

基于虚功原理的 Galfenol 悬臂梁建模与带载特性研究*

舒 亮¹ 吴桂初¹ 陈定方²

(1. 温州大学浙江省低压电器智能技术重点实验室, 温州 325035; 2. 武汉理工大学智能制造与控制研究所, 武汉 430063)

摘要: 研究了带载条件下 Galfenol 驱动器的磁机耦合建模方法, 利用离散型能量均分模型 (Discrete energy-averaged model) 对 Galfenol 的磁滞非线性饱和和非线性进行建模, 可以同时描述合金对于磁场和应力的依赖性。采用虚功原理将能量均分模型与驱动器的结构模型进行动力学耦合, 研究了带载条件下驱动器的输出特性, 并对不同 Galfenol 覆盖比时驱动器的驱动能力进行了研究, 将计算结果与稀土超磁致伸缩材料 (Terfenol-D) 和压电陶瓷进行了对比。研究结果表明, 驱动器的带载能力随着 Galfenol 悬臂梁材料覆盖比的增加而增加, 材料内部承受的张力也随之增大; Galfenol 合金良好的机械性能可以克服负载增加时所承受的张力的变化, 解决其他智能材料易产生的失效问题。

关键词: Galfenol 悬臂梁 虚功原理 建模 带载

中图分类号: TH113 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)10-0403-08

Coupled Model and Characterization of Loaded Galfenol Beam Actuator Based on Virtual Work Principle

Shu Liang¹ Wu Guichu¹ Chen Dingfang²

(1. The Key Laboratory of Low-voltage Apparatus Intellectual Technology of Zhejiang, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China
2. Institute of Intelligent Manufacturing and Control, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: Galfenol is a magnetostrictive material which can be safely operated in tension, compression and shear. The coupled modeling framework of a loaded Galfenol actuator was studied. Field and stress dependent hysteresis and saturation were modeled with the discrete energy-averaged model. The dynamic model was developed by coupling the structural model with the energy-averaged model. Coupled governing equations were obtained by employing the virtual work principle and the model was discretized with Galerkin method. Simulation results showed that the proposed model had proper accuracy to predict the response of the beam actuator. In order to analyze the characteristics when the actuator was loaded with different forces, the output characterization of the loaded Galfenol actuator was studied by using different coverage ratios of the Galfenol cantilever. Calculation results were compared with Terfenol-D and the piezoelectric ceramics. It was shown that the load capacity and the internal tension of the actuator were increased by increasing the coverage ratio of the Galfenol cantilever. With a constant load, the actuator can no longer output positive displacement when the coverage ratio was relatively small. When Galfenol was loaded with tension, simulation results showed that the internal stress distribution exceeded the yield strength of both Terfenol-D and piezoelectric ceramics. The mechanical strength of Galfenol alloy ensured the material safety when the tension was changed due to the increase of the external loads.

Key words: Galfenol beam actuator Virtual work principle Modeling On load

收稿日期: 2014-10-31 修回日期: 2014-12-18

* 国家自然科学基金资助项目(51205293, 51175395)、浙江省“钱江人才计划”D类计划资助项目(QJD1302003)、浙江省自然科学基金面上资助项目(LY15E050011)和中国博士后科学基金资助项目(2015M571904)

作者简介: 舒亮, 副研究员, 博士, 主要从事智能材料与结构、机电一体化技术和自动化控制技术研究, E-mail: shuliangalbert@163.com

通讯作者: 吴桂初, 教授, 主要从事智能电器技术和嵌入式系统控制技术研究, E-mail: wgc@wzu.edu.cn

引言

Galfenol 合金 (Fe - Ga 合金) 是研究者为了提高材料机械属性而研制的具有较好磁致伸缩性能和机械强度的磁致伸缩合金, 最大拉伸强度可以达到 500 MPa^[1]。Galfenol 合金十分适合于悬臂梁器件的设计与应用, 可有效克服 Terfenol-D 和压电陶瓷等材料脆性较大的物理限制^[2-5]。一些研究者研制的 Galfenol 悬臂梁振动器, 末端悬挂 1.5 kg 负载时仍然可以检测到输出位移; 研制了用于恶劣环境的驱动和传感器件; 利用叠片结构对 Galfenol 悬臂梁磁路进行了设计^[6-13]。

然而 Galfenol 合金与 Terfenol-D、压电等材料一样, 存在磁滞非线性与饱和非线性, 材料与结构之间存在耦合效应, 尤其是动态驱动时, 两者之间耦合关系对于驱动结构动态特性具有重要影响^[14]。文献[13]通过线性压磁方程对 Galfenol 悬臂梁的动力学特性进行了描述。文献[15]采用类似的方法对 Terfenol-D 悬臂梁进行了动力学建模。该类方法的优点在于模型简单, 计算效率高, 但是该方法无法描述材料与结构之间的耦合效应, 仅适用于小范围的线性工作区间, 当需要考虑小磁滞环和饱和非线性时, 尤其是需要考虑负载应力对于磁致伸缩特性影响时, 需要寻求磁-机耦合的动力学建模方法。文献[16]建立了一种用于层压板结构的传感器耦合模型, 通过 Armstrong 模型对 Galfenol 的磁滞非线性进行了描述。文献[17]建立了一种用于驱动的分层压板驱动模型, 可以描述静态和准静态磁场驱动时分层压板内部应力和应变的变化, 但这些建模方法都无法描述动态条件下 Galfenol 驱动器的响应, 并且都局限于负载为空载时的响应。

本文研究带载条件下 Galfenol 悬臂梁的动力学耦合建模方法, 利用离散型能量均分模型 (Discrete energy-averaged model) 对 Galfenol 的磁滞非线性和饱和非线性进行建模, 采用虚功原理将能量均分模型与驱动器的结构模型进行动力学耦合, 研究其带载时的输出特性。

