

# 稀土超磁致伸缩材料的应用

朱厚卿

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

1998年1月22日收到

**摘要** 本文重点介绍稀土超磁致伸缩材料在声学方面,特别是在水声换能器方面的应用。

**关键词** 超磁致伸缩材料,水声换能器,执行器

## Applications of rare-earth giant magnetostrictive materials

Zhu Houqing

(Institute of Acoustics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract** This paper mainly presents the applications of rare-earth giant magnetostrictive materials on acoustics, especially on the underwater acoustical transducers.

**Key words** Giant magnetostrictive materials, Underwater acoustical transducers, Actuator

### 1 引言

自从 70 年代美国海军防卫研究所的 A.E.Clark 博士发现了具有超磁致伸缩特性的某种稀土铁合金 ( $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$ , 后被命名为 Terfenol-D) 的居里温度高达 600-700K 以后,大大地激发了人们对这种材料的研究和应用。特别是近 10 年来,相继召开 3 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。目前,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生长点。本文在简要叙述稀土超磁致伸缩材料的基本特性后,重点举例介绍稀土超磁致伸缩材料在水声换能器上的应用,并讨论了在稀土超磁致伸缩材料在应用上的一些技术问题和一些值得注意的研究动向。

### 2 超磁致伸缩材料

超磁致伸缩材料 GMM(Giant Magnetostrictive Materials) 为稀土元素铽 Tb( Ter

bium)、镝 Dy(Dysprosium) 和铁(Fe) 的合金化合物,其基本结构成分为  $Tb_xDy_{1-x}Fe_2$  ( $x=0.2-0.4$ ), 所以又称为稀土超磁致伸缩材料。该材料首先由美国海军防卫研究所 (NOL) 于 70 年代初研制成功,故此材料又称为 Terfenol-D。Terfenol-D 所以称为超磁致伸缩材料是因为它的磁致伸缩效应的最大应变可达到  $10^{-3}$  以上,而通常使用的纯镍的磁致伸缩效应的最大应变仅为  $-40 \times 10^{-6}$  (-40ppm)。比通常水声换能器使用的压电陶瓷的最大应变至少大 4 倍以上。另一方面,超磁致伸缩材料 Terfenol-D 的能量密度比压电陶瓷的能量密度至少大 10 倍以上,可达到  $2 \times 10^4 J/m^3$ , 纯镍的能量密度仅为  $30 J/m^3$ 。稀土超磁致伸缩材料的另一特点是它的声速仅为 1700m/s, 比 PZT 压电陶瓷和纯镍的声速小 3-4 倍。因此用 Terfenol-D 做成的水声换能器,在相同体积的条件下, Terfenol-D 水声换能器,其共振频率比压电陶瓷水声换能

器的共振频率低 3-4 倍, 而辐射的声功率可比压电陶瓷水声换能器的辐射声功率至少大 10 倍。因此超磁致伸缩材料 Terfenol-D 体块材料 (Bulk Materials) 在低频大功率水声换能器、大功率执行器、控制器、有源消振以及力、位移和其他传感器等方面得到越来越大的应用。

近几年来又研制成 Terfenol-D 薄膜材料 (Thin Film), 在微机械电子系统 (Mems) 和声表面波 (SAW) 以及微型泵、阀等器件方面展现出广阔的应用前景。

Terfenol-D 材料的缺点是材质脆, 机械加工困难, 高频涡流损耗大, 价格较贵等等。尽管如此, Terfenol-D 材料及其应用将成为高科技发展的新增长点, 越来越受到人们的重视。

表 1 为超磁致伸缩材料 Terfenol-D 和其他一些磁致伸缩材料的性能比较 [1]。

### 3 机电耦合系数 $k_{33}$ 的动态测量 [3]

机电耦合系数  $k_{33}$  是表征磁致伸缩材料

或器件把电磁能转换成机械贮存能的效率的度量, 磁致伸缩材料的机电耦合系数可表示为:

$$k_{33}^2 = \frac{d_{33}^2}{S_{33}^H \mu^\sigma}$$

式中  $d_{33} = (\partial \lambda / \partial H)_\sigma$  称为压磁系数, 它等于应力恒定时, 材料样品的应变  $\lambda$  和外加磁场强度  $H$  的响应曲线的斜率, 可见斜率越尖锐,  $d_{33}$  值越大。  $S_{33}^H$  为恒  $H$  时材料的顺性常数,  $\mu^\sigma$  为应力恒定时的导磁率。

