

文章编号: 1001-4888(2013)05-0563-09

偏置磁场对磁致伸缩纵向导波 换能器效能的影响研究^{*}

焦敬品¹, 刘伟¹, 马庆增², 肖凯², 张春雷², 吴斌¹, 何存富¹

(1. 北京工业大学 机电学院, 北京 100124; 2. 广东省电力科学院研究院, 广州 510080)

摘要: 为提高磁致伸缩导波换能器的激励效能, 本文研究了磁场结构参数对偏置磁场空间分布的影响。基于 COMSOL 有限元仿真平台, 对磁致伸缩换能器磁场分布特性进行了数值计算, 研究了磁路结构形式、磁路和永磁铁数量等对偏置磁场分布的影响, 最后优化出适合纵向导波激励的磁场结构参数。检测实验结果表明, 随着偏置磁场磁路数量的增加, 偏置磁场强度增大, 磁场径向均匀性更好, 磁致伸缩换能器的效能也相应提高; 在相同磁路数量的条件下, 永磁体数量的改变对换能器效能影响较小, 四磁路偏置磁场最优; 轭铁中部增加永磁铁后的磁路结构的偏置磁场的轴向均匀性更高, 其激励效能更好。

关键词: 磁致伸缩换能器; 磁场; 纵向导波; 无损检测

中图分类号: TB552

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-12-168

0 引言

由于传播速度快、检测距离远、易实现单模态激励等优点, 纵向模态导波已广泛应用于管道、圆钢等柱状波导结构的无损检测^[1-2]。可用于低频纵向模态超声导波检测的超声换能器主要包括压电式、磁致伸缩式两类, 而其中的磁致伸缩换能器由于具有非接触、易于实现单一模态导波激励等特点, 得到了国内外学者的广泛关注^[3-4]。

磁致伸缩换能器工作性能受检测试件本身磁特性、偏置磁场、交变磁场以及三者之间相互作用影响很大^[5], 其中偏置磁场是影响磁致伸缩换能器工作效能的关键因素之一。国内外众多学者通过实验及仿真的方法, 研究偏置磁场对磁致伸缩换能器效能的影响。如 L. Laguerre^[6]等利用直流线圈产生偏置磁场, 设计了一种杆类波导检测用的低频磁致伸缩换能器, 并研究了直流线圈电流密度、匝数、长度对偏置磁场以及换能器工作效能的影响。利用该换能器对锚杆、钢丝绳等结构进行了实验检测, 得到了较好的检测效果。H. Lee^[7]等利用不同偏置磁场分布实现杆类波导中纵向和弯曲模态导波激励, 并通过磁轭的拓扑优化, 实现偏置磁场的优化设计。王悦民^[8]等通过实验研究了圆管中激励纵向导波的磁致伸缩力与直流偏置磁场、交变磁场的关系, 得出偏置磁场与产生纵向导波幅值之间存在类似抛物线关系, 交变磁场与产生纵向导波幅值之间存在非线性关系的结论。竺冉^[9]等设计了一种可调节的永磁体偏置磁场结构方案, 通过调节磁路间隙调整磁场大小, 并用有限元分析及实验验证了该方案的可行性。刘增华^[10]等利用纵向磁致伸缩导波换能器对钢绞线进行了缺陷检测, 对双磁路及三磁路产生的偏置磁场进行了对比, 有限元仿真和检测实验表明, 三磁路比双磁路的磁场强度更大, 均匀性更好, 更适合于为杆类

^{*} 收稿日期: 2012-11-19; 修订日期: 2013-02-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(11272017, 51075012), 北京市自然科学基金项目(1122005)

通讯作者: 焦敬品(1973-), 女, 教授, 博导, 从事超声无损检测新技术研究。E-mail: jiaojp@bjut.edu.cn

结构检测用电磁声换能器提供偏置磁场。

本文基于纵向导波磁致伸缩检测原理及磁路的相关理论,设计了四种永磁体偏置磁场磁路(以下简称磁路),利用 COMSOL 有限元仿真软件对四种磁路下的磁场进行了数值仿真。分析了磁路数量对换能器效能的影响,得到了最优的偏置磁场磁路;研究了四种磁路下永磁体数量对换能器效能的影响;定义了磁场不均匀度,对偏置磁场的均匀性进行了分析,在此基础上,对四磁路偏置磁场的结构进行了优化,提高了其轴向磁场的均匀性。通过上述研究,确定了磁致伸缩换能器偏置磁场的最优结构参数,并进行了实验验证。