1 悬臂梁结构驱动器

1.1 工作原理

带载条件下具有悬臂梁结构的驱动器工作原理如图 1 所示, 非导磁衬底与 Galfenol 薄片进行层压, Galfenol 合金在驱动磁场激励下产生磁致伸缩应变, 从而带动负载 $f(t, x)$ 对外输出位移, 其末端位移可以表示为

$$D = -\frac{1}{2}\kappa L^2$$

(1)

式中 D ——末端输出位移
 κ ——悬臂梁曲率 L ——悬臂梁长度
从式(1)可以看出, 长度越大, 则悬臂梁的输出位移越大。然而增加悬臂梁的长度, 其刚度系数变小, 带载能力将被减弱。长度 L 一定时, 增加曲率 κ 可以获得更大的位移, 然而材料内部所承受的张力也将增加, 普通脆性较大的智能材料无法承受这样的载荷, 提高驱动材料的机械强度, 可以满足在大挠度条件下提高驱动器带载能力的需求。

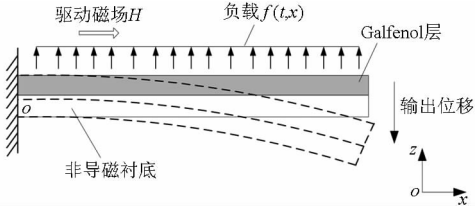


图 1 带载条件下驱动器工作原理
Fig. 1 Working principle of loaded actuator

为了对驱动机构进行动力学建模, 首先采用虚功原理建立机构的整体控制方程。由于驱动机构依靠 Galfenol 产生的磁致伸缩应变进行驱动, 在整体控制方程中需要一个子模型来描述 Galfenol 合金的磁致伸缩特性。采用能量均分模型对合金的特性进行描述, 进而耦合到机构的整体控制方程中, 最后采用有限元方法对耦合方程进行数值求解。

1.2 机构整体动力学模型

采用虚功原理对悬臂梁机构的动力学响应进行建模, 其基本方程可以表示为

$$-\delta W_i - \delta W_e = 0$$

(2)

式中 δW_i ——系统内力所做的虚拟功
 δW_e ——系统外力所做的虚拟功

文献[18]中假设系统在空载状态下运行, 外力为零, 即外部虚拟功为零, 对悬臂梁动力学特性进行了建模, 同时假设悬臂梁中 Galfenol 覆盖比为 100%。为了研究带载条件下 Galfenol 驱动器的动力学响应, 本文设驱动器承受了负载密度函数 $f(t, x)$, 并认为悬臂梁设计过程中 Galfenol 层采用了不同的覆盖比, 如图 2 所示, 衬底层厚度为 t_s , 长度为 L , Galfenol 层厚度为 t_g , 长度为 L_2 。

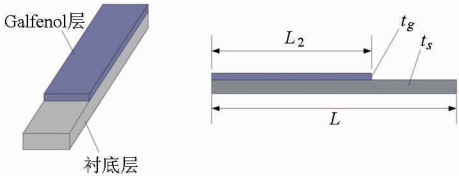


图 2 悬臂梁中 Galfenol 层采用不同长度时的结构示意图
Fig. 2 Diagram of Galfenol layer with different lengths

按照不同的 Galfenol 层长度, 定义覆盖比为

$$\eta = \frac{L_2}{L} \tag{3}$$

负载函数 $f(t, x)$ 所做的虚拟功可以表示为

$$\delta W_e = \int_0^L f(t, x) \delta v(t, x) dx \tag{4}$$

式中 $v(t, x)$ ——悬臂梁 z 轴方向位移函数

当对驱动器施加激励磁场时, Galfenol 层中的应变和应力可以表示为

$$\varepsilon_g = \frac{\sigma_g}{E_g} + \lambda(\sigma_g, H) \tag{5}$$

$$\sigma_g = E_g(\varepsilon_g - \lambda(\sigma_g, H)) \tag{6}$$

衬底层的应力满足胡克定律, 即

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s \tag{7}$$

式中 E ——杨氏模量 σ ——应力

ε ——应变 λ ——磁致伸缩应变

下标 g 和 s 对应于 Galfenol 层和衬底层。

当悬臂梁发生弯曲变形时, 以梁中间面为基准, 悬臂梁中任意一点的轴向形变可以表示为

$$\varepsilon = \frac{\partial u(t, x)}{\partial x} - z \frac{\partial^2 v(t, x)}{\partial x^2} \tag{8}$$

式中 $u(t, x)$ ——悬臂梁中间面的 x 轴向位移

驱动器内部应力所做的虚拟功可以表示为

$$\delta W_\sigma = \int_0^{l_2} \int_{A_g} \sigma_g \delta \varepsilon_g dA_g dx + \int_0^L \int_{A_s} \sigma_s \delta \varepsilon_s dA_s dx \tag{9}$$

式中 A ——悬臂梁中各层的横截面积

注意到由于 Galfenol 层和衬底层采用了不同的长度, 因而其内力所做的虚拟功应在各自的长度上进行积分计算。将方程 (5) ~ (8) 代入方程 (9), 并将其进行展开, 可以得到

