

文章编号 1004-924X(2017)09-2396-09

Fe-Ga 磁特性测试装置改进与动态磁致伸缩实验

王博文, 谢新良*, 周露露, 王保发, 曹晓宁, 翁 玲

(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)

摘要: 利用 Fe-Ga 磁特性测试装置进行动态磁致伸缩测量时, 受激励线圈产生的磁场的影 响, 测试样品的应变通常偏大, 本文对此做了分析并进行验证。通过分析 Fe-Ga 动态磁致伸缩测量过程, 对原测试装置进行了改进。将样品的一端固定在极头上并调节激励磁场使其在样品饱和磁场附近, 以消除机械振动对动态磁致伸缩测试产生的影响。采用多参数磁学测试系统和改进前后的 Fe-Ga 特性测试系统进行 Fe-Ga 静态和动态磁致伸缩特性测试实验。结果表明: 采用改进的 Fe-Ga 磁特性测试装置可在低饱和场下精确测量动态应变。实验还测试了 Fe-Ga 在 2.7 kA/m 偏置磁场作用下的动态磁致伸缩特性, 结果表明: (1) 偏置磁场作用下应变与磁场同频; (2) 应变对磁场的滞后随磁场频率的增加而增大; (3) $\lambda \sim H$ 曲线为椭圆形且椭圆环的面积随频率的增大而增大。上述结果表明, 本文提出的改进装置可有效消除振动产生的额外应变。

关键词: 动态磁致伸缩; 磁特性测试; Fe-Ga; 电磁力

中图分类号: TH871 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172509.2396

Improvement of testing device for Fe-Ga magnetic properties and dynamic magnetostrictive experiment

WANG Bo-wen, XIE Xin-liang*, ZHOU Lu-lu, WANG Bao-fa, CAO Xiao-ning, WENG Ling

(Province-Ministry Joint Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

* Corresponding author, E-mail: xiexinliang1993@163.com

Abstract: Due to the influence of vibration caused by magnetic field of excitation coil, the strain measured by test device of Fe-Ga magnetic characteristics is usually larger than actual one. This paper explained and verified the above phenomenon. By analysis the measurement process of dynamic magnetostrictive strain of Fe-Ga alloy, the original testing device was improved by fixing one end of the sample on pole head and adjusting excitation magnetic field near saturated magnetic field of the sample, resulting in error caused by mechanical vibration on the test of dynamic magnetostriction was eliminated. Static and dynamic magnetostriction test experiment were conducted by adopting multi-parameter magnetic test system and original and improved test device of Fe-Ga magnetic characteristics. Experimental result indicates that the improved test device of Fe-Ga magnetic characteristics has the ability to accurately measure the dynamic magnetostriction of sample with low saturated magnetic field. Dynamic magnetostriction of Fe-Ga at the effect of bias magnetic field of 2.7 kA/m was also tested in the experiment, and the result indicates: (1) the frequency of strain is the same as that of magnetic field at the effect of bias magnetic field; (2) the hysteresis

收稿日期: 2017-04-28; 修订日期: 2017-06-30.

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. E2017202035)

of strain on the field increases with increase of field frequency; (3) $\lambda \sim H$ curve is of elliptical and the area increases with increase of the frequency. The proposed improved device can effectively eliminate the strain caused by vibration.

Key words: dynamic magnetostriction; test of magnetic characteristics; Fe-Ga; electromagnetic force

1 引言

新型磁致伸缩材料在超精密仪器及工业生产中的应用越来越广^[1-3]。超磁致伸缩材料 Terfenol-D 具有磁致伸缩系数大的优点,但饱和场高,延展性差,价格高等缺点限制了它的应用^[4]。Fe-Ga 合金是继传统磁致伸缩材料和 Terfenol-D 稀土超磁致伸缩材料之后出现的一种新型磁致伸缩材料。Fe-Ga 合金具有饱和场低(5 kA/m)、饱和磁致伸缩大(250 ppm)、磁滞小、抗拉强度高和易于加工等优点,在传感器、换能器、振动发电机中有广泛应用^[1-6]。

随后,研究人员从 Fe-Ga 材料的制备、磁特性测试、Fe-Ga 的应变模型和应用等方面进行了大量的研究^[7-13]。李纪恒等^[7-8]针对材料制备及热处理对 Fe-Ga 合金磁致伸缩特性的影响进行了研究,但是只得到不同处理工艺下 Fe-Ga 的静态磁致伸缩系数。翁玲等^[9]在考虑附加涡流损失的情况下建立了 Fe-Ga 合金的动态滞后模型并进行了实验研究。张露予和周新志等^[10-12]利用 Fe-Ga 优越的延展性,将 Fe-Ga 波导丝应用到大量程磁致伸缩位移传感器上。然而,国内对磁特性测试仪器的研究和设计正处于起步阶段。在磁特性测试方面,中国科学院物理研究所和河北工业大学研制的多参数磁学测试系统适合测量具有高饱和场材料的静态磁致伸缩系数、增量磁导率、频率阻抗特性等^[13]。但该测试系统存在激励线圈匝数较多且小电流控制困难的问题,导致其在低饱和场下磁场控制精度低,数据采集点稀疏,无法准确测量低饱和场材料(如 Fe-Ga、Fe-Al、Fe-Co 和 Fe-Ni 等)的磁致伸缩特性。河北工业大学新型磁性材料与器件课题组研制的 Fe-Ga 磁特性测试装置可以对低饱和场磁致伸缩材料的磁特性进行测试,文献^[14]对 Fe-Ga 合金的静态磁致伸缩特性和应力与应变的关系进行了实验研究,但并没有对动态的磁致伸缩特性进行研究,也没有给出动态磁致伸缩特性的实验结果。然而,在实际应用中,Fe-Ga 的动态磁特性是影响利用 Fe-Ga 材料制作的磁致伸缩换能器和悬臂梁式振动发电等装置输出特性的重要因素^[15]。实验发现,在 Fe-Ga 动态磁致伸缩测量中,激励线圈产生的磁场对测试样品存在电磁力的作用,