1 磁致伸缩换能器导波模式选择性原理

图 1 为纵向导波磁致伸缩换能器检测圆钢试件的工作原理示意图,其中图 1(a)为磁致伸缩换能器,主要由永磁体、轭铁及螺旋线圈组成。图 1(b)为螺旋线圈内部磁场分布图,螺旋线圈分为三段,每一段线圈长度为激励导波波长的一半,第一段和第三段线圈绕制方向相同,第二段线圈绕制方向反向。动磁场由螺旋线圈内的交变电流产生。由于三段线圈的长度均为欲激励导波模式波长的一半,而且相邻两段反向绕制,因此使得三段线圈在圆钢中激励出的模式导波正好同相位叠加,使得该模式导波信号增强,而其他模式导波则因相位差异,得到削弱,从而实现该模式导波的选择性^[11-12]。

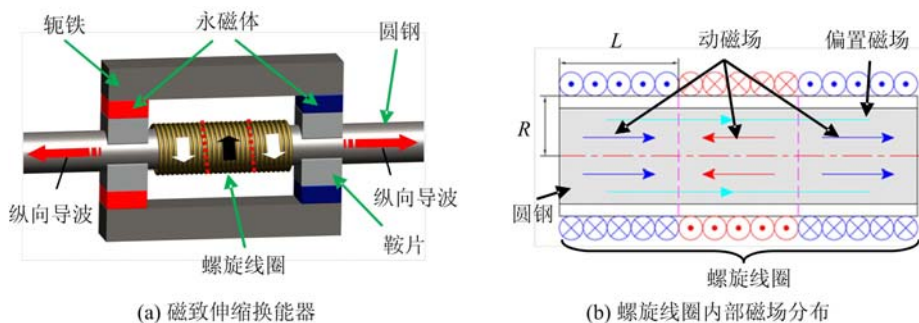


图 1 磁致伸缩纵向导波检测原理

Fig. 1 Schematic diagram of magnetostrictive sensor for guided waves inspection

2 磁致伸缩换能器偏置磁场影响参数的有限元仿真

在电磁场作用下,铁磁性材料中磁致伸缩力可表示为^[12]:

$$F_z^{ms} = -\frac{1}{2}(3\hat{\lambda} + 2\hat{\mu})(1 - 2\nu) \frac{\partial \lambda}{\partial M_0} \frac{\partial m_z}{\partial z} \quad (1)$$

式中, z 为轴向方向; F_z^{ms} 为磁致伸缩力; $\hat{\lambda}$ 、 $\hat{\mu}$ 为拉梅常数; ν 为泊松比; λ 为线磁致伸缩; M_0 为偏置磁场产生的磁化强度; m_z 为交变磁场产生的磁化强度。由公式(1)可知,待检测试件的铁磁性能、偏置磁场和交变磁场直接影响磁致伸缩换能器产生的磁致伸缩力。本文通过有限元仿真,研究偏置磁场结构参数对磁致伸缩换能器激励效能的影响。

2.1 有限元仿真模型

采用 COMSOL 有限元软件对不同偏置磁场作用下圆钢内部磁场进行分析。在仿真分析中,偏置磁场影响参数主要考虑不同磁路结构形式、不同磁路数量和不同永磁铁数量的影响。

以四磁路为例,图 2 给出四磁路分析模型。其中圆钢直径为 22mm;鞍片采用拱形结构;励磁源采用钕铁硼永磁铁,单片规格为长 21mm、宽 21mm,厚 10mm 的长方体,沿厚度方向充磁,剩磁 1.2T,相对磁导率 1.05。轭铁是保证磁路导通的重要元件,采用尺寸为长 142mm,宽 21mm,厚 21mm 的长方形铁条。整个模型建模完毕后,两鞍片之间的尺寸为 100mm,为线圈长度。

与实验设计的换能器相同,组件中圆钢、轭铁及鞍片均采用 35# 钢。通过手册^[13]查得 35# 钢的磁特性曲线如图 3。在有限元分析模型中,按照图 3 所示的磁特性曲线定义上述材料属性。

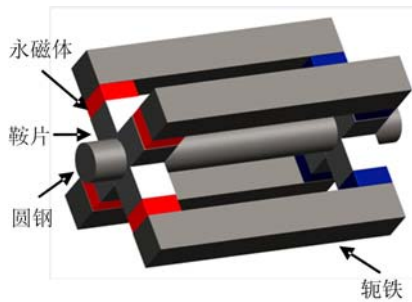


图 2 四磁路模型

Fig. 2 Model of four magnetic circuits

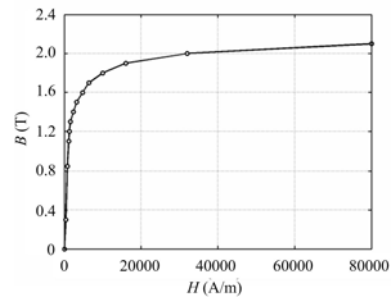


图 3 35# 钢磁性特性曲线

Fig. 3 Magnetic curve of 35 # steel

对不同结构参数下有限元模型进行磁力分析。图 4 给出不同磁路下磁力线分布。对单磁路、双磁路、三磁路及四磁路中的上截面、中截面以及下载面的磁通密度进行对比分析,如图 5 所示。其中,中截面位于换能器中心位置,上下截面距离中截面距离均为 30mm。

