

激光多普勒准静态法测量磁致伸缩系数

李英明^{1) 2)}, 莫喜平^{1) 通信}, 潘耀宗¹⁾, 刘永平¹⁾, 张运强¹⁾

1) 中国科学院声学研究所, 北京 100190 2) 中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049

通信作者, E-mail: moxp@mail.ioa.ac.cn

摘 要 提出了一种利用激光多普勒测量磁致伸缩系数的方法, 理论分析了激光多普勒测量磁致伸缩系数的工作原理, 设计了铁镓合金棒材的测试系统. 对铁镓合金棒 (Galfenol) 的准静态磁致伸缩系数进行测量. 结果显示, 该方法所获得应变与出厂数据符合较好. 在 10 Hz 驱动电流下获得铁镓合金棒的动态变化曲线. 该测量方法具有以下优势: (1) 能够实现非接触测量; (2) 可以测量铁镓合金棒端面任意点的应变情况; (3) 测量结果准确度较高; (4) 测量操作简单.

关键词 铁镓合金; 磁致伸缩; 激光; 多普勒效应

分类号 TG132.2⁺7

Magnetostriction quasi-static measurements with laser Doppler effect

LI Ying-ming^{1) 2)}, MO Xi-ping^{1) 通信}, PAN Yao-zong¹⁾, LIU Yong-ping¹⁾, ZHANG Yun-qiang¹⁾

1) Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2) School of Physical Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

通信作者, E-mail: moxp@mail.ioa.ac.cn.

ABSTRACT A quasi-static method for measuring the magnetostrictive coefficient of Fe-Ga alloys by using laser Doppler effect was put forward, and its working principle was also analyzed. The quasi-static magnetostrictive coefficient of Galfenol was measured. The results show that strains obtained from the measuring setup are consistent with factory data, and the dynamic characteristics curve of Galfenol driven by 10 Hz current is obtained. This method has the following advantages: (1) noncontact measurement can be implemented, (2) the strain of magnetostriction in any point of the rod surface can be measured, (3) the accuracy is better, and (4) little operator skill is required.

KEY WORDS iron gallium alloys; magnetostriction; laser; Doppler effect

20 世纪 70 年代, 稀土超磁致伸缩材料的问世大大推动了磁致伸缩材料在国防、航空和高技术领域的应用. 其主要包括声学领域的军用声纳系统、微位移领域的微位移致动与检测、高能微动力装置、力学传感器领域的静力振动、冲击力和扭力、磁学领域、热学领域^[1-2]等. 铁镓合金 (Galfenol) 是一种新型磁致伸缩材料. 自铁镓合金发现以来国内外学者对其开展了深入研究^[3-5]. 研究内容涵盖组织结构以及温度对磁致伸缩和力学性能的影响. 国外学者对铁镓合金在磁场感应、减震器等方面的应用也展开了研究^[6-7]. 磁致伸缩

系数在磁致伸缩材料应用中作为一个重要特性参数, 其动态数据的缺乏限制其在精确器件上的应用. 常用的测量方法为应变电阻片法, 其测量原理清楚, 对器材没有特别要求, 是测量棒体材料的磁致伸缩系数普遍采用的方法. 翁玲等^[8]采用应变电阻片法设计了铁镓合金磁特性测试装置. 激光测振技术是另一种测试磁致伸缩系数方法, 其首先应用在单层薄硅钢片的测量上^[9-10]. 测量 50 Hz 交流电驱动时硅钢片的振动特性以分析变压器等设备的噪声. 测试装置中有两片反光镜粘在硅钢片上, 作为测量点; 硅钢片放置在光滑的玻璃

收稿日期: 2015-12-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11304350); 中国科学院青年创新促进会资助项目 (2014021)

