大的力是水中使用适用性的直接表示，但是对既定的应用，为了比较不同的机理，描述换能器性能的一个更有用的参量是由 Woollett 研究过的机电耦合因子。耦合因子的平方是输入的电能中机械能所占的百分比，因而它是能量转换能力的基本指数。

所有电声机理以及用电声机理控制的流体声学机理，尽管它们大多数都基于非线性的物理效应，但是都可以在很高近似程度上作为线性器件工作。所有这些机理在充分大振幅时都变成非线性的，所以线性工作范围是描述换能器性能的另一个参量，它常常是一个重要的量。

光纤传感的机理与上述所谈到的各种电声转换机理不同，它是基于光学纤维的特性，以及外界环境引起光纤中光波的变化。

1.3.2 压电陶瓷的优缺点

1.3.2.1 压电陶瓷的优点

在水声换能器中，这样广泛地应用压电陶瓷的最重要理由在于它的机电性质是突出的。表 1.2 表明，压电材料特别是锆钛酸铅有比磁致伸缩材料高的机电耦合因子。高的耦合因子意味着：换能器作为发射器效率高，作为接收器灵敏度高，并且能在比较宽的频带工作。另外，锆钛酸铅有最高的机电储能密度，这意味着功率密度大，这一点通常对作为发射器的换能器是非常重要的。储能密度是能力的一种量度，它和表 1.1 中所示的可能达到的最大力有密切联系。压电陶瓷的介电损耗也比磁致伸缩材料的磁损耗小，这一点对发射器的高效率是十分有益的。

表 1.2 几种压电和压磁换能器材料的重要参数

材 料	耦 合 因 子	机电能量密度 J/m ³
锆钛酸铝	0.62	650(4 kV/cm,有效值)
钛酸钡	0.45	86(2 kV/cm,有效值)
镍	0.3	27
4%钴镍	0.4	23
镍铁氧体	0.4	17
Tb _{0.74} Dy _{0.26} Fe ₂ *	0.6	400

* 这是一种稀土磁致伸缩材料。

压电陶瓷的另一个重要优点是可以通过陶瓷的模压技术很容易把压电陶瓷做成各种形状。各种棒、板、圆盘、圆柱和球都可以直接制做出来，只要样品不是过分大。

压电陶瓷材料的第三个优点是加电场的方式很灵活。为了在所需要的方向产生电场，电极可以用各种方式加到陶瓷表面。它产生电场的方式要比磁致伸缩材料产生磁场的方式灵活得多。例如，在工作中常常利用球形换能器的无方向特性，这只要使用空心的陶瓷球壳，将电极固定在内、外表面，就可以很容易做到；用磁致伸缩材料就不容易做到。另外，电极可以加到陶瓷的上、下端面，以产生一个轴向场。

1.3.2.2 压电陶瓷的缺点

尽管水声换能器中压电陶瓷有很多优点，但是也有很多严重的缺点，这些缺点妨碍它的应用，并且在生产供基阵使用的大数量的性能要求相同的换能器时常常出现问题。其中一个缺点是陶瓷的低抗张强度所产生的固有脆性。在很多应用中，这个缺点可以克服，办法是加一定的压缩预应力，使材料在整个振动周期内都处于受压状态。然而必须看到，由于加预应力，陶瓷的性质常常发生变化。虽然较大和较重的拼合陶瓷圆环已经使用了，但是由于陶瓷的脆性，制造很大的换能器却是不实际的。

压电陶瓷的另一个缺点是它的成分或成型、烧结过程中的微小变化将引起它的机电、

电和机械性质发生显著变化。这样小的变化常常是陶瓷制作中不能控制的，而且常常导致同一批中的不同元件或者是被认为同样陶瓷的不同批的元件之间性质产生不希望的差别。压电晶体，像ADP，能够比陶瓷做得更均匀，在一致性要求很高的情况下，有时使用它。

