

磁致伸缩薄膜动态驱动特性的研究*

张永顺

(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室 大连 116024)

刘广军

(加拿大瑞尔森大学航天工程系 多伦多 M5B 2K3 加拿大)

贾振元

(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室 大连 116024)

摘要:提出一种新的磁致伸缩薄膜动态驱动特性的研究方法,其原理是以磁致伸缩薄膜复合梁的等效形变为基础,将磁致伸缩驱动应力转换为等效驱动力矩,建立磁致伸缩薄膜的强迫振动动态模型,通过受迫振动理论来研究磁致伸缩薄膜的动态特性。对该模型进行了仿真计算和试验验证,表明该模型可以描述磁致伸缩薄膜的动态行为。该方法对薄膜驱动器的运动分析与结构优化,最终实现基于磁场自感知的超磁致伸缩薄膜驱动器的闭环控制具有参考意义。

关键词:超磁致伸缩薄膜 等效力矩 动态模型 动态特性

中图分类号: TP242.2

0 前言

超磁致伸缩薄膜(GMF)在室温低磁场下具有磁致伸缩系数大,磁机耦合系数高,响应速度快以及非接触式驱动等优点,在智能驱动器的研究中占有重要的地位。因此各国学者在 GMF 的制备,最佳成份调整,提高低磁场性能方面做了大量的工作,并取得了很大的进展。超磁致伸缩薄膜驱动器在微机电系统中已经显示出广阔的应用前景,国外已经研制成功了各种薄膜型微机电产品,如微型泵、微型阀、线性超声波微电动机和微行走机构等^[1,2],为其今后的研究及工业产品上的应用奠定了坚实的基础。

超磁致伸缩薄膜一般采用物理气相沉积方法制备,即把 GMM 沉积在适当厚度的衬底材料上。常用衬底材料有硅、石英、镀青铜和聚合物薄膜等,按设计要求加工成数十至数百微米厚的薄片。镀膜主要采用磁控溅射法,调整薄膜成分有 3 种途径:

制取成分连续变化的靶材,但这种方法成本很高。

采用多靶共沉积技术^[3],即利用多个单质靶同时溅射沉积于同一衬底材料上,这对设备有特殊要求。

在纯铁靶材上镶嵌一定数量的单质稀土金属条,通过改变稀土金属条的数量来调整薄膜的成分,此法较为简便。

目前,磁致伸缩薄膜主要以悬臂梁或膜片的形

式用于微型驱动器,其性能主要通过磁致伸缩系数 I_s 来衡量, I_s 通过检测悬臂梁自由端的变形量计算得出。事实上磁致伸缩系数描述的只是薄膜的静态特性。目前,研制的以磁致伸缩薄膜为驱动器的游动微型机器人和微驱动电动机,其特点是以交变磁场驱动,为了确定微型机器人和微驱动电动机的运动,首先要研究磁致伸缩薄膜的动态行为。由于磁致伸缩系数 I_s 是非线性的,因此磁致伸缩薄膜动态行为过程比较复杂。提出了一种在小磁场驱动条件下,基于等效磁致伸缩力矩的磁致伸缩薄膜强迫振动动态模型,该模型对满足一定应用条件的超磁致伸缩薄膜驱动器的运动分析与综合,最终进行结构优化设计,以实现基于磁场自感知的超磁致伸缩薄膜驱动器的闭环控制具有参考意义。

1 磁致伸缩薄膜的驱动

为了提高驱动电流的快速响应,消除电感对动态电流的阻碍作用,功放采用深度电流负反馈放大电路,使驱动线圈中的电流响应得到大幅度的提高,驱动波形可以为正弦波、矩形波和三角波,实际驱动时正弦波效果较好。为了防止薄膜驱动时发生倍频现象,正弦波的下半部分应该滤掉,磁场系统的驱动电流如图 1 所示。输入的交变电流为

$$I_1 = I_0 \sin \omega t$$

式中 I_0 ——输入电流的幅值
 ω ——输入电流的角频率

* 国家自然科学基金(60275034, 50275021)和辽宁省自然科学基金(20021061, 20032119)资助项目。20040803 收到初稿, 20050117 收到修改稿

