doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.052

柔性铰链放大的叠堆式超磁致伸缩致动器建模与实验

何忠波1 荣 策1 杨朝舒2 薛光明1 郑佳伟1

(1. 军械工程学院车辆与电气工程系,石家庄 050003; 2. 奥克兰大学机械工程系,奥克兰 1010)

摘要:为满足新型电液伺服阀的驱动要求,设计了柔性铰链放大的叠堆式超磁致伸缩致动器(FASGMA),建立了 FASGMA 输出位移模型,并进行了实验验证和分析。首先,根据传统 GMA 偏磁施加方式的特点和不足,采用永磁 体和 GMM 棒交替排布的结构形式,设计了叠堆式超磁致伸缩致动器(SGMA),并利用柔性铰链机构放大其输出位 移;然后,根据 SGMA 的结构特点,建立了反映轴向分布不均匀性的 SGMA 应变模型;接着,利用力学基本原理和有 限元法对柔性铰链机构的放大比和固有频率进行了分析,提出了结构优化设计的方法,完成了放大机构结构参数 的确定;在此基础上,考虑 SGMA 与放大机构的相互作用以及 SCMA 轴向应变分布规律,建立了 FASCMA 多自由度 位移模型,确定了自由度的合理取值;最后,搭建了 FASGMA 测试系统,进行了阶跃和正弦激励实验,完成了模型验 证。结果表明:实验与模型计算结果吻合,证明了模型准确性;在阶跃激励下,FASGMA 最大位移约为 130 μm,响应时 间约为 70 ms;正弦激励下,FASGMA 工作频带为 60 Hz,对激励信号有较好的跟随特性。

关键词:超磁致伸缩致动器;叠堆式结构;柔性铰链;多自由度位移模型;实验验证

中图分类号: TP271^{*}.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)12-0421-08

Modeling and Experimental Analysis of Stack Giant Magnetostrictive Actuator Amplified by Flexure Hinge

HE Zhongbo¹ RONG Ce¹ YANG Zhaoshu² XUE Guangming¹ ZHENG Jiawei¹

(1. Department of Vehicle and Electrical Engineering, Shijiazhuang Mechanical Engineering College, Shijiazhuang 050003, China
 2. Department of Mechanical Engineering, University of Auckland, Auckland 1010, New Zealand)

Abstract: Novel electro-hydraulic servo valves (EHSVs) usually require their actuators output large stroke bi-directionally. To meet these requirements, a special stack giant magnetostrictive actuator amplified by flexure hinge (FASGMA) was designed, the displacement model of this actuator was established, and experiments were conducted to verify the model. Firstly, considering the ways to provide bias magnetic field in traditional GMA, a specific structure, with permanent magnets (PMs) and short GMM rods located iteratively, was designed, whose output was amplified by a bridge-type flexure hinge. Then, based on the structure, a strain model of SGMA was established, which can describe the strain distribution along the GMM rod. In addition, the amplification ratio and eigenfrequency of the flexure hinge were analyzed by basic theories of mechanics and finite element method. Meanwhile, with an optimization design method proposed, the structural parameters of the amplifier were decided. Moreover, a multi-DOF displacement model of FASGMA was set up, which considered the interaction of flexure hinge and SGMA as well as the strain distribution along the axial direction of SGMA. After that, the number of DOF was determined. Finally, an experimental system was established, and the proposed model was verified by both step and sinusoidal experiments. The results indicated that when the FASGMA was excited by step signals, the maximum output displacement was about 130 μ m, the response time was about 70 ms. Under harmonic excitation, the frequency bandwidth was about 60 Hz and the actuator performed a good tracking behavior with the excitation signal.

Key words: giant magnetostrictive actuator; stack structure; flexure hinge; multi-DOF displacement model; experimental validation

收稿日期:2017-04-14 修回日期:2017-05-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51275525)

作者简介:何忠波(1968一),男,教授,博士生导师,主要从事智能材料在机电液系统中的应用研究,E-mail: hzb_hcl_xq@ sina. com

引言

超磁致伸缩材料(Giant magnetostrictive material, GMM)是一种性能优异的新型功能材料,相比于其他智能材料,GMM具有输出力大、响应速度快、能量密度高等优点^[1-5]。超磁致伸缩致动器(Giant magnetostrictive actuator, GMA)能够在低电压驱动条件下迅速精确地输出微位移,被视为新型电液伺服阀(Electro-hydraulic servo valve, EHSV)的理想驱动元件^[6-8]。

