

稀土超磁致伸缩换能器

贺西平 著

陕西师范大学出版基金资助出版

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是一本介绍稀土超磁致伸缩大功率换能器的设计理论和设计方法的专著。全书共分9章。第1章是绪论,主要介绍了常用的换能器材料、现代弯张换能器的设计方法及各型弯张换能器的特点;第2章分析了稀土超磁致伸缩材料的工作特性,导出了使稀土棒高效工作时沿棒轴径向均匀切割最小份数的计算公式和等效电路;第3~9章,论述了稀土超磁致伸缩大功率换能器的设计理论,并对研制出的VII和Tonpilz型换能器的性能作了测试和分析。书中先后用到了ALGOR、SYSNOISE和ANSYS这三种有限元计算软件,在相关部分都相应作了简单介绍,并在第9章中重点介绍了ANSYS在设计换能器中的应用。

本书可供从事声换能器研究工作的科技工作者、专业技术人员以及大专院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

稀土超磁致伸缩换能器/贺西平著.—北京:科学出版社,2006

ISBN 7-03-017413-5

I. 稀… II. 贺… III. 磁致伸缩换能器 IV. TN712

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第061744号

责任编辑:胡 凯/责任校对:钟 洋
责任印制:安春生/封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

http://www.sciencep.com

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年12月第一版 开本:B5(720×1000)

2006年12月第一次印刷 印张:8 3/4

印数:1—2 500 字数:157 000

定价:32.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

近几十年来,随着科学技术的高速发展,人类对覆盖地球总面积 71% 的海洋的认识逐渐深化,海洋因其经济上的无穷潜力和战略上的重要地位,越来越被人们所重视。

影片《泰坦尼克号》吸引全世界观众的原因之一就是扑朔迷离的沉船原因、神秘的海底世界……美国加州海洋研究中心的罗伯逊说,深海发现给人类带来的利益要比那些耗资庞大的太空计划实惠得多。

可以预言,21 世纪将是海洋的世纪。

海水是一种导电介质,因而电磁波在海水中的传播受到严重限制。光波本质上属于高频率的电磁波,被海水吸收损失的能量更为严重。因此,这两者在海水中都不能有效地传递信息。在海水中,声波的传播性能最佳。正因为这样,声呐技术不仅在反潜作战中享有重要的地位,而且要深入地认识海洋、开发海洋也必须借助于声呐技术。水声换能器(或基阵)是声呐的一个重要组成部分。

现代声呐技术对发射水声换能器提出的要求是:低频、大功率、高效率,并能在深海中工作等。根据水声物理的研究,人们发现用低频声波来传递信号,对于远距离目标和噪声源的定位和检测有着明显的优越性:因为低频声波在海水中传播时,被海水吸收的数值较高频声波要低,故衰减小,能比高频声波传播更远的距离,这对增大探测距离是有益的;且各型舰艇的噪声级,其低频范围内的量级远比高频范围内要高,这对用接收换能器进行检测是有利的。为了防止声波在海水中过早地产生空化效应,将换能器或基阵置于大深度上,还能使换能器发射出更大的功率。在较大的水深位置工作时,还能更有效地利用“声道效应”,以达到增大探测距离的目的。

磁致伸缩换能器是最早被采用的声学换能器类型之一,后来压电材料的发现,尤其是 PZT 材料的广泛应用,磁致伸缩材料几乎被取代。因为功率要求不大时,压电换能器具有结构工艺简单、性能稳定及成本低廉等优点。

随着现代声呐技术的发展和声学应用范围的不断扩大,研究新型换能器材料及新型水声换能器或基阵显得尤为重要,这也已经受到专家学者们的高度重视。20 世纪 70 年代初期发现的稀土超磁致伸缩材料,由于其卓越的性能以及在远程声呐和其他低频水声系统中的适用性,引起了高技术领域内的广泛重视。现在,稀土超磁致换能器研究已经成为换能器领域内的热点研究方向之一。

本书研究的是低频大功率稀土超磁致换能器的设计理论和方法。书中具体研究了 Tonpilz 换能器、Ⅶ型弯张换能器,在第 9 章中给出了一个超声频稀土超磁致换能器的设计计算实例。

全书共分 9 章:

第 1 章:介绍了各种常用换能器材料,尤其是稀土超磁致伸缩材料的性能,论述了发展中的现代弯张换能器的设计方法,简单分析了各型弯张换能器的特点,并说明了Ⅶ型大功率弯张换能器很适合于深水处工作。

第 2 章:分析了 Terfenol 棒的工作特性。确定有源材料的工作点为使稀土棒能高效工作,探讨并导出了在给定的工作频率下沿棒轴径向均匀切割最小份数的计算公式;为能定性描述组成 Terfenol 棒以外的外部磁路材料对等效电路(或换能器)的影响,并方便换能器的设计,导出了 Terfenol 棒工作的等效电路。

第 3 章:对传统的等效电路、传输矩阵、有限元的设计方法(包括考虑预应力螺栓)从理论上做出归纳、总结,并用具体的设计结果,对这几种设计方法作比较分析,发展并形成了一套计算机辅助 Tonpilz 换能器设计的实用软件。

第 4 章:分析了磁致伸缩换能器各组件中有限单元的能量关系,导出磁致伸缩换能器有限元设计的动力学方程及计算换能器性能参数的表达式。

第 5 章:对 Tonpilz 换能器进行了设计,并利用 SUPER ALGOR 有限元软件计算了这种换能器的振动模态。

第 6 章:建立了换能器流固耦合有限元动力学方程,以及辐射声场的计算理论。

第 7 章:利用 SUPER ALGOR 有限元软件计算Ⅶ型弯张换能器的振动模态以及换能器的尺寸与呼吸模态频率之间的变化关系;计算了弯张壳体装配位移与作用在壳体上的拉伸应力之间的关系曲线;结合 Terfenol 棒材料的工作特性,从理论上计算了弯张换能器在不同水深处,与其对应的工作的偏磁场之间的关系;利用 SYSNOISE 大型声学工作站计算了弯张换能器的辐射声场。

第 8 章:对研制出的Ⅶ型换能器,进行了全面的声学性能方面的实验测试研究。

第 9 章:简单介绍了 ANSYS 有限元软件用于设计、分析换能器的压电耦合功能,并在压电-压磁比拟法的基础上,用 ANSYS 软件对超声频稀土换能器的设计作了探讨和研究。

在从事本书科研的过程中,在国内最先容易接触到的有限元软件是 ALGOR,接下来是 SYSNOISE,最后为 ANSYS。作者先后都用到了这 3 种计算软件。因此,书中对与这 3 种软件结合的研究内容都作了简要的介绍。

借此机会,对西北工业大学航海学院的孙进才教授、李斌教授、张允孟教授,还有给予作者极大帮助的中国科学院声学研究所的莫喜平研究员,表示最诚挚的谢意!

由于水平有限,书中缺点与错误在所难免,恳请专家和读者批评指正。

贺西平

2005年12月

目 录

第 1 章 绪论	1
§ 1.1 常用的换能器材料	1
1.1.1 压电材料	1
1.1.2 压电高聚物	3
1.1.3 复合材料	3
1.1.4 磁致伸缩材料	4
1.1.5 金属玻璃材料	4
§ 1.2 稀土超磁致伸缩材料及其应用	5
1.2.1 稀土超磁致伸缩材料	5
1.2.2 在水声学上的应用	7
1.2.3 在微控制领域中的应用	12
1.2.4 电声学上的应用	13
1.2.5 在声发射技术领域的应用	14
1.2.6 大功率超声频换能器	14
§ 1.3 弯张换能器的发展简史及其特点	15
1.3.1 弯张换能器的早中期发展	15
1.3.2 各型弯张换能器的特点	16
1.3.3 IV型和VII型弯张换能器的特点比较	17
§ 1.4 发展中的换能器设计方法	18
1.4.1 解析解法	18
1.4.2 波动力学法和等效电路法	18
1.4.3 有限元法	19
1.4.4 边界元法	21
1.4.5 有限元和边界元法对比	22
第 2 章 稀土超磁致伸缩棒的工作特性	24
§ 2.1 稀土超磁致伸缩棒的特性	24
2.1.1 不同压力下稀土棒的磁致伸缩特性	24
2.1.2 不同压力下的 d_{33} 与偏磁场之间的关系	26
2.1.3 材料的杨氏模量	27
2.1.4 材料的其他参数	27

§ 2.2	稀土超磁致伸缩棒的高效应用方法	28
2.2.1	计算方法	29
2.2.2	算例	30
§ 2.3	稀土超磁致伸缩棒的等效电路	31
2.3.1	Terfenol 棒的等效电路	31
2.3.2	算例	34
第 3 章	Tonpilz 换能器的设计理论	36
§ 3.1	集中参数设计法	36
§ 3.2	传输矩阵设计法	39
3.2.1	基本原理	39
3.2.2	考虑预应力螺栓的影响	41
3.2.3	程序实现	43
§ 3.3	谐振频率附近处的等效电路	44
第 4 章	稀土超磁致伸缩换能器的有限元设计理论	46
§ 4.1	稀土超磁致伸缩棒的有限元模型及设计理论	47
4.1.1	单元插值函数	48
4.1.2	应变	49
4.1.3	单元中的能量关系	49
4.1.4	动态方程	52
§ 4.2	壳体的有限元模型	53
4.2.1	平面矩形单元的刚度矩阵	54
4.2.2	平板矩形弯曲单元的刚度矩阵	55
4.2.3	矩形薄壳单元的刚度矩阵	56
§ 4.3	弯张换能器中块体的有限元模型	58
§ 4.4	弯张换能器的性能参数	59
4.4.1	共振频率	60
4.4.2	反共振频率	60
4.4.3	电阻抗	61
4.4.4	有效机电耦合系数 k_e	61
第 5 章	Tonpilz 换能器的设计及实验研究	63
§ 5.1	Tonpilz 换能器的设计	63
§ 5.2	Tonpilz 换能器中 Terfenol 棒的分割	63
§ 5.3	Tonpilz 换能器偏磁场及预应力的施加	64
§ 5.4	有限元法分析 Tonpilz 换能器的振动模态	65
§ 5.5	Tonpilz 换能器性能测试	65

