

文章编号 1004-924X(2017)04-0928-06

## 磁致伸缩压力传感器设计及其输出特性

王博文<sup>1\*</sup>, 王启龙<sup>1</sup>, 韩建晖<sup>1</sup>, 万丽丽<sup>1</sup>, 曹淑瑛<sup>1</sup>, 王 宁<sup>2</sup>, 刘华平<sup>2</sup>

- (1. 河北工业大学 电磁场与电器可靠性省部共建重点实验室, 天津 300130;
2. 清华大学 计算机科学与技术系, 智能技术与系统国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:**研究了铁镓合金(Galfenol)的磁致伸缩特性,提出一种基于 Galfenol 的新型磁致伸缩压力传感器,以实现机器人的触觉力精确感知。该传感器利用磁致伸缩逆效应将压力转换为电压信号,从而完成对压力的精确测量。设计、制作了磁致伸缩压力传感器,采用双永磁体回形磁路优化了压力传感器的磁场。对传感器进行了理论分析与实验研究,讨论了偏置条件、外压力等因素对输出电压峰值的影响。实验结果表明,在偏置磁场为 4.8 kA/m、施加的压力为 2.5 Hz、6 N 时,传感器的输出电压峰值达 16 mV,且输出电压峰值与压力呈较好的线性关系。研制的传感器具有结构简单、线性度好、反应速度快等特点,可以满足机器人触觉感知的需求,也可应用于其他领域的压力测量。

**关键词:**压力传感器;触觉感知;铁镓合金;磁致伸缩逆效应

**中图分类号:**TP212.12 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172504.0928

## Design of magnetostrictive pressure sensor and its output characteristics

WANG Bo-wen<sup>1\*</sup>, WANG Qi-long<sup>1</sup>, HAN Jian-hui<sup>1</sup>,  
WAN Li-li<sup>1</sup>, CAO Shu-ying<sup>1</sup>, WANG Ning<sup>2</sup>, LIU Hua-ping<sup>2</sup>

- (1. Province-Ministry Joint Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;
2. State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

\* Corresponding author, E-mail: bwwang@hebut.edu.cn

**Abstract:** Magnetostrictive characteristics of Galfenol were researched and a new type of magnetostrictive pressure sensor based on the Galfenol was proposed to implement the accurate perception of tactile sensation for robots. The sensor converts a pressure signal into a voltage signal based on magnetostrictive inverse effect to implement the accurate measurement of the pressure. The magnetostrictive pressure sensor was designed and fabricated, and the magnetic field of pressure sensor was optimized by a magnetic circuit of double permanent magnets. Then, the sensor was analyzed theoretically and investigated experimentally, and the influences of bias condition, external pressure and other factors on the peak value of output voltage were discussed. The results show that when bias magnetic field is 4.8 kA/m and applied pressure is 2.5 Hz and 6 N, the peak value of output voltage reaches 16 mV

收稿日期:2016-06-30;修订日期:2016-09-19.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51171057);河北省自然科学基金资助项目(No. E2016202034);河北省高等学校科学技术研究重点项目(No. ZD2016004)

and the peak value of output voltage has better linear relation with the pressure. The developed sensor is characterized by simple structure, good linearity, and a quick response speed. It meets the requirements of tactile sensation of robots and is suitable for the pressure measurement in other fields.

**Key words:** pressure sensor; tactile sensation; Galfenol; magnetostrictive inverse effect

## 1 引言

铁镓合金 Galfenol 是一种新型的磁致伸缩材料。与稀土超磁致伸缩材料(Terfenol-D)及压电材料相比<sup>[1-4]</sup>,铁镓合金材料具有脆性小、机械性能好的特点。该材料有效地克服了稀土超磁致伸缩材料的脆性问题,能承受很大的正应力和切应力,常应用在换能器与致动器等领域。目前,铁镓材料的磁致伸缩逆效应在传感器件<sup>[5]</sup>与换能器件<sup>[6,7]</sup>中得到了广泛应用,如位移传感器、压力传感器和振动发电器件等。在仿人型机器人传感器领域,触觉力的测量对于发展智能机器人具有重要的作用<sup>[8]</sup>。Toshihiko 等人研究了用于机器人指尖测试的力传感器<sup>[9-10]</sup>。Kappassov 等人用计算机算法实现了机器人触觉传感器的触觉力控制和触觉目标识别<sup>[11]</sup>。因此研制新型触觉力传感器对于促进机器人触觉感知技术的发展具有重要意义。