为避免 GMM 本身固有的倍频特性,在 GMA 设 计时通常需要施加偏置磁场^[9-10]。近年来,永磁偏 置因低能耗和高可靠性的特点逐渐受到研究人员的 关注^[11-13]。在永磁偏置方式中,筒状永磁体磁场较 为均匀,但所需永磁体的体积和质量较大^[14-15]。碟 片状永磁体常对称放置于 GMM 棒两端,这样的结 构能以较少的永磁体获得较大的磁场强度,但是,磁 场均匀性较差^[16]。

本文根据新型 EHSV 的驱动要求,设计一种柔 性铰链放大的叠堆式超磁致伸缩致动器(Stack giant magnetostrictive actuator amplified by flexure hinge, FASGMA)。为准确预测 FASGMA 的输出,建立 FASGMA 输出位移模型,模型考虑致动器与柔性铰 链的相互作用以及 GMM 棒应变分布不均匀性,通 过实验验证模型的准确性,有助于 FASGMA 整体性 能的分析和在 EHSV 中的应用。

1 FASGMA 结构与工作原理

FASGMA 结构如图 1 所示,主要包括两部分:叠 堆式超磁致伸缩致动器(SGMA)和桥式柔性铰链放 大机构。SGMA 采用永磁体、GMM 棒交替排布的结 构形式,既保留了两端对置式 GMA 质量、体积小的 优点,同时提高了偏磁场分布的均匀性[17]。桥式柔 性铰链机构结构紧凑,位移放大比大,能够满足大流 量伺服阀的驱动要求^[18-19]。两部分通过紧固螺钉 相连,保证工作时能够同步运动。对于 SGMA,可将 其划分为5个功能模块。驱动模块由线圈和线圈骨 架组成,为 SGMA 提供所需的驱动磁场。磁致伸缩 模块由交替排布的 GMM 棒和永磁体组成,为 SGMA 提供偏置磁场。预压模块由外壳、左右端盖及碟簧 组成,通过调整端盖与外壳之间的螺纹可以调节施 加在 GMM 棒上的预紧力。冷却模块由冷却腔、进 出液口以及密封圈组成,保证 SGMA 处于相对恒温 的工作环境。输出模块主要由输出杆及相关附件组 成,可以将 GMM 棒产生的应变转变为位移,并最终 通过放大机构实现输出。



Fig. 1 Structure diagram of FASGMA

1. 外壳 2. 冷却腔 3. 桥式柔性铰链机构 4. 线圈 5. 线圈骨架 6. 右端盖 7. 输出杆 8. 碟簧 9. 出液口 10. 进液口
 11. 左端盖 12. 紧固螺钉 13. GMM 棒 14. 永磁体

2 SGMA 应变分布模型

2.1 磁场模型

为准确描述 SGMA 磁场的不均匀性,将毕奥-萨伐尔定律与磁路模型结合,建立 SGMA 磁场分布 模型,结果为

 $H(I,z) = \overline{H}_{3b}(z) \Psi_{b}(z) + \overline{H}_{3d}(I,z) \Psi_{d}(I,z)$ (1) 式中 H(I,z)——GMM 棒上坐标为 z、驱动电流为 I时的总磁场强度

- *H*₃₆ 磁路模型求得的 GMM 棒上偏置磁场 的平均强度
- *H*_{3d}——磁路模型求得的 GMM 棒上驱动磁场 的平均强度
- Ψ。——偏置磁场的分布函数
- Ψ,——驱动磁场的分布函数

 Ψ_b 和 Ψ_a 利用毕奥-萨伐尔定律求得,在求解时, 有两点需要考虑:①分布函数不应改变 GMM 棒上 磁场强度的平均值。②分布函数应能反映高导磁材 料对磁场的凝聚作用。 Ψ_b 和 Ψ_a 可最终表示为

$$\begin{cases} \Psi_{b}(z) = \frac{1}{\mu_{r3}^{\beta}} \left(\frac{H_{b}(z)}{\overline{H}_{b}} - 1 \right) + 1 \\ \Psi_{d}(I, z) = \frac{1}{\mu_{r3}^{\beta}} \left(\frac{H_{d}(I, z)}{\overline{H}_{d}} - 1 \right) + 1 \end{cases}$$
(2)

