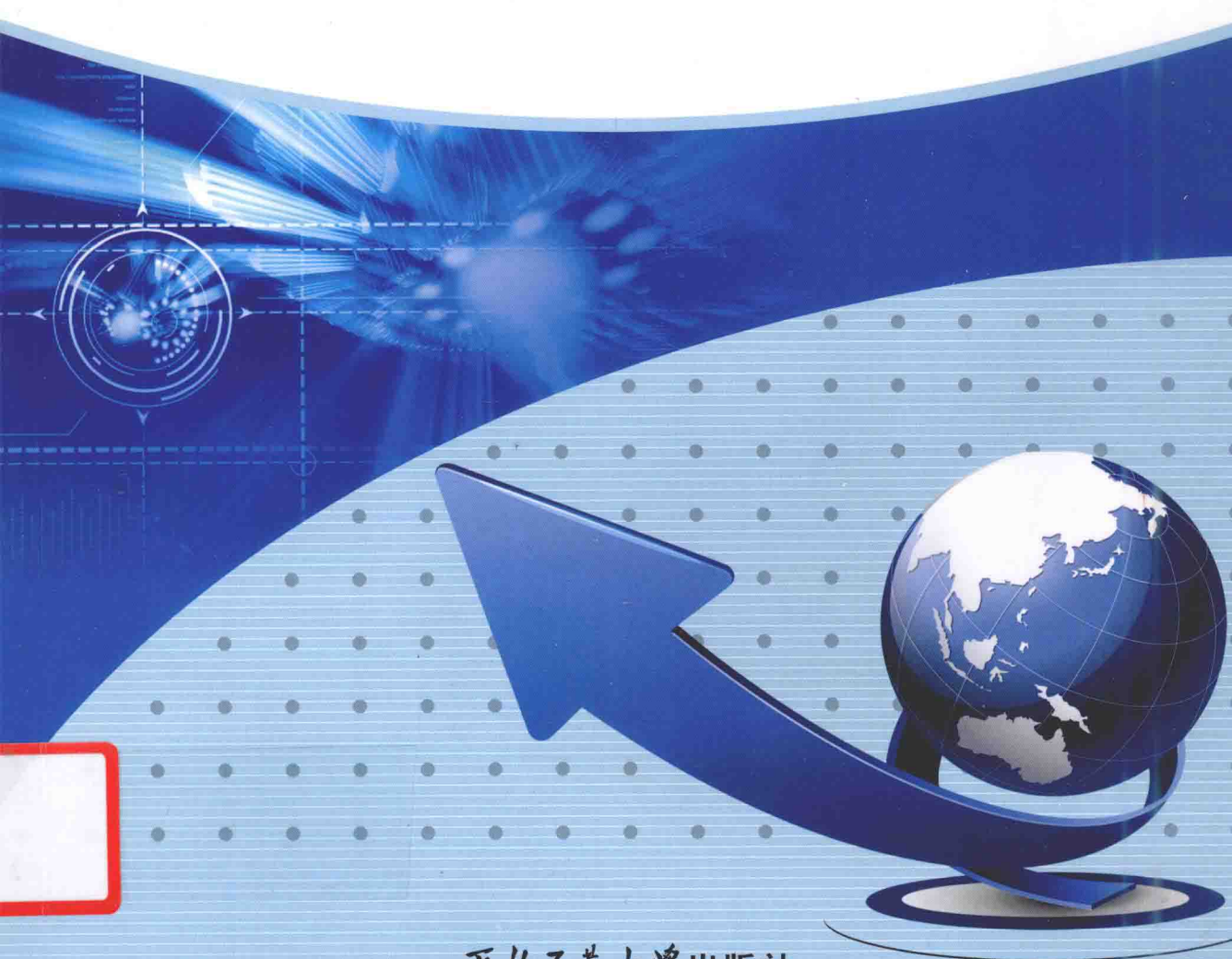




工业和信息化部“十二五”规划教材

# 水声换能器基础

滕 舵 杨 虎 李道江◎编著



西北工业大学出版社



工业和信息化部“十二五”规划教材

SHUISHENG HUANNENGQI JICHU  
**水声换能器基础**

滕 舵 杨 虎 李道江 编著



西北工业大学出版社

**【内容简介】** 本书主要讲述水声换能器的工作原理和工程应用、功能材料的相关知识、设计分析方法、不同类型水声换能器的仿真实例和基阵的基础理论以及水声测试方面的内容。

全书共分十四章。第一章为概述,介绍水声换能器的发展历史、国内外现状、发展趋势以及实际应用等;第二章讲述水声换能器和基阵的基本概念、主要性能指标等;第三章讲述水声换能器的电声转换原理;第四章讲述水声换能器的设计分析方法;第五至十二章分别讲述十种不同类型水声换能器的发展历史、工作原理、结构特点及其实际应用,并分别给出设计分析实例;第十三章介绍水声换能器基阵的基础理论;第十四章介绍水声测试的相关内容。

本书可作为高等院校相关专业的本科教材,同时对于水声换能器领域以及相关学科的研究人员和工程技术人员亦有参考价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

水声换能器基础/滕舵,杨虎,李道江编著. —西安:西北工业大学出版社,2016.4  
工业和信息化部“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-5612-4825-6

I. ①水… II. ①滕… ②杨… ③李… III. ①水声换能器—高等学校—教材  
IV. ①TB565

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 083108 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:兴平市博闻印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:15.125

字 数:364 千字

版 次:2016 年 4 月第 1 版 2016 年 4 月第 1 次印刷

定 价:38.00 元

# 前 言

水声换能器作为水下导航、定位、探测、通信等过程中发射和接收声波的核心器件,在海洋科学研究、海洋资源开发和海军武器装备制造等领域发挥着极为重要的作用。有关它的理论、技术和应用已成为水中兵器、水声工程和船舶与海洋工程等相关专业不可或缺的基础。针对水声换能器的研究可促使许多应用领域的相关技术向着更高的层次发展。因此,有必要对其相关内容进行系统的研究和学习。

