DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413473

多面磁轭结构的单磁铁电磁超声换能器设计*

胡 正[1,2],屈海峰[1],郭新峰[3],邱勋林[1,2],项延训[1]

(1. 华东理工大学上海市智能感知与检测技术重点实验室 上海 200237; 2. 上海飞行器力学与控制研究院 上海 200092; 3. 中国特种设备检测研究院 北京 100029)

摘 要:为提高单磁铁电磁超声换能器(EMAT)的换能效率以激发更高幅值的超声导波,通过仿真与实验相结合的方法,提出了一种简单易行的半封闭磁轭 EMAT 设计思路。半封闭磁轭 EMAT 由长方形永磁铁、半封闭磁轭结构、回折线圈和试件组成。首先通过仿真对比分析了 3 种可能的磁轭加装方案,验证了半封闭磁轭对于增强单磁铁 EMAT 激发效率的可行性。接着分析了半封闭磁轭的设计参数对被测物体表面涡流区域的磁场强度和信号激发效率的影响,包括磁轭结构的侧板间距、顶板间距、板厚、所用材料相对磁导率。对比原始无磁轭方案,优化参数后的半封闭磁轭 EMAT 在仿真中获得了近 50% 的激发效率提升。依据仿真结果,设计制作了加装半封闭磁轭的电磁超声换能器。在 1 mm 厚铝板上激发对称模式的 10 周期 1 MHz 兰姆波(Lamb)实验结果表明,磁铁提离距离 2 mm 时,加装半封闭磁轭的 EMAT 比原始设计的信号幅值提升了 40.42%;磁铁提离 6 mm,磁轭方案的幅值提升了 31.32%。后续又在 2 mm 厚铝板上进行了反对称模式的 5 周期 415 kHz 兰姆波实验,半封闭磁轭方案在不同提离距离上带来的幅值提升亦超过 30%,验证了所提方法的普遍适用性。实验所用的磁轭材料是常规冷轧钢薄板(SPCC),易获取易制备,便于应用推广。

关键词: 电磁超声换能器;兰姆波;磁轭结构;信号增强

中图分类号: TH878 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 460.40

Design of single-magnet based electromagnetic acoustic transducer with multi-sided yoke structure

Hu Zheng[1,2], Qu Haifeng[1], Guo Xinfeng[3], Qiu Xunlin[1,2], Xiang Yanxun[1]

(*1. Shanghai Key Laboratory of Intelligent Sensing and Detection Technology, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. Shanghai Institute of Aircraft Mechanics and Control, Shanghai 200092, China; 3. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China*)

Abstract: To enhance the guided wave amplitude excited by the single-magnet electromagnetic acoustic transducer (EMAT), a simple methodology using a semi-closed yoke structure is proposed in this study, which is based on both simulation and experiment analyses. The proposed EMAT structure consists of one rectangular-shaped magnet, a semi-closed yoke, a meander-line coil, and a metal sample. Through simulation analyses, three different possible yoke structures are compared, and the feasibility of the semi-closed yoke structure for waveform enhancement is confirmed. The parameters of the semi-closed yoke structure are carefully studied, including side plate spacing, top plate spacing, plate thickness, and relative magnetic permeability of the material used. Therefore, their optimized combination achieves the highest possible waveform amplitude. Compared with the original yoke-free solution, the semi-enclosed yoke EMAT with optimized parameters achieves an excitation efficiency improvement of nearly 50% in simulation. Accordingly, the optimized EMAT units are manufactured. Experimental results on a 1 mm thick aluminum plate show that with a lift-off distance of 2 mm, the 10-cycle 1 MHz S0-Lamb wave excited by the proposed solution exhibits a 40.42% amplitude enhancement compared to the original design. When the lift-off distance is 6 mm, the improvement is 31.32%. Then, a 5-cycle 415 kHz A0-Lamb wave is implemented on a 2 mm thick aluminum plate, and the amplitude enhancement brought by the proposed scheme is more than 30% at different lift-off distances.

收稿日期:2024-11-10 Received Date: 2024-11-10

*基金项目:国家自然科学基金(12327807,12304511)、上海高校 IV 类高峰学科建设(飞行器力学与控制)项目资助

Hence, the general applicability of the proposed method is verified. The used yoke is made of common cold-rolled steel sheet (SPCC), which is readily available and suitable for practical applications.

Keywords: electromagnetic acoustic transducer; Lamb wave; magnetic yoke structure; signal enhancement

0　引　　言

与压电超声、空气耦合超声和激光超声等技术相比[1-3],电磁超声所用换能器(electromagnetic acoustic transducer, EMAT)无需耦合剂、克服了气固界面处声阻抗不匹配的问题,在高温、快速在线检测领域有巨大的潜力[4-5]。EMAT 由线圈和磁铁构成,通过电磁效应在试样表面引发局部振动,从而激发出不同模式的超声波[6]。常见改善 EMAT 激发效率[7]的方法有:优化磁铁-线圈结构,提高电磁场利用率[8-16];引入信号处理方法,提高测量信号质量[12,17-20];引入新型材料结构,改善电磁场强度[21-27]。

在磁铁-线圈结构的优化设计方面,黄凤英等[8]研究了静态偏置磁场强度对 EMAT 的影响,并优化了系统设计参数。Liu 等[9]通过布置不同尺寸的柱形永磁铁,实现了磁场聚焦和强度增强。Qiu 等[10]将两个周期性永磁铁 EMAT 对称放置在板的两侧,生成了纯净的 SH1 模式导波。Zhang 等[11]使用拓扑优化方法确定最优的 Halbach 磁铁阵列配置,增强了磁感应强度和均匀性。Zhang 等[12]发现并联双层回折线圈比单层或双层串联线圈具有更高的转换效率。邓鹏等[13]通过调整回折线圈导线长度,显著提高了 EMAT 的灵敏度和缺陷检测能力。Kang 等[14]提出了窄磁铁 EMAT 结构,用磁铁边缘的磁场有效增强了 Rayleigh 波信号。针对窄磁铁 EMAT, Liu 等[15]和 Lin 等[16]分别提出了聚焦结构和线圈间距修正方法,改善了波形失真问题并提升了信号幅度。