式中 H_b——毕奥-萨伐尔定律求得的 GMM 棒上 偏置磁场分布

- *H_b*——由 *H_b*求得的 GMM 棒上偏置磁场的平 均强度
- H_d——毕奥-萨伐尔定律求得的 GMM 棒上 驱动磁场分布
- *H_a*——由 *H_a*求得的 GMM 棒上驱动磁场的 平均强度
- μ₁₃——GMM 棒的相对磁导率
- β——与致动器结构相关的常数

2.2 磁化模型

SGMA 的磁化模型可用 Jiles - Atherton 模型(J-

(3)

第 12 期 何忠波 等: 柔性较短 A 模型) 描述为 $\begin{cases}
H_e = H + \alpha M \\
M_{an} = M_s \left[\coth \left(\frac{H + \alpha M_{an}}{a} \right) - \frac{a}{H + \alpha M_{an}} \right] \\
\frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{M_{an} - M_{irr}}{\delta k - \alpha (M_{an} - M_{irr})} \\
M_{rev} = c(M_{an} - M_{irr}) \\
M = M_{irr} + M_{rev}
\end{cases}$ 式中 H — 驱动磁场强度 H_e — GMM 棒 中有效磁场强度 M_GMM 棒的磁化强度 M_{an} — 无磁滞磁化强度 M_{irr} — 不可逆磁化强度 M_{rev} — 可逆磁化强度

- *M*_s——饱和磁化强度 α——与分子场和预应力相关的磁化常数 *k*——钉扎系数 a——形状系数 *c*——可逆系数
- δ——修正系数,取值为 sgnH

2.3 磁致伸缩模型

对于 GMM,可以用二次畴转模型表示材料磁化 强度与磁致伸缩应变之间的关系

$$\lambda(I,z) = \frac{3\lambda_s}{2M_s^2} M(I,z)^2$$
(4)

式中 λ----GMM 棒的磁致伸缩应变

λ。——饱和磁致伸缩应变

对于包含偏置磁场的致动器,GMM 棒的实际应 变应视为其围绕初始应变的往复运动。

3 放大机构输出建模

3.1 放大倍数计算

当 FASGMA 工作时,如果致动器沿水平方向伸长 2 Δx ,相应地,放大机构将在竖直方向上升 2 Δy ,放大比可表示为 $\Delta y/\Delta x$ 。在分析机构放大比与结构尺寸的关系时,首先分析输入力 F_{SCMA} 引起的左右支臂的变形,取左支臂进行受力分析,如图 2 所示。

令 $F_{SGMA} = F_1$,则支臂中部的挠度为

$$\Delta x_1 = \frac{F_1 L_b^3}{6EI_b} \tag{5}$$

式中 E——放大机构弹性模量

L_b——支臂长度的一半

*I*_b——支臂惯性矩

在分析支臂的基础上,对柔性铰链和连接臂的 组合结构进行受力和变形分析,选取放大机构左上 部分,如图 3 所示,本文采用基于能量的分析方 法^[20]。







Fig. 3 Structure and force analysis diagram of flexure hinge and link arm

在理想情况下,A、B两点的受力情况相同,转角 也相等。假设 $F_A = F_B = F$, $M_A = M_B = M_e$, 则 $M_e = Fh$ 。图 3 中, F_A 为该系统的输入力。由能量守恒, 可得

$$\frac{1}{2}F\Delta x_2 = \frac{1}{2}F(2\Delta l + \Delta L) + 2W_f + W_c \qquad (6)$$

式中 Δx₂——柔性铰链及连接臂结构水平方向总 伸长量

Δ*l*——柔性铰链弹性伸长量

ΔL——连接臂弹性伸长量

W_f——柔性铰链弯曲应变能

₩。-----连接臂弯曲应变能

通过受力分析可以看出,连接臂上所受的弯矩 为0,所以弯曲应变能 W。也为0,W,可以通过弹性梁 理论解得,组合结构的轴向伸长可表示为

$$\Delta x_2 = \left(\frac{2l}{EA_1} + \frac{L}{EA_2} + \frac{h^2 l}{2EI_f}\right)F \tag{7}$$

式中 *l*——柔性铰链长度

- L——连接臂长度
- h——相邻柔性铰链间垂直距离
- A1——柔性铰链的横截面积
- A2——连接臂的横截面积

I_f——柔性铰链的惯性矩

柔性铰链放大机构在竖直方向上的位移可以视 为柔性铰链和连接臂的挠度之和,即

$$\Delta y = \frac{l(L+l)h}{2EI_f}F \tag{8}$$

联立式(5)~(8),柔性铰链放大机构的放大比 R_{amp}可以表示为

$$R_{amp} = \frac{\Delta y}{\Delta x_1 + \Delta x_2} = \frac{\frac{l(L+l)h}{2EI_f}}{\frac{L_b^3}{3EI_b} + \frac{2l}{EA_1} + \frac{L}{EA_2} + \frac{h^2l}{2EI_f}}$$
(9)