通常  $k_{33}$  是根据样品的共振频率和反共振频率的动态法测量获得的:

$$k_{33}^2 = \frac{\pi^2}{8} \left[ 1 - \left( \frac{f_r}{f_a} \right)^2 \right]$$

式中  $f_r$  为样品的共振频率,  $f_a$  为样品的反共振频率。图 1 为磁致伸缩材料机电耦合系数  $k_{33}$  的动态法测量装置, 图 2 为稀土棒  $k_{33}$  测量时阻抗曲线的一个典型例子。

表 1 几种磁致伸缩材料的性能

性 能	材 料				
	Terfenol-D Tb <sub>0.27</sub> Dy <sub>0.73</sub> Fe <sub>2</sub>	Ni Ni > 99%	Fe-Co-Cr 合金 Cr:0.4-0.5 Co:34.5-35.5	Al-Fe 合金 [2] (Alfenol) Al:0.13	Ni-Co 铁氧体 Ni:1.0 Co:0.012
密度 $\rho$ (10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> )	9.25	8.90	8.10	6.7	5.1
导磁率 ( $\mu$ )	4.5-9.3	60	75	1150	
饱和磁致伸缩系数 (ppm)	1500-2000	-40	40	26	-27
机电耦合系数 ( $k_{33}$ )	0.72	0.16-0.25	0.17	0.27	0.19-0.24
杨氏模量 (10 <sup>10</sup> Pa)	$Y^H$ 2.65 $Y^B$ 5.50	20.6	20.6	15	17.0
声速 (m/s)	$C^H$ 1690 $C^B$ 2450	4900	4720		5800
抗拉强度 (MPa)	28.0				
抗压强度 (MPa)	700				
电阻率 ( $\Omega \cdot m$ )	$60 \times 10^{-8}$	$6.7 \times 10^{-8}$	$23 \times 10^{-8}$	$9 \times 10^{-7}$	$10^1$
居里温度 ( $^\circ C$ )	387	354	1115	1150	590

### 4 超磁致伸缩材料在水声 (声呐) 换能器上的应用

#### 4.1 超磁致伸缩材料促进了声呐的发展

由于低频声波比高频声波在水中的衰减小可以传播更远的距离, 且由于潜艇表面的消声

复盖层 (消声瓦) 对低频声波不起作用, 因此使用低频声波探测潜艇更有利。而稀土超磁致伸缩材料与传统的声呐换能器用的压电陶瓷材料相比, 它的能量密度和最大应变大, 它的声速和扬氏模量小, 这些特性正适合于研制低频大

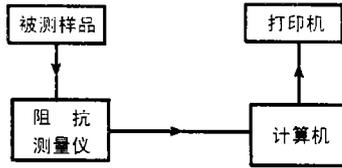
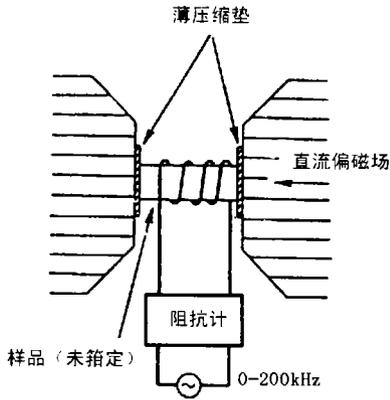


图1 机电耦合系数  $k_{33}$  的动态测量装置

表2 大功率声呐换能器发射材料的特性<sup>[4]</sup>

材料	扬氏模量 (Gpa)	最大应变 ( $10^{-6}$ )	能量密度 ( $J/m^3$ )	声速 (m/s)	机电耦合系数 ( $k_{33}$ )
PZT-8	80	250	2500	4500	0.5-0.6
PMN-PT	101	500	12630	4500	
Terfenol-D	30	1000-2000	15000-60000	1690	0.7