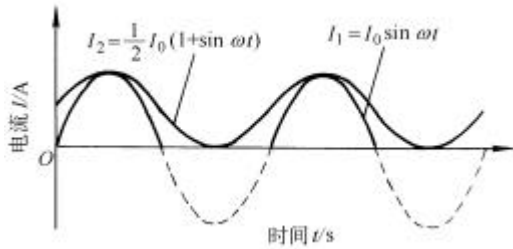


图 1 磁致伸缩薄膜的驱动电流

将正弦电流波的下部分滤掉时的正半波可近似用以下函数来表示

$$I_2 = \frac{1}{2} I_0 (1 + \sin \omega t) \quad (1)$$

结构优化分析表明两个线圈间的磁场比较均匀，因此检测磁场系统采用两个线圈，中间用来夹持薄膜和激光探头的安装，如图 2 所示，试验采用美国 Micro-Track 激光检测系统。

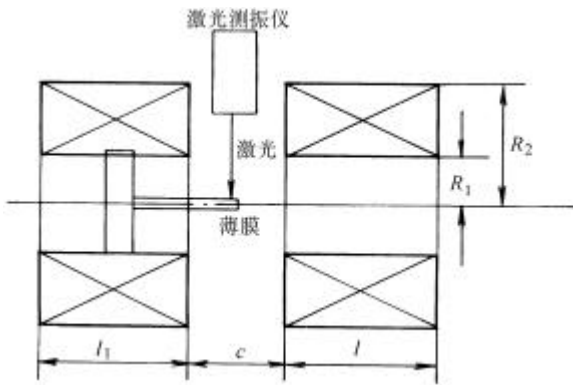


图 2 激励磁场与检测示意图

输入交变电流在激励线圈轴线上中心产生的磁场 H 为^[4]

$$H = \frac{NIR_1}{2b(R_2 - R_1)} \left[b \ln \frac{a + \sqrt{a^2 + b^2}}{1 + \sqrt{1 + b^2}} - g \ln \frac{a + \sqrt{a^2 + g^2}}{1 + \sqrt{1 + g^2}} \right] \quad (2)$$

式中 $b = \frac{l_1 + 0.5c}{R_1}$

$a = \frac{R_2}{R_1}$

$g = \frac{0.5c}{R_1}$

- N ——激励线圈的匝数
- l_1 ——激励线圈的长度
- R_1 ——激励线圈内半径
- R_2 ——激励线圈外半径
- c ——激励线圈间的距离

2 磁致伸缩薄膜等效驱动力矩

磁致伸缩材料在磁场作用下将产生伸缩现象，这种效应的大小常用磁致伸缩系数 I_s 来描述。通过试验得出施加磁场与磁致伸缩系数 I_s 的变化曲线，如图 3 所示，用插补法对试验数据处理可得磁致伸缩系数函数表达式为^[5,6]

$$I_s(H) = L[1 - \exp(-aH^b)] + kH \quad (3)$$

式中 L, a, b, k ——插补法得到的待定系数
当驱动磁场很小时有 $I_s(H) = kH$ 。

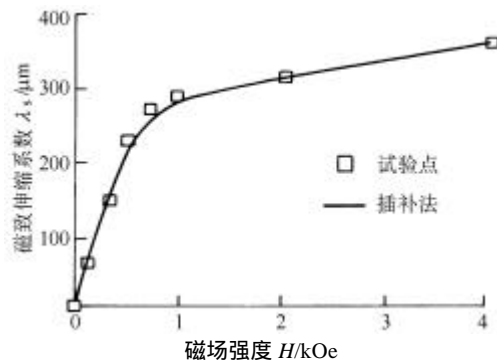


图 3 磁致伸缩系数 I_s 的试验插补曲线

因此磁致伸缩薄膜的平均内应力 s_m 为

$$s_m = -I_s E_1 / (1 + m) \quad (4)$$

式中 E_1 ——GMM 薄膜的弹性模量

m ——GMM 薄膜的泊松比

下面以磁致伸缩薄膜为复合梁，采用悬臂梁结构模型进行应力分析，以便得出磁致伸缩等效驱动力矩。磁致伸缩薄膜悬臂梁的结构如图 4 所示，磁致伸缩薄膜材料为 TbDyFe。