3.2 固有频率计算

利用拉格朗日方程建立放大机构的动力学模型,可以计算其固有频率

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \left(\frac{\partial D}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial D}{\partial q_k} = Q_k \tag{10}$$

式中 D——放大机构动能与势能之差

Q_k——第 k 个广义力

q_k——第 k 个广义坐标

取放大机构的输入位移 2Δx 为广义坐标,用 q 表示。忽略柔性铰链的质量,放大机构的质量分布 如图 4 所示。为避免对称结构的力和位移相互抵 消,分析机构的左半部分。



图 4 放大机构质量分布图 Fig. 4 Mass distribution of amplifier

放大机构的动能包括机构各部分在 x、y 方向上 的平动动能及柔性铰链旋转时的转动动能;而对于 弹性势能,由于连接臂上弯矩为 0,所以放大机构的 弹性势能仅存在于柔性铰链上。将动能和势能代入 拉格朗日方程表达式,可得

$$\left\{\frac{m_1}{4} + \frac{m_1 R_{amp}^2}{4} + \frac{m_2}{8} + \frac{5m_2 R_{amp}^2}{8} + \frac{1}{2}m_3 R_{amp}^2 + \frac{m_2 \left[(L+l)^2 + w^2 \right]}{6 (L+l)^2} \right\} \ddot{q} + K_f R_{amp}^2 \left(\frac{1}{L+l}\right)^2 q = F_{out}$$
(11)

式中 *K_f* —— 柔性铰链的转动刚度 *F_{out}* —— SGMA 的输出力 *w* —— 柔性铰链宽度 放大机构的固有频率可表示为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}} \tag{12}$$

式中 m_{eq} 、 k_{eq} ——式(11)中 \ddot{q} 和 q 的系数

3.3 放大机构优化设计方法

3.3.1 放大比影响因素分析

式(9)建立了放大机构位移放大比与各结构参数之间的关系,在放大机构结构尺寸确定的情况下, 机构的放大比主要受柔性铰链厚度 t、柔性铰链长度 l 以及柔性铰链间距 h 的影响,如图 5 所示。



可以看出,机构的放大比随 *l* 正向变化,随 *t* 和 *h* 反向变化。当需要较大的位移放大比时,应减小 *h* 和*t*,增大 *l*。但是,这样会增加柔性铰链所受的正应 力,加快材料的疲劳和损坏。

3.3.2 固有频率影响因素分析

从式(11)、(12)可以看出,影响放大机构固有 频率的参数主要包括柔性铰链厚度 *t* 和柔性铰链长 度 *l*,如图 6 所示。



图 6 放大机构结构参数对固有频率的影响

Fig. 6 Influence of structural parameters on eigenfrequency

由图 6 可知,增大柔性铰链厚度 *t*,减小柔性铰链长度 *l* 有助于提高放大机构的固有频率,拓宽其工作频带。

3.3.3 优化设计方法

从上面的分析可以发现,当t和l变化时,放大

机构的放大倍数和固有频率变化趋势相反,无法同时达到期待的最优值。因此,在明确机构结构尺寸的基础上,需综合考虑t、l和h对放大机构特性的影响,最终确定参数取值,图7给出了这些参数优化设计的流程。



Fig. 7 Flow chart of optimization design for amplifier

3.4 放大机构有限元分析

依据放大机构优化设计方法,确定了主要参数 的取值,如表1所示。为验证机构计算模型的有效 性,利用有限元软件对其进行放大比和固有频率分析。

| 参数 数值 连接臂长度 L 20 |
|--|
| 连接臂长度 L 20 |
| |
| 柔性铰链长度 1 4 |
| 连接臂厚度 T 8 |
| 柔性铰链厚度 t 0.7 |
| 柔性铰链间距 h 2.1 |
| 柔性铰链宽度 w 10.5 |