由于水声换能器涉及了机、电、声、材料等不同学科的相关知识,因此,在专业学科体系中显现了很强的交叉性。编写本书的目的就是希望能尽可能全面地总结数十年来水声换能器的相关理论、技术、应用等。特别是从本科专业培养和工程技术人员培养的角度来讲,希望能够提供一本适合于初学者理解和掌握的教材。

本书是参编者在多年的本科教学体会和实际科研经验的基础上,不断充实、修订而成的。因此形成的教材侧重于基础理论,既循序渐进、浅显易懂,同时又不乏工程实例,这对本科教学是有好处的。

本书共十四章。第一章至第八章、第十一、十二章由滕舵执笔,第九章和第十章由李道江、滕舵共同执笔,第十三章和第十四章由杨虎执笔。

在本书的编写过程中,陈航教授和贺西平教授也提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示感谢。编写本书曾参阅了相关文献资料,谨向其作者深表谢意。

由于笔者水平有限,书中错误或不妥之处,敬请读者批评指正。

**编著者**

2016年2月

# 目 录

第一章 概述	1
第一节 水声换能器的发展历程	1
第二节 水声换能器的应用	13
第三节 水声换能器的学科地位	18
第二章 水声换能器的基本概念和性能参数	20
第一节 水声换能器的基本概念	20
第二节 水声换能器的分类	21
第三节 水声换能器的性能指标	26
第四节 水声换能器基阵的性能指标	36
第三章 水声换能器的电声转换原理	39
第一节 压电陶瓷及其压电效应	39
第二节 铁电弛豫体及其电致伸缩效应	50
第三节 钽铌铁稀土超磁致伸缩材料及其磁致伸缩效应	51
第四章 水声换能器的设计分析方法	55
第一节 机电等效网络法	55
第二节 压电细棒的集总参数模型	57
第三节 压电细棒的分布参数模型	60
第四节 有限元法	65
第五节 边界元法	69
第六节 关于水声换能器设计与分析的综合方法	70
第五章 压电纵振复合棒型水声换能器	72
第一节 压电纵振复合棒换能器的工作原理	72
第二节 压电纵振复合棒换能器的等效网络模型	74
第三节 压电纵振复合棒换能器分析实例	82

<b>第六章 压电圆管水声换能器</b> .....	86
第一节 压电圆管换能器的工作原理 .....	86
第二节 压电圆管能器的等效网络模型 .....	87
第三节 压电圆管换能器分析实例 .....	97
<b>第七章 溢流环水声换能器</b> .....	99
第一节 溢流环换能器的工作原理 .....	99
第二节 溢流环换能器的等效网络模型 .....	101
第三节 溢流式嵌镶圆管换能器的有限元分析实例 .....	108
<b>第八章 弯张水声换能器</b> .....	113
第一节 弯张换能器的工作原理 .....	113
第二节 弯张换能器的等效网络模型 .....	116
第三节 I类凹筒型弯张换能器分析实例 .....	119
<b>第九章 弯曲圆盘换能器</b> .....	124
第一节 弯曲圆盘换能器的工作原理 .....	124
第二节 弯曲圆盘换能器的瑞利里兹模型 .....	125
第三节 弯曲圆盘换能器分析实例 .....	140
<b>第十章 球型换能器</b> .....	141
第一节 球型换能器的工作原理 .....	141
第二节 球型换能器的等效网络模型 .....	142
第三节 球型换能器分析实例 .....	151
<b>第十一章 磁致伸缩类水声换能器</b> .....	153
第一节 磁致伸缩类水声换能器的工作原理 .....	153
第二节 超磁致伸缩水声换能器的主要结构 .....	155
第三节 纵振复合棒超磁致伸缩换能器等效网络模型 .....	159
第四节 超磁致伸缩棒抑制涡流的有效方式及其仿真实例 .....	165
<b>第十二章 其他类型水声换能器</b> .....	169
第一节 压电复合材料水声换能器 .....	169
第二节 矢量换能器 .....	172

---

---

第三节  钹式水声换能器·····	175
<b>第十三章  水声换能器基阵的基础理论·····</b>	<b>177</b>
第一节  水声换能器基阵概述·····	177
第二节  简单声基阵及其性能特点·····	183
第三节  复合式声基阵及其性能特点·····	205
<b>第十四章  水声测量基础·····</b>	<b>210</b>
第一节  水声换能器阻抗或导纳测量·····	210
第二节  水声换能器接收电压灵敏度测量·····	213
第三节  水声换能器发射响应测量·····	217
第四节  水声换能器及基阵指向性测量·····	220
<b>参考文献·····</b>	<b>222</b>

# 第一章 概述

本章主要讨论水声换能器的发展历史,国内外现状、发展趋势及其应用领域;讲述水声换能器的基本概念及其主要分类方式;介绍水声换能器及其基阵的主要性能指标。

## 第一节 水声换能器的发展历程

海洋是人类生存和可持续发展的重要领域,是影响海洋国家政治军事和经济发展的首要因素。近几十年来,随着科学技术的高度发展,人们对海洋的认识不断深化,海洋在经济上的无穷潜力和政治军事上的重要地位日益显现,各国科学家纷纷预言:21世纪是海洋世纪<sup>[1]</sup>,海洋将被大规模的开发和利用。因此发展海洋经济策略、维护海洋政治军事秩序是每个海洋大国不可回避的战略性问题。

要对海洋进行深层次的开发与利用,必须先对海洋进行必要的认识。迄今为止,利用声波作为信息载体进行海洋探测是水下信息获取的最佳方式。这是由于相对于其他的信息传递手段(如电磁波等)而言,声波是唯一能够在海水中进行远距离传播的能量形式<sup>[2]</sup>。声呐(SONAR)就是由此产生的水下声设备,它的原意为“声波导航与测距”装置(Sound Navigation And Ranging)<sup>[3]</sup>。声呐作为海洋中的“千里眼”和“顺风耳”,被广泛应用于海洋军事及各种探测,已成为现在水下信息获取的主要装备。由此可见,水声换能器是依附着水下声学而发展起来的。