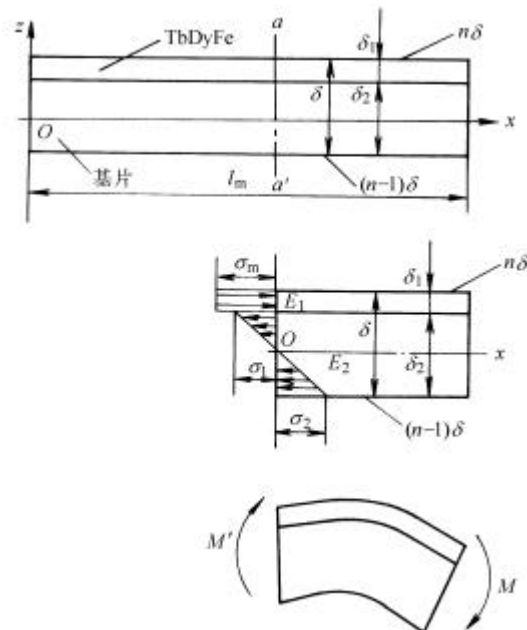


图 4 磁致伸缩薄膜的应力与等效力矩分析

图 4 中, E_1 为 GMM 的弹性模量, E_2 为基片的弹性模量, d_1 为薄膜中 GMM 的厚度, d_2 为薄膜中基片的厚度, d 为薄膜总厚度, l_m 为薄膜悬臂梁总长度。

假设过 $O-x$ 轴的截面是中性层, 薄膜中性层的位置可通过下面的公式计算^[7]

$$\int_{(n-1)d}^{nd} E(z)zdz = 0 \quad (5)$$

式中 z —— 薄膜厚度方向的坐标轴

$E(z)$ —— 关于厚度的弹性模量函数

中性层应在 $z=0$ 处。 d 表示薄膜的总厚度, 其中 n 为小于 1 的待定系数, 则 $z=nd$ 、 $z=(n-1)d$ 分别表示薄膜的下表面和上表面。

因此复合梁结构的中性层位置可由下式确定

$$\int_{(n-1)d}^{(n-1)d+d_2} E_2 z dz + \int_{(n-1)d+d_2}^{nd} E_1 z dz = 0 \quad (6)$$

由式(6)求出 n 即求出了中性层位置。

图 4 所示为磁致伸缩薄膜伸长驱动薄膜产生弯曲时, 梁截面 $a-a'$ 的应力分布情况, 由于 GMM 溅射薄膜的厚度很薄, 其伸长时的压应力 s_m 可以视为均匀常量, 基片中性层上部的内应力是拉应力, 下部是压应力。

此时, 复合梁的等效力矩为

$$M = \int_{(n-1)d}^{nd} E(z)I(z)zBdz \quad (7)$$

式中 B —— 薄膜的宽度

$I(z)$ —— 由磁场引起的关于厚度的应变

积分上式得

$$M = s_m B d_1 \left[(n-1)d + d_2 + \frac{d_1}{2} \right] - \frac{B s_1}{3} [(n-1)d + d_2]^2 - \frac{B s_2}{3} [(n-1)d]^2$$

由应力关系有下式

$$s_2 = \frac{E_2}{E_1} s_m$$

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{nd - d_1}{(1-n)d}$$

代入力矩关系式有

$$M = s_m B d_1 \left(nd - \frac{d_1}{2} \right) - \frac{B E_2 s_m}{3 E_1} \frac{[(1-n)d]^3 + [nd - d_1]^3}{(nd - d_1)}$$

$$\text{令 } d = B d_1 \left(nd - \frac{d_1}{2} \right) - \frac{B E_2}{3 E_1} \frac{[(1-n)d]^3 + [nd - d_1]^3}{(nd - d_1)}$$

