

# 800Hz Terfenol-D 鱼唇式弯张换能器

莫喜平 刘建国 崔 政 刘慧生 姜广军

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

(解放军军需大学 长春 130062)

2000年11月16日收到

**摘要** 本文研制了800Hz Terfenol-D 鱼唇式弯张换能器,换能器设计中采用永磁偏磁场和能有效抑制涡流损耗的闭合磁路结构,最高声源级185dB, -3dB带宽180Hz。这种鱼唇式弯张换能器克服了连续直流提供偏磁场时发热强的缺点,并且仅需要普通的功率放大器,更适于长时间连续工作,使这一新型低频大功率水声换能器趋于实用化。

**关键词** Terfenol-D, 鱼唇式弯张换能器, 永磁偏磁场, 闭合磁路

## 800Hz Terfenol-D Fish-lip flextensional transducer

MO Xiping LIU Jianguo CUI Zheng LIU Huisheng

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

JIANG Guangjun

(The Quartermaster University of PLA, Changchun 130062)

**Abstract** A Terfenol-D Fish-mouth flextensional transducer with resonance frequency 800Hz is developed which includes a closed magnetic circuit with permanent magnetic biasing and a structure that is able to control the eddy current. Its maximum source level is 185dB and its -3dB bandwidth 180Hz. The effect of heating due to a DC bias magnetic field is eliminated in the design of the transducer, which needs only a conventional power amplifier and is suitable for continual operation for a long time. This new type of low-frequency high-power transducers has evolved into utility.

**Key words** Terfenol-D Fish-mouth flextensional transducer, Permanent magnetic biasing, Closed magnetic circuit

## 1 引言

弯张换能器具有尺寸小、频率低、功率大的特点,各种类型弯张换能器在设计上都要考虑优化结构参数,使之能够最大限度地发挥其

优良性能。文献 [1] 提出了 Terfenol-D 鱼唇式弯张换能器,这种新型弯张换能器也是利用弯张换能器原始形式的基本原理—以纵向振动振子激发具有振幅放大效应的壳体来产生弯曲振动,但通过改变结构形式获得以下几个方面的

性能改善:

- (1) 增加辐射阻, 有效提高声功率
- (2) 降低机械  $Q$  值, 展宽频带
- (3) 采用溢流式结构, 增加极限工作深度

该换能器的几何尺寸远小于声波波长, 所提供的内腔谐振频率较高, 腔体振动与壳体弯曲振动的耦合作用比较弱, 这种情况下腔体的主要功能就是保持静水压力平衡, 而对展宽频带贡献不大。所以腔内填充顺性材料的体积应以有效提高辐射声功率为基本前提; 当然, 如果以该种类型换能器组成密排线阵时, 腔体的线度加大后, 其共振频率降低到换能器工作频率附近, 则可以考虑利用腔体耦合作用进一步展宽频带。本文对文献 [1] 所提出的换能器进行如下结构改进和发展:

- (1) 采用闭合磁路, 设计中考考虑有效利用磁场能, 提高电声效率。
- (2) 考虑实际工程应用方便, 在制作中采用永磁片提供偏磁场, 克服了直流偏磁情况下电流热效应影响换能器性能, 不便于连续长时间工作的缺点。

## 2 换能器设计

### 2.1 预应力设计

磁致伸缩换能器一般是在一定机械预应力和偏置磁场 (通常称为工作点) 下工作的, 选择工作点是设计磁致伸缩换能器首先遇到的问题, 工作点选择不当, 就不能很好发挥磁致伸缩材料的性能。

设机械预应力取  $T_{pre}$ , 偏置磁场 ( $H_b$ ) 所产生应力贡献为  $T_b$ ; 动态磁场强度峰值最大设为  $H_m = H_b$ , 在机械共振时产生的动态应力与机械  $Q$  值有关, 一般估算时取为静态值的  $Q$  倍 [2], 则动态应力极大值  $T_d$  可表示成

$$T_d = QT_b \quad (1)$$

换能器正常工作应满足下列条件:

$$T_{pre} + T_b + T_d < T_{max} \quad (2)$$

$$T_{pre} + T_b - T_d > 0 \quad (3)$$

- (2) 式表示换能器振动时稀土棒所承受的最大压应力不能超过材料的动态抗压强度  $T_{max}$ ,
- (3) 式则表示换能器振动时, 稀土棒要始终处于受压状态。