5.5.1	换能器的性能测试	65
5.5.2	设计结果与测试误差分析	67
第 6 章	换能器的流固耦合方程及其辐射声场的计算	68
§ 6.1	流固耦合有限元动力学方程的建立	68
6.1.1	亥姆霍兹积分方程的应用	69
6.1.2	换能器在水中振动方程的建立	70
§ 6.2	辐射声场指向性的计算	71
第 7 章	弯张换能器的设计理论	74
§ 7.1	ALGOR 有限元软件简介	74
§ 7.2	弯张壳体的振动模态	75
7.2.1	呼吸模态	75
7.2.2	呼吸模态与弯张壳体的几何尺寸之间的变化关系	76
§ 7.3	换能器的振动模态	76
7.3.1	呼吸模态	77
7.3.2	弯张换能器尺寸与同相振动谐振频率的关系	78
§ 7.4	换能器装配预应力的计算	80
§ 7.5	换能器入水深度与偏磁场之间的关系	82
7.5.1	入水深度与变化的预应力之间的关系	82
7.5.2	入水深度与偏磁场的关系	83
§ 7.6	换能器的静态电感	84
§ 7.7	SYSNOISE 有限元软件简介	85
7.7.1	SYSNOISE 的功能	85
7.7.2	SYSNOISE 的分析方法	85
7.7.3	SYSNOISE 一般分析步骤	86
7.7.4	SYSNOISE 的后处理	86
§ 7.8	换能器的水下振动及其辐射特性	87
7.8.1	呼吸模态频率	87
7.8.2	换能器声辐射特性	87
§ 7.9	换能器的功率极限	88
7.9.1	电功率极限	89
7.9.2	机械功率极限	90
7.9.3	热功率极限	90
第 8 章	弯张换能器的实验研究	92
§ 8.1	弯张壳体的弹性测试	92
8.1.1	测试装置	92

8.1.2	测试结果	93
8.1.3	实验与理论计算的比较	94
8.1.4	误差分析	94
§ 8.2	弯张壳体振动模态测试	95
8.2.1	模态分析理论基础	95
8.2.2	实验装置简介	96
8.2.3	实验结果	97
§ 8.3	弯张换能器的振动模态测试	98
8.3.1	未装夹上下盖板时	98
8.3.2	装夹上下盖板后	98
§ 8.4	谐振频率附近处的性能测试结果	100
8.4.1	换能器谐振频率、阻抗特性	100
8.4.2	换能器的发射特性、机械品质因数 Q_m 、有效耦合系数 k_e	100
8.4.3	换能器发射声源级随输入电流的关系	103
8.4.4	换能器的电声效率与输入电功率的关系	104
8.4.5	结果分析	104
§ 8.5	换能器声辐射特性	105
§ 8.6	稀土超磁致伸缩换能器的测量系统介绍	106
第 9 章	用 ANSYS 软件设计稀土换能器	108
§ 9.1	ANSYS 有限元软件简介	108
9.1.1	软件简介	108
9.1.2	ANSYS 软件应用于声学及换能器领域解决的具体问题	109
§ 9.2	ANSYS 方法及工作过程简介	110
9.2.1	换能器机电耦合问题的理论基础	110
9.2.2	ANSYS 有限元软件用于换能器分析的基本理论	112
9.2.3	ANSYS 处理器	114
9.2.4	ANSYS 软件一般分析步骤	114
§ 9.3	压磁-压电比拟法	116
§ 9.4	稀土超声频圆环型换能器的设计	119
9.4.1	稀土换能器结构	119
9.4.2	理论计算及实验测试	119
9.4.3	与同频率压电陶瓷换能器尺寸比较	122
	参考文献	124
	附录	128

第 1 章 绪 论

§ 1.1 常用的换能器材料

广义地说,换能器就是进行能量转换的器件,是将一种形式的能量转换成另一种形式能量的器件。声学上所说的换能器,一般都是指电声换能器,即进行电能和声能相互转换的换能器。

通常换能器都有一个电的储能元件和一个机械振动系统。这个电的储能元件中的电场或磁场的变化,借助于某种物理效应实现电机或机电转换。按其物理效应的不同,又可分为两大类:一类是由电-力效应形成换能的器件,称为电场性换能器,如电容式、压电式、压电陶瓷式、高分子材料、铁电反铁电相变式均属此类换能器;另一类是由磁-力效应形成换能的器件,称为磁场性换能器,如电动式、电磁式、磁致伸缩式、超导电式、铁磁流体等均属此类换能器。

当然,要得到声波,除了上述的物理转换机制以外,还可以利用电子束、激光、涡流、微波等来激发出声波。这方面典型的应用是用于无损检测中的激光超声技术。

材料研究是换能器研究的基础,换能器的工作机制取决于材料的工作特性。换能材料的研究,构成了换能器研究很重要的一个方面。为了对本书所采用的新型材料有较深的认识和全面的理解,这里先简单评价一下常用的几种换能器材料。

换能器材料主要分为两大类:一类是压电材料;另一类是磁致伸缩材料。常见的材料有:压电材料、压电高聚物、复合材料、金属玻璃材料、磁致伸缩材料等。

1.1.1 压电材料

1880年居里(Curie)兄弟发现了石英、电气石等具有压电效应的材料,但其真正应用是到电子管放大器发明以后才开始的。1917年,第一次世界大战时,法国物理学家朗之万(Langevin)为了制造探测潜艇用的水声器件,利用石英压电晶体发明夹心式换能器,这是换能器在水声领域中的首次应用。1946年,第二次世界大战时,对钛酸钡压电陶瓷进行了研究,在原来无一定极化方向的电畴构成的陶瓷上,施加强直流场,使整个陶瓷被极化而具有压电性。这就是压电陶瓷从单晶发展到多晶新领域的开端。

压电材料主要有两类:一类是真正的单晶体,如石英、电气石、酒石酸钾钠(罗谢耳盐)、磷酸二氢铵(ADP)、磷酸二氢铵钾(EDT)、硫酸锂等,其压电性是由于晶

体结构的不对称性而产生的；另一类是极化的多晶陶瓷，即压电陶瓷，如钛酸钡（BT）、锆钛酸铅（PZT）、铌镁锆钛酸铅等，其压电性质是人为产生的。此外，反铁电材料也属于多晶陶瓷材料。

多晶陶瓷的发现和应用已有 50 多年的历史，其发展速度是很迅速的。20 世纪 50 年代美国研制成功了锆钛酸铅，60 年代日本研制成功了铌镁酸铅陶瓷系，代号为 PCM，随后又相继研制成功了铌钴酸铅陶瓷，代号为 SPM 及铌铜酸铅陶瓷系等。

压电陶瓷材料的优点是：

(1) 其机电耦合系数，尤其是 PZT 的机电耦合系数高于一般的磁致伸缩材料，稀土超磁致伸缩材料除外。这就使得用该材料制成的换能器有较高的发射效率和较高的灵敏度，并且能在宽频带上工作。

(2) 特别是 PZT 具有较高的机电能量密度，可发射较大的功率。

(3) 除了稀土超磁致伸缩材料外，其变形比一般的磁致伸缩材料大。

(4) 可以制成所需要的任意形状，例如，平板、圆管、圆球、镶嵌结构、长条等，且可任意选取极化轴方向。

(5) 改变陶瓷的组成和工艺，能较易得到不同特性的陶瓷，以便用于不同场合。

压电陶瓷材料的缺点是：

(1) 抗张强度低于磁致伸缩材料。这不仅碍于高功率发射，而且制造过程中易碎，不能制成大功率的换能器。可以通过施加一适当的预应力来控制，但通常预应力会改变陶瓷特性。

(2) 性能会随组合、成型或者是烧结过程中的微小变化而变化，使之性能不稳定，这在制造过程中又是难以控制的。

(3) 声速较高，不利于制成低频大功率换能器。

(4) 密度大，特性阻抗高，不利于与低特性阻抗的工作介质相匹配。

(5) 导热系数低，必须增加散热措施。

钛酸钡系陶瓷的居里点较低，约为 120°C ，同时还存在 -80°C 和 10°C 两个相变点，这使得机电常数在常用温度范围内不够稳定，使用受到限制。该系陶瓷的压电性能较弱，在强电场下电损耗也较大，这使大功率发射换能器的使用受到极大限制，尽管有人曾试图对这两方面性能进行改善，但收效甚微。

基于上述的钛酸钡系陶瓷的缺点，美国于 20 世纪 50 年代研制成功了锆钛酸铅（ $\text{PbTiO}_3\text{-PbZnO}_3$ ）固溶体陶瓷，即 PZT。后来又发展了一系列的 PZT 陶瓷，如 PZT-2、PZT-4、PZT-5A、PZT-5H、PZT-6A、PZT-6B、PZT-7A、PZT-8 等。由于它们具有较优异的机电性能，因而在水声换能器和大功率超声换能器中得到广泛应用。

PZT 材料的居里点较高,约为 $300\sim 360^{\circ}\text{C}$,又无其他相变点,因而温度稳定性好于钛酸钡系陶瓷,压电性能比钛酸钡系陶瓷强。若改变基方配比,离子取代或掺以微量杂质,PZT 性能可发生变化,以用于特殊场合。PZT 陶瓷的压电耦合系数高,PZT-4、PZT-8 陶瓷的平面耦合系数达 50%以上,制成的换能器的耦合系数也超过 50%。耦合系数高,意味着作为发射器时它的转换效率高,作为接收器时,它的灵敏度高,且能在宽频带上工作。