信号处理是提升 EMAT 信号质量的重要方法之一。Zhang 等[12]和黄祺凯等[17]将编码脉冲压缩技术应用于 EMAT 检测,显著提高了系统的信噪比和距离分辨率。Zhou 等[18]采用堆叠去噪自编码器方法,增强了 EMAT 在复杂噪声环境下的可靠性和有效性。He 等[19]将脉冲压缩技术与倾斜波 EMAT 相结合,进一步优化了检测信号的穿透深度和裂纹缺陷检测能力。人工智能方法能够在一定程度上克服噪声干扰并优化检测结果[20]。但此类方法不涉及结构效率的物理性提升,不做展开讨论。

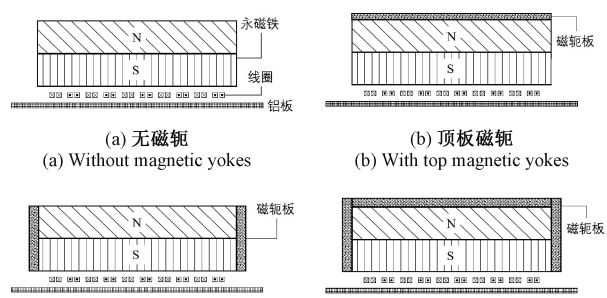
在 EMAT 结构中加入特殊材料/结构可以提高磁场质量,进而提高收发效率。Dhayalan 等[21]和 Liu 等[22]在永磁铁下方分别加入软磁通量集中器和全向磁通集中器,提高了磁场强度和分布的均匀性,增强了感应电流和超声波信号。Ren 等[23]和邱锦川等[24]将硅钢填充到永磁铁与线圈之间也能达到相似的增强效果。从磁体上方考虑,Mirkhani 等[25-27]在双磁铁 EMAT 结构的顶部加装铁磁性盖板,增强了双磁体底部的横向磁场进而提升了激发信号的强度。

以往研究中针对单磁铁 EMAT 上方增加磁轭结构的探索尚不充分。本研究提出了一种针对单磁铁 EMAT 的半封闭磁轭设计方案,并量化分析了该设计换能效率的提升效果。首先通过有限元仿真分析比较了不同磁轭结构的性能差异,发现半封闭磁轭结构可以有效约束并增强试样表面磁场强度。接着对半封闭磁轭的参数进行优化,以最大程度地提升 EMAT 的换能效率。最后,制备了半封闭磁轭的 EMAT 换能器并搭建了实验平台,验证了所提方法的有效性。

1　磁轭结构设计及性能分析

1.1　磁轭结构设计

按摆放位置不同,在单磁铁 EMAT 的顶部加装磁轭的可能方案可以分为 3 类,如图 1 所示。图 1(a)为不含磁轭的常规 EMAT 结构(对照组);图 1(b)在永磁铁顶部布置了磁轭;图 1(c)在永磁铁的侧面布置了磁轭结构;图 1(d)在永磁铁的顶部和侧面都布置了磁轭,形成一个半封闭结构。布置在永磁铁侧面的磁轭称为侧板磁轭,永磁铁顶部的磁轭则称为顶板磁轭。



(a) 无磁轭 (a) Without magnetic yokes　(b) 顶板磁轭 (b) With top magnetic yokes

(c) 侧板磁轭 (c) With side magnetic yokes　(d) 半封闭磁轭 (d) With semi-enclosed magnetic yokes

图 1　4 种不同 EMAT 结构

Fig. 1　Four different EMAT structures

为研究 3 种磁轭加装方案的有效性,在有限元软件 COMSOL Multiphysics 6.0 中建立了上述 4 种 EMAT 的二维有限元模型。永磁铁长 30 mm,高 10 mm,磁通密度模设为 1.37 T。被测试样为 1 mm 厚 6061 铝合金板。磁铁与铝板间距为 1 mm。磁铁下方是中心对称的 10 回折线圈,每折线圈由两匝导线组成。线圈的提离高度为

0.2 mm。激发 10 周期带汉宁窗调制的 1 MHz S0 模式兰姆波信号。根据半波长设计原则[28],回折线圈的间距为 2.65 mm。所有磁轭均紧贴于永磁铁的表面,磁轭材料为相对磁导率 4 000、厚 1 mm 的铁。其他参数设定见表 1 和 2。

表 1 有限元结构设计参数

Table 1 Finite element structural design parameters

(mm)

变量	数值	变量	数值
线圈高度	0.03	永磁铁宽度	30
线圈宽度	0.15	永磁铁高度	10
相邻线圈间距	2.65	永磁铁提离高度	1
线圈提离高度	0.2	铝板厚度	1

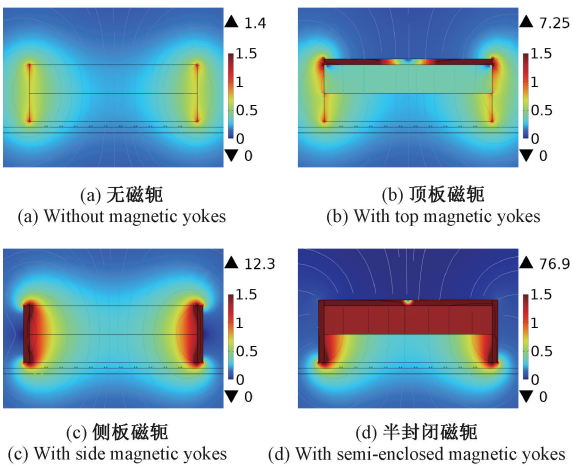
表 2 有限元结构材料参数

Table 2 Finite element structural material parameters

材料	相对磁导率	电导率/(S·m^{-1})	材料	相对磁导率	电导率/(S·m^{-1})
线圈	1.00	6.00×10^{6}	永磁铁	1	1.00×10^{7}
铝板	1.00	3.77×10^{6}	磁轭	$1\sim1\times10^{5}$	1.12×10^{7}