表 1.3 表示了压电陶瓷性质变化的几种不同的类型。横行表示密度 ρ (g/cm^3)、机械 Q 值，机电耦合因子 k 和介电常数 K 的平均值，纵向分别是陶瓷厂家生产的同一型号陶瓷的数值。海军 1 型指的是军用标准中的一种不严格的规格。所有这 6 种产品在大多数情况都能满足这种规格，但是，显然这些 1 型陶瓷之间是有明显差别的，因而在某些性质方面需要更严格的规格。

表 1.3 美国海军 1 型压电陶瓷 (一种特殊类型的锆钛酸铅)
性质变化的实例

ρ	Q_m	k	K	ρ	Q_m	k	K
7.65	968	0.328	1135	7.60	1019	0.346	996
7.54	773	0.359	1301	7.59	1136	0.317	1121
7.58	738	0.327	1208	7.82	1289	2.343	1154

注：每一行给出标准尺寸的样品的平均性质，样品是由不同厂家生产的。

压电陶瓷的另一个问题是老化或者性能随时间变化的问题。这些材料的压电性，是由于加了一个大的极化场，然后去掉场，剩下剩余极化造成的。虽然在未极化的材料中也有老化效应出现，但是老化主要是涉及当材料逐渐趋于回到未极化状态时剩余极化随时间的缓慢减小。

图 1.4 表示锆钛酸铅的电容率和耦合因子的老化曲线。在极化以后每 10 倍时间介电常数减少 5% 是一个典型的数据。这个问题的不利方面可以克服，就是在极化后等 10~100 d 再测量陶瓷性质和提供使用。此后每单位时间性质的微小变化常常是允许的，然而实际的老化效应是非常复杂的，因为老化率依赖于温度、陶瓷中的应力，以及这两者的历史状况。例如图 1.4 表示了热处理对老化曲线影响的例子。

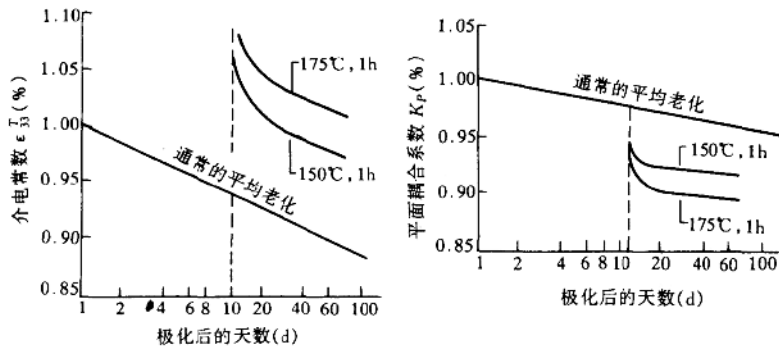


图 1.4 表示极化后 12 d 经过热处理对压电陶瓷的电容率和平面耦合系数老化影响的典型曲线

在大功率发射的条件下，压电陶瓷出现了显著的非线性特性。图 1.5 的曲线作为一

个例子,说明了当交变电场增加时,电容率和介电损耗角的正切都增加。这些效应并非不能预期,因为如前所述,压电陶瓷是一种经过极化使之在小信号下呈现线性工作的电致伸缩材料。图 1.5 表明,一种型号的陶瓷和另一种型号陶瓷之间,非线性程度差别很大,此外,经过老化的陶瓷比新极化的陶瓷非线性小。这说明非线性效应是稍许可变的,并且依赖于结构和成分的微小变化,这种变化在陶瓷制作过程中常常是不能控制的。把非线性效应当作压电陶瓷的缺点是没有理由的,因为这些效应在所有其他换能器材料或者机理中更严重;然而必须了解这些效应,以便合理地使用材料。

1.3.3 几种换能器机理的前景

虽然压电陶瓷材料的压电性是水声换能器最广泛采用的机理,但是其他机理或者材料也在进一步研究,这些研究有可能更多地导致使用其他机理或材料。在将来的一些应用中这些机理的优点可能会胜过压电陶瓷。