$$\begin{aligned} \delta W_\sigma = & E_g I_g \int_0^{l_2} \frac{\partial^2 v(t, x)}{\partial x^2} \delta \frac{\partial^2 v(t, x)}{\partial x^2} dx - \\ & E_g Q_g \int_0^{l_2} \frac{\partial^2 v(t, x)}{\partial x^2} \delta \frac{\partial u(t, x)}{\partial x} dx - \\ & E_g Q_g \int_0^{l_2} \frac{\partial u(t, x)}{\partial x} \delta \frac{\partial^2 v(t, x)}{\partial x^2} dx + \\ & E_g A_g \int_0^{l_2} \frac{\partial u(t, x)}{\partial x} \delta \frac{\partial u(t, x)}{\partial x} dx + \\ & E_s I_s \int_0^L \frac{\partial^2 v(t, x)}{\partial x^2} \delta \frac{\partial^2 v(t, x)}{\partial x^2} dx - \\ & E_s Q_s \int_0^L \frac{\partial^2 v(t, x)}{\partial x^2} \delta \frac{\partial u(t, x)}{\partial x} dx - \\ & E_s Q_s \int_0^L \frac{\partial u(t, x)}{\partial x} \delta \frac{\partial^2 v(t, x)}{\partial x^2} dx + \\ & E_s A_s \int_0^L \frac{\partial u(t, x)}{\partial x} \delta \frac{\partial u(t, x)}{\partial x} dx + \\ & E_g \int_0^{l_2} \int_{A_g} \lambda(H, \sigma_g) \delta \frac{\partial^2 v(t, x)}{\partial x^2} z dA_g dx - \\ & E_g \int_0^{l_2} \int_{A_g} \lambda(H, \sigma_g) \delta \frac{\partial u(t, x)}{\partial x} dA_g dx \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned} \text{其中} \quad I_g &= \int_{A_g} z^2 dA_g \quad Q_g = \int_{A_g} z dA_g \\ I_s &= \int_{A_s} z^2 dA_s \quad Q_s = \int_{A_s} z dA_s \end{aligned}$$

采用类似的方法, 对惯性力和结构阻尼力所做的虚拟功进行建模, 设惯性力与轴向加速度 a_u 和纵向加速度 a_v 呈正比, 阻尼力与轴向运动速度 v_u 和纵向运动速度 v_v 呈正比, 则两种力所做的虚拟功为

$$\begin{aligned} \delta W_\rho = & \int_0^{l_2} \int_{A_g} \rho a^u \delta u dA_g dx + \int_0^{l_2} \int_{A_g} \rho a^v \delta v dA_g dx + \\ & \int_0^L \int_{A_s} \rho a^u \delta u dA_s dx + \int_0^L \int_{A_s} \rho a^v \delta v dA_s dx = \\ & \int_0^{l_2} \int_{A_g} \rho \frac{\partial^2 u(t, x)}{\partial t^2} \delta u dA_g dx + \int_0^{l_2} \int_{A_g} \rho \frac{\partial^2 v(t, x)}{\partial t^2} \delta v dA_g dx + \\ & \int_0^L \int_{A_s} \rho \frac{\partial^2 u(t, x)}{\partial t^2} \delta u dA_s dx + \int_0^L \int_{A_s} \rho \frac{\partial^2 v(t, x)}{\partial t^2} \delta v dA_s dx \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned} \delta W_c = & \int_0^{l_2} \int_{A_g} c \frac{\partial u(t, x)}{\partial t} \delta u dA_g dx + \\ & \int_0^{l_2} \int_{A_g} c \frac{\partial v(t, x)}{\partial t} \delta v dA_g dx + \\ & \int_0^L \int_{A_s} c \frac{\partial u(t, x)}{\partial t} \delta u dA_s dx + \int_0^L \int_{A_s} c \frac{\partial v(t, x)}{\partial t} \delta v dA_s dx \end{aligned} \tag{12}$$

综合方程 (2)、(4)、(10) ~ (12), 弱解式的虚功原理方程可以表示为

$$-\delta W_\sigma - \delta W_\rho - \delta W_c - \delta W_e = 0 \tag{13}$$

利用方程 (13) 即可求解带载条件下, 驱动机构采用不同材料覆盖比时的动力学响应问题。方程 (13) 为积分形式的弱解方程, 为对方程进行求解, 需要采用有限元方法对其进行离散。

1.3 能量均分模型

由式 (5) ~ (6) 得知, Galfenol 合金的磁致伸缩应变是驱动磁场和外部应力的函数, 为了描述合金的饱和和非线性和磁滞非线性, 采用离散型能量均分模型^[19-20]对 $\lambda(\sigma_g, H)$ 进行建模, 模型计算表达式为

$$\lambda = \sum_{i=1}^r \lambda^i(m^i) \xi^i \tag{14}$$

$$\xi^i = \frac{\exp(-G^i/\Omega)}{\sum_{j=1}^r \exp(-G^j/\Omega)} \tag{15}$$

$$G(H, \sigma) = U(m) + E_T(m, \sigma_{ij}) - \mu_0 M_s m H \tag{16}$$

式中 m^i ——磁化方向

ξ^i ——磁化方向上磁畴所占的体积分, 体积比分数可以通过能量权重函数进行求解

Ω ——Armstrong 平滑系数

G ——吉布斯自由能函数
 μ_0 ——真空磁导率
 $U(\boldsymbol{m})$ ——合金磁畴内能
 E_T ——磁畴各向异性能
 M_s ——材料的饱和磁化强度
 $\boldsymbol{H}$ ——驱动磁场矢量

对式(16)求极值,即可得到磁化方向矢量 $\boldsymbol{m}^i$,因而可以结合式(14)、(15)计算 Galfenol 合金的磁致伸缩应变。设施加驱动磁场的方向为 $\boldsymbol{u}=[u_1 \ u_2 \ u_3]$,为了将矢量形式的磁致伸缩应变映射到图 1 中的 x 轴方向,设计映射向量

$$\boldsymbol{u}_T=[u_1^2 \ u_2^2 \ u_3^2 \ u_1u_2 \ u_2u_3 \ u_3u_1]^T \tag{17}$$

则方程(14)中单方向磁单晶体磁致伸缩应变 λ^i 可以表示为

$$\lambda^i=\boldsymbol{u}_T\boldsymbol{\Lambda}^i=\frac{1}{2}\boldsymbol{m}^i\boldsymbol{R}\boldsymbol{m}^i \tag{18}$$