钢板上,使硅钢片处于近似自由状态。Ghalamestani等^[11]对上述方法进行了改进,将硅钢片放置在聚四氟乙烯薄膜上,在两者之间涂上润滑剂以减少摩擦力对磁致伸缩测量的影响,在50~200 Hz对硅钢片的磁致伸缩系数进行测量。上述文献结果表明激光测量磁致伸缩系数的方法中硅钢片与支撑板间的摩擦力对测量结果仍有较大影响,而铁镓合金棒材质量更大,棒与支撑板间的摩擦力影响将会更大。本文设计了铁镓合金棒材的磁致伸缩系数准静态测试装置,该装置能够测量铁镓合金棒材磁致伸缩系数和观察磁致伸缩材料动态曲线,有助于弥补磁致伸缩材料在工程应用中动态数据的不足。

1 测量原理和装置

磁致伸缩系数是磁性材料在外磁场作用下产生的长度的相对变化量,是磁致伸缩材料基本特性参数之一。磁致伸缩系数用 λ 表示:

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l}. \quad (1)$$

式中 l 为铁镓合金棒在外磁场为零时的长度, Δl 为铁镓合金棒在有外磁场时长度变化量。磁致伸缩系数的测量关键是测量外磁场下铁镓合金棒长度变化量。

1.1 磁致伸缩系数准静态测量原理

压电陶瓷材料压电应变常数 d_{33} 的准静态法测量原理(GB11309—89)是依据正压电效应,在压电振子上施加一个频率远低于振子谐振频率的低频交变力,产生交变电荷,测试频率一般为100 Hz。磁致伸缩系数的测量可以类比压电应变常数的准静态测量原理,在远离铁镓合金棒谐振基频的低频交变场激励下,测得一端固定一端自由试件自由端的应变位移 Δl ,即可获得磁致伸缩系数 λ 。

对于均匀细棒,一端固定一端自由边界条件下谐振基频可由下式^[12]描述:

$$f_0 = \frac{c}{4l}. \quad (2)$$

代入铁镓材料的声速 $c = 3162 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、棒长 $l = 80 \text{ mm}$ 参数可得基频为9881 Hz。由此选择工作频率低于50 Hz即可满足准静态条件,实验中准静态测量采用0.1 Hz观测动态曲线采用10 Hz。文献[13]中准静态测量铁镓棒采用的频率为0.05 Hz,考虑到测试电流(10 A)较大,0.05 Hz对应测量周期比0.1 Hz周期长1倍,放出的热量较多,为了减少热量对铁镓合金的影响,文中选择0.1 Hz作为准静态测量。

1.2 激光多普勒测振技术测量自由端振动位移

激光多普勒测振原理是基于测量从物体表面微小区域反射回的相干激光光波的多普勒频率,进而确定该测点的振动速度。激光测振仪的光源与光波接收器

为一体,假设激光垂直入射到铁镓合金棒振动面,这时有

$$f_D = \frac{2v}{\kappa_c}. \quad (3)$$

式中 f_D 为激光光波的多普勒频移, κ_c 为激光光波的波长, v 为铁镓合金棒横截面振动速度。由此可知,激光测振仪通过处理接收的多普勒频移信号可以得到铁镓合金棒表面的振动速度。棒表面位移和振动速度满足方程

$$x(t) = \int v(t) dt. \quad (4)$$

式中 x 为棒表面位移, t 是时间变量。

激光测振仪测试过程中,测试的振动速度和位移都是离散的,假设采样周期为 Δt ,那么经过 n 个采样周期后,离散位移与振动速度满足方程

$$x_i(n) = \sum_{i=1}^n v(i) \Delta t. \quad (5)$$

式中 i 表示第 i 个采样周期。

设计三角波驱动信号,当驱动信号远小于激光测振仪采样频率时,驱动电流信号强度 I 在1/4周期内(从0增大至最大值)可表示为 $I = kt$,其中 k 为电流随时间变化率。若式(5)的离散点对应该1/4周期,则有

$$x_p = \sum_{i=1}^{n_0} v(i) \Delta t. \quad (6)$$

当实验样品采用一端固定一端自由安装方式,自由端测得的 x_p 为铁镓合金棒在一个周期内的最大伸长量, n_0 为电流1/4周期内对应的激光测振仪采样次数。铁镓合金棒的磁致伸缩系数为

