

## 超磁致伸缩电-机转换器的数学模型及其应用

徐鸿翔<sup>1</sup>, 朱玉川<sup>1,2</sup>, 蒋鑫<sup>1</sup>, 陈龙<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 江苏省精密与微细制造技术重点实验室 江苏南京 210016;  
2. 浙江大学 流体动力与机电系统国家重点实验室 浙江杭州 310027)

**摘要:** 超磁致伸缩电-机转换器具有许多优点,并在机电领域显示出良好的应用前景。众多学者建立了大量的磁致伸缩模型,但这些模型种类繁杂,每种模型仅适合特定场合,急需对这些模型进行梳理。文中对超磁致伸缩电-机转换器的典型模型进行分析,比较了这些模型的预测效果与实测结果,最后给出这些模型在超磁致伸缩电-机转换器中的适用场合,为超磁致伸缩电-机转换器的优化设计、整体性能预估、控制及使用提供参考。

**关键词:** 超磁致伸缩材料;磁-机耦合;J-A 模型;Presiach 模型

中图分类号: TP216 文献标识码: A 文章编号: 1002-1841(2013)10-0100-03

## Modeling of Giant Magnetostrictive Actuators and Its Applications

XU Hong-xiang<sup>1</sup>, ZHU Yu-chuan<sup>1,2</sup>, JIANG Xin<sup>1</sup>, CHEN Long<sup>1</sup>

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-manufacturing Technology, Nanjing 210016, China; 2. Zhejiang University State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The advantages of giant magnetostrictive actuators have been widely accepted, which makes it demonstrate good application prospect in the mechanical and electrical domain. Many scholars have established multitudinous models for giant magnetostrictive actuators, but each model was only suitable for specific occasions, these models are needed to be sorted. In this paper, the forecast results of several typical models, which is for giant magnetostrictive actuators, and its measured results were compared. The applicable occasions of these models were given through analysing advantages and disadvantages of each model. The investigation provides basic theoretical guidance for optimization design and integrity property analysis as well as controlling and using the giant magnetostrictive actuators.

**Key words:** giant magnetostrictive material; magnetic-elastic coupling; J-A model; Presiach model

### 0 引言

超磁致伸缩材料(Giant magnetostrictive material, GMM)是继稀土永磁、稀土磁光和稀土高温超导材料之后的又一种重要的新型功能材料。由该材料制成的超磁致伸缩电-机转换器具有伸缩系数大、输出力大、响应速度快、准确度高特点,并且能够在低电压下驱动。最初利用 GMM 优异的物理特性而开发的水声换能器已实现商品化生产,并在水下通信、海底油田探测及跟踪定位等方面得到广泛的应用;随着对该材料研究的进一步深入, GMM 的应用领域已从最初的水声换能器逐步扩展到精密和超精密定位、微型电-机转换器、微机电系统以及纳米技术等高精度、高稳定度的领域,具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。

对于 GMM 的具体应用来说,最核心的问题是能否准确描述 GMM 电-机转换器所涉及电学、磁学或力学的输入量与输出量之间的关系,然而由于 GMM 固有的非线性的磁-机耦合行为以及其与频率相关的磁滞行为,给 GMM 电-机转换器的应用带来了极大的困难。为了有效设计和使用 GMM 电-机转换器,众多学者和科研机构或从物理学原理,或从数学唯象,

或者从其他角度出发,建立了很多描述 GMM 及其电-机转换器输出-输入关系的相关模型,但这些模型种类繁杂,适用条件各不相同,尚无一种理想的模型可以准确描述 GMM 及其电-机转换器的本征特性与磁滞特性,每种模型只是从某一角度在一定范围内反映 GMM 及其电-机转换器的情况。文中从 GMM 线性模型及其扩展型、GMM 的物理机理磁滞模型以及 GMM 的数学唯象磁滞模型方面,对 GMM 电-机转换器的典型数学模型进行详细梳理,并给出各典型模型的适用场合。