测试样品在电磁力的作用下产生机械振动,导致得到的应变曲线存在严重误差。

本文对上述现象进行了分析及解释,并对原测试装置进行了改进及实验,测试了 Fe-Ga 样品在无偏置和有偏置磁场作用下的动态磁致伸缩特性,得到了 Fe-Ga 的 $\lambda \sim H$ 曲线,测试结果与国内外报道结果相符^[16]。本文的研究工作可用于指导基于 Fe-Ga 材料器件输出特性的研究,而且对低饱和场材料的静态、动态、施加偏置磁场、施加应力作用下的磁致伸缩等磁特性测试具有积极的指导意义。

2 测试原理及平台搭建

Fe-Ga 磁特性测试系统如图 1 所示,其主要由 3 大模块组成,分别为磁场激励模块、样品测量模块、信号采集及处理模块。其中,磁场激励模块主要用于产生一个频率和幅值可调的激励磁场,其包括激励线圈、信号发生器、交直流电源、功率放大器及电容补偿装置等。样品测量模块是磁特性测试系统的核心部分,其主要由应变片、线圈、导磁回路、极头、应力施加部件、永磁体及测试样品等组成。信号采集及处理模块主要由动态应变仪、静态应变仪、霍尔芯片、信号采集板和计算机等组成,其主要功能是:(1)采集应变片的应变信号和霍尔芯片的磁场信号;(2)将采集到的电信号转换为应变值和磁场值;(3)数据处理及曲线的绘制。为测量材料的其它磁学参数,Fe-Ga 磁特性测试系统还包括压力传感器、数字磁通计、高斯计等。

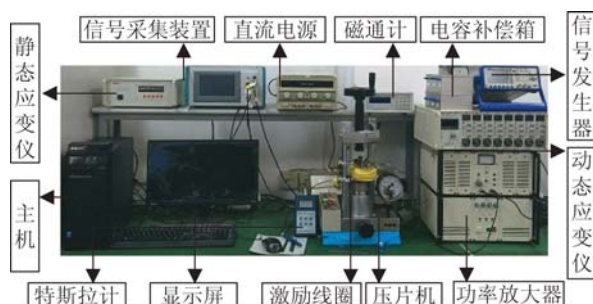


图 1 Fe-Ga 磁特性测试系统

Fig. 1 Test system of Fe-Ga alloy magnetic properties
Fe-Ga 合金的动态磁致伸缩测量过程如下:

利用 TFG6920A 信号发生器产生一个交流信号,再通过 7101 型功率放大器将其放大后,经功率放大器的输出端输入激励线圈,使激励线圈产生激励磁场。将 A1321LUA 型霍尔探头放置在贴有 BX120-3AA 型应变片的测试样品表面,用于采集激励磁场。测试样品在磁场的作用下将产生应变,SDY2103 型动态应变仪用于采集应变片的应变值并将应变传输给数据采集卡,PC 机与数据采集卡连接,使用 PC 机上的 SysDbg_32 软件绘制 $H \sim t$ 、 $\lambda \sim t$ 和 $\lambda \sim H$ 曲线。

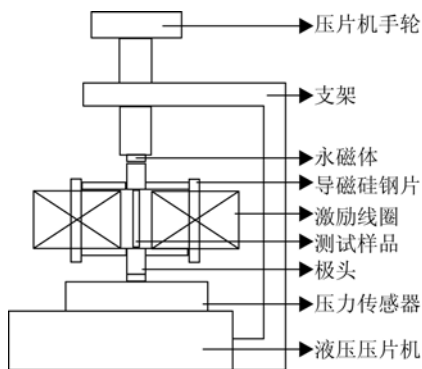


图 2 Fe-Ga 磁特性测试系统测量模块

Fig. 2 Measurement module of Fe-Ga magnetic properties testing system

图 2 为样品测量模块,其主要由压片机手轮、支架、永磁体、导磁硅钢片、激励线圈、测试样品、极头、压力传感器、液压压片机等组成。样品测量模块的设计决定了整个测试系统的准确性,其涉及到磁场的均匀性、电磁转换效率、阻抗匹配、应变测量、磁场测量、极头与测试样品的面积比、偏置磁场的施加等问题^[14],尤其是在动态磁场作用下会出现振动问题。当施加交变磁场时测试样品受电磁力的作用将产生振动,而应变片粘在测试样品上,样品的振动必然会给应变测量带来误差。为消除由材料磁致伸缩以外的电磁力带来的应变测量误差,本文提出在支架上增加可调固定夹具。其可以将测试样品的底部固定在下极头上。为减小振动使测试样品与上极头间留有空气隙,同时将正弦激励磁场的幅值调节至饱和磁场附近。

