

# 超磁致伸缩驱动器及有限元分析方法的研究

贾宇辉, 谭久彬

(哈尔滨工业大学自动化测试及控制系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 新型超磁致伸缩材料  $TbDyFe$  具有输出力大、位移分辨力高及位移范围大等特点, 将其应用于微位移驱动器中, 将极大的提高驱动器的性能指标, 从而推动超精加工技术的发展。文中介绍了应用超磁致伸缩材料研制的驱动器的结构及性能, 并利用有限元方法对建立磁-机械耦合模型进行分析, 以利于计算机的模拟仿真, 对驱动器进行分析及设计。

**关键词:** 超磁致伸缩; 微位移驱动器; 磁-机械耦合; 有限元法

**中图分类号:** TB115, TP211.53 **文献标识码:** A

## 1 引言

随着人们了解物质结构向更深层次发展的不断需要, 纳米科学及纳米技术在高科技研究中发挥着越来越重要的作用。电子束光刻, X射线光刻及扫描隧道显微术等纳米加工方法已在机械、电子、光学、物理、化学等领域的微机构制备中得到了应用。实现纳米级加工的关键技术之一是如何在加工过程中使工具或工件得到稳定可靠的微量位移<sup>[1]</sup>。一种新型的超磁致伸缩材料的出现, 使人们意识到其应用于微位移驱动领域的广阔前景。基于超磁致伸缩材料的驱动器-超磁致伸缩驱动器以其输出力大、位移分辨力高、位移范围大等特点在超精密定位系统中有着广阔的应用前景。它克服了压电陶瓷驱动器由于采用叠片结构带来的漂移现象, 同时由于其工作在低压范围内, 相对于压电陶瓷在高压下工作带来的防止漏电等要求, 具有结构简单的特点。

磁致伸缩是耦合的磁-机械现象, 此现象出现在铁磁材料中, 其中的磁和机械特性有着紧密的联系, 因而, 在驱动器分析设计中, 可以建立磁-机械耦合模型, 并利用有限元法对其静态模型进行分析, 以提高驱动器的效率。

## 2 材料特性及模型

### 2.1 超磁致伸缩材料

所谓磁致伸缩指的是材料在磁场作用下, 其长度发生伸长或缩短的现象。目前发现, 具有立方莱夫斯相结构的  $RFe_2$  类化合物  $Tb_xDy_{(1-x)}Fe_2$  在室温环境下, 具有极大的磁致伸缩量, 其饱和磁致伸缩应变可以达到  $2 \times 10^{-3}$  以上, 相当于传统材料的 20~50 倍, 为压电陶瓷的 15~20 倍。同时, 这种材料具有输出力大的特点, 可以达几百牛顿以上。

### 2.2 材料的特性

由于超磁致伸缩材料所表现出的非线性, 必要的实验特性曲线是建立模型的前提, 在模型中, 材料的非线性被由实验数据拟合出的曲线所代替, 建立非线性方程<sup>[2]</sup>。

### 2.3 模型的建立

超磁致伸缩微驱动器模型的建立是将磁场及机械场分别计算, 然后通过磁场力将磁场与机械场耦合在一起, 耦合过程是基于虚功原理, 建立在能量变分的基础上。

#### 2.3.1 磁方面的模型

在磁致伸缩器件中, 磁场方程一般为:

$$\nabla \times (v \nabla \times A) = J$$

式中:  $v$ ——磁导率;  $A$ ——磁矢单位;  $J$ ——电流密度

其能量泛函的一般形式为:

$$Fv = \int_V \left( \frac{B}{v} H dB - JA \right) dV$$

在轴对称系统中, 根据圆柱坐标系的旋度公式<sup>[3]</sup>:

$$\nabla \times \mathbf{A} = \frac{1}{r} \begin{vmatrix} r_0 & r\theta_0 & Z_0 \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial Z} \\ A_r & rA_\theta & A_z \end{vmatrix}$$

由于  $J = J_0\theta$  所以  $A = A_\theta\theta$

这样, 以上方程就变为:

$$\frac{\partial}{\partial R} \left( \frac{v}{R} \frac{\partial R A_\theta}{\partial R} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left( \frac{v}{R} \frac{\partial R A_\theta}{\partial Z} \right) = - J_\theta$$