其中 $\boldsymbol{R}=3\begin{bmatrix} \lambda_{100}\boldsymbol{u}_{T,1} & \lambda_{111}\boldsymbol{u}_{T,4} & \lambda_{111}\boldsymbol{u}_{T,6} \\ \lambda_{111}\boldsymbol{u}_{T,4} & \lambda_{100}\boldsymbol{u}_{T,2} & \lambda_{111}\boldsymbol{u}_{T,5} \\ \lambda_{111}\boldsymbol{u}_{T,6} & \lambda_{111}\boldsymbol{u}_{T,5} & \lambda_{100}\boldsymbol{u}_{T,3} \end{bmatrix}$

式中 λ_{100} 、 λ_{111} —— $\langle 100 \rangle$ 和 $\langle 111 \rangle$ 方向的磁致伸缩应变

方程(14)、(18)计算了悬臂梁中 Galfenol 层产生的磁致伸缩应变,将其代入方程(10),可以得到磁致伸缩应变产生的内部应力所做的虚拟功,进而通过方程(13),实现驱动器的动力学耦合。

2 方程求解

方程(13)为积分形式的动力学方程,为对方程进行求解,首先需要采用有限元方法对其进行离散化,得到矩阵形式的控制方程,进而采用数值方法对其进行求解,得到计算结果,求解流程如图 3 所示。在离散化阶段,采用文献[15]中相同的型函数对方程进行离散,不同之处在于,在进行单元划分时,由于 2 层的长度不同,为了计算方便,需要使某一个单元的节点刚好分布于 Galfenol 合金右边界处(图 4a),这样可以提高模型的计算效率。离散单元的自由度分布如图 4b 所示,每个节点含 3 个自由度, q_e^v 表示纵向的自由度, q_e^u 表示 x 轴向上的自由度, θ 表示旋转角。

如图 4 所示,悬臂梁被划分为 N 个单元,利用 Hermite 型函数对方程(13)中的纵向位移进行插值,利用线性函数对 x 轴向位移进行插值,其表达式为

$$v_e=\widetilde{\boldsymbol{H}}\boldsymbol{q}_e^v \tag{19}$$

$$u_e=\widetilde{\boldsymbol{N}}\boldsymbol{q}_e^u \tag{20}$$

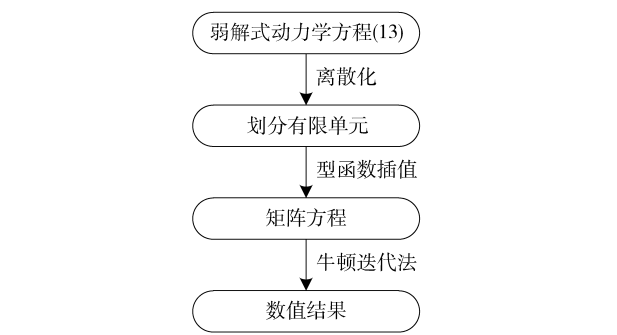


图 3 耦合模型求解流程图
Fig.3 Flow chart for model solution

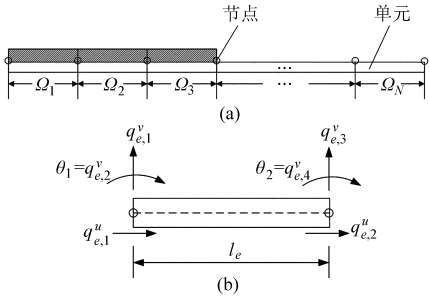


图 4 有限单元离散示意图
Fig.4 Discrete schemes of finite element
(a) 不同覆盖比时单元划分 (b) 单元自由度

$$x=\frac{x_1+x_2}{2}+\frac{x_2-x_1}{2}\xi \tag{21}$$

式中 $\widetilde{\boldsymbol{H}}、\widetilde{\boldsymbol{N}}$ ——型函数矢量
 ξ ——单个单元上的局域坐标
 $x_1、x_2$ ——单元的左、右节点坐标

本文考虑了带载条件下驱动器的动力学建模方法,因而方程(13)中增加了外力所做的虚拟功,设负载函数为

$$f(t,x)=F(t)Q(x) \tag{22}$$

结合方程(4),采用型函数将式(22)中的负载函数转换到局域坐标系以后,经过离散以后的外力所做的虚拟功可以表示为

$$f_e^{ext}=\sum_e\left(\frac{F(t)l_e}{2}\int_{-1}^1Q(\xi)\widetilde{\boldsymbol{H}}(\xi)\mathrm{d}\xi\right)\delta\boldsymbol{q}_e^v \tag{23}$$

式中 l_e ——单元长度

则方程(13)在经过离散以后,得到离散形式的表达式为

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{m}_e^u & \boldsymbol{O} \\ \boldsymbol{O} & \boldsymbol{m}_e^v \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{q}}_e^u \\ \ddot{\boldsymbol{q}}_e^v \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} \boldsymbol{c}_e^u & \boldsymbol{O} \\ \boldsymbol{O} & \boldsymbol{c}_e^v \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{q}}_e^u \\ \dot{\boldsymbol{q}}_e^v \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} \boldsymbol{k}_e^u & -(\boldsymbol{k}^{uv})^T \\ -(\boldsymbol{k}^{uv}) & \boldsymbol{k}_e^v \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \boldsymbol{q}_e^u \\ \boldsymbol{q}_e^v \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \boldsymbol{f}_e^{\lambda,u} \\ -\boldsymbol{f}_e^{\lambda,v}+\boldsymbol{f}_e^{ext} \end{bmatrix} \tag{24}$$

式中 $\boldsymbol{O}$ 为零向量,质量矩阵、阻尼矩阵和载荷向量可参照文献[15]的计算方法,不同的是,由于考虑了外加负载,方程(24)中载荷向量增加了方程(23)所