$T_{max}$  的典型值 [3] 是 300MPa, 或者更高 [4], 因此 (2) 式所代表的条件一般情况下自然满足。

将 (1) 式代入 (3) 式:

$$T_{pre} - (Q - 1)T_b > 0 \quad (4)$$

上式通过动态参数 ( $Q$  值) 描述出静态偏置量 ( $T_{pre}$  与  $T_b$ ) 之间应满足的基本关系式。

对于弯张换能器  $T_b$  的大小要依赖于壳体的结构, 壳体的结构强度越大, 由  $H_b$  产生的  $T_b$  值亦越大。壳体的强度小 (相对薄的壳),  $T_b$  值亦越小, 所需要的预应力  $T_{pre}$  也可以小一些 (只要提供预应力的壳体形变位移大于最大动态位移即可)。  $T_b$  可由换能器结构及稀土棒的参数通过有限元计算获得, 于是可以得到预应力设计值  $T_{pre}$ 。本文所设计的换能器经计算得:

$$T_{pre} > 12\text{MPa} \quad (5)$$

上述估计只是考虑到预应力要满足动态极限激励条件, 并未考虑静水压的作用, 如果是空气背衬情况, 必须计入静水压的作用来设计预应力, 以保证换能器在一定的工作深度上满足所要求达到的声源级。鱼唇式弯张换能器设计中, 采用溢流式结构, 则不必考虑预应力会受静水压作用而发生变化。

### 2.2 偏置磁场的设计

偏置磁场理论上一般选在  $d_{33}$  取极大值的位置, 称为最佳偏置磁场, 这个条件下纵向机电耦合系数  $k_{33}$  也取得最大值 [5]。最佳偏置磁场与预应力关系较密切, 预应力本身还没有好的办法精确测量, 并且工艺随机性比较大, 因此最佳偏置磁场也难于计算与测量, 一般是不易获得的。尤其是采用永磁材料提供偏磁场的情况下, 只能尽可能设计接近最佳偏置磁场工作状态。我们通

过  $k_{33}$  来衡量偏磁场的情况, 选择永磁材料的磁极强度, 使之提供合适的偏磁场, 实验证明这种方法是比较有效的。我们用共振法<sup>[6]</sup>测得国内 Terfenol-D 材料在 0 预应力条件下的  $k_{33}$  最好值接近 0.5, 实验中先测得此最大  $k_{33}$  值, 然后采用一组一定磁极强度的永磁片代替装置中的全部偏磁设备(包括永磁体和磁路轭铁等), 再测得  $k_{33}$  值, 更换永磁片重复测量, 直到测得  $k_{33}$  值等于或接近于预先测得的最大  $k_{33}$  值, 则认为所选的永磁片已经合适。在实际有预应力的情况下, 最佳偏磁场值要高于 0 预应力情况, 因此还要根据经验稍做调整。在设计中考虑偏磁场的均匀性, 稀土棒与永磁片交替分布(图 1)。

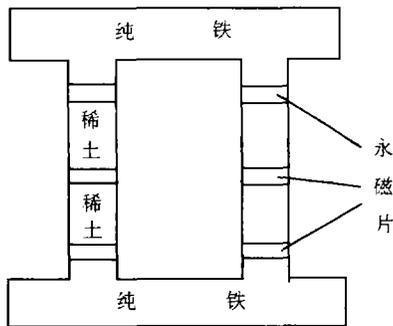


图 1 闭合磁路设计示意图

### 2.3 换能器的结构设计参数

下面直接给出所设计换能器各元件的参数:

稀土棒: Terfenol-D 材料, 直径 20mm、长 40mm, 4 根

永磁片: 钕铁硼材料, 直径 20mm、厚度 5mm, 6 片

轭铁: 纯铁材料

壳体: 防锈铝材料, 最大尺寸: 240mm × 90mm × 180mm, 壳厚 8mm

其余: 硬铝材料

线圈: 高温导线绕制, 260 匝, 2 组

空气中谐振频率: 1295Hz

水中谐振频率: 800Hz

空气中重量: 4.5kg

## 3 换能器电声性能计算

换能器电声性能模拟计算结果见图 2-3, 结果表明: 换能器空气中谐振频率  $f = 1295\text{Hz}$ , 谐振时动态阻抗约  $6.3\Omega$ 。换能器的水中谐振频率为  $f = 860\text{Hz}$ , 发射电流响应  $\text{SIL} = 164\text{dB}$  ( $0\text{dB} = 1\mu\text{Pa}/\text{A}$  1m 处), 若换能器的工作电流  $I = 10\text{A}$ , 声源级可达  $184\text{dB}$ 。-3dB 带宽约为  $250\text{Hz}$ 。可见鱼唇式弯张换能器具有低频、宽带、大功率的特点。

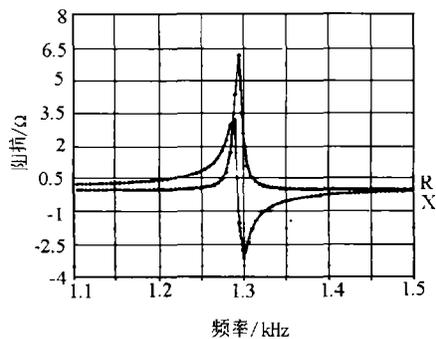


图 2 换能器阻抗曲线(空气中)