3 实验结果与讨论

3.1 Fe-Ga 的静态磁致伸缩特性

分别采用多参数磁学测试系统和本课题组设

计的 Fe-Ga 磁特性测试系统对长 35 mm,宽 8 mm,厚 1 mm 的片状 $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ 合金的静态磁致伸缩特性进行测试,结果如图 3(彩图见期刊电子版)所示。由图可知多参数磁学测试系统在低场下的采样点稀疏,在高场下采样点较密集,其测量所得 $\lambda \sim H$ 曲线表明:(1) $\lambda \sim H$ 曲线为典型的“碟形”曲线;(2)磁场由 0 变到 11.8 kA/m 时,应变由 0 直接达到饱和状态,此时的饱和应变达 241 ppm,当磁场大于 11.8 kA/m 后,应变基本稳定。故由此得到饱和磁场为 11.8 kA/m。根据 Fe-Ga 磁特性测试系统在改进前后所得的测试结果可知:(1)结构改进前后的 $\lambda \sim H$ 曲线基本重合,故结构改进对于静态磁致伸缩特性的测量基本无影响;(2)在 Fe-Ga 材料达到饱和状态前采样点数较多,在低场下能清晰反应磁致伸缩应变随磁场的变化;(3)测试结果表明片状 Fe-Ga 材料的饱和磁场强度为 5 kA/m,饱和磁致伸缩为 250 ppm。对比两台磁特性测试装置结果,可以得出多参数磁学测试系统在低场下对磁场的控制比较困难,无法准确测量具有低饱和场材料的静态磁致伸缩特性,而 Fe-Ga 磁特性测试系统在低场下能准确实现对磁场的控制,适合测量具有低饱和场磁性材料的磁特性参数。

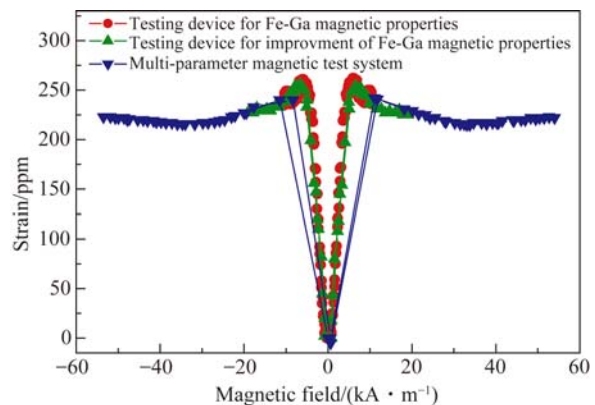


图 3 Fe-Ga 应变与磁场的静态关系曲线

Fig. 3 Relationship between static strain and magnetic field of Fe-Ga alloy

3.2 结构改进前 Fe-Ga 动态磁致伸缩特性测量

当给激励线圈通频率为 1 Hz 的正弦交流电时的 $H \sim t$ 和 $\lambda \sim t$ 曲线如图 4(彩图见期刊电子版)所示。由图 4 可知磁场曲线按正弦规律变化,应变曲线出现倍频现象。当磁场从 0 增加到 5 kA/m 时,应变从 A 点的 0 ppm 迅速增加到 B 的 248 ppm。

当磁场沿正弦曲线继续变化到磁场强度大于 5 kA/m 时,应变缓慢上升,应变值由 B 点缓慢变化到 C 点的 283 ppm。当磁场从 5 kA/m 下降到 0 时,应变由 283 ppm 迅速降落到 D 点的 32 ppm。当磁场反向增加到 5 kA/m 时,应变并未降落到 0 ppm,而是直接从 D 点上升到 E 点的 284 ppm。当反向磁场大于 5 kA/m 时,应变缓慢下降到 F 点的 250 ppm。当反向磁场从 5 kA/m 下降到 0 时,应变值又迅速从 F 点下降到 G 点的 0 ppm。

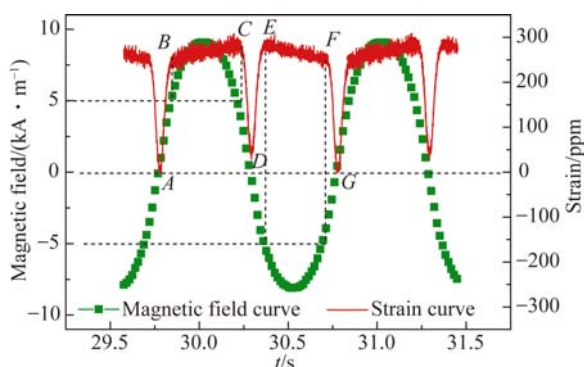


图4 激励电流频率 1 Hz 的动态磁场和应变曲线

Fig. 4 Dynamic magnetic field and strain curves with excitation current of 1 Hz

磁场频率为 1 Hz 时认为是准静态,可以在此状态下分析 Fe-Ga 的静态磁致伸缩特性。由材料的磁致伸缩特性知,样品在大小相等方向相反的磁场中应变值相同,所以应变会出现倍频现象。实验发现在磁场的正负周期内应变曲线并不完全重合,在一个磁场周期内应变值不会出现两个零点,而是有一定的残留应变值(图 4 的 D 点);实验还发现当正向磁场大于饱和磁场 5 kA/m 时,应变值缓慢上升,当反向磁场大于饱和磁场 5 kA/m 时,应变值缓慢下降,这与 Fe-Ga 的静态磁致伸缩特性不符。

本文对上述现象进行了深入分析。磁致伸缩材料有磁滞现象,假设 D 点的应变是由剩磁或磁滞引起的,当施加反向激励磁场时,样品内的磁场会降为零,即在反向磁场的作用下应变应降为零。然而,图 4 中的 D 点在反向磁场作用下应变并没有降为零,而是直接从 D 点上升到 E 点,故可以得出 D 点的应变值并不是由于 Fe-Ga 材料的剩磁或者磁滞引起的。当磁场从 0 kA/m 反向增加到 5 kA/m 时,应变由 D 点增大到 E 点,应变值上升了 252 ppm,这与饱和磁致伸缩结果一致,这也印证了 D 点的应变值并不是由剩磁或磁滞引