则

$$M = d s_m \quad (8)$$

如图 4 所示为在其右端施加与复合梁内应力等效力矩 M 时, 磁致伸缩薄膜产生弯曲变形的情形。于是就可以用受强振动理论来分析复合梁结构磁致

伸缩薄膜的动态行为。

3 磁致伸缩薄膜动态方程的建立

下面以图 4 的悬臂梁结构为力学模型, 在外部施加交变等效力矩 $M(t)$ 的作用下, 来分析磁致伸缩薄膜的振动动态特性。

引入正规坐标, 运用虚功法导出力矩 $M(t)$ 引起反应的典型运动方程可以表示为^[8,9]

$$\frac{m}{m} \ddot{x}_i + \frac{c_{eq}}{m} \dot{x}_i + p_i^2 x_i = \frac{M(t) X'_{il}}{m}$$

$$i = 1, 2, 3, L \quad (9)$$

式中 f_i —— 时间函数

m —— 悬臂梁单位长度上的质量

c_{eq} —— 等效粘滞阻尼系数

p_i —— 固有第 i 阶角频率

$$p_i = b_i^2 \sqrt{EI/m}$$

X'_{il} —— 在悬臂梁末端 l_m 处的正规函数

由悬臂梁边界条件得正规函数 X_i 表达式为

$$X_i = C_i [\cosh b_i x - \cos b_i x + x_i (\sinh b_i x - \sin b_i x)]$$

$$\text{式中 } x_i = -\frac{\sinh b_i l_m - \sin b_i l_m}{\cosh b_i l_m + \cos b_i l_m}$$

$$b_i = \left(i - \frac{1}{2} \right) \pi / l_m \quad i = 1, 2, 3, L$$

$$b_1 = 1.875 / l_m$$

$$b_2 = 4.694 / l_m$$

$$b_3 = 7.855 / l_m$$

由量纲一化条件 $\int_0^{l_m} X_i^2 dx = 1$, 得 $C_i = \sqrt{\frac{1}{l_m}}$ 。

把薄膜悬臂梁当作是复合梁, 则梁的抗弯刚度为^[10]

$$EI = \frac{B h_2^3 d_1 E_1 E_2}{12(d_1 E_1 + d_2 E_2)} k_1$$

$$\text{式中 } k_1 = 4 + 6 \frac{d_1}{d_2} + 4 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 + \frac{E_1}{E_2} \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^3 + \frac{E_2 d_2}{E_1 d_1}$$

引入常数 $K = \frac{1}{2} I_0 R N \frac{E_1}{1+m} d$, $z = \frac{c_{eq}}{2 p_i m}$, 则式(9)

为

$$\ddot{x}_i + 2z p_i \dot{x}_i + p_i^2 x_i = \frac{K X'_{il}}{m} \sin \omega t + \frac{K X'_{il}}{m}$$

$$i = 1, 2, 3, L \quad (10)$$

由杜哈梅积分得

$$f_i = \frac{\exp(-\alpha p_i t)}{q_i} \int_0^t \exp(-\alpha p_i t') \frac{M(t) X'_{il}}{m} \sin q_i(t-t') dt'$$

式中， $q_i = \sqrt{1-z^2} p_i$ ， z 为结构阻尼系数，它和薄膜的结构、应力分布情况和空气的阻尼等条件有关，假设为线形阻尼。由初始条件得待定系数

$$c_1 = \frac{f_{i0} + \alpha p_i f_{i0}}{q_i}, c_2 = f_{i0},$$

$$f_i = \exp(-\alpha p_i t)(c_1 \sin q_i t + c_2 \cos q_i t) + f \sin(\omega t - y) + \frac{K X'_{il}}{m p_i^2}$$

式中前项为暂态解，后项为强迫振动的稳态解。暂态解随时间推移变为零，因此

$$f_i = f \sin(\omega t - y) + \frac{K X'_{il}}{m p_i^2}$$

式中 $y = \arctan\left(\frac{2z p_i \omega}{p_i^2 - \omega^2}\right)$

$$f = \frac{K X'_{il} / m}{\sqrt{(p_i^2 - \omega^2)^2 + (2z p_i \omega)^2}}$$

力矩 $M(t)$ 引起悬臂梁振动反应为

$$y = \sum_{i=1}^{\infty} X_i f_i \quad i=1,2,3,L$$

悬臂梁的稳态反应为

$$y = \sum_{i=1}^{\infty} \left[X_i f \sin(\omega t - y) + X_i \frac{K X'_{il}}{m p_i^2} \right] \quad (11)$$