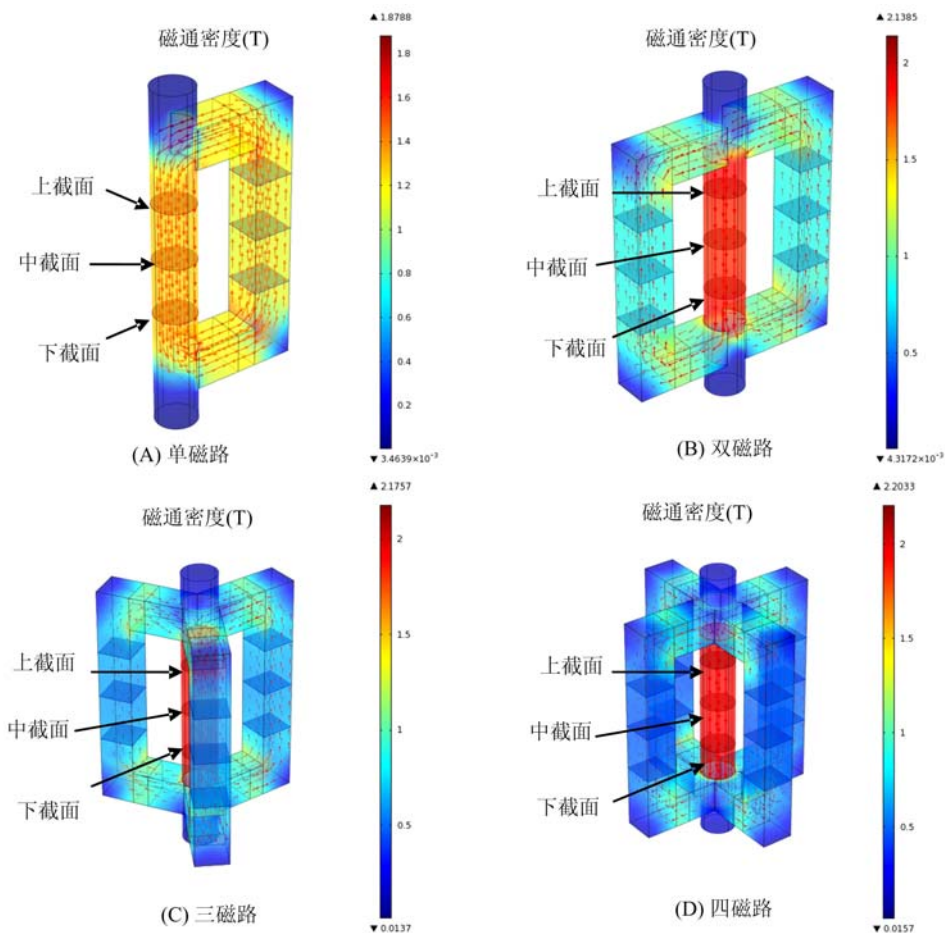


图 4 不同磁路下磁力线分布

Fig. 4 Distribution of magnetic flux for different number of circuits

为获得模态较为单一的信号,需要使圆钢内磁畴在偏置磁场的作用下产生较为一致的偏转。而在磁场方向一定的情况下,磁场强度分布的均匀性直接影响着磁畴偏转的一致性,因此,检验圆钢内部磁场分布的均匀性就显得尤为重要。

为进一步量化偏置磁场的均匀性,定义磁场不均匀度如下:

$$\delta = 1 - \frac{\bar{B}}{\max(B)} \quad (2)$$

其中 $\bar{B}$ 为所求磁场区域的磁通密度均值; $\max(B)$ 为该区域磁通密度最大值。根据仿真结果, 表 1 列出了图 5 所示的各磁路上、中截面的磁通密度最大(小)值、均值及磁场不均匀度(因对称性, 下截面数据与上截面一致, 未列出)。