### 1 GMM 的线性模型

GMM 电-机转换器在工作状态时,受到机械压力场和电磁场双重耦合场的作用,其输入与输出存在着磁-机耦合本征非线性和与频率相关的磁滞特性<sup>[2]</sup>。目前,对 GMM 模型的理论描述主要由 2 条路径进行:只针对磁致伸材料缩的本征磁-机耦合特性开展研究,不考虑磁致伸缩材料的与频率相关的磁滞特性;针对 GMM 磁滞特性进行研究。

对 GMM 磁-机耦合的本征模型研究,最初 Clark 等提出线性压磁模型<sup>[3]</sup>,它由热力学关系导出形式具体的本构关系,再根据实验规律,对某些项进行取舍,不考虑 GMM 的应力与磁化的耦合作用,选取应力  $\sigma$  和磁场  $H$  为自变量,工作点附近狭小范围内描述 GMM 内部应力  $\sigma$ 、磁致应变  $\varepsilon$ 、磁场  $H$  和磁感应强度  $B$  之间耦合行为,表达式如下:

基金项目: 国家自然科学基金项目(51175243); 航空科学基金项目(20110752006); 流体动力与机电系统国家重点实验室 2011 年度开发基金项目(GZKF-201116)  
收稿日期: 2012-09-24 收修改稿日期: 2013-05-22

$$\begin{cases} \varepsilon = \sigma/E^H + dH \\ B = d\sigma + \mu H \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $E^H$ 、 $\mu$  分别为 GMM 的杨氏模量和磁导率。

### 2 GMM 线性模型的扩展型

针对线性压磁模型只适用于描述 GMM 电-机转换器工作点附近狭小范围内的线性行为的缺点,国内外许多学者分别从不同方面对其进行扩展,建立磁致伸缩材料的磁-机非线性耦合本征模型。Carman<sup>[4]</sup>等引入包含  $\sigma$  与磁场  $H$  的耦合项来描述应力对磁化和磁致伸缩应变的影响,并且应变  $\varepsilon$  与磁场  $H$  的平方成正比,由此提出一个标准平方模型,该模型预测结果与实验结果的对比如图 1 所示,可以看出标准平方模型能够模拟预压力较大时低磁场下 ( $H < 10$  kA/m) 磁致应变的变化,但是不能模拟磁致应变的“跳跃”现象<sup>[1]</sup>。图中,  $1 \text{ Oe} = 79.578 \text{ A/m}$ 。

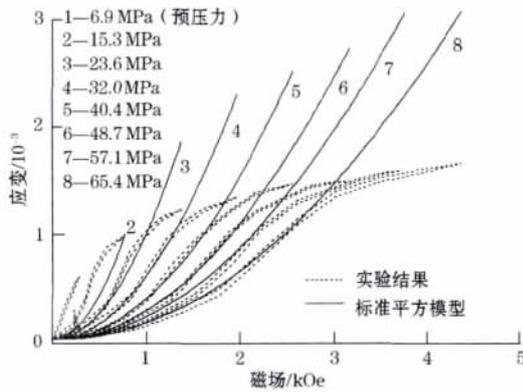


图 1 标准平方模型预测结果与实验结果对比

为了克服标准平方模型的缺点,王永平等<sup>[5]</sup>对标准平方模型进行研究,引进材料函数来模拟 GMM 的最大压磁系数与预应力的关系,提出了双曲正切模型和磁畴翻转密度模型。这两个模型使用了非多项式的复杂函数来模拟磁致应变的饱和,其预测值在强磁场下比标准平方模型要好得多,但是与实验值相比仍有较大误差,如图 2、图 3 所示。

