

一种大功率稀土纵向振动换能器的研究

夏铁坚, 周利生, 范进良, 张铁鸣, 曹 荣

(杭州应用声学研究所, 富阳 311400)

摘要: 本文采用通用有限元软件 ANSYS 对一种稀土纵向换能器进行了建模, 利用软件中提供的机械振动、电磁场和耦合场等功能分析了换能器的电磁特性和机械振动特性, 包括几种磁路结构的比较、磁致伸缩效应的建模、换能器的纵向振动模式以及在空气中的阻抗特性。

关键词: 稀土; 换能器; 有限元建模

中图分类号: TB565 文献标识码: A

Study on a high-power rare-earth longitudinal-vibration transducer

XIA Tie-jian, ZHOU Li-sheng, FAN Jin-liang, ZHANG Tie-ming, CAO Rong

(Hangzhou Applied Acoustic Research Institute, Fuyang 311400, China)

Abstract: In this paper, a high-power rare-earth longitudinal-vibration transducer is modeled with the finite element software ANSYS. With the mechanical, electromagnetic and coupled field capabilities available in ANSYS, electromagnetic and vibration characteristics of the transducer are analyzed, including comparison between several magnetic circuits, modeling of the magnetostrictive effects, longitudinal vibration modes and impedance in the air.

Key words: rare earth; transducer; finite element modeling

1 引言

稀土合金(Terfenol-D)是近几年国内外兴起的一类新型的换能器材料,并且已逐步向商品化方向发展。这种材料的最大应变比压电陶瓷大4倍以上(可达2000ppm),而且其能量密度比压电陶瓷大10倍以上,因此稀土材料又被称为超磁致伸缩材料;稀土超磁致伸缩材料的另外一个特点是杨氏模量比较低;因而这种材料出现以后,在低频、大功率换能器中得到了越来越广泛的应用^[1~3]。本文对一种稀土纵向振动换能器进行了建模分析(如图1所示)。

必须注意分析和研究稀土振子在不同偏磁场和不同预应力下,其电磁性能参数和机械弹性参数的变化。一定的偏磁场和预应力状态称为稀土振子的工作点,工作点的不同,稀土振子的性能指标就会有很大的不同。

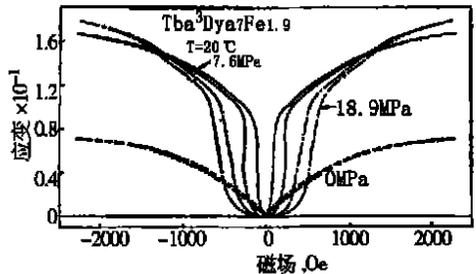


图2 磁致伸缩应变随外加磁场的变化

将稀土材料作成圆棒以后,可以很方便地测出棒内磁致伸缩应变(l/l)随外加磁场变化的关系曲线,如图2所示。图中给出了0MPa、7.6MPa和18.9MPa预应力下,棒内应变随外加磁场的变化关系。从图上可以看出,稀土棒内的磁致伸缩应变是外加磁场的偶函数,即 $l/l = kH^2$ (k 为比例常数,它是外加磁场 H 和预应力 T_{pre} 的函数)。显然,如果我们从零磁场上($H = 0$)外加一个交变正弦磁场(H),则此时棒内产生的磁致伸缩应变存在倍频现象,但如果预先给稀土棒外加一个偏置静态磁场

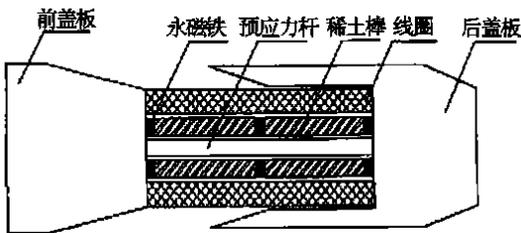


图1 稀土纵向换能器

2 稀土换能器的压磁特性和磁路结构

在分析稀土超磁致伸缩换能器的工作性能时,

收稿日期: 2001-04-20; 修回日期: 2001-08-21

作者简介: 夏铁坚(1974),男,浙江省绍兴县人,工程师,主要从事水声换能器及布阵技术研究。

(H_+), 然后再加一个交流磁场(H_-)。于是棒内的磁致伸缩应变可以表示为:

$$\Delta l/l = k(H_+ + H_-)^2 \quad (1)$$

所以可得:

$$(\Delta l/l)_+ + (\Delta l/l)_- = kH_+^2 + 2kH_+H_- + kH_-^2 \quad (2)$$

当 $H_+ = H_-$ 时, 则有:

$$(\Delta l/l)_- = 2kH_+H_- = dH_- \quad (3)$$

从式(3)可见, 当外加交变磁场比偏置静态磁场小很多时, 棒内磁致伸缩应变的交变部分与外加交变磁场近似成线性关系, 这种现象称为压磁效应, 可将它与压电陶瓷的压电效应相类比, 并可类比出对应的压磁方程。式中的 $d = 2kH_+$ 称为动态磁致伸缩应变常数, 也可称为压磁常数, 它的数值大小与偏置磁场 H_+ 和棒上所加的预应力 T_{pre} 有密切的关系。