1.2 磁轭结构性能分析设计

4 种 EMAT 结构的有限元仿真分析结果如图 2 所示。磁铁正下方为线圈所在位置,即目标区域。磁场强度越大,磁通密度分布云图的颜色越深。3 种磁轭方案都能够增强目标区域的磁场强度,即能够有效地收束其所在区域的磁场。其中图 2(d)所示的三面环绕半封闭磁轭的磁场增强效果最大。



(a) 无磁轭
(a) Without magnetic yokes

(b) 顶板磁轭
(b) With top magnetic yokes

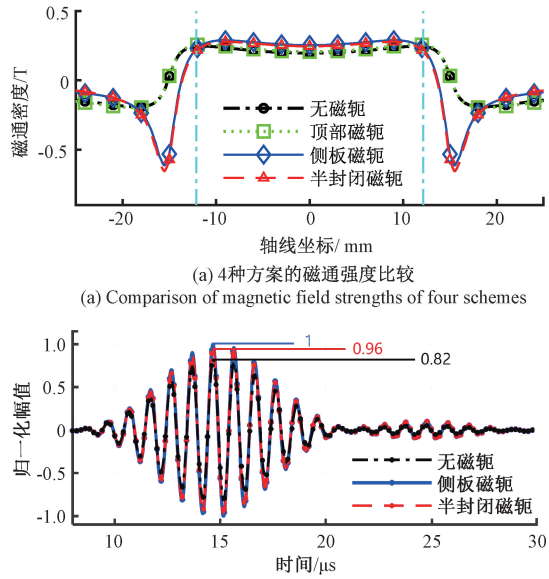
(c) 侧板磁轭
(c) With side magnetic yokes

(d) 半封闭磁轭
(d) With semi-enclosed magnetic yokes

图 2 磁通密度分布云图

Fig. 2 Flux density distribution cloud

激发对称 S0 模式兰姆波主要依靠试样表面的竖直磁场[29],竖直磁场的磁通密度可作为优化方案的直接评价依据,如图 3(a)所示。参考-12.125~+12.125 mm 区间(即线圈覆盖区域),无磁轭对照方案其平均竖直磁通密度为 0.219 2 T,顶板磁轭方案为 0.230 2 T,侧板磁轭方案为 0.270 3 T,半封闭磁轭方案为 0.260 4 T。侧板磁轭和半封闭磁轭方案能够显著提高竖直偏置磁场强度。顶板磁轭方案与无磁轭对照方案的平均磁通密度近似,提升效果并不明显。



(a) 4种方案的磁通强度比较
(a) Comparison of magnetic field strengths of four schemes

(b) 在50 mm处无磁轭与半封闭磁轭的信号对比
(b) Signal comparison between non-yoke and semi-enclosed yoke at 50 mm

图 3 不同磁轭方案对磁通密度和信号强度的影响

Fig. 3 Effects of different yoke schemes on magnetic flux density and signal strength

另一种直观表现各方案增强效果的方法是观察其激发的兰姆波幅值大小,结果如图 3(b)所示。观察在 50 mm 远处的兰姆波,半封闭磁轭方案所激发的波形场峰值对比无磁轭对照组,提升了 17.70%;侧板磁轭方案带来的提升为 22.26%。

针对半封闭磁轭方案,将磁轭结构与磁铁拉开一段距离可以进一步提升目标区域的有效磁场强度,结果如图 4 所示。当侧板磁轭与磁铁间距为 1 mm,在线圈覆盖区域内,半磁轭封闭磁轭方案比图 3(a)提升了 26.60%。即在磁轭与磁铁间预留一定的空气区域有助于进一步提高半封闭磁轭结构的磁场增强效果。同样是拉开 1 mm 间隙,侧板磁轭方案的平均磁通密度相比图 3(a)反而降低了 0.02%,拉开磁轭间隙对侧板方案无提升效果。

总结来讲,半封闭磁轭结构可以有效提高单磁铁 EMAT 的换能效率,而在磁轭与磁铁间预留间隙则可以

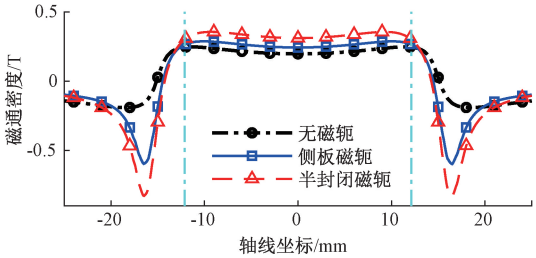


图 4　改变侧板间距后磁场强度比较

Fig. 4　Comparison of magnetic field strengths after changing side panel spacing

进一步增强优化效果。本研究针对半封闭磁轭方案展开结构参数优化研究,进一步挖掘该方案的潜力。

2　磁轭结构优化

针对半封闭磁轭方案优化涉及的结构参数有:侧板间距(side panel distance, *SD*)、顶板间距(top panel distance, *TD*)、侧板厚度(thickness of the side plate, *ST*)、顶板厚度(thickness of the top plate, *TT*)以及磁轭材料的相对磁导率(relative magnetic permeability, *UR*)。结构初始设定如图 5 所示,侧板间距为 1 mm,顶板间距为 0 mm,侧板和顶板厚度皆为 1 mm,磁轭材料的相对磁导率 *UR* 设置为 4 000,其余参数参见表 1。优化效果的评估标准为铝板表面的竖直磁场强度或 50 mm 远处的兰姆波信号峰值。

