文章编号：1000-8608(2011)06-0832-05

超磁致伸缩力传感器及其实验研究

刘慧芳， 贾振元， 王福吉*， 葛春亚

（大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室，辽宁 大连 116024）

摘要： 基于磁致伸缩逆效应原理，以超磁致伸缩棒为敏感元件研究了一种具有高灵敏度的新型超磁致伸缩力传感器，通过集成在结构内部的霍尔传感器测量磁通密度来实现静态力的测量. 同时，为了提高传感器的测量灵敏度，提出了一种安装在霍尔传感器周围的不锈钢钢环的特殊结构. 给出了超磁致伸缩力传感器的测量原理和设计过程，并通过实验研究确定了偏置磁场、预紧力和超磁致伸缩棒的尺寸等因素对传感器输出特性的影响规律，分别得到了传感器工作的最佳偏置磁场和预紧力，为超磁致伸缩力传感器的深入研究和精确控制提供了一种技术途径.

关键词： 磁致伸缩力传感器；磁致伸缩逆效应；超磁致伸缩棒；实验研究

中图分类号： TH823 **文献标志码：** A

0 引 言

磁致伸缩力传感器是利用铁磁材料在外力作用下，其内部产生的机械应力导致材料相对磁导率发生变化的特性，将力输入转换成电磁输出. 此类传感器具有结构简单可靠、过载能力强、安装方便等优点[1]. 目前的磁致伸缩力传感器主要以硅钢片、坡莫合金、电工纯铁等作为核心材料，这些材料的磁致伸缩系数小($10^{-6}\sim10^{-5}$)、敏感性较差，并且多数都是基于电磁感应定律，只能测量动态力[2,3]. 超磁致伸缩材料的出现为该类传感器的发展提供了一种新型敏感材料[4,5]，其凭借室温下磁致伸缩系数大($1\ 500\times10^{-6}\sim2\ 000\times10^{-6}$)、机电耦合系数高、响应速度快等优异特性引起了国内外学术界及工业界的极大关注. 目前，国内外对超磁致伸缩材料的研究主要集中在基于磁致伸缩效应的执行器件，相对较成熟，而关于磁致伸缩静态力传感器的研究尚处于起步阶段，缺乏必要的设计理论，限制了该类器件的发展[6].

本文针对现有磁致伸缩力传感器技术的不足，设计一种以超磁致伸缩棒作为敏感元件，可实现静态力测量的超磁致伸缩力传感器，给出其测量原理及设计过程，并通过实验确定多种因素对传感器输出特性的影响规律，以期为超磁致伸缩力传感器的开发提供一种技术途径.

1 超磁致伸缩力传感器的测量原理和结构设计

1.1 测量原理

超磁致伸缩力传感器以超磁致伸缩棒作为敏感元件，采用集成在内部的霍尔传感器测量磁通密度，将力输入转化为电磁量输出. 依据的是超磁致伸缩材料的磁致伸缩逆效应原理，其本质是在力的作用下，材料内部磁畴发生转动，材料的磁导率发生变化，导致材料内部及其周围的磁通密度发生变化，从而引起霍尔传感器的输出电压发生相应变化.

超磁致伸缩材料工作在恒温条件下时，其压磁方程为[7]

$$\varepsilon = s^H\sigma + dH \tag{1}$$

$$B = d\sigma + \mu^\sigma H \tag{2}$$

式中：ε、σ、H、B、d、s^H 和 μ^σ 分别表示超磁致伸缩材料的应变、应力、磁场强度、磁通密度、磁致伸缩应变系数、恒定磁场作用下的柔顺系数和恒定应力作用下的磁导率.

从式(1)解出 H 并代入式(2)，得

$$B = \sigma(d-\mu^\sigma s^H/d) + \frac{\mu^\sigma}{d}\varepsilon \tag{3}$$

式中：超磁致伸缩棒的应变 $\varepsilon = \Delta L/L$，L 和 ΔL 分

收稿日期： 2010-03-05； **修回日期：** 2011-09-06.
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(50775021).
作者简介： 刘慧芳(1983-)，女，博士生；贾振元(1963-)，男，博士，教授，博士生导师；王福吉*(1974-)，男，博士，副教授，E-mail：wfjsll@dlut.edu.cn.