表1 柔性铰链放大机构参数

改变放大机构的输入位移,可得放大机构的输入一输出曲线,如图8所示。



Fig. 8 Input – output characteristics curve of amplifier

可以看出,放大机构的输入输出之间有较好的 线性度,在输入位移 0~20 μm 的范围内,其放大倍 数基本保持不变,约为 9.208 倍,而理论计算得到的 结果为 9.525 倍,相对误差约为 3.44%,说明模型 有较高的计算精度。

利用有限元软件分析放大机构的固有频率,得 到其前四阶模态如图9所示。



Fig. 9 First four modals analyses of amplifier

从图 9 中可以看出,二阶振型为放大机构输出 位移方向的变形,是放大机构工作时的主要变形形 式。采用解析方法得到的固有频率应为二阶固有频 率,计算值为 153.24 Hz,有限元分析值为 143.78 Hz,相对误差约为 6.6%,表明放大机构的固 有频率计算模型有较高的精度。

4 位移模型

考虑 SGMA 和放大机构的相互作用,建立能够 反映 FASGMA 整体输出的位移模型。为描述 SGMA 磁场和应变分布的不均匀性,将每段 GMM 棒沿轴 向划分为 n 个质量-弹簧-阻尼单元(n 为任意正整 数),则整个致动器表示为如图 10 所示的多自由度 振动系统。

以系统静平衡位置为坐标原点,该多自由度系统的运动微分方程为





图 10 SGMA 位移模型等效图

Fig. 10 Equivalent diagram of displacement model for SGMA

$$\mathbf{K}_{e} = \begin{bmatrix} k_{PM} + k_{e} & -k_{e} & & \\ -k_{e} & 2k_{e} & -k_{e} & & \\ & -k_{e} & \ddots & \ddots & \\ & & \ddots & 2k_{e} & -k_{e} \\ & & & -k_{e} & k_{PM} + k_{e} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{P}_{j} = \begin{bmatrix} 0 & p_{j1} & \cdots & p_{ji} & \cdots & p_{jn} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

式中 k_{PM}——永磁体刚度

c_{PM}——永磁体阻尼系数

*m*_s——输出杆质量 *k*_s——碟簧刚度

m_i — 每段 GMM 棒中第 *i* 个质−弹−阻单元 的等效质量

m_{PM}——每段永磁体的等效质量

c,——输出杆与外壳之间阻尼系数

- *c_e*──GMM 棒中任一质-弹-阻单元的阻尼 系数
- X——SGMA 的位移向量

将矩阵 K_e 中的相应元素换为 c_{PM} 和 c_e ,可得矩 阵 C_e 。在磁致伸缩驱动力向量 [$P_1 P_2 P_3 F_{out}$]^T 中, $P_j(j=1,2,3)$ 为包含 n+1个元素的子向量。其 中,永磁体在磁场作用下不产生应变,不受磁致伸缩 驱动力作用,所以对应位置的元素为 0。在 GMM 棒 上,第 j 段 GMM 棒上第 i 个质-弹-阻单元所受的等 效磁致伸缩驱动力可用 $P_{ji}(i=1,2,\dots,n)$ 表示,如 图 10 所示。

$$\begin{cases} f_{ji} = SE_{II}\lambda(I,z) \\ p_{ji} = f_{ji} - f_{j(i+1)} & (i = 1, 2, \cdots, n) \\ p_{jn} = f_{jn} \end{cases}$$
(14)

- 式中 E_H-----GMM 棒弹性模量
 - S——GMM 棒横截面积
 - *f_{ji}*——第*j*段 GMM 棒上第*i*个质-弹-阻单元 所受的磁致伸缩驱动力

可以看出,最后一个永磁体产生的位移即为 SGMA 的输出位移,经过放大机构放大,最终输出为 $x_{out} = R_{amp}(0,0,\dots,0,1)X$ (15)

5 模型验证

为验证模型的有效性,制作了 FASGMA 样机, 主要参数如表 2 所示,搭建了以高速数据采集卡 (Data acquisition card, DAQ)为核心的实验测试系统。

表 2 FASGMA 主要参数

Tab. 2 Main parameters of FASGMA

| 参数 | 数值 |
|---|--------------------|
| 永磁体总长 L _{PM} /mm | 15 |
| GMM 棒总长 L _{GMM} /mm | 45 |
| 永磁体和 GMM 棒模截面积 S/mm ² | 16π |
| 线圈匝数 N | 500 |
| GMM 饱和磁化强度 M _s /(A·m ⁻¹) | 8×10^{5} |
| GMM 饱和磁致伸缩系数 λ_s | 1×10^{-3} |
| GMM 钉扎系数 k/Am ⁻¹ | 2 208 |
| GMM 可逆系数 c | 0.18 |
| GMM 形状系数 a | 12 800 |
| GMM 磁化常数 a | -0.001 |
| GMM 弹性模量 E _H /GPa | 30 |