$$\lambda = \frac{x_p}{l}. \quad (7)$$

式中 l 为铁镓合金棒在外磁场为零时的长度。测试频率的选择在满足准静态条件下,根据设备的工作频率范围确定。本文实验选择工作频率为0.1 Hz和10 Hz。

1.3 激励磁场产生装置

铁镓合金棒中的磁场由通电螺线管产生,螺线管中心轴线上磁场强度满足方程^[14]

$$H = \alpha \frac{NI}{L}. \quad (8)$$

式中: α 为修正系数,螺线管为理想通电螺线管(螺线管很长,线圈很薄)时 $\alpha = 1$,对于实际设计的多层螺线管而言 $\alpha < 1$,可以通过实验测量来获得其数值,或者借助参考文献中的计算方法进行预估; N 为螺线管线圈匝数; I 为螺线管中电流信号强度; L 为螺线管的长度。

根据式(8),在一定动态范围内螺线管中磁场强度与通电电流强度成正比,通过测量通电螺线管中磁场可以得到磁场强度与电流信号强度关系 $H \sim I$,进而可以获得磁致伸缩应变与驱动磁场的关系 $\lambda \sim H$ 。我

们使用特斯拉计测量通电螺线管中的磁感应强度,得到磁场强度与电流信号强度之间关系:

$$H = 3557 \times I. \quad (9)$$

式中: H 为磁场强度, $A \cdot m^{-1}$; I 为螺线管内电流强度, A. 磁致伸缩系数测量系统示意图如图 1 所示. 将铁镓合金棒一端面固定,通过环氧将铁镓合金棒粘贴在重块上,重块选择无磁铅块(图 1 中与铁镓合金棒连接的固定端为铅块),铅块质量为 20 kg,测量的铁镓合金棒样品质量为 0.192 kg,铅块质量约为铁镓合金棒的 100 倍,另一端面自由;调节激光探头,观测探头上的水平仪,使其发射激光沿水平方向;利用水平尺调整通电螺线管及铁镓合金棒,使其至水平位置. 本文采用不同于文献[9, 11]中的实验装置和测量方法,采用激光多普勒原理设计的测量方法,被测材料制成一端固定的棒状样品,测量另外的自由端,一端固定的测量方法使得材料的状态非常稳定. 同时,该测量方法测量时只需测量一端,这使得步骤简单,减少了测量误差.

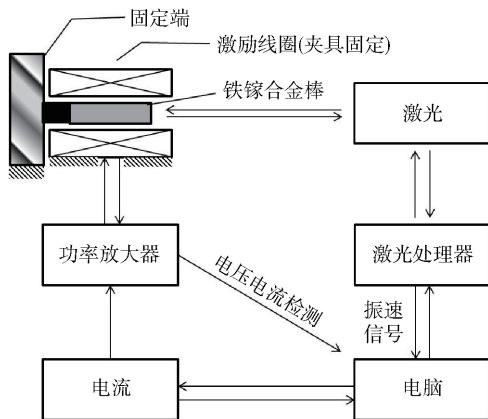


图1 激光测振仪测量磁致伸缩系数示意图

Fig.1 Schematic representation of the magnetostriction measurement setup using a Laser Doppler Vibrometer

该测量中,磁致伸缩材料为铁镓合金,商品名为 Galfenol. 实验中激光发射接收系统为 Polytec 公司的 PSV-500,信号发生器采用 Agilent 公司 33220A 任意波形发生器,功率放大器采用 nF 公司的 BP4610.

2 实验测量及分析

2.1 准静态测量实验设计

通过以上分析,可知磁致伸缩材料在低频时才可以利用激光多普勒准静态原理测量磁致伸缩系数. 为满足准静态要求,实验选择较低频率(0.1 Hz 和 10 Hz)的三角波信号进行驱动. 实验中功率放大器电压输出范围 $-60 \sim 60$ V,电流输出范围 $-10 \sim 10$ A,通电螺线管直流电阻为 6.2Ω . 在测量时,功放电压输出幅度为 60 V、频率为 0.1 Hz 的三角波,采样频率为 256 Hz,采集的电流和电压数据如图 2 所示,电流信号也为三角

波,在 $1/4$ 周期内(电流为 0 A 时作为起始点)电流随时间为线性变化.