示的负载;另外,考虑了 Galfenol 合金采用不同覆盖比时驱动器的输出特性(图 4a),因而方程(24)中的单元矩阵需要在悬臂梁中每层不同的长度上分开进行积分运算,即

$$\begin{aligned} \mathbf{m}_e^u &= \mathbf{m}_e^{u,g} + \mathbf{m}_e^{u,s} & \mathbf{m}_e^v &= \mathbf{m}_e^{v,g} + \mathbf{m}_e^{v,s} & \mathbf{k}_e^u &= \mathbf{k}_e^{u,g} + \mathbf{k}_e^{u,s} \\ \mathbf{k}_e^v &= \mathbf{k}_e^{v,g} + \mathbf{k}_e^{v,s} & \mathbf{k}_e^{uv} &= \mathbf{k}_e^{uv,g} + \mathbf{k}_e^{uv,s} & \mathbf{c}_e^u &= \mathbf{c}_e^{u,g} + \mathbf{c}_e^{u,s} \\ & & \mathbf{c}_e^v &= \mathbf{c}_e^{v,g} + \mathbf{c}_e^{v,s} \end{aligned}$$

式中单元矩阵中的上标 g 和 s 分别表示 Galfenol 层和衬底层的计算结果,在超出长度 L_2 的位置,上标 g 的单元矩阵结果变为零。在计算力载荷矩阵时,在超出 Galfenol 合金覆盖长度之外,其积分为零。

3 驱动器输出特性

3.1 模型验证

首先采用实验对模型进行验证,其装置如图 5 所示,采用激光位移传感器对驱动器位移进行采集,采样频率为 10 kHz,利用电流对驱动器进行驱动,部分实验样品由美国俄亥俄州立大学 Dapino 教授提供。设 Galfenol 覆盖比为 100%,准静态和动态时实验结果与模型预测结果分别如图 6、7 所示。

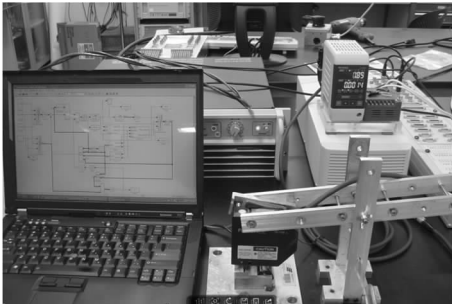


图 5 模型验证实验装置

Fig. 5 Experimental setup for model validation

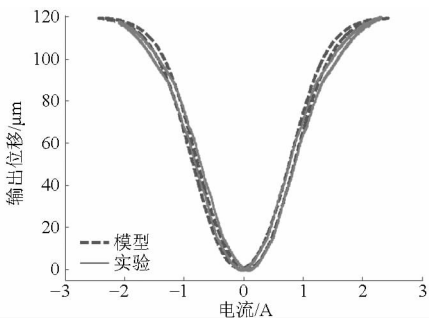


图 6 0.1 Hz 时实验结果与模型预测结果对比

Fig. 6 Comparison of simulated and measured results at 0.1 Hz

从图 6 和图 7 中可以看出,模型可以比较准确预测准静态和动态条件下驱动器的输出,准静态条件下,未施加直流偏置,因而出现图 6 所示的碟状非线性位移曲线。100 Hz 时,施加了偏置磁场,因而获得交变位移曲线。偏置磁场通过在交流电流中叠加直流偏置分量实现,其大小为 6 kA/m。

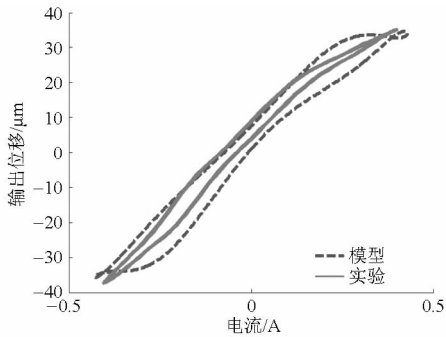


图 7 100 Hz 时实验结果与模型预测结果对比

Fig. 7 Comparison of simulated and measured results at 100 Hz

3.2 不同覆盖比时驱动器输出特性

为研究不同覆盖比对于 Galfenol 驱动器带载能力的影响,分别研究了空载和带载 2 种情况下, Galfenol 合金达到饱和磁致伸缩应变时驱动器的最大输出位移。同时,为对仿真结果进行验证,分别设计了覆盖比为 20%、60% 和 100% 的 3 种样本,进行实验对比。空载时,方程(24)中的负载项 f_e^{ext} 变为零,按照方程(3)中覆盖比的定义,驱动器最大输出位移与材料覆盖比变化关系如图 8 所示。从图 8a 中可以看出,驱动器空载时,当 Galfenol 合金达到饱和磁致伸缩应变 λ_s 时,驱动器的最大输出位移随 Galfenol 覆盖比的增大而增加,位移始终为正方向,实验样本数据也验证了这一趋势。当驱动器带载时,设驱动器承受的负载为末端点负荷,其函数表达式为

$$f(t,x) = F(t)\delta(x - L) \tag{25}$$

式中 $F(t)$ ——负载幅值

$\delta(x - L)$ ——狄利克雷函数,表示负载作用于悬臂梁 L 处

通过方程(24)求解带载时驱动器的位移输出,位移随覆盖比的变化曲线如图 8b、图 8c 所示,负载分别为 0.8 N 和 3 N。从图 8b、8c 可以看出,驱动器输出位移随着 Galfenol 覆盖比的不同开始出现方向上的改变,载荷为 0.8 N 时,覆盖比低于 25% 时驱动器开始出现负方向位移,此时驱动器已无法带动载荷。当负载为 3 N 时(图 8c),覆盖比低于 85% 时驱动器开始无法驱动负载,实验数据也显示覆盖比为 20% 和 60% 时,驱动机构均无法输出正方向的位移,覆盖比为 100% 的样本则可以得到正方向的位移,这与仿真得到的结果是一致的。对比图 8b、8c 可以发现,驱动器的带载能力与 Galfenol 合金的覆盖比有直接关系,覆盖比越高,驱动器带载能力越强。对于同样的载荷,覆盖比高的驱动器其驱动位移大。对于同样的输出位移,以 20 μm 为例,35% 的 Galfenol 覆盖比只能驱动 0.8 N 的负载。但当增加