5.1 实验系统设计

实验测试系统如图 11 所示,根据功能,该系统 大致可以分为4个模块:电源模块、采集模块、致动 器模块和主控计算机。

5.2 模型自由度确定

在位移模型中,SCMA 被等效为多自由度振动 系统,这样的等效能够有效描述磁场不均匀性对致 动器输出的影响。自由度数越多,模型越精细,越接 近实际情况。但是,自由度数增加伴随而来的是模 型运算量的加大,图 12 为输入 5 A 的阶跃电流时, 不同自由度下稳态位移的计算结果。





可以看出,单自由度模型与多自由度模型的稳态位移计算值相差约6μm,当自由度超过50时,模型的计算结果变化不大,所以在实际计算中,自由度数可以选为50。

5.3 实验结果与分析

5.3.1 阶跃激励实验

图 13 为输入 5A 的阶跃电流时 FASGMA 的响 应曲线,可以看出,系统的输出位移约为 130 μm,达 到稳态的时间约为 70 ms。与不连接放大机构的致 动器相比,系统的响应时间更长,主要是因为放大机 构的等效质量较大,增加了系统的惯性。

在此基础上,将不同幅值的直流电流信号通入



致动器,可以得到不同电流下系统的输出位移,与模型计算结果之间的对比如图 14 所示。



从图 14 中可以看出,模型与实验数据之间有较高的吻合度,相对误差基本都在 5% 以下。最大误差出现在驱动电流为-5 A 时,误差约为 6.5 μm,相 对误差约为 5%,说明模型在描绘系统静态特性时 有较高的精度。

5.3.2 正弦激励实验

在 FASGMA 中分别施加 20、40、60、80 Hz 的 驱动电流,得到的输出位移曲线与模型计算值如 图 15 所示。可以看出,在实验频率范围内,系统输 出与输入之间有较好的跟随特性。当激励频率为 20、40 Hz 时,模型结果与实验数据吻合度较高。



Fig. 15 Response curves of FASGMA in sinusoidal excitation

而在 60、80 Hz 的激励下,实验测得的输出位移明 显大于模型计算值,这主要是由于放大机构的一 阶固有频率处于 60、80 Hz 之间,发生了谐振,而且 一阶振型与放大机构的主要变形方式在同一平面 内,有助于增大系统输出位移。但是需要说明的 是,放大机构的一阶振型与目标输出方向不完全 相同,这将导致放大机构在一阶共振点附近工作 稳定性降低。由图 15 可看出,当驱动电流频率为 80 Hz 时,系统各周期的输出位移并不一致,说明 系统不宜工作于该频率下。

6 结论

(1)设计了柔性铰链放大的叠堆式超磁致伸缩 致动器(FASGMA),可应用于新型电液伺服阀的驱 动。GMM 棒和永磁体交替排布的结构形式既保留 了两端对置式 GMA 质量、体积小的优点,同时提高 了偏磁场分布的均匀性。柔性铰链放大机构可以有 效放大 SGMA 的输出位移,使最终输出位移满足负 载要求。 (2)根据 SGMA 的结构特点,利用磁路模型和毕 奥-萨伐尔定律建立了 SGMA 磁场模型,结合 J-A 模 型和二次畴转模型建立了 SGMA 应变模型,模型能 够刻画致动器轴线上应变分布的不均匀性。

(3)应用力学基本原理,计算了柔性铰链机构 的放大倍数和固有频率,提出了放大机构优化设计 方法,确定了机构各结构参数,用有限元方法对计算 结果进行了验证。

(4) 基于 SGMA 轴向应变分布不均的特点,考虑 SGMA 和柔性铰链的相互作用,建立了 FASGMA 的多自由度位移模型,并根据阶跃响应稳态位移的 计算精度确定了自由度的合理取值。

(5)搭建了实验测试系统,完成了 FASGMA 的 阶跃和正弦激励实验。实验表明,阶跃激励下, FASGMA 的最大输出位移约为 130 μm,与模型误差 约为 5%,响应时间约为 70 ms;正弦激励下, FASGMA 能稳定工作于 60 Hz 以下,对激励信号有 较好的跟随特性,输出波形和幅值与模型吻合较好, 证明了模型的正确性。