起的这一结论。考虑到测试样品在交流磁场作用下会产生机械振动,假设此时的应变值是由测试样品在交变磁场的作用下受电磁力的影响产生的,根据电磁力与磁场大小成正相关,且电磁力方向随磁场方向的改变而改变这一规律。图 4 中 BC 段应变值在正向磁场产生的电磁力的影响下,样品向上振动并产生拉升的额外应变,当磁场反向时,EF 段应变值在反向磁场产生的电磁力影响下,样品向下振动并产生压缩的额外应变。由于机械应变速度较慢,所以 BC 和 EF 段的应变值表现为缓慢上升,D 点的前半周期磁场方向为正,所以 D 点的残留应变是由测试样品在正向电磁力的作用下产生的。当磁场反向时,样品受到电磁力的方向为相反方向,在反向磁场的作用下消除由正向磁场带来的残留应变,应变值回到 0(G 点)。

为验证 Fe-Ga 磁特性测试装置在测量动态应变时出现图 4 的问题,调整线圈内正弦交流电的频率。图 5(彩图见期刊电子版)为线圈正弦交流电频率为 5 Hz 时的 $H \sim t$ 和 $\lambda \sim t$ 曲线,图中的应变曲线在一个磁场周期内出现了 6 个拐点,分别为 A、B、C、D、E、F 点,它们对应的磁场强度分别为 0, 5, 5, 0, -5, -5 kA/m,应变分别为 0, 247, 415, 172, 417, 256 ppm。采用与图 4 一致的方法进行分析,应变由 A 点变化到 B 点是由磁致伸缩引起的,此时应变对磁场的变化率较快,当磁场增大到饱和磁场 5 kA/m 后,BC 段的应变值主要是由磁致伸缩以外的电磁力产生的,此时磁场强度为正,由振动引起的应变与磁场方向一致,所以应变缓慢增加;当磁场降落到 5 kA/m 后应变迅速从 C 点降落到 D 点,CD 段应变的降落主要是由于磁致伸缩引起的,与图 4 一致,此时 D 点的应变不为零。当磁场反向增加时,应变从 D 点变化到 E 点,此时应变是由磁致伸缩引起的,应变增加了 245 ppm,当反向磁场增大到 5 kA/m 后,磁致伸缩达到饱和,EF 段的应变主要是由反向电磁力引起的,此时 Fe-Ga 的振动方向与反向磁场方向一致,测试样品做反向运动,应变缓慢减小,当反向磁场下降到 5 kA/m 后,应变由 F 点急剧下降到 G 点的 0 ppm,此时应变是由 Fe-Ga 的磁致伸缩产生的。这与激励线圈通频率为 1 Hz 正弦交流电出现的问题一致,由于测试样品的振动与磁场的大小和频率有关,图 5 中 D 出现的残留应变达 172 ppm。

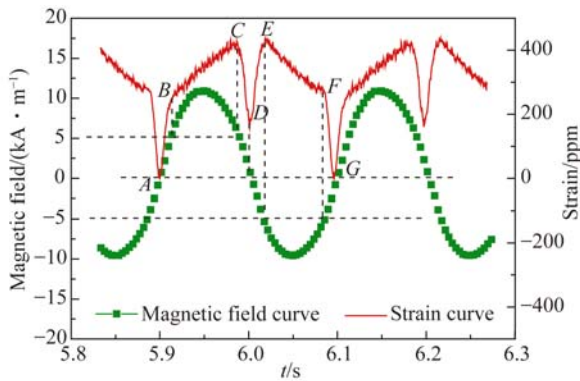


图 5 激励电流频率为 5 Hz 时动态磁场和应变关系曲线
Fig. 5 Dynamic magnetic field varies with strain with excitation current of 5 Hz