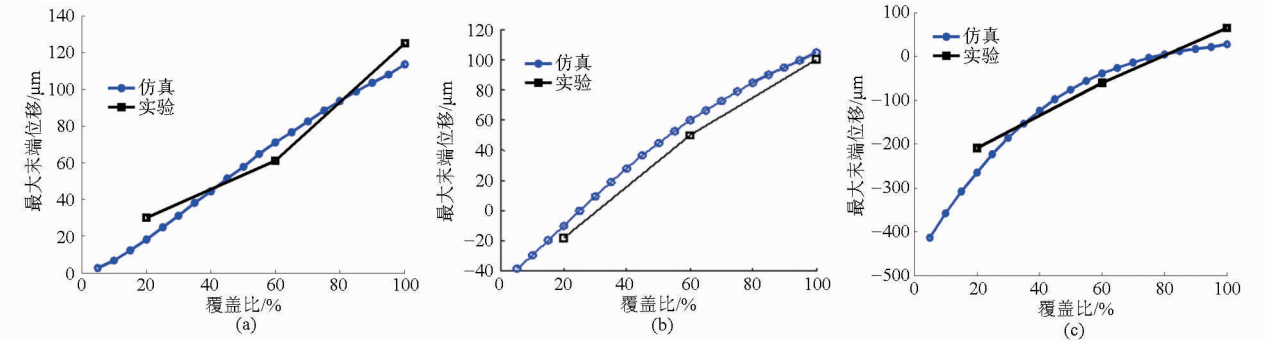


图 8 驱动器最大输出位移与覆盖比的关系

Fig.8 Relationship between the largest output displacement and coverage ratio

(a) 空载 (b) 0.8 N 负载 (c) 3 N 负载

Galfenol 覆盖比到 95% 时 (图 8c), 对于同样的位移, 驱动器可以驱动 3 N 的负载。

3.3 Galfenol 驱动器内部应力特性

3.2 节中的研究发现, 增加 Galfenol 的覆盖比, 提高悬臂梁的长度, 可以提升驱动器的带载能力, 增加输出位移, 但是同时会加剧材料内部承受的张力。为了对驱动器进行可靠性设计, 防止失效, 需要研究材料内部应力与外部负载间的变化关系。本节采用所建立的模型, 研究不同覆盖比、不同负载时驱动器内部的应力分布特征。驱动器的几何模型和实物如图 9 所示。图 9 中包括励磁线圈、轭铁和悬臂梁 3 部分, 不同覆盖比时驱动器内部应力的三维分布如图 10 所示。

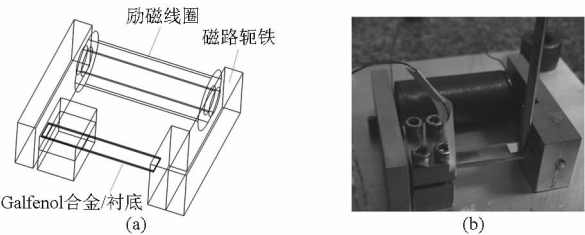


图 9 Galfenol 驱动器几何模型和实物

Fig.9 Geometry and picture of Galfenol beam actuator

当覆盖比为 100% 时, 驱动器 x 轴法相应力三维分布如图 10a 所示, 覆盖比为 70% 时的应力分布如图 10c 所示, 当无磁致伸缩应变, 仅仅施加末端载

荷时驱动器的应力分布如图 10b 所示。从图中可以看出, 覆盖比 100% 时悬臂梁的形变向下, 说明驱动器此时可以驱动负载。当覆盖比为 70% 时 (图 10c), 悬臂梁向上弯曲, 说明此时驱动器无法克服负载的阻力, 在负载的驱动下向上发生形变。当不施加驱动磁场时, Galfenol 合金的磁致伸缩应变为零, 悬臂梁因为末端负载的作用发生向上弯曲 (图 10b)。与图 10 相对应的 Galfenol 合金内部应力沿长度方向的变化如图 11 所示。从图 11 中可以看出, Galfenol 内部的拉伸应力最大值超过了 50 MPa, 稀土超磁致伸缩材料 (Terfenol-D) 所能承受的拉伸应力范围为 28 MPa 左右, 无法满足这一应用需求。对比图 11a 和图 11b 可以发现, 对同样的载荷, Galfenol 合金进行励磁驱动以后产生的应力远高于无励磁时候的应力。由于无励磁, 图 11b 中 Galfenol 与夹块固定的一段其内部应力基本为零, 最大应力出现在自由段靠近夹块的位置。

图 11a 中由于励磁的存在, 与夹块一起被固定的 Galfenol 段出现较大的内部应力, 并沿长度的方向逐渐变小。为研究材料内部应力随覆盖比的变化关系, 对驱动器施加固定的挠度 (400 μm), 改变 Galfenol 合金的覆盖比, 材料最大内部应力随覆盖比的变化曲线如图 12 所示。从图 12 可以看出, 最大应力整体上随着覆盖比的减少而变小, 覆盖比在