早在1490年,意大利的Leonardo Da Vinci就发现声波可在水中传播。1826年,瑞士物理学家Daniel Colladon和法国数学家Charles Sturm合作在瑞士日内瓦湖进行了水中声速的第一次测量<sup>[4]</sup>,由于没有水下电声转换装置,他们就是通过测定闪光和水下钟响之间时间间隔的方式测得8℃淡水中的声速为1435 m/s(另一种说法为1438 m/s),此值与现代测量的8℃淡水声速为1439 m/s十分接近。

随后18世纪后期至19世纪前叶,电信技术推动了电学传感器(Electrical Transducer)的发展,当时通过电-机或磁-机换能器(electromechanical or magnetomechanical transducer)进行电子信号和机械信号之间的相互转换(例如探针指示等形式),尚没有涉及声能量。直到1830年,Joseph Henry通过使用可变磁阻换能器将电声换能器(electroacoustic transducer)引入到了电信技术中,实现了电信号和声信号之间的相互转换。1876年,Alexander Graham Bell进一步发明了电话。

同一时期关于电声换能器(尚没有涉及水声)进行电声能量相互转换的物理机理研究也在进行。1842年,James Joule发现了磁致伸缩效应(magnetostrictive effect)。1880年,Jacques Curie和Pierre Curie兄弟发现了压电效应(piezoelectric effect)。这两种物理效应的发现极大地推动了电声换能器技术的发展。随后各种压电材料和磁致伸缩材料被不断地发现、发明并得以应用,这些研究都为水声换能器(underwater transducer)的产生和发展奠定了理论和物质基础。



在 20 世纪初期,首次利用水声进行导航的是潜艇信号公司(后成为雷神公司的一个分部),他们是通过测量水下声音和空气中声音传播的时间间隔以及应用双耳定位法实现的(见图 1-1)<sup>[5]</sup>。但关于声呐设想的真正方案诞生于 1912 年的“泰坦尼克号”海难。海难事件告诉人们:海上航船必须安装导航和定位设备。事件发生后不久,英国人 L. F. Richardson 就提出了水下回声定位方案,即由船舶通过水下发声器向水中发射声波,接收从暗礁、冰山等目标反射回来的回波,来实现探测目标的目的。这是水声史上第一个回声定位方案,遗憾的是他本人由于当时没有合适的水声换能器,从而没有实现这一方案<sup>[6]</sup>。1914 年,加拿大人 R. A. Fessenden 完善了一种新型的动圈式换能器(moving coil transducer)(见图 1-2),并使用它探测到了近 2mi(约 3.2 km)外的冰山。在第一次世界大战中,这种类型的换能器也被美国应用在潜艇上,这应该算是水下电声换能器的首次实际应用。

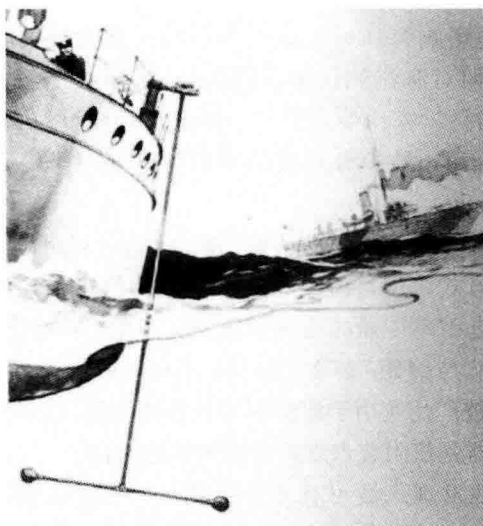


图 1-1 早期雷神公司采用双耳法  
进行水下探测和定位图

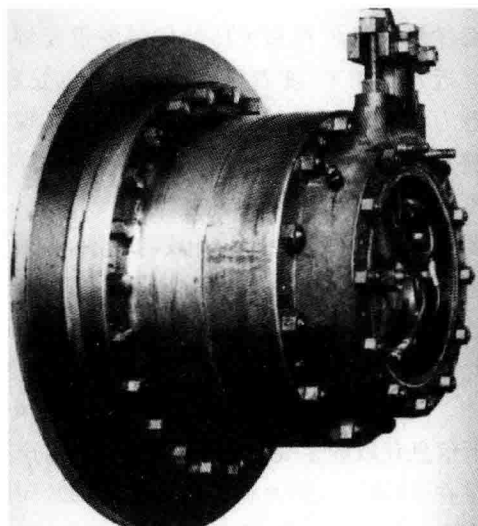


图 1-2 1914 年加拿大人 R. A. Fessenden  
完善的一种新型动圈式换能器

第一次世界大战极大地促使了军用声呐的发展,迫使人们开始对水声学以及相应的水声技术(包括水声换能器技术)进行研究。由于德国击沉了协约国大量的舰船,使其蒙受了重大的损失,这迫使协约国投入大量的人力物力开始研究如何更为有效地发现水下潜艇,其中取得的一个具有里程碑意义的标志性成果就是法国著名爱国科学家 Paul Langevin 在 1916 年成功应用石英石制作出了水声换能器,如图 1-3 所示,并首次将电子学应用于水声技术。他们成功地接收到了海底回波和 200 m 外的一块装甲板的回波,这是人类首次实现利用回声探测水下目标,这在现代声呐的发展上意义重大<sup>[6]</sup>。1918 年,Langevin 探测到了 1 500 m 远的潜艇回波。由此 Langevin 发现了压电效应真正的实际应用价值,而他所采用的夹心式换能器至今仍被采用。他的工作也表明了只有在水声换能器问世和相关电子技术发展的基础上,水声技术才有可能迅速发展和广泛应用。近代声呐技术的发展也有力地证明了这点。