通常, 在选好材料和预应力后, 最佳偏置磁场应选在它的磁致伸缩应变曲线中直线部分中央所对应的磁场强度。如果偏置磁场是激磁线圈产生的, 则稀土棒内的偏置磁场比较均匀, 而且通过调节线圈上的直流偏流就可以改变稀土棒内的偏置磁场, 从而达到最佳偏置磁场。但这样会使发射系统的复杂程度大大增加, 不仅要对换能器提供交流信号, 而且还需要一个较大直流偏流以产生偏置磁场, 这会给工程应用带来许多麻烦。解决办法是采用永磁铁来提供偏置磁场, 但这样会造成稀土棒内偏置磁场的不均匀, 而且不容易调节其值的大小, 导致换能器电声效率的降低。因此在换能器设计时, 必须注意换能器内部的磁场分布, 优化磁路结构。下面我们采用通用有限元程序 ANSYS 对几种换能器磁路结构进行分析。

图3中表示的是采用激磁线圈来提供偏置磁场时, 换能器周围的磁场分布。由于换能器是轴对称的, 因而图中给出的是某一剖面中的结果。从图4中可以看出, 此时稀土棒内的磁场比较均匀。

我们首先将长度为100mm的稀土棒分成两段, 然后在棒的两端和中间分别加上厚度为5mm的永磁铁, 此时换能器周围和稀土棒中的磁场分布如图5和图6所示。从图5中可以看出, 由于换能器的磁路是开放式的, 并且稀土棒的磁导率比较小(4.5左右), 因而漏磁情况十分严重。从图6中可以看出, 在这种情况下稀土棒内的磁场差别较大, 中间磁场只有两边的1/4左右。由于偏置磁场的不均匀会使稀土棒不能处于最佳状态, 严重影响了换能器的电声效率。