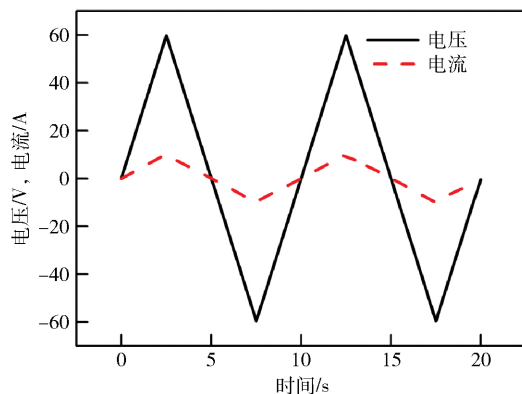


图2 准静态测量(0.1 Hz)电流和电压曲线

Fig.2 Voltage and current curves in quasi-static (0.1 Hz) measurement

对激光测振仪得到的振速进行处理,可以得到铁镓合金棒磁致伸缩应变随驱动磁场强度的变化关系. 对铁镓合金棒的端面进行多点测量,点 1~8 为等边八边形的八个端点,点 9 为中心点,点 9 与其余点的距离为 6.5 mm. 激光测振仪系统能够记录点 9 的位置,通过程序控制实现多次重复测量. 铁镓合金棒直径 20 mm,长度 80 mm. 图 3 为测量点示意图. 采集点位置不同测得的数据之间有差异,点 1、2、3、4 和 8 的数据要大于其余点的数据. 导致原因可能有:①铁镓合金棒辐射面不是一个平面,部分测试点处辐射面与激光入射方向不垂直,存在一定偏角;②由于铁镓合金本身是一种合金,其不同位置处的材料特性可能不同,这也会导致不同测量点测试结果不同;③测量棒材几何体上下部分存在差别,摩擦力重力等因素影响测量结果;④测量系统本身调整存在测量误差. 排除测量辐射面与激光入射线不完全垂直的原因,因为不垂直时,测得的结果会整体偏小(可以通过测量点的坐标计算得入射线与棒面的角度,对获得结果进行矫正),但测量结果之间不会有较大差异.

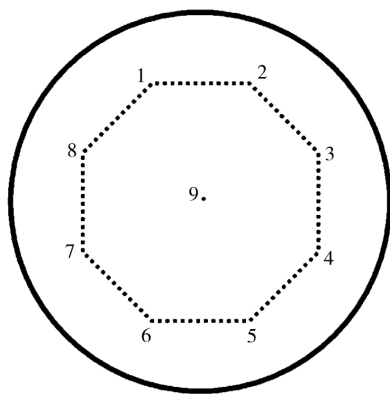


图3 铁镓合金棒端面测量点编号

Fig.3 Numbering of measuring points in the Galfenol surface

为了验证测量系统的操作影响,对点 9 进行四次测量(实际测量中,可以增加测量点数,以获得整个辐射面的应变分布)。表 1 为两种不同测试情形下测试数据。情形 1:使得测试面与激光尽可能垂直,表 1 中第二列为激光探头测量出点 1~9 与激光发射点的距离,第三、四列为两次测量结果。情形 2:使得测试面与入射激光不完全垂直,表 1 第五列为此时激光探头测量出点 1~9 与激光发射点的距离,第六、七列为连续两次测量结果。表 2 为四次测量相对于测量 1 的变化

量。首先,对比测量 1 与测量 2,测量 3 与测量 4,在相同测量情形下,前后两次测量结果差别在 2% 内,说明该测量方法具有可重复性,测量可靠性高;其次,比较同一点的四次测量数据,发现测量数据偏大的点始终偏大,因此可以排除测量带来的操作误差,说明不同测量点的应变不尽相同。