Langevin 的成功极大地促进了回声定位技术在潜艇上的应用。当时英国开始研制一种称为 ASDIC 的潜艇探测器(ASDIC 是声呐的早期叫法,后来美国人称其为 SONAR,英国人接受了这种叫法并沿用至今),相关的水声换能器技术也伴随着得以快速的发展。在第二次世界

大战和冷战期间,各海洋大国对功能材料以及换能器的原理、结构、设计、制作和测试方法等进行了极为广泛的研究,取得了极为丰富的研究成果,使得水声换能器技术得以大踏步地前进。同时由于电子技术和信息科学的突飞猛进,也促进了水声技术的进一步发展。



图 1-3 法国科学家 Paul Langevin 及其发明的石英换能器  
(British Patent 145,691, July 28, 1921)

## 一、电声转换功能材料

功能材料是换能器进行能量转换最为重要的核心部件,可以毫不夸张地说,材料研究是换能器研究的先导。换能器的工作机理取决于功能材料的工作特性,因此功能材料是决定换能器研制、应用和发展的关键因素<sup>[7]</sup>。这里介绍两种应用较为广泛的功能材料,一是压电铁电材料,主要是指压电陶瓷,当然还包括压电单晶、压电高聚物、压电复合材料、弛豫铁电单晶等<sup>[8]</sup>;二是磁致伸缩材料,主要指近年来快速发展的稀土超磁致伸缩材料,即铽镝铁合金<sup>[9]</sup>。

### 1. 压电铁电材料

从 1880 年居里兄弟发现石英具有压电性至今,压电材料的发展可归纳为 4 个阶段,即单晶石英(single-crystal quartz)、单晶罗息盐(single-crystal rochelle salt)、钛酸钡陶瓷(BT)和锆钛酸铅陶瓷(PZT)。第一次世界大战期间,Langevin 应用石英晶体制成水声换能器,从此压电晶体及其应用的研究才开始取得重大发展。1919 年,第一个罗息盐电声器件问世。在随后的 20 年里,人们对热释电晶体(pyroelectric)和铁电晶体(ferroelectric)进行了研究,直到 1943 年钛酸钡陶瓷的发现,标志着压电陶瓷从单晶发展到多晶新领域<sup>[10]</sup>。1954 年,B. Jaffe 颁布了锆钛酸铅二元系压电陶瓷,它具有优良的压电性能,从此翻开了压电陶瓷应用新的一页<sup>[11]</sup>。随后 1965 年,日本研制成功了含铈镁酸铅的三元系压电陶瓷,此后各种性能优良的单元系、二元系、三元系、四元系压电陶瓷以及非铅陶瓷、压电半导体陶瓷、铁电热释电陶瓷不断问世,大大促进了压电陶瓷的广泛应用。20 世纪 70 年代国际上开始研究弛豫铁电单晶材料,1997 年其研究取得了突破性进展,成功生长出了接近实用尺寸的新型弛豫铁电单晶——铈镁酸铅-钛酸铅(PMNT)和铈锌酸铅-钛酸铅(PZNT),如图 1-4 所示。该材料的压电系数为传统 PZT 的 3~6 倍。现在压电陶瓷品种繁多,尤以 PZT 系列应用最为广泛,其主要特点是具有

优异的机电性能,构形灵活,极化方向可控等,但其密度较大,特性阻抗很高,与水介质的声匹配效果不佳。目前我国已出版了多个关于压电陶瓷行业的命名<sup>[12]</sup>及测试标准,产品性能达到国际水平<sup>[13]</sup>。

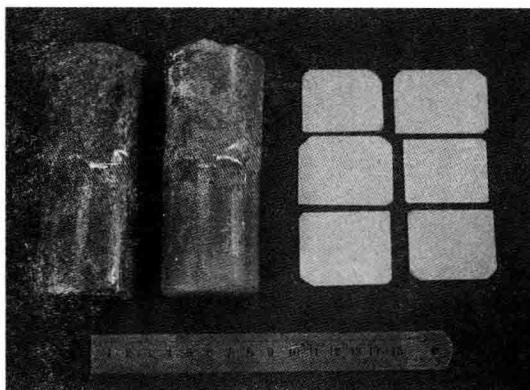


图 1-4 电致伸缩换能器所用的弛豫铁电单晶材料(上海硅酸盐研究所生产的 PMNT)

另一方面,从 20 世纪 40 年代中期开始,人们发现生物有机体组织具有一定的压电性,至 1969 年 H. Kawai 发现聚偏二氟乙烯薄膜(PVDF)经极化处理后具有较强的压电性能,自此有机压电材料及其应用开始迅速发展<sup>[14]</sup>。这种压电高聚物的特点是密度小( $2 \text{ g/cm}^3$ ),声阻抗与水相近,灵敏度较高,制作成本低,但极化困难,适用于水听器材料,不宜制作发射器。

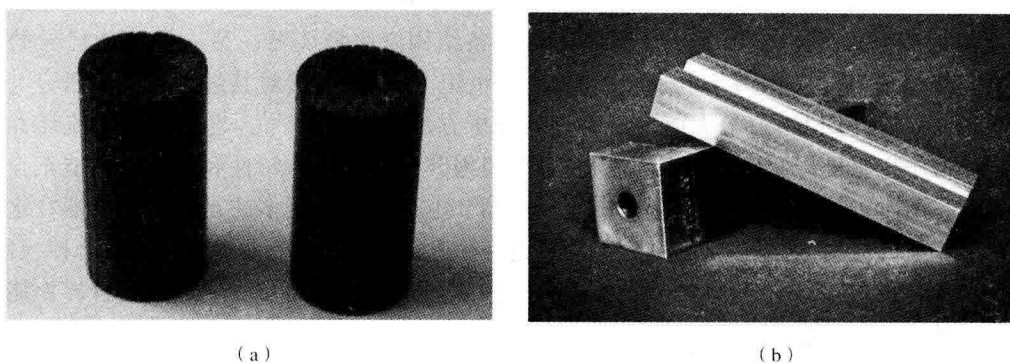
为了综合压电陶瓷和压电高聚物的优点,1978 年美国的 R. E. Newnham 等人提出应用 PZT 与聚合物进行复合的构想,从此压电复合材料 PCM (Piezoelectric Composites Material) 得以发展,并取得显著成果<sup>[15]</sup>。与压电陶瓷相比,压电复合材料改善了压电陶瓷的物理性能和机电参数,已在相关领域取得了好的应用效果。