PZT-4、PZT-8 适合作发射换能器材料,PZT-5 适合作接收换能器材料,PZT-7 适合作各种机械延迟线等。

压电晶体和压电陶瓷的频率可以从很低的值到 10^9 Hz 以上。因而,它可用作水声换能器、功率超声换能器、检测换能器及各种高频超声器件。

另一类重要的压电材料是那些可以通过不同的沉积技术,在各种基体上沉积成薄膜的材料。在这些材料中最突出的是氧化锌(ZnO)、硫化镉(CdS)和氮化铝(AlN)。

1.1.2 压电高聚物

1969 年,日本 H. Kawai 发现了聚偏二氟乙烯(简称 PVDF 或 PVF_2)经极化处理后具有较强的压电性,所产生的内电场值可达 10^6 V/cm。 PVF_2 是一种柔软的塑性薄膜,这种压电体的特点是:可制成大面积任意形状的薄膜,密度小于 $2\text{g}/\text{cm}^3$,其声阻抗与水相近;压电常数 g_{33} 较高(灵敏度高),介电系数和耦合系数较低;压电常数 d_{33} 低,机械损耗大,谐振峰不明显;制作的成本低,但极化较困难。

因而, PVF_2 适合于作水听器、滤波器、延迟线换能器,把薄膜直接贴在船壳上,可解决换能器的笨重问题,不宜用作发射换能器材料。

另外, PVF_2 还可以制成永久极化的驻极体。其特点是:结构简单(因驻极体本身已带电,所以这种传声器无需再加极化电源);电声性能好;抗振能力强;音质较好,频率响应宽且平坦,易小型化;价格低。

1.1.3 复合材料

压电陶瓷材料 PZT,由于其具有较大的压电系数和机电耦合系数,被广泛用作换能器的材料。但是,用 PZT 材料制作水声和医学超声换能器,其致命弱点是密度大,特性阻抗很高,很难与水或是人体的特性组织相匹配。这样就不能充分发挥这种材料的优点。此外,由于 PZT 材料的 d_h 很小,介电系数 ϵ 又很大,因而 $g_h (= d_h / \epsilon)$ 很小,使得用 PZT 材料制作的水听器灵敏度很低。为了克服以上缺点,1978 年美国宾州大学的 R. E. Newnham 等人提出了用压电 PZT 材料与聚合物复合材料复合的构想,并对复合后的微观结构进行了研究。随后,压电复合材料的工艺、特性及振动模式等的研究得到了迅速的发展,取得了显著的成果。

压电 PZT/聚合物两相复合材料,由于 PZT 相及聚合物相自身连通方式的不同,其微观结构共有十种连通方式,其中研究最多的,也是在实际中最有用的只有三种,即 0-3 型、1-3 型和 3-3 型。第一个数字代表压电相的连通维数,第二个数字代表聚合物相的连通维数。两相复合材料的微观结构不同,其压电特性、机电特性也不同。0-3 型压电材料,由于具有柔软抗冲击、 d_h 及 g_h 大等特性,是较理想的水听器材料;3-3 型材料,由于其压电性能好、密度低,是较好的水声换能器材料;1-3 型材料不但压电性能好,特性阻抗低,而且具有较高的机电耦合系数,容易做成高频、高灵敏度、宽带聚焦、检测及医学超声换能器。

与纯压电陶瓷相比,复合材料可能制成尺寸更大的元件,它将具有较大的构形灵活性,不易破碎,研制它的目的也在于能够得到这些改善的物理性能,并保持或改善压电陶瓷的机电参数。

1.1.4 磁致伸缩材料

自 20 世纪 20 年代起,陆续发现了各种具有磁致伸缩效应的材料。依据具有磁致伸缩效应材料特性的不同,可分为两类材料。一类是金属磁致伸缩材料,如镍、铁钴合金、铝铁合金、镍铁合金、镍钴合金等。这类材料的特点是具有高机械强度、高居里点及工作性能稳定。声呐设备中常采用这种材料制成的换能器。因这类材料的电阻率低,涡流大,故在叠片前需经过退火处理,以便每一叠片表面所形成的氧化薄膜可以作为绝缘层。另一类是铁氧体磁致伸缩材料,如镍锌铁氧体、镍铜钴铁氧体、镍钴铁氧体。这种材料最大优点是涡流和磁致损耗小,灵敏度高,可用来做水听器和工作频率要求较高的水声换能器。

磁致伸缩材料的磁致伸缩系数、磁导率、机电耦合系数均与极化场的大小有关,而其磁致伸缩系数一般在 $30\sim 60\text{ppm}$ ^①。

以上这些可称为传统的磁致伸缩材料。一般情况下,由于效率低、笨重,以及要求偏磁场而带来的不方便,磁致伸缩换能器大多已被压电换能器所取代。不过,这些换能器仍然有一些特色是压电换能器不能与之相比的,如它的电输入阻抗低、强度高不易损坏。因此,大家对这些磁致伸缩换能器的兴趣始终不减。

近年来,又研究了几种新的磁性换能材料——稀土超磁致伸缩材料、金属玻璃磁致伸缩材料及铁磁流体。本书即是采用稀土超磁致伸缩材料研究低频、大功率水声换能器。

1.1.5 金属玻璃材料

金属玻璃是一种过渡金属(如铁或镍)与一种非金属(如硼、硅、磷或碳)的玻璃

^① $1\text{ppm} = 1\mu\text{m}/\text{m} = 10^{-6}$ 。

态合金,是从熔化状态经快速冷却得到的。由于冷却速度快但仍保持着金属的延展性和柔韧性,故称为金属玻璃。金属玻璃还具有表面硬度高、抗张强度大、耐腐蚀、易于磁化的特点,其电阻率也比镍大。它的有效机电耦合系数比最好的稀土铁合金还大。遗憾的是,金属玻璃的磁致伸缩系数与镍类似,仅到 $40\sim 50\text{ppm}$ 就饱和了,不过它相应的应变饱和点的磁场强度很低,只有 $1.89\sim 3.14\text{Oe}$,而镍为 126Oe ,稀土铁合金就更高了。这些限制了金属玻璃的应用,它只适合于水听器或高频换能器等小位移场合。

§ 1.2 稀土超磁致伸缩材料及其应用

1.2.1 稀土超磁致伸缩材料

20世纪70年代初期,美国水面武器中心的 Clark 博士首先发现 TbFe_2 , DyFe_2 等二元稀土铁化合物在室温下有很大的磁致伸缩系数,80年代初期以后进一步发展成了三元稀土铁化合物,即 RFe_2 类合金,其中 R 是 Tb、Dy、Sm 和 Ho 等二元或更多种的稀土元素,典型材料为 $\text{Tb}_x\text{Dy}_{1-x}\text{Fe}_{2-y}$,它有较低的各向异性,并可以获得更大的磁致伸缩系数,被称为超磁致伸缩(giant magnetostriction)材料,也称稀土超磁致伸缩材料或稀土铁合金磁致伸缩材料。式中的 x 表示 Tb/Dy 之比, y 代表 R/Fe 之比, x 一般为 $0.27\sim 0.35$, y 为 $0.1\sim 0.05$ 。这三元稀土合金材料是由美国 Ames 实验室制成的,现在美国 Edge Technologies 公司生产,商品牌号为 Terfenol-D[式中 Ter 表示元素铽(Terbium),fe 表示元素铁,nol 代表该材料的开发实验室的名称:Naval Ordnance Laboratory,最后的 D 代表元素镨(Dysprosium),表示加入 Dy 后磁晶各向异性变小],成分为 $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.93}$,并已实现商品化生产。

继美国人的研究之后,瑞典、日本、英国和中国等国也进行了这方面的研究工作。现已全面研究了材料的磁学、电学、力学、热学以及它们之间的耦合特性。三元稀土铁化合物 $\text{Tb}_x\text{Dy}_{1-x}\text{Fe}_{2-y}$ 中的 x 、 y 可有一定范围内的变化。当添加一定数量的 Mn、Al、B 等元素,有可能在常温低磁场下,不同程度地提高磁致伸缩系数和机电耦合系数,降低材料声速。因此,各国所研究的成分可能有所不同^[1]。F. Claeysen、Mark B. Moffett、A. E. Clark、D. Boucher^[2~6] 对这一类材料及其换能器进行了一系列研究,他们的研究工作主要包括:计算测量材料的各向异性电弹参数,不同预应力和不同偏磁场下材料的磁致伸缩系数,不同配比合金的材料性能比较及各种形式换能器的研究设计等。

我国稀土资源丰富,在世界上储量第一。开展这方面的研究虽然较晚,但进展较为迅速。稀土超磁致伸缩材料的制备技术主要采用定向凝固法和粉末冶金法。

定向凝固法通过增加母合金中稀土元素含量,弥补制作过程中的稀土烧损,同时控制温度梯度和热流方向,采用适当的退火工艺,改进组织结构,并且不断改进制作设备。2003年北京有色金属研究总院稀土材料国家工程研究中心自行研究开发了“一步法”新工艺,将熔炼一定向凝固—热处理等工序在一台设备上连续完成,可用来制备大直径、高性能、低成本的稀土超磁致伸缩材料,且易于批量生产。用这种工艺研制的稀土超磁致伸缩材料成本仅为国际售价的18%,现已成功生产出直径70mm,长250mm的 TbDyFe_2 超磁致伸缩棒材,主要技术经济指标均达到国际先进水平。武汉理工大学首创了以提拉法无污染磁悬浮冷坩埚技术为核心的整套单晶制备和加工新技术,生产的 $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_{1.9}$ 单晶,超磁致伸缩系数为 $2000 \times 10^{-6} \sim 2400 \times 10^{-6}$ 。北京科技大学生产的稀土超磁致伸缩材料的成分为 $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}(\text{Fe}, \text{M})_{1.95}$ (式中M代表Mn、Al、B)。粉末冶金法也在不断改进,国外黏结磁致伸缩材料的磁性能已接近定向凝固棒材, Sandual等学者制作的黏结磁致伸缩材料的磁致伸缩效应可与Terfenol-D相当。北京有色金属研究总院稀土材料国家工程研究中心也在进行这方面的研究工作,现成功制备出 $\phi 40\text{mm} \times 60\text{mm}$ 的Terfenol-D黏结磁致伸缩棒材。2004年经全国稀土标准技术委员会审定,由甘肃天星稀土功能材料有限公司制定的“钕镝铁大磁致伸缩材料”标准为国家标准。该种材料国家标准的建立,对保护国家知识产权,在国际上占据制造该种材料的技术制高点有重要意义。