综上所述,激光多普勒准静态测量法可以测量出整个铁镓合金棒辐射面的应变分布,这有助于筛选应变差异较大的棒材。

表 1 不同点四次测量应变对比表
Table 1 Four measurements of the nine points

编号	(距离 1) /mm	(应变 1) / 10^{-6}	(应变 2) / 10^{-6}	(距离 2) /mm	(应变 3) / 10^{-6}	(应变 4) / 10^{-6}
1	545.01	93.7	93.6	545.05	91.5	92.8
2	545.01	95.2	94.5	545.02	92.8	93.2
3	545.00	93.1	92.6	545.01	91.9	92.1
4	545.00	90.1	89.7	545.02	89.9	89.8
5	545.00	87.4	86.2	545.06	87.9	86.2
6	545.00	85.1	85.2	545.09	84.3	86.0
7	545.01	88.9	88.0	545.10	87.6	87.3
8	545.01	92.8	91.2	545.08	90.1	89.6
9	545.00	88.2	88.2	545.02	87.4	87.2

表 2 四次测量相对于测量 1 的变化量
Table 2 Variation between the four measurements %

应变测量 误差	应变测量 误差 2	应变测量 误差 3	应变测量 误差 4
0	-0.1	-2.4	-0.9
0	-0.7	-2.5	-2.1
0	-0.5	-1.3	-1.0
0	-0.5	-0.3	-0.4
0	-1.3	0.6	-1.4
0	0.1	-0.9	1.1
0	-1.1	-1.5	-1.0
0	-1.7	-2.9	-3.5
0	0.0	-0.9	-1.0

提取铁镓合金棒中心线的应变与磁场数据,如图 4 所示。饱和磁致伸缩应变为 9.3×10^{-5} 左右,与厂家提供的数据 1×10^{-4} 基本一致(图 5)。厂家测量采用的是应变法测量圆柱侧面上的应变,并且应变法可带来大于 10% 的误差^[15],因此本文提出方法的测量结果是可信的。从图 4 中可知,在整个测量过程中磁滞很小,说明 0.1 Hz 的准静态测量能够反映出铁镓合金棒的静态磁致伸缩特性。

2.2 准静态工作原理获得动态曲线实验设计

利用激光多普勒准静态法还可以测量铁镓合金棒

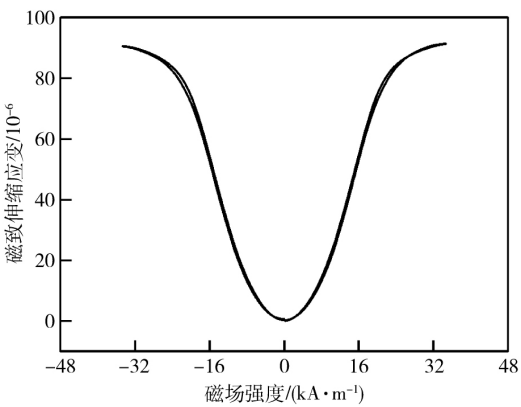


图 4 准静态测量(0.1 Hz)下铁镓合金棒应变随磁场强度变化曲线

Fig. 4 Measured curve of magnetostriction strain in the Galfenol rod with magnetic field in a quasi-static (0.1 Hz)

的应变特性。实验中我们观察到频率升高到 10 Hz 时,准静态测量技术仍有较好的测试精度,只要选择具有较高采样率的激光测振设备即可。实验中选择测试频率为 10 Hz,采样频率为 5000 Hz。10 Hz 时,测得激励线圈的阻值为 8.2 Ω 。铁镓合金棒中心线的应变与磁场数据,如图 6 所示。由于测量频率的提升,铁镓棒中出现涡流,导致系统整体阻抗提高,螺线管中驱动电流幅值最大为 7.7 A。测得的动态应变为 8×10^{-5} 左右,从应变-磁场强度曲线明显可知整个系统中存在磁滞损