别是超磁致伸缩棒的初始长度和长度变化. ΔL 可通过基于磁化强度的磁致伸缩模型计算得到[8]：

$$\Delta L \approx \frac{L}{E\mu_0} B_0^2 \tag{4}$$

式中：E、μ_0 和 B_0 分别是弹性模量、真空中的磁导率和初始磁通密度. 因此，超磁致伸缩棒的应变为

$$\varepsilon = \frac{1}{E\mu_0} B_0^2 \tag{5}$$

将式(5) 代入式(3) 得

$$B = \sigma(d - \mu^{\sigma} s^{H}/d) + \frac{\mu^{\sigma} B_0^2}{dE\mu_0} \tag{6}$$

根据霍尔传感器的工作原理，其输出的霍尔电压为

$$U = KB \tag{7}$$

式中：K 为霍尔传感器的灵敏度系数.

将式(6) 和应力 $\sigma = F/A$ 代入式(7) 得

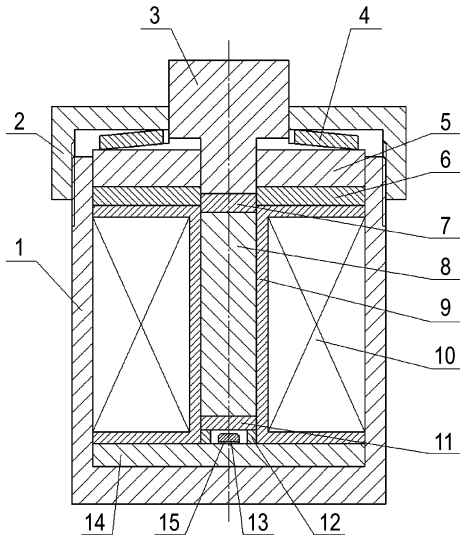
$$U = K\left[\frac{F}{A}(d - \mu^{\sigma} s^{H}/d) + \frac{\mu^{\sigma} B_0^2}{dE\mu_0}\right] \tag{8}$$

在恒定的偏置磁场作用下初始磁通密度 B_0 恒定不变，因此式(8) 中自变量和因变量分别为力 F 和电压 U，超磁致伸缩力传感器通过对输出电压的测量实现了力的测量.

1.2　结构设计

超磁致伸缩力传感器的结构如图 1 所示，其敏感元件是一个 TbDyFe 材料的超磁致伸缩棒. 外力直接作用在施力轴上，并通过施力轴、上导磁垫片传递给超磁致伸缩棒. 不锈钢钢环支撑在超磁致伸缩棒下端，霍尔传感器通过非导磁性胶粘贴在下导磁体上表面、不锈钢钢环内部. 超磁致伸缩棒的磁致伸缩逆效应特性与偏置磁场大小有关，因此采用通有直流电流的激励线圈为超磁致伸缩棒提供偏置磁场，以实现对偏置磁场的实时调节. 电工纯铁材料的上导磁体、上导磁垫片、下导磁垫片和下导磁体对磁通进行引导，保证了超磁致伸缩棒内部具有较均匀的磁通密度. 非导磁性不锈钢材料的外套和顶盖通过螺纹配合固定在一起，将整个超磁致伸缩力传感器结构封装在内部，防止外界环境对传感器内部磁路产生干扰.

为提高超磁致伸缩力传感器测量力的灵敏度，根据磁路特性在霍尔传感器周围增加一个不锈钢钢环结构. 其原理是不锈钢钢环的磁导率接近 1，同霍尔传感器和周围空气的导磁性能相似，因此磁通能够平均地穿过霍尔传感器及其周围结构，霍尔传感器内部磁通密度显著增加，进而实现对超磁致伸缩力传感器灵敏度的提高.