## 2. 磁致伸缩材料

磁致伸缩的研究开始于 1842 年焦耳发现焦耳效应(Jules Effect)。到 20 世纪 40 年代,人们发现铁、钴、镍、铝等合金具有较大的磁致伸缩系数<sup>[16]</sup>,进入 60 年代又发现了铁氧体材料,这些都称为传统的磁致伸缩材料,它们在换能器的应用上都存在一定的局限性。

20 世纪 70 年代初期,美国水面武器中心的 Clark 博士发现  $\text{RFe}_2$  型二元稀土-铁化合物在常温下有很大的磁致伸缩系数<sup>[17]</sup>,20 世纪 80 年代进一步发展成了三元稀土铁化合物,典型材料为  $\text{Tb}_x\text{Dy}_{1-x}\text{Fe}_{2-y}$ ,由于它能获得更大的磁致伸缩系数,故被称为超磁致伸缩材料 GMM (Giant Magnetostrictive Material)(见图 1-5(a),并出现了牌号为 Terfenol-D(成分为  $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.93}$ )的商品化产品<sup>[18]</sup>。这种材料的性能更加稳定,与传统材料相比其主要特点是可承受压力高达  $200\sim 700 \text{ MPa}$ ,为深海工作提供可能;磁致伸缩应变大(比通常的镍大  $40\sim 50$  倍,较 PZT 材料大  $5\sim 8$  倍),故在低频下可使换能器获得很高的体积速度和声源级;能量密度高(比镍大  $400\sim 500$  倍,较 PZT 材料大  $10\sim 14$  倍),有利于大功率发射;声速低(比镍小 3 倍,约为 PZT 的一半),有利于换能器的小型化设计;高的机电转换效率,比 PZT 高  $6\sim 30$  倍;还有频带宽、激励电压低、响应速度快、居里温度高、可靠性好等优点<sup>[19-20]</sup>。可见这种材料十分适合于低频大功率换能器的研制<sup>[21]</sup>。超磁致伸缩材料的广泛研究引起了各国政府的高度重视。目前能够批量生产超磁致伸缩材料及产品的公司有 50 多家,如美国边缘技术公司、美国

埃特利玛公司、瑞典菲罗迪公司、英国稀土制品有限公司、日本的东芝公司等。我国目前至少有 6 家可批量生产该种材料的科研院所和企业。



(a)

(b)

图 1-5 磁致伸缩换能器所用的磁致伸缩材料

(a) 超磁致伸缩材料 Terfenol-D; (b) 大磁致伸缩材料 Galfenol

1998 年,另一种大磁致伸缩材料(large magnetostrictive material)在美国海军水面战斗中心(Naval Surface Warfare Center, NSWC)研制成功,这就是 Galfenol<sup>[22]</sup>,如图 1-5(b)所示。虽然它的磁致伸缩量仅为 Terfenol-D 的 1/3~1/4,但它仍然具有很大的开发潜力和应用价值<sup>[23]</sup>。

## 二、水声换能器结构

若从 Langevin 实现夹心式的石英换能器开始算起,换能器技术已经过了近百年的发展,已然形成了今天结构形式丰富、性能特点各异、应用需求广泛的换能器领域的新局面。水声换能器的结构往往是根据不同的物理效应和换能机理,按照应用需求和性能特点的不同发明或完善的。从 Bell 发明电话开始,这一应用就促进了人们对电声换能器(这里具体是指话筒和扬声器)的研究,先后涌现了许多划时代的发明,例如动圈式(moving coil)、静电式(electrostatic)、可变磁阻式(variable reluctance)换能器等,当然这个时期尚没有涉及水声领域。尽管基于上述原理和结构的换能器后来也被扩展到水声领域,但由于自身的种种限制,最终没有形成水声换能器的主导。直到压电陶瓷和磁致伸缩等功能材料被广泛应用以后,新式的水声换能器及其不同的结构才广泛发展起来,主要有电致伸缩式(electrostrictive)、磁致伸缩式(magnetostrictive)和压电式(piezoelectric)。20 世纪 30 年代人们在压电双晶片器件中首次发现了可利用的弯曲模态,并伴随着压电陶瓷材料的发展,先后对圆盘式弯曲条换能器(flexural bar transducer)<sup>[24]</sup>、弯曲圆盘换能器(flexural disk transducer)<sup>[25]</sup>(见图 1-6)、开槽圆筒弯曲换能器(flexural slotted cylinder transducer)<sup>[26]</sup>等进行了广泛的研究,因其具有良好的低