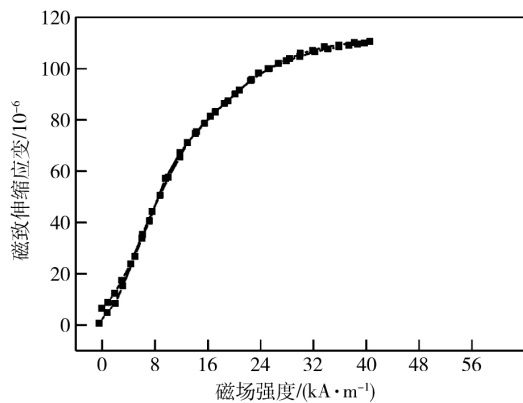


图5 铁镓合金棒出厂测试数据

Fig.5 Factory data of the Galfenol rod

耗. 铁镓合金棒在实际使用中,通常进行切缝等处理以减少棒内涡流影响. 该测量系统还可以用来测量切缝处理后的铁镓合金棒样品,以验证其切缝的可行性及测量切缝后的动态磁致伸缩特性. 铁镓合金棒在工程使用中状态一般更接近于动态情况,例如磁致伸缩材料在驱动制动器或声学换能器时,需要工作在一定频段,因此动态测量有助于分析磁致伸缩材料在工程应用的状态.

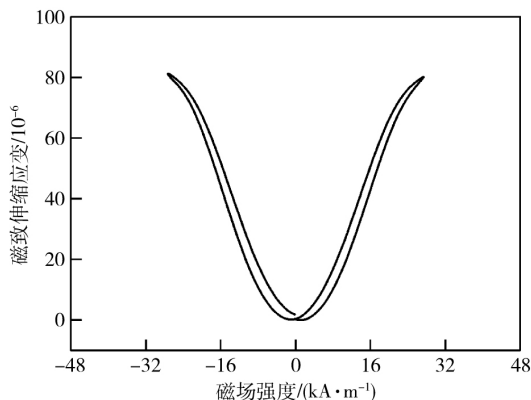


图6 动态测量(10 Hz)下铁镓合金棒应变随磁场强度变化曲线

Fig.6 Measured curves of magnetostrictive strain in the Galfenol rod with magnetic field in a dynamic static (10 Hz)

3 测量误差分析

测量系统的准确度会受到本身测量原理、测量设备及周围环境的影响,根据上述测量样品的参数及测量设备对整个测量系统进行误差分析.

3.1 铁镓合金棒固定装置引入的误差

假设铁镓合金棒的质量为 m' , 固定端质量为 m , 当 $\frac{m}{m'} \rightarrow \infty$, 即固定端质量远远大于测量样品质量时, 整个振动系统趋近固定边界条件, 实际测量系统并不会达到固定边界条件的要求, 测量误差总会存在. 在测量的频率下, 铁镓合金棒振动波长远大于棒的长度,

所以棒的各点振动相位相同, 此时可以将铁镓合金棒类比于一个质量为 m' , 劲度系数为 $K = \frac{ES}{l}$ 的弹簧, 其中 E 为铁镓合金棒的杨氏模量, S 为铁镓合金棒的横截面积. 在振动中弹簧的等效质量为 $\frac{m'}{3}$. 在磁致伸缩力作用下, 铁镓合金棒产生振速 v' , 质量为 m 的质量块的等效振速为速 v . 根据动量定理有

$$mv = \frac{m'v'}{3}. \quad (10)$$

弹簧的动能和弹性势能是相互转化的, 当弹性势能为零时, 弹簧的振速达到最大值 v'_a , 弹簧的动能最大为 $\frac{m'v_a'^2}{6}$. 此时, 质量块的振速达到最大值 v_a , 质量块的动能为 $\frac{mv_a^2}{2}$, 二者能量之和对应的电磁能为 W . 而理想情况下, 质量块动能为零, 弹簧的振速达到最大值 v''_a , W 的电磁能全部转化为弹簧的动能 $\frac{m'v_a''^2}{6}$, 此时有等式

$$\frac{m'v_a'^2}{6} + \frac{mv_a^2}{2} = \frac{m'v_a''^2}{6}. \quad (11)$$

因此有 $v_a' = \sqrt{\frac{3m}{3m+m}}v_a''$, 实验中速度 v_a' 要小于理想条件的速度 v_a'' . 带入实验中质量参数 $m \geq 100m'$, 实验中速度的误差小于 0.2%.