1.3.3.1 磁致伸缩

虽然最好的磁致伸缩材料没有压电陶瓷那样好的机电特性,但也差不多如压电材料那样能比较好地适用于水声换能器。两者的差别可能会由于正在研究新的磁致伸缩材料而发生变化。最有前途的新材料是一类包含稀土元素和铁的化合物。其中的某些化合物,像 $TbFe_2$ 显示了非常大的磁致伸缩效应。 $TbFe_2$ 饱和磁致伸缩应变比镍近似大两个数量级,这很明显是有前途的。但是还必须注意到,在 $TbFe_2$ 中产生这样大的磁致伸缩比在镍中产生饱和应变需要大得多的磁场,换句话说 $TbFe_2$ 的动态磁致伸缩特性不比镍好。其他的稀土化合物,像包含 Tb 和 Dy 的三元化合物

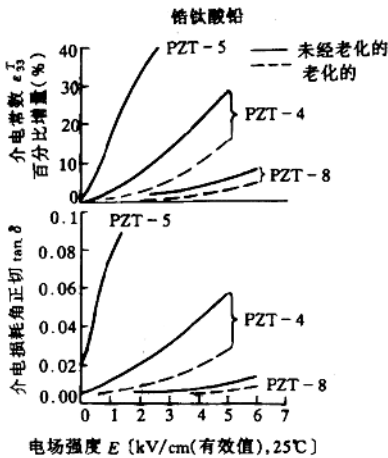


图 1.5 各种型号的锆钛酸铅压电陶瓷的电容率和介电损耗角正切的非线性特性

就是一种试图改善动态特性的例子。最近发现,有些三元化合物的机电耦合因子高于镍,和压电陶瓷差不多。为了改善稀土材料的机械强度和制造出为换能器实际应用所需要的足够大的体积和数量,还需要做进一步研究。

在实际换能器中,压电材料比磁致伸缩材料优越的一个理由是压电材料介电损耗比磁的损耗低,后者主要是涡流损耗。稀土材料有比较高的电阻率,因而比起镍来,涡流损耗小。另一方面把稀土材料制成薄叠片,做为降低涡流损耗的另一种方法,如像改善镍的特性所做的那样大概比较困难。

磁致伸缩材料与压电陶瓷相比的另一个缺点是它需要一个专用的极化电流。大多数磁致伸缩材料都不能在剩磁下使用,因为它们太容易退磁化。究竟哪一种稀土化合物能够解决这个问题还仍然不知道,但是有些在剩磁下使用是可能的。能够有效地和压电陶瓷相媲美的磁致伸缩材料应该是坚固、在剩磁下有好的动态磁致伸缩特性和低涡流损耗。

现在正研究的磁致伸缩换能器的其他改进包括使用晶粒取向镍和使用垂直磁场激发卷环换能器。不管哪种改进，都没有使磁致伸缩材料完全达到压电陶瓷的水平，但是由于另外的理由，使用磁致伸缩材料还是有一定价值的。

镍和镍的合金比压电陶瓷有突出的优越性，即它是强度很高的金属材料，可以做成低频应用的大型换能器。卷环式换能器已经做到直径达 3.96 m、重量达 6 t。另外磁致伸缩金属的合成物比压电陶瓷更容易控制。磁致伸缩卷环式的简单结构也提供了一种非常可靠的换能器。某些低频大功率应用要求大的换能器，卷环磁致伸缩换能器可能是一种最好的形式；如果要求高可靠性或者容易修理，这种形式就更适宜。

水声换能器一个特殊的环境问题是经常要求它工作在深水，承受大的流体静压力。很多换能器在这种条件下由于某种其他理由将会被压碎或者不能工作。卷环式磁伸缩换能器在这方面有它的优越性，因为它可以做成自由浸沉圆环换能器，这种换能器在任何深度性能基本均匀一致。压电的自由浸沉圆环也具有这个优点，但是比磁致伸缩换能器存在比较大的水密问题。