参考文献

- 1 贾振元,郭东明. 超磁致伸缩微位移执行器原理与应用[M]. 北京:科学出版社,2008.
- 2 张雷,邬义杰,王彬,等. 超磁致伸缩构件精密加工异型孔滑膜控制[J]. 浙江大学学报:工学版, 2012, 46(8): 1412 1418. ZHANG Lei, WU Yijie, WANG Bin, et al. Non-cylinder holes precision machining by giant magnetostrictive components with sliding mode control[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2012, 46(8): 1412 - 1418. (in Chinese)
- 3 薛光明,张培林,何忠波,等.强偏置超磁致伸缩致动器准静态位移建模与实验[J/OL].农业机械学报,2015,46(7): 318-324. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20150745&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn. 1000-1298.2015.07.045.

XUE Guangming, ZHANG Peilin, HE Zhongbo, et al. Modeling and experiment of strong bias giant magnetostrictive actuator's semi-static displacement[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 318 – 324. (in Chinese)

4 张雷,邬义杰,刘孝亮,等.嵌入式超磁致伸缩构建多场耦合优化[J/OL].农业机械学报,2012,43(5):190-196.http: //www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20120533&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012. 05.033.

ZHANG Lei, WU Yijie, LIU Xiaoliang, et al. Multi-field coupling model of embedded giant magnetostrictive components optimization[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 190-196. (in Chinese)

5 孟爱华,刘成龙,陈文艺,等.超磁致伸缩致动器的小脑神经网络前馈逆补偿-模糊 PID 控制[J].光学精密工程,2015, 23(3):753-759.

MENG Aihua, LIU Chenglong, CHEN Wenyi, et al. CMAC feed forward inverse compensation-fuzzy PID control for giant magnetostrictive actuator[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(3): 753 - 759. (in Chinese)

- 6 YANG Z, HE Z, LI D, et al. Direct drive servo valve based on magnetostrictive actuator: multi-coupled modeling and its compound control strategy[J]. Sensors and Actuators: Physical, 2015, 235: 119-130.
- 7 朱玉川,李跃松. 射流伺服阀用放大型超磁致伸缩执行器建模及分析[J]. 航空学报, 2014, 35(11): 3156-3165. ZHU Yuchuan, LI Yuesong. Modeling and analysis for amplified giant magnetostrictive actuator applied to jet-pipe electro-hydraulic servovalve[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(11): 3156-3165. (in Chinese)
- 8 胡均平,李科军. 磁流体对双喷嘴挡板伺服阀工作性能的影响[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2016, 47(7): 2287 2295. HU Junping, LI Kejun. Influence of magnetic fluids on working performance of twin flapper-nozzle servo valve [J]. Journal of

Central South University: Science and Technology, 2016, 47(7): 2287 – 2295. (in Chinese)

- 9 SMITH R. A nonlinear physics-based optimal control method for magnetostrictive actuators [J]. Journal of Intelligent Material System and Structure, 1998, 9(6): 468-486.
- 10 STACHOWIAK D. The influence of magnetic bias and prestress on magnetostriction characteristics of a giant magnetostrictive actuator[J]. Przeglad Elektrotechniczny, 2013, 89(4): 233 236.