3.2 环境因素带来的误差

环境因素主要有两类, 一是重力和摩擦力的影响, 二是环境“噪声”的影响. 测量的铁镓合金棒样品质量为 0.192 kg, 考虑样品垂直放置时情况, 高度为 h ($0 < h < l$) 处的重力产生的压应力为 $T = \rho(l-h)$, 其中 ρ 为铁镓合金的密度, 最低处的压应力为 576 Pa. 因此在测量过程中, 无论水平还是垂直放置, 铁镓合金棒都处于较低的压应力下.

环境噪声有三类, 分别是电噪声、光学噪声和振动声音的干扰. 信号传输线都有屏蔽层, 因此 50 Hz 的电噪声比较小, 实验中测试频率小于 50 Hz, 可以加低通滤波器来滤除电噪声. 从测量点反射回来的光信号与环境中光噪声信号的信噪比足够高就能保证测量数据是准确的, 这与激光发射强度及测量目标点的反射能力有关. 文中实验采用的激光测振仪具有大功率的激光源且测量铁镓棒端面抛光较好, 测试系统能够识别信噪比最优的结果. 为了减少环境噪声的影响, 选择相对安静的实验场所, 并在测试系统底部加橡胶或者泡沫, 以滤除高频振动噪声.

为了测试环境噪声影响, 切断激励线圈中电流, 测量铁镓合金棒表面的振动, 测试结果如图 7 所示. 在采集时间内有一个周期为 20 Hz 左右的环境噪声, 噪

声引起的最大位移为 27 nm, 实验中测试频率为 0.1 Hz 和 10 Hz, 可以通过低通滤波器滤除此干扰信号提高测试精度。当激励电流提供的磁场使得铁镓棒在饱和应变附近时(如电流 10 A, 磁致伸缩系数约为 9×10^{-5} , 棒的伸长量 7200 nm), 即可获得较大的信噪比, 此时的环境噪声引起的误差在 0.4% 以内。

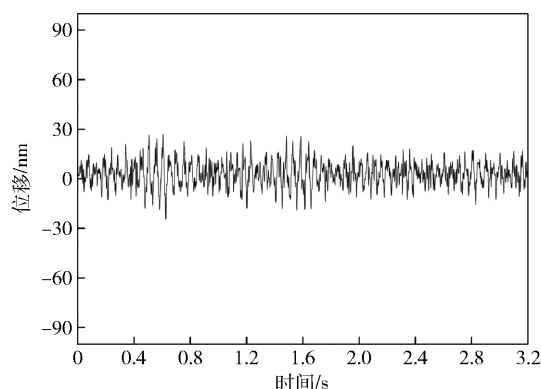


图7 环境噪声的测量

Fig. 7 Measurements of environmental noise

4 结论

本文研究了一种新的磁致伸缩系数测量方法, 即利用激光多普勒准静态法测量磁致伸缩系数。该测量方法具有如下优势: (1) 可以测量的最小位移到达 30 nm, 测量结果准确度较高, 在本研究中铁镓合金棒固定装置引入的误差小于 0.2%, 环境噪声(较难消除的低频噪声)带来的误差小于 0.4%; (2) 实验测量的可重复性较高, 重复测量误差小于 2%; (3) 实现了非接触测量, 可以获得棒材磁致伸缩样品的整体应变, 而且可以获得样品端面上应变的分布情况, 与传统的应变电阻片法相比, 克服了通过测量局部应变推算整体应变所带来的误差增大; (4) 能够观察到磁致伸缩材料动态应变特性, 磁致伸缩动态曲线有助于分析铁镓合金棒在实际工程应用中的特性。