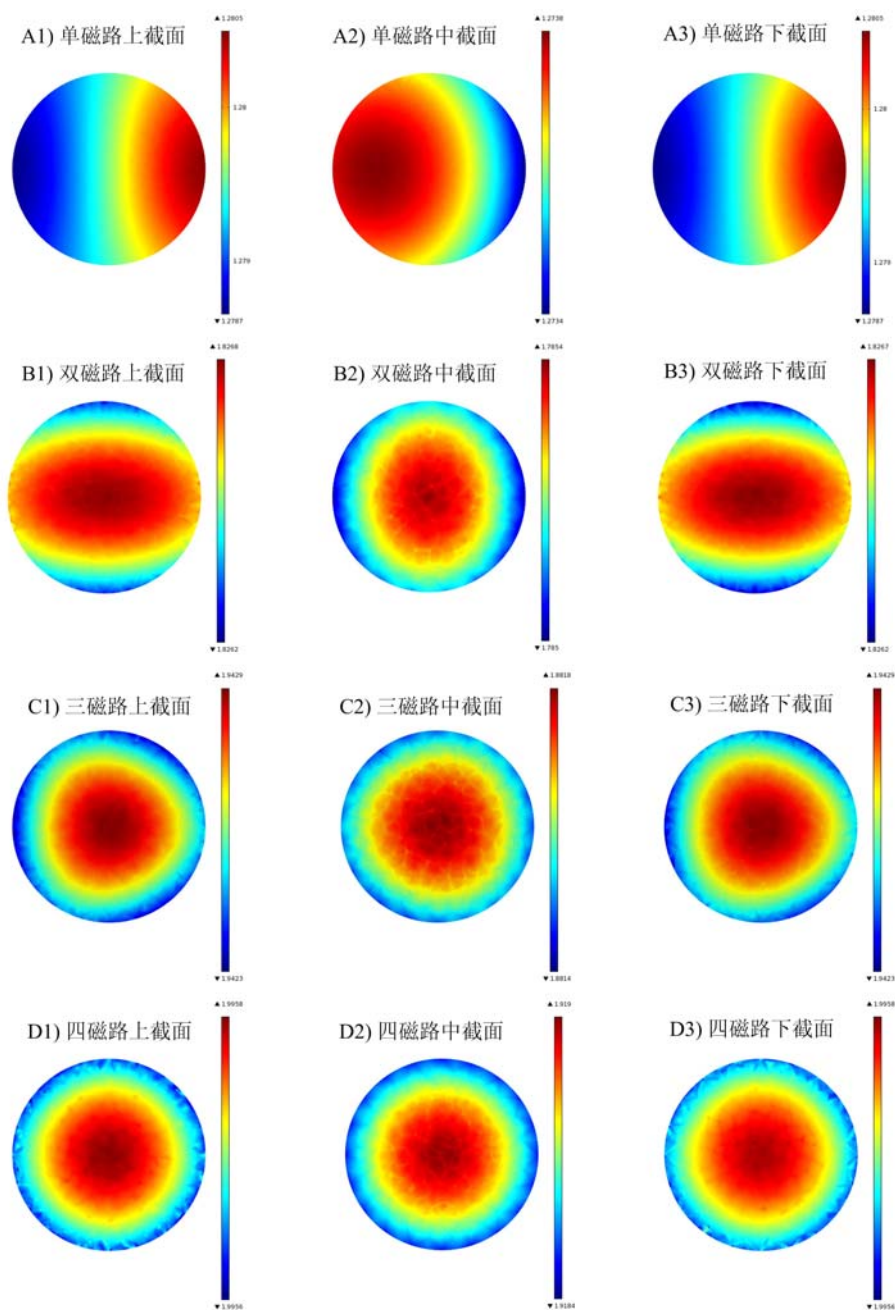


图 5 不同磁路数量下圆钢各截面上的磁通密度分布

Fig. 5 Distribution of flux density in different cross-section of round steel under different magnetic circuits

表 1 数据表征了圆钢内部径向磁场均匀性, 四磁路径向磁场均匀性较优, 而单磁路径向磁场不均匀度最大。

表 1 各磁路不同截面的磁通密度最大(小)值、均值

Tab. 1 Maximum, minimum and average flux density at different cross-sections and different magnetic circuits

截面	磁通密度最大值 $\max(B)(T)$	磁通密度最小值 $\min(B)(T)$	磁通密度最大、 最小差值 $B(T)$	磁通密度 均值 $\bar{B}(T)$	磁场不 均匀度 $\delta(\%)$
A1	1.2805	1.2787	0.0018	1.2795	0.078
A2	1.2738	1.2734	0.0004	1.2737	0.008
B1	1.8268	1.8262	0.0006	1.8266	0.011
B2	1.7854	1.7850	0.0004	1.7853	0.006
C1	1.9429	1.9423	0.0006	1.9427	0.010
C2	1.8818	1.8814	0.0004	1.8816	0.011
D1	1.9958	1.9956	0.0002	1.9957	0.005
D2	1.9190	1.9184	0.0006	1.9189	0.005