1.3.3.2 甚低频率的声源的选配

目前水声换能器应用最困难的方面是 100 Hz 以下的甚低频发射器。制造大尺寸和低频换能器在原则上是可能的，虽然在大多数情况下那是属于工艺方面的问题，然而由于更基本的理由，制造大尺寸的换能器是不实际的。

在低频、小面积、中等功率范围内，可能达到的最大力，已不再像通常情况下那样，可作为衡量换能器的标准了，因为介质辐射阻抗小。在这种情况下，上面提到的动圈换能器非常有用。然而动圈换能器的进一步改进，除了或许对磁铁有改进可能外没有什么希望。钐钴永磁材料（必须与磁致伸缩稀土材料区别开来）在水声换能器中可以使用，它现已在空气中的扬声器里使用。已经研究的把动圈换能器用于水下的另外一个改进是使用超导磁铁，它可以极大地增强使线圈运动的磁场，因而增加作用在线圈上的力，使这种机理更加适合于水中使用。流体声学 and 可变磁阻换能器看来也非常好地满足很多种甚低频率应用方面的要求，它们在甚低频共振时相应的结构尺寸比较小，因而制造比较容易。然而磁致伸缩和压电换能器如果在 100 Hz 共振，那么尺寸将是非常大，对任何考虑过的应用来说都是不实际的，除非使用弯曲模。

众所周知的亥姆霍兹共振器是提供解决甚低频换能器问题的另一个途径。最有前途的进展是使用加上有一个开口的空腔的普通的压电型换能器，以获得亥姆霍兹共振。例如将可以在 100~200 Hz 共振的陶瓷弯曲圆盘放在圆柱空腔一端，另一端开口，用包含顺性管的液体充满空腔，空腔的亥姆霍兹共振可以在 30~40 Hz 这样低的频率范围共振。这样的换能器在弯曲圆盘的基频处有最大的发射响应。在共振频率以下，响应从共振峰迅速下降，直到较低频的亥姆霍兹共振时它又上升。

最困难的换能器设计问题之一是用小于波长的换能器在甚低频和在深水中辐射声波。动圈换能器适合于甚低的频率，因为它本身就近似于易弯曲的结构。这种结构容易在低频发生谐振，然而这同一特性也使它变得脆弱，且对流体静压力的作用敏感。

亥姆霍兹共振器在开口处有大的位移，开口处带有使压力处处均匀的结构。它的应用深度受到用于加强空腔顺性和降低谐振频率的器件（像顺性管）的特性限制。

不受深水影响的小的低频声源的另一个可能性是使用这样一些材料，外加电场或者

磁场能引起这些材料的结构相变并伴随着体积形变。Mn、As 是属于这种材料的磁性材料，含镧 (Lanthanum) 的铈钛酸铅是具有这种性质的压电材料。这种效应将提供体积位移，这对于小的低频声源将是最佳的，然而这种效应在换能器应用中的现实性从来没有得到证实。

1.3.3.3 新型水听器的要求

在包含大量的单个水听器的大型被动声纳阵中，近来主要是改进这些水听器的特性。一个引人注目的要求是制造轻型水听器。极化的压电薄膜聚合物，像聚偏二氟乙烯 (Polyvinylidene fluoride) 在这方面具有比较大的潜力。这种柔顺材料密度小于 2 g/cm^3 ，压电常数（一个度量水听器工作的最适宜的参数）非常高。正如所有换能器的新材料所经历的那样，压电聚合物现在正处于研制适合实际应用形式的阶段。由拌和在环氧树脂中的压电陶瓷粉末所组成的所谓柔顺型陶瓷，提供了另外一种新应用的可能性，但是它的密度是水的 3~4 倍。某些新型水听器的要求甚至可能推动静电换能器的发展，或许在静电换能器使用永久极化的驻极体。