图 6(a)、(b)、(c)、(d) 是激励电流频率分别

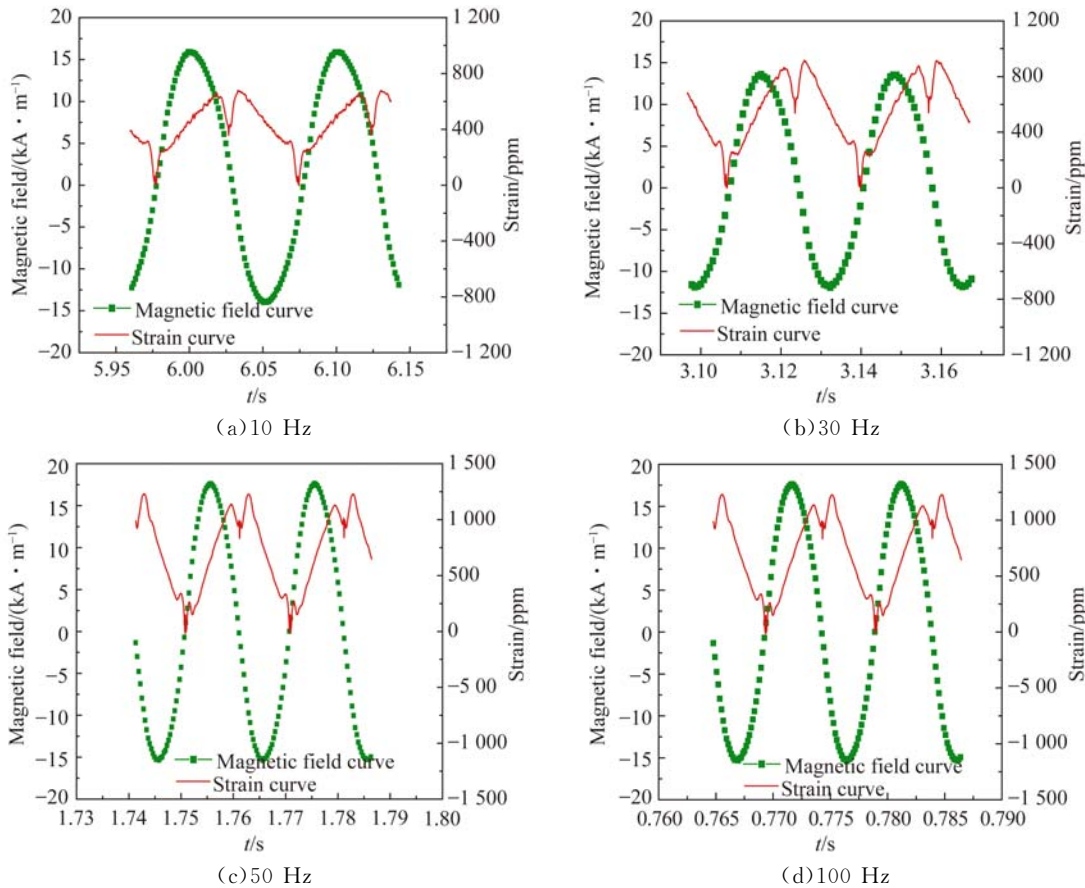


图 6 不同激励电流频率下的动态磁场和应变关系曲线

Fig. 6 Dynamic magnetic field varies with strain at different excitation current frequencies

总结可得:Fe-Ga 磁特性测试装置测得的应变主要由两部分组成:材料的磁致伸缩和电磁力产生的振动所引起的应变。磁致伸缩产生的应变主要有以下特点:(1)在饱和场以下起作用;(2)变化速

度快;(3)有倍频现象;(4)由于 Fe-Ga 的磁滞小,所以在低频时磁致伸缩应变值与频率基本无关。由电磁力产生的振动引起的应变主要有以下特点:(1)电磁力的大小与磁场大小有关,磁场越大电磁

为 10、30、50、100 Hz 时的 $H \sim t$ 和 $\lambda \sim t$ 曲线。由图 6 可知,应变曲线都出现了图 4 和图 5 中磁场达到饱和磁场(5 kA/m)后应变持续增大的问题,图 6(a)、(b)、(c)、(d)中当磁场达到饱和磁场后应变分别增大了 402,610,872,951 ppm。磁场大于 5 kA/m 时的应变主要是由 Fe-Ga 材料在高场作用下受电磁力产生的振动引起的额外应变。由电磁力产生的机械振动引起的应变的主要特点有:应变值较大、应变变化缓慢、应变方向与磁场方向有关、应变周期与激励磁场周期一致、应变随磁场频率的增大而增大,当频率达到 100 Hz 时,由振动产生的应变达到 951 ppm。这对动态磁致伸缩特性的测量产生严重误差,所以必须减小由电磁力产生振动对动态磁致伸缩测量带来的影响。

力越大,所以电磁力主要是在高场起作用;(2)由于机械振动的变化率较慢,所以由电磁力引起的应变变化速度较慢;(3)电磁力引起的应变方向与磁场有关,表现为与磁场同频;(4)机械振动与频率有关,所以由电磁力引起的应变不仅与所施加磁场的数值和方向有关,而且与激励磁场的频率有关。

3.3 结构改进后 Fe-Ga 动态磁致伸缩特性测量

为降低由电磁力产生振动对动态磁致伸缩测量带来的影响,在图 2 样品测量模块上用可调固定夹具将测试样品的底部固定在下极头上,测试样品上部与上极头留有空气气隙。根据电磁力与磁场强度正相关这一规律,实验中通过调节功率放大器的旋钮调节激励源的电压,进而将激励磁场调节在饱和场附近。

给改进后 Fe-Ga 磁特性测试装置的激励线圈通频率为 5 Hz 正弦交流电所得测量结果如图 7 所示。由图 7(a) $H \sim t$ 和 $\lambda \sim t$ 曲线可知:磁场按正弦曲线变化,应变出现倍频,当磁场从 0 增加到 5 kA/m 时,应变迅速从 A 点的 0 ppm 变化到 B 点的 252 ppm,磁场按正弦规律继续变化,当磁场强度大于 5 kA/m 时应变由 B 点变化到 C 点,应变值基本保持不变,当磁场从 5 kA/m 开始下降时,应变由 C 点的 260 ppm 迅速降落到 D 点的 0 ppm,在磁场的正半周期与负半周期实验结果一致。图 7 与图 5 的实验结果主要区别在于:(1)结构改进后当磁场大于 5 kA/m 后由机械振动产生的应变明显减小,说明结构改进后能有效消除电磁力产生的机械振动;(2)当磁场降为零时,应变也降为零,D 点不再产生残留应变。图 7(b)是激励电流频率为 5 Hz 时的动态 $\lambda \sim H$ 曲线,与图 3 对比可知,动态应变值不仅与外加磁场的瞬时值有关,而且和它过去的状态有关,这是由 Fe-Ga 材料本身的磁滞产生的。

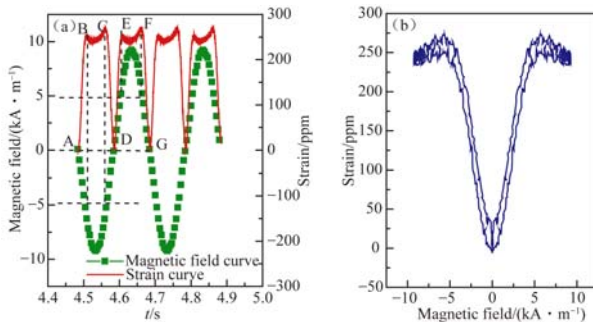


图 7 磁场和应变随时间变化曲线及应变-磁场曲线
Fig. 7 Magnetic field and strain vary with time and strain-magnetic field curve