对应的变分问题是:

$$T_{(RA_\theta)} = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \left\{ \left[ \frac{v}{R} \left( \frac{\partial R A_\theta}{\partial R} \right)^2 + \frac{v}{R} \left( \frac{\partial R A_\theta}{\partial Z} \right)^2 \right] - 2J_\theta R A_\theta \right\} dR dZ$$

利用有限元方法将其离散化, 导出下面的代数矩阵方程:

$$[M][A] = [S]$$

其中:  $M$ ——磁刚性矩阵;  $A$ ——磁矢量矩阵;  $S$ ——源矢量

### 2.3.2 机械方面的模型

机械应变的一般方程为:

$$\frac{E}{2(1 + \alpha)} \Delta u + \frac{E}{2(1 + \alpha)(1 - 2\alpha)} \nabla (\nabla \cdot u) + f = 0$$

其中:  $E$  为弹性模量;  $\alpha$  为泊松系数;  $u$  为位移;  $f$  为体积力。

磁致伸缩材料中体积力的计算是通过虚功原理, 由磁场能量对位移求导得出的。在计算中, 认为磁通量维持恒定不变。

$$f = - \int_{\Omega} (h^T \cdot dB) d\Omega$$

式中:  $h^T$  为磁场强度, 由于受预压力影响, 因而用  $h^T$  表示。

这样弹性场中的能量泛函就可以表示为:

$$\int_v \frac{1}{2} \sigma_u \epsilon_u dv - \int_v f v dv = 0$$

式中:  $\sigma$  为磁致伸缩棒中的应力;  $\epsilon$  为磁致伸缩棒的应变

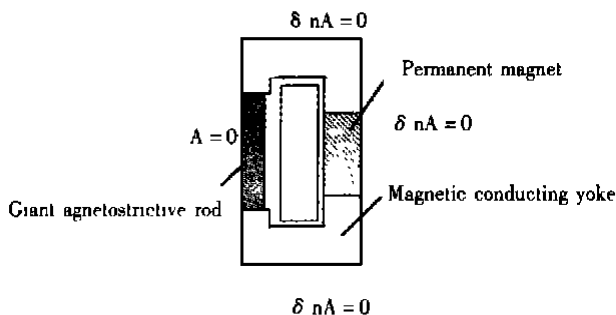
经有限元离散后, 矩阵为:

$$[K][U] = [F]$$

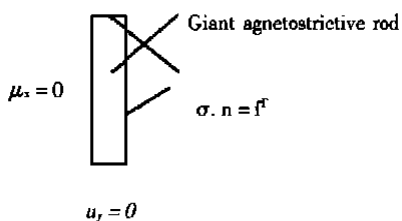
其中:  $K$ ——机械刚性矩阵;  $U$ ——未知位移量矩阵;  $F$ ——节点力矢量矩阵。

### 2.3.3 耦合模型

在耦合模型的有限元分析中, 由于驱动器为轴对称结构, 因而可以将其按轴对称二维平面结构分析。在磁场的计算中, 因为导磁轭铁的磁导率很大, 可以近似看作没有漏磁。永磁铁的充磁方向为轴向, 在侧面也作为没有漏磁的近似处理。在机械场的计算中, 近似认为除超磁致伸缩棒外, 都没有机械变形。



(a) Magnetic field critical conditions



(b) Mechanical field critical conditions

Fig. 1 Boundary conditions enactment of finite element analysis

在变形的情况下, 耦合问题利用连续磁-机械有限元计算的迭代方法处理。磁等式和机械等式被分别解出, 耦合过程通过预矫正过程实现。对一个初始预变形状态, 计算磁场, 随后计算磁力分布。然后预变形形态被修正以进行下一个计算, 直至收敛<sup>[4]</sup>。

在模型的分析中, 超磁致伸缩材料的压力特

性及弹性模量随磁场变化特性曲线预先输入到计算机中, 并采用线性插值的办法进行拟合。磁滞特性是通过对于上升及下降段取平均值的办法来实现的。通过模型的建立及分析, 可以在驱动器设计中, 利用计算机对驱动器进行仿真, 使驱动器设计更加合理。