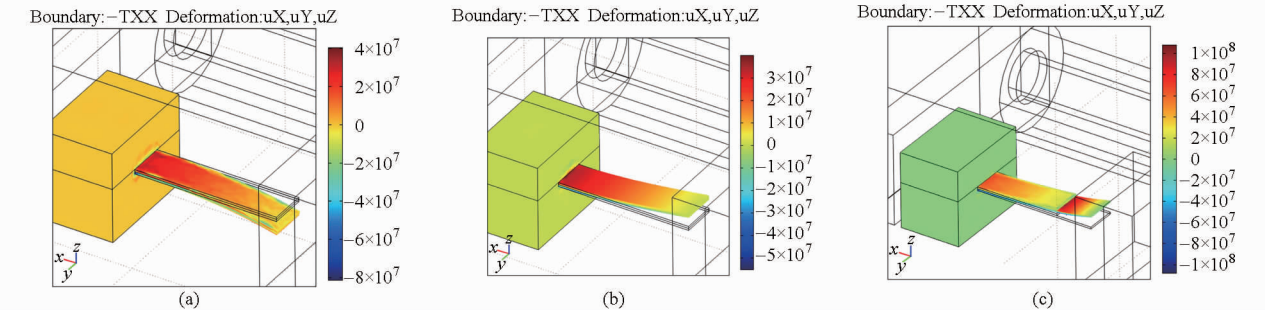


图 10 3 N 时悬臂梁 x 轴法相应力三维分布图

Fig.10 Stress distribution under 3 N

(a) 饱和磁致伸缩应变、覆盖比为 100% (b) 零磁致伸缩应变、覆盖比为 100% (c) 饱和磁致伸缩应变、覆盖比为 70%

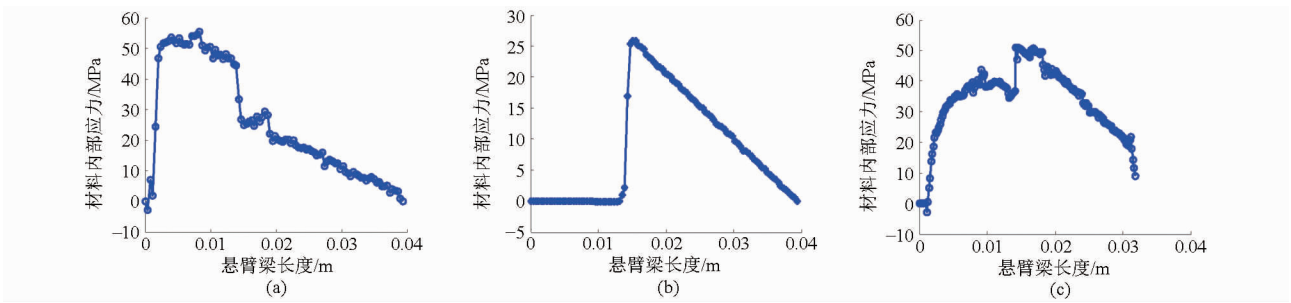


图 11 3 N 时悬臂梁 x 轴法向应力沿长度方向分布

Fig. 11 Stress distribution along length direction under 3 N

(a) 饱和磁致伸缩应变、覆盖比 100% (b) 零磁致伸缩应变、覆盖比 100% (c) 饱和磁致伸缩应变、覆盖比 70%

10% 和 70% 附近出现拐点,应力变化的斜率在 70% 以上时变得平缓,低于 10% 时变得陡峭,这说明当覆盖比大于 70% 时,继续增加覆盖比,材料内部需要承受的应力增加缓慢。

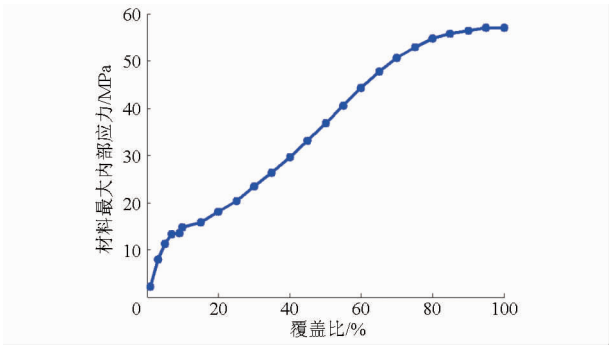


图 12 固定位移时材料内部应力随覆盖比的变化关系

Fig. 12 Relationship between stress and coverage ratio under fixed displacement

图 12 中最大应力超过 50 MPa,说明 Terfenol-D、压电陶瓷等脆性较大的材料无法满足该应用需求,为了满足要求,可以通过减少覆盖长度的方法减小材料内部承受的拉伸应力,但该做法将直接导致

驱动器的驱动能力变小(图 8b、图 8c)。Galfenol 良好的机械特性可以满足应力较大的应用场合,弥补了 Terfenol-D 和压电陶瓷等材料的不足,该建模方法可以为材料的可靠、安全运行,防止材料失效提供有效的指导。

5 结论

- (1)建立了加载条件下 Galfenol 驱动器的动力学耦合模型,通过模型研究了不同覆盖比时驱动器的输出特性,其加载能力与 Galfenol 合金的覆盖比有直接关系,覆盖比越高,驱动器加载能力越强;对于同样的载荷,覆盖比高的驱动器其驱动位移大。
- (2)对同样的载荷,驱动器中 Galfenol 合金进行励磁驱动以后产生的内部应力高于无励磁时的应力。
- (3)减少驱动器中材料的覆盖比,可以缓解材料内部承受的拉伸应力,但该做法将直接导致驱动器的驱动能力变小。Galfenol 良好的机械特性可以满足应力较大时的应用场合,可以弥补 Terfenol-D 和压电陶瓷等材料脆性较大的物理限制。

参 考 文 献

1 Kellogg R A, Russel A M, Lograsso T A, et al. Tensile properties of magnetostrictive iron-gallium alloys[J]. Acta Materialia, 2004, 52(17): 5043 – 5050.

2 Baillargeon B P, Vel S S. Active vibration suppression of sandwich beams using piezoelectric shear actuators: experiments and numerical simulations[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2005, 16(6): 517 – 530.

3 Ueno T, Higuchi T. Micromagnetostrictive vibrator using a U-shaped core of iron-gallium alloy (Galfenol)[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(7): 07E904.