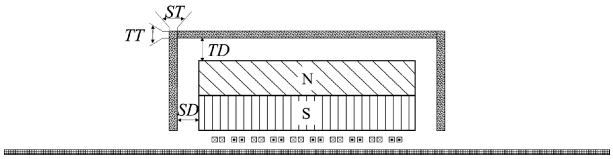
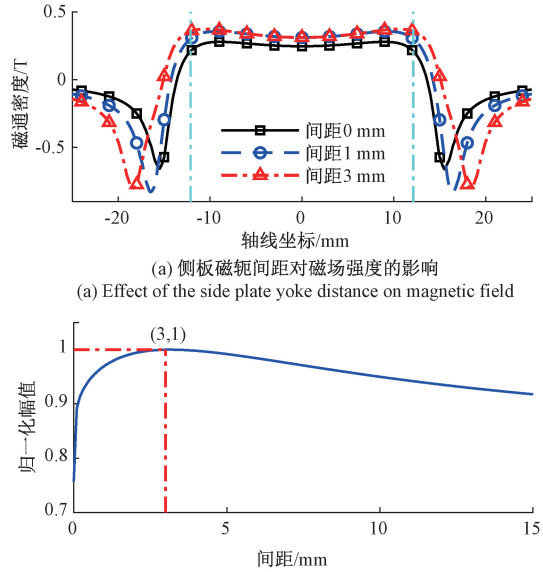


图 5　半封闭磁轭结构需优化的参数

Fig. 5　Parameters to be optimized for semi-enclosed yoke

2.1　侧板磁轭间距优化

首先优化的参数是侧板间距,以 0.5 mm 的步长从 0~15 mm 遍历,结果如图 6 所示。图 6(a)展示了 *SD* 为 0、1、3 mm 时的竖直磁场分布结果:相比 0 mm 的磁轭紧贴方案,拉开侧板间隙能够有效提升目标区域的磁场强度。50 mm 远处的兰姆波信号峰值随侧板间距的变化如图 6(b)所示:从 0~3 mm 区间内,间隙越大效果越好;当 *SD*>3 mm,激发信号的峰值开始减小。对这一现象的解释:在临界值以上,侧板间距越大,EMAT 结构就越接近无磁轭方案,磁轭带来的磁场增强效果就开始衰减。*SD*=3 mm 即为此结构设置下的临界值。



(a) 侧板磁轭间距对磁场强度的影响

(a) Effect of the side plate yoke distance on magnetic field

(b) 侧板磁轭间距对50 mm处位移场峰值的影响

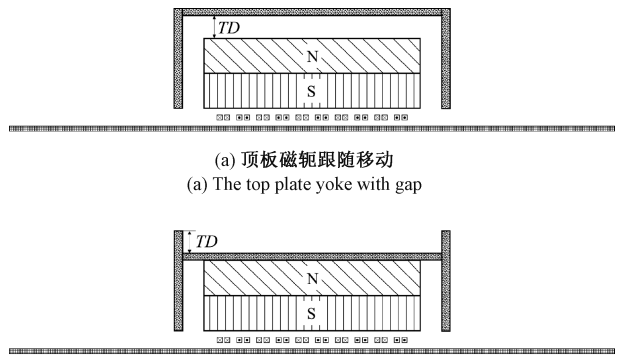
(b) Effect of the side plates yoke distance on displacement field peak at 50 mm

图 6　侧板磁轭间距对 EMAT 性能的影响

Fig. 6　Effect of the side plate yoke distance

2.2　顶板磁轭间距优化

将 *SD* 固定为 3 mm,再优化半封闭磁轭的顶板与磁铁的间距。如图 7 所示,设计了两种方案比较铝板表面涡流区域竖直磁场强度。



(a) 顶板磁轭跟随移动

(a) The top plate yoke with gap

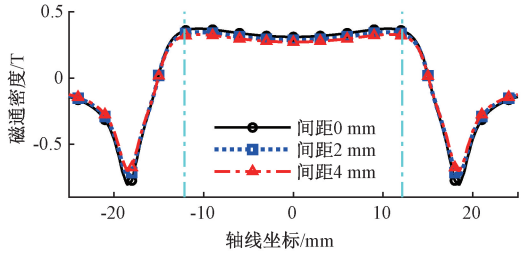
(b) 顶板磁轭保持紧贴

(b) The top plate yoke without gap

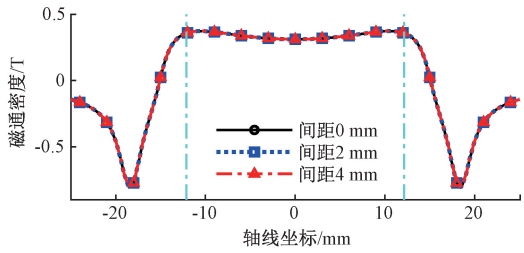
图 7　顶板磁轭间距改变的情况

Fig. 7　Changes in the top plate yoke distance

铝板表面竖直磁场强度与顶板间距的关系如图 8 所示。由图 8(a)可知顶板跟随移动时,顶板间距为 0 mm 时有效竖直磁通密度最大。由图 8(b)可得:顶板和磁铁保持紧贴时向上延长磁轭突起结构并无明显效果。因此,半封闭结构的顶板磁轭应该和磁铁保持紧贴。



(a) 顶板磁轭跟随移动
(a) The top plate yoke with gap



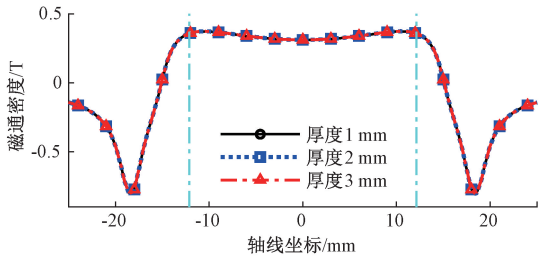
(b) 顶板磁轭保持紧贴
(b) The top plate yoke without gap