图 1-6 弯曲圆盘换能器实物

频、小型化优势,所以人们的研究热度一直持续到 70 年代才转移到弯张换能器上来。弯张换能器作为一种强功率低频发声器,直到今天仍获得广泛应用<sup>①</sup>,发展至今至少存在 7 种类型<sup>[28]</sup>。几十年来人们对弯张换能器结构改进的研究从未间断,也从另一方面说明了弯张换能器顽强的生命力。图 1-7 所示为 I 类凹筒型板条结构弯张换能器。另一种性能优异的低频发声器当属溢流环。美国海军电子实验室于 20 世纪 50 年代开始对其进行全面的研究<sup>[29]</sup>,D. H. Robey, G. W. McMahon 等人奠定了溢流环分析方法的基础<sup>[30-31]</sup>。发展至今溢流环并没有表现出类似于弯张换能器那样丰富的改型结构,但因其优良的深水特性和大功率性能至今仍被广泛应用。图 1-8 所示为溢流式嵌镶圆管换能器。上述换能器更多的是作为发声器在水下领域获得了广泛的应用,这里不得不提一种应用更为普遍的高性能换能器类型——复合棒换能器,如图 1-9 所示。其因具有良好的收发共用特性和阵列排放特性而备受欢迎。复合棒换能器产生的是一种类似于活塞式的振动,因此也有人称其为活塞式换能器(piston transducer)。类似结构的换能器还有 Tonpilz 型换能器<sup>[32]</sup>(见图 1-10)、Hybrid 换能器<sup>[33]</sup>(见图 1-11)、Sandwich 换能器(Langevin 换能器就是利用的这种结构)<sup>[34]</sup>等,这些结构的换能器从一开始就获得了人们的关注并对其进行研究。在 20 世纪 70—80 年代美国水面武器中心又发明了超磁致伸缩材料,并开发了牌号为 Terfenol-D 的商品化产品,后又开发出了基于超磁致伸缩材料的复合棒式换能器<sup>[35-36]</sup>,图 1-12 所示为超磁致伸缩复合棒换能器。复合棒是换能器是目前应用最为广泛的一类换能器,在后面章节将详细介绍其原理、结构、性能及应用。还有一种可作为小功率发声器和水听器用的新式换能器称为钹式换能器(cymbal transducer),如图 1-13 所示。钹式换能器在 20 世纪 80 年代后期由美国宾夕法尼亚州立大学材料研究室在第 V 类弯张换能器的基础上开发出来<sup>[37]</sup>,它具有结构灵巧、轻质小型的特点,后来由 Newnham 及其同事将其引入到了水声领域<sup>[38]</sup>。在水下声波接收换能器上,获得普遍应用的有圆管式换能器(Cylindrical Tube Transducer)(见图 1-14)和球形换能器(Spherical Transducer)(见图 1-15),另外还有始于 20 世纪 40 年代美国开始研制的矢量水听器(Vector Hydrophone)、始于 20 世纪 60 年代的压电薄膜水听器(PVDF Piezo-film Hydrophone)和始于 20 世纪 70 年代末美国海军实验室开始研制的光纤水听器(Fiber Optic Hydrophone)<sup>[39-40]</sup>等,如图 1-16 和图 1-17 所示,这些水听器也获得了成功的应用。

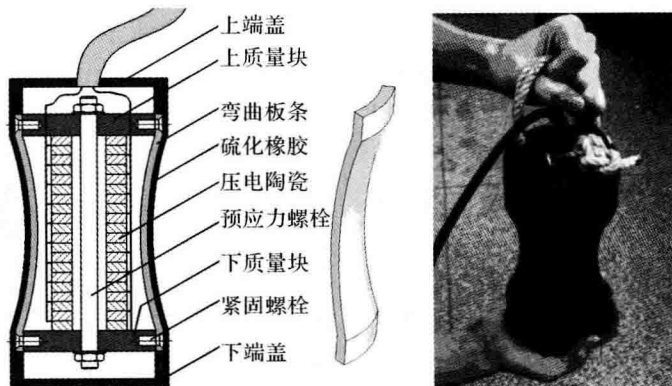


图 1-7 I 类凹筒型板条结构弯张换能器结构示意图及实物

<sup>①</sup>现在的文献普遍认为是 William J. Toulis 于 20 世纪 50 年代后期发明了弯张电声换能器。<sup>[27]</sup>