各国研制的材料成分可能略有些差异,但都具有共同点。以Terfenol-D为例,与传统有源材料的几个典型性能参数相比较而言,具有以下特点:

Terfenol-D的应变值很大,比镍大40~50倍,比PZT压电陶瓷大5~8倍,故在低频下可使得水声换能器获得很高的体积速度和声源级;能量密度高,比镍大400~500倍,比PZT压电陶瓷大10~14倍;耦合系数大,有利于换能器的宽带高效率工作;声速低,比镍小3倍,约为压电陶瓷的1/2,有利于换能器小型化设计;居里点温度高。对大功率而言,即使是瞬间过热都将致PZT压电陶瓷的永久性极化完全消失,而Terfenol-D工作到居里温度以上只会使其磁致伸缩特性暂时消失,冷却到居里点温度以下时,其磁致伸缩特性又可完全恢复,故无过热失效问题。几张常见材料性能比较见表1.1所示。用稀土超磁致伸缩材料制成的换能器,很适合于远程声呐和其他低频水声系统中应用。以上特性,也引起了高技术领域的广泛重视。

自从20世纪70年代发明稀土超磁致伸缩材料以来,稀土超磁致伸缩材料制造工艺不断完善,性能不断提高,成本不断降低,应用领域不断扩大,市场迅速发展,在军民两用高技术领域显示出了广阔的应用前景,是21世纪军工与高新技术的重要战略材料。稀土功能材料已发展成为一个新兴的科学技术领域,是目前功能材料研究的热点,稀土超磁致伸缩材料的生产和应用被普遍认为将是新的经济增长点。近30年来,随着稀土超磁致伸缩材料应用范围逐渐扩大,产量不断增加。

表 1.1 几种常见材料性能比较

性能参数	Terfenol-D	纯镍	压电陶瓷	
	Tb _{0.27} Dy _{0.73} Fe _{1.93}	>98%Ni	PZT-4	PZT-8
杨氏模量/N·m ⁻²	2.65×10 ¹⁰	20.60×10 ¹⁰	11.30×10 ¹⁰	11×10 ¹⁰
声速/ms ⁻¹	1690	4900	4150	4500
居里点/°C	387	354	300	300
伸缩系数/μm·m ⁻¹	1500~2000	-40	400	250
机电耦合系数 k ₃₃	0.72	0.16~0.25	0.68	0.5~0.6
d ₃₃ /m A ⁻¹	1.7×10 ⁻⁹	—	—	—
d ₃₃ /m V ⁻¹	—	—	496×10 ⁻¹²	225×10 ⁻¹²
磁导率	9.3	60	—	—
磁弹密度/Jm ⁻³	14000~25000	30	960	2500

据美国前沿技术公司统计,全世界 Terfenol-D 合金产量从 1989 年的 100kg 增加到 1997 年的 70t。据业内人士推算美国 Etrema 公司 1999 年产值约 8 千万到 1 亿美元。该公司的总裁 Larson 预测稀土超磁致伸缩材料已进入一个稳定的需求增长期,其成长趋势与 NdFeB 永磁材料极为相似;TbDyFe 材料的未来市场预计为:2010 年 8 亿美元,2015 年 17.5 亿美元。2004 年 3 月,美国某公司用稀土超磁致伸缩材料制作燃汽轮机喷嘴,每天需要用稀土超磁致伸缩材料 20~30kg,全年约用 10t 左右。稀土超磁致伸缩材料技术和器件的研究在快速发展。据 Etrema 公司统计,2003 年与 Terfenol-D 有关的专利为 43 项,2004 年 1~7 月已申请和批准的专利为 81 项。

近十几年来,国际上相继召开了多次稀土超磁致伸缩材料的基础研究和应用开发的国际会议。国外有的把稀土超磁致伸缩材料称为 Smart 材料,国内有人翻译为智能材料,其功能还在不断地开发与扩展,其应用领域也还在不断地扩大之中^[7,8]。

1.2.2 在水声学上的应用

1.2.2.1 各型主动声呐发射型换能器

近些年来,用此种材料研制的水声换能器主要有复合棒纵向伸缩型(也称活塞式或 Tonpilz 换能器)^[9,10]、环形或曲面弯张型换能器^[11,12]、鱼唇式换能器^[13]、溢流镶拼式换能器^[14]以及圆环弯张式换能器等^[15]。

文献[9]描述了英国研制的一具有 2kHz 的 Terfenol-D 纵向磁致伸缩声源。图 1.1 是它的结构示意图。为了使换能器在深水下不受到静水压的影响而导致其性能参数的变化,可在用钢制成的节点平面 4 上套一铝制的框架将有源材料所在

的后部与水隔绝起来。该换能器的核心元件 Terfenol-D 管,是由六个对边距为 13mm 的六角形 Terfenol-D 棒相叠而组成的,中空为六角形的一大 Terfenol-D 管,管长为 100mm,用直流线圈提供偏磁。整个换能器尺寸直径为 190mm,长为 420mm,重为 15kg,声源级达 199.5dB,总效率为 37%。

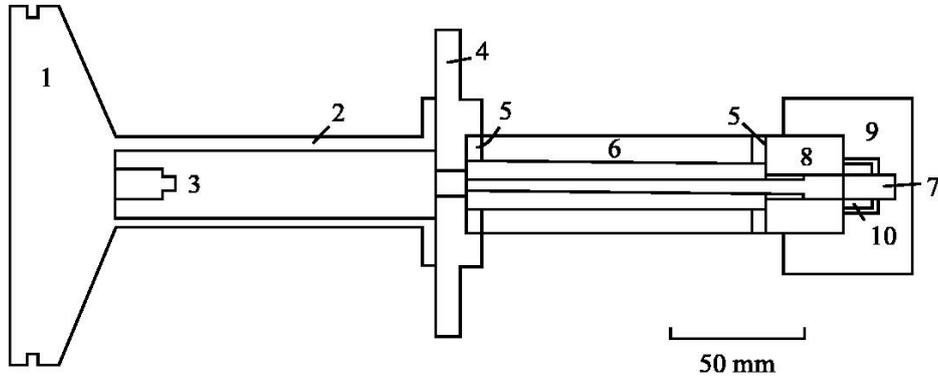


图 1.1 2kHz 的 Terfenol-D 复合棒型声源

- 1. 前辐射铝块; 2. 铝管; 3. B & K4384 加速度计; 4. 钢节点平面; 5. 冻石绝缘件;
- 6. Terfenol-D 管; 7. 钛螺栓; 8. 内部尾块; 9. 钢尾质量块; 10. 钢螺帽

文献[10]用美国 EDGE Technologies 公司生产的三根 Terfenol 棒,研制了 Tonpiliz 换能器,测得空气中和水中工作频率分别为 2100 Hz 和 1600 Hz,交流电声效率和总的电声效率分别为 30% 和 20%。工作过程中,发现当输入的电功率增加时,换能器的谐振频率有漂移现象,漂移范围为 300 Hz。

日本在 1992 年成功地将稀土超磁致伸缩棒(成分为 $Tb_{0.3} Dy_{0.7} Fe_{1.92}$)制成的环形换能器用于海洋断层探测,图 1.2 是他们研制的换能器^[11]。外形尺寸为

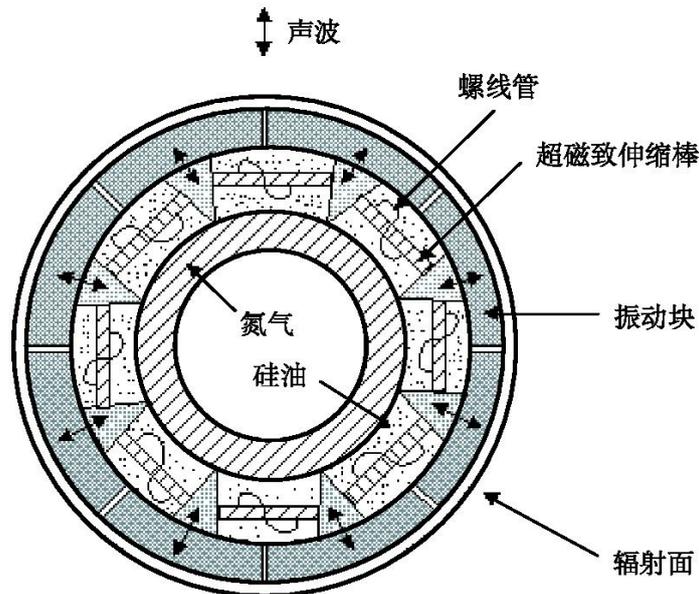


图 1.2 200 Hz 海洋断层探测环形声源

940mm×370mm(直径×高),重为410kg。有源材料由8个 $\phi 20\text{mm}\times 120\text{mm}$ 的磁致伸缩棒组成,内部的高压氢气用于平衡周围的水压。在10m深的开阔水域中测得其谐振频率为236Hz,带宽为60Hz(机械品质因数 $Q=3.9$),声源级为190.5dB,电声效率为20%。该换能器能探测到千公里以上的范围。文中还说明,将要用定向结晶Tb-Dy-Fe材料研制工作频率为70Hz,传播距离为10000km的海洋气候声学温度测量系统的声源。而用PZT压电陶瓷做的声源,有效探测距离不足300km。

目前已研制出了数种不同形状的稀土超磁致伸缩弯张型水声换能器。图1.3(a)表示用Terfenol-D制作的IV型弯张伸张换能器^[12]。图1.3(b)为永久偏磁及其驱动工作方式。沿壳体的主轴方向置放Terfenol-D材料,在文献[12]中描述了三种不同尺寸的这种形式的换能器:主轴分别为0.375m、0.7m和0.975m,谐振频率都在1kHz以下,电声效率达60%~80%。