图 8 顶板磁轭间距对磁场强度的影响

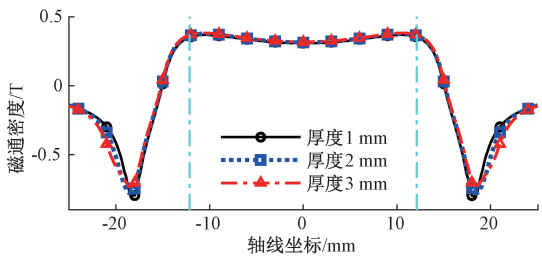
Fig. 8 Effect of the top plate yoke distance

2.3 磁轭厚度优化

保持 $SD=3$ mm，顶板紧贴，现分别改变侧板和顶板磁轭的厚度，铝板表面涡流区域的竖直磁场强度如图 9 所示。在 −12.125～+12.125 mm 的有效区域中，图 9(a) 中曲线重叠度很高。这意味着改变顶板厚度不会明显提升竖直磁场强度。图 9(b) 中，侧板厚度 3 mm 的平均竖直磁通密度是 1 mm 方案的 103.32%，略有提升。考虑到 1 mm 板厚简单易得，因此将侧板和顶板厚度统一设置为 1 mm。



(a) 改变顶板磁轭厚度
(a) Changing the thickness of the top plate yoke



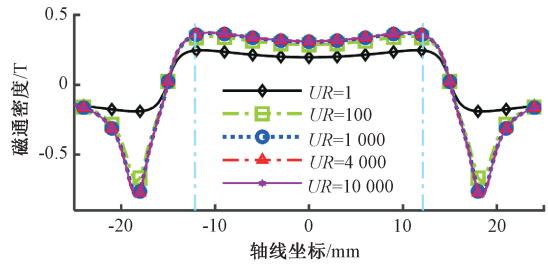
(b) 改变侧板磁轭厚度
(b) Changing the thickness of the side plate yoke

图 9 磁轭厚度对磁场强度的影响

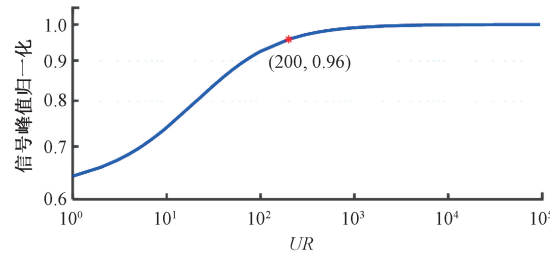
Fig. 9 Effect of yoke thickness

2.4 磁轭材料相对磁导率优化

为确定磁轭材料的 UR 对激发信号峰值的影响，从 1～1×10^5 改变磁轭材料的 UR，结果如图 10 所示。图 10(a) 说明磁轭材料的磁导率越高，磁场增强效果越强。图 10(b) 显示：磁轭材料的 $UR>200$ 时，提升效果接近理论极限的 96%。



(a) UR对磁场强度的影响
(a) Effect of UR on magnetic field strength



(b) UR对50 mm处信号峰值的影响
(b) Effect of UR on the signal field peak at 50 mm

图 10 磁轭材料相对磁导率对 EMAT 的影响

Fig. 10 Effect of UR of yoke material on EMAT

在上述逐步优化单一参数的方案之外，本研究还尝试通过遍历所有参数排列组合的方法，寻求最优配置。在磁轭材料相对磁导率设定为 200 的条件下，全局参数遍历得出的最优组合为：$SD=3$ mm、$TD=0$ mm、ST 和 TT 均为 2 mm。该结果与逐步优化单一参数的迭代结果基本一致。当板厚从 1 mm 增加至 2 mm 时，位移场峰值提升约 3%，这一趋势与图 9 中的相关分析结果相符。当前系统设定下，不同参数间的耦合作用较弱，逐项优化的方案是可行的。

综合考虑，针对由 30 mm×50 mm×10 mm 的钕铁硼永磁铁和双层双分裂的 10 折蜿蜒线圈组成的单磁铁 EMAT，三面磁轭优化后的结构参数为：$SD=3$ mm、$TD=0$ mm、ST 和 TT 为 1 mm、磁轭材料的 UR 为 200～4 000。

为验证以上参数优化对 EMAT 换能效率的影响，现比较无磁轭方案、原始半封闭磁轭方案、优化半封闭磁轭方案所激发的 50 mm 处的兰姆波幅值。令磁轭材料的 $UR=200$，结果如图 11 所示。优化后的半封闭磁轭方案其位移场明显高于无磁轭方案和原始半封闭磁轭方案。与无磁轭方案相比，优化半封闭磁轭方案的位移场峰值提升了 49.33%。

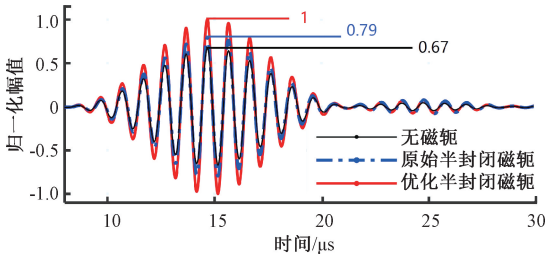


图 11　半封闭磁轭的优化前后的信号比较

Fig. 11　Signal comparison before and after optimisation of a semi-closed yoke

3　实验验证及结果分析

根据第 2 章的研究结果,设计了加装半封闭磁轭的电磁超声换能器。如图 12 所示,使用 30 mm×50 mm×10 mm 的方形钕铁硼永磁铁,基于印制电路板制作的回折线圈折数为 10、折间距为 2.65 mm。半封闭磁轭用的是冷轧板(steel plate cold commercial,SPCC),该材料在常温条件下相对磁导率通常为 247[30-31]。检测试样为 120 mm×500 mm×1 mm 的 6061 铝合金板。

