

Terfenol-D 超磁致伸缩换能器的有限元模拟

莫喜平 朱厚卿 刘建国 崔 政

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

1999 年 7 月 16 日收到

摘要 本文研究了利用 ANSYS 软件分析磁致伸缩换能器,使这一有限元分析软件能够用于 Terfenol-D 换能器的分析设计。设计了 14kHz Terfenol-D 纵向换能器,计算结果与实验结果符合很好。

关键词 ANSYS 软件, 超磁致伸缩换能器设计, Terfenol-D

Terfenol-D giant magnetostrictive transducer simulation by finite element method

Mo Xiping Zhu Houqing Liu Jianguo Cui Zheng

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

Abstract In this paper, analysis of magnetostrictive transducer using the ANSYS software has been studied, and the finite element analysis program that can be used to design the Terfenol-D transducer is provided. A 14kHz Terfenol-D longitudinal transducer has been developed, of which the calculated results are in good agreement with measurements.

Key words ANSYS software, Design of giant magnetostrictive transducer, Terfenol-D

1 引言

ANSYS 是目前比较流行的有限元分析软件之一,它能解决工程中诸多学科、诸多门类中的实际问题,功能全面,在换能器设计中曾被许多研究者采用^[1-5],但是在这些工作中都是利用 ANSYS 软件处理压电型换能器。ANSYS 软件有专门求解压电耦合问题的计算功能,却不能直接用于解决磁致伸缩机电耦合问题,给磁致伸缩换能器的设计带来很大的不便。目前超磁致伸缩材料(Terfenol-D)的应用越来越广,它以高能量密度和低声速的特点而被广泛应用于低频—甚低频大功率水声换能器中,比较适合的频率范围是几百 Hz 到几 kHz,而在十

几 kHz 以上的频率范围设计工作又遇到新的难题:涡流损耗大、有功材料体积小、预应力施加与度量等等。我们通过压磁-压电比拟法,实现借助 ANSYS 压电耦合求解功能来分析计算磁致伸缩型换能器的电声转换问题,并探讨设计十几 kHz 稀土纵向换能器的可行性。

2 利用 ANSYS 软件解决磁致伸缩机电耦合问题的探讨

类似的工作^[6]在应用 ANSYS 低版本程序解决声学问题中已有过尝试。文献中利用声学-固体力学比拟法,探讨解决利用固体单元模拟声介质,最终达到求解声学问题的目的。

我们通过压磁 - 压电比拟法, 实现磁致伸缩型换能器电声转换问题的分析计算:

ANSYS 解决压电耦合问题时选择如下压电方程 [7]:

$$\begin{cases} T = c^E S - e E \\ D = e S + \varepsilon^s E \end{cases} \quad (1)$$

其中电弹常数:

c^E — 恒电场强度 (E) 下的弹性系数

e — 压电应力常数

ε^s — 恒应变 (截止) 介电常数

可以选择与 (1) 相对应的磁致伸缩方程, 对于力学量 S 作自变量, T 作因变量:

$$\begin{cases} T = c^H S - \beta H \\ B = \beta S + \mu^s H \end{cases} \quad (2)$$

其中磁弹常数:

c^H — 恒磁场强度 (H) 下的弹性系数

β — 磁致伸缩应力常数, 它与另一个磁致伸缩应力常数 σ 之间的关系为 [8]

$$\beta = \mu^s \cdot \sigma$$

式中, μ^s — 恒应变 (截止) 磁导率。

从方程 (1) 和 (2) 的形式上看, 只要把磁学量与电学量等效:

$$\begin{cases} B \Leftrightarrow D \\ H \Leftrightarrow E \end{cases} \quad (3)$$

磁弹常数与电弹常数等效:

$$\begin{cases} c^H \Leftrightarrow c^E \\ \beta \Leftrightarrow e \\ \mu^s \Leftrightarrow \varepsilon^s \end{cases} \quad (4)$$

则两个方程所描述的物理问题就可以化归同一形式的数学方程。压电耦合问题的有限元控制方程 [7]:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} [M][0] \\ [0][0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}\} \\ \{\ddot{V}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C][0] \\ [0][0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}\} \\ \{\dot{V}\} \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} [K] & [K^z] \\ [K^z]^T & [K^d] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{V\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{Q\} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

广义位移向量取作结构位移向量 $\{u\}$ 与压电体节点电位向量 $\{V\}$ 的组合; 广义刚度阵中加入机电耦合分量 $[K^z]$ 和介电矩阵分量 $[K^d]$, 具体表达形式在相关手册中有更详细的表述。