1 外套；2 顶盖；3 施力轴；4 碟形弹簧；5 端盖；6 上导磁体；7 上导磁垫片；8 超磁致伸缩棒；9 线圈骨架；10 激励线圈；11 下导磁垫片；12 不锈钢钢环；13 霍尔传感器；14 下导磁体；15 非导磁性胶

图 1　超磁致伸缩力传感器结构

Fig. 1　Structure of giant magnetostrictive force sensor

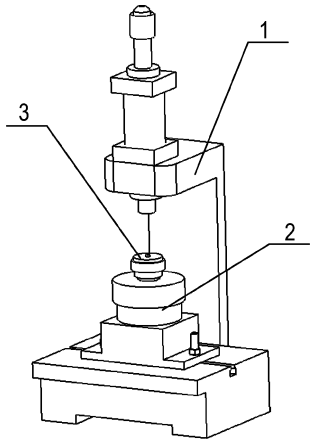
所以，根据磁致伸缩逆效应原理和超磁致伸缩材料特性，超磁致伸缩力传感器主要包括：产生磁致伸缩逆效应的超磁致伸缩材料、提供恒定磁场的激励线圈或永磁铁、导磁结构、磁通密度测量装置、施力装置以及防外界干扰的外套.

2　传感器输出特性实验

根据图 1 的设计，研制了超磁致伸缩力传感器样机，并对偏置磁场、预紧力以及超磁致伸缩棒尺寸等因素对传感器输出特性的影响规律进行了实验研究，实验系统结构如图 2 所示. 在本传感器中使用的超磁致伸缩棒是长度为 44 mm、直径为 12 mm 的 TbDyFe，激励线圈匝数为 535 匝. 实验系统采用压力机为传感器施加静态力，高速双极性电源为传感器中的激励线圈提供直流电流，称重传感器测量作用在超磁致伸缩力传感器上的实际力，万用表监测传感器的输出电压.

2.1　传感器静态力输出实验

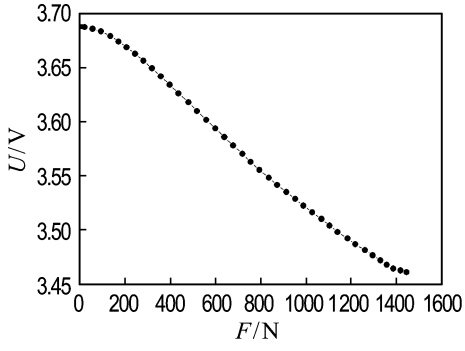
图 3 是电流分别为 0.9、1.8 和 2.4 A 时传感器输出电压与力的关系，从实验结果可知：第一，传感器不是在整个范围内都具有优异的线性输出特性，仅在 300～800 N 力作用下，其输出的线性关系较好. 第二，当力较小时，传感器的输出电压与力之间存在一定非线性关系，因此需要给超磁



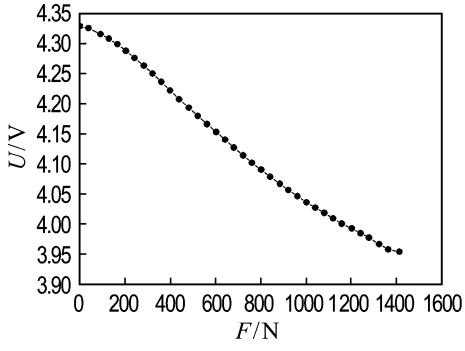
1 压力机；2 超磁致伸缩力传感器；3 称重传感器

图 2 传感器实验系统

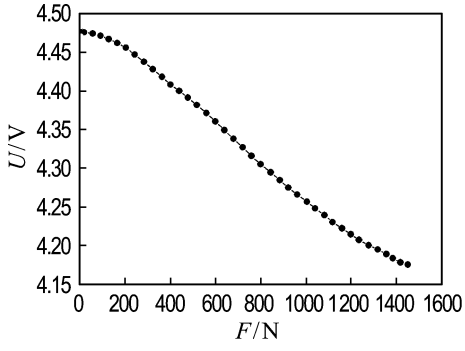
Fig. 2 Sensor's experiment system



(a) $I=0.9$ A



(b) $I=1.8$ A



(c) $I=2.4$ A

图 3 不同偏置电流下传感器输出电压与力的关系

Fig. 3 Relationship between output voltage and force of sensor under different bias current

致伸缩棒施加一定的预紧力以消除小信号时传感器输出的非线性现象.