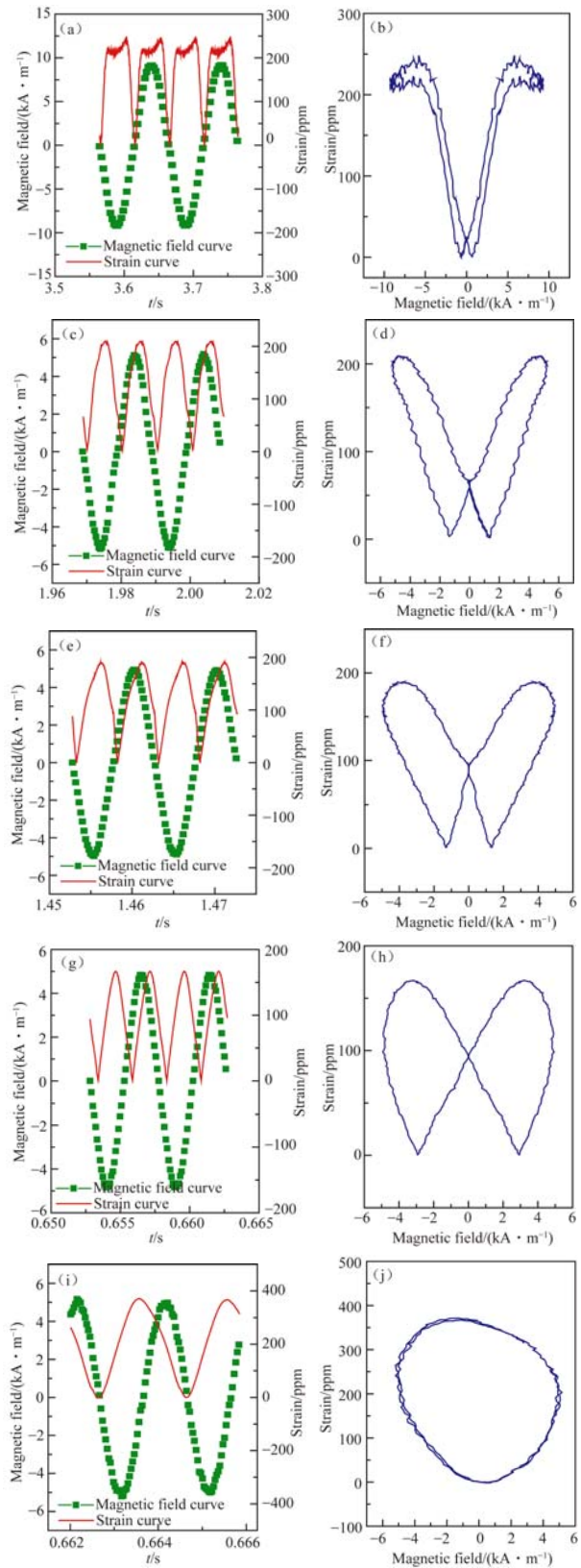


图 8 不同激励电流频率下磁场和应变随时间变化曲线及应变-磁场曲线
Fig. 8 Magnetic field and strain vary with time and strain-magnetic field curves at different excitation current frequencies

图 8(a)、(c)、(e)、(g)、(i) 分别是线圈通频率为 10, 50, 100, 200, 500 Hz 正弦交流电的 $H \sim t$ 和 $\lambda \sim t$ 曲线, 图 8(b)、(d)、(f)、(h)、(j) 分别为对应频率下的 $\lambda \sim H$ 曲线。由图可知: 在不同磁场频率下未出现图 6 中的由于振动带来的额外应变。说明结构改进后能有效消除由电磁力产生振动带来的应变。随磁场频率的增大, 应变会出现延迟现象, 当磁场为 0 时, 应变并不为 0, 继续加反向磁场时应变才会降为 0。由 $\lambda \sim H$ 曲线知, 随磁场频率的增大 $\lambda \sim H$ 曲线的环增大, 磁场为 0 时的交点随频率的增大而提高。当磁场频率为 500 Hz 时, 应变与磁场同频, 应变不再出现倍频现象, 此时输出的最大应变值为 380 ppm, $\lambda \sim H$ 曲线类似圆形。结构改进后 Fe-Ga 合金磁特性测试系统能有效消除电磁力产生的额外应变。根据测量结果可得: (1) 在共振频率以下动态磁场伸缩的最大应变比静态磁致伸缩系数略小, 且随激励磁场频率的增大, 最大应变减小; (2) 随着磁场频率的增大, 应变对磁场的延迟角度也增大, $\lambda \sim H$ 曲线的面积越来越大; (3) 当激励磁场的频率为 500 Hz 时, 应变与磁场同频, $\lambda \sim H$ 曲线类似为圆形。

结构改进前激励电流频率在 10 Hz 以上会产生明显的振动, 当激励电流频率为 100 Hz 时由线圈电磁力而产生的振动带来的附加应变达 951 ppm, 此值是静态磁场下饱和应变 250 ppm 的 3.8 倍, 所得测量结果存在严重误差。测试结构改进后激励电流频率为 100 Hz 时所得最大应变为 190 ppm, 其应变曲线并没有出现图 5 中类似 B 点的转折点, 故可以认为此时测量结果是可信的。此时的应变较静态磁场下的饱和应变有所减小可能是由于材料本身的磁滞产生的。

为验证结构改进后的 Fe-Ga 磁特性装置能准确测量具有低饱和场样品的动态磁特性, 选取 $\text{Fe}_{85}\text{Al}_{15}$ 作为被测样品, 其饱和磁场强度为 4 kA/m, 饱和磁致伸缩为 34 ppm。当激励电流频率为 25 Hz 时的动态磁特性如图 9 所示。由图 9 可知, $\text{Fe}_{85}\text{Al}_{15}$ 的应变改变落后于磁场变化, 测量结果与国内外的报道一致, 故结构改进后在动态磁特性测试实验中能有效消除由电磁力产生振动带来的应变。