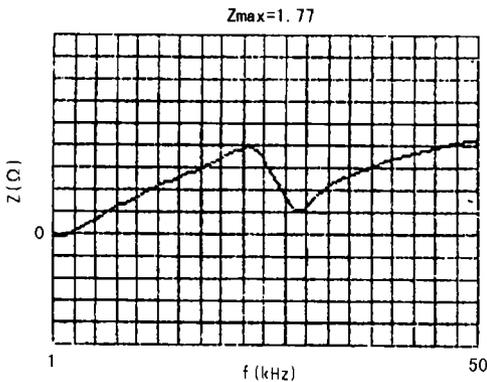


图2 稀土超磁致伸缩材料的机电耦合系数  $k_{33}$

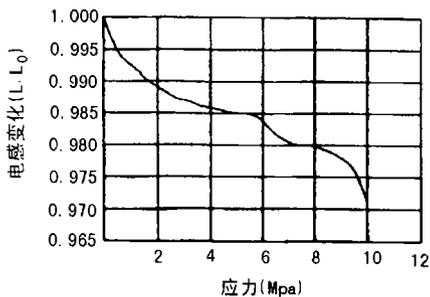


图3 预应力的估算

功率宽带声呐换能器。表2为稀土超磁致伸缩材料 Terfenol-D 和大功率压电陶瓷 PZT-8、大形变电致伸缩铌酸铅陶瓷 PMN-PT 等大功率声呐换能器发射材料性能的比较。

应用声学

稀土超磁致伸缩材料 Terfenol-D 的上述特性使它具有广泛的应用前景，例如低频大功率而体积小重量轻的声呐换能器能提高海军的防卫和攻击能力，是它的典型而又重要的一个应用。

#### 4.2 稀土超磁致伸缩水声(声呐)换能器举例

我们知道，稀土超磁致伸缩材料的特性与直流磁偏置和预应力的大小有关。如压磁系数  $d_{33}$  在正确选择直流磁偏置和预应力的条件下有极大值，又如预应力越大，磁偏置越大，使得材料的导磁率变小和材料变软(扬氏模量变小)。因此设计超磁致伸缩水声换能器的关键是确定稀土超磁致伸缩材料的工作点，即磁偏置和预应力的值及其施加技术。磁偏置通常设置在磁致伸缩饱和值的  $1/3$  处，约  $H=20KA/m$  左右，预应力通常设置为  $7-10MPa$ ，将使稀土超磁致伸缩器件具有最大的输出功率。由于预应力的增加，稀土超磁致伸缩材料导磁率下降，图3是我们对带稀土棒材的线圈的电感和对稀土棒材施加预应力的实验曲线。根据此曲线，我们可预计，线圈电感量的相对变化为  $-3\%$  时，预应力约为  $10MPa$ 。