本文基于磁致伸缩逆效应,应用铁镓材料设计、制作了一种新型的压力传感器。研究了铁镓材料的磁致伸缩特性,研究表明该类材料具有迟滞小、反应速度快和温度稳定性高的特点。运用 COMSOL 软件对传感器进行了磁场仿真,验证了铁镓材料磁场的均匀性。对磁致伸缩压力传感器进行了理论分析与实验研究,结果表明在频率一定时,偏置条件和外压力对传感器输出特性具有较大的影响。该压力传感器输出电压信号,输出电压峰值与压力成线性关系,而且测量电路简单、精度高,可用于机器人指尖对触觉力的测量,也可应用于其他对压力敏感领域。

## 2 压力传感器的结构与工作原理

### 2.1 压力传感器结构

压力传感器由 FeGa 材料、探测线圈、永磁体、橡胶触头、传动棒、导磁体、弹簧、外壳等组成,具体结构如图 1 所示。铁镓材料一端固定在非导磁材料外壳上,并由弹性铝片衬底作为保护,另

一端为受力端,接受外部压力,形成悬臂梁结构。外部压力由橡胶触头和传动棒传递给悬臂梁。FeGa 材料主体部分绕有探测线圈,偏置磁场通过永磁体、导磁体和铁镓材料构成回形通路,使 Fe-Ga 材料主体部分的磁场均匀分布。

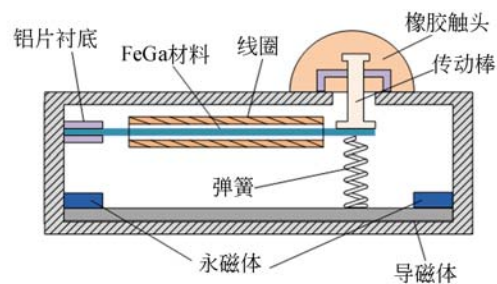


图1 压力传感器结构

Fig. 1 Structure of pressure sensor

导磁体略长于 FeGa 材料,永磁体与 FeGa 材料有一定气隙。施力端与导磁体之间用弹簧连接,使悬臂梁受压力后恢复原位。

FeGa 材料具有饱和磁场低、磁滞小、线性度好等优点<sup>[12]</sup>。测试得到的 FeGa 材料的磁致伸缩与磁场的关系曲线如图 2 所示。从图 2 可见,Fe-Ga 材料的磁致伸缩在低磁场下表现为线性,且斜率较大,滞回特性小。当磁场为 10 kA/m 时,FeGa 材料的磁致伸缩已达到饱和。在 20~60 °C 条件下,测试了 FeGa 材料的磁致伸缩与磁场的关系,发现 FeGa 材料的磁致伸缩随温度变化很小。实验结果表明,应用 FeGa 材料研制的压力传感器具有迟滞小、反应速度快和温度稳定性高的特点。

采用 COMSOL 软件对压力传感器的磁场进行仿真分析,得到的压力传感器的磁场分布如图 3 所示。在图 3(a)中,左右永磁体与铁镓材料、导磁体形成回形通路,使铁镓材料主体部分处于较均匀的偏置磁场中,磁场差值在 5% 以内。以悬臂梁轴向方向为横坐标,以磁通密度  $B$  为纵坐标,可得到压力传感器轴向的磁场变化关系,如图 3(b)所示。在探测线圈区间,磁场基本均匀分布。

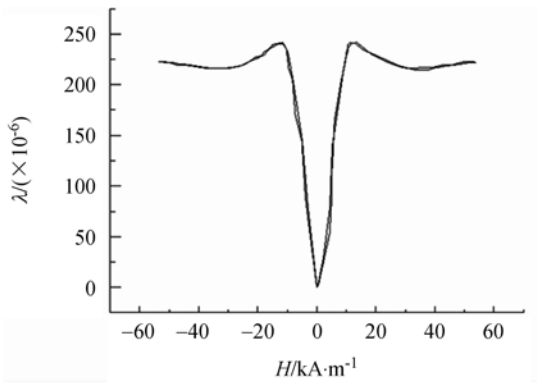
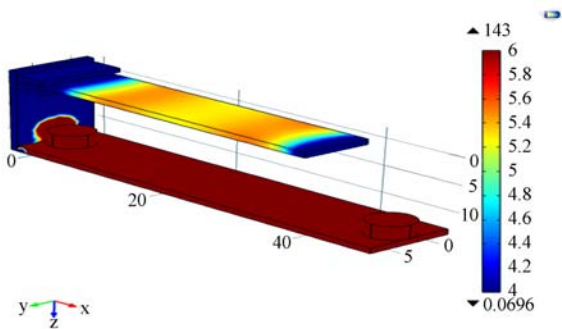