参考方程 (5) 可以写出磁致伸缩机电耦合的有限元控制方程:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} [M][0] \\ [0][0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}\} \\ \{\ddot{A}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C][0] \\ [0][0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}\} \\ \{\dot{A}\} \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} [K] & [K_m] \\ [K_m]^T & [K_\mu] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{A\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{\phi\} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

磁致伸缩耦合项出现在广义刚度阵中, $[K]$ 是机械结构刚度阵; $[K_\mu]$ 是磁导率矩阵; $[K_m]$ 是磁致伸缩机电耦合矩阵。

由 (6) 式计算出的广义位移向量和广义力向量中的 $\{A\}$ 和 $\{\phi\}$ 应该具有磁场性质的含义。下面仍根据等效类比关系来阐明 $\{A\}$ 和 $\{\phi\}$ 的物理意义。

在方程 (5) 中广义位移

$$V = \int_{x_1}^{x_2} \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (7)$$

表示 x_2 点与 x_1 点之间的电压 (电势差)。而方程 (6) 中广义位移为:

$$A = \int_{x_1}^{x_2} \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (8)$$

如此看来, A 的物理意义似仍不明朗, 但参见图 1, 沿图示回路积分:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = nI \quad (9)$$

nI 是回路内的安匝数, 注意到

$$\begin{aligned} & \int_{x_2}^{x_3} \vec{H} \cdot d\vec{l} + \int_{x_3}^{x_4} \vec{H} \cdot d\vec{l} + \int_{x_4}^{x_1} \vec{H} \cdot d\vec{l} \\ & \ll \int_{x_1}^{x_2} \vec{H} \cdot d\vec{l} \end{aligned} \quad (10)$$

可得出下面近似表达式:

$$A = \int_{x_1}^{x_2} \vec{H} \cdot d\vec{l} \approx nI \quad (11)$$

可见 A 的物理含义就代表磁致伸缩材料中 x_1x_2 一段上的激磁安匝数。方程 (5) 中广义力

$$Q = \int_{\Sigma} \vec{D} \cdot d\vec{\sigma} \quad (12)$$

代表 Σ 截面上积累的自由电荷。方程 (6) 中广义力为

$$\phi = \int_{\Sigma} \vec{B} \cdot d\vec{\sigma} \quad (13)$$

(13) 式的物理意义很鲜明, 它表示截面 Σ 穿过的磁通量。

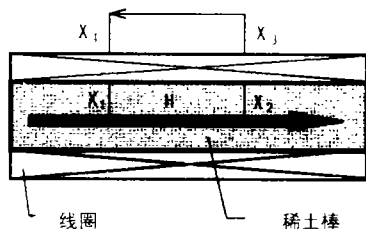


图1 描述广义位移 A 的物理意义示意图

(图中表示磁致伸缩材料中 $H \gg$ 线圈外的 H)

根据这些赋予具体物理意义的广义位移和广义力可以计算出换能器性能参数。

若换能器以恒流 I 工作, 如图2所示, 那么在换能器上的电压降为

$$U = \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (14)$$

换能器的输入阻抗可由下式表示, 其中 Z_0 为静态阻抗。

$$Z = Z_0 + \frac{\partial \phi / \partial t}{I} \quad (15)$$

在求解中, 若同时考虑流体 - 结构耦合作用, 将换能器与周围介质 (足够大区域) 作有限元网格划分, 可一并求出声场参数, 结合上面给出的电输入量 (U , I) 的值便可以计算出一系列换能器性能参数, 如输入阻抗曲线、声源应用声学

级、发射电压响应、发射电流响应、接收灵敏度曲线、指向性图、机械品质因数及频带宽度等等。

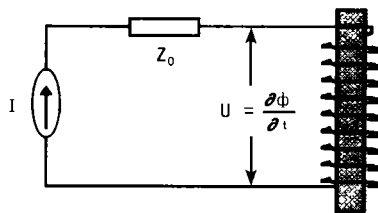


图2 磁致伸缩换能器阻抗关系简图

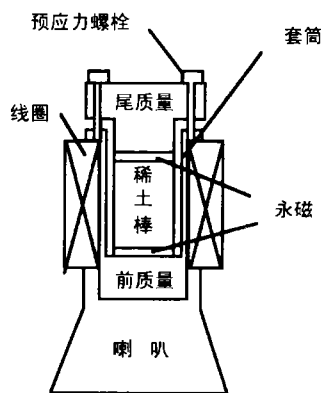


图3 换能器结构示意图

3 换能器设计

设计十几 kHz 以上的频率范围的换能器首先遇到的难题就是涡流损耗大, 依文献 [9], 趋肤深度的计算公式为

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \sigma \mu f}} \quad (16)$$

可计算频率在 14kHz 时 δ 约为 1.6mm, 我们在实验中为了抑制涡流损耗同时保证机械强度, 将 $\phi 20\text{mm}$ 的稀土棒纵向切割成 2mm 的薄片, 再用环氧树脂粘接成棒状。两端用钕铁硼永磁加偏磁场。稀土棒中预应力约 12MPa。