根据上述基础，我们设计和研制了一些不同类型和不同用途的水声换能器。在介绍了这

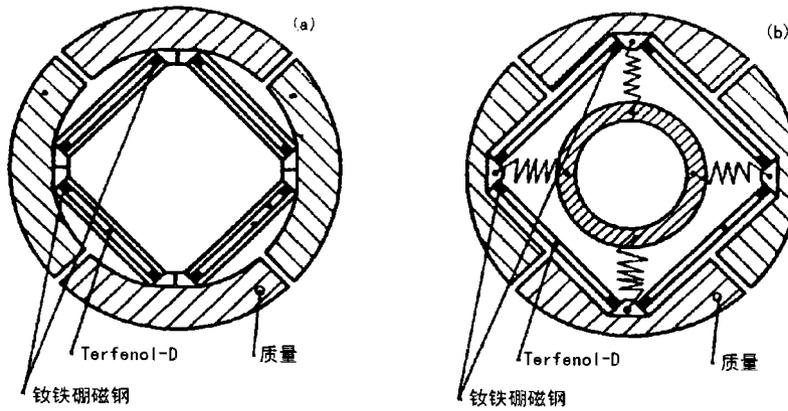


图 4 圆柱形水声换能器

(a) 8 根 Terfenol-D, 一层横截面, 共二层 (b) 4 根 Terfenol-D, 只有一层

些稀土超磁致伸缩水声换能器后, 我们还将介绍国外一些稀土超磁致伸缩水声换能器的最近进展。

(1) 圆柱形水声换能器<sup>[5]</sup>

两种圆柱形水声换能器如图 4 所示。

图 4(a) 的圆柱形换能器, 共用 8 根 Terfenol-D 棒, 其直径 8.3mm, 长 80mm, 分二层安装, 每根棒为一单元振子, 其预应力由二个应力杆提供; 图 4(b) 使用 4 根 Terfenol-D 棒, 直径 8.3mm, 长 80mm, 只有一层, 共用 4 个径向应力杆提供预应力。图 4(a) 所示的超磁致伸缩圆柱形水声换能器的基本特性为:

- 重量: 25kg
- 尺寸: 直径 285mm, 高度 120mm
- 工作深度: 50m
- 共振频率: 900Hz
- 最大驱动电流: 10A
- 共振时阻抗:  $2\Omega + j3\Omega$
- 发射电流响应:  $161\text{dB}(0\text{dB}=1\mu\text{Pa}\cdot\text{m}/\text{A})$
- 最大声源级:  $>180\text{dB}$
- 指向性: 无

该换能器用于 1996 年 8 月中美联合水声考察远黄海的内波试验, 海下 50m 连续工作 48 小时, 在 10km 处能检测到其发射的信号, 工作情况良好。

(2) 图 5 为一复合棒 (Tonpiliz) 换能器, 为我

国首次具体报导 (1993 年) 的超磁致伸缩水声换能器<sup>[6]</sup>, 此换能器只用一根直径为 12mm, 长为 50mm 的 Terfenol-D 棒材。其基本特性为:

- 共振频率: 2.4kHz
- 发射电流响应:  $173\text{dB}(0\text{dB}=1\mu\text{Pa}\cdot\text{m}/\text{A})$
- 机械品质因数: 3
- 电声效率: 45%

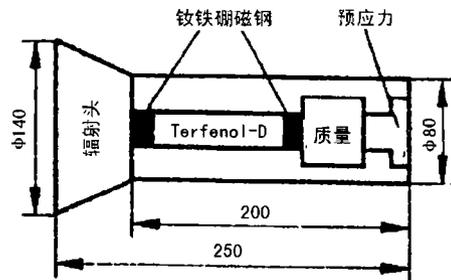


图 5 Tonpiliz 水声换能器

(3) 图 6 为 II 型弯张水声换能器 (II Flex-tensional Underwater acoustical transducer)

Terfenol-D 棒的直径为 10mm, 长度 50mm, 共振频率为 1.83kHz, 而用 PZT-8 压电陶瓷为换能材料代替 Terfenol-D 时, 其共振频率高达 4kHz。

(4) 用于海洋声层析 (Tomography) 的水声换能器<sup>[7]</sup>

图 7 为日本在 1992 年“稀土超磁致伸缩

材料和应用”国际会议上介绍的一种圆柱形换能器，可用于海洋声层析。该换能器的基本特性为：

- (a) 驱动单元
- |                   |                                  |
|-------------------|----------------------------------|
| Terfenol-D 棒：     | 直径 20mm ，<br>长度 120mm ，<br>共 8 根 |
| 预应力：              | 10.5MPa                          |
| 磁偏置：              | 247.5 O <sub>e</sub>             |
| 最大压磁系数 $d_{33}$ ： | 2.12ppm/O <sub>e</sub>           |
| 最大位移：             | 40 $\mu$ m                       |
| 电机转换效率：           | 86.6%                            |
| 工作 30 分钟后温升：      | 110.5 $^{\circ}$ C               |
- (b) 声源
- |                 |                               |
|-----------------|-------------------------------|
| 共振频率：           | 200Hz                         |
| 机械品质因数：         | $Q_m = 3.9$                   |
| 最大声源级：          | 190.5dB(0dB=<br>1 $\mu$ Pa·m) |
| 直径 $\times$ 高度： | 940mm $\times$ 370mm          |
| 重量：             | 410kg                         |

日本海洋科技中心提出<sup>[7]</sup>用 16 个驱动单元研制类似图 7 的圆柱形换能器，其共振频率为 70Hz， $Q_m = 4$ ，输入电功率 1kW 时的声源级为 194dB，电声效率 20%，可用于海洋环境温度测定的 ATOC 计划。