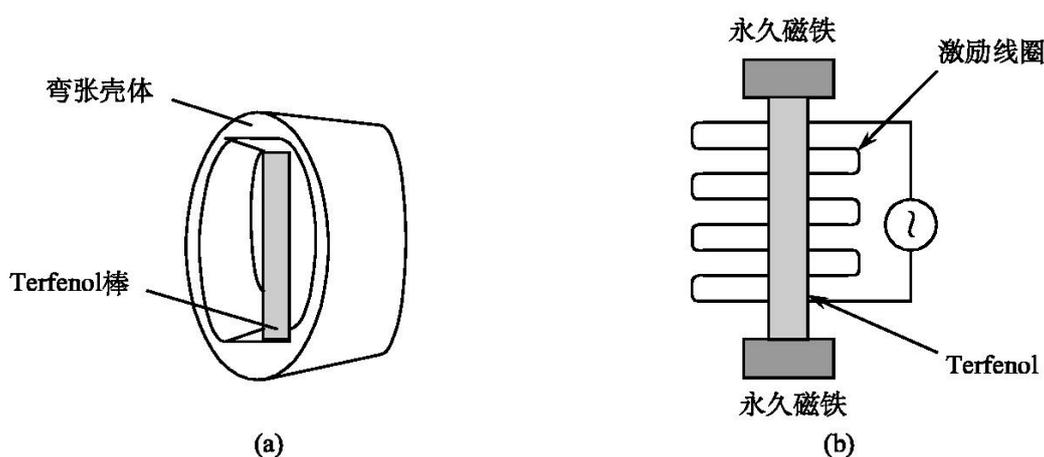


图 1.3 Terfenol 棒弯张型换能器

中国科学院莫喜平研究员提出了一种“鱼唇式”弯张换能器^[13],壳体结构如图1.4所示。该壳体的结构特点是采用了变高度的椭圆管结构,充分利用杠杆臂的放大效应,并使等效辐射面加大。当偏磁直流电流为2A时,换能器的谐振频率为1.2kHz,带宽为200Hz,电流响应为167dB;当偏磁直流电流为4A时,换能器的谐振频率为1.1kHz,带宽为375Hz,电流响应高于177dB。因此,工作点对电声性能的影响是比较显著的。预计当偏磁电流增加到最佳工作点(8A)时,电流响应将进一步提高,机械品质因数将进一步降低。

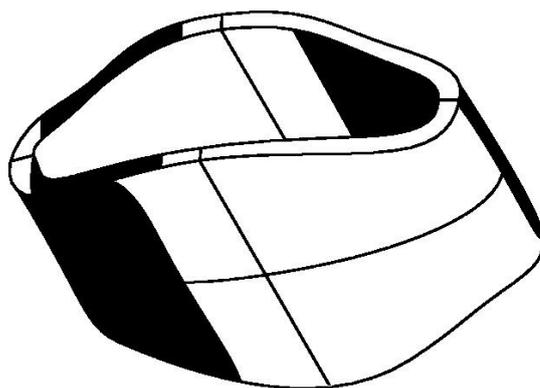


图 1.4 “鱼唇式”弯张壳体图

726研究所研制的溢流式镶拼六面体型换能器^[14],采用高磁钢永磁体做偏磁。图

1.5(a)为换能器结构图,图 1.5(b)为换能器实物图。水中谐振频率为 0.89kHz,带宽为 100Hz,电声效率为 7%,当电流为 3.5A 时,声源级为 180dB 左右。

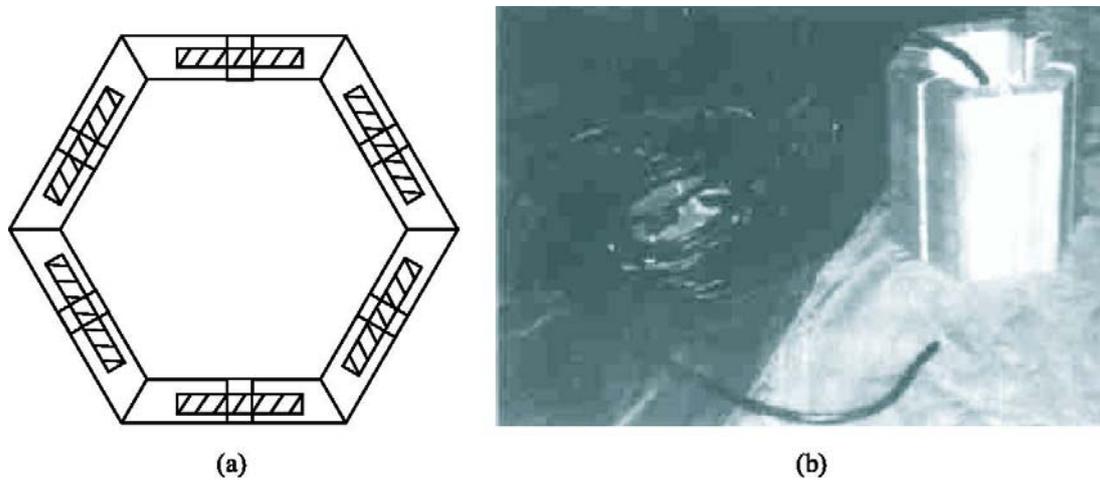


图 1.5 溢流式镶拼六面体型换能器

715 研究所先后研制了三种圆环弯张式换能器^[15],图以 C-III 型为例,采用直流线圈偏磁结构,稀土棒 $\phi 12\text{mm} \times 75\text{mm}$ 的稀土棒 6 根,水中谐振频率为 790Hz,带宽为 165Hz,偏磁电流为 4A 时,图 1.6 为换能器结构图。声源级为 180dB,电声效率为 27.1%。

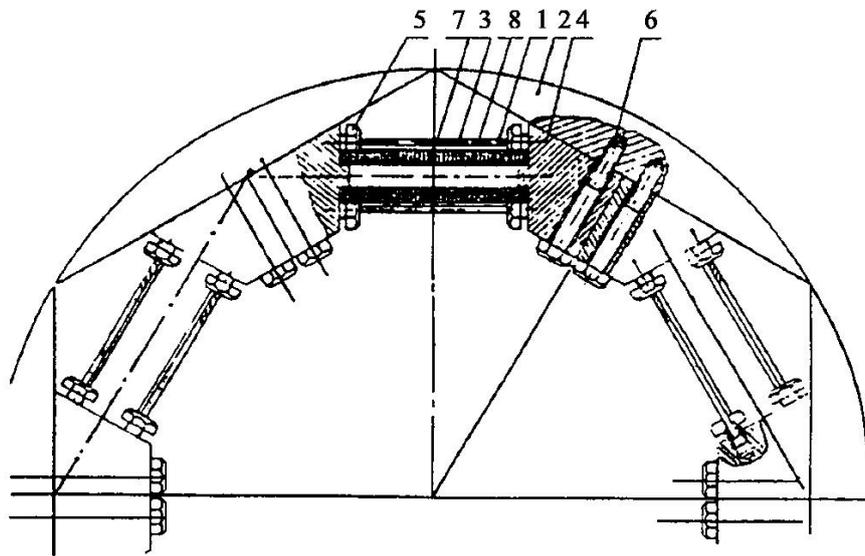


图 1.6 圆环弯张式换能器

- 1. 预应力丝;2. 辐射块;3. 线圈骨架;4. 变幅块;7. 稀土棒;8. 线圈绕组

海鹰企业集团有限责任公司的蔡志恂等人研制了凹筒型稀土超磁致伸缩换能器,该换能器结构似 I 型弯曲伸张,但呈凹型,外型尺寸为 $\phi 130\text{mm} \times 250\text{mm}$ 。用稀土磁钢提供永久偏磁场谐振频率为 990Hz,发射电流响应级为 170dB,声源级为

190dB, 谐振点处的效率为 7.3%^[16]。

根据目前掌握的资料显示, 已有十几个国家正在用该材料从事军用及民用声呐方面的研究。据美国 EDGE 公司总裁 Larson 说, 预测到 2015 年稀土水声换能器声呐将在世界范围内普遍使用, 那时将形成世界标准与系列。

1.2.2.2 压电-超磁致伸缩混合式宽带纵振换能器

以压电陶瓷和稀土超磁致伸缩材料(稀土棒)为驱动元件的换能器组成混合式(Hybrid)宽带纵振换能器。这两种有源元件机械串联, 相互耦合, 稀土棒产生低频谐振, 压电陶瓷产生高频谐振。两部分振子在电路中并联工作, 振动存在着一个恒定的 90°相位差。由于是压电和压磁的双激励, 它们一个是电容性的, 一个是电感性的, 这两部件能互相电调谐使得振动一端增强一端抵消。Terfenol 能在低频段产生大的位移形变, 整个振子将在低频处得到一宽频带。

混合式换能器在结构上可看是一个“质量(头)—弹簧(1)—质量(中)—弹簧(2)—质量(尾)”机械串联振动系统, 如图 1.7 所示。弹簧(1)是有源压电陶瓷, 弹簧(2)为稀土超磁致伸缩材料 Tefenol-D。由于 Tefenol-D 材料的刚度比压电陶瓷材料低很多, Tefenol-D 产生低频振动时, 可以将前盖板和中间质量集中起来看作是低频部分的前盖板; 压电陶瓷材料产生高频振动时, 可以认为后盖板几乎对前盖板和中间质量的振动没有影响^[17]。因此, 后盖板质量、前盖板质量和中间质量的比例搭配要合适。文献[17]报道, 在一定条件下, 可以得到 1.5~5kHz 的工作频带。

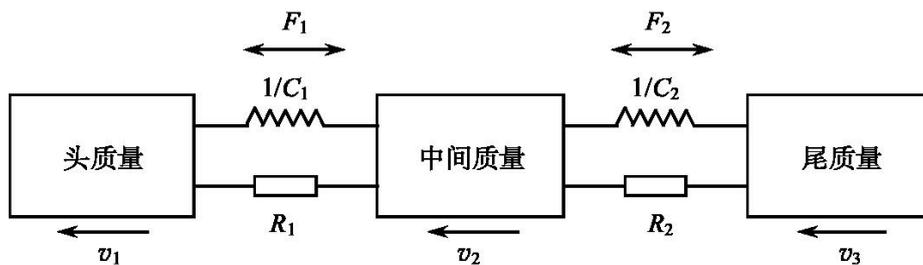


图 1.7 换能器的机械振动系统

v 为盖板振速, F 为外力, R 为阻尼, C 是有源元件的机械柔顺系数

Hybrid 换能器是一种新型的换能器, 目前还存在许多尚待研究的问题:

(1) 压电与压磁最佳耦合的研究, 其中如何适当选取稀土振子与压电振子的机械阻抗、电阻抗、有效刚度以及合理选取各部分质量与顺性负载;

(2) 最佳与合理的磁路设计、磁场的均匀性, 以及如何减小磁致损耗、涡流及欧姆损耗;

(3) 预应力与偏磁场合理的施加。

另外, 国内生产的稀土超磁致伸缩棒的直径还不小, 作单棒来说很难与压电陶

瓷在刚度上进行匹配,而多棒工作涉及施加预应力的均匀性,给磁路设计和机构装配带来更大的困难。

1.2.3 在微控制领域中的应用

近些年来,国外研制了近千种应用器件,仅批准的美国专利就已超过 100 件。

(1) 在检测领域中的应用

研究利用超磁致伸缩材料的磁致伸缩正效应或逆效应可以制作检测磁场、应变、位移、扭矩、压力和电流等的各种元器件。根据稀土超磁致伸缩材料在磁场中产生应变的原理,配以激光二极管或 PZT 材料可以制成各种测磁仪。1991 年美国依阿华大学的 R. Chung 等开发出一种超磁致伸缩激光二极管磁强计原型。美国海军采用超磁致伸缩材料开发了磁致伸缩应变计,它与传统的半导体应变计相比具有更大的动态范围、更高的灵敏度和精度,并且它的温度依赖性小,可测的频带更宽,可测应变量更小。日本东芝公司 M. Sahashi 等发明了用磁致伸缩薄膜制作的接触型扭矩传感器,其动态范围大、响应快,灵敏度比用传统金属电阻薄膜制成的扭转应变计高 10 倍^[18]。

(2) 在磁(电)-机械换能器中的应用

基于超磁致伸缩材料的磁(电)-机械换能器具有大位移、强力、响应快、可靠性高、漂移量小、驱动电压低等优点,因而在超精密加工、微马达、振动控制以及流体机械等工程领域均显示出良好的应用前景,是一种很有潜力的新型智能驱动元件。

1) 在超精密加工中的应用。精度达到纳米级及以上的超精密定位系统目前大多采用基于压电陶瓷材料的致动元件,其输出功率低,且必须采取有效措施防止冲击力和高驱动电压造成的击穿短路等问题。超磁致伸缩驱动元件输出位移是电致伸缩致动器的数十倍,且可低阻抗运行。日本茨城大学江田弘和东芝公司的 Kobayashi 合作设计了定位精度达到纳米级的超磁致伸缩致动器,并将其成功地应用于大型光学金刚石车床的微进给装置。

2) 在微型马达中的应用。微型马达驱动元件可采用的材料主要有电致流变材料、形状记忆合金、压电陶瓷和超磁致伸缩材料等,其中基于超磁致伸缩材料的微型马达性能优越,应用前景非常广泛。Cedrat Recherche 首次研制并测试了超磁致伸缩摩擦马达,该马达的定子由一个环和两个超磁致伸缩线性致动器构成,产生平移和屈曲两种振动模式,并利用 90°相移耦合以产生椭圆振动,利用这种椭圆振动并借助摩擦从而将运动传递给两个转子。德国 L. Kiesewetter 利用 Terfenol-D 棒研制成功一种尺蠖式马达。当线圈通入电流并且位置发生变化时,超磁致伸缩棒交替伸缩,从而像虫子一样蠕动前进。美国 J. M. Vranish 等采用超磁致伸缩材料亦利用蠕动原理,开发出转动式步进马达。

3) 在振动控制领域中的应用。主动减振降噪机构是利用传感器检测减振对

象的振动位移信号,经控制器处理后输出一个相应的控制信号到致动器,由致动器产生大小相等、方向相反的位移以抵消振动。采用超磁致伸缩致动器作为执行机构的主动减振降噪系统有低频特性好的特点,振动衰减量最大可达70%,频率范围为0~5kHz。日本的 Ohmate K. 等采用 Terfenol-D 设计了三连杆臂型半主动振动控制装置,可减缓由于地震、强风等产生的振动。该装置可在3个直线或转动方向产生可控的摩擦力和摩擦力矩。美国 M. Anjanappa 等将超磁致伸缩致动器应用于振动的主动控制中,并对其工作原理进行了理论分析与实验研究,首次给出了考虑热效应的超磁致伸缩致动器的基本数学模型。

4) 在流体机械中的应用。目前,超磁致伸缩电(磁)-机械能转换器广泛地应用于各种阀门、燃油喷射系统和微型泵等。一家瑞典公司将 Terfenol-D 用于燃料喷射阀的驱动,并申请了专利。日本用 Terfenol-D 制成了微型隔膜泵;瑞典 ABB 公司用 Terfenol-D 为驱动元件设计了流体泵。

我国南京航空航天大学的顾仲权、朱金才等研究了磁致伸缩材料致动器在振动主动控制中的应用。海军工程大学的欧阳光耀、施引研究了超磁致伸缩致动器的设计方法,并将其作为振动主动控制的执行器,取得了较好的振动控制效果。浙江大学的夏春林、丁凡等研究了超磁致伸缩致动器在流体伺服器件中的应用。

1.2.4 电声学上的应用

2005年1月美国拉斯维加斯消费电子产品博览会(CES 2005)上,人们聚集在一块高2m多、厚约12mm的方形的透明厚玻璃面前。这块玻璃不仅有投射上去的视频图像,而且还有发出电影配音的音响。过往的参观者努力寻找潜伏的扬声器到底在什么地方,最后发现发声的却是巴掌大小的两个圆柱形的换能器,振动使竖立在前方的这块巨大透明玻璃发出了声音。这是美国 Induction Dynamics 公司推出的扬声器新产品。它实际上是一种磁致伸缩音频换能器,在国内又称为平板扬声器,因其没有振膜,又被称为没有振膜的扬声器。它的工作原理是在驱动线圈的作用下,磁致伸缩材料将音频电信号转换为活塞或圆片的机械振动,这一往返运动由机械放大系统放大,再通过输出器驱动硬质物体发声。由于产生驱动磁场的线圈是静止的,并很容易通过外部导热介质有效散热,因此可承受非常大的功率。这种器件的特点是没有运动的音圈、锥盆和悬边,因此,不必担心损坏以及由于惯性存在造成的瞬态失真。同时,平板发声还消除了传统音箱定向发射声波带来的声像定位不佳、对聆听位置要求苛刻等负面效应。

我国也有科研单位在进行平板扬声器的研究,如中国专利 ZL 01208463.8、ZL 02224933.8(平板式高保真扬声器)等都揭示了类似的结构。这种换能器还可以安装在各种各样坚硬的平板面上,并使这些板面变成扬声器,例如,装饰面内墙、天花板、地板、玻璃、夹板,甚至工作台面、书桌等等。它具有无指向发声、弥散性

强、声音均匀等特点,可应用于家庭影院系统、商店、酒吧、会议室,以及任何只要音响不要音箱的地方。当然它也可以随身携带,与随身听、MP3、笔记本电脑等声源连接,就可以驱动身边几乎所有材料的平面发声。

1.2.5 在声发射技术领域的应用

应用于声发射领域内的声源,要求重复性好、测计时准、可控、检测速度快、余震短、安全性好,应用于长距离的检测声源还需要能量大。传统的声发射声源有捶击、电火花、电雷管等,对比上面的要求,这几种声源都存在较大缺陷。压电陶瓷换能器虽然很好,但能量小、不坚实(容易有绝缘破坏、应力破坏、热破坏、疲劳破坏)、余震大等缺点,不能作为长距离的检测声源用。

应用稀土超磁致伸缩材料设计声发射震源,具有发射能量大,频率带宽,余振小、使用寿命长、重量轻、体积小、抗震性好等特点,是比较理想的声发射换能器。在水利、水电、公路、桥梁、石油等领域,例如厚混凝土检测、油井探测、波动采油、锚杆检测等方面都可以满足对声波发射的要求。另外,由于该换能器尺寸小,辐射指向性均匀,还可用于一些相应于该特点的地方。

1.2.6 大功率超声频换能器

功率超声换能器常用于超声清洗、切削、焊接等加工及处理中,工作频率在 $10\sim 100\text{kHz}$,声功率通常为几百瓦,有时几千瓦,要求较高振幅,在 20kHz 时,振幅通常在 $10\sim 50\mu\text{m}$ 。

采用超磁致伸缩材料,可以研制出强功率超声频换能器。由于稀土超磁致伸缩材料的特性,如用它研制超声频换能器,将在功率密度、位移振幅等方面优于压电陶瓷换能器。或者说,一个稀土超磁致伸缩换能器所产生的能量,可以等于几个压电陶瓷换能器产生的能量。

但在超声频段工作时,为提高工作效率,减少热损耗,必须面对和解决的重要问题就是如何降低这种材料的涡流损耗。

从美国 ETREMA 公司网页上传出来的最新消息说^[19,20],已用稀土超磁致伸缩材料作成谐振频率为 20kHz 的 25kW 的超声换能器,可使废旧轮胎脱硫,从而能将成千上万污染环境的旧轮胎转化为新轮胎,具有重大的经济和社会效益。强功率稀土超磁致伸缩超声换能器在超声化学、超声清洗、超声医疗器械等方面也将具有广泛的应用前景。

因此,稀土超磁致伸缩材料的应用范围十分广阔,涉及军事、民用等方方面面。2004年8月,美国 Etrema 公司销售经理 Todd Kreamer 先生说道:“Terfenol-D 材料的应用行业及应用产品几乎是无限的。”