2.2 磁路数量的影响

从图 5 所示四种磁路下圆钢各截面上的磁通密度分布对比可以看出,圆钢内磁通密度随磁路的增加而增大,但这种增大并非简单线性增大,体现了圆钢磁化状态由快到慢,再到接近饱和的磁化特性,与 $B-H$ 曲线变化趋势保持一致。取圆钢中轴线为 x 轴,两轭铁间圆钢长度为 100mm(坐标从 0 到 100mm),得到各磁路圆钢中轴线上磁通密度分布,如图 6 所示。从单磁路到双磁路,圆钢中磁场强度均值提高了 0.546T,而从三磁路至四磁路,磁场强度均值只提高了 0.047T。由仿真结果可知,增加磁路数量可以提高检测圆钢内的磁场强度,从而提高换能器能量转换效能。但由于四磁路中圆钢内的磁场强度已接近饱和,当继续增加磁路数量时,对换能器效能提升有限,同时使换能器结构变得复杂,安装不便。因此,四磁路偏置磁场具有较好的实用性,适合于圆钢类铁磁性材料的纵向导波无损检测。

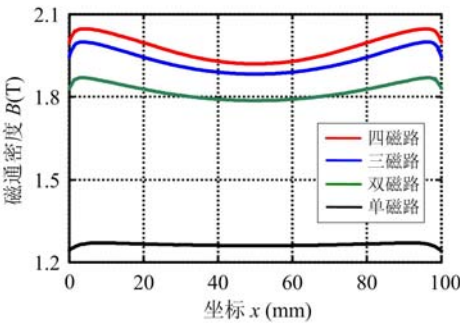


图 6 各磁路圆钢中轴线上磁通密度分布
Fig. 6 Distribution of flux density at central axis of round steel for different magnetic circuits

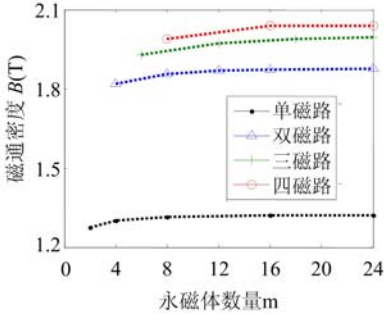


图 7 不同永磁体数量下圆钢的中轴线上磁通密度均值
Fig. 7 Average flux density in central axis of round steel for different magnetic circuits

2.3 永磁体数量的影响

为分析永磁体数量对换能器效能的影响,在不改变磁路数量的情况下,只增加永磁体数量(增加的永磁体与原永磁体串联相叠,成倍对称增加),即保持磁路长度和高度均不变,长度仍为 142mm,高度仍为 52mm。同样分析四种磁路在不同永磁体数量下中轴线磁通密度,如图 7 所示。结果表明,增加的永磁体并不改变磁场分布的对称性及均匀性。同时,由于永磁体磁导率与空气相近,随着表面积的增加,会导致“漏磁”现象加剧。因此,与增加磁路相比,对圆钢内磁场强度的提高并没有明显作用,仅可以对圆钢内磁场进行局部“微调”。从仿真结果可知,增加永磁体数量后,偏置磁场强度提升幅度有限,对换能器效能的影响较小。

2.4 磁路结构的影响

为提高四磁路磁场分布的均匀性,可在磁路的轭铁中部增加永磁体,新永磁体的磁场方向与原磁场方向一致(图中由蓝色到红色),如图 8 所示。图 9 给出两种磁路结构下中轴线磁通密度分布对比。结果表明,原四磁路磁场的轴向不均匀度 δ 为 3.4%,而新四磁路磁场的轴向不均匀度 δ 为 1.4%,轭铁中部新永磁体的加入提高了偏置磁场轴向均匀性。