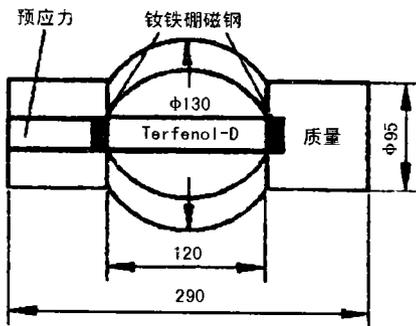


图 6 II 型弯张水声换能器

#### (5) Janus 换能器<sup>[8]</sup>

复合棒换能器也称纵向振动换能器式 Tonpiliz 换能器，它可以用一根或多根稀土超磁致伸缩棒作为驱动单元，这种换能器只是单

面辐射。类似这样的换能器可以设计成双面辐射的，这种结构更紧凑，工作频率更低，如图 8 所示。这种换能器也称 Janus 换能器，它是由 4 根直径 20mm，长度 200mm 的稀土棒和永久磁钢组成，二振动端面的直径为 400mm，其振频率为 305Hz，声功率达 3.3kW，是一种功率较大的稀土超磁致伸缩水声换能器。

#### (6) IV 型弯张稀土超磁致伸缩水声换能器 (Flextensional class IV)<sup>[9,10]</sup>

如图 9 所示，这类换能器被认为是低频、大功率和重量较轻的较理想的类型之一。瑞典皇家海军已使用这种换能器在声扫雷系统中，并经过 7 次经北大西洋公约组织 (NATO) 的演习，被证明较其他声扫雷系统优越。表 3 为 Tonpiliz、Janus 和 Flextensional class IV 三种水声换能器的性能比较。

#### (7) 超导稀土超磁致伸缩水声换能器<sup>[11]</sup>

如图 10 所示。该换能器采用高温超导线圈激励稀土超磁致伸缩棒，使二端面活塞振动，活塞直径 23cm，换能器在水中的共振频率为 430Hz，可望获得更大的声功率。

## 5 超磁致伸缩材料在执行器中的应用举例

### 5.1 超磁致伸缩材料致动器 (Actuator)<sup>[12]</sup>

超磁致伸缩材料致动器的结构如图 11 所示。主要由四部分组成：(1) 推进器 (driver)；(2) 驱动卡具 (Actuator)；(3) 固定卡具 (Block)；(4) 转换器 (Transformer)。推进器、驱动卡具、固定卡具的结构大致相似，由  $\phi 5 \times 30$ mm 的 Terfenol-D 棒、绕组线圈以及 U 形夹组成。其工作原理为驱动卡具张开，使转换器与推进器连接，推进器伸长，使转换器前移，固定卡具张开，使转换器与底盘 (不动盘) 连接，驱动卡具张开，推进器带驱动卡具退回、固定卡具松开，实现前移一个超磁致伸缩棒的伸长量。循环往复，可使转换器一步步前移。同时调换驱动卡具和固定卡具的时序，可实现转换器的后移。

表 3 不同类型 Terfenol-D 水声低频大功率换能器

类型	Tonpizl 4 根棒 线圈偏磁	Tonpizl 3 根棒 线圈偏磁	Janus 300 1 根棒 磁钢偏磁	Flext.IV (设计值) 磁钢偏磁
换能器体积 (dm <sup>3</sup> )	51	22	125	144
共振频率 (Hz)	1150	1200	305	320
品质因数 Q <sub>m</sub>	2.5	6.0	4.3	5.0
指向性指数 (dB)	2	2	0	0
电声效率 (%)	17	36	52	46
声功率 (kW)	1.6	3.8	4.4	151
声源级 (dB)	205	209	208	223