被动声纳中对水听器的最大要求是便于和障板、反射体及其他常常必须使用的抑制强噪声背景所利用的机械装置连结。为了沿着这个方向发展，就必须了解水听器在存在噪声情况下的信号接收作用，把噪声抑制机构作为水听器的一个完整部分来考虑，适当地选择水听器机构和材料。例如，比信号的相干性小得多的噪声或者比信号波长甚短的噪声可以用空间平均的办法提高信噪比。这就要求这种水听器的灵敏部件比普通水听器的灵敏部件有比较大的面积，这可以用一组水听器代替单个水听器或者使用单个大面积水听器来实现。像压电聚合物或者柔顺陶瓷之类的材料（它们都可以做成比较大的片状）很有可能在这里会起一定作用。在另外情况下，可以使用反射器和障板或者设计适当指向性水听器来抗噪声干扰。用小水听器，采用具有需要的指向性的振动结构模式或者使用相控的成对水听器构成偶极子，能够得到指向性。当必须使用障板时，一个很重要的问题是使水听器和障板能合并在一个便于安装的结构中。障板对信号的可能影响也必须估计到，因为我们的目的是提高信噪比。

1.3.4 水声换能器技术的发展思考

水声换能器的最重要的实际问题是了解和改进广泛使用的压电陶瓷材料的一些特性，像性质的可变性、性质随时间的变化、非线性等。

最有前途的研究领域涉及到研制新材料（像稀土磁致伸缩材料）、抗噪声干扰要求比较高的水听器设计的新方法、产生水下声波的新方法（像非线性参量技术）。

应用上最困难的问题是要求设计和制作尺寸甚小于波长的在甚低频工作的换能器，在很多情况下还要求换能器能承受大洋里的深水压力。

第二章 水声换能器的基础效应

2.1 磁致伸缩效应

一切铁磁材料都具有磁致伸缩效应。所谓磁致伸缩效应就是指铁磁材料放在磁场中，它的大小和形状会发生变化或者相反变化的现象。由于变化的种类和形式不同，所以，磁致伸缩效应又可分为：纵向效应、横向效应、扭转效应和体积效应等。一般在磁致伸缩水声换能器中主要是利用纵向磁致伸缩效应，所以本节的重点是介绍纵向效应，附带说明一下横向效应和扭转效应等。为了深入理解磁致伸缩现象的物理本质，我们还用磁畴概念来说明磁致伸缩效应的起因和特性。本节最后还将介绍因磁致伸缩效应而引起的铁磁材料弹性模量和磁导率等机磁特性的变化。

2.1.1 纵向磁致伸缩正效应（焦耳效应）

一根铁磁材料的棒在外磁场的激发下，沿着磁力线的方向产生伸长或收缩的相对形变的效应，叫做纵向磁致伸缩正效应。图 2.1 所示的铁磁棒，其上绕有电磁线圈，当线圈通入电流时，此棒就会沿 X 轴方向产生伸长或收缩的相对形变。因此，我们可利用具有这种效应的铁磁棒做成声波发射器。

此效应具有如下性质：

不同的铁磁材料的棒，在相同的磁场强度 H 作用下，所产生的相对形变的大小和方向是不同的。即是说，磁致伸缩性能是与材料的内部机构和性质有关的，所以也与材料的工艺处理有关。

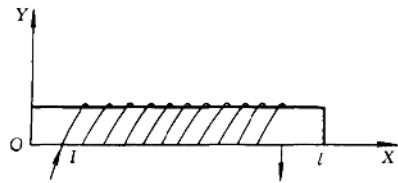


图 2.1 磁致伸缩的铁磁棒

图 2.2 为几种常见的磁致伸缩材料的相对形变与磁场强度大小的关系。由图可看出：第一，各类铁磁材料在相同的磁场作用下，所产生的相对形变的大小是不同的。如退火镍就比金属铁的磁致伸缩现象显著；第二，它们不仅形变的大小相差很大，而且形变的方向也有所不同。有的材料不论是在正向磁场还是反向磁场作用下，它的相对形变总是收缩的，即形变为负值。例如退火镍、镍锌铁淦氧等。我们称这类材料为收缩型磁致伸缩材料。另一类材料是在正向或反向磁场作用下，其形变总是伸长的，例如，铝铁合金、钴铁合金和含镍量在 80%~20% 之间的镍铁合金等。我们称这类材料为伸长型磁致伸缩材料。还有一种材料如纯铁，它在弱磁场下伸长而在强磁场中收缩；第三，同一材料因工艺处理不同会造成磁致伸缩特性有很大的差别，例如，铸钴与退火钴就有很大差别。