为了改善换能器的磁路结构, 我们在线圈的外

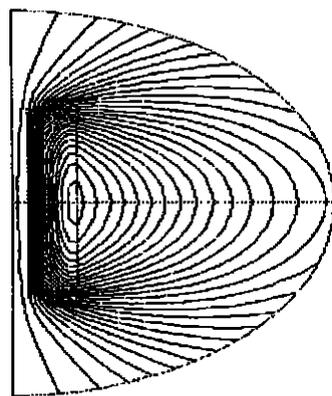


图3 线圈偏磁换能器周围的磁场分布



图4 线圈偏磁稀土棒内的磁场分布

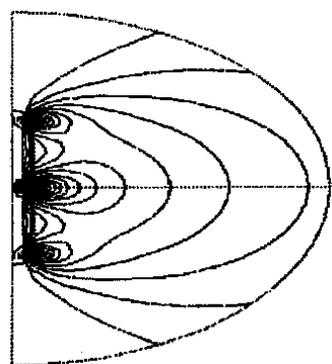


图5 永磁偏磁换能器周围的磁场分布

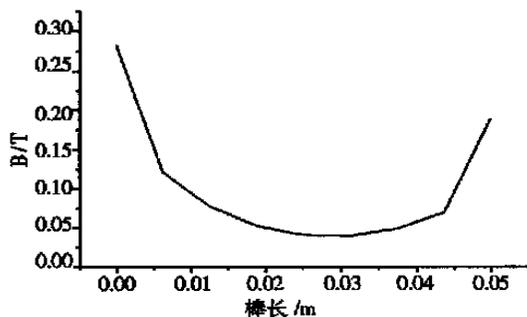


图6 永磁偏磁稀土棒内的磁场分布

面加了一个软铁薄壁圆桶, 以实现换能器的磁路闭合。此时换能器周围及稀土棒内的磁场分布如图 7 和图 8 所示。

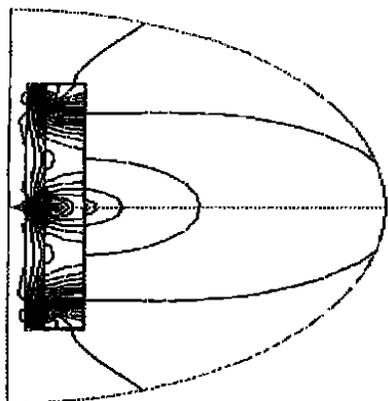


图 7 加薄壁圆桶时的磁场分布

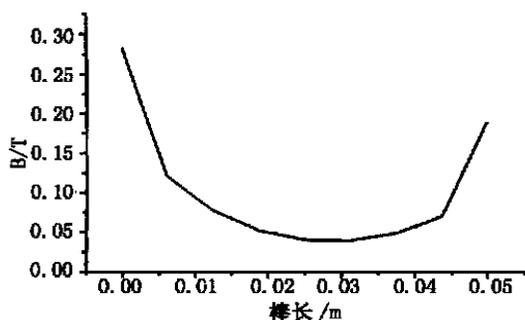


图 8 加薄壁圆桶时稀土棒的磁场分布

从图 7 和图 8 中可以看出, 将换能器的磁路闭合以后, 换能器周围的磁场明显减小, 而且稀土棒内的磁感应强度也有明显增加, 但棒内的磁感应强度仍然不均匀, 这一部分工作还需要进一步深入。

3 稀土换能器的振动特性分析

本节中我们采用通用有限元程序 ANSYS 对稀土换能器的振动特性进行建模分析。ANSYS 程序是目前比较流行的有限元软件之一; 它功能非常全面, 能解决工程中许多学科的实际问题, 如: 结构力学、热学、电磁学、流体力学和耦合场问题等等。而换能器的设计是一个较为复杂的过程, 它涉及到多个物理参数的合理选取, 如力学量、电学量、磁学量、压电量和声场量等等。有限元程序 ANSYS 的多物理场计算功能正好满足了我们的这种要求。但遗憾的是 ANSYS 软件只能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磁耦合问题。要用 ANSYS 程序分析磁致伸缩换能器, 必须要将压电效应和压磁效应进行比拟, 利用压电单元来求

解磁致伸缩问题^[4]。

ANSYS 程序解决压电耦合问题时选择如下压电方程:

$$\begin{cases} [T] = [c]^E [S] - [e] \{E\} \\ \{D\} = [e] [S] + []^S \{E\} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $[T]$ 、 $[S]$ 分别为应力矩阵和应变矩阵; $[c]^E$ 、 $[e]$ 、 $[]^S$ 分别为恒 E 下的弹性矩阵、压电常数矩阵和恒 S 下的介电常数矩阵; $\{E\}$ 、 $\{D\}$ 分别为电场矢量和电位移矢量。

求解力学问题的有限元方程可表示为:

$$[M] \{u\} + [C_m] \{u\} + [K] \{u\} = \{F\} \quad (4)$$

其中, $[M]$ 、 $[C_m]$ 和 $[K]$ 分别为有限元模型的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\{u\}$ 、 $\{F\}$ 分别为模型的位移矢量和力矢量。

求解压电耦合问题时所采用的有限元方程为:

$$\begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{v\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_m] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{v\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [K^Z] \\ [K^Z]^T & [K^d] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{v\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{Q\} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

将广义位移矢量取作结构位移矢量 $\{u\}$ 与压电体节点电位矢量 $\{v\}$ 的组合; 广义质量矩阵和广义阻尼矩阵以零矩阵 $[0]$ 扩充; 而广义刚度矩阵中加入机电耦合分量 $[K^Z]$ 和介电矩阵分量 $[K^d]$; 广义力矢量取作结构力矢量 $\{F\}$ 和压电体节点电荷矢量 $\{Q\}$ 的组合。

我们可以选择与方程 (3) 相对应的压磁方程为:

$$\begin{cases} [T] = [c]^H [S] - [] \{H\} \\ \{B\} = [] [S] + []^S \{H\} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $[c]^H$ 、 $[]$ 、 $[]^S$ 分别为恒 H 下的弹性矩阵、压磁常数矩阵和恒 S 的磁导率矩阵; $\{H\}$ 、 $\{B\}$ 分别为磁场强度矢量和磁感应强度矢量。

从方程 (3) 和方程 (6) 的形式来看, 只要把电学量和磁学量作等效, 即:

$$\{B\} \{D\}, \{H\} \{E\} \quad (7)$$

$$[c]^H [c]^E, [] [e], []^S []^S \quad (8)$$

于是方程 (3) 和方程 (8) 所描述的物理问题就可化为同一形式的数学方程, 因而它们的有限元方程也应具有相同的表现形式, 磁致伸缩耦合的有限元方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{A_H\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_m] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{A_H\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [K^m] \\ [K^m]^T & [K^u] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{A_H\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{u\} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