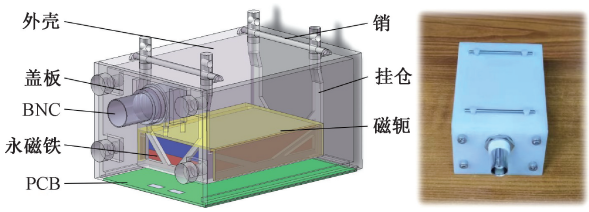


图 12　EMAT 结构装配图和实物图

Fig. 12　EMAT structural assemble and object drawing

EMAT 完整结构还包括刺刀螺母连接器(bayonet nut connector, BNC)、圆柱销以及 3D 打印的外壳、盖板、挂仓。其装配过程如下:首先,将永磁铁放入挂仓的卡槽中,并将半封闭磁轭吸附在永磁铁的上表面,在两侧插入 3 mm 厚的 9600 树脂材料板条,以确保侧板与磁铁的间距。随后将挂仓通过圆柱销固定在外壳上板,将回折线圈的印刷电路板(printed circuit board, PCB)插入永磁铁下方。最后将线圈信号线与前板上的 BNC 接头相连,再用螺丝锁紧前板,装配完成。

实验平台如图 13 所示,主要由信号发生器、Ritec GA-2500A 功放、阻抗匹配网络、EMAT 探头、前置放大器、示波器和铝板构成。实验采用一发一收模式,两个探头距离为 15 cm。激发信号是中心频率为 1 MHz 的 10 周期正弦脉冲,由 Ritec GA-2500A 功放进行放大后,再经过阻抗匹配网络驱动激发端。Lamb 波在铝板中传播后,被接收端的 EMAT 采集并通过阻抗匹配网络和前置放大器到达示波器。

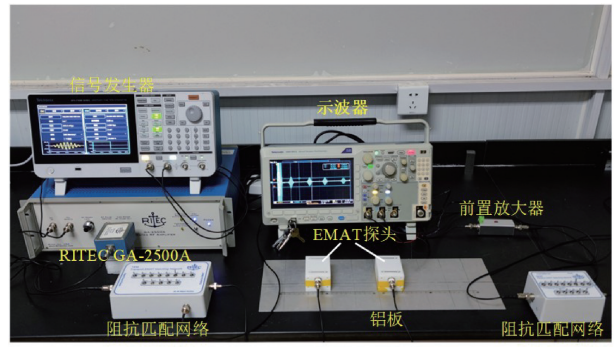
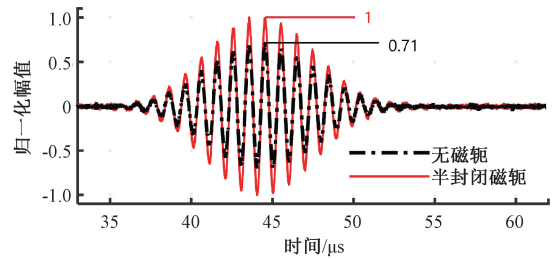


图 13　用于激发/接收信号的 EMAT 实验系统

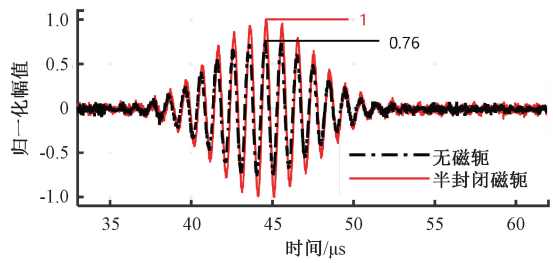
Fig. 13　EMAT experimental system for excitation/reception signals

在 1 mm 厚铝板上的实验结果如图 14 所示。与无磁轭方案相比,当磁铁提离 2 mm 时,加装封闭磁轭方案的信号峰值提升了 40.42%;当磁铁提离 6 mm 时,加装封闭磁轭方案的信号峰值提升了 31.32%。封闭磁轭方案可明显提高 EMAT 的激发效率,实验与仿真展现了较好的一致性。



(a) 磁铁提离2 mm

(a) Magnet lift-off 2 mm



(b) 磁铁提离6 mm

(b) Magnet lift-off 6 mm

图 14　1 mm 铝板的实验结果

Fig. 14　Experimental results of 1 mm aluminum plate

为验证方案的普适性,补充一组在 2 mm 厚铝板上激发 A0 模式兰姆波的实验,所用 EMAT 与图 14 一致,激发信号改为中心频率为 415 kHz 的 5 周期正弦脉冲。结果如图 15 所示,与无磁轭方案相比,当磁铁提离 2 mm 时,加装封闭磁轭方案的信号峰值提升了 42.69%;当磁铁提离 6 mm 时,加装封闭磁轭方案的信号峰值提升了 34.41%。

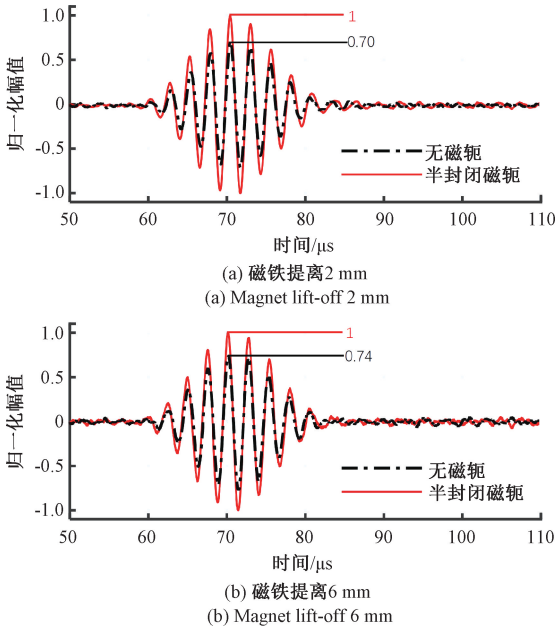


图 15 2 mm 铝板的实验结果

Fig. 15 Experimental results of 2 mm aluminum plate

4 结 论

本研究将顶部磁轭引入单磁铁 EMAT 设计中,增强了磁铁下方有效区域的磁场强度,改善了传统方案换能效率低的问题。采用仿真和实验相结合的方式,验证了半封闭磁轭方案的有效性,并进一步优化了结构设计参数。以尺寸为 30 mm×50 mm×10 mm 的钕铁硼永磁铁和 10 折蜿蜒线圈为 EMAT 基础结构,研究所得结论为:

1)仿真结果显示,侧面磁轭和三面半封闭磁轭结构可以有效提高单磁铁 EMAT 的换能效率。在磁轭与磁铁紧贴的情况下,加装磁轭结构的 EMAT 激发效率可提升 17.70%。

2)对半封闭磁轭结构而言,磁轭与磁铁间预留间隙可以进一步增强优化效果。实验结果表明,磁铁提离距离为 2 mm 时,优化后的半封闭磁轭方案的激发效率是无磁轭原始方案的 1.40 倍;磁铁提离距离为 6 mm 时,优化后的半封闭磁轭方案的激发效率是无磁轭原始方案的 1.31 倍。

3)实验所用的半封闭磁轭材料是常规冷轧碳钢薄板,材料容易获取。这为单磁铁 EMAT 结构优化设计提供了一种简单易行的思路。

本研究中半封闭磁轭方案的参数是通过二维有限元仿真优化获得的。在实际应用中,若检测对象/环境发生变化,需要重新建模计算。未来研究可聚焦于建立解析表达式和完善三维模型,以简化设计流程并提升方案的适用性和推广性。

参考文献

[1] 丁涛涛,郭宇,项延训. 超声导波目标模式的激励方法研究[J]. 振动与冲击,2024,43(4):20-26.
DING T T, GUO Y, XIANG Y X. Research on excitation methods of target mode of ultrasonic guided waves[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024,43(4):20-26.

[2] 童立坤,项延训,邓明晰, 等. 铁电驻极体空气耦合声换能器的研制[J]. 声学技术,2018,37(5):507-510.
TONG L K, XIANG Y X, DENG M X, et al. Development of a ferroelectric electret air-coupled acoustic transducer[J]. Technical Acoustics, 2018, 37(5):507-510.

[3] XU H M, LIU L SH, LI X, et al. Wavefield imaging of nonlinear ultrasonic Lamb waves for visualizing fatigue micro-cracks[J]. Ultrasonics, 2024, 138:107214.

[4] 黄松岭,彭丽莎,孙洪宇, 等. 航空发动机叶片缺陷无损检测与在线监测技术综述[J]. 测控技术,2023,42(5):1-11.
HUANG S L, PENG L SH, SUN H Y, et al. Review of nondestructive testing and online monitoring techniques for aeroengine blade defects[J]. Measurement & Control Technology, 2023,42(5):1-11.

[5] 张晓妍,曾周末,李健, 等. 基于超声导波和 Y-Net 的复合材料胶接质量检测研究[J]. 复合材料科学与工程,2024(5):92-99.
ZHANG X Y, ZENG ZH M, LI J, et al. Study on bonding quality detection of composite materials based on ultrasonic guided waves and Y-Net[J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2024(5):92-99.

[6] 郑阳,李铮,李超月, 等. 基于 EMAT 的三维声场断层扫描测量方法研究[J]. 仪器仪表学报,2019,40(12):9-18.
ZHENG Y, LI ZH, LI CH Y, et al. Study on 3D acoustic field tomographic measurement method based on EMAT[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(12):9-18.

[7] 杨理践,邢燕好,张佳, 等. 基于电磁超声导波的铝板裂纹缺陷检测方法[J]. 仪器仪表学报,2018,39(4):150-160.
YANG L J, XING Y H, ZHANG J, et al. Crack defect detection method for aluminum plates based on electromagnetic ultrasonic guided waves[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018,39(4):150-160.

[8] 黄凤英,周正干. 静态偏置磁场对电磁超声换能器灵敏度的影响[J]. 机械工程学报,2011,47(10):1-7.
HUANG F Y, ZHOU ZH G. Effect of static bias magnetic field on the sensitivity of electromagnetic ultrasonic transducers[J]. Journal of Mechanical

Engineering, 2011,47(10):1-7.

[9] LIU T H, PEI C X, CHENG X, et al. Adhesive debonding inspection with a small EMAT in resonant mode[J]. NDT&E International, 2018, 98:110-116.

[10] QIU G ZH, SONG X CH, ZHANG X, et al. Pure SH1 guided-wave generation method with dual periodic-permanent-magnet electromagnetic acoustic transducers for plates inspection[J]. Sensors, 2019, 19(13):3019.

[11] ZHANG T, YANG X Q, LI M, et al. Enhancing unilateral EMAT performance through topological optimization of Halbach permanent Magnet arrays[J]. NDT&E International, 2024, 146(9):103172.

[12] ZHANG J, WANG X, WANG X B, et al. Methods for enhancement of high-sensitivity detection for a surface wave EMAT[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2021, 66(4):669-691.

[13] 邓鹏,何存富,吕炎, 等. 回折线圈导线长度对表面波 EMAT 性能及缺陷检测的影响[J]. 北京工业大学学报,2018,44(5):665-671.
DENG P, HE C F, LYU Y, et al. Effect of meander coil wire length on the performance of surface wave EMAT and defect detection[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018,44(5):665-671.

[14] KANG L, ZHANG CH, DIXON S, et al. Enhancement of ultrasonic signal using a new design of Rayleigh-wave electromagnetic acoustic transducer[J]. NDT&E International, 2017, 86:36-43.

[15] LIU J L, LIU S ZH, ZHANG CH, et al. A new focused EMAT design with narrow magnet to achieve both A0-Lamb signal enhancement and waveform distortion correction[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(15):14786-14798.

[16] LIN J L, HU ZH, GUO X F, et al. A simple coil design scheme of narrow-magnet EMAT for correction of waveform distortion[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(10):15945-15953.