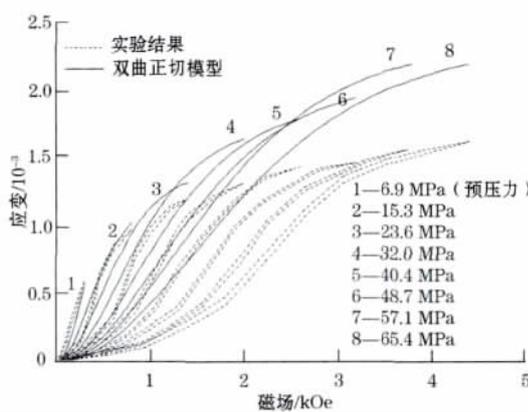


图 2 双曲正切模型预测结果与实验结果对比

此外 Duenans 等<sup>[6]</sup>提出用磁化强度  $M$  代替磁场  $H$  作为自变量,并假定磁致应变  $\varepsilon$  与磁化强度  $M$  的平方成正比,由此提出一个更为简洁的本征模型。在低磁场下,该模型不同预压力下的磁致应变预测值与实验值吻合良好,如图 4 所示,但该模型的磁致应变项不包含  $\sigma$  和  $M$  的耦合,因此也不能反映磁致

伸缩“跳跃”现象。

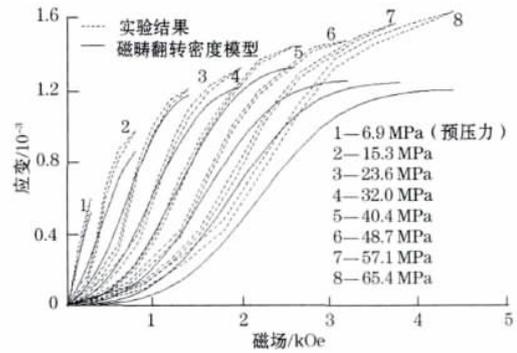


图 3 磁畴翻转密度模型预测结果与实验结果对比

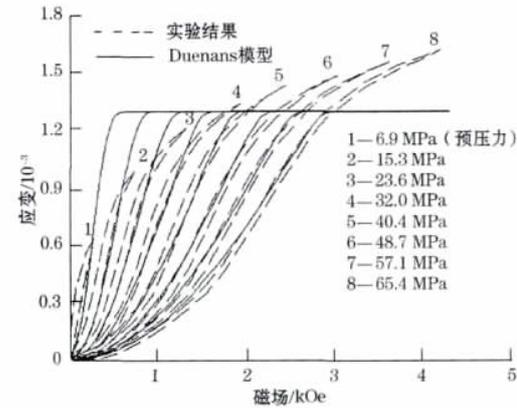


图 4 Duenans 模型预测结果与实验结果对比

郑晓静和刘信恩<sup>[7]</sup>从宏观热力学关系出发,以  $\sigma$  和  $M$  为自变量,结合预应力影响磁致应变饱和值的微观物理机制及其变化规律,建立了一个新的一维 GMM 非线性本构模型,即 Z-L 模型。相比之前的模型,该模型首次成功描述了磁致伸缩材料的“跳跃”现象,同时也能够较精确描述在低磁场下 GMM 不同预压力对应的磁滞伸缩情况,如图 5 所示。

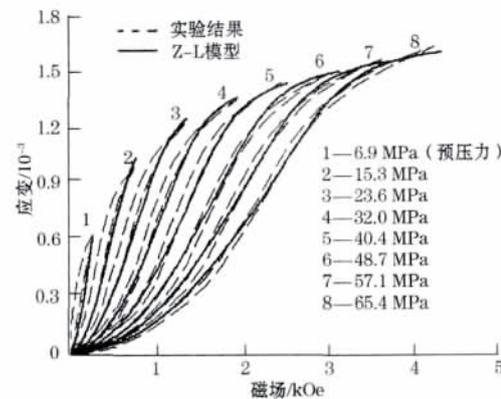


图 5 Z-L 模型预测结果与实验结果对比

### 3 GMM 的非线性磁滞模型

#### 3.1 基于物理机理的磁滞模型

如前所述,GMM 线性模型及其扩展型能够较好地描述在低磁场下 GMM 的磁致应变情况以及“跳跃”现象,因此可利用它们来确定 GMM 电-机转换器的物理参数与其性能指标之间的关系,促进 GMM 电-机转换器结构的初步设计,但由于这些模型均没有考虑 GMM 磁化过程中存在能量损耗,所以无法描