4 薄膜动态特性的计算与仿真

试验采用的薄膜基片为聚酰亚胺薄膜，所用参量取值如表所示，驱动电流取 0.7 A。

表 磁致伸缩薄膜及驱动的相关参数

| 参量 | 数值 | 参量 | 数值 |
|---|--------------------|---------------------------|------|
| 薄膜长度 L_m / mm | 45 | 薄膜弹性模量 E_1 / GPa | 26.5 |
| 薄膜厚度 $d_1 / \mu\text{m}$ | 1 | 基片弹性模量 E_2 / GPa | 2.2 |
| 基片厚度 $d_1 / \mu\text{m}$ | 50 | 薄膜泊松比 m | 0 |
| 薄膜密度 $\rho_1 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 9.25×10^3 | 结构阻尼系数 z | 0.5 |
| 基片密度 $\rho_2 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 1.43×10^3 | 插补系数 a | 378 |
| 线圈内半径 R_1 / mm | 20 | 插补系数 b | 133 |
| 线圈外半径 R_2 / mm | 66 | 插补系数 k | 25 |
| 线圈长度 l_1 / mm | 100 | 插补系数 L | 270 |
| 薄膜宽度 b / mm | 8 | | |

代入数值，应用 MATLAB 对磁致伸缩薄膜悬臂梁的强迫阻尼振动仿真可得出前三阶振型曲线，如图 5 所示。

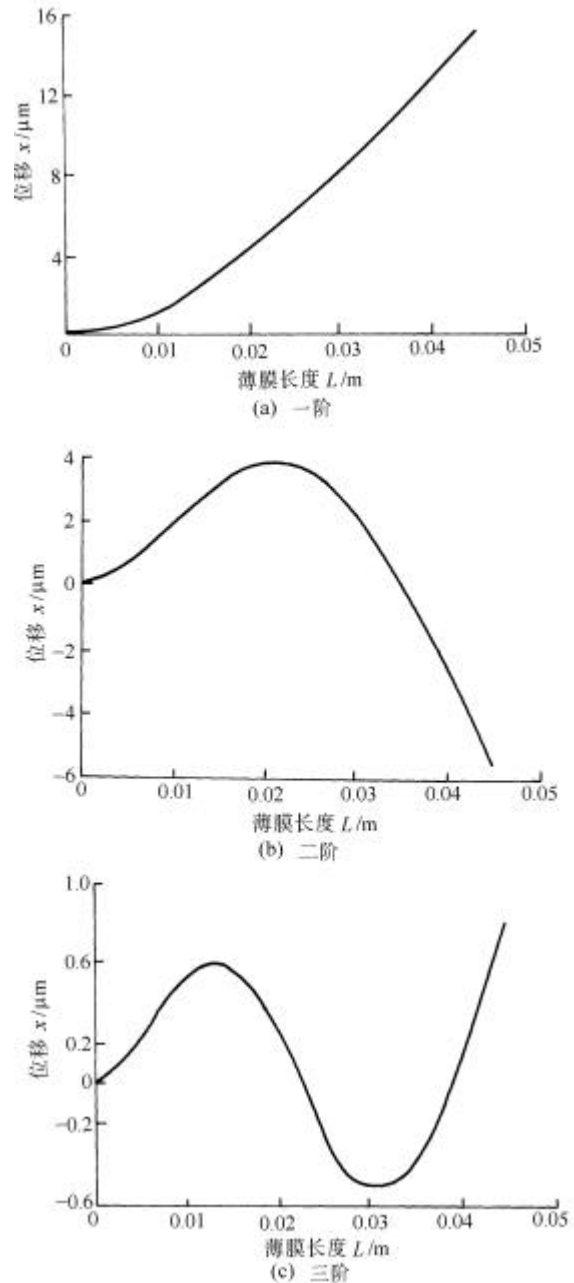


图 5 磁致伸缩薄膜各阶谐振反应曲线

从图 5 中可以看出，在谐振频率下，一阶振幅较二阶、三阶都大。任意频率的振动为前三阶振型的叠加。

由于理论分析与实际存在误差，因此在某一频率下，为了较准确地描述磁致伸缩薄膜的动态行为，可通过对式(10)中的磁场强度和结构阻尼系数进行修正，进而理论上实现驱动器的运动分析与结构优化设计。取驱动频率为 16 Hz，驱动电流 0.7 A，结构阻尼系数 0.5，对薄膜的动态特性进行仿真。