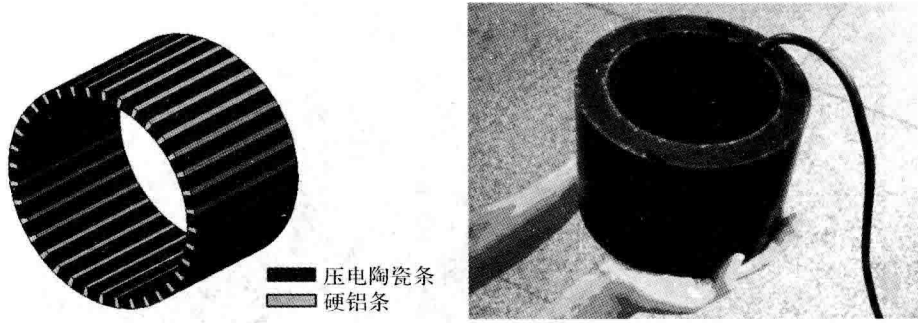


图 1-8 溢流式镶嵌圆管换能器结构示意图及其实物

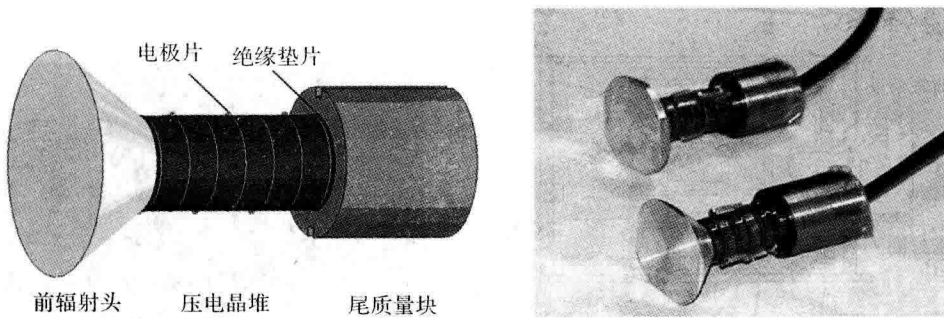


图 1-9 压电纵振复合棒换能器结构示意图及其实物

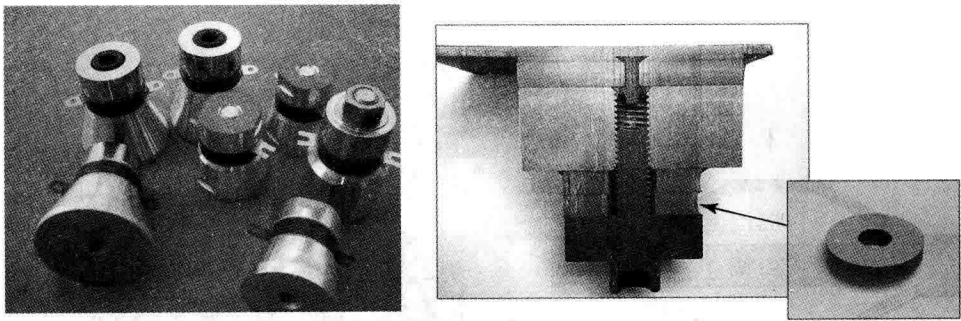


图 1-10 Tonpitz 型换能器

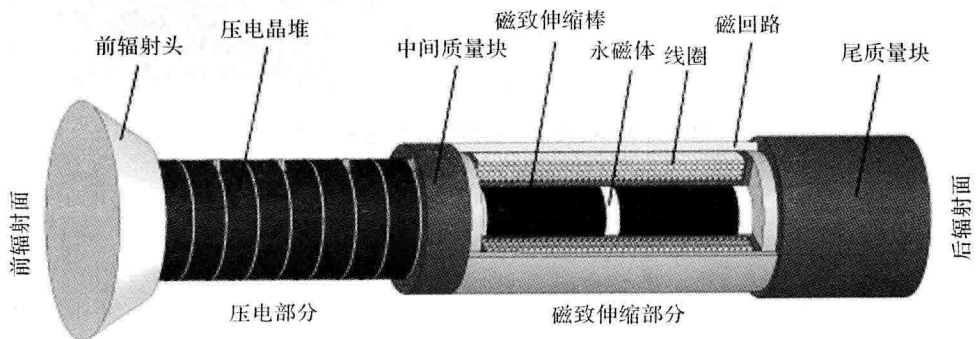
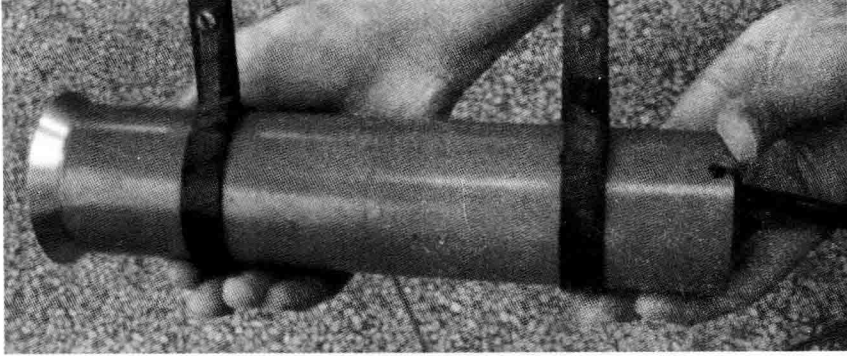


图 1-11 Hybrid 换能器结构示意图及其实物图



续图 1-11 Hybrid 换能器结构示意图及其实物图

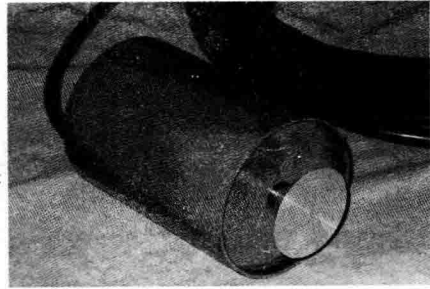
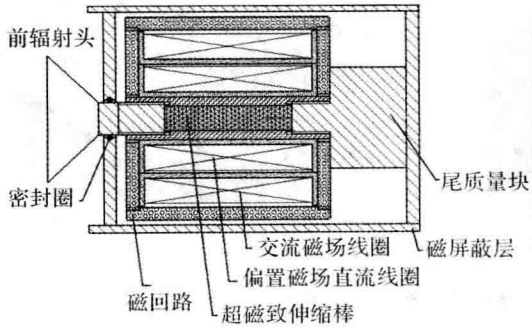


图 1-12 超磁致伸缩复合棒换能器结构示意图及其实物

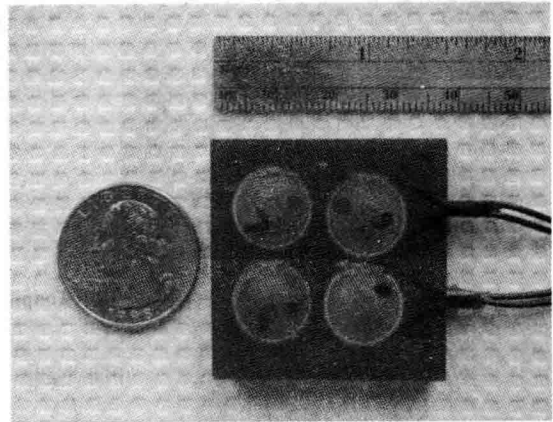
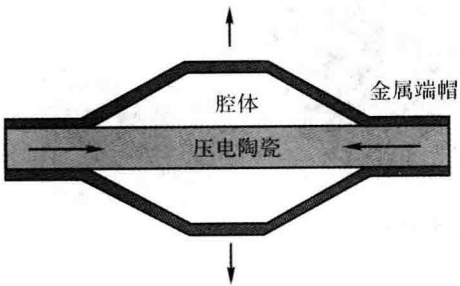