4 刘孝亮, 鄢义杰, 章一智, 等. 超磁致伸缩执行器率相关迟滞混合模型研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 286 – 291. Liu Xiaoliang, Wu Yijie, Zhang Yizhi, et al. Hybrid rate-dependent hysteresis model in giant magnetostrictive actuator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 286 – 291. (in Chinese)

5 张雷, 鄢义杰, 刘孝亮, 等. 嵌入式超磁致伸缩构件多场耦合优化[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 190 – 196. Zhang Lei, Wu Yijie, Liu Xiaoliang, et al. Multi-field coupling model of embedded giant magnetostrictive components optimization [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 190 – 196. (in Chinese)

6 Ueno T, Higuchi T. Investigation of micro bending actuator using iron-gallium alloy (Galfenol)[C]//International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science, 2007: 460 – 465.

7 Dwney P R, Flatau A B. Magnetoelastic bending of Galfenol for sensor applications[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(10): 10R505.

8 Datta S, Atulasimha J, Flatau A B. Modeling of magnetostrictive Galfenol sensor and validation using four point bending test[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(9): 09C521.

- 9 Myers R, Islam R A, Karmarkar M, et al. Magnetolectric laminate composite based tachometer for harsh environment applications[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(12): 122904.
- 10 Wang Y, Atulasimha J. Nonlinear magnetolectric model for laminate piezoelectric-magnetostrictive cantilever structures[J]. Smart Materials and Structures, 2012, 21(8): 085023.
- 11 Clarke J, Sundaresan V B. Static and dynamic characterization of a magnetolectric cantilever cutting tool[C] // Proceedings of the SPIE Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites, 2010, 7644: 764413.
- 12 Shu Liang, Dapino M J, Evans P G, et al. Optimization and dynamic modeling of Galfenol unimorphs[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011, 22(8): 781 – 793.
- 13 舒亮, 陈定方, 卢全国. 基于分布参数模型的 Galfenol 智能悬臂梁动力学建模方法及控制[J]. 机械工程学报, 2011, 47(13): 72 – 83.
- Shu Liang, Chen Dingfang, Lu Quanguo. Dynamic modeling and control of Galfenol smart cantilever beam based on distributed parameter model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(13): 72 – 83. (in Chinese)
- 14 Evans P G, Dapino M J. State-space constitutive model for magnetization and magnetostriction of Galfenol alloys[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(7): 1711 – 1720.
- 15 Kumar J S, Ganesan N, Swarnama S, et al. Active control of beam with magnetostrictive layer[J]. Computers and Structures, 2003, 81(3): 1375 – 1382.
- 16 Datta S, Atulasimha J, Mudivartha C, et al. The modeling of magnetomechanical sensors in laminated structures[J]. Smart Materials and Structures, 2008, 17(2): 025010.
- 17 Datta S, Atulasimha J, Mudivartha C, et al. Modeling of magnetomechanical actuators in laminated structures[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2009, 20(9): 1121 – 1135.
- 18 Shu Liang, Headings L M, Dapino M J, et al. Nonlinear model for Galfenol cantilevered unimorphs considering full magnetoelastic coupling[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2014, 25(2): 187 – 203.
- 19 Evans P G, Dapino M J. Efficient model for field-induced magnetization and magnetostriction of Galfenol[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(11): 113901.
- 20 Evans P G, Dapino M J. Measurement and modeling of magnetic hysteresis under field and stress application in iron-gallium alloy[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2013, 330: 37 – 48.

(上接第 396 页)

- 13 张从鹏, 魏学光. 基于 Harris 角点的矩形检测[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2259 – 2266.
- Zhang C P, Wei X G. Rectangle detection based on Harris corner[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(8): 2259 – 2266. (in Chinese)
- 14 孙惠娟, 蒋红海, 殷国富. 基于机器视觉的五座标机床旋转轴误差检测方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 293 – 298.
- Sun H J, Jiang H H, Yin G F. Error measurement method for rotation axes of five-axis machine tool based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 293 – 298. (in Chinese)
- 15 吕继东, 赵德安, 姬伟. 苹果采摘机器人目标果实快速跟踪识别方法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 65 – 72.
- Lü J D, Zhao D A, Ji W. Fast tracing recognition method of target fruit for apple harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 65 – 72. (in Chinese)
- 16 张亚楠, 魏武, 武林林. 基于小波包 Shannon 熵 SVM 和遗传算法的电机机械故障诊断[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(1): 87 – 91.
- Zhang Y N, Wei W, Wu L L. Motor mechanical fault diagnosis based on wavelet packet, Shannon entropy, SVM and GA[J]. Electronic Power Automation Equipment, 2010, 30(1): 87 – 91. (in Chinese)
- 17 姜万录, 吴胜强. 基于 SVM 和证据理论的多数据融合故障诊断方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(8): 1738 – 1743.
- Jiang W L, Wu S Q. Multi-data fusion fault diagnosis method based on SVM and evidence theory[J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2010, 31(8): 1738 – 1743. (in Chinese)
- 18 王艳景, 乔晓艳, 李鹏, 等. 基于小波包熵和支持向量机的运动想象任务分类研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(12): 2729 – 2735.
- Wang Y J, Qiao X Y, Li P, et al. Classification of motor imagery task based on wavelet packet entropy and support vector machines[J]. Chinese Journals of Science Instruments, 2010, 31(12): 2729 – 2735. (in Chinese)
- 19 周维华. RBF 神经网络隐层结构与参数优化研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
- 20 穆云峰. RBF 神经网络学习算法在模式分类中的应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- 21 梁武科, 赵道利, 马薇, 等. 基于粗糙集-RBF 神经网络的水电机组故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(10): 1806 – 1810.
- Liang W K, Zhao D L, Ma W, et al. Fault diagnosis of hydroelectric unit based on rough set & RBF network[J]. Chinese Journal of Science Instruments, 2007, 28(10): 1806 – 1810. (in Chinese)