不论何种磁致伸缩材料，它们均有磁致伸缩饱和现象。就是说，当外加磁场强度由小逐渐增加时，开始时形变随之增加，但当磁场增至某一数值后，形变就不随之增加了，我们称此最大磁致伸缩形变为饱和磁致伸缩形变，记为 $(\frac{\Delta L}{L})_s$ ，所对应的磁场强度记为 H_s 。虽然，不同的铁磁材料所对应的 H_s 和 $(\frac{\Delta L}{L})_s$ 值是不同的，例如退火镍是在： $H_s \approx 47\ 746.5\ \text{A/m}$ 时， $(\frac{\Delta L}{L})_s \approx -36 \times 10^{-6}$ 。

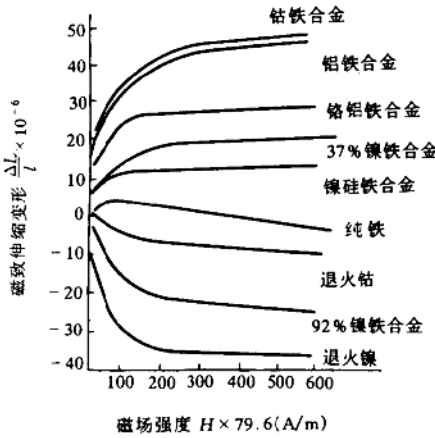


图 2.2 几种材料的静态磁致伸缩特性

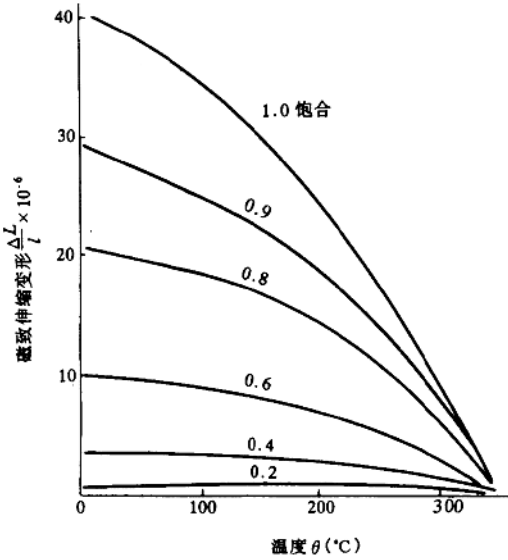


图 2.3 镍的磁致伸缩形变大小与温度的关系

各类材料的磁致伸缩形变受温度影响很显著。温度升高会使磁致伸缩性能降低，直至温度超过居里点时，它的磁致伸缩特性会完全消失。如图 2.3 所示为金属镍的磁致伸缩特性与温度的关系曲线。因此，当我们设计功率较大的磁致伸缩换能器时，必须充分注意到因热效应而引起的换能器机磁性能的变化。

各类磁致伸缩材料的磁致伸缩形变还有个极重要的特性：当外磁场的方向更换时，棒的磁致伸缩的形变方向不改变，也就是说，磁致伸缩形变 $\frac{\Delta L}{L}$ 是磁场强度的偶函数。例如，金属镍在 H 为正值时是收缩的，而当 H 变为负值时也同样是收缩的，如图 2.4 所示。

根据以上分析：我们可用如下数学式来描写此效应：

因为 $\frac{\Delta L}{L} \propto H^2$ 或 $\frac{\Delta L}{L} = C_1 B^2 + C_2 B^4 + C_3 B^6 + \dots$

所以 $\frac{\Delta L}{L} \approx x = C(B)B^2 \tag{2.1}$