2.2 偏置磁场对传感器输出特性的影响

为了提高传感器的灵敏度,在传感器正常工作前需要通过偏置磁场对超磁致伸缩棒进行预磁化,因此为了确定偏置磁场对传感器输出特性的影响规律并确定最佳偏置磁场,对传感器在不同偏置磁场下进行了实验,结果如图 4 所示. 在相同力的作用下,当电流从 0 逐渐增大到 1.8 A 时,传感器输出电压变化量的绝对值逐渐增大,并在1.8 A 附近达到最大值;但是当电流继续增大时,输出电压变化量的绝对值逐渐减小. 因此,在 1.8 A 电流产生的偏置磁场下,传感器相对具有最高的灵敏性. 这是因为磁场使磁畴向与施力方向平行的方向偏转,磁场越强,磁畴发生转动的数量越多、角度越大,材料的敏感性越强;但是磁场过强时,超磁致伸缩棒内磁畴转动的阻力增大,磁畴转动变得困难,使材料的磁化强度变化减小,传感器的输出电压变化减小.

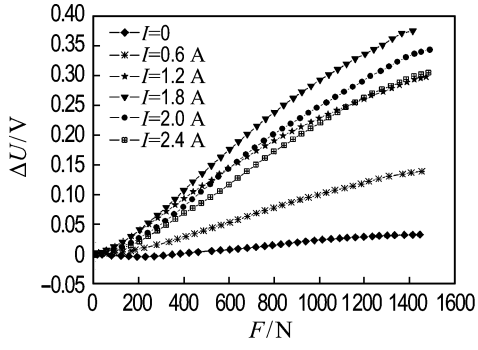


图 4 不同偏置电流下传感器输出电压变化与力的关系

Fig. 4 Relationship between output voltage variation and force of sensor under different bias current

2.3 预紧力对传感器输出特性的影响

从图 3 可知,传感器在较小外力作用下,输出电压和输入力之间存在一定的非线性关系,所以为了消除传感器在小信号作用下存在的非线性现象,需要为超磁致伸缩棒提供一定的预紧力. 由图 5 所示的不同预紧力下传感器的输出结果可知,预紧力不仅影响小信号时传感器输出的非线性特性,而且还关系到传感器的整个线性测量范围. 在 0 和 75 N 预紧条件下,传感器分别在 0～300 N 和 0～200 N 范围内存在非线性;当预紧力达到 200 N 和 245 N 时,在较小外力作用下输出电压

和输入力之间不存在非线性关系.但是,较大的预紧力减小了传感器的线性测量范围,由 200 N 预紧条件下的 0～750 N 线性范围降低到 245 N 预紧条件下的 0～500 N.这是因为预紧力使超磁致伸缩棒内的磁畴朝着与施力方向垂直的方向偏转,预紧力越大,偏转角度越大.此时超磁致伸缩棒再受到外力作用时,磁畴继续偏转的角度将减小并且磁畴密度变化减小,因此传感器的线性测量范围减小.综合考虑消除传感器在小信号作用下的非线性影响及扩大整体线性测量范围,本文设计的传感器需要的最佳预紧力约为 200 N.