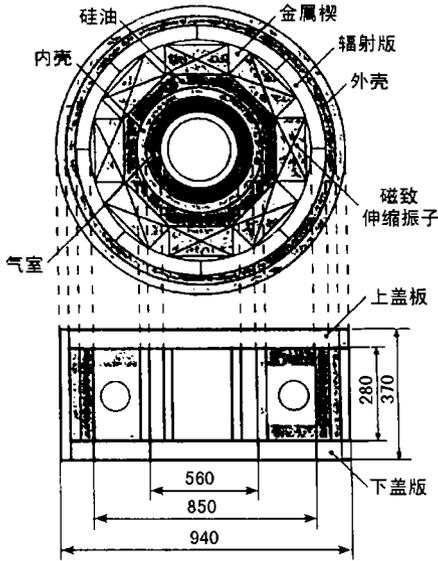


图 7 用于海洋声层析的 200Hz Terfenol-D 水声换能器

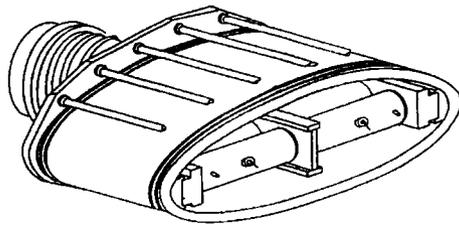


图 9 IV 型弯张型水声换能器

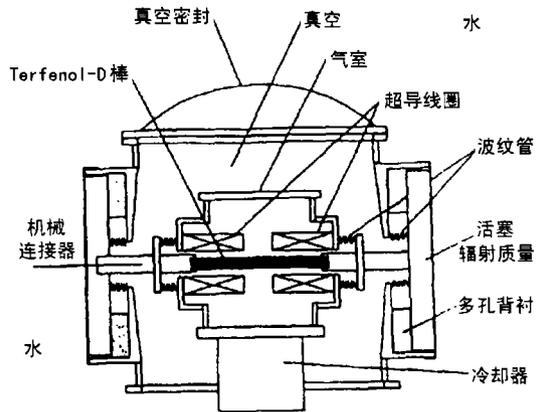


图 10 超导超磁致伸缩水声换能器

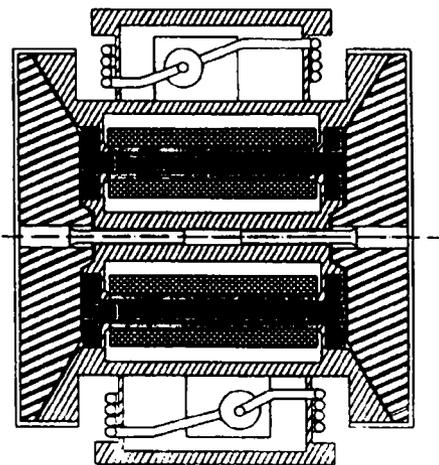


图 8 Janus 换能器

## 5.2 ETREMA 超磁致伸缩执行器<sup>[13]</sup>

超磁致伸缩微位移和执行器的特点是它具有大的推进力, 大的位移, 高的能量密度, 低电压使用, 快速响应 (微秒量级), 微控制 (可达  $10^{-9}\text{m}$ ), 宽频带, 宽温度范围, 极其稳定和无极化、老化等问题。英国已研制成 DC-300Hz, 推力达上万牛顿的可控执行器。图 12 为美国 ETREMA 公司的典型执行器的结构图。