§ 1.3 弯张换能器的发展简史及其特点

随着现代声呐技术的不断发展,实际应用中 对换能器提出了似乎有些矛盾的要求,例如,低频、高功率、深水、小尺寸、轻重量等,给科学家和工程设计人员提出了挑战。

为了解决主动声呐换能器的小体积问题,可有 两种途径。一种即是采用新材料,如前面论及的稀土铁磁致伸缩材料的发现和研究;另一种途径是将注意力转向弯张换能器。

书中利用新材料研究了 Tonpiliz 和 VII 型弯张式这两种换能器。下面结合弯张换能器的发展简史,谈谈选择 VII 型弯张换能器作为我们首选的弯张型换能器的原因^[21]。

1.3.1 弯张换能器的早中期发展

最早的弯张换能器可追溯到 1929 年。当时, H. C. Hayes 是华盛顿特区海军研究实验室 NRL (Naval Research Laboratory) 声学分部主任。1936 年,在他的“发声及定向装置”专利中^[22],令人信服地解释了弯张换能器的工作原理:在平行放置几根长度方向磁致伸缩的驱动棒和共轴线圈的两端,通过一定的装置与两块凸形板相固接而形成椭圆形结构体,为使驱动元件在高驱动级上不会承受张应力,必须加上一定的预应力。现代弯张换能器中,驱动元件上的预应力通常是由壳体施加上的, Hayes 是通过张紧的棒来给驱动元件提供预应力的。Hayes 制作的带有两块凸形板的弯张换能器到目前为止可能是最大的。两板的尺寸为 $1.8\text{m} \times 0.3\text{m}$,椭圆的短轴与长轴之比为 0.45,壳厚为 0.32cm。在空气中的谐振频率为 540 Hz,当时是作为雾中声源。1947 年 Hayes 退休时,他仍是 NRL 声学分部的主任。由于他的杰出贡献,在美国第 58 届声学会议上被授予“水声学先驱”勋章。

在 20 世纪 30 年代中期之后的相当长一段时间内,由于 NRL 缺少资金,弯张换能器未能得到进一步发展。

50 年代中期, Toulis 和他的同事们首次将弯张换能器应用于水声中。1963 年, Toulis 将其发明作了总结归档,并获得了 1966 年的专利^[23]。其中一个弯张换能器的形状如图 1.8 所示。他是用压电陶瓷来设计的。Hayes 则是用磁致伸缩镍棒作为驱动元件的。

与 Toulis 同时代的还有两位对弯张换能器的发展做出了积极的贡献:一位是美国海军电子实验室(现称为海军海洋系统中心,简称 NOSC)的 F. R. Abbott,他发明了压电陶瓷圆环驱动的轴对称飞碟形的径向辐射弯张换能器,获得了 1959 年的专利^[24];另一位是 H. C. Merchant 发明的 VII 型弯张换能器,如图 1.9 所示。

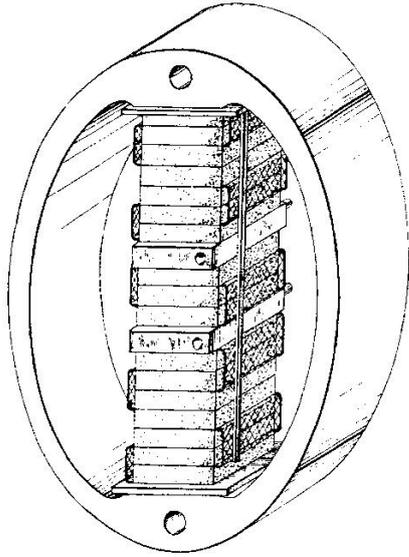


图 1.8 W. J. Toulis 的弯张换能器

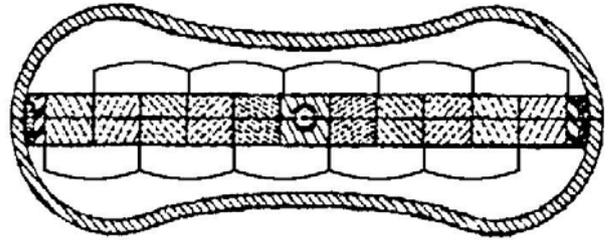


图 1.9 Merchant 的弯张换能器

他几乎和 Toulis 同时获得了 1966 年的专利^[25]。

1.3.2 各型弯张换能器的特点

在正式文献中“弯张”这个名字,首次出现在 Toulis 的 1966 年的专利中。因它是由驱动元件的伸张振动和壳子的弯曲振动组合而成的,故称为弯张是很恰当的,也正是由于板(壳)的弯曲振动频率远低于其厚度振动频率,所以也理所当然地成了满足现代主动声呐换能器要求的主要对象之一。

通常,弯张换能器分为 7 种类型,如图 1.10 所示。它们的结构特点简要说明如下:

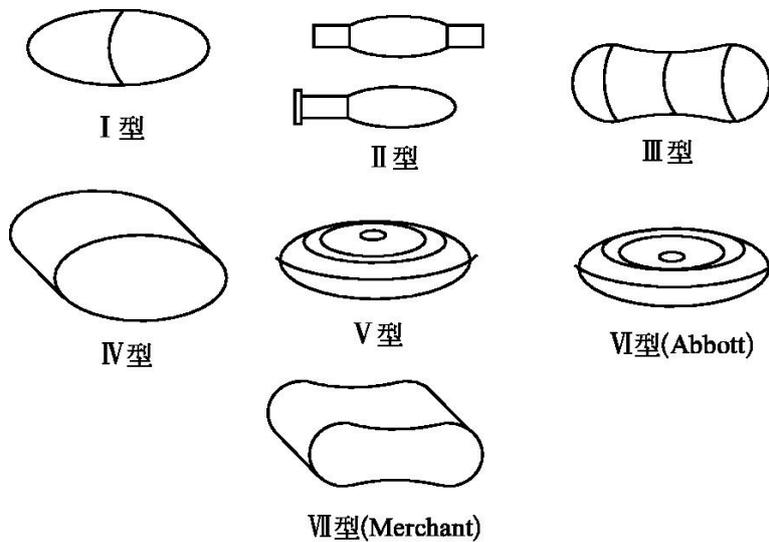


图 1.10 弯张换能器类型

I型:由一系列圆拱形弯曲梁围成一个类似于圆桶形的振动辐射面,这些辐射面具有扁平而弯曲的表面沿长轴方向插入压电堆或磁致伸缩棒做激励元件,激励元件的伸缩振动推动弯曲梁作弯曲振动。因它的形状很像美国的橄榄球,所以可不严格地称它为“橄榄球”。

II型:是I型的改进,即沿着主轴两端延伸出圆柱形压电陶瓷堆,以便能放置更多的压电陶瓷,提高功率容量并展宽频带。为了能减少应力集中,提高壳体的耐疲劳强度,其曲面外壳的形状比I型更平滑。

III型:看起来像两个不同尺寸的I型换能器嫁接在一起,这是想通过两个相近谐振频率的壳体来展宽换能器的频带。因为样子很像葫芦,所以又称为“葫芦式”。

IV型:是由许多椭圆管组叠在一起。在每个椭圆管中,沿长轴方向插入一个压电陶瓷堆或磁致伸缩棒,激励元件的纵振动激励椭圆壳体做弯曲振动。Hayes的换能器即属IV型。

V型:是由两个球冠组合而成,不严格地称它为“蛤壳”。激励元件为一圆片或一圆环,其径向振动激励这两个局部球壳做弯曲振动。

VI型:它是V型的改进,将球壳作成凹形,这种结构体积更小,整个辐射面振动位相相同,预应力随入水深度的增加而增大。如前所述,Abbott的专利即为该型。

VII型:它是IV型的改进,将椭圆柱面做成凹形,这种凹形结构同样可以改善预应力状态,并可使结构面振动同相,同时还可以展宽频带。Merchant发明的专利即是这种类型。

1.3.3 IV型和VII型弯张换能器的特点比较

IV型和VII型弯张换能器是实际中最常用的两种换能器,一个为凸形,一个为凹形。这决定了它们的工作特点有较大的不同。

IV型换能器是完全凸形的椭圆壳体,而VII型则大部分是凹面形的。虽然两者在壳体曲线上看仅有些微小的不同,但在换能器的性能和刚度方面却有很大的不同:

第一,IV型的有效耦合系数要大于VII型的。

第二,IV型换能器置于深水中,随着静水压的增大,将会减小原先通过壳体加于驱动元件上的预应力。而VII型则是随着静水压的增大,加在驱动元件上的预应力也随之而增大。这就意味着对IV型来说,倘若要使其在很深的水中工作,装配时必须在驱动元件堆上加很大的预应力,甚至会产生变形。如果驱动元件是PZT-8压电陶瓷,连续作用的高压应力将会造成退极化而失去效用,因而不利于保存。相反,VII型只要加中等预应力于驱动元件上,就能工作于大深度,而且在存储期间也不会产生性能上的退化。在深水处水的空化阈值大,故VII型弯张换能器能产生高声源级。

第三,Ⅶ型换能器能工作在“呼吸模式上”,即其长轴平面(凹面)和短轴平面都能同向地工作,同时伸张或同时收缩。因而,在长轴平面附近的水域中产生的辐射声压将与短轴平面附近的水域中产生的辐射声压同相位,因此声压相消将减小到最小程度,换能器的工作效率增大。而Ⅳ型换能器的长轴方向和短轴方向的相位相反,工作效率减小。

§ 1.4 发展中的换能器设计方法

传统的 Tonpitz 换能器的主要设计理论基础是建立在有源元件和各振动组件的机电等效电路图上,而机电等效电路图则是在假定满足一维纵向振动模型的基础上通过求解微分方程,与电路理论相类比列出频率方程求解而得到的,这样做显得较为繁琐。随着计算机技术的发展,对单纯的振动系统出现了四端网络设计法,简化了设计^[26~29]。由于弯张换能器的振动是由有源元件的纵振动和壳体弯曲振动相组合而成的,所以,对单纯振动系统设计的方法将不再适合于弯张换能器的设计。