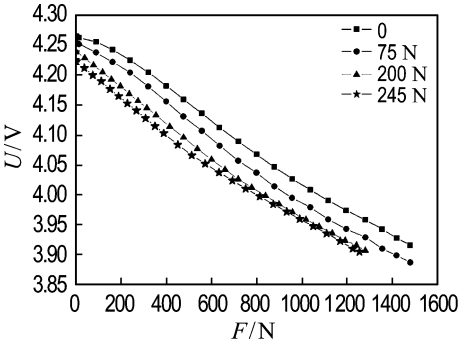


图 5　不同预紧力下传感器输出电压与力的关系

Fig. 5　Relationship between output voltage and force of sensor under different prestressing force

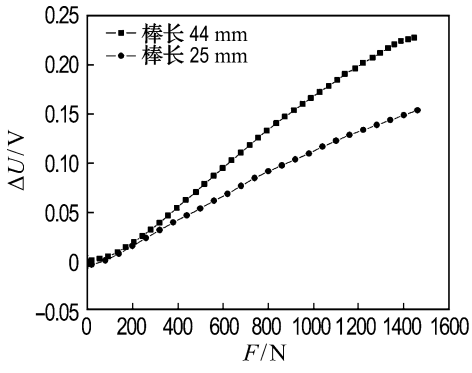
2.4　超磁致伸缩棒长度对传感器输出特性的影响

作为传感器的敏感元件,超磁致伸缩棒尺寸决定其内部磁畴数量及磁畴之间的关系,并且影响磁致伸缩逆效应的产生程度,本文在相同的偏置磁场条件下,对分别采用长度为 44 和 25 mm 的超磁致伸缩棒构成的传感器进行了实验,结果如图 6 所示.图 6(a)和(b)是预紧力为 0,偏置磁场分别为 183 和 265 mT 时,传感器的输出电压变化与力之间的关系.通过对实验结果的分析可知,在相同的外力作用下,超磁致伸缩棒越长,输出电压的变化越大,灵敏度越高.这是因为超磁致伸缩棒越长,内部的磁畴数量越多,在外力作用下发生转动的磁畴数量也越多,材料的磁化强度变化越大,因此传感器的输出电压变化越大,灵敏度越高.

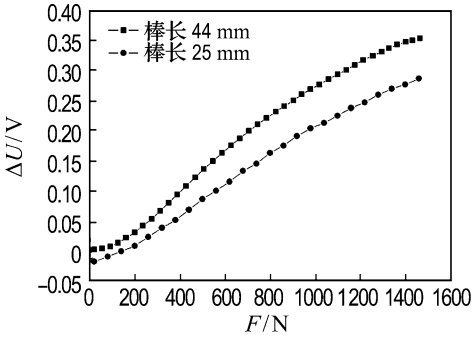
2.5　传感器的灵敏度

传感器的灵敏度是指输出增量与输入增量的比值,本文在研究超磁致伸缩力传感器灵敏度的过程中,对输出电压进行归一化处理,归一化电压为

$$U_n = U_H - U_0 \tag{9}$$



(a) 偏置磁场为 183 mT



(b) 偏置磁场为 265 mT

图 6　不同长度超磁致伸缩棒构成的传感器输出电压变化与力的关系

Fig. 6　Relationship between output voltage variation and force of sensor under different rod length

式中:U_0 是没有外力作用时传感器的输出电压,U_H 是在已知外力作用下传感器的输出电压.归一化电压表示传感器受到一个给定力作用时其输出电压的净变化.基于归一化电压的灵敏度(S)被定义为

$$S = \frac{\partial U_n}{\partial F} \tag{10}$$

在通有 1.8 A 电流的激励线圈产生的偏置磁场和 200 N 预紧力下,以 25 N 的间隔对传感器施加 0～1 000 N 的力,记录与每组力对应的输出电压.根据式(9)得到的归一化电压与输入力之间的实际关系曲线以及最小二乘拟合直线如图 7 所示.由式(10)可知拟合曲线的斜率表示传感器的灵敏度,因此该传感器的灵敏度为－0.40 mV/N.