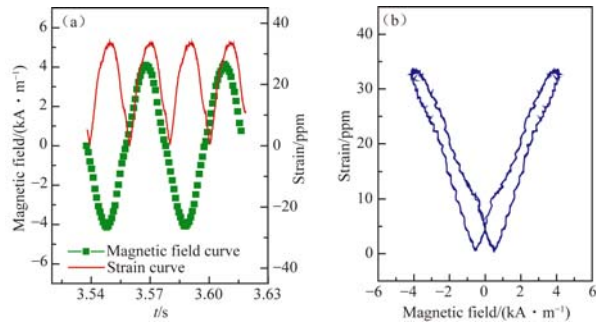
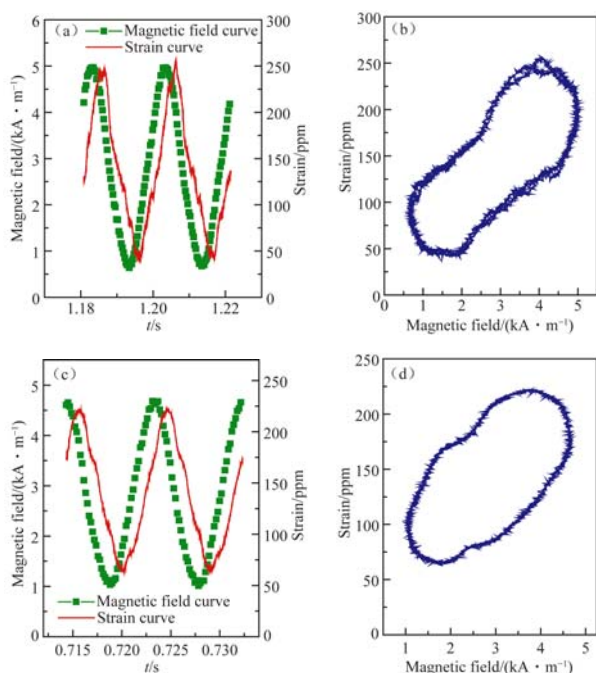


图 9 $\text{Fe}_{85}\text{Al}_{15}$ 的动态磁特性

Fig. 9 Dynamic magnetostrictive of $\text{Fe}_{85}\text{Al}_{15}$

3.4 偏置磁场作用下的应变曲线

在磁致伸缩换能器或者传感器中, 为消除磁致伸缩应变出现的倍频现象, 以及改善器件工作的非线性, 通常会给磁致伸缩材料施加一定的偏置磁场。实验中永磁体所提供的偏置磁场强度为 2.7 kA/m, 图 10(a)、10(c) 和 10(e) 分别为激励电流频率为 50, 100 和 200 Hz 时的 $H \sim t$ 和 $\lambda \sim t$ 曲线, 10(b)、10(d) 和 10(f) 为对应频率下的 $\lambda \sim H$ 曲线。由 $H \sim t$ 和 $\lambda \sim t$ 曲线可知, 在偏置磁场的的作用下应变与磁场同频, 但应变落后于磁场, 延迟角分别为 -49° 、 -63° 和 -81° 。由 $\lambda \sim H$ 曲线可知, $\lambda \sim H$ 曲线为椭圆形曲线, 且随磁场频率的增大, 椭圆环的面积逐渐增大。



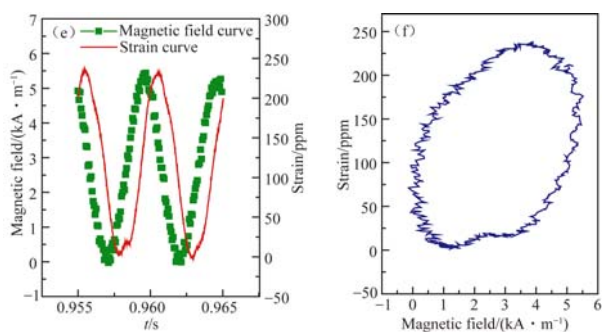


图 10 偏置磁场作用下不同激励电流频率的磁场和应变随时间变化曲线及应变-磁场曲线

Fig. 10 Magnetic field and strain vary with time and strain-magnetic field curves at different excitation current frequencies under bias magnetic field

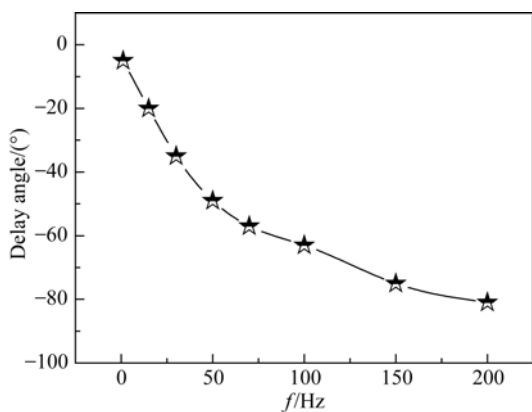


图 11 延迟角与激励电流频率的关系

Fig. 11 Delay angle vs frequency of excitation current

图 11 为偏置磁场强度为 2.7 kA/m 时,应变相对于激励磁场的延迟角与激励磁场频率的关系曲线。由图 11 可知延迟角随激励磁场频率的增

大而增大,在低频时频率对延迟角较为敏感,当频率达 50 Hz 后延迟角随激励磁场频率的变化较为缓慢。Fe-Ga 材料的应变变化落后于磁场变化是由于材料本身的磁滞引起的。因为外部的激励磁场与材料内部的有效磁场存在延迟性,可能会使材料内部的磁场转动跟不上外部磁场的变化,当磁场频率增大时这种延迟会更明显。