近些年来,大量的专利及不同类型的产品表明^[30~33],弯张换能器已经在许多方面,例如在壳体几何形状、壳体材料、深水压力平衡结构(空气背衬、耐高静水压硬质泡沫材料和壳内橡胶水袋)、聚氨酯无硫透声橡胶浇注及耦联工艺、复合体预应力技术、声学器件黏接技术、理论设计方法、驱动元件材料等,都有不同程度的革新。弯张换能器的理论和设计就是其中一个很重要的方面。

弯张换能器的设计方法有:经典的解析解法、波动力学法、等效电路法、有限差分法、有限元法和边界元方法。

1.4.1 解析解法

弯张换能器的理论和设计是一个比较复杂的问题。从结构动力学和弹性力学的角度来看,壳体的振动是一个经典的问题。J. N. Boone 和 L. H. Royster 最早从寻得解析解的角度出发,将弯张换能器的拱形壳体离散成一组变截面曲梁,并把原来的连续体的振动问题转换成许多个不等质量的多自由度振动问题,利用这个离散系统求问题的近似解,这种方法对结构模型和力学模型都作了简化^[34,35]。J. R. Rutledge 等和 R. A. Nelson 等以类似的方法对Ⅳ型和Ⅴ型弯张换能器作了研究^[36,37]。

1.4.2 波动力学法和等效电路法

波动力学法源于 Brigham^[38],Brigham 用凸型环的差分方程来描述辐射壳体,用纵波理论来描述压电堆,用椭圆辐射函数来确定声场,计算Ⅳ型弯张换能器的电

声特性。

等效电路法是换能器设计的一种经典方法,针对Ⅳ型弯张换能器 Debus 提出一种很好的方法叫做 piece-part 等效电路法^[39]。压电陶瓷振子被描述为机电两部分电路,在电端有一个静态电容,在机械端有等效电感和等效电容,机电两部分之间有一个转换系数,而辐射壳体被描述为一个负载,将此负载加到振子的电端就是整个弯张换能器的等效电路图,其中负载是壳体的第一阶弯曲模态。但这种方法在计算壳体频率和描述的振动模态并不标准,Debus 提出Ⅳ型弯张换能器在工作时并不只是第一阶弯曲模态有贡献,而是各阶振动模态共同作用的结果。因此,负载应等效于多阶振动模态并联的形式,但是实际上只要把第二阶弯曲模态也考虑上就可以满足计算精度了。

经典的等效电路法和寻求解析解的方法来设计和分析换能器系统时,有较大的局限性。它们都要将被分析对象,建立并简化成一定的数学模型,如等效电路法处理的对象是集中参数系统,因而它只能得出换能器处于谐振状态时(这时可简化为集中的参数系统)的一些参数;又因为得出的性能参数都是以解析式的形式表达出来,所以要确切地知道换能器系统内部的位移分布、应力分布等量,以及与此有关的换能器的空间声压分布、指向性等都要经过很繁琐的运算才能得到。波动力学法、寻求解析解的方法和等效电路法在设计弯张换能器的时候计算非常复杂,而且无法进行结构的优化,而应用有限元软件来设计,过程就非常简单,而且可以随意调整换能器的结构。

1.4.3 有限元法

20 世纪 70 年代初期,从摇篮时期逐渐发展起来并日趋成熟的有限元法(finite element analysis, FEA)首次被应用于压电体的振动分析中^[40],这是声学换能器设计上的一大进步。接下来,国际国内许多研究者在这方面做了大量的工作,都与实验结果吻合得较好。

有限元法(finite element method, FEM)属于力学分析中的数值法,起源于航空工程中的矩阵分析。它是把一个连续的介质(或构件)看成是由有限数目的单元组成的集合体。在各单元内假定具有一定的理想化的位移和应力分布模式,各单元间通过节点相连接,以实现应力的传递,各单元之间的交接面要求位移协调。通过力的平衡条件,建立一套线性方程组,求解这些方程组,便可得到各单元和结点的位移、应力。

有限元法是目前工程实践中大量采用的一种数值计算方法。由于有限元法具有方法统一,易于掌握,能够适应边界形状不规则、材料非均匀、各向异性等复杂情况,所以它得到了迅速的发展和推广。随着二维、三维弹性体动力分析的发展,声学结构振动分析乃至压电弹性体动力分析也逐渐运用了有限元法。它能解决换能

器设计中的很多问题,包括结构应力分析、振动特性模拟、发射及接收声能转换问题和远场辐射问题等。对于压电弹性体,在忽略机电损耗和电磁辐射的情况下,有限元法理论已经逐渐完善。有限元法是以变分原理或加权残数法和剖分原理为基础的。对于线性压电弹性体振动问题的求解,采用哈密顿变分原理。剖分差值是把用于结构振动分析的整个连续体想象剖分成有限个单元,这些单元在其边界(或边界线)处彼此连接,以单元边界(或边界内)的结点处的参数为未知量,构造未知量节点值和单元内任意点值关系的插值函数,从而建立近似满足整个连续体的线性代数方程组。它的系数矩阵总是对称的,对于正定的变分问题,有限元离散化后保持了正定性,而且有限元法的系数矩阵是稀疏的。全部过程编成程序,由计算机完成求解。

虽然有限元法是将所考察的连续场分割为有限个单元,然后用比较简单的函数来表示每个单元的解,但是它并不要求每个单元的试探解都满足边界条件。因为边界条件不进入单个有限元的有关特性的关系式中,所以对内部的和边界上的单元能够采用同样的函数。边界条件只需在集合体的方程中引入,其过程并不复杂,因为在变分法中自然边界条件隐含地得到满足,只需考虑强迫边界条件。

任何维数的连续问题,其场变量本来应该具有无限多个值,因为它是解域内每一点的函数,所以这是一个具有无限个未知数的问题。但有限元法将解域分割为有限个单元,并在每个单元内采用假设的函数来表示未知场变量。这样,有限元的离散工作就把问题简化成为有限个未知量的问题了。假设的函数称为场变量模型(试探函数),场变量的结点值和单元的场变量模型完全确定了单元内场变量的性质。用有限元描述一个问题,场变量的结点值就成为新的未知量,一旦求出这些未知量后,场变量模型就确定了整个单元以至集合体的场变量。显然,解的正确性和近似程度不仅与单元的大小、数目有关,而且与所选择场变量模型有关。场变量模型的选择需要经验和判断。

用有限元法来设计和分析还有独特的好处,对任何结构形状的换能器都不需要作简化假设。有限元法将所考虑的结构空间划分为有限个单元,并按某种原则确定物理量在单元上的分布,最终得到以数值形式表示的物理量在所考虑空间上的分布,它很自然地考虑了各单元之间的耦合。单元划分得越细小,分析得就越精确。对换能器设计者来说,用 FEA 法可研究换能器的谐振模态、振速分布、静态动态应力、声输出特性、空间声压分布及指向性等量。

有限元法和有限差分法相比较起来,后者需要求解差分方程,过程相对复杂,且通常采用矩形网格进行计算会带来较大的误差,尤其对具有复杂边界形状的物体。

国际上早在 20 世纪 50 年代末 60 年代初就投入大量的人力和物力开发具有强大功能的有限元分析程序。其中最为著名的是由美国国家宇航局(NASA)在

1965年委托美国计算科学公司和贝尔航空系统公司开发的 NASTRAN 有限元分析系统。该系统发展至今已有几十个版本,是目前世界上规模最大、功能最强的有限元分析系统。从那时到现在,世界各地的研究机构和大学也发展了一批规模较小但使用灵活、价格较低的专用或通用有限元分析软件,主要有德国的 ASKA,英国的 PAFEC,法国的 SYSTUS,美国的 ALGOR、ABQUS、ADINA、ANSYS、BERSAFE、BOSOR、COSMOS、ELAS、MARC、STARDYNE 以及比利时的振动声分析软件 SYSNOISE 等公司的产品。

有限元方法和软件从单纯的计算结构力学发展到计算许多物理场问题,如近年来已发展到流体力学、温度场、电传导、磁场、渗流和声场等问题的求解计算,以及几个交叉学科的求解问题,由求解线性工程问题进展到分析非线性问题。这是当今国际上 FEA 方法和软件发展的最大趋势特征。

1.4.4 边界元法

把边界值问题的解用积分形式来表示的想法产生于一百多年前,如 Helmholtz、Kirchhoff、Rayleigh、Fredholm 等人,但积分方程用于数值计算则是 20 世纪 60 年代开始的,这与计算机的迅速发展和广泛使用密切相关,也与近代数学理论密切相关。这些工作能够克服由于积分方程的奇异性所造成的分析和数值上的困难。目前,对复杂结构体的振动与声辐射的理论研究工作,主要也是通过计算机作数值计算来完成的。

边界元方法是在有限元方法的基础上结合了经典的积分方程发展起来的,因而许多概念、方法、技巧等都是从有限元方法中移植过来的,它实际上是一种定义在边界上的有限单元。这种方法把所研究问题的微分方程变成边界积分方程,然后将区域的边界划分为有限个单元,即把边界积分方程离散化,得到只含有边界上的结点未知量的方程组,然后进行数值求解。

有限元方法出发点是把原来的分布参数系统问题化为集中参数系统问题来求解。这些方法的基本思想是用完全(或局部)满足定义域上边界条件的函数去逼近问题的控制微分方程。边界元法却是把定义域上的边界划分成一系列的单元,用满足控制方程的函数去逼近边界条件。在单元上所考虑的函数可以按不同的形式变化,这一点与有限元大致相同。

边界元可分为两种基本类型,即间接法和直接法。间接法是从一个基本解入手,该解在定义域内满足控制方程,但却含有某些未知数,这些未知数则通过在许多点(或子域)上施行边界条件来确定。间接边界元法是用物理意义不一定很明确的变量来表示最终的公式。这种方法曾用于求解由拉普拉斯方程或亥姆霍兹方程所控制的弹性力学问题或其他势问题。直接边界元法是最近才提出来的,以格林恒等式为出发点,变量具有明确的物理意义,现已应用于工程科学中。