为了评价本文设计的传感器(No.1 传感器)的灵敏度,在相同实验条件下对不具备不锈钢钢环结构的传感器(No.2 传感器)进行了相同实验,其归一化电压与输入力之间的实际关系曲线以及最小二乘拟合直线如图 7 所示.在大小为 1 N 的力作用下,No.2 传感器产生－0.065 mV 的输出电压.对比两个传感器的输出结果可知,在相同力

作用下，No.1传感器能够产生比No.2传感器更大的输出电压，其灵敏度约是No.2传感器的6.15倍，显然本文提出的不锈钢钢环结构有效地提高了超磁致伸缩力传感器的灵敏度.

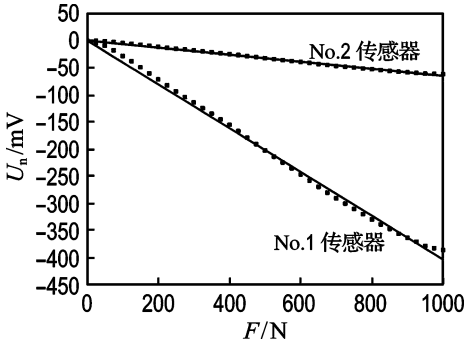


图7 No.1传感器和No.2传感器输出结果对比

Fig.7 Output result comparison between No.1 and No.2 sensor

3 结 论

(1)存在一个最佳的偏置电流(偏置磁场)使得传感器的灵敏度最高，对于本文设计的传感器最佳偏置电流为1.8 A.

(2)存在一个最佳的预紧力使得传感器的线性度较好，线性测量范围较大，对于本文设计的传感器最佳的预紧力为200 N.

(3)超磁致伸缩棒长度方向上的尺寸越大，传感器灵敏度越高.

但是，该传感器的线性测量范围较小，今后需要继续开展有关提高传感器线性测量范围的研究工作.

参考文献：

[1] YANG Q X, YAN R G, FAN C Z, *et al*. A magneto-mechanical strongly coupled model for giant magnetostrictive force sensor [J]. **IEEE Transactions on Magnetics**, 2007, **43**(4):1437-1440

[2] BAUDENDISTEL T A, TURNER M L. A novel inverse-magnetostrictive force sensor [J]. **IEEE Sensors Journal**, 2007, **7**(2):245-250

[3] KLEINKE D K, URAS H M. A magnetostrictive force sensor [J]. **Review of Scientific Instrument**, 1994, **65**(5):1699-1710

[4] 贾振元，杨 兴，郭东明，等. 超磁致伸缩微位移执行器控制方法的研究[J]. 仪器仪表学，2002，**23**(3)：288-290

[5] 侯淑萍，杨庆新，陈海燕，等. 超磁致伸缩材料的特性及其应用[J]. 兵器材料科学与工程，2008，**31**(5)：95-98

[6] KIM Y Y, CHO S H, LEW H C. Application of magnetomechanical sensors for modal testing [J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2003, **268**(4):799-808

[7] 徐爱群，项占琴，陈子辰，等. 超磁致伸缩执行器自感知机理研究[J]. 浙江大学学报，2007，**41**(5)：705-708

[8] 贾振元，杨 兴，郭东明. 超磁致伸缩材料控制模型的研究[J]. 压电与声光，2001，**23**(2)：164-166

Giant magnetostrictive force sensor and its experimental study

LIU Hui-fang, JIA Zhen-yuan, WANG Fu-ji*, GE Chun-ya

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

Abstract: Based on the inverse magnetostrictive effect, a new type of giant magnetostrictive force sensor with high sensitivity which uses a giant magnetostrictive materials rod as the sensitive element is studied. The static force measuring is realized by a Hall sensor measuring magnetic flux density integrated in the structure. In order to improve sensor's measuring sensitivity, a special structure which is a stainless steel ring around Hall sensor is proposed. The measuring principle and design process of giant magnetostrictive force sensor are presented. The influence law of bias magnetic field, pre-tightening force, rod length and other factors on sensor's output characteristics is determined by experiments. Optimal bias magnetic field and pre-tightening force are obtained. It lays a foundation of the further study on giant magnetostrictive force sensor and accurate control.

Key words: magnetostrictive force sensor; inverse magnetostrictive effect; giant magnetostrictive materials rod; experimental study