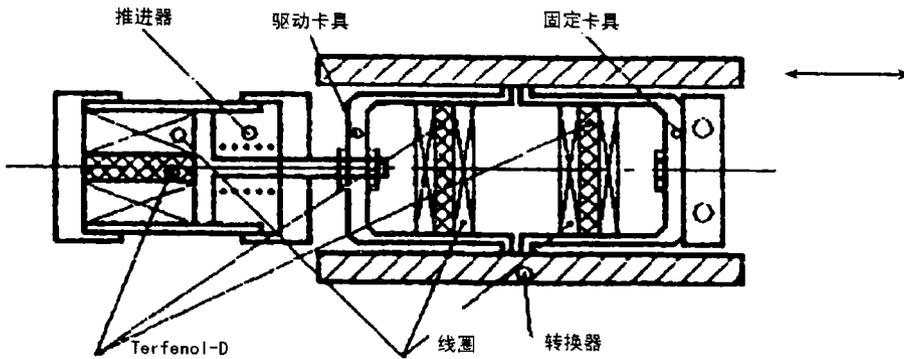


图 11 超磁致伸缩致动器原理图

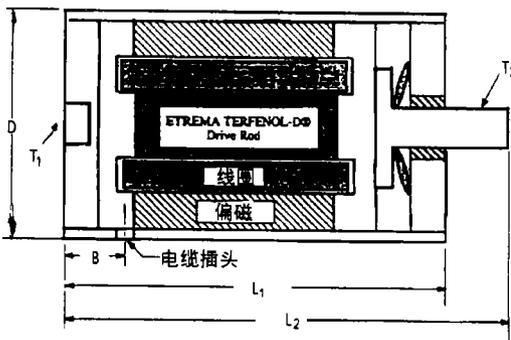


图 12 ETREMA 超磁致伸缩执行器

### 5.3 在其他方面的应用<sup>[14]</sup>

除了上述二种稀土超磁致伸缩执行器之外，还可用于有源消振，如咖啡杯大小的执行器进行有源消振，可使飞机客舱内的噪声降低 20dB，达到豪华轿车内的低噪声水平；可使轿车内的振动减弱 30dB。在超声技术上，用于轮胎再生的清洗旧橡胶轮胎的稀土大功率超声换能器的声功率可达 3kW，变幅杆的位移达 26 $\mu$ m 以上。在医学超声上，超声外科手术刀的尺寸比压电陶瓷的超声手术刀的尺寸小而效率更高。另外，Terfenol-D 在位移控制系统、传感器技术、自动化与通信技术、阀门和流量控制等等方面也具有广阔的应用前景。

## 6 高频稀土超磁致伸缩材料及其应用

不像压电陶瓷，稀土超磁致伸缩材料是导体铁磁物质，当磁感应强度变化时，它将在介质中产生涡流电流，该涡流电流使材料发热，降低了换能器的效率。涡流损耗的大小取决于外磁场的频率、材料的电阻率及其形状。为了

降低涡流损耗，如同变压器一样，把材料切割成薄片，以提高其截止频率。一般说来，稀土超磁致伸缩棒材的截止频率为：

$$f = \frac{2\rho_e}{\pi D^2 \mu_r^s}$$

式中  $\rho_e$  为稀土超磁致伸缩材料的电阻率， $\rho_e = 60 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ， $\mu_r^s$  为导磁率， $\mu_r^s = \mu^s \mu_0$ ， $\mu^s$  为相对导磁率， $\mu_0$  为真空导磁率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{Wb/A} \cdot \text{m}$ ，D 为稀土棒的直径。因此 Terfenol-D 换能器，当工作频率在 20kHz 时，其厚度（直径）不应超过 2mm，当 Terfenol-D 的厚度为 1mm 时，其工作频率可达 100kHz。因此对稀土超磁致伸缩棒沿轴向切割成薄片再用环氧树脂粘接，可做成超声波清洗机、焊接机和超声外科手术刀等等使用的高频超声换能器。为提高稀土超磁致伸缩棒材的工作频率，也可以不切成薄片而切割成图 13 的稀土棒横截面<sup>[15,17]</sup>。

另一种提高稀土超磁致伸缩材料高频特性的方法是使用稀土超磁致伸缩复合材料 (GMPC)<sup>[16]</sup>，它是由稀土超磁致伸缩材料的粉末与粘接剂合成的金属基体复合材料，虽然其最大磁致伸缩应变降低 30%，其饱和应变仍达 1100ppm。但其他性能大大改善，如提高了材料的电阻率，大大降低了涡流损耗，上限频率可扩展到 100kHz，大大扩充了在超声方面的应用，不仅如此，GMPC 材料易于机械加工，可做成各种不同的形状，这是一个值得注意的方向。