磁致伸缩耦合项出现在广义刚度矩阵中, $[K]$ 是机械结构刚度矩阵; $[K^u]$ 是磁导率矩阵, 它由材料的磁导率矩阵 $[\mu]^S$ 及单元插值函数决定, 对应于压电耦合有限元方程中的介电矩阵 $[K^d]$; $[K^m]$ 是磁致伸缩耦合矩阵, 由稀土材料的压磁系数矩阵 $[\lambda]$ 和单元的插值函数决定, 对应于压电耦合有限元方程的机电耦合矩阵 $[K^z]$ 。另外, $\{A_H\}$ 、 $\{u\}$ 应该具有磁场性质的物理量, 经推导可得:

$$A_H = \int_L H dl = N_m I \quad (10)$$

即, A_H 表示长度为 L 的稀土棒的激磁安匝数。

$$u = \int B dS \quad (11)$$

表示穿过面积为 S 的磁通量。

在上述讨论的基础上, 我们利用 ANSYS 软件对稀土纵向换能器进行分析。考虑到换能器是轴对



图9 换能器的有限元模型

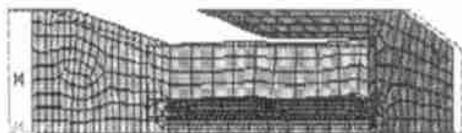


图10 换能器的纵向振动模式

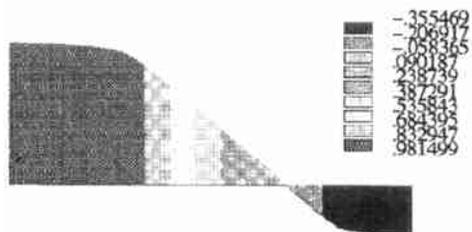


图11 换能器在纵向振动模式上的位移分布

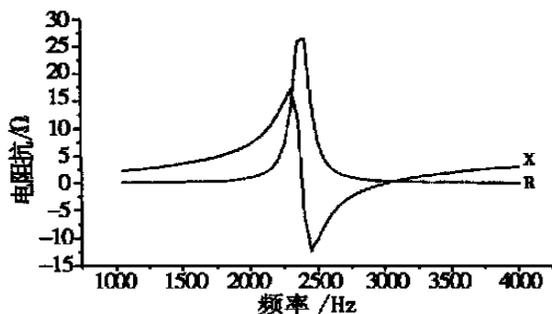


图12 换能器在空气中的阻抗曲线

称的, 我们采用平面模型对其进行分析, 有限元模型如图9所示。

首先, 我们对换能器进行了模态分析, 第一阶纵向振动模式的频率为 2.37kHz, 其振动形状如图10所示。图中虚线表示静态换能器形状, 实线表示振动以后换能器的形状。图11是在这阶模式下换能器的纵向位移分布。从该图中可以看出, 换能器的振动节点在稀土棒的靠后 1/3 处左右, 后盖板的振动位移幅度为前盖板的 1/3 左右。

我们还对换能器在空气中的阻抗特性进行了分析。图12中表示的是当换能器两端的激励电流为 5A 时, 换能器在空气中的阻抗曲线。

4 结 论

通过以上分析, 我们可以得出以下结论:

(1) 要使稀土换能器能进行较好的工作, 必须要给稀土元件施加一个合适的、均匀的偏磁场。当采用激励线圈来产生偏磁场时, 能使稀土棒内部的偏磁场较为均匀, 但这将使发射系统的复杂程度大大增加。当采用永磁铁来产生偏磁场时, 电路中的偏流问题可以避免, 但由于稀土材料的磁导率较低, 漏磁情况较为严重而且棒内磁场不均匀, 因此必须要合理设计磁路结构。

(2) 稀土材料不仅是一种导磁材料而且也是一种导电材料, 因而当外界磁场随时间变化时, 在稀土棒内部会产生涡流损耗; 特别是在超声领域, 由于工作频率较高, 涡流损耗将会严重影响换能器的电声性能和大功率容量的发挥, 因此对于稀土棒应采用薄片切割以减小涡流损耗。

(3) 本文只对一种稀土换能器的初步设计作了一些简单的介绍, 有许多技术工作还需进一步深入探讨。

参考文献:

- [1] 夏铁坚, 周利生, 曹荣, 范进良. 有限元平面波法对型稀土弯张换能器建模分析[A]. 声纳技术研讨会论文集[C]. 杭州, 2000. 150-156.
- [2] G. A. STEEL. A 2 kHz Magnetostrictive Transducer [A]. Proceeding of the third international workshop on Transducers for sonics and ultrasonics[C]. Florida, U. S. A., 1992. 250-258.
- [3] 周利生, 曹荣, 唐良雨, 秦维玉. 多边形稀土换能器[J]. 声学与电子工程, 1996, 41: 8-17.
- [4] 莫喜平. 新型弯张换能器的研究与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 1998. 11-21.