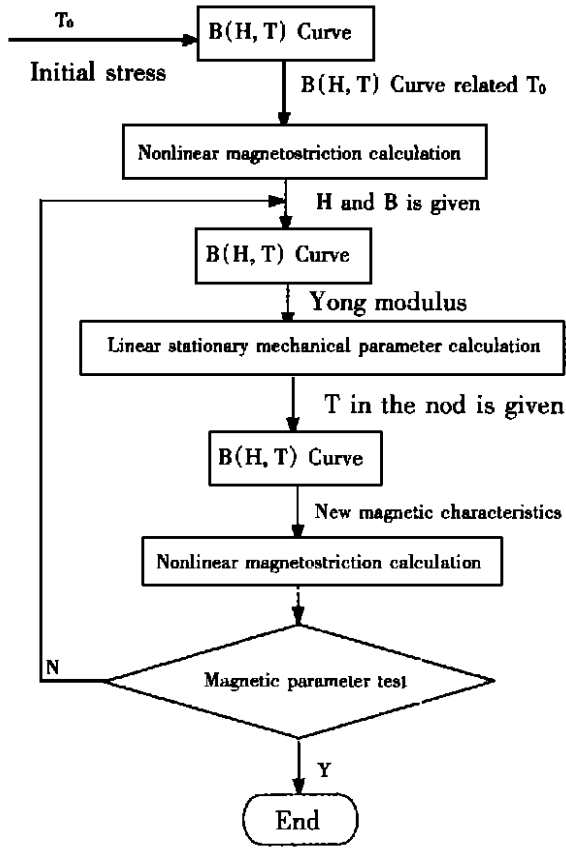


Fig. 2 Frame chart of coupling calculation

### 3 超磁致伸缩驱动系统

微位移驱动器是利用超磁致伸缩材料在外部磁场发生变化时,其材料发生伸长形变这一特点研制的,具体结构见图3。驱动器是由磁致伸缩棒、永磁铁套筒、驱动用螺线管线圈、轭铁及弹性钢片等组成。由永磁铁产生一个偏置磁场,从而使驱动器工作在伸缩率最大及良好的线性段,我们采用钕铁硼作为永磁材料,产生5000e的偏置磁场。另外,通过弹性钢片,调整磁致伸缩棒上的预紧力,从而使磁滞最小。并且,为了防止线圈温升带来的影响,设计了强制水冷装置,将温度的变化控制在0.01以内<sup>[5]</sup>。通过改变驱动线圈中电流的大小,来改变棒中磁场的大小,进而控制位移。在驱动器中,磁场构成闭合回路,从而降低了漏磁,并且也不会受到外部磁场的影响,这样仪器可以和其它精密仪器放在一起使用,而不会互相干扰。

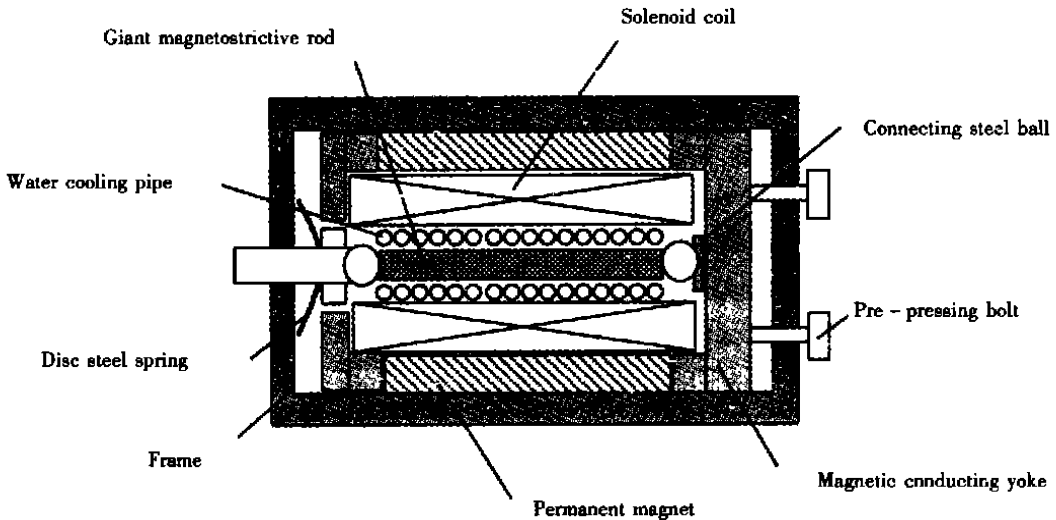


Fig. 3 Diagram of actuator structure

### 4 实验特性及曲线

将驱动器置于恒温室中的隔震平台上,用自行研制的分辨力为0.5nm的电容量移传感器监

测驱动器的位移,测得位移输出曲线如图4所示。

由图4可以看出,超磁致伸缩微位移驱动器的位移分辨力优于1nm,位移范围可以达到40μm以上。利用计算机对驱动器进行修正,将进一步改善驱动器的性能,提高线性,降低磁滞。