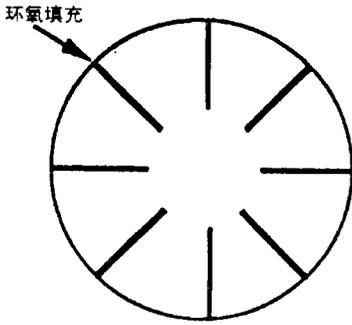


图 13 高频稀土棒的横截面

### 参 考 文 献

- 1 Eda H, Oyatsu M, Nadmi Z, Kobayashi T. et al. The 10th International Workshop on Rare-Earth Magnets and Their Applications, Kyoto, Japan, 16-19 May, 1989. 285-302.
- 2 周福洪. 水声换能器及基阵. 北京: 国防工业出版社, 1984. 153.
- 3 Abell J S, Butler D, Greenough R D, Joyce V, et al. *J of Magnetism and Magnetic Materials*, 1982 **62**: 6-14.
- 4 McCollum M D, Hamonic B F, Wilson O B. *Transducers for Sonics and Ultrasonics*. Technomic Publishing Co, INC, 1993. 15.
- 5 ZHU Houqing, Liu Jianguo, Wang Xiurong, et al. *J of Alloys and Compounds*, 1997 **258**: 49-52.

- 6 朱厚卿, 张洪平 刘建国. 1993 年全国水声学学术会议论文集, 1993, 11, 13-16, 宜昌.
- 7 Nakano I, Tsuchiya T, Amitani Y, et al. The International Symposium on Giant Magnetostrictive Materials and their Applications, Tokyo, Japan, November 5-6, 1992, 77-82.
- 8 Claeysen F, Boucher D. Design of Lanthanide Magnetostrictive Sonar Projectors, Undersea Defence Technologies (UDT) 1991, Proc. 1059-1065.
- 9 Claeysen F, Lhermet N, Leletty R, et al. Progress in Magnetostrictive Sonar Transducers, Undersea Defence Technologies (UDT) 1993, Proc. 240-250.
- 10 Kvarnsjo L. *J of Alloys and Compounds*, 1997 **258**: 123-125.
- 11 Joshi C H, Schempp E, Schiff E A. Putting a Chill into the New HTS Applications, Superconductor industry, Fall 1993, 26-29.
- 12 李楚建, 张效昌, 唐云俊等. 第九届磁学和磁性材料会议, 1996 年 10, 21-27, 郑州.
- 13 ETREMA Terfenol-D Magnetostrictive Actuators, ENTEMA Products, INC. 1996.
- 14 Larson L G. International conference on Giant Magnetostrictive Materials, ICGMM'96, Nov. 6-8, 1996 Honolulu, Hawaii, U.S.A.
- 15 McCollum M D, Hamonic B F, Wilson O B. *Transducers for Sonics and Ultrasonics*. Technomic Publishing Co, INC 1993, 160-169.
- 16 *ibid*, 113-118.
- 17 贺西平, 李斌, 孙进才. *应用声学*, 1998, **17**(3): 43-45.

(上接第 43 页)

表 1 计算机模拟的估计结果

目标位置 (m)	估计误差的均值 (m)	估计误差的标准差 (m)
$x_0$ 97.03	-0.01	0.86
$y_0$ 57.73	0.09	0.28
$z_0$ 172.49	-0.07	0.19

## 4 结论

综上所述, 首先我们对测站的声传感器进行一定的布设, 在简化激波到达时间模型的基础上, 进行二次多项式拟合, 得到了测站中心的时间和梯度梯度的估计. 这实际上是对到达时间噪声的滤波, 在前端进行这样的处理对于整个算法的精度是非常重要的.

然后, 我们应用矢量运算, 对参数进行分

步估计. 由于需要估计的参数较多, 若同时进行估计, 那么参数空间则过大, 这会给估计方法的选择和计算造成很大的困难. 最后, 根据波前方向矢量, 应用空间几何关系得到激波锥面顶点.

本文基于波前方向矢量, 应用最小二乘法, 为超声速运动目标提供了一种有效的被动定位算法. 对于飞行弹丸, 应用该算法得到它在空中不同时刻的几个位置, 再用弹道方程进行外推, 即可得到弹丸的发射点和落点, 这是我们的进一步研究方向.

### 参 考 文 献

- 1 朱道光. 火控雷达技术, 1995, **24**(4): 13-19.
- 2 陆燕芳, 何巧, 罗晓松等. 电声技术, 1993, (3): 2-6.
- 3 Par Renaud. *Science & Vie*, 1995, (3): 105-107.
- 4 David E O, Edward G M. AD-875500, 1970.