述 GMM 固有的磁滞特性。国内外学者为描述 GMM 磁滞行为进行了大量的建模工作,并取得了一些成果,建模大致分为两类:基于物理机理的磁滞模型;数学唯象的磁滞模型。物理机理模型依据探索研究对象磁滞产生的物理原因,并用各种物理参量来构建模型,其中以 J-A<sup>[8]</sup>模型及其扩展模型为典型代表。

J-A 模型是从铁磁材料的畴壁理论出发,认为铁磁材料磁化过程中存在畴壁的不可逆移动或不可逆转动,这种不可逆磁化过程导致铁磁体热动自由能方程中存在亚稳态,从而形成磁滞。该模型首先需确定铁磁材料的有效磁场  $H_e$ ,依据 Boltzman 原理确定畴壁的无磁滞磁化强度  $M_{an}$ ,进而确定畴壁位移产生的不可逆磁化强度  $M_{in}$ 与畴壁弯曲产生的可逆磁化强度  $M_{rev}$ ,最后总磁化强度  $M$ 为  $M_{in}$ 和  $M_{rev}$ 之和,这样建立起磁化强度与外加磁场的磁滞关系。

然而,由于 J-A 模型的方程均为隐式方程,方程中包含的 5 个参数之间又存在着复杂的耦合作用,给实际应用中的辨识带来困难。为了方便 J-A 模型在应用中的实现,很多学者对 J-A 模型进行了扩展与完善,使得 J-A 模型的物理思想更加清晰,更容易实现,例如 Calkins 等<sup>[3]</sup>采用 J-A 扩展模型和二次畴转磁致伸缩模型建立 GMM 器件的输出-输入模型,与实验结果对比如图 6 所示。

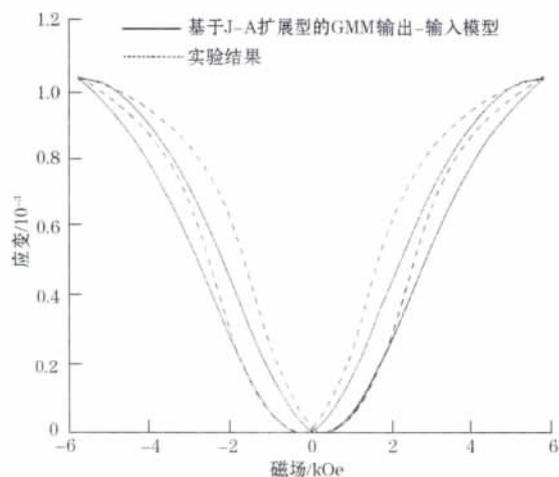


图 6 Calkins 的 J-A 扩展模型预测结果与实测对比

### 3.2 基于数学唯象的磁滞模型

数学唯象磁滞模型则是用纯数学工具描述观察到的现象,与产生的物理机制无关,而这类模型中,Preisach<sup>[9]</sup>模型及其扩展型为应用最广泛的一种,因其具有对复杂磁滞行为建模能力强、通用性好、逆模型获得容易等优点,Preisach 逆模型常被用于控制,可实现 GMM 器件磁滞非线性全逆补偿,如 Tan<sup>[10]</sup>利用 Preisach 逆模型作补偿,效果如图 7 所示。

### 4 结束语

(1) GMM 的线性压磁模型及其扩展型描述的是低磁场下 GMM 磁-机耦合的本征特性,有利于较好地理解 GMM 电-机转换器的物理参数与其性能指标之间的关系,为磁致伸缩器件的初步设计、应用提供参考依据。