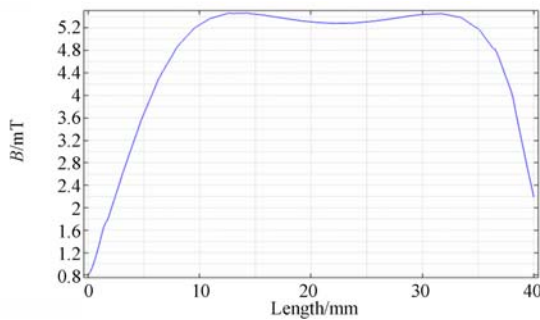
图 2 FeGa 材料磁致伸缩与磁场的关系

Fig. 2 Dependence of magnetic field on magnetostriction for FeGa material



(a) 悬臂梁结构磁路仿真

(a)Magnetic circuit simulation of cantilever beam structure



(b) 悬臂梁轴向磁场分布

(b)Axial magnetic field distribution of cantilever beam

图 3 悬臂梁磁路分析

Fig. 3 Analysis of magnetic circuit of cantilever beam

### 2.2 压力传感器工作原理

在压力作用下,FeGa 材料中的磁畴将产生运动,导致材料的磁化强度  $M$  发生改变,使材料中的磁感应强度  $B$  发生变化。由电磁感应定律可知,磁感应强度  $B$  的变化将使传感器探测线圈两端产生电压,可表示为:

$$u(t) = NA \frac{dB}{dt}, \quad (1)$$

式(1)中, $N$  和  $A$  分别表示探测线圈的匝数和截面积<sup>[13]</sup>, $t$  为时间。可见,压力传感器的输出电压与磁感应强度  $B$  随时间的变化率、探测线圈的匝数  $N$  和线圈的截面积  $A$  成正比。

基于材料的压磁方程,磁感应强度  $B$  可表示为:

$$B = d\sigma + \mu H, \quad (2)$$

式中  $d$  为压磁系数, $\sigma$  为材料所受到的正应力 (Pa); $\mu$  为磁导率, $H$  为施加的磁场。当正应力  $\sigma$  与磁场  $H$  较小时,可以认为压磁系数  $d$  和磁导率  $\mu$  为常数。因此,式(2)表示的磁感应强度  $B$  主要由铁镓材料的正应力和磁场决定<sup>[14]</sup>。

对悬臂梁施加的外力为  $F(t) = F_0 \sin \omega t, 0 \leq \omega t \leq \frac{\pi}{2}$ ,其中  $F_0$  为外力的幅值。可将外力分解为正向力  $F_\sigma$  和切向力  $F_\tau$ ,如图 4 所示。正向力  $F_\sigma$  为:

$$F_\sigma = F(t) \sin \theta = F_0 \sin^2 \omega t, \quad (3)$$

其中  $\theta$  为悬臂梁在外力作用下转动的角度,可表示为  $\theta = \omega t$ ,角速度  $\omega = 2\pi f, f = 2.5 \text{ Hz}$ 。则正应力  $\sigma$  为:

$$\sigma = \frac{F_\sigma}{S}, \quad (4)$$

式中  $S$  为 FeGa 材料的横截面积。

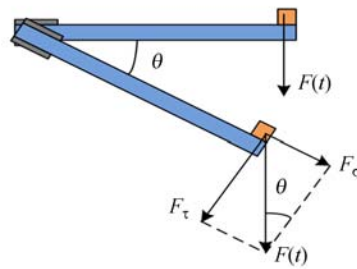


图 4 悬臂梁受压力作用时的力的分解图

Fig. 4 Force decomposition of cantilever beam under pressure action

将式(3)、(4)带入式(2),得磁感应强度  $B$ :

$$B = \frac{F_0 d \sin^2 \omega t}{S} + \mu H, \quad (5)$$

将式(5)带入式(1)可得传感器的输出电压:

$$u(t) = NA \left[ \frac{F_0 d \omega}{S} \sin(2\omega t) + \mu \frac{\partial H}{\partial t} \right], \quad (6)$$