[17] 黄祺凯,石文泽,卢超, 等. 基于编码压缩的钢板电磁超声 Lamb 波检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022,43(2):117-127.
HUANG Q K, SHI W Z, LU CH, et al. Research on steel plate electromagnetic ultrasonic Lamb wave detection method based on coded compression[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(2):117-127.

[18] ZHOU J J, YU D, LI X, et al. Reconstructing echoes completely submerged in background noise by a stacked denoising autoencoder method for low-power EMAT testing[J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(12):5910.

[19] HE M, SHI W Z, LU CH, et al. Application of pulse compression technique in high-temperature carbon steel forgings crack detection with angled SV-wave EMATs[J]. Sensors, 2023, 23(5):2685.

[20] 杨斌, 易朋兴, 郝峥旭. 基于电磁超声的小样本铝板表面缺陷检测方法[J]. 电子测量技术,2024,47(3):109-115.
YANG B, YI P X, HAO ZH X. Method for detecting surface defects of small sample aluminum plates based on electromagnetic acoustic[J]. Electronic Measurement Technology, 2024,47(3):109-115.

[21] DHAYALAN R, SATYA NARAYANA MURTHY V, KRISHNAMURTHY C V, et al. Improving the signal amplitude of meandering coil EMATs by using ribbon soft magnetic flux concentrators (MFC)[J]. Ultrasonics, 2011, 51(6):675-682.

[22] LIU Z H, DENG L M, ZHANG Y CH, et al. Development of an omni-directional magnetic-concentrator-type electromagnetic acoustic transducer[J]. NDT & E International, 2020,109:102193.

[23] REN W P, HE J P, DIXON S, et al. Enhancement of EMAT′s efficiency by using silicon steel laminations back-plate[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 274:189-198.

[24] 邱锦川,刘昭廷,罗伟, 等. 基于正交试验法的电磁超声换能器梯形硅钢聚磁器优化设计[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(12):98-106.
QIU J CH, LIU ZH T, LUO W, et al. Optimization design of trapezoidal silicon steel concentrator for electromagnetic ultrasonic transducer based on orthogonal test method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(12):98-106.

[25] MIRKHANI K, CHAGGARES C, MASTERSON C, et al. Optimal design of EMAT transmitters[J]. NDT & E International, 2004, 37(3):181-193.

[26] SEHER M, NAGY P B. On the separation of Lorentz and magnetization forces in the transduction mechanism of electromagnetic acoustic transducers (EMATs)[J]. NDT & E International, 2016, 84:1-10.

[27] 翟国富,梁宝,邓超然, 等. 耐高温双线圈结构电磁超声换能器设计[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(11):3943-3951.
ZHAI G F, LIANG B, DENG CH R, et al. Design of high-temperature resistant dual-coil electromagnetic ultrasonic transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2021,41(11):3943-3951.

[28] GUO ZH Q, ACHENBACH J D, KRISHNASWAMY S. EMAT generation and laser detection of single Lamb wave modes[J]. Ultrasonics, 1997, 35(6):423-429.
[29] WANG SH, HUANG S L, WANG Q, et al. Characterizing excitability of Lamb waves generated by electromagnetic acoustic transducers with coupled frequency domain models[J]. Ultrasonics, 2019, 93:71-80.
[30] KOIBUCHI K, SAWA K, HONMA T, et al. Characteristic analysis and enhancement of sensing property for eddy-current type proximity sensor[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2005, E88C(8):1696-1703.
[31] TAKAHASHI N, MORISHITA M, MIYAGI D, et al. Comparison of magnetic properties of magnetic materials at high temperature[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10):4352-4355.

作者简介

胡正,2012 年于西安电子科技大学获得学士学位,2016 年获于德国德累斯顿工业大学获得硕士学位,2022 年于德国开姆尼茨工业大学获得博士学位,现为华东理工大学讲师。主要研究方向为:传感与测量技术、阻抗谱分析、电磁超声检测、嵌入式系统设计。

E-mail: zhenghu@ecust.edu.cn

Hu Zheng received his B. Sc. degree from Xidian University in 2012, M. Sc. degree from Dresden University of Technology, Germany in 2016, and the Ph. D. degree from Chemnitz University of Technology, Germany in 2022. He is currently a Lecturer at East China University of Science and Technology. His main research interests include sensor and measurement technology, impedance spectroscopy, electromagnetic acoustic testing and embedded system design.

郭新峰,2015 年于河南工业大学获得学士学位,2018 年于大连交通大学获得硕士学位,2023 年于华东理工大学获得博士学位,现为中国特种设备检测研究院博士后。主要研究方向为:电磁超声检测、高温结构健康监测、电磁超声相控阵检测。

E-mail: guoxinfeng91@126.com

Guo Xinfeng received his B. Sc. degree from Henan University of Technology in 2015, M. Sc. degree from Dalian Jiaotong University in 2018, and Ph. D. degree from East China University of Science and Technology in 2023. He is currently a postdoctoral researcher at China Special Equipment Inspection and Research Institute. His main research interests include electromagnetic acoustic testing, high-temperature structural health monitoring, and electromagnetic acoustic phased array testing.

项延训(通信作者),2000 年于同济大学获得学士学位,2003 年于同济大学获得硕士学位,2011 年于华东理工大学获得博士学位,现为华东理工大学教授。主要研究方向为:材料微损伤非线性超声检测、超声导波检测及成像、声学超材料与声场调控技术、检测数据挖掘与机器学习。

E-mail:yxxiang@ecust.edu.cn

Xiang Yanxun (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Tongji University in 2000, M. Sc. degree from Tongji University in 2003, and Ph. D. degree from East China University of Science and Technology (ECUST) in 2011. He is currently a professor at ECUST. His main research interests include nonlinear ultrasonic detection of material microdamage, ultrasonic guided wave detection and imaging, acoustic metamaterials and acoustic field modulation techniques, detection data mining and machine learning.