R—阻分量 X—抗分量

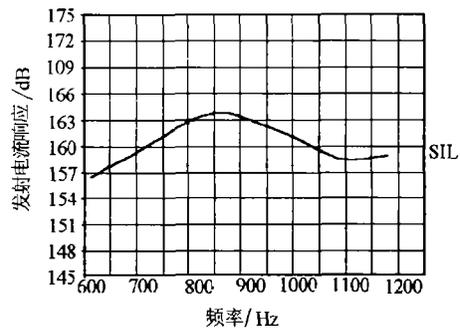


图 3 发射电流响应模拟结果

( $0\text{dB} = 1\mu\text{Pa}/\text{A}$  1m 处)

## 4 换能器电声性能测量结果

换能器的电声性能测量在国防水声计量一级站完成, 测得换能器电感  $L = 2.65\text{mH}$  ( $f =$

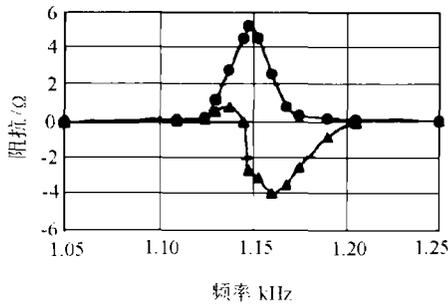


图4 换能器空气中动态阻抗测量结果

● 阻分量 ▲ 抗分量

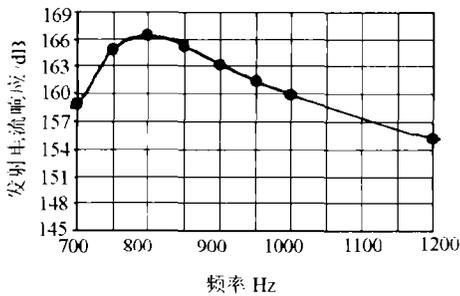


图5 换能器发射电流响应测量结果

(0dB=1μPa/A 1m处)

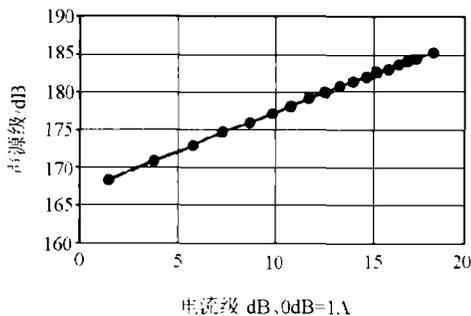


图6 输入输出线性关系测量结果

(0dB=1μPa/A 1m处)

1000Hz, 含 60m 电缆), 阻抗 ( $f=1000\text{Hz}$ , 含 60m 电缆)10 Ω, 空气中动态阻抗曲线见图 4。换能器的发射电流响应测量结果见图 5, 输入输出线性关系测量结果见图 6。结果表

明: 换能器谐振频率  $f=800\text{Hz}$ , 最大电流响应 166.4dB, -3dB 带宽约 180Hz。最大声源级 185dB。

## 5 结语

近期我们开展了一系列低频大功率水声换能器的研究, 采用“鱼唇式”弯张换能器结构和永磁材料提供偏磁场, 换能器谐振频率分别为 1200Hz、800Hz、410Hz、220Hz。本文介绍了 800Hz 换能器, 该换能器已用于低频水声实验声源。湖试、海试证明了“鱼唇式”稀土弯张换能器性能稳定可靠, 具有低频、小尺寸、重量轻、大功率、深水特性好等优点。所设计的 Terfenol-D “鱼唇式”弯张换能器, 发射电流响应在 160-170dB 之间, 线圈设计能承载 10A 的动态电流, 声源级可达 180-190dB。设计中考虑小尺寸、重量轻、实用化的要求, 就必须以牺牲一定的声源级为代价。为了获得单个换能器 200dB 以上的声源级, 又必须加大尺寸、增加有源材料(稀土棒)的体积、增加线圈导线的线径使工作电流达到 30-50A。这一研究方向将在今后逐步完善的工作中得以实现。

## 参 考 文 献

- 1 莫喜平. 声学学报, 2001, 26(1): 25-28.
- 2 袁易全主编. 近代超声原理与应用. 南京: 南京大学出版社, 1996. 23-31.
- 3 Sandlund L, Cedell T. Proceedings of the third international workshop on Transducers for sonics and ultrasonics, ORLANDO, FLORIDA 1992, 113-118.
- 4 Oswin J R, Maskery A. Proc. I. O. A., 1987, 9 (Part2): 23-30.
- 5 Claeysen F, Boucher D, Faure S. Proc. Sec. Int. Cont. on giant magnetost. alloys. Sensglas(1988), Ch.12, 1-31.
- 6 倪嘉缙, 洪广言主编. 稀土新材料及新流程进展. 北京: 科学出版社, 1998. 271-276.