当传感器结构与压力频率一定时,式(6)中的

参数  $N$ 、 $A$ 、 $d$ 、 $\omega$ 、 $\mu$  均为常数。从式(6)可见,在忽略磁场变化条件下,当角速度  $\omega t = \frac{\pi}{4}$ , 即  $t = 0.05$  s时,输出电压取得峰值,并且输出电压与施加的压力幅值  $F_0$  成线性关系。从式(6)还可发现,除了压力对输出电压有重要影响之外,施加磁场的变化率对传感器的输出电压也有影响。

### 3 实验结果与分析

搭建了压力传感器的测试系统,系统由加压装置、传感器、磁场调节装置、示波器等组成,测试系统的结构框图如图 5 所示。对橡胶触头施加频率一定的压力,通过示波器可以测试传感器中探测线圈的输出电压。

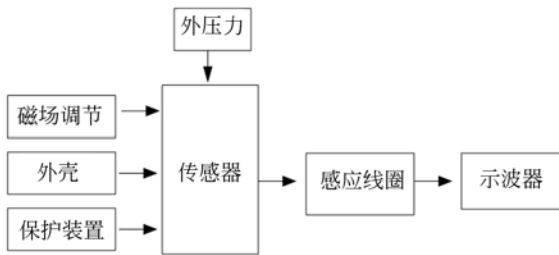


图 5 压力传感器的测试系统框图

Fig. 5 Block diagram of pressure sensor test system

在室温自然环境下,模拟机器人手以一定的频率抓取物体,对传感器进行了压力 ( $f = 2.5$  Hz) 测试,由数字示波器读取感应电压峰值,每个点采集 3 组数据并取平均值,以保证实验数据可靠。得出了不同偏置磁场  $H$  条件下的压力幅值  $F_0$  与输出电压峰值  $V$  的关系,如图 6 所示。可见,施加的压力幅值  $F_0$  与输出电压峰值  $V$  呈很好的线性关系,与式(6)的分析一致,表明可以用式(6)描述传感器输出电压与压力幅值之间的关系。图 6 中的结果也表明研制的传感器具有较好的压力与电压对应关系<sup>[15-17]</sup>。从图 6 还可看出,偏置磁场对于传感器的输出电压峰值具有重要影响。

通过磁场调节装置,可以调节偏置磁场  $H$  的大小。在施加不同压力条件下得到的偏置磁场  $H$  与输出电压峰值  $V$  的关系如图 7 所示。从图 7 可见,当偏置磁场从 0 增加到 4.8 kA/m 时,输出电压峰值随偏置磁场的增加快速增加;偏置磁场为 4.8~16 kA/m 时,输出电压峰值随偏置磁场

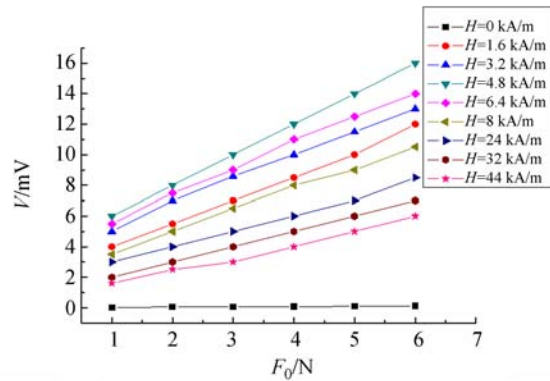


图 6 不同偏置磁场下压力幅值  $F_0$  与输出电压  $V$  峰值的关系

Fig. 6 Relationship between the peak value of output voltage  $V$  and the peak value of pressure  $F_0$  under different bias magnetic fields

的增加逐渐降低;当偏置磁场大于 16 kA/m 时,输出电压峰值随偏置磁场的增加缓慢降低。偏置磁场达 4.8 kA/m 时,输出电压峰值达到最大值。当偏置磁场一定时,施加的压力增大,传感器的输出电压峰值也增大。当偏置磁场达 4.8 kA/m、压力幅值为 6 N 时,输出电压峰值为 16 mV。