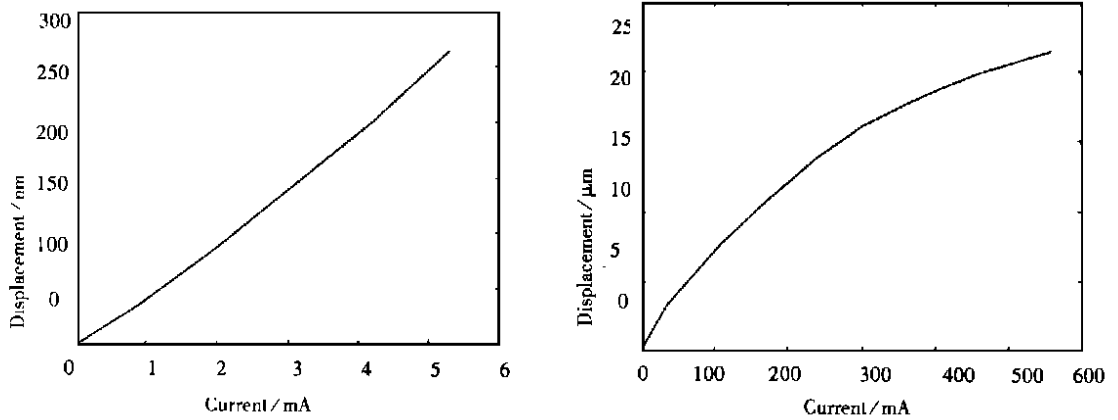


Fig. 4 Displacement characteristics

## 5 结 论

(1) 采用超磁致伸缩材料研制的微位移驱动器具有位移范围大, 位移分辨率高的特点。

(2) 驱动器结构简单, 为刚性结构, 不存在蠕变及漂移。

(3) 利用有限元方法对磁-机械耦合模型进行分析, 方便超磁致伸缩器件的研究, 并可通过计算

机对位移特性进行修正。

(4) 通过温控系统可以保证位移精度, 并随着材料特性的改善, 驱动器的性能指标也将得到极大的提高。

总之, 将超磁致伸缩材料引入到微位移驱动器中, 将极大的提高微位移驱动系统的性能指标, 并将进一步推动精密及超精密加工领域的发展。

### 参考文献:

- [1] 李旦, 郭永丰, 董申. 磁致伸缩纳米级微量进给机构的实验研究[J]. 仪器仪表学报, 1995, 16(1): 126-128.
- [2] Benbouzid M E H, Spomic S A. Computer-aided Design of Magnetostrictive Devices Using Terfenol-D[J]. ETEP, 1997, 7(5): 351-359.
- [3] 许永兴. 电磁场理论及计算[M]. 上海: 同济大学出版社, 1994. 67-69.
- [4] Ren Z, Lonescu B, Besbes M. Calculation of mechanical deformation of magnetic materials in electromagnetic devices[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(3): 1873-1876.
- [5] 江田宏, 小野间隆, 佐桥政司等. 超磁歪アクチュエータに関する研究[J]. 精密工学会志, 1991, 57(3): 532-537.

## Giant magnetostrictive actuator and finite element model

JIA Yu-hui, TAN Jiu-bin

(Department of Automated Test Measurement and Control,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The new giant magnetostrictive material TbDyFe has the trait of output power large, displacement resolving power high and displacement range great. If the material is used in the micro-displacement actuator, the performance index of displacement actuator will be greatly advanced, which will impel the development of giant precision process technique. In the paper, the structure and the performance of giant magnetostrictive actuator are introduced, and the model of magnet-machine coupling is analysed by the finite element method. It will rebound to the computer simulation and the actuator analysis and its design.

**Key words:** giant magnetostrictive; micro-displacement; magnet-machine coupling; finite element model

作者简介: 贾宇辉(1971-), 男, 黑龙江省哈尔滨市人。1996年入哈尔滨工业大学自动化测试与控制系攻读博士学位, 主要从事微位移驱动器方面的研究。

谭久彬, 哈尔滨工业大学自动化测试与控制系主任, 教授, 博士生导师, 中国计量测试学会(CSM)常务理事, 全国计量仪器专业委员会主任委员, 国际测量与仪器委员会(ICMI)委员, 多次获国家及部级科技进步奖。