图 1-13 钹式换能器结构示意图及其实物

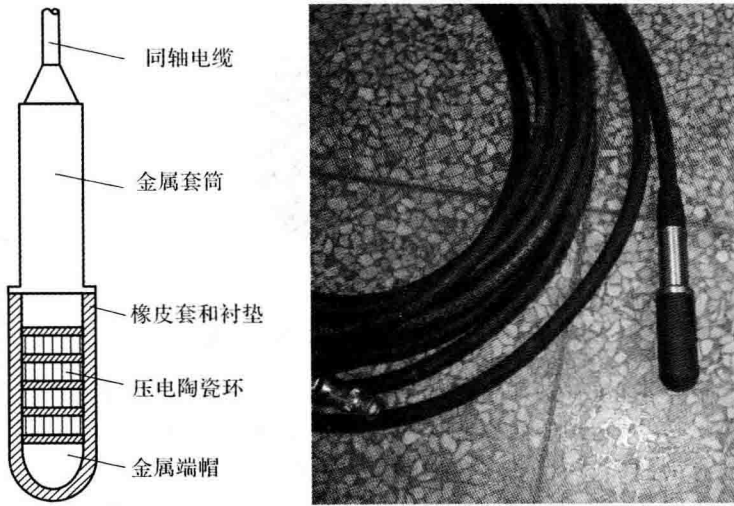


图 1-14 压电圆管式水听器结构示意图及其 B&K8104 标准水听器



图 1-15 球形换能器实物

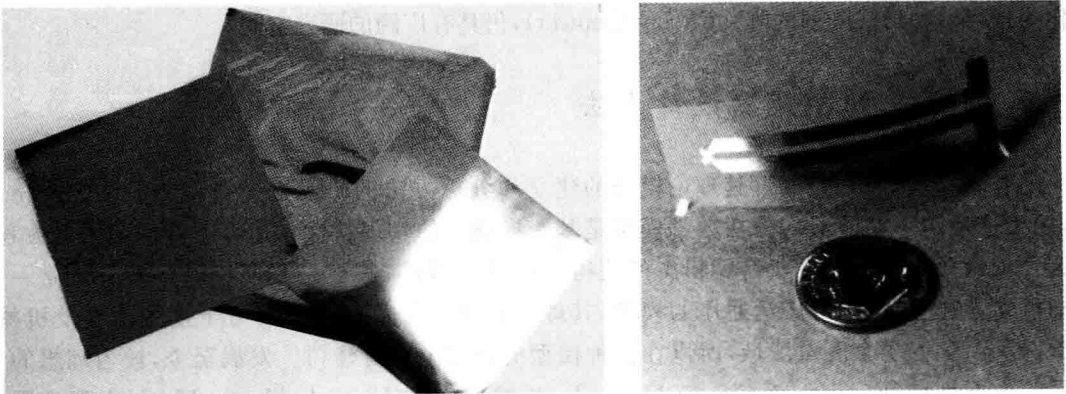


图 1-16 PVDF 压电薄膜材料及其换能器实物图



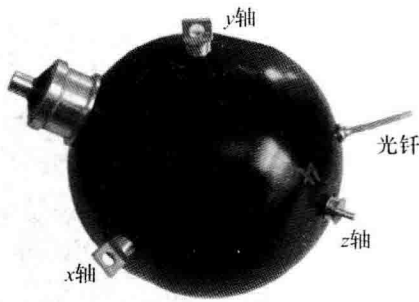


图 1-17 光纤矢量水听器实物图

总的来说近一百年来,结合功能材料的不断发展,上述结构的换能器都曾先后成为不同时期的研究重点和热点,针对它们的研究和应用为水声学科发展提供了强有力的手段,为水下装备的发展提供了强有力的保障,目前上述换能器仍被广泛研究并不断改进。

另一方面不得不提的是换能器阵列(Transducer Array)技术的发展。换能器阵列的理论与技术与换能器技术几乎是同时发生、并列发展的。第二次世界大战之后,特别是在导弹核动力潜艇出现以后,为了适应近代海战的需要,对声呐性能的要求也大大提高,要求声呐获得更远的探测距离、更高的搜索率和更精的定向准确度。早期的探照灯式声呐已不能满足这种要求<sup>[41]</sup>。于是近代声呐往往是由许多高效率、高灵敏度和一致性较好的换能器构成的大型声基阵(几百到几千个)。伴随着电子技术、雷达技术和信号处理技术的发展和计算机的应用,换能器已从单纯能量形式的转换发展成为电声信号时空处理系统一部分的声基阵系统。通过阵列形成一定的空间指向性以获得空间增益,可使设备在干扰背景下提取所需的信息,从而完成在复杂环境下的探测任务。应用较为广泛的换能器阵列形式有线列阵、平面阵、圆柱阵、球壳阵、弧形、体积阵阵等。结合快速发展的数字技术和信息处理技术,又出现了一些新型阵列形式:参量阵(Parametric Array)、乘积阵(Multiplicative Array)、合成孔径阵(Synthese Aperture Array)、恒定束宽阵(Constant Beamwidth Array)、舷侧阵(Flank Array)、共形阵(Conformal Array)、相控阵(Phased Array)、自适应阵(Adaptive Array)、声矢量换能器阵(Acoustic Vector Transducer Array)、拖曳线列阵(Towed Line Array)、聚焦阵(Focusing Array)等。目前关于换能器阵列的研究不再是简单的阵列几何形式的排布,研究重心更多的是在于阵列信号与信息处理方面,当然换能器作为任何一种形式阵列的阵元(Array Element),仍具有广阔的研究空间。

### 三、发展中的换能器设计方法

随着水声换能器的发展,其理论模型的建立和分析方法的研究也一直备受关注。严格来讲,用于描述水声换能器的确切数学模型是基于换能器的物理特性和边界条件的偏微分方程,但这种偏微分方程的获取及其解析解的获得无疑是困难的,甚至是不可行的。于是建立一个准确可靠、快速易解且可广泛通用的模型,其理论意义十分重要。然而由于换能器涉及机械、电子以及声学等多个能量区域,所以在这种模型的构建上难有建树。发展至今,较为理想的无外乎等效网络法(Equivalent Circuit Method)、传输矩阵法(Cascade Matrix Method)和有限元法(Finite Element Method)。