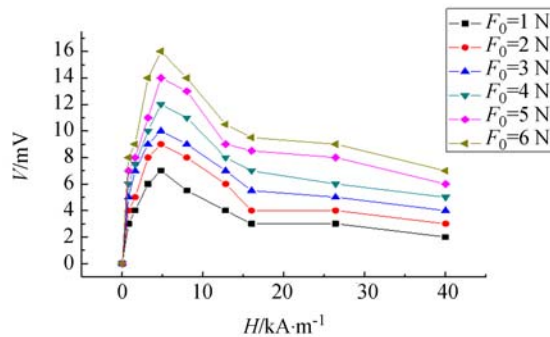


图 7 施加不同压力时偏置磁场  $H$  与输出电压峰值  $V$  的关系

Fig. 7 Relationship between bias magnetic field  $H$  and peak value of output voltage  $V$  at different pressures

图 8 示出了偏置磁场为 4.8 kA/m、施加不同的压力下输出电压  $u(t)$  与时间  $t$  的关系曲线。可见输出电压  $u(t)$  与时间  $t$  的关系接近按正弦规律变化,与式(6)的分析一致,符合机器人手抓取物体过程中压力的变化。当时间小于 0.05 s 时,施加的压力变化率处于增加阶段,此时,磁致伸缩材料的逆效应引起材料的磁感应强度  $B$  的变化率增加,因而输出电压随着时间的增加而增加。

当时间处于 0.05~0.1 s 时,施加的压力变化率处于减小阶段,磁致伸缩材料的逆效应引起材料的磁感应强度  $B$  的变化率降低,使传感器的输出电压随着时间的增加而减小。

随着施加压力的增加,传感器输出电压逐渐

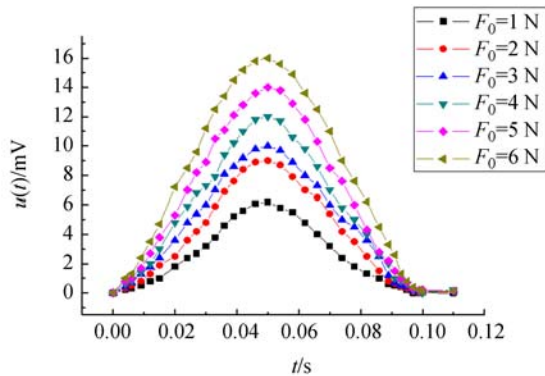


图 8 偏置磁场定为 4.8 kA/m、施加不同的压力下输出电压  $u(t)$  与时间  $t$  的关系曲线

Fig. 8 Relationship between output voltage  $u(t)$  and time  $t$  under different pressures when bias magnetic field is 4.8 kA/m

#### 参考文献:

- [1] 黄文美, 薛胤龙, 王莉, 等. 考虑动态损耗的超磁致伸缩换能器的多场耦合模型[J]. 电工技术学报, 2016, 31(7):173-178.  
HUANG W M, XUE Y L, WANG L, et al.. Multi-field coupling model considering dynamic losses for giant magnetostrictive transducers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(7):173-178. (in Chinese)
- [2] 贺学锋, 杜志刚, 赵兴强, 等. 悬臂梁式压电振动能量采集器的建模及实验验证[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8):1771-1778.  
HE X F, DU Z G, ZHAO X Q, et al.. Modeling and experimental verification for cantilevered piezoelectric vibration energy harvester[J]. Opt. Precision Eng., 2011, 19(8):1771-1778. (in Chinese)
- [3] ZHANG J H, MA S L, QIN L F. Analysis of frequency characteristics of MEMS piezoelectric cantilever beam based energy harvester[C]. Proceedings of 2015 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAWDA), IEEE, 2015: 193-197.
- [4] RAMEZANPOUR R, NAHVI H, ZIAEI-RAD S. Electromechanical behavior of a pendulum-based piezoelectric frequency up-converting energy harvester[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 370: 280-305.
- [5] 王博文, 张露予, 王鹏, 等. 磁致伸缩位移传感器检测信号分析[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2):358-364.  
WANG B W, ZHANG L Y, WANG P, et al.. Analysis of detection signal for magnetostrictive displacement sensor. [J]. Opt. Precision Eng., 2016, 24(2):358-364. (in Chinese)
- [6] 曹淑瑛, 桑杰, 郑加驹, 等. Gallfenol 悬臂梁能量采集器的机电耦合动态模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21):5623-5631.  
CAO S Y, SANG J, ZHENG J J, et al.. Mechanical-electro coupled dynamic model of Gallfenol cantilever energy harvester [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21):5623-5631. (in Chinese)
- [7] 王福吉, 贾振元, 刘巍, 等. 复合薄膜磁致伸缩系数求解及悬臂梁结构优化[J]. 光学精密工程,