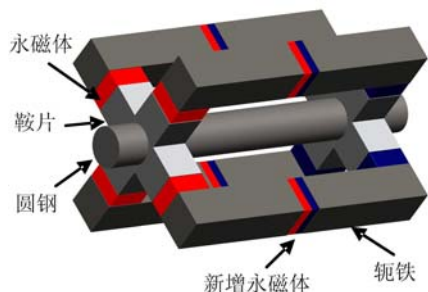


图 8 改进的磁路结构

Fig. 8 Structure of the improved magnetic circuits

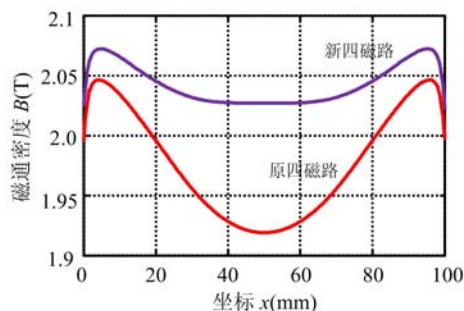


图 9 两种磁路在圆钢中轴线磁通密度分布对比

Fig. 9 Compare of flux density at central axis

3 磁致伸缩换能器偏置磁场影响参数实验研究

3.1 实验系统

在数值仿真基础上,利用不同偏置磁场参数下磁致伸缩换能器进行圆钢检测实验,验证数值仿真结果的正确性。检测实验系统框图如图 10 所示,主要包括磁致伸缩换能器、阻抗匹配器、脉冲激励接收仪、数字示波器、计算机等。检测试件采用直径为 22mm,长度为 2m 的圆钢。磁致伸缩换能器中心频率 50kHz,线圈的长度 100mm,漆包线直径 0.16mm。磁致伸缩换能器置于圆钢一端,检测实验采用自激励自接收模式。由脉冲激励接收仪产生的功率信号,经阻抗匹配器后,施加在磁致伸缩换能器上,在钢杆中产生特定模态的超声导波,在结构中传播的超声导波又被该换能器接收,产生的弱信号经阻抗匹配器,到脉冲激励接收仪的输入端,经激励接收仪处理后,可以在数字示波器上显示,并通过接口存储到计算机内。

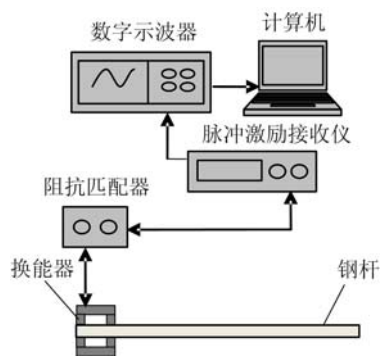


图 10 实验系统框图

Fig. 10 Schematic diagram of experimental system

3.2 磁路数量的影响

利用图 10 所示的实验系统,分别对上述四种磁路偏置磁场作用下的换能器进行检测实验。接收到的检测信号波形如图 11 所示。

对比图 11 中不同磁路换能器检测波形可以发现,单磁路换能器激励效能最差,无法接收到有效的端面回波,二磁路、三磁路和三磁路换能器均可以检测到多次端面回波,但四磁路换能器检测信号的回波幅值和信噪比,明显好于二磁路和三磁路换能器。这与上节中仿真结果吻合较好。即增加磁路数量可以增强圆钢内的磁场强度,从而提高超声回波信号的幅值,即提高换能器的能量转换效率。四磁路偏置磁场能够提供更强的磁场强度,其检测回

波幅值也最大。但比较三磁路和双磁路,三磁路磁场强度及信号回波幅值有显著的提高,而四磁路相比三磁路,则提升幅度较小。当继续增加磁路数量时,对换能器效能提升有限。因此,四磁路偏置磁场效能较优并具有较好的实用性,适合于圆钢类铁磁性材料的纵向导波无损检测。

3.3 永磁体数量的影响

利用图 10 所示实验系统,研究永磁体数量对不同磁路换能器性能的影响,结果如图 12 所示。可以

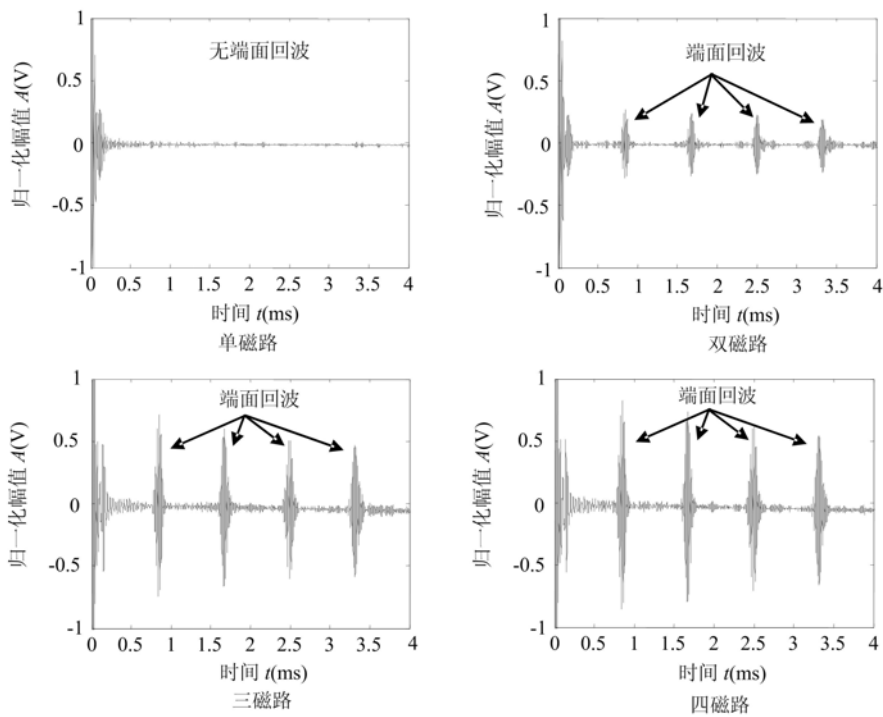
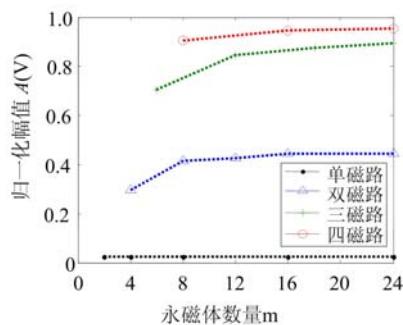