换能器的结构如图3所示, 选择稀土棒尺寸 $\phi 20 \times L 30\text{mm}$, 线圈 $\phi 1.1\text{mm}$ 漆包线 150 匝, 电感 0.512mH, 钕铁硼永磁铁 2 片 $\phi 20 \times L 4$

mm, 最大尺寸 $\phi 44 \times L 83 \text{ mm}$, 重量 (不含电缆) 约 460g。

4 换能器性能的有限元分析及测试结果

利用 ANSYS 软件对所设计的 14kHz 稀土超磁致伸缩换能器进行了有限元模拟, 模拟计算结果与实验测量结果符合较好, 限于篇幅, 本文仅在图 4、图 5 分别给出发射电流响应及接收灵敏度的结果曲线。

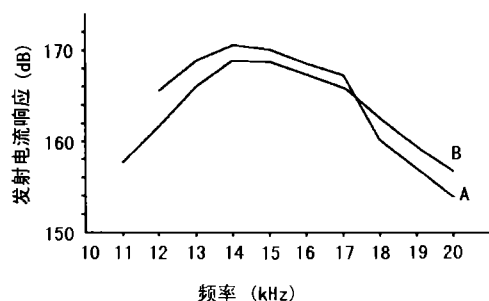


图 4 发射电流响应的模拟与测量结果

(A 为测量结果, B 为有限元模拟结果,
 $0 \text{ dB} = 1 \mu \text{ Pa/A } 1 \text{ m 处}$)

5 结语

有限元法是换能器设计中比较有效的方法之一, 目前大型通用有限元软件程序也有几种, 能够充分开发利用通用软件的功能无疑对提高换能器的设计精度和设计效率具有重要意义, 本文尝试利用 ANSYS 软件分析磁致伸缩型换能器, 理论上给出处理问题的思路和方法, 并通过换能器的实际设计、性能预报及实验测试, 证明思路与方法正确可行的。本文工作可为解决电磁式换能器的有限元分析设计提供参考, 该问题的解决有待进一步研究。

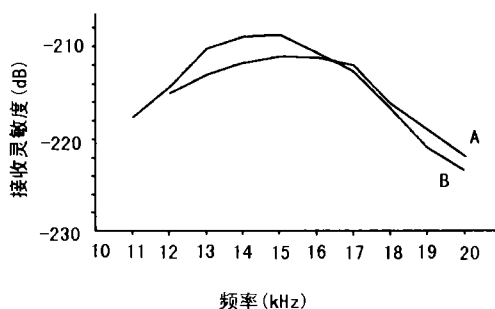


图 5 接收灵敏度的模拟与测量结果

(A 为测量结果, B 为有限元模拟结果, $0 \text{ dB} = 1 \text{ V}/\mu \text{ Pa}$)

本文设计了 14kHz Terfenol-D 纵向换能器, 在设计中充分考虑抑制涡流损耗和易于施加与度量预应力, 发射电流响应为 170dB, -3dB 带宽约 4kHz, $Q=3.5$ 。结果表明, Terfenol-D 材料可以用于设计十几 kHz 水声发射换能器, 并且与压电换能器相比, 具有体积小、电流响应高、Q 值较低等特点。

参 考 文 献

- 1 Yao Qingshan, Bjorno L. 3rd European conference on underwater acoustics. Heraklion, 1996, 1037-1042.
- 2 Zhang L D, Humphrey V F. 3rd European conference on underwater acoustics. Heraklion, 1996, 1013-1018.
- 3 Ring M D. Proceedings of the third international workshop on Transducers for sonics and ultrasonics. Edited by McCollum M D, Hamonic B F, Wilson O B. ORLANDO FLORIDA, 1992, 198-208.
- 4 Quido Pucci. Conference Proceedings UDT (Undersea Defence Technology), 1995, 536-541.
- 5 Yamamoto M, Ishimura H, Hama Y, et al. Conference Proceedings UDT (Undersea Defence Technology), 1996, 109-112.
- 6 刘树功. 声学学报, 1992, 17(1): 17-21.
- 7 ANSYS User's Manual (Rev 5.2), Vol.IV, Chapter11.
- 8 周福洪编著. 水声换能器及基阵. 北京: 国防工业出版社, 1984. 149-161.
- 9 应崇福主编. 超声学. 北京: 科学出版社, 1990. 93-94.