通过仿真计算磁致伸缩薄膜端点振动的幅值为 53.4 μm 。仿真计算曲线如图 6 所示。

基于这一仿真结果，下面进行验证试验，对仿真结果进行修正。

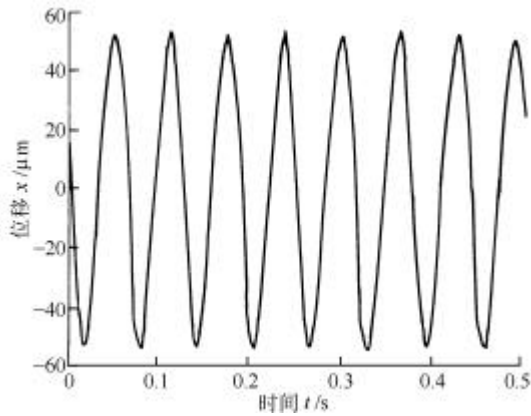


图6 $I=0.7\text{ A}$ 时磁致伸缩薄膜端点振动反应曲线

4 试验与验证

研制了磁致伸缩薄膜检测试验装置,可以用来测量磁致伸缩薄膜的静态和动态特性。如图7所示。



图7 磁致伸缩薄膜检测实验装置

取驱动频率的范围为0到100 Hz,计算出不同频率的振动幅度值,并通过试验修正,结果表明能以很高的精度描述薄膜的动态行为,下面仅以驱动频率为16 Hz为例,介绍该动态修正方法,驱动电流为0.7 A时,对磁致伸缩薄膜端点的振动进行测试,测试结果如图8所示。幅值为45 μm 。

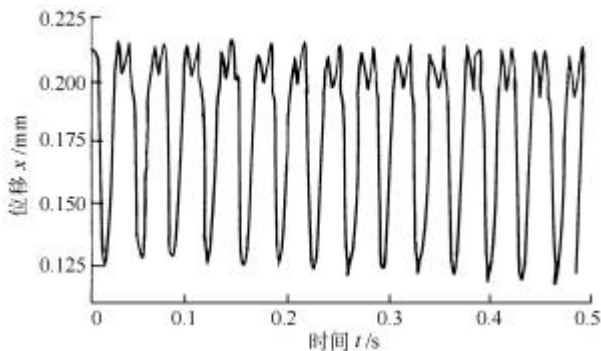


图8 电流为0.7 A时薄膜端点的振动测试曲线

通过振幅的比值对理论分析的磁场进行修正,

在相同频率下,以0.2 A的电流再进行仿真,仿真计算曲线如图9所示。其振幅为10.7 μm 。

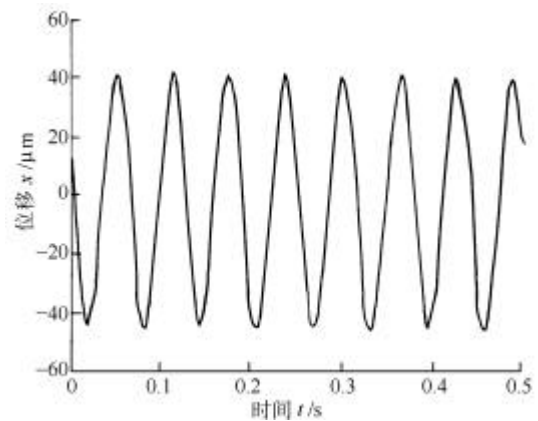


图9 $I=0.2\text{ A}$ 时磁致伸缩薄膜端点振动反应曲线

再通过试验对修正的结果进行验证,测试结果如图10所示。其振幅为10.5 μm 。可见修正后的仿真结果与实际测量结果接近。

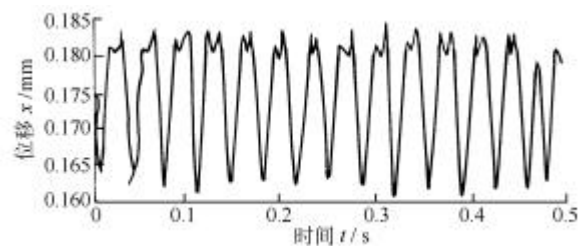


图10 电流为0.2 A时薄膜端点的振动测试曲线

5 结论

理论计算的结果比实测值偏大的原因是由于磁致伸缩薄膜存在磁滞现象,使位移输出明显减小;磁致伸缩薄膜结构阻尼系数很难准确求得,假设为线性阻尼,也会引起误差;检测系统同时也存在着系统测量误差。