- 33 ERDEM G, ÇAĞDAS S, CANOĞLU M C, et al. Comparison of empirical Bayesian Kriging and geo-Anfis methods for interpolating hydraulic head in a Karst Alluvium [C] // Iemss 2016, International Congress on Environmental Modelling and Software, 2016.
- 34 MWENDA K M. Quantifying uncertainty of spatial interpolation of fine particulate matter in small regions using empirical Bayesian Kriging[C] // International Chemical and Environmental Engineering Conference Iceec, 2014.
- 35 KRIVORUCHKO K. Spatial statistical data analysis for GIS users[M]. Redlands: ESRI Press, 2011.
- 36 ZHANG S W, SHEN C Y, CHEN X Y, et al. Spatial interpolation of soil texture using compositional Kriging and regression Kriging with consideration of the characteristics of compositional data and environment variables [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(9):1673-1683.
- 37 CAMBARDELLA C A, MOORMAN T B, NOBAL J M, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(5):1501 - 1511.
- 38 张世文,王胜涛,刘娜,等. 土壤质地空间预测方法比较[J]. 农业工程学报,2011,27(1):332-339. ZHANG Shiwen, WANG Shengtao, LIU Na, et al. Comparison of spatial prediction method for soil texture[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1):332-339. (in Chinese)
- 39 张世文,叶回春,王来斌,等.景观高度异质区土壤有机质时空变化特征分析[J/OL].农业机械学报,2013,44(12): 105-113. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20131218&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.018.
 ZHANG Shiwen, YE Huichun, WANG Laibing, et al. Temporal and spatial characteristics of soil organic matter for landscape
 - heterogeneity area [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12):105 113. (in Chinese)
- 40 CHAI Xurong, SHEN Chongyang, YUAN Xiaoyong, et al. Spatial prediction of soil organic matter in the presence of different external trends with REML-EBLUP[J]. Geoderma, 2008, 148(2):159-166.
- 41 苑小勇,黄元仿,高如泰,等.北京市平谷区农用地土壤有机质空间变异特征[J].农业工程学报,2008,24(2):70-76. YUAN Xiaoyong, HUANG Yuanfang, GAO Rutai, et al. Spatial variability characteristics of farmland soil organic matter in Pinggu District, Beijing, China[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(2):70-76. (in Chinese)
- 42 敖子强,林文杰,严重玲,等. 土法炼锌区土壤重金属形态及其转化[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2):564-569. AO Ziqiang, LIN Wenjie, YAN Chongling, et al. Speciation and transformation of heavy metals in the indigenous Zinc smelting area[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(2):564-569. (in Chinese)
- 43 余涛,杨忠芳,钟坚,等. 土壤中重金属元素 Pb、Cd 地球化学行为影响因素研究[J]. 地学前缘,2008,15(5):67-73.
 YU Tao, YANG Zhongfang, ZHONG Jian, et al. Factors affecting the geochemical behavior of heavy metal elements Pb and Cd in soil[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(5):67-73. (in Chinese)

(上接第 428 页)

11 杨旭磊,朱玉川,费尚书,等. 超磁致伸缩电静液作动器磁场分析与优化[J]. 航空动力学报, 2016, 31(9): 2210-2217.

YANG Xulei, ZHU Yuchuan, FEI Shangshu, et al. Magnetic field analysis and optimization of giant magnetostrictive electrohydrostatic actuator [J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(9): 2210-2217. (in Chinese)

- 12 BRAGHIN F, CINQUEMANI S, RESTA F. A low frequency magnetostrictive inertial actuator for vibration control[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012, 180: 67 74.
- 13 ZHANG H, ZHANG T, JIANG C. Design of a uniform bias magnetic field for giant magnetostrictive actuators applying triple-ring magnets [J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22: 115009.
- 14 HALL D L. Dynamics and vibrations of magnetostrictive transducers [D]. Iowa City: Iowa State University, 1994.
- 15 WANG X, WU J, JIA Z, et al. Mechanical and magnetic analysis of giant magnetostrictive transducer [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 79: 166 171.
- 16 牟星,唐海军,高学绪,等.超磁致伸缩致动器中偏置磁场的有限元模拟[J].磁性材料及器件,2014,45(4):6-10.
 MOU Xing, TANG Haijun, GAO Xuexu, et al. Finite element modeling of magnetic bias field for magnetostrictive actuator[J].
 Journal of Magnetic Materials and Devices, 2014,45(4):6-10. (in Chinese)
- 17 YANG Z, HE Z, LI D, et al. Bias magnetic field of stack giant magnetostrictive actuator: design, analysis and optimization [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2016, 2016: 1 - 13.
- 18 董云峰,曲兴田,沈传亮,等. 压电直接驱动式伺服阀[J]. 吉林大学学报:工学版,2006,36(5):678-680. DONG Yunfeng, QU Xingtian, SHEN Chuanliang, et al. Servo-valve driven by piezoelectric ceramics [J]. Journal of Jinlin University: Engineering and Technology Edition, 2006, 36(5):678-680. (in Chinese)
- 19 QI K, YANG X, CHAO F, et al. Analysis of the displacement amplification ratio of bridge-type [J]. Mechanism and Machine Theory, 2015, 87: 45-56.
- 20 凌明祥,刘谦,曹军义,等. 压电位移放大机构的力学解析模型及有限元分析[J]. 光学精密工程, 2016, 24(4): 812-818. LING Mingxiang, LIU Qian, CAO Junyi, et al. Analytical model and finite element piezoelectric displacement amplification mechanism[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(4): 812-818. (in Chinese)