增加,输出电压  $u(t)$  与时间  $t$  的关系仍按正弦规律变化,表示研制的传感器可以用于探测机器人手抓取物体过程中压力的变化。

## 4 结 论

利用铁镓材料的磁致伸缩逆效应,设计、制作了一种新型的压力传感器。该传感器可应用于机器人指尖触觉力的测试。传感器为悬臂梁结构,设计时对磁路进行了优化,使悬臂梁主体磁场误差在 5% 以内。理论分析和实验研究表明:传感器的输出电压峰值与压力幅值成线性关系;偏置磁场从 0 增加到 4.8 kA/m 时,输出电压峰值随偏置磁场的增加快速增加;偏置磁场为 4.8~16 kA/m 时,输出电压峰值随偏置磁场的增加逐渐降低;当偏置磁场大于 16 kA/m 时,输出电压峰值随偏置磁场的增加缓慢降低。将偏置磁场确定为 4.8 kA/m,输出电压  $u(t)$  与时间  $t$  的关系接近正弦规律变化,压力幅值为 6 N 时,输出电压峰值达 16 mV。该传感器可用于机器人指尖对触觉力进行精确测量,同时也可应用于其他领域的压力测量。

- 2011,19(8):1832-1837.
- WANG F J, JIA Z Y, LIU W, *et al.*. Calculation of magnetostrictive coefficient of composite thin film and structure optimization of cantilever[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8):1832-1837. (in Chinese)
- [8] BOTTERON C, BRIAN D, MISHRA B, *et al.*. A low-cost UWB sensor node powered by a piezoelectric harvester or solar cells[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016(239):127-136.
- [9] KOYAMA K, SUZUKI Y, MING A, *et al.*. Grasping control based on time-to-contact method for a robot hand equipped with proximity sensors on fingertips[C]. *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2015:504-510.
- [10] GUNJI D, MIZOGUCHI Y, TESHIGAWARA S, *et al.*. Grasping force control of multi-fingered robot hand based on slip detection using tactile sensor[C]. *Proceedings of IEEE-International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 2008: 2605-2610.
- [11] KAPPASSOV Z, CORRALES J A, PERDREAUX V, *et al.*. Tactile sensing in dexterous robot hands — Review[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2015,74:195-220.
- [12] LI S Q, FU L L, BARBAREE J M, *et al.*. Resonance behavior of magnetostrictive micro/milli-cantilever and its application as a biosensor[J]. *Sensors & Actuators B: Chemical*, 2009, 137(2): 692-699.
- [13] 翁玲, 王博文, 孙英, 等. 磁场和应力作用下的超磁致伸缩换能器的动态模型[J]. *电工技术学报*, 2008,23(12):17-22.
- WENG L, WANG B W, SUN Y, *et al.*. Dynamic model of giant magnetostrictive transducer under magnetic field and stress[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*. 2008,23(12):17-22. (in Chinese)
- [14] SHU L, WU G C, CHEN D F, *et al.*. Modeling of galfenol bending actuator considering nonlinear hysteresis and dynamic real-time control strategy [J]. *Smart Materials & Structures*, 2016, 25(3): 035046.
- [15] CHO C, KYUH Y. Fabrication of flexible tactile force sensor using conductive ink and silicon elastomer[J]. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2016(237):73-80.
- [16] XU T Z, ZHAO L B, JIANG Z D, *et al.*. A high sensitive pressure sensor with the novel bossed diaphragm combined with peninsula-island structure [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016(237):66-76.
- [17] 郭鑫, 热合曼·艾比布力, 王鸿雁, 等. 自增强承压圆筒结构的超高压传感器[J]. *光学精密工程*, 2013,21(12):3152-3159.
- GUO X, RAHMAN · H, WANG H Y, *et al.*. Ultra-high pressure sensor with autofrettaged cylinder structure[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12):3152-3156. (in Chinese)

## 作者简介:



王启龙(1990—)男,山东临沂人,硕士研究生,2014年于山东农业大学获得学士学位,2017年于河北工业大学获得硕士学位,研究方向为新型磁性材料与器件。E-mail:343466771@qq.com

## 通讯作者:



王博文(1956—)男,辽宁沈阳人,教授,博士生导师,1995年于中国科学院金属研究所获博士学位,1997年于东北大学完成博士后研究工作,主要从事磁性材料与器件的研究工作。E-mail: bwwang@hebut.edu.cn