通过实测表明,提出的一种基于等效磁致伸缩力矩的磁致伸缩薄膜振动模型可以在一定条件下描述磁致伸缩薄膜的动态行为。该模型对磁致伸缩薄膜谐振频率的设计和优化,实现基于超磁致伸缩薄膜驱动器的微型机械的运动特性分析,最终实现基于磁场自感知的超磁致伸缩薄膜驱动器的闭环控制具有参考意义。

参 考 文 献

- 1 Quant E. Giant Magnetostrictive thin film materials and applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 1997, 258(8): 126 ~ 132

- 2 Claevssen F, Lhermet N, Letty R, et al. Actuators, transducers and motors based on magnetostrictive materials. *Journal of Alloys and Compounds*, 1997,
- 3 谢海清, 靳永敏, 杨德明, 等. 磁致伸缩薄膜材料及其应用. *中国有色金属学报*, 2000, 10(1): 266 ~ 270
- 4 张宝裕, 刘恒基. 磁场的产生. 机械工业出版社, 1987
- 5 Christophe B, Gilbert R, Gerard M. Nonlinear finite element modeling of magneto-mechanical phenomenon in giant magnetostrictive thin films. *IEEE Transactions on Magnetism*, 1997, 33(2): 1 620 ~ 1 623
- 6 Honda T, Aral K I, Yamaguchi M. Fabrication of magnetostrictive actuators using rare earth (Tb, Sm)-Fe thin films (invited). *J. Appl. Phys.*, 1994, 76(10): 6 994 ~ 6 998
- 7 Takashi H, Ken I, A, Masahiro Y. Basic properties of magnetostrictive actuators using Tb-Fe thin film. *IEICE transactions on Electron*, 1997, 76(10): 232 ~ 237
- 8 铁摩辛柯 S, 杨 D H, 小韦孚 W. 工程中的振动问题. 人民铁道出版社, 1978
- 9 王守忠. 振动理论习题详解. 天津: 天津科学技术出版社, 1982
- 10 罗克 R J, 杨 W C. 应力应变公式. 中国建筑工业出版社, 1985

ANALYSIS ON DYNAMIC CHARACTERISTICS OF GIANT MAGNETOSTRICTIVE THIN FILMS

Zhang Yongshun

*(Key Laboratory for Dalian University of Technology
Precision & Non-traditional Machining of Ministry of
Education, Dalian 116024)*

Liu Guangjun

*(Department of Aerospace Engineering,
Ryerson University, Toronto M5B2K3, Canada)*

Jia Zhenyuan

*(Key Laboratory for Dalian University of Technology,
Precision & Non-traditional Machining of Ministry of
Education, Dalian 116024)*

Abstract : Research on dynamic characteristics of giant magnetostrictive thin films is crucial important for further description of its kinematics behavior of micro mobile mechanism, therefore a new method about its dynamic characteristics analysis on giant magnetostrictive thin films is proposed, whose principle is to analyze its dynamic behavior of giant magnetostrictive thin films based on force oscillation theory, by establishing its force oscillation model on which equivalent drive torque, converted from magnetostrictive drive stress, is exerted based on equivalent deformation of compound magnetostrictive thin films beam. Simulations and experiments on the model show its effectiveness to describe the dynamic behavior of giant magnetostrictive thin films. This method has significance for reference to its dynamics analysis, as well as structural design and optimization as finally to realize its close-up control on giant magnetostrictive thin films actuator by

Keywords: Giant magnetostriction thin films

Equivalent torque Dynamic model

Dynamic characteristics

作者简介: 张永顺, 男, 1965 年出生, 工学博士, 副教授。主要从事机电控制及自动化、机器人技术、微型机器人和磁致伸缩微型电-机械转换器等方面的研究工作, 发表论文 40 余篇。

E-mail: zyshun@dlut.edu.cn