(2) 在中高磁场下工作的 GMM 电-机转换器,其磁滞非线性变得非常显著,需要建立描述 GMM 电-机转换器磁滞非线性的数学模型。而基于物理机理的 J-A 磁滞非线性模型及其

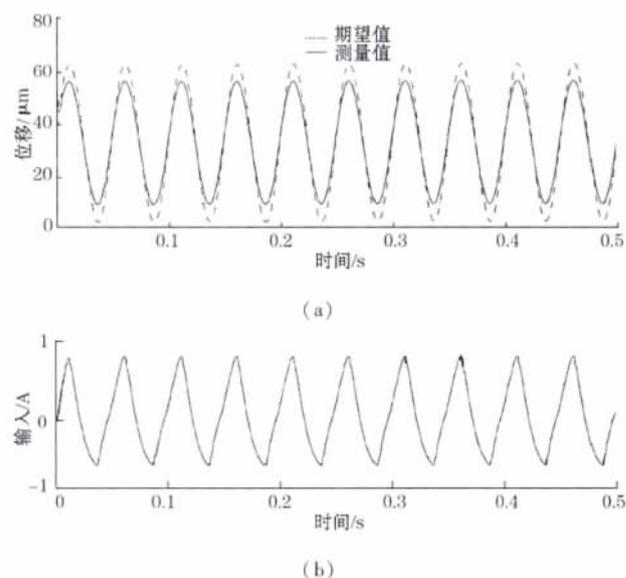


图 7 GMM 执行器的 Preisach 逆模型控制器位移跟踪性能  
扩展型的方程因其物理思想清晰,应用容易实现,适合于数值分析 GMM 器件所涉及的电学、磁学或力学的输入量与输出量之间的关系,进而促进 GMM 器件的优化设计,但其全逆模型难以确定。

(3) 基于数学唯象的 Preisach 磁滞模型及其扩展型最大的优势在于其通用性好、逆模型容易获得,因此适合用来构建 GMM 电-机转换器的完全逆模型,作前馈逆补偿控制器。

### 参考文献:

- [1] 贾振元,郭东明.超磁致伸缩材料微位移执行器原理与应用.北京:科学出版社,2008.
  - [2] 王传礼.基于 GMM 转换器喷嘴挡板阀伺服阀的研究[学位论文].杭州:浙江大学,2005.
  - [3] CLARK A E. Magnetostrictive rare earth-Fe<sub>2</sub> compounds. In: E. P. Wohlfarth (Ed), Ferromagnetic materials, North-Holland Amsterdam, 1980, 1(3): 531-589.
  - [4] CARMAN G P, MITROVIC M. Nonlinear constitutive relations for magnetostrictive materials with application to 1-D problems. J. Intell. Mater. Syst. Struct., 1995, 6(3): 673-683.
  - [5] 万永平,方岱宁.磁致伸缩材料的非线性本构关系.力学学报,2001,33(6): 749-797.
  - [6] DUENANS T, CARMAN G P. Magnetostrictive composite material systems analytical and experimental. Materials Research Society Symposium, Advances in Materials for Smart Systems-Fundamentals and Applications, 1996.
  - [7] ZHENG X J, LIU X E. A nonlinear constitutive model for Terfenol-D rods. J. Appl. Phys., 2005, 9(7): 897-901.
  - [8] JILES D C, ATHERTON D L. Ferromagnetic hysteresis. IEEE Trans. Magn., 1983, 19(5): 2183-2185.
  - [9] MAYERGOYZ I D. Mathematical models of hysteresis. New York: Springer Verlag, 1991.
  - [10] TAN X B, BARA J S. Modeling and control of hysteresis in magnetostrictive actuators. Automatica, 2004, 40(9): 469-480.
- 作者简介:徐鸿翔(1989-),硕士,主要研究方向为流体传动与控制、机电控制及其自动化。E-mail: xhx\_1989@126.com