4 结 论

采用 Fe-Ga 磁特性测试装置进行动态磁致伸缩测量时会出现应变偏大现象,对此现象进行了解释并进行了实验验证。本文在 Fe-Ga 磁特性测试装置的基础上通过将测试样品的底部固定在极头上并将激励磁场调节在饱和磁场附近,通过实验验证了结构改进后能有效消除机械振动对动态磁致伸缩特性测试带来的影响,基于测量结果得到:(1)在共振频率以下,Fe-Ga 的动态最大应变比静态饱和应变略小,且最大应变随磁场频率的增大而减小;(2)磁场频率的增大,应变对磁场的延迟角度增大, $\lambda \sim H$ 曲线环的面积越大;(3)当磁场频率达 500 Hz 时,应变与磁场同频, $\lambda \sim H$ 曲线近似为圆形。实验还测试了 Fe-Ga 材料在 2.7 kA/m 偏置磁场作用下的磁致伸缩特性,结果表明在偏置磁场作用下应变与磁场同频,但应变落后磁场,延迟角随频率的增大而增大, $\lambda \sim H$ 曲线为椭圆形曲线,椭圆环的面积随频率的增大而增大。

参考文献:

- [1] 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)
- [2] 程鹏,肖博涵,贺凯,等. 超磁致伸缩致动器的复合反馈控制及其在变椭圆销孔精密加工中的应用[J]. 光学精密工程, 2016, 24(6): 1389-1398.
ZHAI P, XIAO B H, HE K, *et al.*. Composite backward control for GMA and its application in high precision machining of variable ellipse pinhole [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(6): 1389-1398. (in Chinese)
- [3] 孙英,边天元,王硕,等. 偏置磁场对磁致伸缩液位传感器检测电压的影响[J]. 光学精密工程, 2016, 24(11): 2783-2791.
SUN Y, BIAN T Y, WANG SH, *et al.*. Influence of bias magnetic field on detection voltage of magnetostrictive liquid level sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(11): 2783-2791. (in Chinese)
- [4] SANDLUND L, FAHLANDER M, CEDELL T, *et al.*. Magnetostriction, elastic moduli, and coupling factors of composite Terfenol-D [J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 75(10): 5656-5658.

- [5] CLARK A E, MARILYN W F, RESTORFF J B, *et al.*. Magnetostrictive properties of Fe-Ga alloys under large compressive stresses [J]. *Materials Transactions*, 2002, 43(5):881-886.
- [6] WENG L, WALKER T, DENG Z, *et al.*. Major and minor stress-magnetization loops in textured polycrystalline Fe₈₁.6Ga_{18.4} Galfenol [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(2):024508.
- [7] LI J H, GAO X X, ZHU J, *et al.*. Wiedemann effect of Fe-Ga based magnetostrictive wires [J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(8):476-481.
- [8] 高学绪, 李纪恒, 朱洁, 等. 气体雾化制备 Fe-Ga 合金粉末的微结构及磁致伸缩性能[J]. *金属学报*, 2009, 45(10):1267-1271.
GAO X X, LI J H, ZHU J, *et al.*. Microstructure and magnetostriction of Fe-Ga powders prepared by gas atomization [J]. *Acta Metallurgica Sinica*. 2009, 45(10):1267-1271. (in Chinese)
- [9] 翁玲, 赵青, 孙英, 等. 考虑附加涡流损失的 Galfenol 合金动态滞后建模与实验[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(4):399-405.
WENG L, ZHAO Q, SUN Y, *et al.*. Dynamic hysteresis model and experiment of galfenol alloy considering excess eddy current losses [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(4):399-405. (in Chinese)
- [10] ZHANG L Y, WANG B W, YIN X W, *et al.*. The output characteristics of Galfenol magnetostrictive displacement sensor under the helical magnetic field and stress [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2016, 52(7):1-4.
- [11] 周新志, 余超陈, 熊胤琪, 等. 新型 Fe₈₃Ga₁₇ 波导丝在磁致伸缩位移传感器中的应用[J]. *重庆大学学报*, 2013, 36(5):64-69.
ZHOU X ZH, YU CH CH, XIONG Y Q, *et al.*. Application of Fe₈₃Ga₁₇ line to magnetostrictive displacement sensors [J]. *Journal of Chongqing University*, 2013, 36(5):64-69. (in Chinese)
- [12] 王博文, 谢新良, 张露予, 等. 大量程磁致伸缩位移传感器的应力波衰减特性研究[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(4):813-820.
WANG B W, XIE X L, ZHANG L Y, *et al.*. Analysis of stress wave attenuation property of large-scale magnetostrictive displacement sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(4):813-820. (in Chinese)
- [13] WANG B W, HUANG W M, WENG L, *et al.*. Effect of stress and magnetic field on Young's modulus of Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂(110) oriented alloy [J]. *Materials Science Forum*, 2011, 675-677:1159-1162.
- [14] 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[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(2):237-241.
WENG L, LUO N, ZHANG L Y, *et al.*. Design and experiment of a testing device for Fe-Ga magnetic properties [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(2):237-241. (in Chinese)
- [15] 曹淑瑛, 桑杰, 郑加驹, 等. Galfenol 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 SH Y, SANG J, ZHENG J J, *et al.*. Mechanical-electro coupled dynamic model of galfenol cantilever energy harvester [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(21):5623-5631. (in Chinese)
- [16] WALKER T. *Experimental characterization and modeling of galfenol(Fe-Ga) alloys for sensing* [D]. Columbus:Ohio State University, 2012.

导师简介:



王博文(1956—)男,辽宁沈阳人,博士,教授,博士生导师,1995年于中国科学院金属研究所获得博士学位,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。E-mail: bwwang@hebut.edu.cn

通讯作者:



谢新良(1993—),男,江西吉安人,硕士研究生,2015年于防灾科技学院获得学士学位,主要从事磁性材料与器件的研究。E-mail: xiexinliang1993@163.com