该测量方法主要有两个缺点, 一是激光测试设备成本较高, 不利于设备的广泛使用, 二是环境的噪声会影响测量精度, 因此对测量环境要求较高。本文的激光多普勒准静态测量法可以通过改进激光视窗应用于气体预应力系统中, 推广到测量铁镓合金棒有预应力的情况, 也是后续工作的研究内容。

参 考 文 献

[1] Hu M Z, Li Q, Li Y X, et al. Research on characteristics and applications of magnetostrictive material (I). *Rare Met Mater Eng*, 2000, 29(6): 366
(胡明哲, 李强, 李银祥, 等. 磁致伸缩材料的特性及应用研究(I). 稀有金属材料与工程, 2000, 29(6): 366)

[2] Hu M Z, Li Q, Li Y X, et al. Research on characteristics and applications of magnetostrictive material (II). *Rare Met Mater Eng*, 2001, 30(1): 1
(胡明哲, 李强, 李银祥, 等. 磁致伸缩材料的特性及应用研究(II). 稀有金属材料与工程, 2001, 30(1): 1)

[3] Han Z Y, Ma F, Zhang M C, et al. Magnetostrictive properties and structure of $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ during heat treatment. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2006, 28(6): 539
(韩志勇, 马芳, 张茂才, 等. $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ 合金热处理过程中的磁致伸缩性能和结构分析. 北京科技大学学报, 2006, 28(6): 539)

[4] Li J H, Gao X X, Zhu J, et al. Effect of boron and chromium on magnetostriction and mechanical properties of polycrystalline $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ alloy. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2009, 31(10): 1281
(李纪恒, 高学绪, 朱洁, 等. 硼和铬对多晶 $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ 合金磁致伸缩和室温力学性能的影响. 北京科技大学学报, 2009, 31(10): 1281)

[5] Raghunath G, Flatau A B. Investigation of the interaction of magnetic field with the auxetic behavior of Galfenol. *IEEE Trans Magn*, 2014, 50(11): 2506504

[6] Caponero M, Cianfarani C, Davino D, et al. Galfenol-based devices for magnetic field sensing in harsh environments. *IEEE Trans Magn*, 2014, 50(11): 4006604

[7] Scheidler J J, Dapino M J. Nonlinear dynamic modeling and resonance tuning of Galfenol vibration absorbers. *Smart Mater Struct*, 2013, 22(8): 085015

[8] Weng L, Luo N, Zhang L Y, et al. Design and experiment of a testing device for Fe-Ga magnetic properties. *Trans China Electrotech Soc*, 2015, 30(2): 237
(翁玲, 罗柠, 张露予, 等. Fe-Ga 合金磁特性测试装置的设计与实验. 电工技术学报, 2015, 30(2): 237)

[9] Nakata T, Takahashi N, Nakano M, et al. Magnetostriction measurements with a laser Doppler velocimeter. *IEEE Trans Magn*, 1994, 30(6): 4563

[10] Nakase T, Nakano M, Fujiwara K, et al. Measuring system for magnetostriction of silicon steel sheet under AC excitation using optical methods. *IEEE Trans Magn*, 1998, 34(4): 2072

[11] Ghalamestani S G, Hilgert T G D, Vandevelde L, et al. Magnetostriction measurement by using dual heterodyne laser interferometers. *IEEE Trans Magn*, 2010, 46(2): 505

[12] Zhang H L. *Theoretical Acoustics*. Beijing: Higher Education Press, 2007
(张海澜. 理论声学. 北京: 高等教育出版社, 2007)

[13] Kellogg R A, Flatau A, Clark A E, et al. Quasi-static Transduction Characterization of Galfenol // *ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Washington D. C., 2003: 273

[14] Engdahl G. *Handbook of Giant Magnetostrictive Materials*. San Diego: Academic Press, 2000

[15] Gao J, Gao X X, Lan Y H. Measuring of magnetostriction using a noncontact electric eddy current sensor. *J Magn Mater Devices*, 2007, 38(3): 57
(高静, 高学绪, 兰银辉. 用非接触式电涡流传感器测量磁致伸缩系数. 磁性材料及器件, 2007, 38(3): 57)