图 11 四种磁路换能器检测信号波形

Fig. 11 Waveform received by magnetostrictive sensor with different magnetic circuits

图 12 不同永磁体数量换能器
接收到第一次回波幅值Fig. 12 Amplitude of the first echo received
by sensors with different number
of permanent magnets

看出不同永磁体数量下第一次端面回波的幅值变化规律与图 7 所示磁通密度分布一致。在 2 倍永磁体数量下,各磁路偏置磁场强度略有提升,端面回波信号幅值也略有提高,继续增加永磁体数量,偏置磁场强度及端面回波幅值提升幅度较小,因此,增加永磁体数量可以实现圆钢内磁场强度的局部“微调”,对换能器效能的影响较小,而在相同永磁体数量下,四磁路偏置磁场的效能最优。

3.4 磁路结构的影响

利用图 10 所示的实验系统,对两种四磁路换能器的性能进行对比测试,结果如图 13 所示。从图中可以看出,由于提高了磁场的均匀性,新磁路换能器检测信号波形信噪比更高,更适用于实际检测。

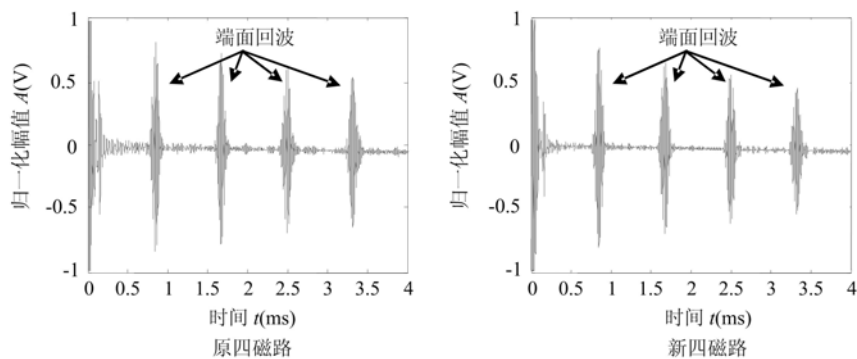


图 13 两种磁路结构换能器检测的信号波形

Fig. 13 Waveform received by magnetostrictive sensors with different strutures

4 结 论

针对圆钢结构纵向导波检测需要,本文进行了纵向导波磁致伸缩换能器研究,重点研究了偏置磁场对磁致伸缩换能器激励效能的影响,得出以下主要结论:

(1) 增加磁路数量可以增强偏置磁场的强度,磁场的径向均匀性更好,从而可以提高磁致伸缩换能器检测信号的幅值,即提高了换能器的转换效能。四磁路偏置磁场能够提供更大的磁场强度,其检测回波幅值也最强。当继续增加磁路数量时,对换能器效能提升有限,同时使换能器结构变得复杂。因此,四磁路偏置磁场具有较好的实用性。

(2) 在不改变磁路数量的前提下,永磁体数量的改变对换能器效能影响较小,相同永磁体数量下,四磁路偏置磁场最优。

(3) 軛铁中部增加永磁铁后磁路结构的偏置磁场轴向均匀性更高,信号信噪比得以改善,激励效能更好。

参考文献:

- [1] Calkins F T, Flatau A B, Dapino M J. Overview of magnetostrictive sensor technology [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2007, 18(10): 1057—1066.
- [2] Alleyne D N, Pavlakovic B, Lowe M J S, Cawley P. Rapid long-range inspection of chemical plant pipework using guided waves [J]. Insight, 2001, 43(2): 93—96.
- [3] Lowe M J S, Alleyne D N, Cawley P. Defect detection in pipes using guided waves [J]. Ultrasonics, 1998, 36(1-5): 147—154.
- [4] 刘增华, 张易农, 张慧昕, 何存富, 吴斌. 基于磁致伸缩效应在钢绞线中激励接收纵向导波模态的试验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(6): 71—76 (Liu Zenghua, Zhang Yinong, Zhang Huixin, He Cunfu, Wu Bin. Experimental research on excitation and reception of longitudinal guided wave modes in steel strands based on magnetostrictive effect[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(6): 71—76(in Chinese))
- [5] Kwun H, Bartels K A. Magnetostrictive sensor technology and its applications [J]. Ultrasonics, 1998, 36(1-5): 171—178.
- [6] Laguerre L, Aime J C, Brissaud M. Magnetostrictive pulse-echo device for non-destructive evaluation of cylindrical steel materials using longitudinal guided waves [J]. Ultrasonics, 2002, 39(7): 503—514.
- [7] Hocheol L, Yoon Y K. Wave selection using a magnetomechanical sensor in a solid cylinder [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2002, 112(3): 953—960.
- [8] 王悦民, 康宜华, 武新军. 磁致伸缩效应在圆管中激励纵向导波的理论 and 试验研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(10): 174—179 (Wang Yuemin, Kang Yihua, Wu Xinjun. Theoretical and experimental study of generation of longitudinal guided waves in circular pipes based on magnetostrictive effect[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(10): 174—179(in Chinese))
- [9] 竺冉, 吕福在, 唐志峰, 王飞. 磁致伸缩纵向导波换能器中偏置磁场的优化设计[J]. 传感技术学报, 2011, 24(3): 371—375 (Zhu Ran, Lv Fuzai, Tang Zhifeng, Wang Fei. Bias magnetic field optimization of longitudinal modes guided wave sensor based on magnetostriction[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuation, 2011, 24(3): 371—375(in Chinese))
- [10] 刘增华, 张易农, 吴斌, 刘溯, 何存富. 钢绞线用磁致伸缩传感器偏置磁场的有限元分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(2): 281—289 (Liu Zenghua, Zhang Yinong, Wu Bin, Liu Su, He Cunfu. Development of magnetostrictive transmitter and receiver for exciting ultrasonic longitudinal guided waves in steel strands[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2009, 17(2): 281—289(in Chinese))
- [11] Tse P W, Liu X C, Liu Z H, Wu B, He C F, Wang X J. An innovative design for using flexible printed coils for magnetostrictive-based longitudinal guided wave sensors in steel strand inspection [J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20(5): 055001.
- [12] Sablik M J, Telschow K L, Augustyniak B, Grubba J, Chmielewski M. Relationship between magnetostriction and the magnetostrictive coupling coefficient for magnetostrictive generation of elastic waves [C]. AIP Conference

Proceedings, 2002, 615B: 1613—1620.

- [13] 常用钢材磁特性曲线速查手册[M]. 机械工业出版社, 2003:20 (Manual for Magnetic Characteristic Curve of Common Material [M]. China Machine Press, 2003:220(in Chinese))

Study of the Effect of Bias Magnetic Field on the Efficiency of Magnetostrictive-based Longitudinal Guided Wave Transducer

JIAO Jing-pin¹, LIU Wei¹, MA Qing-zeng², XIAO Kai²,
ZHANG Chun-lei², WU Bin¹, HE Cun-fu¹

(1. Department of Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Guangdong Electric Power Research Institute, Guangzhou 510080, China)

Abstract: To improve the excitation efficiency of magnetostrictive guided wave transducer, the influence of magnetic field structure parameters on the spatial distribution of bias magnetic field was studied. Based on the finite element COMSOL simulation platform, the magnetic field distribution characteristics of magnetostrictive transducer were numerically calculated; the effect of the magnetic circuit structure and the number of permanent magnet and magnetic circuit on the distribution of bias magnetic field was investigated. Finally, the optimal magnetic field structure parameters suitable for longitudinal guided wave excitation were obtained. Experimental results show that the static magnetic field intensity increases with the increasing of number of magnetic circuits, and the magnetic field uniformity along radical direction is improved. Therefore the excitation efficiency of magnetostrictive transducer is improved. Under the condition of same number of magnetic circuit, the number of permanent magnet has a little influence on the performance of magnetostrictive transducer. When the number of magnetic circuit is four, the magnetic field performance is optimal. By adding permanent magnet in the middle of yoke iron, the uniformity of magnetic field along the axial direction is improved, which can improve the excitation efficiency of magnetostrictive transducer.

Keywords: magnetostrictive transducer; magnetic field; longitudinal guided wave; nondestructive testing